

Università degli Studi di Catania
Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura – DICAR

Dottorato di ricerca in
“Valutazione e Mitigazione dei Rischi Urbani e Territoriali” - XXIX CICLO
Coordinatore: prof. Massimo Cuomo

Tesi per il conseguimento del titolo di Dottore di Ricerca

Chiara Circo

Architettura storica e terremoto.

Il percorso della conoscenza dell’edificio per la
valutazione della sicurezza e per il progetto di restauro
conservativo

Supervisore: Prof.ssa Caterina Carocci (Restauro, Struttura Didattica
Speciale di Architettura, Siracusa)
Gruppo di Tesi: Prof. Nicola Impollonia (Scienza delle Costruzioni, Struttura
Didattica Speciale di Architettura, Siracusa)
Prof. Cesare Tocci (Restauro, Politecnico di Torino)

Indice

Indice.....	3
Extended abstracts (in English)	6
Introduzione	17
1. La conoscenza dell'edificio nella normativa tecnica e nei documenti di indirizzo	19
1.1 Finalità e ambito.....	19
1.2 Le norme tecniche storiche	19
1.3 La nuova normativa sismica e la procedura di quantificazione della conoscenza	24
1.4 La conoscenza dell'edificio per la conservazione: i documenti di indirizzo per il restauro in zona sismica.	37
1.5 Considerazioni.....	43
2. Le “Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale”. Una lettura critica.....	45
2.1 Introduzione.....	45
2.2 Finalità, contenuti e struttura delle Linee Guida	48
2.3 Criteri e procedura per la valutazione della sicurezza e per la progettazione degli interventi.....	51
2.4 Il percorso della conoscenza	57
2.5 Livelli di conoscenza e fattori di confidenza	70
2.6 Considerazioni critiche	74
3. Il percorso di conoscenza nel progetto di “Verifica sismica dei musei statali” (progetto Arcus-Mibact), applicazione delle Linee Guida.....	79
3.1 Premessa	79
3.2 Il Progetto di verifica sismica dei musei statali.....	80
3.2.1 <i>Il campione analizzato</i>	81
3.3 Obiettivi e metodologia di analisi	84
3.4 Palazzi in aggregato.....	87
P1. Palazzo Loffredo, Potenza	88
P2. Museo Ridola, Matera	91
P3. Palazzo Ferretti, Ancona	94
P4. Palazzo Dei Provveditori Veneti, Cividale Del Friuli (UD).....	97

P5. Palazzo Ducale, Urbino	101
P6. Palazzo dei Priori, Perugia.....	105
P7. Palazzo Panichi, Ascoli Piceno	108
P8. Palazzo Bruni, Arezzo	111
P9. Casa Vasari, Arezzo.....	114
P10. Casa Museo del Poeta Giovanni Pascoli, S. Mauro Pascoli (FC)	117
P11. Museo Archeologico Di Sarsina, Sarsina (Fc).....	120
3.5 Ville e palazzi isolati.....	123
V1. Villa Pignatelli, Napoli.....	124
V2. Villa d'Este, Tivoli (Rm).....	127
V3. Palazzo del Real Museo, Napoli	130
V4. Reggia di Capodimonte, Napoli.....	133
V5. Villa Floridiana, Napoli.....	136
3.6 Chiese e monasteri.....	139
M1. Certosa di Trisulti, Collepardo (FR).....	140
M2. Certosa di San Martino, Napoli	144
M3. Certosa di San Lorenzo, Padula (SA).....	148
M4. Certosa di San Giacomo, Capri (Na).....	152
M5. Abbazia di Casamari, Veroli (FR)	155
M6. Ex convento di Santa Maria degli Angeli, Salerno	158
M7. Ex convento di San Domenico, Perugia	161
M8. Monastero di San Bernardo, Arezzo	164
M9. Ex monastero di Santa Maria delle Monache, Isernia	167
M10. Ex Monastero di Sant'Agata e teatro romano, Spoleto.....	170
M11. Basilica di San Francesco (Cappella Bacci), Arezzo	173
3.7 Costruzioni fortificate.....	177
F1. Castello Pirro del Balzo, Venosa (PZ)	178
F2. Castello di Melfi, Melfi (PT)	181
F3. Castel Sant'Elmo, Napoli.....	184
F4. Castello Svevo Angioino, Manfredonia (FG)	187
F5. Castello Pandone, Venafro (IS).....	190
F6. Rocca Roveresca, Senigallia (AN).....	193
F7. Rocca Albornoziana, Spoleto (PG).....	196
F8. Rocca Demaniale, Gradara (PU).....	200
3.8 Crediti	203
3.9 Confronti	207
3.10 Considerazioni.....	227
4. Proposta per una sistematizzazione del percorso della conoscenza	233
4.1 Introduzione.....	233
4.2 Interpretazione dei criteri alla base del percorso della conoscenza.....	236
4.2.1 <i>La logica strutturale dell'architettura muraria storica</i>	236

4.2.2	<i>Qualità meccanica di una costruzione muraria</i>	237
4.2.3	<i>Comportamento strutturale, vulnerabilità e resistenze, macroelementi, meccanismi di danno.</i>	241
4.3	Il caso studio di Palazzo Lanfranchi a Matera.....	244
4.3.1	<i>Conoscenza</i>	244
4.3.2	<i>Interpretazione</i>	265
4.3.3	<i>Definizione del fattore di confidenza</i>	276
4.3.4	<i>Verifica sismica</i>	279
4.4	Considerazioni.....	281
5.	Conclusioni	283
6.	Bibliografia	286

Extended abstracts (in English)

Historical Architecture and Earthquakes.

The *path of knowledge* for the seismic evaluation and the restoration project.

INTRODUCTION

The scope of the research is the seismic risk prevention of historic buildings and, in particular, it investigates the role of the knowledge in the restoration project with seismic improvement.

The current Italian standards – Italian Structural Code 2008 (quoted as NTC08) and Guidelines for Assessing and Reducing Seismic Risk of Cultural Heritage (quoted as Italian Guidelines) – underline the crucial role of the knowledge phase and in particular the Italian Guidelines organizes the survey activities in a methodology, known as the *Path of knowledge*.

According to the standards, the knowledge can be acquired at various levels of depth (Knowledge Levels or KL), which are linked to safety coefficients (Confidence Factors or CF), which make verification more prudential penalizing the lowest KL.

Starting from the analysis of the standards approach, the research sets out to prove the following thesis: (i) the Confidence Factor as defined in the Italian Guidelines fails to include the substantial differences that may arise from knowledge paths that differ by type of investigations and the quality of the information collected; (ii) the deepening of knowledge is related to the type of investigations carried out and the quality of the results obtained rather than to the number of surveys.

The work aims at clarifying which investigative tools are most useful to establish an adequate knowledge level to both a seismic assessment and a definition of intervention criteria for safety and the preservation of the building.

The research methodology provides a preliminary analysis of the standards' indications for the completion of the knowledge phase, with particular regard to the knowledge path outlined in the Italian Guidelines. A comparative analysis of different knowledge paths is carried out on a sample of 34 cases of seismic assessments - carried out on historical buildings according to the Italian Guidelines approach - with the dual aim of (i) verifying the congruity between cognitive outcomes and confidence factor, (ii) and identifying a hierarchy of the investigations which mark out the knowledge path more suitable to the peculiarities of masonry buildings. This latter is finally illustrated through its application to a case study, adding a proposal for the improvement of the current *Path of knowledge*.

1. THE KNOWLEDGE ISSUE ACCORDING TO THE ITALIAN STANDARDS AND GUIDELINES

The preliminary knowledge phase is introduced for the first time by the Ministerial Decree of 24 January 1986 (DM86).

The earlier Italian standards – local Building Regulation from 1909 to 1937, National Laws from 1962 to 1974 – governed the reconstruction of earthquake-damaged fabrics and provided only technical prescriptions for the execution of interventions. In the standards of the XVIII, XIX and early XX centuries, the seismic safety of the masonry building was guaranteed by respecting the prescriptions of "regola dell'arte" (rule of art), codified in the treatises of architecture published between the second half of the '700 and the early XX century.

The DM86 introduces a paragraph devoted specifically to existing buildings (§C.9), which describes criteria and procedures to be followed for the design of seismic “upgrading” or “improvement”. The project should be come from the results of preliminary study aimed at understanding the as-built condition of the building. This study includes the analysis of the geometric-structural configuration of the building in its historical process and the investigations of the causes of damage or instabilities.

An analogous approach characterizes Italian standards up to the current NTC08, in which indications for the knowledge phase are increasingly detailed: in addition to the geometric-constructive aspects, it is necessary - as a rule - to determine the mechanical parameters of materials, with particular reference to the masonry characteristics, obtainable by means of destructive or moderately destructive tests.

The concepts of Knowledge Level and Confidence Factor in the Italian Standard appears to be linked to the introduction of the semi-probabilistic approach for safety assessment. According to this approach, the uncertainties inherent in the assessment process of existing building need to be taken into account in determining the safety level. The value of the safety coefficient (i.e. Confidence Factor) is directly linked to the depth of the knowledge (i.e. the Knowledge Levels).

The procedure proposed by NTC08 to identify KL and CF is generally valid for buildings of any constructive system, net of the differences in values assigned to the CF, and it links the adequate knowledge level (KL2) to the execution of a number of mechanical characterization tests (Figura 1.7).

The current Italian Guidelines flank the mandatory standards with the purpose of specifying the methodological approach to the restoration project according to the peculiarities of the historic building and consistent with the requirements of protection and conservation. The investigations must give priority to the direct analysis of the building with regard to its historical stratifications with the objective of formulating a suitable qualitative judgement on structural behaviour.

If referred to historical masonry architectures, the definition of an adequate knowledge should pay attention to conservative instance by minimizing the invasiveness of investigations. For this reason, the Italian Guidelines, compared to NTC08, proposes a different procedure for the definition of KL and CF which makes the treatment of uncertainties more flexible and seems more suitable to the peculiarities of masonry buildings.

2. THE KNOWLEDGE ISSUE IN THE ITALIAN *GUIDELINES FOR EVALUATION AND REDUCTION OF SEISMIC RISK OF CULTURAL HERITAGE*

The Italian Guidelines confirm that actions aimed at protecting by seismic risk the masonry cultural heritage must respond to the dual safety and conservation aspects, both satisfied by the intervention of “seismic improvement”, which is conceptually based on the understanding of the actual structural behaviour to be safeguarded by limiting interventions to real structural needs.

The preliminary knowledge is a prerequisite for the formulation of such a project because only an in-depth study of the building in its current configuration and constructive history allows to express a conscious judgment on its structural behaviour.

The explicit objective pursued by the Guidelines is to specify a path of knowledge, assessment of the level of safety conceptually similar to the one defined for ordinary masonry building by NTC08, but suitably adapted to the needs and peculiarities of cultural heritage.

The purpose of project interventions is to preserve not only the matter but also the structural functioning determined in the knowledge phase.

Hence it follows the importance of the study of construction meant as an *anamnesis* of the building, which the Guidelines have translated into the *Path of Knowledge*. It includes activities related to various disciplinary fields, to be programmed in relation to the objectives of the safety assessment (or intervention) and to the complexity of the building.

The main investigative tool is the direct survey. This latter, declined with different meanings, allows specific surveys (geometric configuration, state of damage, constructive technique) and its drawings are the basis upon which the results of other analysis converge, including historical research (reconstruction of evolutionary phases and transformations) and specialist investigations (mechanical parameters of materials and soil of foundation).

The findings of the cognitive phase - usually used in the definition of the restoration project - become the basic elements which allow the definition of a mechanical model more adherent to the complex built reality of the masonry building in order to provide a more reliable security assessment (Figura 2.6). For this matter, the Guidelines provide the use of global models or, alternatively, of an adequate number of local models concerning the most vulnerable portions of the building.

The use of local models is also considered more reliable to represent the seismic behaviour of the masonry buildings and this inevitably links the verification phase (local collapse mechanisms) to a careful qualitative assessment of the building aimed at individuating the weaker sections to be subjected to numerical control, including, at the same time, the positive contribution to the seismic response of constructive constructions possibly present in the building.

The foregoing of the Guidelines highlights a substantial evolution in the approach to restoration project in seismic areas and the role of knowledge phase, this latter to be intended as a logical-intuitive process based on the direct querying of the as-built configuration.

The link between knowledge and security check is perhaps the greatest merit of this procedure as much as it pushes towards a real investigation with the materiality of the building by shifting the purely structural approach - which tends to abstraction and simplification of the built reality - toward an indispensable multidisciplinary in the conservative intervention process of the existing building.

As aforementioned, also the Guidelines provide the use of CF to quantify the deepening level of knowledge, involving some differences in comparison with the NTC08. The confidence factor is obtained from the sum of four partial coefficients whose value is linked to the depth of each of the four aspects of knowledge (geometrical survey, historical and constructive features, mechanical parameters, soil and foundations).

Within the Table 4.1 (Figura 2.7), it is possible to follow different paths of knowledge characterized by very different outcomes, but that actually correspond to the same FC value: following an approach more focused on deepening of geometric-constructive survey and historical analysis than on the mechanical characterization of materials and soil it results $FC=1,18$; but the same value can be obtained by following a knowledge path conceptually opposite (Figura 2.8).

This evidence implies some very delicate aspects of the procedure: the Confidence Factor appears not uniquely representative of the path of knowledge and is possible to interpret the *Path of Knowledge* with various approaches not always suitable to the peculiarities of masonry building.

3. THE KNOWLEDGE PATHS OF THE RESEARCH PROJECT MIBACT-ARCUS “SEISMIC EVALUATION OF ITALIAN NATIONAL MUSEUMS”, APPLICATION OF THE ITALIAN GUIDELINES

The issue concerning the CF definition and the interpretation of the *Path of Knowledge*, is further investigated through the comparative analysis of 34 examples of seismic assessment of real historical buildings carried out according to the approach of Italian Guidelines (Figura 3.1).

The opportunity was offered by the national research project "Seismic Verification of National Museums - Application of OPCM 3274/2003 s.m.i. and the DPCM 12/10/2007 "(or Arcus Project) - promoted by the Ministry for Cultural Heritage and Tourism in 2011 and funded by ARCUS s.p.a. – in which I was directly involved with the research group of the University of Catania. The activities involved research groups from 18 Italian universities, engaging them in the study of 37 historic buildings with the aim to carry out a seismic safety check according to the most accurate assessment level and following the same methodological reference of the Italian Guidelines.

Within comparative analysis, the buildings are grouped according to the architectural typology and to the location of the building in the built fabric, with the aim of identifying possible approach analogies related to typological features. Four categories of buildings are identified: (i) palaces in aggregates, (ii) isolated villas and palaces, (iii) churches and monasteries, (iv) fortified

constructions. The distinction between (i) palaces in aggregate and (ii) villas is related, for example, to the differences that exist in the geometric survey operations that in the case of category (i) also require a verification of the geometric configuration of the adjoining building in order to know the level of interaction between them.

The analysis of the sample concerned the consultation of all the outcomes of the research groups, with particular regard to the results of the knowledge phase.

The documentation is analysed with the following aims:

1. Describe the general features of the building that could affect the activities provided by the *Path of knowledge* (relationship with the context, material and dimensional consistency, constructive history, etc.). The aim is to formulate a subjective idea of the potential difficulties of the knowledge phase and provide the basic elements to understand the approach and investigation choices of the research groups.
2. To relate methodologies used and results achieved on each knowledge activity with the respective partial confidence factor chosen (geometrical survey and cracking framework (F_{C1}), identification of historical and constructive features (F_{C2}), mechanical parameters (F_{C3}), soil and foundations (F_{C4}).
3. Identify the selected numerical models with the aim of verifying how data from the knowledge phase are interpreted.

The outcomes of analysis of each building are illustrated in synthetic charts consisting of three main sections: a) historical and morphological features of the building, b) methodologies and results of the survey, confidence factor, c) interpretation of the information.

The comparative analysis (see also comparative tables at pag. 213) highlights differences and affinities in the cognitive approach that are reflected in the type and quality of the information collected. It reveals that the confidence factor fails to take into account these differences that, while not affecting the results of numerical verification, may be decisive in the restoration project within the scope of identifying the minimum necessary interventions.

The most representative case concerns the definition of the geometrical survey. In most of the cases it is chosen a $CF1=0$ (highest level of knowledge) independently if it has been performed a comprehensive control of the existing drawings or a sample control, or none direct control. These differences do not substantially affect the results of the verification, but take account of the restoration intervention that must take into account the historical and constructive features of the building, which in many cases are understandable only by a thorough direct survey.

Similar considerations are valid for the reconstruction of the constructive phases. Information from the sources is not systematically verified on the building (an operation necessary to evaluate the reliability of the information and the presence of constructive discontinuities) and the differences in this issue (which determine the understanding of the cracking framework as well as the understanding of the historical and constructive valences to preserve) do not correspond to different partial CF.

It can be concluded that the lack of uniqueness of the confidence factor is bound to the difficulty of translating into a single numeric coefficient the knowledge outcomes which are eminently qualitative contents. This difficulty can be overcome not so much by remodelling knowledge levels or the value of the Confidence Factor, but rather by finalizing the knowledge path to managing the entire design process. That means to know which are the investigations actually necessary and useful for identifying the real vulnerability factors that a possible restoration project based on the minimum intervention criterion will have to mitigate.

According to this issues, finally the comparative analysis allows to identify prevalent interpretation of the *path of knowledge*, which in general deepens the aspects related to the geometric-constructive configuration and the historical constructive phases, reserving a less important role to the knowledge of the mechanical parameters most often obtained from available data (Figura 3.41).

From this outcome it can also be concluded that the depth of the knowledge does not depend from the quantity of investigations but rather from the type of investigation performed. Performing a deep survey and a deep historical research an optimal level of knowledge could be obtained; adding investigations could also increase the level of knowledge of a minimum (depending on the case-study) (Figura 3.42). Hence the investigation has to be planned with the aim of optimize costs in relation with benefits in term of knowledge acquired.

4. A PROPOSAL FOR A SYSTEMATIZATION OF THE PATH OF KNOWLEDGE

The prevalent knowledge path highlighted from the 34-cases-study analysis is considered from this work the most suitable for the analysis of historical buildings, because it takes into account the peculiarities of the masonry architecture.

However, it should be noted that by the current setting of the *Path of Knowledge* the results could be scattered in many elaborates, what often makes difficult a comprehensive overview of the knowledge outcomes.

From this consideration it comes a proposal for a systematization of the process which is illustrated by its application to the case study of Palazzo Lanfranchi in Matera, nowadays Museum of Medieval and Modern Art of Basilicata. It is one of the case-study of Arcus Project, and I participated in person to its study that was carried out by the research group of University of Catania.

The approach adopted on Palazzo Lanfranchi shares the essential aspects of the prevalent knowledge path and places them within a unitary conceptual framework that provides a rigorous justification of the purpose and correlation of each transaction and proposes to confer the sequence of operations with the same features of repeatability (by different subjects) and exportability (in other cases).

The base hypothesis - implicitly assumed in the case studies whose approach is shared by the present work - are the following: (i) the masonry building is able to face optimally the earthquake

if it responds to the “regola dell’arte”; (ii) its seismic response is related to equilibrium stability problems rather than materials resistance.

Both assumptions hinge on the knowledge path that needs to be aimed at acquiring the data needed to evaluate the body’s mechanical quality by comparing it with the “regola dell’arte”, such as the configuration of the walls layout, the quality of the connections, the quality of the structural elements. An indispensable aspect is the evaluation of masonry quality in relation to the capacity to exhibit a monolithic behaviour. This latter is related to parameters obtainable through direct observation (size and elemental rotation, presence of *diatoni*, vertical joints offset, etc.).

Such hypotheses make it legitimate to adopt an approach in which the mechanical (quantitative) characterization of masonry, though desirable, is not strictly necessary for the purposes of safety assessment and the definition of interventions.

5.1 The case-study of Palazzo Lanfranchi

Knowledge phase investigations, confidence factor

The Palazzo Lanfranchi, settled in the XVII century originally as a monastery, hosted a seminary in the XVIII century and then a gymnasium after the Italian Unification. It was erected on a tufaceous spur at the town edge between the Piano and the Sasso Caveoso.

The building, with an even configuration, has an elongated plan embodying the cloister and the Carmine Church at the end overlooking Giovanni Pascoli Square. On the other extremity, the building is bounded by a wide terrace. The layout testifies quite clearly that the final configuration has been reached through a series of transformations¹ accomplished by strictly following the peculiar local constructional techniques.

Restitution of the structural geometry was carried out by means of a systematic check of the available drawings, both by comparison of planets of various ages and direct check, with particular regard to the verification of all wall thicknesses, vaults dimension features. The cracking

¹ The construction of the Carmine convent started in 1608 when the site was partially settled with underground rocky churches. It may be inferred that the convent had two storeys. The construction of seminary - completed in 1672 – provided the layout with the central cloister. The first enlargement – 1776 – consisted in a new portion in the west façade, involving the demolition of some perimeter walls. The following enlargement - dated 1853 - involved also the main facade renovation. A new one-floor volume was added in the rear part of the building. The new added portion was built in continuity with the existing one where is possible to observe just shifts in the masonry wall and vaults layers as traces of different executions. In 1930 a volume was built on the second floor in the east-south corner that closed the perimeter of the nineteenth-century superlevation. The different construction periods are attested by the different wall textures and by the thickness of the walls. The last significant interventions are the restoration project of the 1980s by architect Vincenzo Baldoni and the retrofitting of plants.

framework is collected in the geometrical survey work. Based on these results, an $F_{C1} = 0.00$ is chosen.

Regarding the reconstruction of the construction process and the historical transformations, much of the information from the documentary sources was attested checking the traces and constructive discontinuities directly on the building. The constructive phases and transformations have been also specified by reading the wall alignments and the structural layout as a whole.

The analysis of the construction technique was mainly directed to the analysis of the wall and vault textures and was conducted with reference to the practice Code of the *Assisi*, which illustrates the mechanical qualities in relation to the rules of the “regola dell’arte”. Therefore, specific drawings are elaborated with the aim of a critical comparison with the details learned from the Code; these drawings highlights that technique is perfectly superimposable to the one learned from the Code. So it was not considered necessary to carry out specific investigations to investigate the wall section, which was however hypothesized by means of the direct observation of wall mostly without plaster.

Regarding the knowledge of mechanical parameters, $F_{C3} = 0.12$ is chosen because mechanical characterization of materials was not carried out. However, it should be underlined that the analysis carried out on the wall types allowed us to evaluate the mechanical properties of the walls of Palazzo Lanfranchi so the chosen F_{C2} could be considered precautionary. The mechanical parameters are directly derived from table C8A.2.1 of NTC08, by selecting the wall type in “tufo blocks”.

According to the knowledge of soil and foundations, RLS studies conducted by the CNR are available, and was chosen a partial factor $F_{C4} = 0.06$.

The Confidence Factor so determined is $FC=1.18$ (Figure 6).

Rilievo critico (critical survey)

The heterogeneous data from investigations are collected and arranged according to the so-called ‘rilievo critico’ (critical survey), which allows the contextual reading of all the information about the material, constructive and structural aspects that affect the seismic response of the building while at the same time providing immediate reciprocal correlation.

Some symbols – expressly derived from the material condition detected - have been specifically developed for the drawings of Palazzo Lanfranchi so to enrich the graphical understanding of the available information. These last, systematically reproduced on the drawings of the geometric survey, make reference to a legend subdivided into three thematic sections.

The first section is devoted to structural elements and construction techniques; the second is aimed to reproduce crack patterns and dislocations along with main structural discontinuities; the third one collects information on the element connections and on devices introduced to tie the different structural parts of the masonry body.

Additional symbols specify the trustworthiness of the information (ascertained /not ascertained) and the source (direct inspection or historical source). The legend indicates when the same information is confirmed both by direct and indirect sources, which increases its reliability. Specifically, a 'verified data' is that one which - deriving from a historical source – has been identified also through the direct observation of the building; a 'historical data' is simply derived from a historical source; a 'direct data' is derived from the direct observation and survey of the building.

The articulated legend enables a detailed reading of the various information and their superposition. Features of masonry wall configuration (geometry and construction technique) are related to those of ancient and recent modifications and location of strengthening and consolidation interventions.

The complete picture highlights the presence of structural flaws and strengths on the specific building and will direct toward a thoughtful structural analysis.

General remarks

The comprehensive map of knowledge provided by the “rilievo critico” allow to formulate the qualitative judgment on structural behaviour of the palace². It clearly ascertains that the building obeys the best construction rules of Matera and assures that it possesses a sizeable seismic capacity, as also confirmed by the presence of crack of moderate spread and width, most probably due to masonry physiological behaviour.

It is also facilitated the localization of the portion considered most vulnerable to the seismic action. The mechanisms are identified and include the exterior movement of the walls (1st mode mechanisms). This mode of damage is hypothesized (i) for the west wall of the cloister due to its configuration (absence of contiguous wall extensions, small thickness associated with a presence of a vault without chains); (ii) for the top portion of the facade of the church of the Carmine sailing.

The qualitative judgment based on the acquired knowledge is associated to the quantitative verification carried out both for the most vulnerable local mechanisms and for global analysis³.

² As a results of the knowledge phase it can be assessed that Palazzo Lanfranchi benefits of good global features. The overall configuration is sound and does not show gross alterations, the structural layout is substantial and coherent with local building traditions. The wall arrangement and thicknesses are sized to building dimensions and well-proportioned to the required load carrying demand. Also stonework and coursed ashlar meet the traditional construction practise of Matera. Regular coursed ashlars with correct block layout and thin mortar bed and head joints (usually less than 5 mm) are encountered. The behaviour of the walls under horizontal action will be that of a monolithic body. Such a conclusion is also substantiated by the tomographic inspection executed on some walls.

³ The outcomes of the evaluations - carried out both by local mechanisms and through a global model - confirm the qualitative considerations underlining the greater vulnerability of the cloister wall to out-

Finally, it could be asserted that the “rilievo critico” of Palazzo Lanfranchi which represents a detailed depiction of the current overall as-built configuration was fruitfully used to assess the structural behaviour but it could also be used as a base start of a future restoration project.

6. CONCLUSIONS

The aim of the research was to find an appropriate cognitive approach to the assessment of seismic safety and also to define a conservative seismic improvement project of the historic masonry building.

In this matter it should be underlined the contribution offered by the Italian Guidelines which provide the set of principal activities (the *Path of Knowledge*) to be addressed in the preliminary phase. The Path of Knowledge may be performed following different approach which could focus, on one hand, the real as-built configuration investigated through the geometrical-constructive survey and historical research, on the other hand, the mechanical characterization of materials obtained by the execution of diagnostic investigations. The CF – as defined in the Italian Guidelines – fails to take into account those substantial differences, so that it does not express uniquely the quality of the acquired knowledge.

This issue is inherent in the difficulty in translating into a numerical coefficient a content of knowledge of eminently qualitative nature and characterized by a considerable degree of complexity. This knowledge content, moreover, is an indispensable prerequisite not only for reliable mechanical modelling but also for the definition of a conservative intervention strategy. From this point of view, the major problem is not reaching a reliable quantification of the uncertainties related to the level of knowledge (what immediately affects the safety numerical assessment), but rather to finalize the knowledge path to manage the entire design process (which can provide a rational criterion for choosing a particular "path of knowledge" among the possible ones).

The analysis of project Arcus - the core of the research – allows to specify the issues concerning the path of knowledge and the CF procedure, but it also suggests an interpretative trace of the path of knowledge - coherent with the criterion set of the Guidelines - that incardinate the path of knowledge which can be summarized as follow: the judgment on the anti-seismic quality of a historic construction can be formulated by comparison of the constructive features of the building with the “regola dell’arte”; the seismic behaviour of masonry building concerns more an equilibrium issue than a overcoming of material resistance. Hence it descends the central role in the cognitive phase of the direct survey and historical research.

of-plane movement. The analysis also shows that by performing minimal interventions, such as the introduction of chains, an increase in wall capacity corresponds to good seismic response.

The almost general adoption of this approach by the various research groups involved in the Arcus project is a reassuring confirmation of the substantial sharing by the scientific community of which are the essential aspects of the structural behaviour of ancient masonry constructions which need to be evaluated, and how difficult it is to reduce the complexity of historical factories to synthetic mechanical models.

The path of knowledge can thus be described by an incremental model in which an optimal stage of knowledge is identified through the essential investigations of historical research and survey (as stated in its geometric and constructive meanings) beyond which the level of knowledge is not directly proportional to the amount of investigations carried out.

In addition, it should be noted that an accurate “path of knowledge” could be relocated as a mere to-do-step or of the assessment procedure and the results could be organized just to define Confidence Factor and the linked numerical model.

Hence the research proposes a possible improvement of the “path of knowledge” which consists of a method to systematize the mole of results in order to make them utilizable both in the assessment phase and in the project phase.

The “rilievo critico” is proposed as tool for a coordinate management of data, that avoid a fruitless dispersion. It facilitates a knowledge synthesis which is crucial for the definition of qualitative judgment on structural behaviour and, in the project phase, it allows the finding of “minimum interventions” necessary to safety and preservation of the building.

In this way, an inseparable link between the stages of the design process (knowledge-interpretation-intervention) is established, and allows at any time to retrace the logic process followed by qualitative judgment, to verify the actual necessity of the interventions and their congruence with the masonry construction conception, which both represent essential requirements for a conservative seismic improvement project.

Introduzione

La ricerca si inquadra nel filone di studi inerenti la prevenzione del rischio sismico degli edifici murari storici e, in particolare, indaga il ruolo della conoscenza del fabbricato nel progetto di restauro con miglioramento sismico.

L'importanza della conoscenza è esplicitamente affermata dalla normativa vigente (Norme Tecniche per le Costruzioni 2008 e Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale) che distingue diversi livelli di approfondimento (livelli di conoscenza, LC) ai quali la conoscenza può essere acquisita, in base all'accuratezza delle indagini svolte, e lega ogni livello a un coefficiente di sicurezza (fattore di confidenza, FC) che rende cautelativa la verifica (nello stato di fatto e nello stato di progetto) penalizzando i livelli di conoscenza più bassi. Su questo aspetto le NTC08 e le Linee Guida si allineano alle norme internazionali più evolute, ma le Linee Guida propongono una procedura differente per la definizione di LC e FC in cui il livello di conoscenza considerato adeguato non è necessariamente legato alla esecuzione di un certo numero di indagini di caratterizzazione meccanica dei materiali. L'aspetto forse più delicato della procedura proposta dalle Linee Guida è la elevata soggettività con cui si può valutare la completezza delle indagini e quindi scegliere il fattore di confidenza, per cui risulta che quest'ultimo non rappresenta univocamente gli esiti conoscitivi.

A partire dall'analisi delle norme italiane degli ultimi trent'anni (Capitolo §1), la ricerca si pone l'obiettivo di chiarire quali sono gli strumenti di indagine e i risultati auspicabili che consentono di raggiungere una conoscenza dell'edificio storico adeguata per la valutazione della sicurezza e la definizione dei criteri di intervento volti parimenti alla sicurezza e alla conservazione. È inoltre indagato il contributo delle acquisizioni della comunità scientifica alla evoluzione dei contenuti delle norme e dei documenti di indirizzo, fino a giungere alle attuali Linee Guida nelle quali le attività preliminari del processo progettuale sono sistematizzate nel *percorso di conoscenza*.

Le Linee Guida, nel presente lavoro, sono oggetto di una analisi più approfondita con particolare riguardo ai contenuti del percorso della conoscenza – descritto dalla norma come un insieme di attività da svolgere in modo non sequenziale ma integrato – e alla procedura di quantificazione della conoscenza attraverso il fattore di confidenza (Capitolo §2).

Gli aspetti problematici connessi alla definizione del fattore di confidenza sono indagati attraverso la disamina di 34 casi di verifiche sismiche condotte su edifici reali secondo l'approccio delle Linee Guida (Capitolo §3). L'occasione è offerta dal progetto di ricerca "Verifica Sismica dei Musei Statali" - promosso dal Ministero dei Beni Culturali e finanziato dall'Arcus - cui si è partecipato direttamente con il gruppo di ricerca dell'Università di Catania.

Il materiale analizzato è stato approntato da studiosi di 18 università italiane, raccolti in gruppi marcatamente multidisciplinari. Dall'analisi emergono differenze e affinità nell'approccio conoscitivo che si riflettono nella tipologia e nella qualità delle informazioni raccolte. La disamina rivela che il fattore di confidenza non riesce a tenere conto di queste differenze che – pur non inficiando i risultati della verifica numerica – potrebbero essere determinanti nell'ambito di un progetto di restauro, all'atto di individuazione degli interventi minimi necessari.

Dall'analisi dei 35 casi studio emerge un percorso di conoscenza prevalente, fondato essenzialmente sulla disamina puntuale della realtà costruita, che sembra poter costituire un solido fondamento tanto per la fase di analisi strutturale quanto per la fase più strettamente progettuale.

Sulla base di questi risultati, la tesi avanza una proposta per la sistematizzazione del suddetto percorso di conoscenza e la illustra attraverso l'applicazione al caso studio di Palazzo Lanfranchi – edificio storico di fine Seicento originaria sede del Seminario di Matera – oggi adibito a Museo dell'Arte Medievale e Moderna della Basilicata (Capitolo §4).

Le attività svolte per Palazzo Lanfranchi sono organizzate in tre momenti reciprocamente correlati e sinteticamente riferiti come conoscenza–interpretazione–progetto. In particolare, per Palazzo Lanfranchi sono approfondite le prime due fasi e sono sottolineate le relazioni tra i vari aspetti della conoscenza (rilievo, analisi storica, analisi della tecnica costruttiva) e gli esiti della valutazione della sicurezza.

Un ruolo fondamentale è rivestito dal rilievo critico quale strumento interpretativo della realtà costruita. Attraverso il rilievo critico, le informazioni dirette e indirette sono selezionate e inserite nei disegni del rilievo geometrico specificandone fonte e grado di attendibilità. Il rilievo critico quindi fornisce un quadro complessivo della conoscenza dell'edificio, compresi gli eventuali vuoti conoscitivi. Un esito del rilievo critico è il giudizio qualitativo sul comportamento strutturale formulato sulla base della qualità dell'impianto strutturale, della tecnica costruttiva e delle connessioni.

Il livello di conoscenza su ogni aspetto dell'indagine è definito solo a valle di tale fase di interpretazione qualitativa del comportamento strutturale che viene, infine, sostanziata e integrata attraverso la verifica di sicurezza effettuata per mezzo di ulteriori valutazioni quantitative.

1. La conoscenza dell'edificio nella normativa tecnica e nei documenti di indirizzo

1.1 Finalità e ambito

Nelle norme italiane attuali – Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC08)⁴ e Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale (Linee Guida)⁵ – la fase di conoscenza dell'edificio è un passaggio imprescindibile per l'esecuzione della verifica sismica e per la definizione degli interventi di miglioramento sismico, perché consente di acquisire informazioni fondamentali per la definizione di un modello meccanico quanto più aderente alla realtà costruita del fabbricato.

Con la finalità di avviare una riflessione sulla richiesta di conoscenza adatta allo studio degli edifici murari, in questo capitolo il tema della conoscenza è affrontato indagando l'evoluzione dell'approccio della normativa su questo ambito attraverso la disamina delle indicazioni dettate per la indagini preliminari al progetto.

L'analisi è focalizzata sulle normative sismiche italiane degli ultimi trent'anni con rimandi alle principali norme internazionali che ne hanno influenzato i contenuti, con particolare riguardo ai concetti di Livello di Conoscenza e Fattore di Confidenza. Sono inoltre analizzate le indicazioni contenute nei documenti di indirizzo, principalmente rivolti agli edifici tutelati, che hanno affiancato (e affiancano tutt'oggi) le norme tecniche cogenti, fino alle attuali Linee Guida.

1.2 Le norme tecniche storiche

La prima normativa tecnica per gli edifici murari esistenti, intesa come codice che disciplina il progetto di consolidamento strutturale con applicazione a livello nazionale, è individuabile in forma embrionale nel Decreto Ministeriale 3 marzo 1975 (DM75)⁶, che dedica il paragrafo §C.9 alla “riparazione degli edifici in muratura”. Questa norma, però, non contiene alcuna

⁴ Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Ministero dell'Interno, Decreto 14 gennaio 2008, approvazione *Norme Tecniche per le Costruzioni*, G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008 suppl. ord. n. 30.

⁵ Ministero dei Beni e le Attività Culturali, Circolare n. 26 del 2 dicembre 2010 avente come oggetto «Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale allineate alle nuove Norme tecniche per le costruzioni». Documento già approvato dal Consiglio Superiore Dei Lavori Pubblici, Assemblea Generale del 23 luglio 2010, prot. n. 92.

⁶ Ministero dei Lavori Pubblici, Ministero dell'Interno, Decreto Ministeriale 3 marzo 1975, recante *Approvazione delle norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche*. Supplemento ordinario G.U. 8 aprile 1975, n. 93.

indicazione relativa alla necessità di una fase di conoscenza preliminare alla definizione degli interventi. La prima norma tecnica nazionale che contiene indicazioni in tal senso è il Decreto Ministeriale 24 gennaio 1986 (DM86)⁷.

Le norme precedenti⁸ a questi decreti ministeriali disciplinano le riparazioni degli edifici danneggiati da eventi sismici⁹ e forniscono esclusivamente prescrizioni tecniche per gli interventi e indicazioni per i calcoli di stabilità; non sono presenti indicazioni relative ad attività conoscitive preliminari alla scelta dell'intervento. Nell'ambito di queste norme la sicurezza sismica degli edifici murari esistenti è garantita dal rispetto delle regole del buon costruire¹⁰ che sono ampiamente descritte nei trattati di architettura pubblicati tra la metà del Settecento e l'Ottocento e sono identificate come "regole dell'arte". In questa epoca i trattati di architettura sono il vademecum di architetti e ingegneri, sia per le nuove costruzioni sia per gli interventi da eseguire sul patrimonio esistente, e sono probabilmente il riferimento culturale principale per le prescrizioni dettate dalle norme tecniche dei primi del Novecento e dai Regolamenti Edilizi del XIX secolo¹¹.

La diffusione, nel corso del Novecento, dei nuovi materiali da costruzione, quali l'acciaio e il cemento armato, e la definizione di nuovi sistemi costruttivi che stimolano l'interesse di tecnici e studiosi – anche perché rispetto alla muratura tali sistemi costruttivi sono più docili al calcolo strutturale secondo gli approcci ormai consolidati della meccanica delle strutture – favoriscono il progredire del loro uso anche nell'ambito del restauro e del consolidamento degli

⁷ Decreto del Ministro dei Lavori Pubblici del 24 gennaio 1986, Norme tecniche relative alle costruzioni antisismiche, G.U. 12 maggio 1986, n. 108.

⁸ Il quadro di norme analizzate precedenti al DM75 comprende i Regi Decreti Legge a partire dal 1909 fino al 1937, la Legge n. 1684 del 1962, la Legge n. 64 del 1974. Cfr. Bibliografia per l'elenco completo di norme analizzate.

⁹ I terremoti avvenuti dal 1908 al 1980 cui si legano le norme analizzate sono: Reggio Calabria e Messina del 28 dicembre 1908 (7,10 Mw), Avezzano del 13 gennaio 1915 (7,08Mw), Irpinia del 23 luglio 1930 (6,67 Mw), Irpinia del 21 agosto 1962 (6,15 Mw), Belice del 15 gennaio 1968 (6,41 Mw), Friuli del 9 maggio 1976 (6,45 Mw), Valnerina del 19 settembre 1979 (5,83 Mw), Irpinia-Basilicata del 23 novembre 1980 (6,81 Mw). Le informazioni sui terremoti sono desunte dal Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani – CPTI15 disponibile on line al sito <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>

¹⁰ L'attenta lettura dei danni prodotti dai terremoti mostrava come i crolli rovinosi riguardavano – nella maggior parte dei casi – edifici mal costruiti o privi di presidi antisismici come le catene. Di contro, gli edifici in muratura costituiti da muri solidi e connessioni efficaci erano rimasti in piedi e potevano essere recuperati. Cfr. *“Relazione della Sottocommissione incaricata di visitare le località colpite dal terremoto”* Allegato A della *“Relazione della Commissione incaricata di studiare e proporre norme edilizie obbligatorie per i comuni colpiti dal terremoto del 28 dicembre 1908 e da altri anteriori”*, pubblicata nel *Giornale del Genio Civile*, Roma, Stabilimento tipo-litografico del Genio Civile, 1909.

¹¹ Tra i Regolamenti Edilizi del XIX secolo ricordiamo il Regolamento di Norcia del 1860, Il Regolamento Edilizio dell'Isola di Ischia del 1883.

edifici storici¹², e un corrispondente progressivo scollamento tra la cultura costruttiva dell'epoca e la antica tecnica muraria.

Solo con il DM86 sono introdotte indicazioni che impongono al tecnico l'esecuzione di alcune attività conoscitive di base funzionali alla comprensione dello stato di fatto da cui dovranno discendere le scelte di progetto.

L'impianto del testo e i contenuti del DM86 sono mutuati dal precedente DM75 e dal Decreto Ministeriale 2 Luglio 1981 (DM81)¹³, da cui sono riprese anche le indicazioni generali sulla conoscenza dell'edificio.

Il primo aspetto innovativo del DM86 è quello di costituire una normativa nazionale non solo per gli interventi di ricostruzione post-sisma, ma anche per gli interventi di consolidamento eseguiti in regime ordinario su edifici in zone dichiarate sismiche¹⁴. La norma si propone inoltre come riferimento metodologico distinguendo operazioni fondamentali inderogabili e scelte progettuali soggette alla valutazione e discernimento del progettista¹⁵.

Le indicazioni sulla conoscenza dell'edificio intesa come atto preliminare al progetto per l'edificio esistente sono contenute nei paragrafi §C.9.2.3 (Operazioni progettuali) e §C.9.2.4 (Criteri di scelta progettuale).

Le operazioni progettuali sono le seguenti:

«a. individuazione dello schema strutturale nella situazione esistente; b. valutazione delle condizioni di sicurezza attuale dell'edificio e delle caratteristiche di resistenza degli elementi strutturali interessati dagli interventi, avuto riguardo alla eventuale degradazione dei materiali e ad eventuali dissesti in atto; c. scelta progettuale dei provvedimenti di intervento [...]; d. verifica sismica, se necessaria, del nuovo organismo strutturale.»

¹² Questo lento processo è intellegibile nelle prescrizioni delle norme dal 1909 al 1976, nelle quali gli elementi originari della costruzione ritenuti più vulnerabili al terremoto (volte, archi, scale in pietra) sono spesso sostituiti con solai metallici e poi in c.a. (v. e sono introdotti cordoli in c.a. costruiti in breccia su ogni interpiano (vedi ad esempio il punto C.9.4 del DM75, il punto 3.4.2.4 del DM81 e relative istruzioni nella Circolare 30 luglio 1981 n. 21745)

¹³ Ministero dei Lavori Pubblici, Decreto Ministeriale 2 Luglio 1981, *Normativa per le riparazioni ed il rafforzamento degli edifici, danneggiati dal sisma nelle regioni Basilicata, Campania e Puglia*, supplemento ordinario G.U. del 21 luglio 1981, n. 198.

¹⁴ La classificazione sismica del territorio nazionale è stata introdotta con la Legge n. 64 del 2 febbraio 1974 recante "Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche", G.U. 21 marzo 1974 n.76.

¹⁵ Cfr. Circolare del Ministero LL.PP. n. 27690 del 19 luglio 1986 recante "Istruzioni per l'applicazione del DM 24 gennaio 1986" in cui si afferma che il DM86 «potrà utilmente assumersi come riferimento metodologico anche per gli interventi relativi ad edifici di diversa destinazione d'uso. Dato il carattere peculiare della materia, difficilmente assoggettabile a rigide regole vincolanti, la normativa ha voluto preordinatamente stabilire soltanto concetti fondamentali, nel cui ambito ricercare la soluzione più adatta al caso specifico».

Al punto “a”, l’individuazione dello schema strutturale resistente rimanda ad operazioni quali il rilievo geometrico e dello stato di conservazione che non sono esplicitamente richiamati nel testo. Un’illustrazione più compiuta delle operazioni è contenuta nelle Istruzioni del precedente DM81¹⁶ e riguardano: caratteristiche tipologiche e dimensionali, l’impianto strutturale (disposizione e spessore dei muri), tipologia muraria (qualità e stato di conservazione della malta, descrizione del dissesto), corpi aggiunti, posizione e tipologia delle scale. Inoltre si aggiunge che «per una esatta cognizione dello stato di fatto preesistente al sisma, poter disporre (se rintracciabile) del progetto originario della costruzione»¹⁷.

Al punto “d”, l’inserito “se necessaria” non consiste in una deroga alla valutazione della sicurezza (che è sempre obbligatoria) bensì rimanda alla possibilità di eseguire la verifica della sicurezza con valutazioni qualitative illustrate in una relazione tecnica specifica¹⁸, e non obbligatoriamente mediante il calcolo strutturale¹⁹. Già il DM81 prevede che per gli edifici in muratura la verifica sismica “vera e propria” (quindi quella numerica), di regola obbligatoria per gli edifici in cemento armato, può essere sostituita dalla relazione specifica sul comportamento delle strutture, purché si dimostri che l’edificio oggetto dell’intervento, con l’avvenuta esecuzione delle progettate opere di rinforzo, possieda i requisiti costruttivi di “pari efficacia” rispetto a quelli previsti per le nuove costruzioni in muratura, quali murature ben ammassate, maglia muraria compatta, predisposizione di cordoli su ogni piano, la costruzione di solai rigidi, tetti e orizzontamenti non spingenti.²⁰

Al paragrafo §C.9.2.4 si legge che «i criteri adottati nella scelta del tipo di intervento devono scaturire, di norma, da uno studio preliminare dell’organismo edilizio» che deve riguardare in particolare:

«a. le caratteristiche, nella situazione esistente, sotto il profilo architettonico, strutturale e della destinazione d’uso; b. l’evoluzione storica delle predette caratteristiche con particolare

¹⁶ Ministero dei Lavori Pubblici, Circolare del 19 luglio 1986 n. 27690 recante *Istruzioni per l’applicazione del D.M. 24 gennaio 1986 recante norme tecniche per le costruzioni in zona sismica*,

¹⁷ Cfr. Circolare 30 luglio 1981 n. 21745, §2 (Operazioni progettuali), §3 (Edifici in muratura) e §3.1 (Progetto esecutivo).

¹⁸ Questa interpretazione è fornita da Antonino Giuffrè il quale afferma che nello spirito della norma «la dimostrazione della sicurezza possa seguire vie non basate su algoritmi numerici ma su proposizioni logiche che, se pur in via qualitativa, stringentemente dimostrino ciò che la meccanica moderna non consente ancora di quantificare.» Cfr. A. Giuffrè, *Restauro e sicurezza in zona sismica. La cattedrale di Sant’Angelo dei Lombardi*, in C.F. Carocci e C. Tocci (a cura di), *Leggendo il libro delle antiche architetture. Aspetti statici del restauro*, Gangemi Editore, Roma, 2010, pag. 240.

¹⁹ L’approccio adottato dai DM81 e DM86 è metodo POR, già proposto nell’ambito del DM81, i cui criteri di base sono l’ipotesi di comportamento elasto-plastico con controllo della duttilità, la trascurabile rigidità della parete per deformazioni ortogonali al piano.

²⁰ Si potrebbe dire, in altre parole, che la verifica sismica per la norma risulta soddisfatta allorché siano rispettati i requisiti di una costruzione a regola d’arte.

riferimento all'impianto edilizio originario ed alle principali modificazioni intervenute nel tempo; c. l'analisi globale del comportamento strutturale al fine di accertare le cause ed il meccanismo di eventuali dissesti in atto».

Il DM86, malgrado le indicazioni rimangano piuttosto vaghe, esplicita dunque la necessità di desumere le scelte di progetto dalla conoscenza del comportamento strutturale dell'edificio analizzato nel suo processo storico²¹.

Rispetto al DM81 e al DM86, il Decreto Ministeriale 16 gennaio 1996²² prevede le medesime indicazioni per la fase di conoscenza, ma contiene alcuni elementi di novità legati alla introduzione del metodo degli Stati Limite e all'utilizzo dell'approccio probabilistico per la valutazione della sicurezza, proposto dall'Eurocodice 8 – parte 1-4 nella versione del 1996 (EC8-96)²³.

Nell'approccio probabilistico il raggiungimento di uno stato limite può essere provocato dall'intervento concomitante di vari fattori di carattere aleatorio derivanti dalle incertezze relative a (i) parametri meccanici, (ii) divergenza tra effetti dei carichi reali e quelli di calcolo, (iii) geometria della costruzione. Per tener conto delle incertezze riguardanti i primi due aspetti sono introdotti i coefficienti γ_m e γ_f , che si applicano rispettivamente alle resistenze dei materiali, diminuendo il valore caratteristico, mentre la geometria della costruzione è considerata deterministica.

Nell'EC8-96 nel caso di un monumento o di un edificio storico le informazioni utili ai fini del calcolo strutturale provengono principalmente dalla conoscenza del comportamento esibito in occasione terremoti passati e delle tecniche costruttive tradizionali. Le indicazioni sulle indagini preliminari da svolgere valgono per qualsiasi tipologia strutturale e sono contenute nel paragrafo §2 (Informazioni per la valutazione delle strutture) e nella relativa appendice §B; indicazioni specifiche per gli edifici murari storici sono contenute nelle appendici informative §F (Considerazioni particolari per edifici storici e monumenti) e §K (Disposizioni particolari per edifici di muratura). Gli aspetti principali da indagare riguardano due piani di indagine: indiretta e in situ. Riguardo le indagini indirette è necessario raccogliere informazioni storiche, quali la data di costruzione, progetto originario, eventuali interventi di consolidamento progressivi, e in particolare per quanto concerne gli edifici storici la conoscenza accurata e

²¹ Appaiono chiare, in questo ambito, le influenze e i contributi provenienti dalla disciplina del Restauro, che con la Carta Italiana del Restauro del 1972 traccia le linee fondamentali dell'approccio progettuale, pur non entrando nel merito della questione sismica. La problematica dell'intervento di restauro in zona sismica è più propriamente affrontata dal "Comitato nazionale per la prevenzione del rischio sismico del patrimonio culturale", di cui si dirà nel seguito.

²² Ministero dei Lavori Pubblici, Ministro dell'Interno, Decreto Ministeriale del 16 gennaio 1996 recante Norme Tecniche per le Costruzioni in zone sismiche, G.U. del 5 febbraio 1996, n. 29.

²³ Comitato Europeo di Normazione (CEN), "Eurocodice 8 - Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture, Parte 1-4: Regole generali - Rafforzamento e riparazione degli edifici", versione italiana ufficiale della norma europea sperimentale ENV 1998-1-4 (gennaio 1996).

attendibile del comportamento esibito durante terremoti precedenti può essere ritenuta sufficiente per le decisioni da prendere in relazione alla sicurezza dell'edificio²⁴. Nell'ambito dell'ispezione in situ bisogna prevedere un attento esame diretto delle strutture che consenta una valutazione della stabilità degli elementi strutturali e il riconoscimento di eventuali difetti di costruzione, il rilievo del danneggiamento, l'esame degli edifici contigui per la valutazione delle interazioni. In particolare per gli edifici in muratura la norma indica le seguenti indagini in situ:

- dati globali relativi alla geometria;
- spessore medio dei giunti di malta, qualità e resistenza della malta;
- dimensioni medie e resistenza dei blocchi;
- connessioni tra pareti trasversali;
- elementi di collegamento trasversali tra blocchi appartenenti a pareti (come legature, tiranti, ecc.);
- classificazione delle forme delle pietre (naturale, a blocchi), riconoscimento di eventuali discontinuità verticali;
- prove in situ per valutare la resistenza della muratura;
- individuazione di eventuali vuoti nella compagine muraria.

L'obiettivo delle indagini è l'individuazione e la valutazione della qualità di tutti gli elementi che giocano un ruolo nel comportamento strutturale dell'edificio.

In relazione ai risultati dei rilievi diretti e delle eventuali indagini di approfondimento (soniche, endoscopie, ecc.) è scelto un coefficiente parziale di sicurezza γ_M , che dovrà tener conto dell'affidabilità dei metodi diagnostici utilizzati.

1.3 La nuova normativa sismica e la procedura di quantificazione della conoscenza

Il processo di quantificazione della conoscenza – inteso come procedura di definizione di un coefficiente di sicurezza legato al livello di approfondimento delle indagini svolte – è introdotto dalle linee guida FEMA 273²⁵ del 1997, da cui deriva l'attuale norma statunitense ASCEI/SEI 41-06²⁶, dedicata al progetto di adeguamento sismico degli edifici esistenti.

²⁴ EC8-96, punto F.3.2 Valutazione della sicurezza nel caso di un'affidabile storia degli eventi sismici, pag. 43.

²⁵ Building Seismic Safety Council, Applied Technology Council, *NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*, Federal Emergency Management Agency (FEMA) publication 273, Washington D.C., October 1997.

²⁶ American Society of Civil Engineers (ASCE), *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, ASCE pubs., Reston (Virginia), 2007, ISBN-13: 978-0-7844-0884- 1.

Su questo tema è possibile confrontare l'approccio delle suddette norme statunitensi ASCEI 41-06 (2007), l'Eurocodice 8 parte 3 (2005)²⁷, l'OPCM 3274 (2003)²⁸ e la successiva OPCM 3431(2005)²⁹, il Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008 (NTC08) e la relativa Circolare 617/2009³⁰.

Le norme ASCEI 41-06 forniscono indicazioni generali sui dati da acquisire preliminarmente all'intervento che sono funzionali sia alla definizione del modello di analisi per le verifiche, sia alla scelta dei criteri di intervento e valutazione della convenienza economico-sociale, oltre che strutturale.

Le informazioni necessarie da reperire nella fase preliminare sono descritte nel paragrafo §2.2 (*As-built information*). La configurazione strutturale dell'edificio è indagata con l'obiettivo di definire i carichi agenti sulla struttura e per la individuazione di eventuali discontinuità nella distribuzione dei carichi o precarietà strutturali, ecc.

È prevista l'analisi delle caratteristiche degli elementi strutturali, quali la geometria e i parametri meccanici per consentire un adeguato calcolo strutturale; le incertezze associate ai parametri meccanici dei materiali sono tenute in conto mediante il fattore di conoscenza κ (*knowledge factor*) che va a ridurre i valori in fase di calcolo.

Sono individuati tre livelli di conoscenza: minimo, normale ed esaustivo³¹. I livelli di conoscenza sono definiti in base (i) agli obiettivi del progetto, (ii) ai metodi di analisi utilizzati, (iii) alla quantità di prove di caratterizzazione meccanica, (iv) ai disegni di base posseduti, (v) livello di verifica, (vi) proprietà meccaniche dei materiali.

²⁷ European Comitee for Standardization (CEN), *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of buildings*, CEN, Bruxelles, 2005.

²⁸ Presidenza del Consiglio dei Ministri, Ordinanza n. 3274 del 20 marzo 2003 recante "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica", G.U. 8 maggio 2003 n.72.

²⁹ Presidenza del Consiglio dei Ministri, Ordinanza n. 3431 del 3 maggio 2005 recante ulteriori modifiche e integrazioni alla OPCM 3274 del 20 marzo 2003 recante "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica", G.U. 8 maggio 2003 n.72.

³⁰ Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Circolare 2 febbraio 2009 n. 617 recante "Istruzioni per l'Applicazione Nuove Norme Tecniche Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008", G.U. n. 47 del 26 febbraio 2009

³¹ Gli aggettivi utilizzati dalla norma sono *minimum, usual, comprehensive*.

Data	Level of Knowledge							
	Minimum		Usual				Comprehensive	
Rehabilitation Objective	BSO or Lower		BSO or Lower		Enhanced		Enhanced	
Analysis Procedures	LSP, LDP		All		All		All	
Testing	No Tests		Usual Testing		Usual Testing		Comprehensive Testing	
Drawings	Design Drawings	Or Equivalent	Design Drawings	Or Equivalent	Design Drawings	Or Equivalent	Construction Documents	Or Equivalent
Condition Assessment	Visual	Comprehensive	Visual	Comprehensive	Visual	Comprehensive	Visual	Comprehensive
Material Properties	From Drawings or Default Values	From Default Values	From Drawings and Tests	From Usual Tests	From Drawings and Tests	From Usual Tests	From Documents and Tests	From Comprehensive Tests
Knowledge Factor (κ)	0.75	0.75	1.00	1.00	0.75	0.75	1.00	1.00

Figura 1.1 – Tabella n. 2-1 Requisiti per la raccolta delle informazioni (*Data collection requirements*), da ASCEI 41-06, pag. 31.

Sono proposti due valori per il fattore di conoscenza: 0,75 e 1. Con riferimento alla tabella in Figura 1.1, la scelta di tale valore dipende esclusivamente dal numero di prove di caratterizzazione eseguite e dagli obiettivi del progetto. Per cui il valore 0,75 è utilizzato sia nel caso in cui sono previsti interventi di miglioramento sismico (*Base Safety Objective* - BSO) o rafforzamento locale più o meno diffusi, sia nel caso di interventi di adeguamento sismico (*Enhanced*) e in presenza di un numero limitato di prove di caratterizzazione meccanica³². Il valore 1 è utilizzato nel caso di un intervento di miglioramento associato alla esecuzione di un numero limitato di prove, e nel caso di un intervento di adeguamento associato a un numero esaustivo di prove³³.

Nell'Eurocodice 8 (2005) le indicazioni per la conoscenza dell'edificio sono illustrate al capitolo §3 (*Information for Structural Assessment*). Le indagini sono finalizzate alla individuazione delle caratteristiche dell'impianto e degli elementi strutturali da utilizzare principalmente per una corretta modellazione. Esse consistono nella raccolta della documentazione di base disponibile, con particolare riguardo al rilievo geometrico e disegni di eventuali interventi pregressi o informazioni storiche su danneggiamenti, alla caratterizzazione meccanica dei materiali; qualora non siano disponibili informazioni sui parametri meccanici, è necessario eseguire prove diagnostiche in situ.

³² Il numero minimo di prove previsto dalla norma è di un test per ciascuna tipologia muraria per un minimo di sei test in tutto sull'edificio. Cfr. §7.2.2.9.1 (*Usual Testing*), pag. 202.

³³ Il numero esaustivo di prove previsto dalla norma, in presenza di prove pregresse è di 3 test per ciascuna tipologia muraria (o 6 in assenza di documentazione), ogni tre piani di edificio ovvero ogni 270 mq di pareti, nel caso in cui siano disponibili prove pregresse per un minimo totale di otto prove su tutto l'edificio.

Le indicazioni specifiche per gli edifici in muratura sono contenute nell'appendice C. Per gli edifici murari è necessario individuare le tipologie murarie presenti nell'edificio, lo stato di conservazione, la qualità delle connessioni tra gli elementi e la configurazione della maglia muraria; è inoltre necessaria una conoscenza di base dell'impianto degli edifici eventualmente adiacenti per individuare le interazioni con il fabbricato oggetto di valutazione. I dati da raccogliere per la restituzione della geometria strutturale sono: posizione, spessore e dimensione dei muri portanti; dimensione e posizione delle aperture. I dettagli costruttivi sono indagati verificando: la classificazione della struttura (muratura tradizionale, confinata, o rinforzata), presenza di connessioni nelle murature a doppio paramento, valutazione della compattezza del muro e della qualità della malta, verifica delle connessioni tra gli elementi strutturali, rilievo dello stato di danno. Riguardo la caratterizzazione meccanica dei materiali la norma suggerisce l'esecuzione di indagini non distruttive (soniche, ultrasoniche, raggi-x) per confermare la qualità dei materiali presenti nella costruzione. Ulteriori indagini debolmente distruttive (martinetti piatti) o distruttive (prove di compressione diagonali) possono essere utilizzate per incrementare la conoscenza sui parametri meccanici.

Sono definiti tre livelli di conoscenza (KL1, KL2, KL3), limitato, normale, completo³⁴ (Figura 1.2); sulla base dei livelli di conoscenza è scelto il metodo di analisi da utilizzare per la valutazione della sicurezza e il Fattore di confidenza (CF) il cui valore è pari a $CF_{KL1}=1,35$, $CF_{KL2}=1,20$, $CF_{KL3}=1$. Il fattore di confidenza ottenuto riduce le resistenze dei materiali utilizzate nella fase di modellazione.

Si nota che la valutazione dei livelli di conoscenza è condotta seguendo una procedura generalmente valida per ogni sistema costruttivo (cemento armato, acciaio, muratura) senza precisazioni relative agli edifici murari.

Gli elementi che entrano in gioco nella determinazione del livello di conoscenza sono: la geometria, i dettagli costruttivi e i parametri meccanici. In particolare, la conoscenza completa della configurazione geometrica è un dato di base irrinunciabile qualsiasi sia il livello di conoscenza auspicato. Essa può essere desunta dal rilievo di base disponibile eventualmente prevedendo un controllo limitato di alcune porzioni (*visual survey*); in assenza dei rilievi di base deve essere eseguito un rilievo completo ex novo (*full survey*).

Per ottenere il livello di conoscenza minimo il rilievo geometrico deve essere affiancato da elaborati grafici dei dettagli costruttivi ipotizzati sulla scorta delle modalità

³⁴ Gli aggettivi utilizzati dalla norma sono rispettivamente *limited*, *normal*, *full*.

costruttive dell'epoca³⁵ oppure a valle di ispezioni in situ 'limitate'³⁶; i parametri meccanici sono desunti da valori tabellati.

Il livello di conoscenza intermedio (“*normal*”) si ottiene qualora siano disponibili elaborati incompleti sui dettagli costruttivi integrati con informazioni desunte da ispezioni in situ 'limitate' o 'estese'³⁷, e dati parziali sui parametri meccanici eventualmente integrati con indagini diagnostiche 'limitate'³⁸ o 'estese'³⁹.

Il livello di conoscenza completo (“*full knowledge*”) è raggiunto quando al rilievo geometrico è associata una conoscenza sui dettagli costruttivi basata su documentazione disponibile ampiamente descrittiva degli elementi strutturali, integrata con ispezioni in situ 'limitate' o 'esaustive'⁴⁰ e i valori dei parametri meccanici sono desunti dalla documentazione disponibile eventualmente affiancata da prove in situ 'limitate' o 'esaustive'⁴¹.

³⁵ Questa è una interpretazione della definizione di “*simulated design*” dettata dalla norma, che consiste nella definizione di uno schema strutturale di base fondato sulle prescrizioni delle norme vigenti all'epoca della costruzione. Per gli edifici storici in muratura, queste ipotesi possono essere costruite con riferimento alle tecniche costruttive locali o a edifici della stessa area geografica in cui le informazioni sui dettagli costruttivi sono a vista.

³⁶ Per ispezioni in situ “limitate” la norma intende il controllo a campione del rilievo geometrico-costruttivo disponibile; in particolare, le ispezioni limitate devono riguardare almeno il 20% degli elementi strutturali costituenti l'edificio (cfr. tabella 3.2 Eurocodice 8 parte 3). Si nota che l'esecuzione di ispezioni limitate può essere considerata un risultato utile al raggiungimento di una conoscenza solo se associata alla disponibilità di una documentazione di base ritenuta congrua.

³⁷ Per ispezioni in situ “estese” si intende un controllo sistematico dei dettagli costruttivi in assenza di documentazione di base disponibile. In particolare, le ispezioni estese devono riguardare almeno il 50% degli elementi strutturali costituenti l'edificio (cfr. tabella 3.2 Eurocodice 8 parte 3).

³⁸ Per indagini diagnostiche “limitate” si intende la esecuzione di prove di caratterizzazione meccanica dei materiali a integrazione della documentazione disponibile; in particolare, è eseguita 1 prova su ogni tipologia di materiale per ciascun piano dell'edificio (cfr. tabella 3.2 Eurocodice 8 parte 3).

³⁹ Per indagini diagnostiche “estese” si intende la esecuzione di prove di caratterizzazione meccanica dei materiali in assenza di documentazione di base; in particolare, sono eseguite 2 prove per ogni materiale e per ciascun piano dell'edificio (cfr. tabella 3.2 Eurocodice 8 parte 3).

⁴⁰ Per ispezioni in situ “esaustive” si intende un controllo diffuso dei dettagli costruttivi in assenza di documentazione di base disponibile finalizzato ad ottenere un livello di conoscenza maggiore; in particolare, le ispezioni estese devono riguardare almeno l'80% degli elementi strutturali costituenti l'edificio (cfr. tabella 3.2 Eurocodice 8 parte 3).

⁴¹ Per indagini diagnostiche “esaustive” si intende la esecuzione di prove di caratterizzazione meccanica dei materiali in assenza di documentazione di base; in particolare, sono eseguite 3 prove per ogni materiale e per ciascun piano dell'edificio (cfr. tabella 3.2 Eurocodice 8 parte 3).

Knowledge Level	Geometry	Details	Materials	Analysis	CF
KL1	From original outline construction drawings with sample visual survey <i>or</i> from full survey	Simulated design in accordance with relevant practice <i>and</i> from limited in-situ inspection	Default values in accordance with standards of the time of construction <i>and</i> from limited in-situ testing	LF- MRS	CF _{KL1}
KL2		From incomplete original detailed construction drawings with limited in-situ inspection <i>or</i> from extended in-situ inspection	From original design specifications with limited in-situ testing <i>or</i> from extended in-situ testing	All	CF _{KL2}
KL3		From original detailed construction drawings with limited in-situ inspection <i>or</i> from comprehensive in-situ inspection	From original test reports with limited in-situ testing <i>or</i> from comprehensive in-situ testing	All	CF _{KL3}

Figura 1.2 – Tabella 3.1 dell’Eurocodice 8-parte 3, pag. 19. Definizione del Livello di Conoscenza secondo l’Eurocodice 8 (2005). Ogni LC è associato a uno specifico metodo di analisi (LF: Lateral Force procedure, MRS: Modal Response Spectrum analysis) e a un Fattore di Confidenza (CF). Cfr.

Per gli aspetti relativi alla fase di conoscenza, le norme italiane attuali hanno in gran parte recepito le indicazioni dettate dall’Eurocodice 8 parte 3. Riguardo l’individuazione del Livello di conoscenza, si nota una evoluzione sostanziale tra l’approccio proposto dalla O.P.C.M. 3274/2003 e quello delle NTC08.

In generale è precisato che gli edifici esistenti si distinguono da quelli di nuova progettazione perché (i) il progetto riflette lo stato delle conoscenze al tempo della loro costruzione e (ii) può contenere difetti di impostazione concettuale e di realizzazione non immediatamente visibili, oppure (iii) gli edifici possono essere stati soggetti a terremoti o ad altre azioni accidentali i cui effetti non sono palesemente visibili. La valutazione della sicurezza e il progetto degli interventi sono affetti da un grado di incertezza che dipende dall’approfondimento della fase di conoscenza.

Nell'OPCM 3274/2003, le indicazioni sulla conoscenza sono contenute nel capitolo §11 dedicato agli edifici esistenti⁴², al paragrafo §11.2.3, e sono integralmente analoghe a quelle previste dalla norma europea appena descritta, così come i criteri per la valutazione del livello di conoscenza, con lievi differenze nel numero di prove diagnostiche da eseguire e nella percentuale di elementi strutturali da indagare. Nella OPCM 3274/2003 in base al livello di conoscenza il fattore γ_M è ridotto o aumentato (Figura 1.3).

Livello di Conoscenza	Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	γ_m
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione oppure rilievo ex-novo completo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>limitate</i> verifiche in-situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>limitate</i> prove in-situ	Analisi lineare statica o dinamica	Aumentati
LC2		Disegni costruttivi incompleti + <i>limitate</i> verifiche in situ oppure <i>estese</i> verifiche in-situ	Dalle specifiche originali di progetto + <i>limitate</i> prove in-situ oppure <i>estese</i> prove in-situ	Tutti	Invariati
LC3		Disegni costruttivi completi + <i>limitate</i> verifiche in situ oppure <i>esaustive</i> verifiche in-situ	Dai certificati di prova originali + <i>limitate</i> prove in situ oppure <i>esaustive</i> prove in-situ	Tutti	Diminuiti

Figura 1.3 – Tabella 11.1 dell'OPCM 3274/2003 – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e coefficienti parziali di sicurezza.

Nell'Ordinanza, per la valutazione del livello di conoscenza i risultati da ottenere sono individuati in maniera distinta per ciascun sistema costruttivo, ma gli aspetti che entrano in gioco nella quantificazione della conoscenza sono sempre la geometria, i dettagli costruttivi e le proprietà meccaniche dei materiali.

Per gli edifici murari in particolare (§11.5), il rilievo geometrico può essere “sommario” o “completo” a seconda che sia stato effettuato un controllo a campione o un controllo diffuso del rilievo di base.

Riguardo i dettagli costruttivi è necessario verificare: la qualità delle connessioni tra pareti ortogonali e tra solai e pareti e l'eventuale presenza di cordoli di piano; l'esistenza di architravi dotate di resistenza flessionale al di sopra delle aperture; la presenza di elementi

⁴² Con l'OPCM3274 è fatto obbligo di eseguire una verifica sismica⁴² nel caso di sopraelevazioni e ampliamenti, variazione di destinazioni d'uso, interventi strutturali che portino a un organismo diverso da quello preesistente. La verifica è intesa come «un procedimento quantitativo volto a stabilire se un edificio esistente è in grado o meno di resistere alla combinazione sismica di progetto» prevista dalla norma.

strutturali spingenti e di eventuali elementi atti ad eliminarne la spinta; la presenza di elementi ad elevata vulnerabilità. L'analisi dei dettagli costruttivi può avvenire eseguendo verifiche in situ "limitate" – basate unicamente su rilievi di tipo visivo e possono essere effettuate a campione – oppure "estese ed esaustive". Queste ultime consistono in rilievi diretti degli elementi strutturali eseguiti mediante scrostature di intonaco; in particolare le ammorsature tra i muri ortogonali e le connessioni tra orizzontamenti e struttura di elevazione possono essere controllate a campione, mentre deve essere eseguito un controllo sistematico dell'efficacia degli architravi, della presenza di elementi spingenti e di dispositivi atti a contenerne spinta.

Le proprietà meccaniche dei materiali sono determinate mediante indagini diagnostiche debolmente distruttive o distruttive, eventualmente supportate da indagini non distruttive. Sono distinte prove in situ "limitate", "estese" o "esaustive", il cui approfondimento crescente dipende dalla quantità di prove sperimentali eseguite⁴³. In particolare, le verifiche in situ limitate «sono basate su esami visivi della tessitura della muratura e degli elementi (blocchi e malta) di cui è costituita. Deve essere effettuato almeno un esame per ogni tipo di muratura presente e per ogni piano dell'edificio. Non sono richieste prove sperimentali».

Per l'Ordinanza, una conoscenza adeguata (LC2) è raggiunta in presenza di un rilievo completo e verifiche in situ estese sui dettagli costruttivi e proprietà dei materiali desumibili da dati disponibili o da estese prove in situ (almeno una prova per tipologia muraria).

Anche in questa norma si nota una maggiore propensione alla raccolta di dati quantitativi sulle resistenze dei materiali che sono necessari dati di input per il modello meccanico utilizzato per le verifiche, che sono condotte secondo l'approccio dell'analisi statica o dinamica (lineare o non lineare).

Con l'OPCM 3431/2005 (OPCM2005) si nota una sostanziale evoluzione dell'approccio normativo al progetto di consolidamento dell'edificio murario che corrisponde a una maggiore specificazione delle indicazioni fornite per la conoscenza del manufatto.

La OPCM2005 per la prima volta obbliga a verificare la sicurezza nei confronti dei meccanismi di collasso fuori dal piano delle pareti, aggiungendo che i modelli numerici che presuppongono un comportamento sismico globale spesso non sono rappresentativi del reale comportamento sismico dell'edificio murario⁴⁴. Al paragrafo §11.5.4.3.1 (Meccanismi locali) l'Ordinanza aggiunge che:

⁴³ Per le verifiche "estese" è richiesta almeno una prova su ciascun tipo di muratura presente, in aggiunta al rilievo visivo. Per le verifiche "esaustive" sono richieste almeno tre prove su ciascun tipo di muratura presente, in aggiunta al rilievo visivo.

⁴⁴ Antonino Giuffrè nel 1993 descrive le modalità di danneggiamento degli edifici murari individuando due modi di danno. I meccanismi di I modo interessano la parete investita da una forza orizzontale ortogonale al proprio piano, mentre i meccanismi di II modo riguardano la parete investita da una forza parallela al proprio piano. Il I modo di danno innesca il ribaltamento fuori dal piano della pareti esterne

«Un possibile modello di riferimento per questo tipo di valutazioni è quello dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie, considerate come corpi rigidi non resistenti a trazione; la debole resistenza a trazione della muratura porta infatti, in questi casi, ad un collasso per perdita di equilibrio, la cui valutazione non dipende in modo significativo dalla deformabilità della struttura ma dalla sua geometria e dai vincoli»

Nell'Allegato 11.C (Analisi dei meccanismi locali di collasso in edifici esistenti in muratura) l'Ordinanza precisa che il metodo di analisi assume significato se è garantita una certa monoliticità del muro che ne impedisca collassi per disgregazione della muratura, inoltre l'applicazione del metodo presuppone:

«l'analisi dei meccanismi locali ritenuti significativi per la costruzione, che possono essere ipotizzati sulla base della conoscenza del comportamento sismico di strutture analoghe, già danneggiate dal terremoto, o individuati considerando la presenza di eventuali stati fessurativi, anche di natura non sismica; inoltre andranno tenute presenti la qualità della connessione tra le pareti murarie, la tessitura muraria, la presenza di catene, le interazioni con altri elementi della costruzione o degli edifici adiacenti»

Nella valutazione dei meccanismi locali, quindi, assumono meno importanza le informazioni inerenti le caratteristiche meccaniche dei materiali, mentre è fondamentale la conoscenza della configurazione dell'impianto strutturale (disposizione della maglia muraria, presenza di elementi spingenti, ...), della presenza ed efficacia delle connessioni, della interpretazione del quadro fessurativo e deformativo, ma soprattutto è necessario valutare la qualità delle murature con particolare riguardo alla capacità dei muri di esibire un comportamento monolitico in risposta all'azione sismica⁴⁵.

La definizione del processo evolutivo e delle trasformazioni subite dall'edificio assume anche una certa importanza. Questo aspetto è trattato al paragrafo §11.5.4.3.2 dedicato agli aggregati edilizi – concetto peraltro introdotto proprio dal questa Ordinanza⁴⁶ – in cui si legge che l'indagine sugli edifici in aggregato dovrebbe comprendere:

vincolate a quelle interne mediante connessioni non tenaci (ammorsature). Questo meccanismo di danno rappresenta la condizione di massima debolezza dell'edificio murario nei confronti delle azioni sismiche. Il meccanismo di II modo avviene per il superamento della resistenza dei muri e si manifesta con lesioni diagonali che tagliano il muro. Questo meccanismo può attivarsi esclusivamente se il I modo è stato scongiurato ed è innescato da una intensità sismica notevolmente superiore a quella che ribalta fuori dal piano le pareti non vincolate. L'analisi sismica qualitativa, dunque, è rivolta principalmente a valutare l'attivazione dei meccanismi più deboli, ovvero i meccanismi di I modo. Cfr. Giuffrè A., *Guida al progetto di restauro antisismico*, in Giuffrè A. (a cura di), "Sicurezza e conservazione dei centri storici. Il caso Ortigia". Roma-Bari, Laterza, 1993, pp. 151-188.

⁴⁵ Antonino Giuffrè propone l'uso della analisi limite dell'equilibrio per la verifica sismica degli edifici murari. Cfr. A. Giuffrè, *Lecture sulla meccanica delle murature storiche*, Edizioni Kappa, Roma, 1991.

⁴⁶ Un aggregato edilizio è costituito da un insieme di parti che sono il risultato di una genesi articolata e non unitaria, dovuta a molteplici fattori (sequenza costruttiva, cambio di materiali, mutate esigenze, avvicinarsi dei proprietari, etc.). Nell'analisi di un edificio facente parte di un aggregato edilizio occorre tenere conto perciò delle possibili interazioni derivanti dalla contiguità strutturale con gli edifici

«(i) l'analisi dei rapporti tra i processi di aggregazione ed organizzazione dei tessuti edilizi e l'evoluzione del sistema viario; (ii) i principali eventi che hanno influito sugli aspetti morfologici del costruito storico desumibili da fonti storiche. (i) la morfologia delle strade (andamento, larghezza, flessi planimetrici e disassamenti dei fronti edilizi); (ii) la disposizione e la gerarchia dei cortili (con accesso diretto o da androne) ed il posizionamento delle scale esterne; (iii) l'allineamento delle pareti e la verifiche di ortogonalità rispetto ai percorsi viari; (iv) individuazione dei prolungamenti, delle rotazioni, delle intersezioni e degli slittamenti degli assi delle pareti (ciò aiuta ad identificare le pareti in relazione alla loro contemporaneità di costruzione e quindi a definire il loro grado di connessione); (v) i rapporti spaziali elementari delle singole cellule murarie, nonché i rapporti di regolarità, ripetizione, modularità, ai diversi piani (ciò consente di distinguere le cellule originarie da quelle dovute a saturazione successiva); (vi) la forma e la posizione delle bucatore nei muri di prospetto: assialità, simmetria, ripetizione (ciò consente di determinare le zone di debolezza nel percorso di trasmissione degli sforzi, nonché di rivelare le modificazioni avvenute nel tempo); (vii) i disassamenti e le rastremazioni delle pareti, i muri poggianti "in falso" sui solai sottostanti, lo sfalsamento di quota tra solai contigui (ciò fornisce indicazioni sia per ricercare possibili fonti di danno in rapporto ai carichi verticali e sismici, sia per affinare l'interpretazione dei meccanismi di aggregazione)»

Riguardo l'analisi della qualità muraria, l'Ordinanza fornisce alcune indicazioni al paragrafo §11.5.2.2 (Dettagli costruttivi) e al paragrafo §11.5.2.3 (Proprietà dei materiali).

Il rilievo a vista della apparecchiatura degli elementi nel paramento e nello spessore del muro è riconosciuta come attività di base delle *verifiche in situ*⁴⁷ e «in assenza di un rilievo diretto, o di dati sufficientemente attendibili, dovranno comunque essere assunte, nelle successive fasi di modellazione, analisi e verifiche, le ipotesi più cautelative».

Le proprietà meccaniche sono definite – di base – con *indagini in situ*⁴⁸ che prevedono di (i) esaminare «la tipologia della muratura (a un paramento, a due o più paramenti, con o senza collegamenti trasversali, ...), e le sue caratteristiche costruttive (eseguita in mattoni o in pietra, regolare, irregolare, ...)» al fine di individuare la tipologia corrispondente nella tabella dei parametri e (ii) valutarne la qualità con riferimento al rispetto della "regola

adiacenti, connessi o in aderenza ad esso. A tal fine dovrà essere individuata, in via preliminare, l'unità strutturale (US) oggetto di studio, evidenziando le azioni che su di essa possono derivare dalle unità strutturali contigue. Ove necessario, tale analisi preliminare dovrà considerare l'intero aggregato, al fine di individuare le relative connessioni spaziali fondamentali, con particolare attenzione al contesto ed ai meccanismi di giustapposizione e di sovrapposizione.

⁴⁷ Sono distinte verifiche in situ "limitate" o "estese ed esaustive". Nelle verifiche limitate la qualità delle connessioni tra i vari elementi strutturali possono essere valutate anche «sulla scorta di una conoscenza appropriata delle tipologie di solai e della muratura», mentre nelle verifiche estese ed esaustive tale controllo è eseguito sistematicamente su tutto l'edificio.

⁴⁸ Sono distinte indagini in situ "limitate", "estese" o "esaustive", il cui approfondimento crescente è legato alla esecuzione del numero e della tipologia di indagini diagnostiche eseguite per la caratterizzazione meccanica dei materiali. Solo nel caso di verifiche "limitate" non sono previste prove, ma solo il rilievo dell'apparecchio murario.

dell'arte"⁴⁹; risulta rilevante, a questo proposito, individuare «la presenza o meno di elementi di collegamento trasversali (es. diatoni), la forma, tipologia e dimensione degli elementi, la tessitura, l'orizzontalità delle giaciture, il regolare sfalsamento dei giunti, la qualità e consistenza della malta» inoltre «dovrà essere valutata la capacità degli elementi murari ad assumere un comportamento monolitico in presenza delle azioni sismiche, valutandone la qualità della connessione interna e trasversale attraverso saggi localizzati, che interessino lo spessore murario».

L'esecuzione di queste indagini di base associata a un rilievo geometrico-strutturale completo – che nel caso di un edificio compreso in un aggregato edilizio deve prevedere anche l'analisi delle interazioni con gli edifici contigui – consente di raggiungere il livello di conoscenza più basso (Figura 1.4). Una conoscenza adeguata (LC2) per la norma si ottiene associando alla valutazione della qualità muraria (i) una analisi sistematica dei dettagli costruttivi (verifiche estese) e (ii) l'esecuzione di saggi interni allo spessore del muro e prove diagnostiche di caratterizzazione meccanica in numero pari ad almeno una prova per ogni tipologia muraria presente (indagini estese), oppure desumendo i dati da prove eseguite su murature simili di edifici afferenti alla stessa area/zona geografica. L'esecuzione di più prove che, per numero e qualità, siano tali da consentire di valutare le caratteristiche meccaniche della muratura consente di raggiungere il livello di conoscenza più alto (LC3).

Livello di Conoscenza	Geometria	Dettagli costruttivi	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	Rilievo strutturale	Limitate verifiche in-situ	Limitate indagini in-situ	Tutti	1.35
LC2		Estese ed esaustive verifiche in-situ	Estese indagini in-situ	Tutti	1.20
LC3			Esaustive indagini in-situ	Tutti	1.00

Figura 1.4 - Tabella 11.5.1 (OPCM3431/2005) – Livelli di conoscenza in funzione della informazione disponibile e relativi valori dei fattori di confidenza per edifici in muratura

L'individuazione del livello di conoscenza è principalmente funzionale alla scelta dei valori dei parametri meccanici definiti dalla tabella 11.D.1. Il fattore di confidenza è utilizzato solo nell'ambito dell'analisi lineare (statica e dinamica), riducendo le resistenze o aumentando le sollecitazioni trasmesse agli elementi duttili (moltiplica le resistenze). Nell'analisi cinematica il suo uso non è previsto.

⁴⁹ Antonino Giuffrè affermava che la corrispondenza alla regola dell'arte delle caratteristiche costruttive di un elemento strutturale è garanzia sufficiente della sua buona qualità meccanica; in particolare per le murature, la rispondenza del muro ai requisiti della regola dell'arte garantisce il comportamento monolitico del muro in risposta al meccanismo di ribaltamento. Cfr. A. Giuffrè, Guida al progetto di restauro antisismico”, in A. Giuffrè (a cura di), *Sicurezza e conservazione dei centri storici in zona sismica. Il caso Ortigia*, Edizioni La Terza, Bari 1993, pag. 151-188.

Nelle NTC08 il tema delle costruzioni esistenti è trattato al capitolo §8 e le indicazioni sulla conoscenza sono solo accennate al paragrafo §8.5 (Procedure per la valutazione della sicurezza e la redazione dei progetti), e descritte estesamente nella relativa Circolare n. 617/2009 al paragrafo §C8.5.

Rispetto alla precedente Ordinanza alle attività del rilievo geometrico e della caratterizzazione meccanica dei materiali si aggiunge l'analisi storico-critica che, per gli edifici murari, è finalizzata alla definizione della storia costruttiva dell'edificio con particolare riguardo alla individuazione dei terremoti subiti nel tempo. Per la norma la ricerca storica è una sorta di «valutazione sperimentale della vulnerabilità sismica dell'edificio» che consente di dedurre importanti considerazioni sul comportamento strutturale a patto che non siano intervenute trasformazioni della configurazione strutturale.

Riguardo la caratterizzazione meccanica dei materiali, la norma chiarisce che le eventuali indagini devono essere illustrate in un programma che ne attesti la necessità e che, nel caso di edifici tutelati, ne valuti l'impatto in termini di conservazione del monumento.

L'Appendice C8A al paragrafo §C.8.A.1 introduce i criteri per la "Stima dei livelli di conoscenza e dei fattori di confidenza". Per questa operazione la norma definisce dei criteri specifici per ciascuna tipologia strutturale (muratura, cemento armato e acciaio).

Il paragrafo §C8A.1.A (Dati necessari e identificazione del livello di conoscenza) è dedicato agli edifici in muratura. Le indicazioni sui dati da raccogliere per i vari aspetti della conoscenza sono del tutto analoghi a quelli enunciati dalla Ordinanza del 2005.

Per la definizione del livello di conoscenza non sono tenuti in conto i risultati dell'analisi storico-critica, mentre sono fondamentali la definizione del rilievo geometrico e del quadro fessurativo e lo studio dei dettagli costruttivi. Le NTC08 confermano sostanzialmente i criteri individuati precedentemente per la definizione di verifiche in situ 'limitate' o 'estese ed esaustive' e indagini in situ 'limitate', 'estese', 'esaustive', oltre che le indicazioni per la valutazione della qualità muraria.

Al paragrafo §C8A.1.A.4 sono definiti i Livelli di Conoscenza (LC1, LC2, LC3) e i rispettivi Fattori di Confidenza (FC) che rimangono analoghi a quelli dell'Ordinanza 2005 (Figura 1.5).

Inoltre, ai fini dell'individuazione del Livello di Conoscenza, rimane abbastanza determinante il numero e la tipologia delle indagini diagnostiche effettuate per la determinazione dei parametri meccanici dei materiali⁵⁰, senza le quali il livello di conoscenza rimane quello più basso, corrispondente a un valore di $FC=1,35$ ⁵¹.

⁵⁰ È possibile utilizzare prove eseguite su murature/materiali della stessa area geografica «qualora esista una chiara, comprovata corrispondenza tipologica per materiali, pezzatura dei conci, dettagli costruttivi» Cfr. § C8A.1.A.3 dell'Appendice C8A della Circolare n. 617/2009.

⁵¹ Cfr. § C8A.1.A.4 dell'Appendice C8A della Circolare n. 617/2009.

Il Livello di Conoscenza – per le NTC08 – determina l’intervallo dei parametri meccanici da utilizzare nell’ambito dell’analisi numerica, che si desumono dalla tabella C8A.2.1⁵² e possono essere i minimi (LC1) i medi (LC2 o LC3) o i valori desunti dalle prove in situ (LC3), come da Figura 1.5.

Livello di Conoscenza	Geometria	Dettagli costruttivi	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	Rilievo muratura, volte, solai, scale. Individuazione carichi gravanti su ogni elemento di parete Individuazione tipologia fondazioni. Rilievo eventuale quadro fessurativo e deformativo.	verifiche in situ limitate	Indagini in situ limitate Resistenza: valore minimo di Tabella C8A.2.1 Modulo elastico: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1	Tutti	1.35
LC2			Indagini in situ estese Resistenza: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1 Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1		1.20
LC3		verifiche in situ estese ed esaustive	Indagini in situ esaustive -caso a) (disponibili 3 o più valori sperimentali di resistenza) Resistenza: media dei risultati delle prove Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1 -caso b) (disponibili 2 valori sperimentali di resistenza) Resistenza: se valore medio sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, valore medio dell’intervallo di Tabella C8A.2.1; se valore medio sperimentale maggiore di estremo superiore intervallo, quest’ultimo; se valore medio sperimentale inferiore al minimo dell’intervallo, valore medio sperimentale. Modulo elastico: come LC3 – caso a). -caso c) (disponibile 1 valore sperimentale di resistenza) Resistenza: se valore sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, oppure superiore, valore medio dell’intervallo; se valore sperimentale inferiore al minimo dell’intervallo, valore sperimentale. Modulo elastico: come LC3 – caso a).		1.00

Figura 1.5 – Tabella C8A.1.1 contenente livelli di conoscenza in funzione dell’informazione disponibile e conseguenti valori dei fattori di confidenza per edifici in muratura. Appendice C8A, pag. 379.

Il Fattore di Confidenza si applica in modo differente a seconda del modello di analisi. Rispetto alla Ordinanza 2005, il FC è utilizzato anche nell’analisi cinematica e riduce la capacità dell’edificio. È interessante notare come al paragrafo §C8A.4⁵³ nel caso in cui il

⁵² Vedi Appendice C8A (Circolare 617/2009) pag. 389. La tabella raccoglie i valori di riferimento dei parametri meccanici (minimi e massimi) e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura, riferiti alle seguenti condizioni: malta di caratteristiche scarse, assenza di ricorsi (listature), paramenti semplicemente accostati o mal collegati, muratura non consolidata, tessitura (nel caso di elementi regolari) a regola d’arte.

⁵³ V. pag. 399 Appendice C8A.

modello non tiene conto della resistenza a compressione della muratura si utilizzerà un $FC=1,35$ che corrisponde al Livello di Conoscenza più basso⁵⁴.

1.4 La conoscenza dell'edificio per la conservazione: i documenti di indirizzo per il restauro in zona sismica.

Il documenti di indirizzo nascono con l'intento primario di fornire un approccio metodologico per la formulazione del progetto di restauro in zona sismica concettualmente in linea con le richieste normative ma opportunamente precisato sulla base delle esigenze di conservazione del portato storico-culturale del patrimonio costruito. Il ruolo della conoscenza dell'edificio in questi documenti è fondamentale e stabilisce la differenza di fondo con l'approccio normativo, specialmente per l'importanza assegnata allo studio della storia costruttiva dell'edificio.

Con l'introduzione, da parte del DM81, del concetto di "adeguamento sismico", contestualmente alla riparazione del danno sismico, è fatto obbligo di adeguare gli edifici esistenti ai livelli di sicurezza per le nuove costruzioni, operazione che rende indispensabile la verifica quantitativa del raggiungimento di tali standard. In particolare i metodi di calcolo utilizzati per la verifica di sicurezza⁵⁵ presuppongono la presenza di diaframmi rigidi e comportamento scatolare⁵⁶.

L'adozione generalizzata di tali approcci anche negli interventi di restauro degli edifici storici (in particolare per gli edifici monumentali) determina un acceso dibattito culturale sulla possibilità del raggiungimento di una sicurezza adeguata coerentemente con l'istanza di conservazione.

Nel 1984 è istituito il «Comitato nazionale per la prevenzione del patrimonio culturale dal rischio sismico»⁵⁷ (da qui Comitato Sismico) con l'obiettivo di individuare delle adeguate

⁵⁴ Sebbene possa apparire (e forse sia) eccessivamente cautelativa, tale indicazione introduce all'interno di un modello fortemente idealizzato, come quello di corpo rigido, la considerazione di aspetti di natura costruttiva (quali la conoscenza della qualità delle connessioni) che, in assenza della drastica semplificazione normativa, richiederebbero valutazioni più articolate ma ugualmente convenzionali.

⁵⁵ Come detto in precedenza (vedi nota 19), per le verifiche è suggerito il Metodo POR.

⁵⁶ Tra gli interventi suggeriti dal DM81 sono presenti: l'introduzione di solai in cemento armato o in acciaio e, per le murature, l'applicazione di fodere armate con rete elettrosaldata su entrambe le pareti, la cerchiatura di vani porta e finestra con telai in cemento armato nel caso di disposizione irregolare delle aperture, l'inserimento di pilastri in c.a. nelle pareti murarie.

⁵⁷ Il Comitato Sismico è istituito con Decreto Interministeriale del Ministero dei Beni culturali e ambientali e del Ministro per il coordinamento della Protezione Civile del 7 agosto 1984 ed è presieduto da Romeo Ballardini. Con D. I. del 29 dicembre 1988 il Comitato Sismico è ampliato con docenti universitari, che si affiancano ai soprintendenti e i funzionari del Ministero. L'attività del Comitato si realizza attraverso la stipula di convenzioni tra il Ministero e i Dipartimenti universitari e Enti in possesso di esperienza e competenza nel campo del restauro e del rischio sismico del patrimonio culturale.

strategie di prevenzione del rischio sismico e di intervento sul patrimonio danneggiato coerenti con l'istanza di conservazione del patrimonio culturale.

Dal punto di vista normativo, il DM86 introduce la possibilità – oltre all'adeguamento – dell'intervento di “miglioramento sismico” che consente l'incremento di sicurezza attraverso operazioni che non necessariamente mutino il comportamento originario dell'edificio⁵⁸.

Al DM86 segue il primo documento di indirizzo elaborato dal Comitato Sismico, la ‘Circolare Ballardini’⁵⁹, in cui si afferma che «l'obiettivo degli interventi sul patrimonio monumentale per quanto attiene alla sicurezza alle azioni sismiche, è assimilabile al miglioramento» e che tali interventi «devono essere caratterizzati da un aumento di sicurezza nei confronti delle azioni sismiche senza però che si ponga in modo rigido il problema del rispetto delle verifiche formali nei confronti delle azioni sismiche di progetto previste per le nuove costruzioni».

La Circolare definisce i concetti fondamentali che pongono le basi per un coerente approccio al progetto del restauro in zona sismica, le cui scelte devono provenire da un bilanciamento tra gli esiti di una conoscenza approfondita dell'edificio⁶⁰.

Nell'agosto del 1996 sono approvate le *Linee guida per la redazione dei progetti esecutivi concernenti interventi di recupero e di conservazione di costruzioni appartenenti al patrimonio culturale della Val di Noto*⁶¹, con particolare riferimento agli aspetti di restauro e della sicurezza sismica, redatte da una Commissione⁶² istituita – a seguito del crollo della Cattedrale di Noto

⁵⁸ Il DM96 definisce l'intervento di miglioramento sismico come «l'esecuzione di una o più opere riguardanti i singoli elementi strutturali dell'edificio con lo scopo di conseguire un maggior grado di sicurezza senza peraltro modificarne in maniera sostanziale il comportamento globale» (§C9.1.2).

⁵⁹ Ministero dei Beni culturali e ambientali, Circolare 18 luglio 1986 n. 1086, Interventi sul patrimonio monumentale a tipologia specialistica in zone sismiche: raccomandazioni.

⁶⁰ La Circolare precisa che la fase di conoscenza espressa dal DM86 ai punti §C9.2.3 e 4, ‘operazioni’ e i ‘criteri progettuali’, che deve prevedere: lo studio storico-critico delle trasformazioni avvenute espresse anche graficamente; l'analisi della storia sismica; un accurato rilievo plano-altimetrico; un dettagliato rilievo critico in cui i dati acquisiti dalle fonti opportunamente incrociati con dati reperiti in situ mediante indagini diagnostiche; una relazione sulla causa e l'entità dei dissesti.

⁶¹ Commissione “Recupero del patrimonio culturale della Val di Noto”, *Linee guida per la redazione dei progetti esecutivi concernenti interventi di recupero e di conservazione di costruzioni appartenenti al patrimonio culturale della Val di Noto, con particolare riferimento alla esigenza di conciliare gli aspetti del restauro con quelli della sicurezza sismica*, Siracusa, 30 agosto 1996.

⁶² Decreto Legge 25 marzo 1996 n. 162, art. 3 comma 2, reiterato con Decreto Legge 26 luglio 1996 n. 393 recanti “Interventi urgenti di protezione civile”. La commissione è presieduta dall'assessore regionale alla pubblica istruzione e ai beni culturali ed ambientali e composta dai soprintendenti per i beni culturali e ambientali competenti, dai direttori degli uffici del genio civile competenti nonché dal direttore dell'Istituto centrale per il restauro del Ministero per i beni culturali e ambientali e dal presidente del

del 13 marzo 1996 – per gli interventi e per la validazione dei progetti di restauro conservativo finanziati con i fondi pubblici stanziati dopo il sisma del 13 dicembre del 1990.

Il presupposto metodologico, per la prima volta sancito da una legge dello Stato⁶³, è quello di conciliare nelle scelte di intervento «gli aspetti del restauro e quelli dalla sicurezza sismica». Il testo mira a sintetizzare una metodologia per il progetto di miglioramento sismico che sia coerente con la logica strutturale e le esigenze di conservazione dell'architettura storica. Il criterio di base per la formulazione del progetto è quello del “minimo intervento”. La conoscenza dell'edificio assume un ruolo fondamentale nel processo progettuale e deve dimostrare l'effettiva necessità di ciascuna scelta progettuale; il rilievo diretto e l'analisi storica sono gli strumenti di studio privilegiati⁶⁴.

Obiettivi e contenuti analoghi caratterizzano le «Istruzioni generali per la redazione dei progetti di restauro nei beni architettonici di valore storico-artistico in zona sismica»⁶⁵ emanate nel 1997 – dopo il terremoto di Umbria e Marche – che mettono a frutto il lavoro del Comitato Sismico – anticipato dalla Circolare Ballardini e dalle Direttive Ministeriali del 1991⁶⁶. L'obiettivo delle Istruzioni è duplice: (i) delineare una metodologia per la conoscenza del patrimonio architettonico che consenta di valutare - anche in regime di gestione ordinaria - la necessità di un intervento, (ii) nell'ipotesi di un progetto evitare interventi superflui e incoerenti con la logica strutturale intrinseca dell'edificio storico.

Il miglioramento sismico deve avvenire senza prevedere interventi che stravolgano l'organismo originario, la sua logica strutturale e le fasi costruttive che sono «ad esso organicamente connesse e fisiologicamente connaturati».

Gruppo nazionale per la difesa dai terremoti del Consiglio nazionale delle ricerche (CNR), il direttore dell'Istituto Centrale di Restauro (ICR).

⁶³ Le Linee Guida della Val di Noto sono approvate dal Parlamento con la Legge n. 496 del 25 settembre 1996.

⁶⁴ L'analisi storica e archivistica (e l'analisi tipologica) rappresentano la prima fase conoscitiva che consente di definire il comportamento statico dell'edificio e della sua evoluzione nel tempo, con particolare riguardo alla “storia sismica” della zona e dell'edificio che consente l'individuazione di interventi di riparazione o manutenzione, quando documentati. In particolare, se la zona ha già subito il massimo terremoto atteso, le informazioni sui danni subiti dall'edificio forniranno un contributo decisivo alle valutazioni di sicurezza, anche di ordine superiore alle valutazioni numeriche, e quindi alle scelte progettuali. Ogni aspetto indagato attraverso il rilievo (tipologia costruttiva, geometria, quadro fessurativo, fondazioni) dovrà essere letto nel suo sviluppo storico.

⁶⁵ Ministero Beni Culturali e Ambientali - Ministero dei Lavori Pubblici, *Istruzioni generali per la redazione di progetti di restauro nei beni architettonici di valore storico-artistico in zona sismica*, approvato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici nella seduta del 28 novembre 1997, protocollo 564.

⁶⁶ Ministero Beni Culturali e Ambientali, Circolare n. 1841 del 12 marzo 1991 contenente *Direttive Direttive per la redazione ed esecuzione di progetti di restauro comprendenti interventi di miglioramento e manutenzione nei complessi architettonici di valore storico-artistico in zona sismica*.

Sono previsti tre livelli di progettazione – preliminare, definitiva ed esecutiva - descritti nell'ambito delle Operazioni progettuali.

La finalità del progetto preliminare è impostare un modello scientifico di conoscenza che consenta la raccolta coerente di dati provenienti da vari settori disciplinari. L'obiettivo in questo ambito è conoscere la patologia del manufatto e chiarire la necessità di un intervento – sia di manutenzione straordinaria o di miglioramento sismico – e valutare la sua entità sulla base del criterio della «giusta misura» e del «minimo intervento».

Il quadro delle conoscenze definisce quali indagini sono necessarie per l'ottenimento di una adeguata conoscenza del manufatto. Le indagini sono suddivise dal testo nei seguenti «settori», quali: l'analisi storico-critica, il rilievo del manufatto, la diagnostica sul campo ed in laboratorio, l'individuazione del comportamento strutturale.

L'analisi storico-critica è tesa alla ricostruzione degli eventi subiti dall'edificio, alla comprensione delle modificazioni che hanno inciso sul comportamento strutturale e alla risposta esibita dal manufatto a tali eventi.

Il rilievo del manufatto è lo strumento fondamentale di analisi ed è declinato nelle due accezioni di rilievo morfologico-descrittivo e rilievo critico. In particolare, il rilievo critico⁶⁷ è inteso come una elaborazione che illustra le caratteristiche costruttive e la configurazione dell'edificio nella loro evoluzione storica. In altre parole, questo particolare tipo di rilievo (già ripreso dalla Circolare Ballardini), mira a costruire un quadro completo della conoscenza dell'edificio funzionale alla interpretazione dello stato attuale.

La diagnostica - per le Istruzioni ministeriali - è principalmente tesa alla definizione delle caratteristiche meccaniche e fisico-chimiche dei materiali, è messa a supporto delle precedenti operazioni di analisi ed è finalizzata all'accertamento della efficacia delle soluzioni progettuali e alla dimostrazione della loro necessità.

La individuazione del comportamento strutturale avviene attraverso il rilievo accurato del manufatto, dal punto di vista della configurazione geometrica, del degrado e dei dissesti eventualmente in atto.

⁶⁷ La definizione di "rilievo critico" in prima istanza è stata utilizzata per la descrizione grafica delle varie fasi costruttive leggibili sugli elevati di un edificio, mutuando dalla analisi stratigrafica (utilizzata per i rilievi archeologici) il metodo di lettura e l'adozione di codici identificati delle varie epoche (cfr. F. Doglioni, *Il rilievo critico su base stratigrafica. L'individuazione di elementi e di ambienti del manufatto edilizio*, in R. Francovich, R. Parenti (a cura di), *Archeologia e restauro dei monumenti*, Firenze 1988). Nell'accezione della norma questo elaborato comprende una sintesi delle informazioni provenienti dall'indagine diretta e quelli desunti dalle fonti storiche che può indirizzare ulteriori indagini specialistiche: «il rilievo "critico" presenta una maggiore complessità e richiede il confronto tra l'osservazione del manufatto, intesa come fonte diretta, e le conoscenze storiche desunte [dall'analisi storica]. La storia del processo di trasformazione del manufatto fornisce utili indicazioni per localizzare le zone interessabili da eventuali rilievi particolareggiati e/o sondaggi.»

Le Istruzioni del Comitato Sismico sono il riferimento normativo dei documenti di indirizzo⁶⁸ e attività di ricerca formulati a livello regionale⁶⁹ per supportare la ricostruzione dei territori colpiti dal sisma del 1997.

Il contributo della comunità scientifica e della ricerca universitaria ha favorito il riavvicinamento della cultura tecnico-scientifica alle peculiarità delle antiche fabbriche, perseguita in primo luogo mediante la illustrazione delle tecniche costruttive premoderne nelle loro declinazioni locali. È il contributo di conoscenza offerto dai *manuali del recupero* pubblicati a partire dalla fine degli anni '80 quali quello della città di Roma⁷⁰, di Città di Castello⁷¹, di Palermo⁷² (Figura 1.6).

⁶⁸ Commissario Delegato, Codice di pratica (Linee Guida) per gli interventi di riparazione restauro e miglioramento sismico dei beni architettonici danneggiati dal terremoto umbro-marchigiano del 1997, Bollettino Ufficiale della Regione Marche, 29 settembre 2000, Anno XXXI, n. 15 (edizione straordinaria). Contratto di ricerca tra commissario delegato per la Regione Marche e IUAV (D.G.R. n. 78 PR/CBC del 18 gennaio 1999 - Convenzione reg. int. 2709 del 25 maggio 1999). Il codice di pratica ha come riferimento gli esiti della ricerca svolta dal CNR-GNDT sul patrimonio culturale danneggiato dal sisma del Friuli nel 1976 sul danno sismico delle chiese (v. F. Doglioni, V. Petrini, *Le chiese e il terremoto...*, LINT, 1994). Nell'ambito della suddetta ricerca è formulata la definizione di *macroelemento*, intesa come «una parte costruttivamente riconoscibile e compiuta del manufatto, che può coincidere - ma non necessariamente coincide- con una parte (identificabile anche sotto l'aspetto architettonico e funzionale (es. facciata, abside, cappelle); è di norma estesa almeno ad una intera parete o ad un orizzontamento, ma solitamente è formata da più pareti ed elementi orizzontali connessi tra loro a costituire una parte costruttivamente unitaria e, in alcuni casi, volumetricamente definita, pur se in genere collegata e non indipendente dal complesso della costruzione. In realtà, il criterio-guida nella definizione del concetto di macroelemento e nella sua applicazione pratica per la suddivisione in parti della fabbrica è solo marginalmente ed in subordine di natura architettonica e strutturale, così come formulabile in base a suddivisioni classiche della fabbrica; infatti, il principio fondamentale adottato per la suddivisione in macroelementi -che, in sostanza, ne legittima l'applicazione in questa ricerca- costituisce già il risultato di una prima osservazione del comportamento sotto sisma degli edifici e del loro modo di discretizzarsi in parti macroscopiche» (da A. de Colle, F. Doglioni, L. Mazzorana, *La definizione e l'utilizzo del concetto di macroelemento*, in: *Le chiese e il terremoto*, op. cit.)

⁶⁹ Si segnalano a tal proposito gli esiti delle attività di ricerca condotte per la Regione Marche dopo il terremoto del 1997 contenute in C. Carocci, V. Ceradini, I. Cremonini, M. Panzetta, *Recupero e riduzione della vulnerabilità dei centri storici danneggiati dal sisma del 1997*, Regione Marche, Ancona 2004.

⁷⁰ P. Marconi, F. Giovanetti, E. Pallottino (direzione scientifica), *Manuale del recupero del Comune di Roma*, Roma 1989; F. Giovanetti (a cura di), *Manuale del recupero del Comune di Roma*. Seconda edizione ampliata, DEI Tipografia del Genio Civile, Roma 1997.

⁷¹ F. Giovanetti (a cura di), *Manuale del recupero di Città di Castello*, DEI Tipografia del Genio Civile, Roma 1992.

⁷² P. Marconi, F. Giovanetti (a cura di), *Manuale del recupero del centro storico di Palermo*, Flaccovio, Palermo 1997.

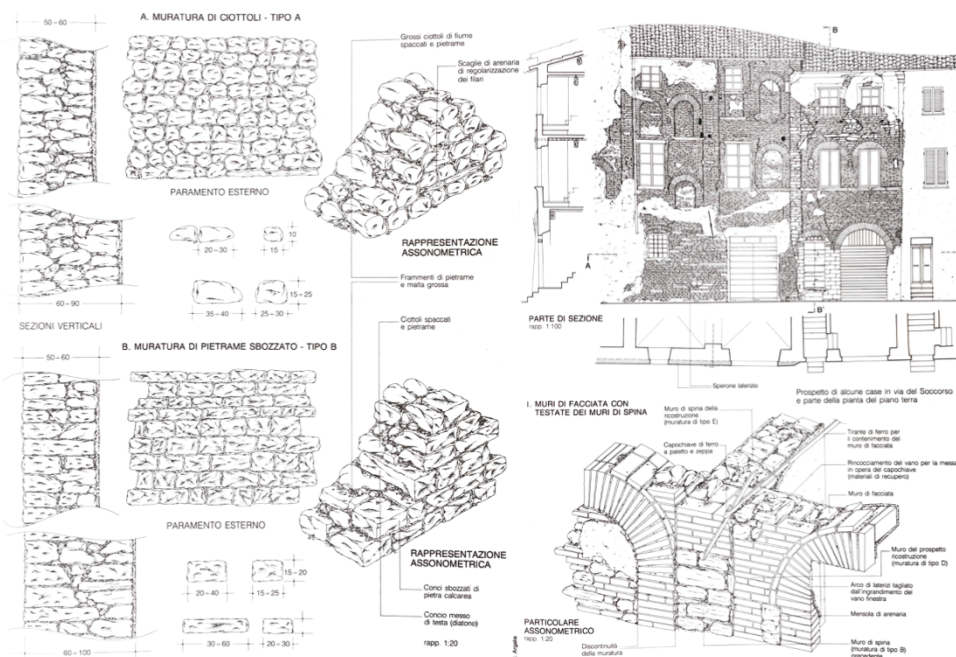


Figura 1.6 – Analisi delle murature e dei dettagli costruttivi (fonte: F. Giovanetti (a cura di), Manuale del recupero di Città di Castello, Roma 1989)

Per quanto concerne più specificatamente l'ambito del restauro strutturale un contributo essenziale proviene dai codici di pratica per gli interventi di miglioramento sismico dei centri storici⁷³, quali il codice di Ortigia⁷⁴, dei Sassi di Matera⁷⁵ e di Palermo⁷⁶.

La metodologia dei suddetti Codici si fonda sul criterio secondo cui un edificio murario ben costruito, o meglio costruito secondo la regola dell'arte, è in grado di sopportare il terremoto in sicurezza. Il cardine della metodologia è la approfondita analisi della tecnica costruttiva locale – e in particolare dello studio della qualità muraria – condotta in relazione alla efficacia antisismica; l'obiettivo primario del progetto di restauro è sanare le eventuali precarietà (dovute a errori costruttivi o a particolari configurazioni insufficienti delle tecniche costruttive locali) e ricondurre la fabbrica allo stato di edificio costruito a regola dell'arte. L'istanza della

⁷³ A. Giuffrè (a cura di), *Centri storici in zona sismica, analisi tipologica della danneggiabilità e tecniche di intervento conservativo*. Castelvetero sul Calore, Studi e Ricerche n. 8 novembre 1988, Università degli Studi di Roma la Sapienza - Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica.

⁷⁴ A. Giuffrè (a cura di), *Sicurezza e conservazione dei centri storici in zona sismica. Il caso Ortigia*, Edizioni La Terza, Bari 1993.

⁷⁵ A. Giuffrè, C. F. Carocci (a cura di), *Codice di pratica per la sicurezza e la conservazione dei Sassi di Matera*, Edizioni La Baitta, Matera, 1997.

⁷⁶ A. Giuffrè, C. F. Carocci (a cura di), *Codice di pratica per la sicurezza e la conservazione del centro storico di Palermo*, Editori Laterza, Palermo, 1999.

conservazione nel progetto di miglioramento sismico è garantita dalla elaborazione di tecniche di intervento precisate all'interno della logica costruttiva muraria.

Lo strumento di base per le attività della conoscenza nel codice di pratica è il rilievo costruttivo finalizzato alla valutazione della qualità antisismica degli elementi strutturali.

1.5 Considerazioni

La conoscenza preliminare dell'edificio nel progetto di restauro in zona sismica comincia ad assumere un ruolo nella normativa tecnica dal 1986. Il DM86 e i successivi DM87 e DM96, si limitano a sottolineare che il progetto sull'edificio esistente deve pervenire da uno studio preliminare che definisca la storia costruttiva del fabbricato e lo schema strutturale attuale, e rimangono generiche sugli strumenti di indagine utili a tale scopo e sui risultati da ottenere. L'analisi delle murature è più incentrata sulla determinazione di dati quantitativi, quali la resistenza dei materiali, e l'importanza della ricerca storica e della ricostruzione delle trasformazioni è solo accennata.

La procedura della normativa italiana per il progetto di miglioramento e adeguamento sismico degli edifici esistenti (DM86-DM96) a livello concettuale rappresenta una innovazione nell'approccio progettuale che si deve basare sulla conoscenza dello stato di fatto. Tuttavia, dal testo si evince una filosofia dell'intervento volta principalmente all'aumento della resistenza dell'edificio murario, considerato – di base – inadeguato a sopportare le azioni sismiche. Inoltre, la proposta e la illustrazione dettagliata di provvedimenti tecnici specifici è un ulteriore elemento di scollamento con la logica costruttiva muraria (oltre che dal lessico costruttivo locale) che riduce l'intervento di consolidamento alla esecuzione di soluzioni standardizzate.

L'approccio suggerito per la verifica di sicurezza è mutuato dalle analisi eseguite sulle strutture in cemento armato o acciaio, infatti perché siano valide le ipotesi di calcolo l'edificio murario deve avere delle caratteristiche specifiche diverse da quelle tradizionali (solai rigidi, murature iniettate, collegamenti rigidi)⁷⁷.

Le indicazioni per la conoscenza dell'edificio esistente nelle norme tecniche – introdotte in generale per ogni tipologia strutturale – fino alla OPCM 2005 rimangono molto generiche.

Il processo progettuale indicato dalle norme tecniche mira principalmente ad acquisire dati quantitativi utili alla definizione del modello strutturale utilizzato per la verifica di sicurezza. Questa preferenza da parte della norma è legata al metodo di analisi suggerito per l'esecuzione

⁷⁷ Con il DM81 (Appendice della Circolare del 20 luglio 1981 n. 21745) sono proposti dei metodi di verifica sismica il cui obiettivo è valutare la resistenza a taglio dell'edificio ammettendo il comportamento elasto-plastico della parete a duttilità limitata (metodo POR, Tomaževic, M., *The computer program POR*, Report ZRMK, 1978). Gli assunti di base per la validità dell'approccio sono collegamenti rigidi tra tutte le pareti e solai. Bisogna accertare queste condizioni perché sia attendibile quella modalità di verifica.

delle verifiche sismiche. E forse non è un caso che l'approccio conoscitivo delle norme italiane muta radicalmente con l'OPCM 3431/2005, nell'ambito della quale, oltre ai metodi di analisi statica e dinamica, per la prima volta è introdotto il metodo dell'analisi cinematica, i cui modelli meccanici richiedono dati di input che riguardano più strettamente la realtà costruita dell'edificio, quali la configurazione geometrica-strutturale, la qualità muraria in relazione al comportamento monolitico, la presenza di sconessioni tra gli elementi, ecc.

Tuttavia, per le norme tecniche – italiane e internazionali – la conoscenza dell'edificio è ritenuta adeguata (LC2) quando al rilievo diretto è associata una campagna di indagini di caratterizzazione meccanica più o meno diffusa, in mancanza della quale il Livello di conoscenza è considerato sempre il più basso ($FC_{LC1}=1,35$)(Figura 1.7).

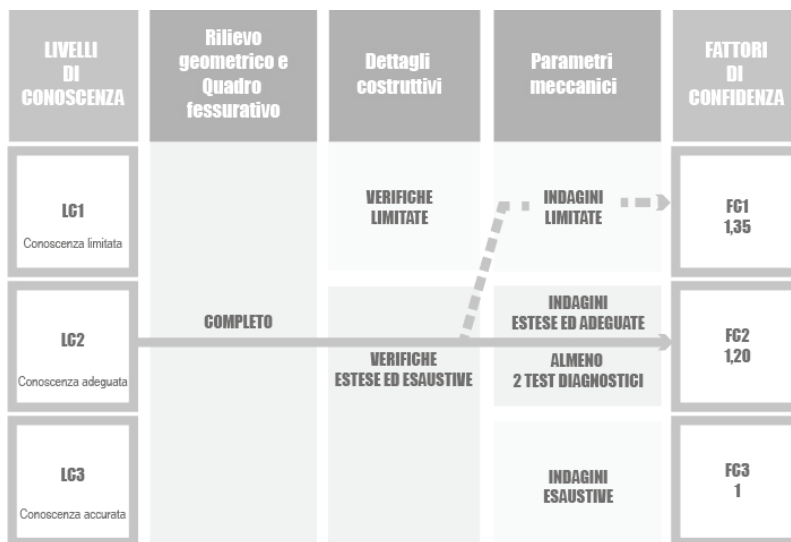


Figura 1.7 – Indagini necessarie per il raggiungimento di una conoscenza adeguata (Eurocodice 8-3, NTC08)

2. Le “Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale”. Una lettura critica.

2.1 Introduzione

L’esigenza di definire linee guida per la valutazione del rischio sismico dei beni culturali e per la redazione dei progetti di miglioramento sismico deriva dalla consapevolezza che il terremoto rappresenta una delle principali cause di danneggiamento e – nei casi peggiori – di perdita del patrimonio costruito, e dalla constatata inadeguatezza dell’approccio al progetto di consolidamento finalizzato esclusivamente ad aumentare la rigidezza e la resistenza dell’edificio murario⁷⁸.

Tale approccio ha spesso condotto a interventi incongrui, invasivi o inefficaci dettati da una scarsa attenzione alla esigenza della conservazione del portato storico-costruttivo con un risultato che – come vediamo oggi – va spesso a detrimento della sicurezza che ha invece informato quelle scelte. Si è constatato che l’introduzione di elementi strutturali volti a modificare radicalmente il comportamento dell’edificio (quali fodere armate, pilastri in c.a., ...) determina ibridi strutturali la cui risposta sismica è difficilmente prevedibile e in alcuni casi peggiorativa rispetto alla debolezza che si vuole eliminare.

Oggi è ampiamente condivisa dalla comunità scientifica l’idea che le azioni finalizzate alla riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale devono perseguire il duplice obiettivo della sicurezza e della conservazione. Le modalità per operare in questa direzione sono strettamente legate al monumento oggetto di intervento. I due obiettivi sono perseguibili qualora sia possibile ridurre la vulnerabilità dell’edificio con interventi minimi, precisati all’interno della logica strutturale muraria⁷⁹. Qualora questa via non sia perseguibile e gli interventi necessari a garantire la sicurezza implicino la modifica radicale della natura costruttiva del monumento, allora è possibile intervenire sulla “esposizione” scegliendo una funzione che ne limiti l’utilizzo – o nel caso estremo lo vieti del tutto – e individuando

⁷⁸ Lagomarsino S., *Le nuove Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, allineate alle Norme Tecniche per le Costruzioni 2008*, Seminario CIAS (Centro Internazionale di Aggiornamento Sperimentale-Scientifico), “Riabilitazione del costruito e adeguamento sismico”, Genova, 2010, disponibile on-line <http://www.cias-italia.it/bibliografia.php>

⁷⁹ I criteri di fondo coerenti con la logica muraria sono la reversibilità e la compatibilità fisico-chimica e meccanica. L’intervento può essere rimovibile e modificabile senza arrecare danno all’edificio (così come un muro in pietra può essere smontato e rimontato in occasione di opere di ricostruzione parziale o consolidamento localizzato).

contestualmente opere provvisoriale che evitino la perdita del monumento e dei beni artistici in esso contenuti.

L'intervento che rende compatibile l'incremento della sicurezza con le istanze della conservazione ha come riferimento concettuale e pratico la categoria normativa del miglioramento sismico, che per definizione prevede l'esecuzione di opere che incrementano la sicurezza senza necessariamente raggiungere i livelli di sicurezza richiesti per le nuove costruzioni. Nell'intervento di miglioramento l'istanza formale e quella strutturale dell'architettura storica sono assolutamente inscindibili, per cui il processo progettuale che lo caratterizza è senza dubbio marcatamente multidisciplinare.

Le *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale* (da qui in poi *Linee Guida*), sono il punto di arrivo di un processo culturale durato circa 30 anni⁸⁰ e nascono con l'intento di definire una metodologia per la valutazione della sicurezza e il progetto di miglioramento sismico, coerente con l'approccio dettato dalla normativa tecnica ma opportunamente commisurato alle peculiarità del costruito storico, che possa essere un riferimento unitario per le due anime culturali del progetto di restauro – che, semplificando, rimandano alle competenze proprie rispettivamente degli architetti e degli ingegneri – facendole interagire attraverso la correlazione e calibrazione degli aspetti qualitativi e quantitativi che entrano in gioco nel progetto.

L'iter di formazione del testo è avviato a partire dalla Ordinanza PCM 3431/2005, in seguito alla quale è formata una commissione⁸¹ con l'incarico di predisporre le *Linee Guida* per l'applicazione delle norme tecniche delle costruzioni (NTC05) al patrimonio culturale⁸².

⁸⁰ Vedi *supra* § 1.4

⁸¹ Gruppo di lavoro ai sensi dell'art. 3 dell'OPCM 3431/2005, istituito con Decreto Interministeriale del 23 maggio 2005: Roberto Cecchi e Michele Calvi (coordinatori), Agostino Goretti (redazione del documento e segreteria, Dipartimento della Protezione Civile), Paolo Faccio (docente di Restauro architettonico, IUAV di Venezia) e Sergio Lagomarsino (docente di Tecnica delle costruzioni, Università degli Studi di Genova) (redazione documento), Antonio Borri (docente di Tecnica delle costruzioni, Università degli Studi di Perugia), Giovanni Carbonara (docente di Restauro architettonico, Università degli Studi di Roma "La Sapienza"), Giorgio Croci (docente di Tecnica delle costruzioni, Università degli Studi di Roma "La Sapienza"), Michele Jamiolkowski (docente di Geotecnica, Politecnico di Torino), Gaetano Manfredi (docente di Tecnica delle costruzioni, Università degli Studi di Napoli "Federico II"), Luciano Marchetti (Ministero per i Beni e le Attività Culturali, Direzione Regionale per i beni culturali e paesaggistici del Lazio), Claudio Modena (docente di tecnica delle costruzioni, Università degli Studi di Padova), Paolo Rocchi (docente di restauro architettonico, Università degli Studi di Roma "La Sapienza"), Carlo Viggiani (docente di geotecnica, Università degli Studi di Napoli "Federico II"), Carlo Blasi (docente di Restauro architettonico, Università degli Studi di Parma).

⁸² Le linee guida dovranno: «1) definire quali stati limite devono essere considerati per un edificio tutelato; 2) indicare quali modelli di calcolo e criteri di verifica possono essere idonei per gli edifici storici; 3) chiarire quali livelli di sicurezza possono essere accettati, ora che questi vengono esplicitamente calcolati (la possibilità di limitarsi ad interventi di miglioramento non significa che un livello di sicurezza eccessivamente basso debba essere accettato); 4) suggerire metodi semplificati per le verifiche da eseguirsi

Dopo la sua elaborazione, il documento è trasmesso al Dipartimento di Protezione Civile e al Ministero per i Beni e le Attività Culturali che, a loro volta, lo trasmettono al Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti per un esame da parte del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici; quest'ultimo, nel marzo 2006, istituisce una commissione istruttoria⁸³ che emenda il documento e lo rende coerente con le NTC 2005.

Le Linee Guida, approvate dal Consiglio Superiore dei Lavori pubblici, sono emanate come "Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 12 ottobre 2007", ma sono pubblicate nella Gazzetta Ufficiale gennaio 2008⁸⁴. Contestualmente sono pubblicate le nuove Norme Tecniche (NTC2008)⁸⁵ che introducono un nuovo approccio per la definizione dell'input sismico per cui le Linee Guida sono già inapplicabili⁸⁶.

Le Linee Guida istituivano una cabina di regia⁸⁷ costituita da esperti appartenenti alle istituzioni universitarie e al Dipartimento di Protezione Civile incaricati di monitorare l'applicazione delle Linee Guida e di predisporre degli aggiornamenti quando necessario. La cabina di regia ha quindi formato un gruppo tecnico di lavoro composto di esperti nel campo delle costruzioni in muratura e nel restauro⁸⁸ che ha modificato il testo per ottenere l'allineamento alle NTC 2008. Nel luglio 2010 il testo è approvato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici⁸⁹.

sull'intero patrimonio tutelato, con finalità di programmazione delle azioni di mitigazione del rischio» (da Lagomarsino 2010, pag. 74).

⁸³ Coordinamento: Valentino Chiumarulo. Componenti commissione: Silvio Albanesi, Pietro Baratonò, Marisa Bonfatti Paini, Franco Braga, Alberto Castellani, Roberto Cecchi, Elisabetta D'Antonio, Giacomo Di Pasquale, Giovanni Guglielmi, Giancarlo Imbrighi, Giovanni Manieri, Claudio Modena, Maddalena La Montagna, Aldo Linguitti, Paolo Rocchi, Alberto Prestininzi e Giancarlo Santariga. Ulteriori contributi di: Paolo Faccio, Sergio Lagomarsino e Aurelio Vetro.

⁸⁴ Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 12 ottobre 2007, Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, G.U. n. 24 del 29 gennaio 2008 (suppl. ord. n. 25).

⁸⁵ Supplemento Ordinario n. 30 della G.U. n. 29 del 4.2.2008

⁸⁶ Lagomarsino 2010

⁸⁷ La cabina di regia è formata da: Paolo Angeletti, Guglielmo Berlasso, Roberto Cecchi, Pietro Ciaravola, Mauro Dolce, D. Piccinini, Serena Virgadamo.

⁸⁸ Presidente: Pietro Ciaravola. Componenti del gruppo tecnico: Maria Agostiano, Franco Braga, Alberto Burghignoli, Roberto Di Marco, Giacomo Di Pasquale, Mauro Dolce, Paolo Faccio, Donatella Fiorani, Sergio Lagomarsino, Bruno Santoro.

⁸⁹ Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – Assemblea generale, Adunanza del 23 luglio 2010 protocollo n. 92, oggetto "Acquisizione parere sull'allineamento delle *Linee Guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale* alle nuove Norme Tecniche sulle Costruzioni.

Il testo è infine approvato come Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 9 ottobre 2011⁹⁰.

2.2 Finalità, contenuti e struttura delle Linee Guida

Le Linee Guida forniscono indicazioni per il progetto di restauro con miglioramento sismico dei beni architettonici tutelati in allineamento alle Norme Tecniche delle Costruzioni (D.M. 14 Gennaio 2008), al Codice dei beni culturali e alla Legge n. 64/74⁹¹.

Il corpo della Direttiva consta di sei capitoli (più un settimo capitolo di sintesi) e tre allegati (A, B, C)⁹². Al corpo principale sono affiancati due testi di approfondimento⁹³, cinque applicazioni esemplificative del metodo su edifici reali, la guida all'uso del «Sistema informativo per la valutazione della sicurezza sismica a scala territoriale (SIVARS)» e lo Schema di capitolato prestazionale.

Al capitolo 1 (Oggetto della Direttiva) è dichiarato l'intento delle Linee Guida:

«specificare un percorso di conoscenza, valutazione del livello di sicurezza nei confronti delle azioni sismiche e progetto degli eventuali interventi, concettualmente analogo a quello previsto per le costruzioni non tutelate, ma opportunamente adattato alle esigenze e peculiarità del patrimonio culturale»⁹⁴

Qui si sancisce anche il ruolo delle Linee Guida quali principale riferimento per quanto concerne le azioni sugli edifici tutelati. Il primo obiettivo è quindi proporre una metodologia per svolgere in modo congruo l'azione di tutela e prevenzione del rischio sismico del patrimonio culturale. Questa metodologia prende le mosse dalla conoscenza dell'edificio e specifica – come vedremo più avanti – i vari stadi cui si può svolgere la valutazione della sicurezza e, infine, gli eventuali interventi. È chiarito che la finalità dell'azione di tutela del

⁹⁰ Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 9 febbraio 2011 contenente “Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale. Allineamento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008”, G.U. n. 47 del 26/02/2011 - suppl. ord. n. 54

⁹¹ Legge del 2 febbraio 1974 n. 64 recante *Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche*, Gazzetta Ufficiale 21 marzo 1974 n. 76.

⁹² L'allegato A contiene il «Programma per il monitoraggio per lo stato di conservazione dei beni architettonici tutelati» e sistematizza in moduli schedografici il processo conoscitivo dell'edificio storico. L'Allegato B è dedicato alla «Analisi strutturale delle costruzioni storiche in muratura» e mira a sintetizzare le caratteristiche generalizzate degli edifici murari nell'ottica di una congrua impostazione del modello meccanico. L'Allegato C è dedicato specificatamente al «Modello per la vulnerabilità sismica delle chiese».

⁹³ S. Lagomarsino, «La vita nominale di un bene culturale: uno strumento per la prevenzione ed il miglioramento sismico»; P. Faccio, «Conoscenza e prevenzione».

⁹⁴ Linee Guida, pag. 3

manufatto «è quella di formulare, nel modo più oggettivo possibile, il giudizio finale sulla sicurezza e sulla conservazione garantite dall'intervento di miglioramento sismico».

Le Linee Guida sono riferite esclusivamente agli edifici in muratura – e ciò marca ulteriormente la distinzione di metodo rispetto alle strutture esistenti in cemento armato o acciaio – ed è possibile intuire la possibilità di rivolgere tale metodologia a tutti i manufatti che rispondono alla medesima logica costruttiva, siano essi di tipo monumentale (vincolati) ovvero ordinario⁹⁵.

Le Linee Guida riconoscono la difficoltà di stabilire metodi di analisi della sicurezza standardizzati per le architetture storiche sia per la loro singolarità costruttiva (anche dovuta alle trasformazioni avvenute nel tempo)⁹⁶, sia perché gli strumenti di analisi per le costruzioni in muratura sono ancora oggi oggetto di diffusa sperimentazione e quindi in continua evoluzione. Per questa ragione i metodi cui il testo fa riferimento hanno carattere non vincolante e saranno oggetto di aggiornamenti periodici⁹⁷.

Nel secondo capitolo sono illustrati i “Requisiti di sicurezza e conservazione”. In questo ambito le Linee Guida definiscono strumenti per la valutazione della sicurezza differenziati a seconda della scala dell'intervento e i relativi criteri da seguire. In nessun caso è fatto obbligo dell'adeguamento sismico, piuttosto gli interventi dovranno – per quanto possibile – limitarsi alla riparazione o intervento locale; la sicurezza e protezione sismica è comunque assicurata dal rispetto degli stati limite di riferimento, opportunamente rimodulati a partire da quelli definiti dalle NTC08. Ai due stati limite della norma (SLV ed SLD)⁹⁸ le linee guida affiancano lo stato

⁹⁵ Come abbiamo già discusso nel §1.5, la normativa di riferimento per le costruzioni ordinarie in muratura sono le NTC08 (Cap. 8) e la Circolare 617 (C.8). Tuttavia, la precisazione posta in questo punto offre la possibilità di estendere l'approccio a tutto il costruito murario storico; del resto i centri storici di cui si promuove la conservazione sono costituiti da architetture di tipo ordinario per le quali valgono gli stessi principi enunciati per gli edifici tutelati. La conservazione non può essere un privilegio acquisito con un decreto di vincolo, ma è una esigenza comune a tutto il costruito storico.

⁹⁶ Vedi anche Linee Guida, pag. 20

⁹⁷ Nel testo delle Linee Guida è spesso sottolineato questo carattere non vincolato degli approcci proposti, che è proprio di un documento di indirizzo e non una norma. V. Linee Guida pag. 14

⁹⁸ Le Linee Guida rimandano al §3.2.1 delle NTC08 per la definizione degli Stati limite. Ciascuno stato limite è associato a una probabilità di superamento dell'azione sismica ed è definito in relazione alla prestazione che l'edificio deve assumere nel suo complesso, compresi elementi strutturali e impiantistici. Secondo lo SLV «a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali». Allo SLD la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione «subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidità nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature».

limite di danno ai beni artistici (SLA). Per beni culturali sono da considerare lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) e lo stato limite di danno (SLD),

È precisato che la verifica allo SLV dell'edificio storico garantisce «non solo l'incolumità delle persone, ma anche la conservazione del manufatto che potrà essere restaurato a seguito dell'evento».⁹⁹ In seconda istanza, la verifica allo SLD è considerata solo in relazione a un'avvenuta condizione di inagibilità del fabbricato, in quanto per terremoti di bassa intensità il danno è considerato accettabile perché rientra nella risposta normalmente esibita da un edificio murario. Il terzo stato limite – SLA – è definito per un terremoto analogo a quello previsto per lo SLD e prevede che «i beni artistici contenuti nel manufatto, intesi come apparati decorativi, [...] ed elementi architettonici [...] subiscono danni di modesta entità tali da poter essere restaurati senza una significativa perdita del valore culturale». La valutazione a questo stato limite è richiesta a livello locale¹⁰⁰.

Il capitolo 3 riporta indirizzi per la definizione dell'azione sismica; essa è descritta dallo spettro di risposta elastico di riferimento i cui parametri di governo sono assegnati a partire dai valori corrispondenti alla coordinata geografica del sito su cui sorge l'edificio con precisione calibrata su un reticolo di ampiezza 10x10km.

La procedura proposta dalle Linee Guida si basa su una adeguata conoscenza dell'edificio, acquisita attraverso il *percorso della conoscenza* presentato nel capitolo 4 (Conoscenza del manufatto) e nell'Allegato A.

La conoscenza dell'edificio può essere condotta a vari livelli di approfondimento, dai quali dipenderà l'attendibilità del modello meccanico scelto per la verifica di sicurezza. Le Linee Guida intendono quantificare il livello di conoscenza attraverso il Fattore di Confidenza, analogamente a quanto avviene nelle NTC08, ma rimodulando in parte la metodologia, coerentemente alle esigenze del patrimonio culturale. Il Fattore di Confidenza rende cautelativa la verifica di sicurezza le analisi numeriche eseguite a partire da una conoscenza meno approfondita.

Sul “percorso della conoscenza” e sulla definizione del Fattore di confidenza si ritornerà in maniera esaustiva nel seguito.

Nel capitolo 5 sono illustrate diverse possibilità di modellazione del comportamento strutturale di un edificio murario. Le Linee Guida articolano la valutazione della sicurezza su tre livelli che si distinguono per la crescente conoscenza dell'edificio e accuratezza della

⁹⁹ Linee Guida, pag. 24

¹⁰⁰ Il danno al bene artistico è strettamente correlato alla interazione che il bene mantiene con la struttura portante. Esso può essere (i) totalmente vincolato alla struttura (es: affresco, bassorilievo, ...) per cui la verifica riguarderà lo SLD con specifici valori di deformazioni e fessurazioni, (ii) parzialmente vincolato per cui gli apparati decorativi possono assecondare alcune deformazioni della struttura senza riportare danno, (iii) accostati/appoggiati alla struttura ma aventi conformazione e comportamento autonomo (pinnacoli, campanili, ...).

modellazione strutturale. Essi sono commisurati agli obiettivi dell'analisi e in particolare: LV1 è finalizzato a valutazioni del rischio alla scala territoriale¹⁰¹; LV2 e LV3 sono finalizzati alla progettazione degli interventi, ovvero alla riparazione o intervento locale (LV2) e al miglioramento sismico (LV3). Sempre al capitolo 5 sono introdotti modelli meccanici semplificati per la valutazione LV1, distinti in base alla tipologia di manufatto architettonico: palazzi e ville, chiese ed edifici ad aula unica, torri e campanili e altre strutture a sviluppo verticale.

Infine al capitolo 6 sono descritti i criteri da seguire per il progetto di miglioramento sismico. Sono individuate le problematiche cui possono essere soggetti gli edifici storici e cui il progetto dovrà rispondere nell'ottica della conservazione e della sicurezza e per ciascuna di esse sono proposte alcune possibili tecniche di intervento, esaminate criticamente in relazione, soprattutto, alla congruità con la logica muraria.

2.3 Criteri e procedura per la valutazione della sicurezza e per la progettazione degli interventi

L'obiettivo della prevenzione del rischio sismico del patrimonio culturale – per le Linee Guida – si persegue con due azioni: la valutazione della sicurezza sismica e la progettazione degli interventi. Le Linee Guida individuano tre livelli di valutazione ad approfondimento crescente in base alla scala di intervento, alla accuratezza delle indagini e del modello meccanico¹⁰²: strumenti di valutazione a scala territoriale (LV1) e strumenti per la valutazione alla scala dell'edificio destinati alla progettazione degli interventi distinti in relazione alla tipologie di intervento delineate dalle NTC08, ovvero riparazione o intervento locale (LV2), miglioramento sismico (LV3). La valutazione secondo LV3 può essere utilizzata anche nel caso venga richiesta una verifica della sicurezza accurata.

Per LV1 si fa riferimento a «modelli semplificati, basati su un numero limitato di parametri geometrici e meccanici o che utilizzano dati qualitativi (interrogazione visiva, lettura dei dettagli costruttivi, rilievo critico e stratigrafico)»¹⁰³. In sintesi, essi consistono in modelli

¹⁰¹ La introduzione dei tre livelli di valutazione – con particolare riguardo a LV1 – nasce dalla esigenza di fornire in tempi estremamente brevi precise indicazioni sulla sicurezza dei beni culturali, in ottemperanza all'art. 2 c. 3 della OPCM 3274 (verifica degli edifici rilevanti e di importanza strategica). Secondo l'elenco del Decreto P.C.M. Del 21.10.2003 (G.U. n. 252 del 29.10.2003) risulta che tali verifiche devono essere effettuate su quasi tutto il patrimonio tutelato (circa 500.000 edifici). Vedi anche Podestà 2010.

¹⁰² Anche la OPCM 3274, il Decreto PCM 21 ottobre 2003 nelle disposizioni attuative dell'Ordinanza introduce 3 livelli di verifica della sicurezza ad approfondimento crescente: livello 0, 1, 2. Cfr. Allegato 2 del Decreto (G.U. n. 252 del 29 ottobre 2003).

¹⁰³ Linee Guida 2010, pag. 18.

globali tramite i quali è verificata la resistenza a taglio delle pareti murarie in entrambe le direzioni¹⁰⁴.

Per il secondo livello di valutazione LV2, richiesto nel caso di interventi che non alterino in nessun modo il funzionamento strutturale della costruzione (riparazioni, interventi locali), le Linee Guida suggeriscono l'uso di metodi di analisi locale per le parti oggetto di intervento e consente di eseguire la verifica complessiva del manufatto allo SLV con metodi semplificati di LV1. I modelli locali sono rivolti a porzioni dell'edificio per le quali è riconosciuto un comportamento autonomo, che nelle Linee Guida sono definiti *macroelementi*¹⁰⁵.

Il livello LV3 considera la sicurezza sismica della costruzione nel suo complesso e richiede la valutazione della «accelerazione del suolo che porta allo stato limite ultimo la costruzione nel suo complesso o singole sue parti significative (macroelementi)». Questo livello si applica nel caso di interventi diffusi che modificano il comportamento strutturale del manufatto (miglioramento sismico)¹⁰⁶ e può essere condotto utilizzando un modello globale ovvero scomponendo la struttura nei macroelementi purché essi siano individuati in numero congruo alla dimensione dell'edificio nel suo complesso¹⁰⁷.

La procedura proposta dovrà essere calibrata in base al Livello di Valutazione; in linea generale essa è costituita dall'espletamento dei seguenti passi:

1. conoscenza del manufatto finalizzata alla comprensione del comportamento sismico dell'edificio;
2. scelta di uno o più modelli meccanici interpretativi del comportamento strutturale compreso a valle della fase conoscitiva;
3. definizione del livello di sicurezza sismica nello stato di fatto e della vita nominale dell'edificio;
4. progettazione degli interventi (se prevista) di miglioramento o riparazione;
5. valutazione del livello di sicurezza e della vita nominale raggiunti a seguito del progetto.

¹⁰⁴ Ivi, §2.1 e §5.3.1. Per la realizzazione di questo livello di valutazione il Ministero ha messo a punto un sistema informativo – il SIVARS – attraverso il quale è possibile gestire l'iter metodologico delle Linee Guida fino alla valutazione della sicurezza secondo LV1. Nell'ambito dell'iter metodologico prevista la raccolta di dati strutturati in schede relative alla fattura e allo stato di conservazione dei beni architettonici tutelati; consentendo la costruzione di una banca dati nazionale su ciascun bene, come auspicato dal programma di monitoraggio predisposto dal Ministero.

¹⁰⁵ Cfr. Linee Guida §5.3.2. Il concetto di *macroelemento* è stato introdotto in Doglioni et al. 1994 con riferimento al comportamento sismico delle chiese, nell'ambito delle ricerche condotte dal GNDT all'indomani del terremoto del Friuli del 1976.

¹⁰⁶ Interventi di questo genere possono essere necessari nel caso di ricostruzioni post-evento, ovvero a seguito di un danneggiamento manifesti o riutilizzo di edifici non mantenuti da tempo.

¹⁰⁷ Cfr. Linee Guida pag. 19 e §5.3.3.

Questa procedura si può sintetizzare attraverso lo schema logico Figura 2.1.

La conoscenza è presupposto fondamentale sia per la verifica di sicurezza sia per il progetto e il suo livello di approfondimento dovrà essere adeguato al Livello di Valutazione richiesto. Lo scopo della fase di conoscenza è comprendere lo stato attuale della fabbrica, che dipende dalla fattura degli elementi strutturali e dal loro stato di conservazione, dalla storia dell'edificio che può essere stato oggetto di trasformazioni che possono incidere anche in maniera determinante nel comportamento strutturale.¹⁰⁸ Attraverso la conoscenza diretta è possibile riconoscere la conformità della costruzione alla regola dell'arte con riferimento alle specificità locali, che costituisce un primo elemento di valutazione della sicurezza¹⁰⁹. La conoscenza della storia della fabbrica consente di verificare il comportamento esibito a seguito di trascorsi eventi sismici e di trarre considerazioni in merito alla sussistenza di meccanismi di danno ricorrenti.

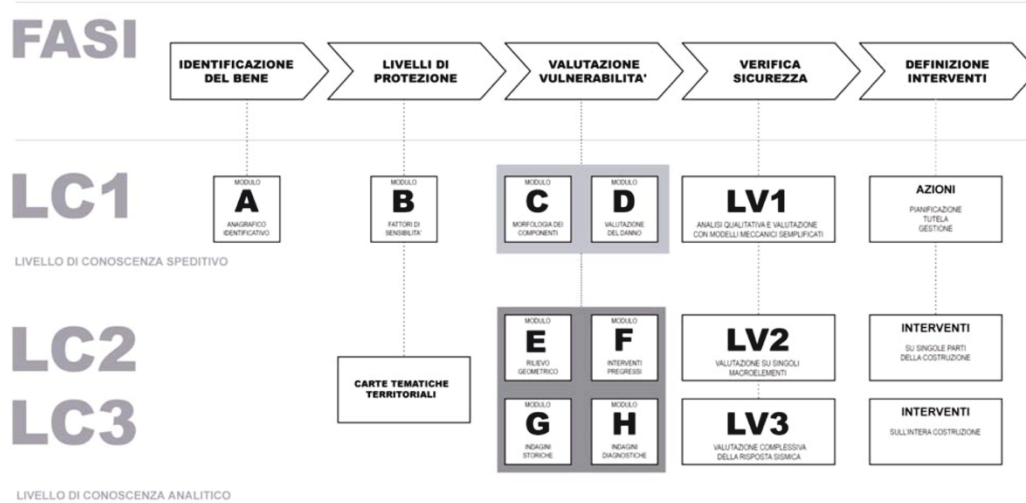


Figura 2.1 – schema logico illustrativo della corrispondenza tra schede di analisi (A, B, C, D, E, F, G, H), livelli di conoscenza e livelli di valutazione, così come definiti nelle Linee Guida. L'immagine è tratta da Moro L., *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale*, Gangemi Editore, Roma, 2006.

Per la valutazione della sicurezza, in ogni caso, «non si può prescindere da una analisi strutturale, finalizzata a tradurre in termini meccanici e quantitativi il comportamento nella costruzione», per cui i dati della conoscenza confluiscono nel modello meccanico, la cui aderenza alla realtà costruttiva dell'edificio – e quindi l'attendibilità delle analisi quantitative – dipenderà dal grado di approfondimento delle indagini. La conoscenza conserverà sempre un grado di incertezza immancabilmente connaturato a qualsiasi operazione che ha come oggetto

¹⁰⁸ Ciò non avviene per gli edifici di nuova costruzione, per i quali in fase di progetto si stabiliscono prestazioni e modalità costruttive.

¹⁰⁹ Linee Guida pag. 57.

un edificio esistente, e dovrà essere quantificato attraverso il fattore di confidenza, che penalizza i livelli di indagine meno approfonditi e sarà applicato in modo diverso a seconda del tipo di modello meccanico che si utilizza per la verifica¹¹⁰.

In base alle risultanze della fase di conoscenza, possono essere scelti più modelli meccanici per la interpretazione del comportamento strutturale. È noto – specificano le Linee Guida – che per gli edifici murari storici è impossibile definire una strategia univoca di analisi e modellazione, perché le incertezze che confluiscono sul modello – sia per il comportamento, sia sui parametri che lo costituiscono – dipendono dalla condizione dello stato di fatto specifica di ciascun manufatto. Come accennato poc'anzi, il modello utilizzato potrà riguardare l'intera costruzione, nel caso in cui la conoscenza accerti l'attendibilità di un comportamento globale dell'edificio, ovvero la compagine strutturale potrà essere interpretata scomponendola nei *macroelementi* riconosciuti, per cui saranno utilizzati modelli locali¹¹¹.

La Direttiva mette in conto che il modello meccanico potrebbe non rappresentare in modo attendibile la complessità costruttiva del fabbricato. Per questa ragione consente al progettista di tenere conto nella valutazione del «contributo di alcuni aspetti costruttivi la cui importanza è emersa a seguito della conoscenza storica e tecnologica del manufatto, [quantificando] tale effetto su base soggettiva» giustificando il tutto attraverso valutazioni qualitative¹¹².

La valutazione della sicurezza – per le Linee Guida – deve contemperare criteri analitici quantitativi e criteri empirici qualitativi¹¹³, per cui dovranno essere calcolati i livelli delle azioni sismiche corrispondenti ai diversi stati limite, ovvero dovranno essere definiti l'indice di sicurezza sismica e la vita nominale sia nello stato di fatto sia a seguito dell'eventuale intervento.

Le Linee Guida definiscono i livelli di protezione sismica relativi ai vari stati limite, con opportune probabilità di superamento (e conseguenti periodi di ritorno dell'azione sismica) nel periodo di riferimento dell'edificio V_R , che considera le caratteristiche proprie del bene e la condizione d'uso (esposizione). Le caratteristiche del bene culturale sono delineabili a valle della conoscenza del manufatto e sono anche espresse dalla vita nominale (V_N). Essa è definita dalle NTC al §2.4.1 «come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata»¹¹⁴ - definizione coerente con l'intervento di miglioramento nell'ambito del quale la conservazione

¹¹⁰ In particolare, FC è applicato alle proprietà dei materiali riducendo le resistenze nel caso di modelli che considerano la deformabilità dei materiali e degli elementi strutturali; mentre si applica alla capacità della struttura riducendo l'accelerazione nel caso di modelli di corpo rigido (analisi cinematica).

¹¹¹ L'edificio murario in caso di sisma non esibisce una risposta di tipo globale, bensì si danneggia per perdita di equilibrio di alcune porzioni della costruzione particolarmente deboli.

¹¹² Linee Guida, pag. 20

¹¹³ Cfr. Croci 2010, §7

¹¹⁴ Cfr. NTC2008, Cap. 2, pag. 4.

del manufatto è assicurata attraverso opere periodiche di revisione (monitoraggio) e manutenzione¹¹⁵. Il livello di esposizione del fabbricato è espressa da tre classi d'uso (CU)¹¹⁶.

Coerentemente con la possibilità di derogare all'adeguamento, è chiarito che per i beni culturali in nessun caso è prescritto il raggiungimento di un prefissato livello di sicurezza. Per le costruzioni ordinarie adeguate alla normativa è assunta $V_N \geq 50$ anni; per i beni culturali non vi è prescrizione in tal senso, ma è detto che «valori della vita nominale maggiori di 20 anni possono comunque considerarsi ammissibili»,¹¹⁷ ammettendo che una vita nominale ridotta tutela la costruzione per un numero minore di anni in termini probabilistici¹¹⁸. Qualora una verifica di sicurezza dovesse suggerire la necessità di un intervento invasivo nella struttura, il progettista è autorizzato a considerare una vita nominale ridotta che consenta un esito positivo della valutazione. La vita nominale è quindi il periodo di validità della verifica di sicurezza, allo scadere del quale una nuova verifica dovrà essere eseguita tenendo conto del tempo che è passato¹¹⁹ (la probabilità di un terremoto forte è quindi più alta). La questione è affrontata solo in termini quantitativi, per cui l'intervento invasivo è solo posticipato nel tempo, anche se le Linee Guida ribadiscono che bisogna considerare il continuo progresso della scienza in relazione a tecniche di intervento più efficaci e al contempo meno invasive.

L'indice di sicurezza I_s , è il confronto tra l'azione sismica e la capacità del manufatto. Tale indice assume significato diverso a seconda che l'obiettivo della analisi sia una valutazione a scala territoriale o del singolo edificio (progettazione degli interventi).

Nel primo caso (LV1) I_s è utile per la conoscenza complessiva del livello di rischio sismico del patrimonio culturale a scala territoriale e può fornire una graduatoria di priorità per la programmazione delle opere di prevenzione.

Nell'ambito della progettazione degli interventi (LV2, LV3) il valore dell'indice di sicurezza sismica «non deve essere inteso come parametro per una verifica cogente ($I_s \geq 1$) ma come importante elemento quantitativo da portare in conto in un giudizio qualitativo complessivo, che consideri le esigenze di conservazione»¹²⁰. In questo caso, può essere più opportuno

¹¹⁵ Linee Guida pag. 26

¹¹⁶ La classe d'uso CU, coerentemente alle diverse classi definite al punto 2.4.2 delle Allegato A, punto B.6, con riferimento ai beni culturali nel seguente modo: Classe utilizzato; Classe II – uso frequente con normali affollamenti; Classe III – uso affollamenti significativi; Classe IV – edificio strategico e uso frequente con affollamenti significativi. Con riferimento a quest'ultima classe potrebbe essere valutata la delocalizzazione delle funzioni qualora il loro mantenimento implicasse un livello di sicurezza ottenibile solo mediante l'esecuzione di interventi incompatibili con l'istanza della conservazione.

¹¹⁷ Ivi, pag. 31

¹¹⁸ Ivi, pag. 27

¹¹⁹ *Ibidem*

¹²⁰ Linee Guida, pag. 127

confrontare la vita nominale nello stato di fatto e la vita nominale ottenibile con l'intervento. In particolare, per valori di $I_S < 1$ è suggerito di calcolare la vita nominale corrispondente a un indice di sicurezza unitario, in modo tale da mettere a conoscenza il committente della necessità di nuove verifiche allo scadere di tale periodo.

Per il progetto degli interventi atti a mitigare la vulnerabilità sismica è necessario porsi il duplice obiettivo della sicurezza e della conservazione «non solo della materia ma anche del funzionamento strutturale accertato, qualora questo non presenti carenze tali da poter comportare la perdita del bene»¹²¹.

Le strategie e le tecniche di intervento, nonché la necessità di realizzazione dello stesso dipendono dagli esiti della precedente fase di valutazione. Le scelte di intervento sono da valutare “caso per caso”, ma in generale dovranno – per quanto possibile – seguire dei criteri di base quali: la compatibilità, la durabilità nel tempo, la reversibilità, il minimo impatto sul manufatto.

Il criterio della compatibilità è richiamato esplicitamente come compatibilità fisico-chimica con la materia storica; inoltre, gli interventi dovranno, quando possibile, «rispettare la concezione e le tecniche originarie della struttura», per cui è auspicata anche la compatibilità “costruttiva” – intesa come coerenza con la logica strutturale muraria – nonostante non vi sia una indicazione esplicita in tal senso. La durabilità è intesa come capacità dell'intervento di garantire la sicurezza nel tempo.

L'intervento reversibile è poi contrapposto a quello invasivo: il primo «integra gli elementi resistenti e/o condiziona le sollecitazioni senza trasformare in modo permanente la struttura originale» mentre il secondo «è teso alla modifica permanente degli elementi resistenti»¹²². Una considerazione più chiara e diretta è avanzata nello “Schema di capitolato prestazionale” in cui si legge che l'intervento reversibile consente di «conservare la scomposizione e lo smontaggio di molte parti strutturali senza compromettere il resto della struttura»¹²³. Il rispetto del criterio della reversibilità, quindi, è ulteriore garanzia di coerenza con le peculiarità strutturali dell'architettura muraria, risultato di un sapiente assemblaggio di elementi.

Infine «l'intervento dovrà essere proporzionato agli obiettivi della sicurezza e durabilità, contendendo gli interventi in modo tale da produrre il minimo impatto sul manufatto storico»¹²⁴. Il rimando al criterio del “minimo intervento” è evidente, ma potrebbe essere utile chiarire che non ci si riferisce esclusivamente a una limitazione della estensione e del numero degli interventi, ma anche alla individuazione di interventi minimi necessari e giustificati dalle

¹²¹Ivi, pag. 99

¹²²Ivi, pag. 102

¹²³Ivi, pag. 379

¹²⁴Ivi, pag. 100

risultanze della conoscenza che possono limitare l'impatto sull'edificio – sia visivo (istanza estetica) sia strutturale (coerenza con la logica muraria).

Una nota importante riguarda la progettazione degli impianti, la cui collocazione non dovrebbe, di norma, interessare gli elementi strutturali dell'edificio murario. Nell'ambito di una valutazione della sicurezza va analizzato l'impatto degli impianti tecnologici presenti con l'obiettivo di individuare le eventuali interazioni con gli elementi strutturali.

Infine, coerentemente con l'obiettivo della conservazione, nelle Linee Guida è sottolineata l'importanza di un adeguato programma di monitoraggio che, in alcuni casi, consente di evitare l'intervento. La congruità del programma di monitoraggio è correlata al livello di approfondimento della fase di conoscenza e della successiva comprensione dello stato attuale dell'edificio: una volta individuati eventuali dissesti in atto o situazioni di particolare precarietà che non implicano un danno imminente è possibile – e consigliato – controllare l'evoluzione di queste condizioni attraverso una strumentazione adeguata. I dati provenienti dal monitoraggio saranno funzionali alla definizione di una manutenzione controllata, considerata il mezzo favorito per garantire la conservazione del monumento.

2.4 Il percorso della conoscenza

Il “percorso della conoscenza” mette a sistema attività afferenti a vari settori disciplinari che assieme contribuiscono alla disamina del comportamento strutturale dell'edificio storico.

Gli strumenti principali sono quelli propri della disciplina del restauro, quali il rilievo geometrico, l'analisi storica, il rilievo materico, l'analisi del degrado dei materiali. A queste si affiancano aspetti della conoscenza funzionali al calcolo strutturale, quali la caratterizzazione meccanica dei materiali e della tipologia del terreno di fondazione.

Le attività sono da programmare in relazione agli obiettivi dell'analisi (livelli di valutazione) e alla complessità dell'edificio e sono finalizzate alla «definizione di un modello interpretativo che consenta, nelle diverse fasi della sua calibrazione, sia una interpretazione qualitativa del funzionamento strutturale, sia l'analisi strutturale per una valutazione quantitativa»¹²⁵.

L'obiettivo delle attività conoscitive è la comprensione del comportamento strutturale attuale, passando per la definizione del sistema strutturale resistente, con i suoi vincoli e le sue caratteristiche costruttive che saranno i dati di base sui quali sarà scelto e costruito il modello meccanico che supporti le valutazioni qualitative e quantitative.

Il percorso della conoscenza delle Linee Guida prevede le seguenti operazioni principali:

- identificazione della costruzione e caratterizzazione funzionale;
- rilievo geometrico della costruzione nello stato attuale;
- analisi degli eventi e interventi subiti;

¹²⁵ Linee Guida, pag. 37

- rilievo materico costruttivo e dello stato di conservazione;
- caratterizzazione meccanica dei materiali;
- caratterizzazione meccanica del terreno e studio delle fondazioni.

Malgrado sia proposta l'accezione di “percorso”, le Linee Guida precisano che queste attività non seguono un ordine sequenziale, bensì sono da svolgere in modo integrato¹²⁶ (Figura 2.6).

Una considerazione generale sul percorso di conoscenza riguarda la parziale frammentarietà delle indicazioni fornite per ogni attività che sono contenute nel corpo del capitolo 4, ma anche nell'allegato A, nei moduli C e D (Figura 2.2, Figura 2.3) e nello schema di capitolato prestazionale, condizione che non favorisce una visione d'assieme degli aspetti della conoscenza.

Di seguito le attività del percorso sono descritte integrando le informazioni al fine di consentirne una congrua lettura critica.

¹²⁶ Ivi, pag. 39

MODULO C - Morfologia degli Elementi

Ha lo scopo di individuare e descrivere gli elementi strutturali, attraverso il riconoscimento della morfologia, della tipologia, delle tecniche costruttive e dei materiali.

C1 Codifica degli elementi strutturali

Nota esplicativa.

Individuare gli elementi strutturali identificandoli a livello planimetrico con codici alfa-numeriche progressivi, secondo le seguenti categorie:

V. elementi verticali (sesti murari, pilastri, colonne)

O. Orizzontamenti (solai e coperture)

S. Collegamenti verticali (scale e rampe)

PO. Elementi portanti orizzontali (archi, architravi, pilastrande)

C2 Ispezionabilità

Nota esplicativa.

Per ogni elemento codificato al punto C1 specificare se è ispezionabile, parzialmente ispezionabile, non ispezionabile.

C3 Morfologia

Nota esplicativa.

Per ogni elemento codificato al punto C1 descriverne la morfologia:

V. elementi verticali: pilastro, colonna, sesto continuo.

O. orizzontamenti: piano, inclinato, resistente per forma.

S. collegamenti verticali: rettilineo, curvo, elicoidale.

PO. elementi portanti orizzontali: orizzontali, curvi.

C4 Tipologia elementi strutturali

Nota esplicativa.

Per ogni elemento codificato al punto C1 descrivere la tipologia costruttiva, secondo vocabolari elaborati a livello regionale. A titolo esemplificativo:

V. elementi verticali: portante in blocchi, in laterizio, monolitico, tamponatura in laterizio, in legno, non visibile, ecc.

O. orizzontamenti: solaio a orditura semplice, doppia, composta, soletta, volta a crociera, a botte, non visibile, ecc.

S. collegamenti verticali: rampa semplice su travi, su volta a botte, su volta rampante, ecc.

PO. elementi portanti orizzontali: arco a tutto sesto, ribassato ogivale, pilastranda, architrave, non visibile, ecc.)

C5 Tipologia finiture

Nota esplicativa.

Per ogni elemento codificato al punto C1 descrivere la tipologia delle finiture, secondo vocabolari elaborati a livello regionale. A titolo esemplificativo: intonaco, rivestimento lapideo, ligneo, ceramico, compositivo, struttura a vista, ecc. Specificare la finitura per l'interno e l'esterno, per l'intradosso e l'estradosso.

C6 Tecnica costruttiva elementi strutturali

Nota esplicativa.

Per ogni elemento codificato al punto C1 descrivere la tipologia costruttiva, secondo vocabolari elaborati a livello regionale.

Le murature andranno analizzate stilando moduli schedografici che dovranno contenere

- descrizione delle caratteristiche materiche dei componenti, rapporti geometrici tra altezza del blocco e spessore del giunto orizzontale, disposizione e allineamenti desumibili dall'analisi della tessitura e dell'apparecchiatura muraria

C7 Tecnica costruttiva finiture

Nota esplicativa.

Per ogni elemento codificato al punto C1 descrivere la tipologia costruttiva, secondo vocabolari elaborati a livello regionale.

C8 Parametri meccanici

Nota esplicativa.

Per ogni elemento codificato al punto C1 riportare i parametri meccanici dei materiali ottenuti da indagini diagnostiche eseguite sulla fabbrica o per analogia.

gn = resistenza media a compressione

rd = resistenza a taglio

E = valore medio di elasticità normale

G = valore medio di elasticità tangenziale

W = peso specifico medio

C9 Elementi di pregio storico artistico

Nota esplicativa.

Per ogni elemento codificato al punto C1 individuare e descrivere eventuali elementi di pregio storico artistico: apparati decorativi (fregi, cornici, affreschi, dipinti, stucchi, elementi scultorei, ecc.), tecniche costruttive antiche (intonaci, rivestimenti, travature, elementi metallici, particolari tessiture murarie), elementi mobili addossati (arazzi, quadri, alari, stampe, tabernacoli, ecc.).

C10 Materiali finiture

Nota esplicativa.

Per ogni elemento codificato al punto C1, e per gli eventuali elementi di pregio in esso presenti, identificare i materiali attraverso analisi a vista o prove di laboratorio se disponibili.

Figura 2.2 - contenuti del Modulo C; Allegato A alle Linee Guida, pag. 136-139.

MODULO D - Stato di Conservazione

Classifica e descrive i fenomeni di danno dei singoli elementi strutturali.

D1 danno strutturale

D1a. pannelli murari

- fuori piombo
- spanciamiento
- traslazione verticale
- traslazione orizzontale
- fessurazioni superficiali (specificare profondità/spessore murario)
- fessurazioni passanti
- lesioni isolate o diffuse
- crollo

Nota esplicativa.

Da individuare per ogni elemento come codificato al punto C1. Per le lesioni la valutazione va innesa come rilevamento della posizione delle cuspidi e della gola, distanza massima tra i cigli fessurativi e relativo scostamento dei cigli fessurativi fuori dal piano.

D1b. strutture resistenti per forma

Nota esplicativa.

Da individuare per ogni elemento come codificato al punto C1. Valutazione del meccanismo di danno/meccanismo di collasso. Quantificazione e posizionamento delle fessurazioni.

D1c. orizzontamenti

- valutazione a vista dei difetti (secondo classificazione a vista del legname in opera)
- rottura fragile
- entità dell'appoggio
- disallineamento appoggi
- deformazione ($F/L > 1/300$; $F/L > 1/200$; $F/L >> 1/ << 200$)
- crollo

Nota esplicativa.

Da individuare per ogni elemento come codificato al punto C1.

D1d. strutture in legno articolate

- valutazione a vista dei difetti (secondo classificazione a vista del legname in opera)
- qualità delle unioni e delle giunzioni
- rottura fragile
- rotazione fuori dal piano di appartenenza della struttura
- inflessione
- crollo

Nota esplicativa.

Da individuare per ogni elemento come codificato al punto C1.

D2 danno materico

D2a. strutture murarie

- distacco
- erosione
- disgregazione

Nota esplicativa.

Da individuare per ogni elemento come codificato al punto C1. Vedi anche il lessico delle Raccomandazioni Normal 1/88. Specificare in percentuale l'estensione della superficie del danno.

D2b. strutture in legno semplici e articolate

- marcescenza
- rosume

Nota esplicativa.

Da individuare per ogni elemento come codificato al punto C1. Vedi anche il lessico delle Raccomandazioni Normal 1/88. Specificare in percentuale l'estensione della superficie del danno.

D3 Cause del danno

D3a. cause intrinseche

- umidità
- cicli termici
- deflusso acque meteoriche
- vegetazione
- non valutabile

D3b. cause estrinseche

- eventi sismici
- frane/alluvioni
- scoppi/incendi
- azioni antropiche
- non valutabile

D4 Analisi dei dettagli strutturali

- efficienza dei nodi delle strutture multiasta
- efficienza del collegamento fra pareti ortogonali
- efficienza del collegamento fra solai e pareti
- presenza di cordoli di piano
- architravi con resistenza flessionale
- elementi strutturali spingenti
- catene, ritegni, contrafforti
- presenza di elementi ad elevata vulnerabilità

D5 Interazioni fra Unità Strutturali

- grado di vincolo agli elementi contigui
- azioni degli elementi contigui

Figura 2.3 - contenuti del Modulo D; Allegato A alle Linee Guida, pag. 139-142.

Identificazione della costruzione e caratterizzazione funzionale

La prima indagine riguarda “l’identificazione della costruzione” nel suo contesto urbano e territoriale, con particolare riferimento a eventuali fattori di rischio che possano avere influenza sulla sicurezza del manufatto.

Dovranno essere descritte le caratteristiche ambientali e geografiche (presenza di fiumi, torrenti, ecc...), le caratteristiche ambientali antropiche (viabilità di accesso all’edificio) e le caratteristiche orografiche del sito.¹²⁷

Oltre a una schedatura anagrafica (proprietario, dati catastali, ecc...)¹²⁸ in questa fase è analizzato:

«il rapporto del manufatto con l’intorno, attraverso la descrizione del Complesso Architettonico (CA), isolato o non isolato, e la caratterizzazione dei rapporti spaziali e funzionali tra l’edificio ed eventuali manufatti contermini»¹²⁹

Questa analisi può essere condotta prevalentemente dall’esterno eseguendo una lettura dall’esterno. In primo luogo, questo rilievo ha la finalità di specificare se l’edificio fa parte di un aggregato strutturale o se è isolato; in secondo luogo si dovranno individuare i vari Corpi di Fabbrica di cui può essere costituito il Complesso Architettonico (l’edificio in questo caso è esso stesso un aggregato strutturale)¹³⁰ e definire la loro “gerarchia costruttiva”, attraverso la ricostruzione delle fasi evolutive e di trasformazione avvenute per ampliamenti, sovrelevazioni, ecc.

L’individuazione dei corpi di fabbrica avviene attraverso la lettura dei fronti strada e della articolazione plano-altimetrica.

Un ulteriore aspetto da analizzare è l’evoluzione funzionale dell’edificio finalizzata alla individuazione delle varie destinazioni d’uso che si sono succedute nel corso della sua storia. Gli esiti di queste analisi favoriscono la comprensione di eventuali trasformazioni attuate nell’edificio anche dal punto di vista dell’uso.

Rilievo geometrico

La definizione della geometria strutturale è eseguita attraverso operazioni di rilievo riferito all’edificio nel suo complesso e ai suoi elementi costruttivi, considerando i rapporti con gli eventuali edifici in aderenza (se di testata, d’angolo, contiguo)¹³¹.

In generale, andrà rilevata la geometria di «tutti gli elementi in muratura, delle volte (spessore e profilo), dei solai e della copertura (tipologia e orditura), delle scale (tipologia

¹²⁷ Linee Guida, programma di monitoraggio Modulo B, pag. 134-136

¹²⁸ Ibidem, Modulo A, pag. 132-134

¹²⁹ Linee Guida §4.1.2

¹³⁰ La definizione di Corpo di fabbrica ha evidente analogia con le Unità Strutturali degli aggregati murari indicate dalle NTC08.

¹³¹ Linee Guida, Allegato A, punto B4b, 136

strutturale)». Nell'ambito di questo controllo sono localizzate eventuali nicchie, aperture richiuse (specificando la modalità, se con stipiti ammorsati o con tamponature semplicemente accostate al muro) cavità, canne fumarie, la tipologia delle fondazioni. La tipologia costruttiva degli elementi strutturali andrà specificata secondo «vocabolari elaborati a livello regionale»¹³².

L'obiettivo è definire lo schema strutturale resistente con i suoi vincoli e i carichi agenti necessari alla formulazione del modello meccanico e in funzione di ciò sono indicate le informazioni significative da reperire: spessore dei muri, imposte degli orizzontamenti e dei sistemi archiviati, entità dell'appoggio degli stessi sulle murature d'ambito.

Per sopperire alle difficoltà del rilievo geometrico, quali l'accessibilità di alcuni vani o parti dell'edificio, quali sottotetti, controsoffitti, o la dimensione a volte poco gestibile di alcuni manufatti (campanili, chiese con grandi aule), le Linee Guida indicano la disponibilità di strumenti che consentono un "rapido rilievo" e una restituzione accurata anche nel caso di elementi complessi e tecniche di indagine diretta o indiretta per gli spazi non accessibili, quali endoscopie o termografie.

Dovrà essere rilevato e rappresentato l'eventuale quadro fessurativo indicato per ogni lesione la geometria e il cinematismo ad esse connesso.

«Successivamente, considerato che le fasi della conoscenza non sono sequenziali, potrà essere associato ad ogni lesione, o ad un insieme di lesioni, uno o più meccanismi di danno che siano compatibili con la geometria dell'organismo e della sua fondazione, con le trasformazioni subite, con i materiali presenti, con gli eventi subiti»¹³³

Anche se in forma non esplicita, è possibile intuire che il rilievo geometrico e la definizione del quadro fessurativo dovranno essere reconsiderati nel complesso delle informazioni reperite con le successive indagini storica e materica, per cui la comprensione dello stato attuale passa attraverso una lettura integrata di queste risultanze.

Analisi storica degli eventi e degli interventi subiti

L'analisi storica è finalizzata alla «comprensione dell'organismo inteso nella sua unità architettonica e strutturale anche attraverso la conoscenza delle modifiche (ampliamenti, trasformazioni e/o alterazioni) avvenute nel tempo [...] anche ai fini di una corretta individuazione del sistema resistente e del suo stato di sollecitazione»¹³⁴.

Obiettivo principale è la ricostruzione del processo evolutivo attraverso cui l'edificio ha raggiunto la configurazione attuale (interventi di consolidamento, cambio di destinazioni d'uso, demolizioni, ampliamenti, ecc.), ponendo particolare attenzione alle trasformazioni subite a seguito di catastrofi, quali eventi sismici.

¹³² Ivi, pag. 137.

¹³³ Ivi, pag. 42

¹³⁴ Linee Guida, schema di capitolato, pag. 367

In questo ambito, la disamina della storia sismica locale attraverso i cataloghi sismici¹³⁵ assume importanza per la conoscenza dell'entità dell'azione sismica cui l'edificio è stato soggetto e se tali azioni hanno mai superato quella di riferimento indicata nelle mappe di pericolosità sismica.

La ricostruzione delle fasi evolutive della fabbrica deve mirare alla localizzazione delle eventuali zone di discontinuità sia in pianta che in alzato (accostamenti, sopraelevazioni), ma anche di interventi «non compatibili con le caratteristiche tipologiche, costruttive e storico-architettoniche»¹³⁶ fondamentali per la comprensione del comportamento strutturale attuale.

La storia dei danneggiamenti subiti può favorire il riconoscimento di una risposta sismica ricorrente dell'edificio e l'individuazione delle porzioni più deboli, che sono elementi utili alla identificazione di un modello qualitativo di comportamento, tenendo conto delle modifiche occorse a seguito dei suddetti danneggiamenti. La documentazione dei cambi di destinazioni d'uso è importante per la conoscenza delle «azioni applicate in passato».

Gli eventi e le trasformazioni subite dovranno essere «accertabili per via documentale (fonti scritte o iconografiche) o tramite un rilievo analitico diretto del manufatto»¹³⁷.

Le Linee Guida suggeriscono di illustrare le fasi costruttive su piante e sezioni, in scala non superiore a 1:100, distinguendo le varie epoche di costruzione¹³⁸.

Questo aspetto della conoscenza consiste, dunque, in un vero e proprio processo di *anamnesi* del manufatto.

Il ruolo della storia dell'edificio per la comprensione del comportamento strutturale è cruciale per le Linee Guida perché supporta il riconoscimento di una risposta sismica recidiva dell'edificio che consente la definizione di un modello meccanico interpretativo più attendibile oltre alla individuazione di porzioni di edificio per le quali è riconoscibile una modalità di danneggiamento potenziale (macroelementi).

Una considerazione di metodo importante, ma forse non espressa in modo sufficientemente esplicito dalle Linee Guida, riguarda le modalità attraverso cui acquisire le informazioni sul processo costruttivo. È utile sottolineare che la ricerca storica finalizzata all'analisi strutturale deve essere indirizzata da una ipotesi sulle trasformazioni occorse delineata preliminarmente attraverso un «rilievo analitico diretto»; per questo motivo, quindi, la selezione e consultazione delle fonti non può essere indipendente dalla conoscenza diretta dell'edificio.

¹³⁵ Guidoboni et al., Catalogue of strong earthquake in Italy 461 b.C. To 1997 and Mediterranean area 760 b.C. To 1500, CFTI 4.0, <http://storing.ingv.it/cfti4med>; A. Rovida, R. Camassi, P. Gasperini e M. Stucchi (a cura di), 2011. CPTI11, la versione 2011 del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Milano, Bologna, disponibile on line <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI11/>

¹³⁶ Linee Guida, pag. 368

¹³⁷ Ivi, pag. 43

¹³⁸ Schema di capitolato, pag. 369

Rilievo materico costruttivo e dello stato di conservazione

Un'altra indagine prevede l'esecuzione del rilievo materico costruttivo dell'edificio che «deve permettere di individuare completamente l'organismo resistente» tenendo conto della qualità e dello stato di conservazione dei materiali.

Questa attività comprende il rilievo dei dettagli costruttivi, supportato da indagini diagnostiche (termografie, endoscopie, georadar) per l'analisi di elementi eventualmente non visibili perché coperti da intonaco, da controsoffitti, ecc. La conoscenza completa degli aspetti materico-costruttivi potrebbe implicare l'applicazione diffusa di indagini diagnostiche, ma è precisato che – per motivazioni economiche e di eventuale impatto sull'edificio - il ricorso a tali prove deve essere motivato con riferimento alla loro utilità per la valutazione della sicurezza o al progetto dell'intervento.

Per limitare al massimo il numero (e anche il tipo) di indagini da effettuare appare fondamentale – per le Linee Guida – non solo la conoscenza delle vicende costruttive del fabbricato ma anche una «approfondita consapevolezza delle caratteristiche costruttive dei manufatti nell'area e nei diversi periodi storici» ovvero della tecnica costruttiva locale.

Per questo aspetto della conoscenza assume particolare attenzione lo studio delle murature. Dovrà prima di tutto essere individuata la tipologia muraria, descrivendone elementi costituenti e caratteristiche costruttive che ne definiscono la qualità in termini meccanici. Quest'ultima è valutata considerando:

- la forma, la dimensione e la tipologia di elementi costituenti e la presenza di diafani di collegamento tra i paramenti murari;
- la regolarità e l'orizzontalità dei ricorsi, ovvero la presenza di listature;
- la buona tessitura, individuata dal buon ingranamento degli elementi e il regolare sfalsamento dei giunti
- la natura delle malte e il loro stato di conservazione.

Tra gli altri dettagli costruttivi da analizzare si indica: la tipologia degli orizzontamenti e la loro qualità con particolare riferimento alla rigidità nel piano; l'efficacia dei sistemi di chiusura delle bucaure (architravi, piattabande, archi); la presenza di dispositivi atti a elidere o contenere la spinta di volte e archi eventualmente presenti (catene, contrafforti, speroni); la presenza di elementi, anche non strutturali, ad elevata vulnerabilità.

Nella definizione del sistema resistente riveste importanza anche la conoscenza della tipologia e qualità dei collegamenti tra gli elementi strutturali quali:

- il collegamento tra pareti verticali (presenza di ammorsamento nei cantonali e nei martelli murari, disposizione di catene);
- il collegamento tra pareti verticali e orizzontamenti, rilevando l'entità degli appoggi e l'eventuale presenza di cordoli di piano o altri dispositivi di connessione come le catene;

Per ognuno di questi aspetti la qualità meccanica è valutata anche in relazione allo stato di conservazione e ai dissesti eventualmente presenti che dovranno essere opportunamente documentati.

Le informazioni sui materiali e la tecnica costruttiva degli elementi strutturali potranno essere illustrate con riferimento ai Moduli C e D dell'Allegato A (Figura 2.2, Figura 2.3). In aggiunta, nel caso di edifici in aggregato, «dovrà essere valutata l'entità dell'interazione con gli edifici contigui, specificando il grado di vincolo e le azioni esercitate»¹³⁹.

Per questo aspetto della conoscenza è confermata l'importanza del rilievo diretto e in aggiunta di una conoscenza approfondita del lessico costruttivo locale. Un supporto essenziale in questo ambito può provenire dai *Codici di pratica* e dai *Manuali del recupero* – di cui molte regioni italiane sono oggi dotati – da consultare preliminarmente alla pianificazione delle eventuali indagini diagnostiche.

Per quanto concerne le relazioni tra i vari aspetti della conoscenza, anche in questo caso potremmo dire che sussiste - ed è utile - uno schema logico-sequenziale delle operazioni che colloca l'approfondimento materico-costruttivo sicuramente dopo il rilievo diretto e la ricostruzione delle fasi evolutive.

Parametri meccanici dei materiali e aspetti geotecnici

Per le linee guida il rilievo diretto e le indagini non distruttive «possono consentire di giungere a una buona conoscenza e a un giudizio sulla qualità dei materiali e del loro degrado», ma alcuni modelli di calcolo necessitano della conoscenza dei parametri meccanici dei materiali¹⁴⁰.

Questi dati sono desumibili esclusivamente attraverso la esecuzione di prove di caratterizzazione meccanica debolmente distruttive (martinetti piatti) o distruttive (compressione diagonale) il cui impatto è incompatibile con le esigenze di conservazione dell'edificio storico. Per questo motivo l'esecuzione di queste prove dovrà essere ampiamente giustificata «non solo dall'uso dei relativi risultati nella modellazione della struttura, ma anche dal fatto di essere discriminanti nei confronti della valutazione o della scelta dell'intervento»; in ogni caso il numero di prove dovrà essere limitato per cui è importante che tali prove siano inquadrare in un piano complessivo di indagine in cui possa assumere significato anche un solo dato sperimentale.

Nel caso di murature di mattoni o in pietra squadrata a tessitura regolare le caratteristiche meccaniche «possono essere desunte dalle proprietà degli elementi costituenti; solo in questo

¹³⁹ Linee Guida, allegato A, modulo D, pag. 142.

¹⁴⁰ I modelli in questione considerano la deformabilità del materiale, v. Linee Guida, pag. 46

caso è possibile fare riferimento alle indicazioni contenute nel punto 11.10 delle NTC o in altri documenti di riconosciuto valore scientifico e tecnico»¹⁴¹.

Inoltre, le Linee Guida consentono di desumere i parametri meccanici anche da indagini condotte su murature di analoga tecnica costruttiva e afferenti alla stessa area geografica eventualmente presenti in una banca dati regionale.

Tuttavia, in assenza degli archivi di cui sopra, si potrà fare riferimento, per ogni tipologia muraria, ai valori dei parametri meccanici definiti nelle Tabelle C8A2.1 e C8A.2.2 della Circolare 617/2009 (Figura 2.4, Figura 2.5).

La possibilità di desumere i parametri meccanici direttamente dalle Tabelle delle Norme Tecniche presuppone comunque il riconoscimento delle tipologie murarie presenti nell'edificio che può avvenire direttamente, nel caso di paramenti a vista, ovvero mediante stonacature o termografie. Questo aspetto della conoscenza è dunque strettamente correlato al precedente anzi ne rappresenta una parte complementare¹⁴².

¹⁴¹ Ivi, pag. 48

¹⁴² Nello schema di capitolato il rilievo materico-costruttivo e la caratterizzazione meccanica dei materiali sono collocate sotto un'unica sezione denominata “Diagnosi sul campo e in laboratorio”. Cfr. Schema di capitolato, pag. 370-374.

Tipologia di muratura	f_m	τ_0	E	G	w (kN/m^3)
	(N/cm^2)	(N/cm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	
	Min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100 180	2,0 3,2	690 1050	230 350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200 300	3,5 5,1	1020 1440	340 480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260 380	5,6 7,4	1500 1980	500 660	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140 240	2,8 4,2	900 1260	300 420	16
Muratura a blocchi lapidei squadrati	600 800	9,0 12,0	2400 3200	780 940	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240 400	6,0 9,2	1200 1800	400 600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura $\leq 40\%$)	500 800	24 32	3500 5600	875 1400	15
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura < 45%)	400 600	30,0 40,0	3600 5400	1080 1620	12
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	300 400	10,0 13,0	2700 3600	810 1080	11
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	150 200	9,5 12,5	1200 1600	300 400	12
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	300 440	18,0 24,0	2400 3520	600 880	14

Figura 2.4 - Tabella C8A.2.1 - Valori di riferimento dei parametri meccanici (minimi e massimi) e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura, riferiti alle seguenti condizioni: malta di caratteristiche scarse, assenza di ricorsi (listature), paramenti semplicemente accostati o mal collegati, muratura non consolidata, tessitura (nel caso di elementi regolari) a regola d'arte; f_m = resistenza media a compressione della muratura, τ_0 = resistenza media a taglio della muratura, E = valore medio del modulo di elasticità normale, G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale, w = peso specifico medio della muratura. Appendice C8A, pag. 389

Tipologia di muratura	Malta buona	Giunti sottili (<10 mm)	Ricorsi o listature	Connessioni trasversale	Nucleo scadente e/o ampio	Iniezione di miscele leganti	Intonaco armato *
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	-	1,3	1,5	0,9	2	2,5
Muratura a conci sbozzati, con parametro di limitato spessore e	1,4	1,2	1,2	1,5	0,8	1,7	2
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	-	1,1	1,3	0,8	1,5	1,5
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,5	1,5	-	1,5	0,9	1,7	2
Muratura a blocchi lapidei squadrati	1,2	1,2	-	1,2	0,7	1,2	1,2
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	1,5	1,5	-	1,3	0,7	1,5	1,5

* Valori da ridurre convenientemente nel caso di pareti di notevole spessore (p.es. > 70 cm).

Figura 2.5 - Tabella C8A.2.2 Coefficienti correttivi dei parametri meccanici (vedi sopra) da applicarsi in presenza di: malta di caratteristiche buone o ottime; giunti sottili; ricorsi o listature; sistematiche connessioni trasversali; nucleo interno particolarmente scadente e/o ampio; consolidamento con iniezioni di malta; consolidamento con intonaco armato. Appendice C8A, pag. 392

Inoltre, è interessante notare, come la caratterizzazione meccanica assunta per le linee guida un'importanza diversa rispetto a quella rivestita nelle NTC08: l'opportunità di usare (e quindi conoscere) i parametri meccanici dipende dal modello che si vuole adottare per l'analisi numerica; la caratterizzazione meccanica non è una indagine da eseguire obbligatoriamente e soprattutto non è un aspetto da cui dipende il livello di approfondimento della fase di conoscenza dell'edificio. Su questo aspetto in particolare si tornerà nel paragrafo § 2.5 .

Aspetti geotecnici

Lo studio delle caratteristiche geotecniche del terreno e della consistenza delle fondazioni costituiscono elementi importanti per la determinazione dell'azione sismica e dei suoi effetti sulla costruzione.

La consistenza e la geometria delle fondazioni dell'edificio andranno indagate preliminarmente attraverso la disamina della documentazione disponibile sulla storia costruttiva dell'edificio, con particolare attenzione alla sussistenza di preesistenze archeologiche.

A valle di questo studio le prove possibili consistono nella esecuzione di pozzetti e trincee esplorative (ovvero perforazioni a carotaggio continuo) atte a verificare il piano di spiccato, la dimensione e la geometria del piede di fondazione.

Le indagini geotecniche possono prevedere prove in situ o in laboratorio e sono finalizzate alla caratterizzazione fisico-meccanica del terreno utile alla definizione di modelli geotecnici adatti alle analisi di risposta sismica locale e d'interazione terreno-struttura.

In generale, questo aspetto della conoscenza non riveste un ruolo cruciale nella comprensione del comportamento manifesto della costruzione, eccezion fatta per quegli edifici in cui, attraverso le operazioni di rilievo diretto è possibile osservare fenomeni riferibili a cedimenti fondali. Su questo punto, la storia dell'edificio rappresenta già un “collaudo” del sistema di fondazione di cui, a meno di interventi incongrui, può valutarsi la qualità attraverso l'indagine diretta.

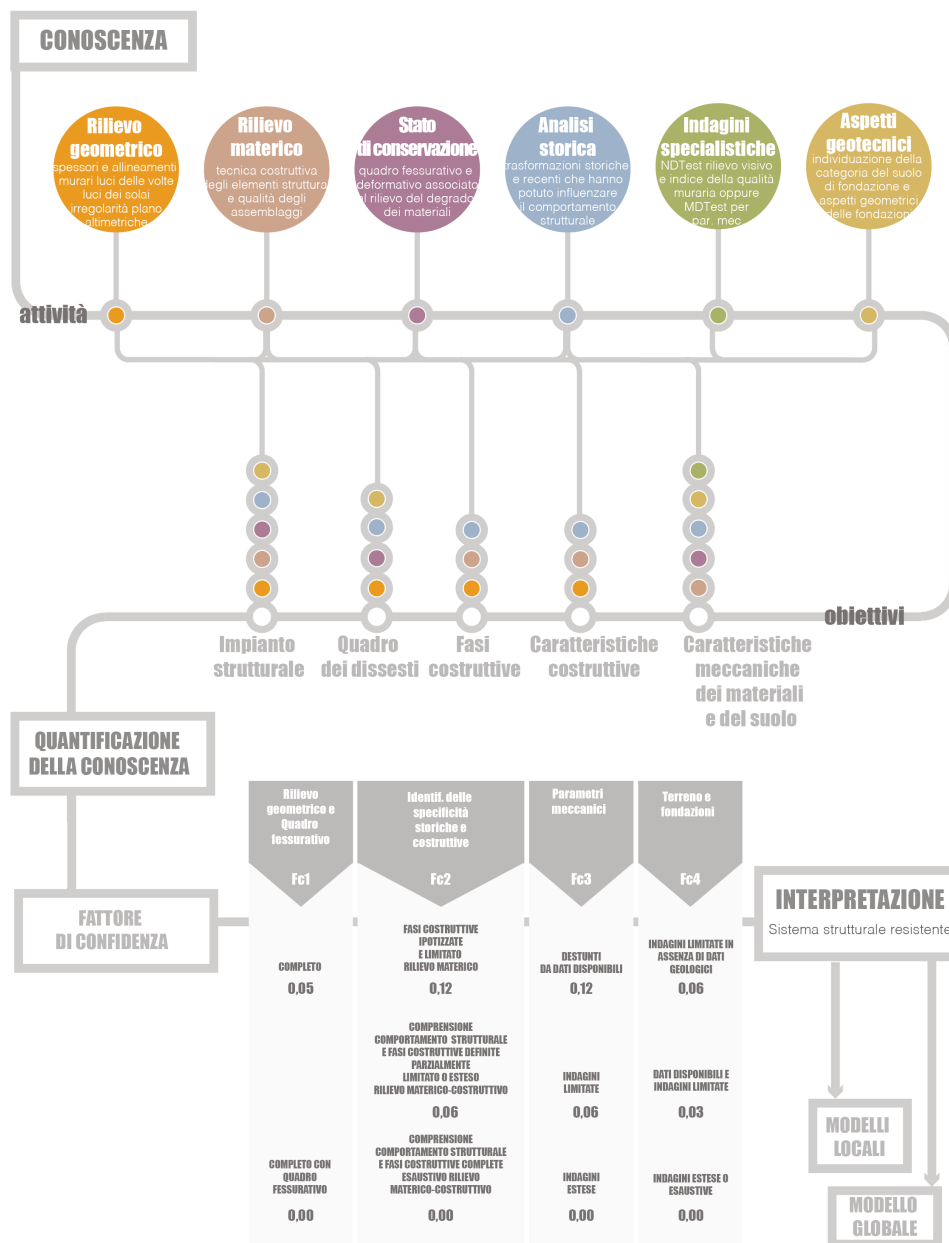


Figura 2.6 – Conoscenza dell’edificio e interpretazione del comportamento strutturale per le Linee Guida, diagramma interpretativo. Livelli di Conoscenza e Fattori di Confidenza

2.5 Livelli di conoscenza e fattori di confidenza

La conoscenza può avvenire a più livelli di approfondimento in relazione alla accuratezza delle indagini eseguite e i vuoti conoscitivi sono tenuti in conto con il Fattore di Confidenza (FC). Il FC nell’ambito delle verifiche di sicurezza si applica in modo diverso in funzione dei modelli per la valutazione della sicurezza sismica. Per i modelli che considerano la deformabilità

e la resistenza dei materiali e degli elementi strutturali il Fattore di Confidenza si applica in genere alle proprietà dei materiali, in particolare riducendo le resistenze ovvero penalizzando le proprietà meccaniche dei materiali riportati nelle Tabelle C8A.2.1 e C8A.2.2. Per i modelli basati sull'analisi limite dell'equilibrio – che considerano il muro come blocco rigido non resistente a trazione – il Fattore di Confidenza si applica direttamente alla capacità della struttura, ovvero riducendo l'accelerazione corrispondente ai diversi stati limite.

La determinazione di questo fattore introduce qualche elemento di differenza tra le Linee Guida e le NTC2008.

Nelle Linee Guida i Livelli di Conoscenza non sono definiti rigidamente e per ogni aspetto della conoscenza sono individuati due o più livelli di approfondimento possibili ai quali sono legati dei Fattori di Confidenza parziali (F_{Ck}), che introducono una maggiore flessibilità nella valutazione del percorso di conoscenza.

Il FC si desume dalla sommatoria dei vari fattori parziali corrispondenti ai seguenti quattro aspetti della conoscenza: (1) il rilievo geometrico, (2) la identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica, (3) le proprietà meccaniche dei materiali, (4) le proprietà del terreno e la fattura delle fondazioni (Figura 2.7).

Rilievo geometrico	identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica	Proprietà meccaniche dei materiali	Terreno e fondazioni
rilievo geometrico completo $F_{C1} = 0.05$	restituzione ipotetica delle fasi costruttive basata su un limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche) $F_{C2} = 0.12$	parametri meccanici desunti da dati già disponibili $F_{C3} = 0.12$	limitate indagini sul terreno e le fondazioni, in assenza di dati geotecnici e disponibilità d'informazioni sulle fondazioni $F_{C4} = 0.06$
rilievo geometrico completo, con restituzione grafica dei quadri fessurativi e deformativi $F_{C1} = 0$	restituzione parziale delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su: a) limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione e alla verifica delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, verifica diagnostica delle ipotesi storiografiche); b) esteso rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche) $F_{C2} = 0.06$	limitate indagini sui parametri meccanici dei materiali $F_{C3} = 0.06$	disponibilità di dati geotecnici e sulle strutture fondazionali; limitate indagini sul terreno e le fondazioni $F_{C4} = 0.03$
	restituzione completa delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su un esaustivo rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, eventuali indagini diagnostiche) $F_{C2} = 0$	estese indagini sui parametri meccanici dei materiali $F_{C3} = 0$	estese o esaustive indagini sul terreno e le fondazioni $F_{C4} = 0$

Figura 2.7 – Tabella 4.1. Definizione dei livelli di approfondimento delle indagini sui diversi aspetti della conoscenza e relativi fattori parziali di confidenza. Linee Guida pag. 54.

Per il rilievo geometrico si individuano due livelli di approfondimento che differiscono per la presenza del quadro fessurativo. Il rilievo geometrico deve comunque essere sviluppato a un livello di dettaglio «coerente con le esigenze del modello geometrico adottato nelle valutazioni analitiche e/o nelle necessarie considerazioni di tipo qualitativo»¹⁴³. L'accuratezza del rilievo è dunque commisurata non solo al tipo di modello utilizzato nella verifica - che di norma prevede drastiche semplificazioni della realtà costruita - ma anche alla formulazione del giudizio sulla qualità, ad esempio, dell'impianto strutturale o alla precisazione delle fasi costruttive desunte dalle fonti¹⁴⁴.

Nell'ambito della identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica è valutato l'approfondimento dello studio del processo evolutivo della fabbrica e della tecnica costruttiva¹⁴⁵ ritenuti determinanti per la definizione del comportamento strutturale. Nella tabella 4.1 sono individuati tre livelli di conoscenza che prevedono:

- (i) l'individuazione ipotetica delle fasi costruttive attraverso un 'limitato' rilievo materico-costruttivo associato alla comprensione delle vicende costruttive
- (ii) restituzione parziale delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su: a) limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione e alla verifica delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, verifica diagnostica delle ipotesi storiografiche); b) esteso rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche)
- (iii) restituzione completa delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su un esaustivo rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, eventuali indagini diagnostiche).

È specificato che il rilievo materico e costruttivo «dovrà tendere, compatibilmente con le esigenze di tutela del bene, ad accertare le diverse tipologie costruttive presenti [...] con particolare attenzione a tutti gli aspetti che possono influenzare l'innescò di meccanismi di collasso locale»¹⁴⁶ (come ad esempio la presenza di discontinuità costruttive, orizzontamenti

¹⁴³ Linee Guida 2010, pag. 53.

¹⁴⁴ Il controllo della configurazione geometria dell'edificio è fondamentale per la individuazione di eventuali anomalie o fattori di vulnerabilità, quali muri in falso o spinte non debitamente contenute. Per la definizione delle fasi costruttive si possono trarre informazioni utilissime dalla lettura attenta della maglia muraria – allineamenti e dello spessore dei muri – che può consentire la individuazione – anche in via ipotetica – di accostamenti murari e discontinuità eventualmente non visibili e sicuramente sostanziare e/o accertare le informazioni desunte dalle fonti documentarie.

¹⁴⁵ Nelle NTC08 gli esiti della ricerca storica non entrano in gioco nella definizione del livello di conoscenza.

¹⁴⁶ Linee Guida 2010, pag. 53. I contenuti minimi relativi agli aggettivi 'limitato', 'esteso' ed 'esaustivo', non sono dunque esplicitati, ma è possibile dedurre che essi si riferiscano alla estensione delle informazioni ottenute rispetto alla dimensione del manufatto.

spingenti, cattivo stato di conservazione, ecc.). Le fasi costruttive devono essere illustrate attraverso grafici «che consentano di relazionare le diverse componenti dell'edificio con le relative epoche costruttive; tali successioni edilizie, ipotizzate, parziali o esaustive, dovranno comunque essere accompagnate da sintetiche argomentazioni che giustifichino la ricostruzione storiografica proposta». È dunque necessario motivare gli esiti sulle fasi costruttive chiarendo se è stato effettuato il controllo diretto informazioni desunte dalle fonti e le modalità utilizzate per eseguirlo. L'oggettività del giudizio sulla completezza delle fasi appare comunque legata alla estensione del rilievo materico-costruttivo¹⁴⁷.

Riguardo i parametri meccanici (3) e i dati geotecnici (4) ai fini della valutazione dell'approfondimento sembra meno determinante la correlazione con indagini diagnostiche finalizzate alla quantificazione delle resistenze della muratura, che si possono finanche desumere da prove effettuate su murature in analogia tecnica costruttiva¹⁴⁸.

Non sono richieste delle indagini di minimo di caratterizzazione meccanica, ma è specificato che dovranno essere utilizzati i valori relativi ai materiali che maggiormente influenzano il valore dell'Indice di sicurezza. Per la definizione dei parametri meccanici delle murature occorre riferirsi così come prescritto nelle NTC08, alla effettiva possibilità di eseguire indagini e verifiche nelle varie parti dell'edificio oggetto di analisi.

In particolare, si segnala che nell'ambito di verifiche locali – considerate peraltro più attendibili nel caso di edifici murari – le linee guida indicano che può essere utilizzato un FC diverso per ogni porzione di edificio individuata (si ammette che per ogni parte della costruzione si può avere una conoscenza diversa); e nel caso delle analisi locali il FC relativo agli aspetti geotecnici può essere considerato pari a zero.

Secondo l'articolazione delle Linee Guida, qualora l'unica fonte di incertezza sia derivante da una carenza di conoscenza sui parametri meccanici e sulla caratterizzazione del terreno, si può infatti assumere un fattore di confidenza $FC=1,18$ (derivante dai fattori parziale $FC_3=0,12$ e $FC_4=0,06$ che rappresentano la condizione in cui non si effettuino indagini dirette e siano disponibili solo dati derivanti da altre fonti) anziché $FC=1,35$ come si avrebbe secondo l'approccio delle NTC08¹⁴⁹.

Risulta evidente, dunque, l'intento delle Linee Guida di commisurare anche la procedura di quantificazione della conoscenza alla peculiarità dell'architettura muraria storica, soprattutto

¹⁴⁷ I dati di minimo richiesti per il raggiungimento di ciascun livello di conoscenza non sono specificati nelle Linee Guida. Tuttavia è possibile dedurre, ad esempio, che l'approfondimento minimo comprenda una comprensione del processo evolutivo della fabbrica ottenuta esclusivamente attraverso le fonti documentarie (bibliografiche o archivistiche), senza prevedere un controllo delle informazioni direttamente sull'edificio.

¹⁴⁸ Le indagini diagnostiche sui materiali sono comunque necessarie per raggiungere il valore minimo $FC=1$

¹⁴⁹ Vedi *supra* § 1.3

per quanto concerne il ruolo della conoscenza dei parametri meccanici ai fini della analisi strutturale. Un altro merito è quello di aver attribuito alla indagine storica un ruolo preponderante – oltre che nello studio di tutti gli aspetti della conoscenza - nella misurazione del livello di approfondimento, rendendola di fatto una operazione imprescindibile.

2.6 Considerazioni critiche

Le Linee Guida hanno per la prima volta sistematizzato in un documento istituzionale una metodologia per la conoscenza finalizzata alla verifica di sicurezza e al progetto di miglioramento sismico dell'edificio murario, che consta di attività afferenti a vari ambiti disciplinari.

All'interno delle Linee Guida è possibile riconoscere concetti chiave che in parte confermano alcune acquisizioni scientifiche già confluite in alcuni testi di indirizzo storici e attuali¹⁵⁰ affianco ad alcuni aspetti innovativi.

In primo luogo, è ribadito che in nessun caso è fatto obbligo di adeguamento ai livelli di sicurezza prescritti dalle NTC08 e che l'intervento compatibile con l'istanza della conservazione è quello del miglioramento sismico. La necessità di intervenire sulle architetture storiche con interventi di miglioramento è una consapevolezza acquisita dalla comunità scientifica e dalla norma già nei primi anni '80¹⁵¹. Per «miglioramento sismico» Le Linee Guida intendono «l'esecuzione di opere in grado di far conseguire all'edificio un maggior grado di sicurezza rispetto alle condizioni attuali, con un livello di protezione sismica non necessariamente uguale a quello previsto per l'adeguamento delle costruzioni»¹⁵² senza peraltro modificare il “funzionamento strutturale accertato” attraverso il percorso della conoscenza.

La locuzione “funzionamento strutturale” in questi termini è interpretabile come l'effettiva *logica* strutturale sottesa dall'edificio murario – legata a caratteristiche intrinseche comuni a tutti gli edifici, come l'essere costituite da elementi semplicemente assemblati – e non il suo *comportamento* sismico – che, oltre che dalla logica strutturale, dipende dalle modalità con cui

¹⁵⁰ Ci si riferisce in particolare alle Raccomandazioni Icomos (Icomos, *Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*, International Scientific Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage, 2003) e alle Linee Guida del CIB (CIB W023 Commission, 2010, *Guide for the Structural Rehabilitation of Heritage Buildings*, ISBN: 978-90-6363-066-9).

¹⁵¹ Vedi *supra* capitolo § 1.4 . In particolare si rimanda alle indicazioni contenute nel DM86 che per la prima volta introduce l'intervento di miglioramento sismico e alla Circolare Ballardini che sottolinea come questa tipologia di approccio sia compatibile con l'istanza della conservazione del patrimonio culturale.

¹⁵² Nel caso in cui il livello di sicurezza raggiungibile è considerato eccessivamente ridotto (vita nominale troppo breve) è auspicata una delocalizzazione delle funzioni strategiche qualora gli interventi per garantirle risultassero troppo invasivi. Cfr. Linee Guida, pag. 23.

gli elementi sono tra loro assemblati e connessi. Infatti, scegliendo di intervenire con il miglioramento sismico¹⁵³ comunque si modificherà il «comportamento» della fabbrica incrementandone le prestazioni – ad esempio in relazione all’attivazione di meccanismi fuori piano – e la conservazione è garantita dal rispetto della logica strutturale immanente dell’edificio murario¹⁵⁴. L’intervento di miglioramento sismico si pone quindi l’obiettivo è di conferire all’edificio una “sicurezza equivalente”¹⁵⁵ a quella che le norme attribuiscono alle nuove costruzioni, in termini di qualità antisismica non sempre dimostrabile a livello quantitativo (I_s non necessariamente uguale a 1).

Un altro concetto ribadito dalle Linee Guida riguarda il *comportamento* sismico tipico dell’architettura storica. L’edificio murario soggetto a un’azione sismica non esibisce un comportamento globale, bensì il danneggiamento avviene per meccanismi di danno che interessano porzioni limitate della costruzione, individuate a valle della fase di conoscenza. Da qui deriva il legame inscindibile tra la verifica di sicurezza e la conoscenza diretta dell’edificio finalizzata a individuare le situazioni di precarietà (da sottoporre a controllo numerico) e al contempo gli agenti che rivestono un ruolo positivo nella risposta sismica da tenere in conto nel giudizio qualitativo complessivo.

I risultati della fase conoscitiva – usualmente utilizzati nella definizione del progetto di restauro – diventano elementi di base per la costruzione di un modello meccanico quanto più aderente alla complessa realtà costruttiva dell’edificio murario storico al fine di garantire una verifica di sicurezza più attendibile.

Le linee guida individuano nell’analisi cinematica lo strumento più efficace per la valutazione dei meccanismi locali¹⁵⁶. L’adozione di cinematismi di corpi rigidi come scelta realistica di

¹⁵³ Nell’ottica della conservazione è possibile scegliere anche la via del “non intervento” riducendo drasticamente l’uso della costruzione, qualora gli interventi minimi necessari atti a garantire la sicurezza siano eccessivamente invasivi.

¹⁵⁴ L’idea di intervenire nel fabbricato murario coerentemente con la sua natura costruttiva caratterizza l’approccio di Antonino Giuffrè al problema della sicurezza sismica degli edifici storici. Essa è basata sulla convinzione che gli edifici murari possiedono una intrinseca qualità antisismica purché siano realizzati in accordo con la regola dell’arte muraria. È la natura stessa delle costruzioni murarie, intese come assemblaggio di elementi, che offre la possibilità di intervenire in chiave conservativa, mediante l’inserimento di dispositivi di connessione, se mancanti, o sostituendo elementi particolarmente degradati non più in grado di assolvere la loro funzione strutturale. Cfr. A. Giuffrè, *L’intervento strutturale quale atto conclusivo di un approccio multidisciplinare...* in C. Carocci – C. Tocci (a cura di), *Leggendo il libro ... op.cit.*, 15 -28.

¹⁵⁵ Vedi la premessa alle Linee Guida scritta da R. Cecchi, M. Calvi, in Moro 2006.

¹⁵⁶ Su questo aspetto un contributo fondamentale proviene dal lavoro di Antonino Giuffrè, che già negli anni ‘80 evidenziava come la complessità dell’architettura muraria fosse inafferrabile con i modelli matematici complessi utilizzati per il calcolo delle nuove strutture. A livello normativo l’uso della analisi cinematica per la valutazione della sicurezza è introdotto per la prima volta dalla OPCM 3431/2005 (§11) e confermato anche dalle NTC08 (§C8A.4).

modellazione, proviene dal riconoscimento che il problema della sicurezza dell'edificio murario sia legato a questioni di equilibrio, più che di resistenza del materiale. In ogni caso, è necessario considerare i risultati delle analisi affianco al giudizio qualitativo proveniente dalla rigorosa interrogazione della realtà costruita¹⁵⁷.

La necessità di affiancare agli esiti della verifica un giudizio qualitativo sul comportamento sismico proveniente dagli esiti della fase di conoscenza è sottolineato anche dalle Linee Guida¹⁵⁸.

La correlazione istituita tra la conoscenza dell'edificio e la valutazione della sicurezza – più marcata rispetto a quella definita dalle norme tecniche – costituisce uno degli aspetti più rilevanti della procedura proposta dalle Linee Guida in tema di quantificazione del livello di conoscenza poiché, riconoscendo la irriducibile multidisciplinarietà dell'intervento sull'esistente, induce a derivare dalla realtà costruita le scelte di modellazione e le strategie di intervento più proprie evitando le semplificazioni dell'astrazione numerica.

Un aspetto assai delicato delle Linee Guida è rappresentato dalla visione della conoscenza dell'edificio come sommatoria della conoscenza raggiunta mediante le diverse indagini condotte (rilievo geometrico, parametri meccanici ecc.).

È semplice mostrare seguendo due approcci concettualmente opposti come sia possibile raggiungere lo stesso FC ovvero lo stesso livello di conoscenza (Figura 2.8).

Una conoscenza adeguata (Figura 2.8 linea continua) può essere ottenuta attraverso un accurato rilievo geometrico e materico costruttivo, che devono prevedere la documentazione del quadro fessurativo, l'analisi degli elementi costruttivi, degli assemblaggi e delle connessioni con l'obiettivo di valutarne l'efficacia in relazione alla risposta sismica. La configurazione attuale è riletta nel suo processo storico analizzando le varie trasformazioni subite sulla base della documentazione bibliografica e archivistica reperibile e della lettura diretta dell'edificio alla ricerca di tracce che confermino le fonti e/o aggiungono informazioni non documentate. L'obiettivo è di definire le principali fasi costruttive e le trasformazioni che possano avere influenza nella risposta sismica attuale. In questo approccio non sono eseguite indagini diagnostiche finalizzate alla quantificazione dei parametri meccanici della muratura, che sono desunti da dati disponibili e la qualità meccanica delle murature è valutata principalmente in relazione alla capacità di esibire un comportamento monolitico sotto l'azione sismica attraverso un esaustivo rilievo costruttivo. Le indagini sul terreno e le fondazioni non sono eseguite se

¹⁵⁷ Cfr. A. Giuffrè, *Restauro e sicurezza in zona sismica...* op.cit.

¹⁵⁸ L'indice di sicurezza ottenuto dalle verifiche non è un parametro cogente ($I_s > 1$) bensì come «un importante elemento quantitativo da portare in conto in un giudizio qualitativo complessivo, che consideri le esigenze di conservazione, la volontà di preservare il manufatto dai danni sismici ed i requisiti di sicurezza, in relazione alla fruizione ed alla funzione svolta» (Cfr. Linee Guida pag. 127), tale giudizio dovrà tenere conto nelle verifiche del contributo (positivo) di aspetti costruttivi importanti individuati nella fase di conoscenza (Cfr. Linee Guida pag. 20).

non in presenza di un quadro fessurativo che rimandi a problemi di stabilità del suolo. Questo percorso di conoscenza corrisponde a un $FC=1,18$.

Tuttavia lo stesso Fattore di Confidenza si può ottenere scegliendo un percorso che tende alla interpretazione del comportamento strutturale attraverso una più spinta astrazione della realtà materica dell'edificio, concentrando l'impegno conoscitivo sulla sola esecuzione di prove diagnostiche di caratterizzazione meccanica dei materiali e del terreno di fondazione (Figura 2.8 linea tratteggiata).

Si tratta di una difficoltà connaturata alla procedura finalizzata a declinare in termini operativi gli esiti del percorso della conoscenza per come formulato nelle Linee Guida. Detta procedura comporta infatti, in molti punti, la necessità di quantificare mediante un unico coefficiente numerico un contenuto di conoscenza di natura eminentemente qualitativo e caratterizzato da un notevole grado di complessità.

Tale contenuto di conoscenza, peraltro, costituisce un imprescindibile prerequisito non solo per una modellazione meccanica affidabile, ma anche per la definizione di una strategia di intervento conservativa. Da questo punto di vista, il problema maggiore non è tanto quello di pervenire a una quantificazione attendibile del grado di incertezza connaturato al livello di conoscenza raggiunto (ciò che agisce immediatamente nella onerosità delle verifiche di sicurezza), quanto di finalizzare il percorso della conoscenza alla gestione dell'intero processo progettuale (ciò che forse potrebbe fornire un criterio razionale per scegliere un particolare "percorso di conoscenza" tra quelli possibili per le Linee Guida ed esemplificati nella Figura 2.8).

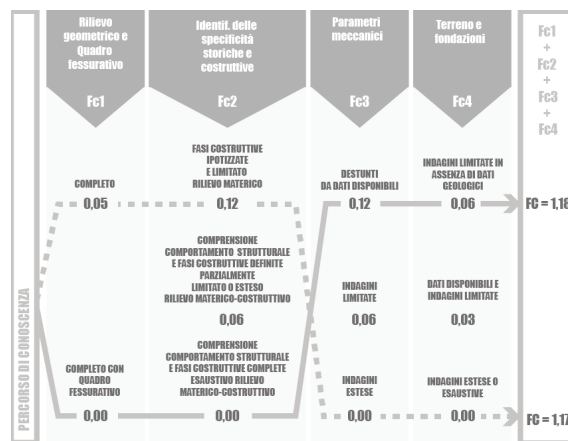


Figura 2.8 – Dal diagramma si evince come a quantità analoghe di FC corrispondano informazioni conoscitive molto diverse per tipologia e qualità. Il percorso con tratto continuo attribuisce un ruolo preminente alla conoscenza diretta del manufatto per cui mira a una interpretazione del comportamento attuale mediante una restituzione quanto più attendibile del processo costruttivo e della consistenza geometrica e materica dell'edificio; i parametri meccanici di materiali e suolo sono desunti da fonti documentarie. Il percorso con linea tratteggiata è sbilanciato verso un approccio opposto, ma i FC sono praticamente analoghi.

3. Il percorso di conoscenza nel progetto di “Verifica sismica dei musei statali” (progetto Arcus-Mibact), applicazione delle Linee Guida.

3.1 Premessa

La sperimentazione dell'approccio proposto dalle Linee Guida è stata avviata già a partire dalla prima stesura.

Nel 2008 il MiBACT ha avviato la sperimentazione sul complesso monumentale degli Uffici a Firenze coinvolgendo l'Università IUAV di Venezia e l'Università di Genova per una verifica sismica condotta secondo modelli semplificati LV1¹⁵⁹.

Una ulteriore sperimentazione è stata eseguita nell'ambito di un progetto di ricerca promosso dalla Direzione Generale dell'Emilia Romagna¹⁶⁰ con l'obiettivo di indagare il livello di sicurezza di 30 edifici tutelati secondo una valutazione di primo livello (LV1)¹⁶¹.

In seguito al terremoto del 2009 è stato avviato il Progetto Sisma Abruzzo¹⁶², con l'obiettivo di sperimentare l'approccio delle Linee Guida su alcuni edifici tutelati danneggiati per i quali era previsto un progetto di restauro con miglioramento sismico. Un importante risultato di questo progetto è lo schema di Capitolato Tecnico Prestazionale – oggi allegato al testo delle Linee Guida – che sistematizza in elaborati (relazioni e tavole) gli obiettivi del percorso della conoscenza.

Ad oggi sono in corso diversi studi volti alla verifica sismica di edifici tutelati sotto la supervisione delle Soprintendenze, dei Comuni e del MiBACT¹⁶³.

¹⁵⁹ v. Curti&Podestà 2010. La ricerca è stata finanziata dal MiBACT e coordinata dal prof. Sergio Lagormarsino dell'Università di Genova (Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni, dell'Ambiente e del Territorio). L'occasione di studio del palazzo degli Uffici è stata offerta dal cantiere in corso in quegli anni per la riqualificazione funzionale ed impiantistica del complesso monumentale per la creazione della nuova sede museale.

¹⁶⁰ Belletti&Damonì 2011

¹⁶¹ Questi studi hanno comprovato la bassa attendibilità dello strumento di valutazione LV1 proposto dal Ministero: se da un lato il SIVARS è utile per la raccolta di dati riguardanti la fattura e lo stato di conservazione degli edifici tutelati.

¹⁶² Progetto “Sisma Abruzzo, risorse CIPE delibera 35/2005 - linea di attività verifiche della vulnerabilità sismica”, coordinato dalla DG PaBAAC e sviluppato con apposita Convenzione (Dicembre 2009) con il Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni dell'Università di Genova, in collaborazione con la Direzione Regionale e le Soprintendenze territoriali dell'Abruzzo.

¹⁶³ Si vedano Iannelli&Salvatore 2013, Prandi et al. 2014

La sperimentazione più recente effettuata dal Ministero riguarda il progetto di “Verifica sismica dei musei statali. Applicazione dell’Ordinanza PCM 3274/2003 s.m.i. e della Direttiva PCM 12/10/2007” (di seguito progetto Arcus), cui ho avuto l’occasione di partecipare direttamente come componente del gruppo di ricerca dell’Università di Catania.¹⁶⁴

Questo capitolo contiene l’analisi delle sperimentazioni condotte nell’ambito del progetto Arcus, ovvero 35 studi volti alla verifica sismica di edifici storici secondo il livello di valutazione più accurato (LV3).

L’analisi è stata condotta con due obiettivi fondamentali: (1) verificare le criticità della procedura di quantificazione della conoscenza attraverso il fattore di confidenza emerse a valle della disamina delle Linee Guida; (2) individuare un percorso di analisi da privilegiare – un “modello di conoscenza” – per il raggiungimento di una conoscenza reale dell’edificio.

3.2 Il Progetto di verifica sismica dei musei statali

Il progetto di “Verifica sismica dei musei statali. Applicazione dell’Ordinanza PCM 3274/2003 s.m.i. e della Direttiva PCM 12.10.2007”, è stato promosso dal Ministero per i Beni e le Attività Culturali e del Turismo nel 2011 con il finanziamento erogato da ARCUS SpA.

Il Progetto si pone l’obiettivo di verificare eventuali difficoltà relative all’applicazione delle Linee Guida del MiBACT e di proporre eventuali precisazioni alla metodologia con l’obiettivo di individuare un approccio che possa servire da modello per gli altri organi istituzionali periferici (le Soprintendenze) che dovranno confrontarsi con la verifica sismica del patrimonio culturale sotto loro tutela.

Le attività hanno avuto inizio nel 2013 e hanno coinvolto vari gruppi di ricerca afferenti a 17 istituti universitari, impegnandoli nello studio di 37 edifici storici con destinazione d’uso museale per i quali eseguire la verifica della sicurezza sismica con il medesimo riferimento metodologico - le Linee Guida – e sotto un coordinamento unico¹⁶⁵.

¹⁶⁴ Il gruppo di ricerca dell’Università di Catania ha avuto come responsabile scientifico la prof.ssa Caterina Carocci e coordinatore generale il prof. Nicola Impollonia; componenti del gruppo di lavoro: arch. Chiara Circo, arch. Giuseppe Cocuzza Avellino; arch. Serena Petrella.

¹⁶⁵ Il Responsabile Unico del Procedimento è l’arch. Pia Petrangeli. Il progetto ha previsto la presenza di un Gruppo Tecnico costituito dal Ministero e dal Consorzio ReLUIIS che ha avuto funzione di coordinamento tra gli istituti universitari partecipanti al Progetto.

Gli elaborati richiesti per l'espletamento delle verifiche sismiche seguono lo schema di Capitolato prestazionale redatto nell'ambito del Progetto Sisma Abruzzo,¹⁶⁶ e sono di seguito elencati:

1. Caratterizzazione geologica del sito, geotecnica e sismica dei terreni
2. Analisi storico critica
3. Documentazione fotografica
4. Rilievo geometrico dei manufatti
5. Diagnosi sul campo e in laboratorio (rilievo materico costruttivo e indagini specialistiche)
6. Analisi dello stato di fatto e del comportamento strutturale con indicazione dei danni
7. Valutazione dell'impatto degli impianti tecnologici sugli elementi strutturali
8. Valutazione della sicurezza strutturale
9. Report di sintesi dei risultati significativi
10. Relazione finale (che consiste in una sintesi del lavoro svolto, dalla conoscenza preliminare alla verifica di sicurezza)

In particolare, riguardo la caratterizzazione geotecnica del terreno (punto 1), il progetto Arcus ha previsto anche il coinvolgimento del CNR-IGAG per l'analisi della risposta sismica locale (RLS) di alcuni siti su cui sorgono gli edifici oggetto di studio.

Il Progetto ha richiesto che tutti gli edifici fossero analizzati con un livello di conoscenza adeguato corrispondente a un Fattore di Confidenza pari a 1,20 (o inferiore) nell'ottica di raggiungere una diffusa e approfondita conoscenza dei beni oggetto di studio e di ottenere risultati confrontabili sul piano degli indici di sicurezza. Infine, per la verifica della sicurezza sismica (obiettivo del percorso della conoscenza) sono stati richiesti i tre livelli di valutazione previsti dalle Linee Guida¹⁶⁷.

L'organizzazione del progetto ha previsto la scansione delle attività nelle seguenti fasi operative: conoscenza del manufatto, conoscenza strutturale dell'edificio (rilievo materico-costruttivo, esecuzione delle indagini in situ e in laboratorio), verifiche numeriche. Al termine di ciascuna fase il lavoro di ogni gruppo di ricerca è stato presentato nell'ambito di riunioni collegiali con l'obiettivo di confrontare i risultati raggiunti e gli approcci utilizzati.

3.2.1 Il campione analizzato

L'analisi ha come oggetto 34 dei 37 edifici che costituiscono il progetto Arcus. Dall'analisi è escluso un edificio costruito in tempi relativamente recenti in cemento armato, quindi non confrontabile con gli edifici storici in termini di percorso e attività della conoscenza; il secondo

¹⁶⁶ Il Capitolato prestazionale delle Linee Guida è disponibile on line a questa pagina del sito del MiBACT (ultimo aggiornamento gennaio 2011)

¹⁶⁷ v. *supra* § 2.3

caso escluso è il complesso archeologico di Sepino, costituito da un insieme di edifici murari sparsi, esempio unico in questi termini; infine, non rientra nell'analisi Palazzo Lanfranchi a Matera – edificio studiato direttamente – al quale è dedicato l'ultimo capitolo della tesi.

Il campione comprende edifici murari storici afferenti a diverse tipologie architettoniche, localizzati in 11 regioni italiane in territori soggette a rischio sismico (Figura 3.1).

Classificazione degli edifici

Per agevolare il confronto dei risultati, l'analisi è stata organizzata raggruppando gli edifici in base alla tipologia architettonica e alla localizzazione dell'oggetto di studio nel tessuto costruito. Ciò è funzionale alla individuazione di eventuali analogie di approccio tra i vari gruppi di ricerca nel caso di edifici dalle caratteristiche analoghe.

Il riconoscimento di configurazioni ricorrenti ci consente, in questa sede, una semplificazione finalizzata principalmente al confronto delle metodologie utilizzate nella fase di conoscenza, alla individuazione di eventuali analogie negli approcci e nella interpretazione dei dati conoscitivi (giudizio qualitativo e scelta del modello strutturale).

A tal fine sono individuate quattro categorie di edifici: (i) palazzi in aggregato, (ii) ville e palazzi isolati, (iii) chiese e monasteri, (iv) costruzioni fortificate.

Le due tipologie di palazzo e villa, per le Linee Guida, sono descritte come «[...] costruzioni con sviluppo planimetrico anche complesso, costituite da un sistema di pareti portanti perimetrali ed interne, disposte secondo diverse direzioni, e da un sistema di orizzontamenti intermedi, che spesso svolgono anche una funzione di collegamento»¹⁶⁸.

Dal punto di vista dell'analisi strutturale questa semplificazione è condivisibile¹⁶⁹. Tuttavia nell'ambito della fase di conoscenza possono sussistere delle differenze nelle analisi da approntare influenzate dalla differente collocazione nel tessuto costruito. Le ville e i palazzi storici oggetto di analisi sono costruzioni isolate che sorgono all'interno di grandi giardini o spazi di pertinenza, in alcuni casi costruiti secondo un progetto unitario e in unica fase costruttiva. I “palazzi in aggregato” fanno parte di *aggregati* strutturali e quindi interagiscono con edifici contigui, ovvero sono essi stessi un aggregato strutturale, come risultato della rifusione di più unità edilizie¹⁷⁰.

I monasteri e i conventi formano una classe per le note affinità di impianto architettonico costituito da ambienti di piccola o media dimensione costruiti attorno a uno o più chiostri, ai

¹⁶⁸ Cfr. MiBACT 2010, pag. 70

¹⁶⁹ Nell'ambito della modellazione la realtà è comunque semplificata e la differenza tra palazzo e villa si sostanzierebbe nell'applicazione di uno o più vincoli a seconda della presenza o meno di edifici contigui.

¹⁷⁰ Pensiamo, ad esempio, al controllo del rilievo geometrico. Nel caso di un edificio compreso in un aggregato strutturale è opportuno conoscere la configurazione plano-altimetrica degli edifici ad esso contigui (sono anch'essi dei vincoli) per cui le operazioni di rilievo possono essere più onerose.

quali si affiancano edifici specialistici – le chiese – dalla conformazione radicalmente diversa caratterizzata da «strutture con grandi aule senza orizzontamenti intermedi»¹⁷¹.

Le costruzioni fortificate comprendono castelli e roccaforti che sono accomunati dalla peculiare struttura di elevazione caratterizzata dalla compresenza di muri aventi caratteristiche molto diverse (cinta muraria e pareti degli edifici ad esse addossate).

Indagini utilizzate dai gruppi di ricerca per la fase di conoscenza

È opportuno anticipare la descrizione dei casi studio con una breve descrizione delle metodologie e delle prove diagnostiche utilizzate dai vari operatori, finalizzata ad agevolare la comprensione delle descrizioni dei casi studio, in cui tali indagini sono solo citate.

Il percorso della conoscenza può prevedere – anche per le Linee Guida – l'esecuzione di un piano di indagini specialistiche finalizzato ad approfondire la conoscenza di alcuni dati non reperibili dal rilievo diretto o all'indagine storica e bibliografica, come lo studio dei dettagli costruttivi (tessiture murarie, ammorsamenti, orditura solai) o alla verifica di discontinuità materiche. In altri casi, le indagini di approfondimento possono mirare alla caratterizzazione meccanica degli elementi strutturali, con particolare riguardo alle murature.

Nell'ambito delle sperimentazioni del Progetto Musei Statali possono individuarsi due grandi classi di indagini: indagini schedografiche e indagini diagnostiche. Queste ultime sono suddivise in due grandi gruppi in base al grado di invasività nei confronti del monumento. Si hanno così Prove Non Distruttive (NTD – Non Destructive Test) e Prove Moderatamente Distruttive (MDT – Moderately Destructive Test)¹⁷².

Tabella 3.1 – Nella tabella sono elencate le tipologie di indagini diagnostiche maggiormente utilizzate dalle unità di ricerca per lo studio dei musei statali. Nella tabella sono specificati gli obiettivi generalmente perseguiti dalle UR con ciascuna indagine.

¹⁷¹ Cfr. Linee Guida 2010, pag. 79

¹⁷² Nel campo della diagnostica esistono anche i Test Distruttivi, ma per i casi oggetto di studio tali prove non sono contemplate perché incompatibili con l'istanza di conservazione del monumento.

Tabella 3.1

INDAGINE	TIPOLOGIA - MODALITÀ ESECUTIVE	OBIETTIVI PRINCIPALI
Indice di Qualità Muraria (IQM)	<p>NDT - La procedura richiede di esprimere un giudizio sul rispetto di sette parametri caratteristici della regola dell'arte: (1) efficace contatto fra gli elementi, (presenza di zeppe, malta di buona qualità); (2) presenza di diatoni, (3) elementi resistenti di forma quadrata; (4) elementi resistenti di grande dimensione rispetto allo spessore del muro; (5) sfalsamento tra i giunti verticali; (6) presenza di filari orizzontali; (7) buona qualità degli elementi resistenti. I livelli di giudizio sul rispetto dei parametri sono tre: (i) rispettato, (ii) parzialmente rispettato; (iii) non rispettato</p>	<p>Caratterizzazione delle murature, definizione della qualità muraria e dei parametri meccanici più appropriati.</p>
Classificazione GNDT	<p>NDT - La procedura consiste nel riconoscere la tipologia muraria dall'osservazione di alcuni elementi: elementi costitutivi (mattoni, pietra, ...); malta (di calce, cementizia, ...); posa in opera, ovvero tessitura (apparecchiatura, ricorsi o listature, zeppe/scaglie) e sezione trasversale (paramento unico, due paramenti accostati, ...); intonaco (presente, facciavista, stato di conservazione, ...); collegamenti tra le pareti (angolate, martelli); interventi di consolidamento (alla muratura o ai collegamenti)</p>	<p>Caratterizzazione delle murature, definizione della qualità muraria</p>
Ispezione Visiva (IV)	<p>NDT - Si intende il rilievo a vista della tessitura muraria, previa demolizione di una porzione di intonaco di dimensioni minime 1mx1m. Il rilievo prevede il disegno della muratura a vista, mettendo in evidenza gli elementi che ne definiscono la qualità in termini di aderenza alla regola dell'arte: orizzontamenti, ricorsi o listature, sfalsamento dei giunti verticali, dimensioni medie degli elementi, ipotesi della sezione trasversale, modalità di riempimento degli interstizi (malta, zeppe o scaglie), qualità della malta.</p>	<p>Caratterizzazione delle murature, definizione della qualità muraria</p>
Termografie (TM)	<p>NDT - La termografia consiste nell'acquisizione di immagini utilizzando la banda delle radiazioni infrarosse. La termocamera riconosce la distribuzione delle temperature legata ai differenti coefficienti di conducibilità termica dei materiali che costituiscono gli strati più esterni dei muri e degli orizzontamenti e restituisce una mappatura degli elementi immediatamente sotto l'intonaco. Un'analisi termografica può essere condotta in modo passivo o attivo; la differenza consiste nell'utilizzo o meno di sorgenti artificiali per il riscaldamento della superficie da analizzare.</p>	<p>Caratterizzazione delle murature e degli orizzontamenti coperti da intonaco; rilievo di cesure murarie e dei collegamenti. Rilievo delle lesioni.</p>
Soniche e Ultrasoniche (SO-US)	<p>NDT - Le indagini soniche consentono di caratterizzare e descrivere qualitativamente la muratura in termini di omogeneità e compattezza interna, in base alla generazione di onde nell'ambito di frequenze soniche in un punto della struttura, attraverso la percussione o con appositi strumenti o con trasduttori elettrodinamici. Si basano sul principio che la velocità di propagazione delle onde in un materiale elastico, omogeneo ed isotropo sia correlata con i moduli elastico e di Poisson del mezzo stesso. La prova consiste nel colpire manualmente una porzione di muratura, generalmente costituita da un pannello 1x1 metro, suddiviso in una griglia di punti equidistanti 20/25 cm tra loro, utilizzando un martello opportunamente strumentato, generando delle onde elastiche (frequenza pari a 20 - 20.000 Hz) che si propagano nel muro e nel misurare il tempo di volo che serve all'impulso emesso per coprire la distanza tra l'emettitore e il ricevitore (accelerometro). La velocità di propagazione è calcolata dividendo la distanza tra emettitore e ricevitore per il tempo di volo. Le prove soniche possono essere di tre tipi: diretta, indiretta ed semiretta in base al posizionamento dell'emettitore e del ricevitore.</p>	<p>Caratterizzazione delle murature, definizione della qualità muraria</p>
Sclerometriche (SC)	<p>NDT - La prova è eseguita utilizzando uno sclerometro, appunto, che mediante la percussione sul materiale è in grado di misurarne la durezza. Si basa sul principio che il rimbalzo della massa metallica che percuote la superficie è funzione della durezza della superficie stessa.</p>	<p>Caratterizzazione delle murature e delle malte</p>

INDAGINE	TIPOLOGIA - MODALITÀ ESECUTIVE	OBIETTIVI PRINCIPALI
Magnetometriche Pacometriche (PA)	<p>NDT - Il metodo si basa sul principio operativo delle correnti parassite (eddy current). L'impulso di corrente applicato alla sonda di ricerca, contenente due bobine, genera un campo magnetico che, inducendo delle correnti parassite, magnetizza la barra di armatura. Una volta esaurito l'impulso, le correnti parassite iniziano a dissolversi creando un campo magnetico di intensità ridotta come ripetizione (eco) dell'impulso iniziale, che viene nuovamente misurato dalle bobine nella sonda. L'intensità dell'eco determina la dimensione della barra, la distanza della stessa dalla sonda e l'orientamento della sonda rispetto alla barra, quindi la direzione delle armature.</p> <p>Attraverso il pacometro si misura il campo magnetico determinato dalla presenza materiali ferrosi nelle vicinanze della superficie del calcestruzzo oggetto di indagine. Attraverso tali misurazioni si possono rilevare, come se proiettate sul piano costituito dalla superficie del calcestruzzo: la posizione (tale da consentire la stima dell'interferro e del copriferro) la direzione, il numero e il diametro delle armature, poste su piani paralleli a quello di indagine; il passo delle staffe; rilevare la presenza di altri oggetti metallici quali tubazioni, cavi elettrici, tiranti.</p>	Determinazione della direzione dell'armatura metallica di elementi in c.a.
Resistograph	<p>NDT - Prevede l'inserimento di un lungo e sottile ago nell'elemento ligneo. Lo strumento misura e registra l'energia impiegata nella perforazione, mettendo in relazione questi dati con la densità del legno perforato.</p>	Densità degli elementi lignei
Pull-out	<p>NDT - La prova consiste nell'introduzione di una vite a elica nel giunto di malta e nel misurare la forza necessaria per estrarla.</p>	Determinazione della resistenza della malta
Saggi esplorativi (SE)	<p>MDT - Consistono nella rimozione di uno o più elementi lapidei dalla tessitura muraria per esplorare la tessitura nello spessore.</p>	Caratterizzazione delle murature, definizione della qualità muraria
Carotaggi	<p>MDT - Il carotaggio consiste nell'estrazione dalle strutture di campioni cilindrici tramite carotatrici. La profondità e la dimensione del carotaggio sono legate allo spessore degli elementi da indagare e agli obiettivi dell'indagine. Inoltre il criterio comune da seguire durante i prelievi deve essere la riduzione al minimo del danneggiamento provocato dall'estrazione sul campione.</p>	Caratterizzazione delle murature, definizione della qualità muraria.
Endoscopie (EN)	<p>MDT - L'endoscopia si esegue praticando un foro di piccolo diametro nei punti da indagare; possono essere sufficienti fori di 10 mm e genericamente inferiori ai 20 mm. La profondità del foro è variabile a seconda dell'indagine da effettuarsi, come limite massimo si possono eseguire fori di lunghezza pari a 120-150 cm. Per eseguire i fori nella muratura vengono utilizzati trapani a basso numero di giri per evitare vibrazioni eccessive nella muratura indagata.</p>	Caratterizzazione delle murature, definizione della qualità muraria, spessori murari
Martineti Piatti Singoli Doppi	<p>MDT - Il martinetto piatto singolo consiste nell'esecuzione di un taglio in direzione normale alla superficie del muro. Introducendo un martino piano all'interno della fessura è possibile riportare i lembi della fenditura creata dal taglio nelle condizioni iniziali. La forza esercitata del martinetto per ottenere questa situazione consente di ottenere lo stato tensionale nella muratura.</p> <p>Il doppio martinetto piatto consiste nella esecuzione di due tagli paralleli nella muratura a una certa distanza (da 50 a 100 cm a seconda della muratura), all'interno dei quali sono posizionati due martini piatti. Mandando in pressione i due martinetti si provoca uno stato di tensione monoassiale sulla porzione di muratura compresa fra i due martini, riproducendo quindi una prova in condizioni simili a quelli di un test uniassiale convenzionale. La prova può proseguire fino alla rottura del campione, in modo da ottenere indicazioni sulle caratteristiche di resistenza della muratura.</p>	Caratterizzazione meccanica delle murature: stato tensione, deformabilità e resistenza della muratura

3.3 Obiettivi e metodologia di analisi

La disamina delle sperimentazioni realizzate con il Progetto Arcus, come accennato più sopra, si pone l'obiettivo di verificare le criticità emerse a valle della lettura critica delle Linee Guida relativa alla valutazione del livello di conoscenza raggiunto su ogni analisi attraverso il fattore di confidenza. Altro obiettivo perseguito dall'analisi è l'individuazione – se esiste – di un “modello di conoscenza” ricorrente per lo studio degli edifici storici e di eventuali influenze di metodo provenienti dalle caratteristiche tipologiche e morfologiche dell'edificio.

L'esame condotto su queste sperimentazioni ha previsto la consultazione degli elaborati prodotti dai gruppi di ricerca, con particolare riguardo al materiale inerente la fase conoscitiva. Sono stati consultati:

- Relazione finale;
- Analisi storico critica (relazione e tavole);
- Rilievo geometrico (relazione e tavole);
- Rilievo materico (relazione e tavole);
- Rilievo del danneggiamento (relazione e tavole);
- Piano delle indagini specialistiche (relazione e tavole);
- Verifiche strutturali.

La documentazione è stata analizzata eseguendo una lettura finalizzata a:

1. descrivere le caratteristiche generali dell'edificio, quali rapporto con il contesto, consistenza materica e dimensionale, storia costruttiva, ecc., che influiscono sulle attività previste dal “percorso della conoscenza” delle Linee Guida. Lo scopo è formulare un'idea soggettiva delle potenziali difficoltà di questa fase e fornire gli elementi di base per comprendere l'approccio conoscitivo e le modalità operative dei gruppi di ricerca.
2. mettere in relazione i risultati raggiunti da ogni gruppo di ricerca sugli aspetti della conoscenza che entrano in gioco nella definizione del FC – rilievo geometrico e quadro fessurativo (F_{C1}), identificazione delle specificità storiche e costruttive (F_{C2}), parametri meccanici (F_{C3}), terreno e fondazioni (F_{C4}) – con le modalità operative e le eventuali prove diagnostiche utilizzate per lo svolgimento di ciascuna attività. L'obiettivo è di valutare criticamente il piano delle indagini specialistiche e i criteri utilizzati per la “stima del livello di conoscenza” (scelta del FC parziale).

Sono stati inoltre analizzati i giudizi sul comportamento strutturale dell'edificio e i modelli utilizzati per l'espletamento dei tre livelli di valutazione, con l'obiettivo di verificare come sono interpretati i dati provenienti dalla fase di conoscenza e come confluiscono nella verifica numerica.

Gli esiti della lettura critica di ogni edificio sono illustrati in schede sintetiche costituite da 3 sezioni principali: a) caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio, b) metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza, c) interpretazione delle informazioni.

La prima sezione (a) comprende una descrizione sintetica della configurazione e della storia costruttiva dell'edificio per come è possibile comprendere dagli elaborati prodotti dalle unità di ricerca. Sono descritti i seguenti aspetti:

- collocazione dell'edificio nel tessuto edilizio, precisando se si tratta di un edificio *isolato* (assenza di interazioni con altre strutture), in *aggregato* precisandone la posizione (di testata, intercluso) e l'entità delle interazioni, oppure se l'oggetto di studio è esso stesso un aggregato edilizio (complesso architettonico/monumentale), derivante macroscopicamente dall'unione/rifusione di più edifici afferenti a epoche costruttive diverse.
- conformazione geometrica dell'edificio, indicando la superficie di impronta a terra e altezza media alla gronda (ricavata dalle misure presenti negli elaborati del Rilievo Geometrico);
- impianto strutturale con particolare riferimento alla configurazione della maglia muraria (compatta, diradata, ...) e alle eventuali irregolarità plano-altimetriche (fondazioni su sedimenti a quote differenti, terrazzamenti, elementi/porzioni svettanti, planimetria irregolare) anche dovute alla presenza di elementi strutturali con caratteristiche molto differenti (mura di cinta, acquedotti,...) o di edifici specialistici (la descrizione proviene dall'analisi degli elaborati grafici del rilievo geometrico);
- sintesi delle fasi costruttive più importanti (desunte dall'analisi storico-critica)
- tecnica costruttiva degli elementi strutturali, accessibilità e visibilità delle informazioni (presenza di intonaco o muri facciavista)

La sezione (a) si chiude con un giudizio sulle difficoltà conoscitive che caratterizzano l'edificio basato su considerazioni in merito a dimensioni e irregolarità plano-altimetriche dell'edificio, accessibilità e visibilità delle informazioni, complessità delle fasi evolutive ed eterogeneità delle tecniche costruttive.

Nella seconda sezione (b) sono descritti i risultati raggiunti e le indagini condotte per ciascun aspetto della conoscenza e i relativi fattori di confidenza parziali selezionati dal gruppo di ricerca. Alcune note critiche sui risultati ottenuti sono già inserite in questa sezione per marcare le differenze tra i casi analizzati e verificare se a tali differenze corrispondono differenti fattori parziali di confidenza.

Nella terza sezione (c) è riportata una sintesi del giudizio qualitativo sul comportamento strutturale delineato dal gruppo di ricerca a valle del percorso della conoscenza e dell'interpretazione dei dati che si concretizza nella scelta del modello meccanico per la valutazione della sicurezza (globale, locale). Infine, è descritto sinteticamente il modello utilizzato dal gruppo di ricerca per la esecuzione di ogni livello di valutazione.

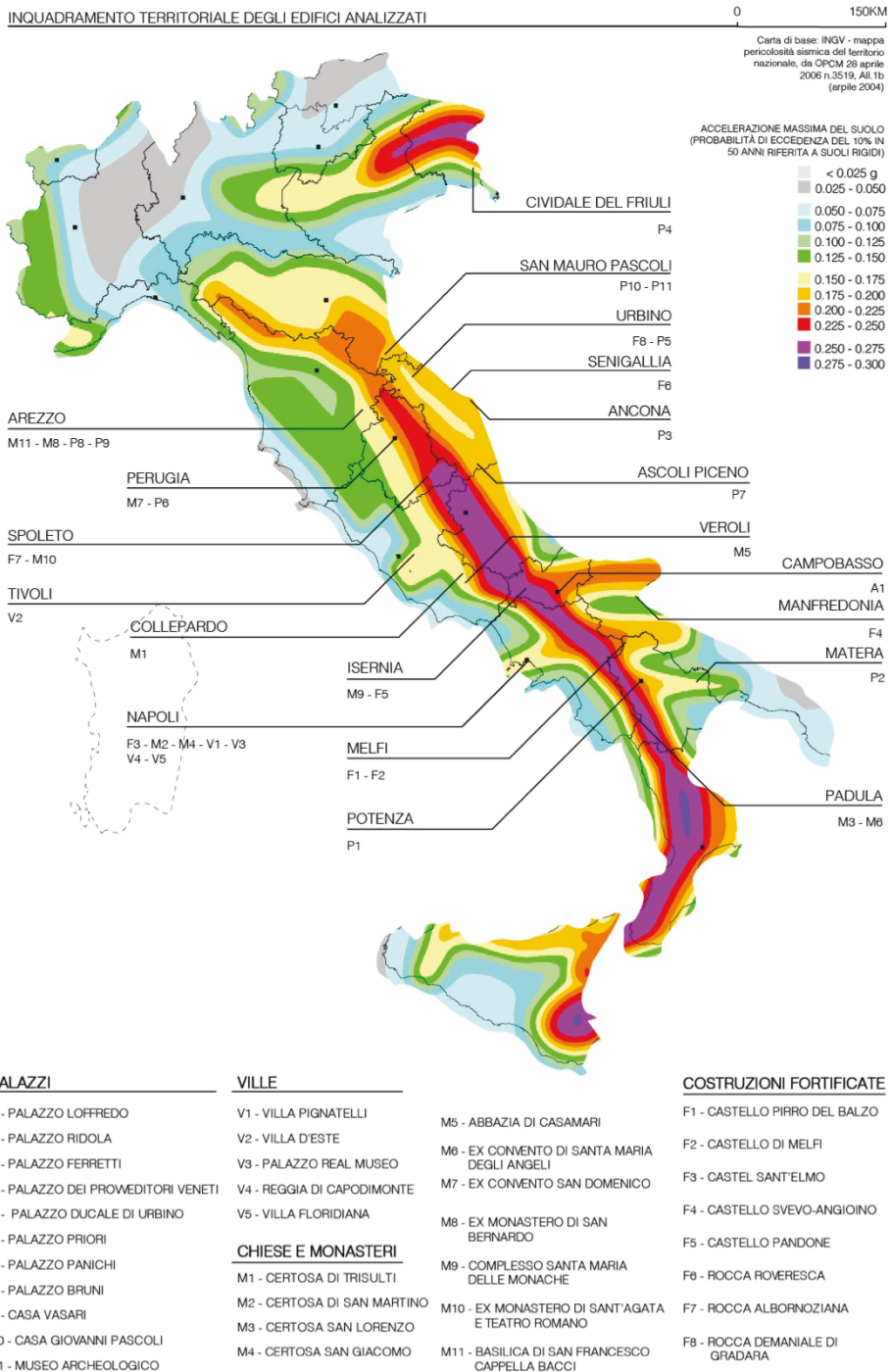


Figura 3.1 - Inquadramento territoriale degli edifici analizzati. La carta di base è tratta dalla mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale elaborata dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e allegata alla OPCM del 28 aprile 2006 n. 3519, Allegato 1b.

3.4 Palazzi in aggregato

P1. PALAZZO LOFFREDO, POTENZA

Palazzo Loffredo è situato nel centro storico di Potenza e rappresenta per la Basilicata una importante testimonianza di palazzo signorile del XVII secolo. Dal 2005 è sede del Museo Archeologico Dinu Adamesteanu.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

Il palazzo ha un impianto di forma prossima al quadrato con una superficie di impronta a terra di circa 2.000 mq, per tre livelli fuori terra aventi altezza media di circa 8 m alla gronda. È caratterizzato dalla presenza di due corti: la corte di ingresso aperta sul lato est a una quota superiore rispetto alla strada; e la corte centrale (ormai chiusa con una copertura metallica).

Rispetto al tessuto edilizio del centro storico, il palazzo si configura come un edificio isolato.

Il palazzo sorge su un pendio lieve che ha consentito la formazione di un piano interrato e di una cisterna al di sotto della corte di ingresso.

Dal punto di vista plano-altimetrico si osservano alcune irregolarità nell'andamento dei solai in alcuni casi non allineati; le fondazioni sembrano impostate tutte sul medesimo piano; non si osservano elementi svettanti, ma si nota l'altezza particolarmente contenuta di una porzione dell'edificio prospettante su piazza Duomo.

Il primo impianto di Palazzo Loffredo risale agli inizi del Seicento (1604) ed è impostato sui resti di un antico complesso conventuale celestino.

L'impianto originario probabilmente aveva forma pressoché rettangolare con il prospetto principale su tre livelli con la campata centrale forata da un loggiato con archi a pieno sesto e ingresso principale al piano terra definito dal portale durazzesco. Dagli inizi dell'Ottocento, nell'arco di due secoli, al corpo centrale originario sono affiancate due ali ortogonali, costituendo così un edificio a forma di "h", in parte leggibile sull'attuale maglia muraria del piano terra. Agli inizi del Novecento è costruito un ampliamento che definisce la seconda corte; la struttura da progetto è sempre in muratura portante ed è accostata alla preesistente. Tra il 1980 e il 1990, a seguito dei danni dovuti al terremoto del 23 novembre 1980, sono eseguiti lavori di adeguamento sismico. Sono inseriti anche elementi strutturali in cemento armato e acciaio (scala su lato nord e Galleria Civica nella corte nuova) e gli orizzontamenti in muratura sono consolidati con cappe di cemento armato e "cinturazione"; le murature, sono consolidate con placcaggio o con perforazioni armate di 5-6 metri; le fondazioni sono consolidate con micropali.

Le vicende costruttive dell'edificio implicano una limitata eterogeneità delle tecniche costruttive, soprattutto dovuta agli interventi recenti. La struttura di elevazione è in gran parte in muratura costituita da diverse tipologie murarie: quella prevalente è la muratura in pietra sbozzata e alcune porzioni più recenti (inizi '900) in mattoni pieni. La maglia muraria è abbastanza compatta al piano terra, con l'unica eccezione di un vano contiguo alla corte centrale coperto da una volta a botte e caratterizzato da una luce libera molto ampia. Uno schema analogo è osservabile ai piani superiori,

dove i muri diventano di spessore inferiore ma gli allineamenti rimangono i medesimi, se non in rare occasioni in cui il muro è assente.

Gli orizzontamenti sono in prevalenza solai piani in cemento armato, e solo in minima parte voltati (comunque consolidati con elementi in c.a.).

Le difficoltà per il raggiungimento di una conoscenza adeguata di questo edificio – di dimensioni relativamente contenute – sono ascrivibili alla presenza di diffusi interventi di adeguamento sismico delle strutture la cui consistenza e la realizzazione che non possono essere accertati direttamente. Il giudizio del comportamento strutturale attuale deve tener conto di questi interventi che – per molti versi – hanno modificato in maniera radicale e definitiva il funzionamento originario.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La restituzione della geometria strutturale è stata realizzata con strumentazione tradizionale effettuando un controllo a campione su alcune parti dell'edificio, ritenendo affidabile il rilievo degli anni '90¹⁷³. I prospetti sono stati realizzati con il supporto del rilievo fotogrammetrico¹⁷⁴. Il quadro fessurativo e lo stato di degrado sono rilevati attraverso documentazione fotografica, attribuendo particolare attenzione alla valutazione dello stato attuale degli interventi di adeguamento sismico degli anni '80-'90. Non è presente un quadro fessurativo rilevante e le poche lesioni sono riportate nei prospetti. A seguito di queste risultanze per l'aspetto "Rilievo geometrico" scelto $F_{CI}=0,05$.

Le fasi evolutive sono state ricostruite con il supporto di una ricerca bibliografica e archivistica, che ha rivelato la mancanza delle fonti sulle trasformazioni avvenute dalla costruzione del palazzo ai primi anni dell'Ottocento. La ricostruzione è fondata su ipotesi basate su vedute storiche e solo in minima parte confermate da riscontro diretto sull'edificio, in cui eventuali segni di discontinuità non sono visibili per la presenza di intonaco. La sintesi delle fasi costruttive è rappresentata da un modello schematico tridimensionale in cui sono definiti 3 volumi corrispondenti alle 3 fasi principali.

I dettagli costruttivi sono stati analizzati con il supporto di indagini diagnostiche per le porzioni di muratura coperte da intonaco (stonacature, video-endoscopie, termografie), indagini pacometriche sono utilizzate per verificare la presenza di rete metallica sui muri. Termografie e stonacature hanno permesso il riconoscimento delle tipologie murarie.

Non sono stati realizzati degli elaborati di dettaglio che illustrano gli assemblaggi tra i vari elementi strutturali, e la qualità muraria è definita mediante un confronto con tabella C8A.2.2: per ciascun parametro definito dalla norma – giunti sottili, ricorsi, eccetera – sono descritte le caratteristiche

¹⁷³ Le relazioni disponibili sul rilievo geometrico non chiariscono le metodologie e gli strumenti utilizzati se non per i prospetti, per cui si avanza l'ipotesi che il controllo sia avvenuto con strumentazione tradizionale.

¹⁷⁴ Probabilmente i prospetti non erano presenti nel materiale di base e dovevano essere realizzati ex-novo.

riferibili a palazzo Loffredo accompagnate da un giudizio qualitativo sulle murature. Si considera di aver eseguito un rilievo materico “esteso”, per cui è scelto $F_{C2}=0,06$.

Le indagini sui parametri meccanici sono considerate “limitate” ed è scelto $F_{C3}=0,06$. Sono stati utilizzati i valori medi della tabella C8A.2.1 della Circolare 617, incrementati o diminuiti con i coefficienti correttivi.

Infine, relativamente a “terreno e fondazioni” sono disponibili indagini pregresse condotte tra gli anni '80 e '90, per cui è scelto un $F_{C3}=0,03$.

Dalla sommatoria dei fattori parziali si ottiene il valore globale di $FC=1,20$.

Interpretazione delle informazioni

Il giudizio qualitativo sul comportamento strutturale evidenzia vulnerabilità ascrivibili (i) a irregolarità plano-altimetriche (solai sfalsati con diverse rigidzze) dovute all'accostamento di corpi di fabbrica in epoche differenti, (ii) meccanismi progressi (fuori piano della parete est sulla corte centrale) (iii) aperture disallineate. Le verifiche numeriche sono condotte su tre modelli meccanici corrispondenti ai tre corpi di fabbrica desunti dallo studio del processo costruttivo (A, B, C). L'analisi secondo LV1 è stata condotta con riferimento al modello semplificato “Palazzi e Ville” delle Linee Guida. Il SIVARS è stato sperimentato solo per il corpo C. La valutazione secondo LV3 è stata condotta eseguendo un'analisi statica non lineare su un modello meccanico a macro-elementi, che considera la scatola muraria chiusa trascura l'eventualità di meccanismi fuori dal piano.

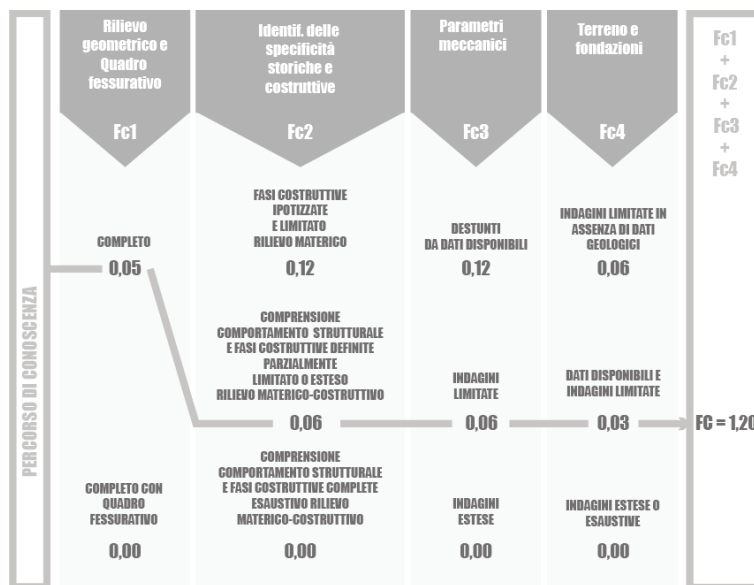
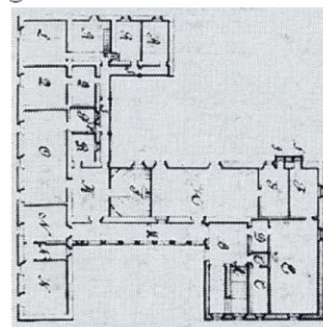
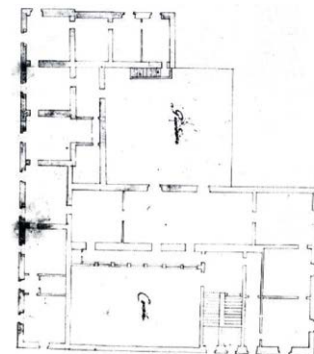
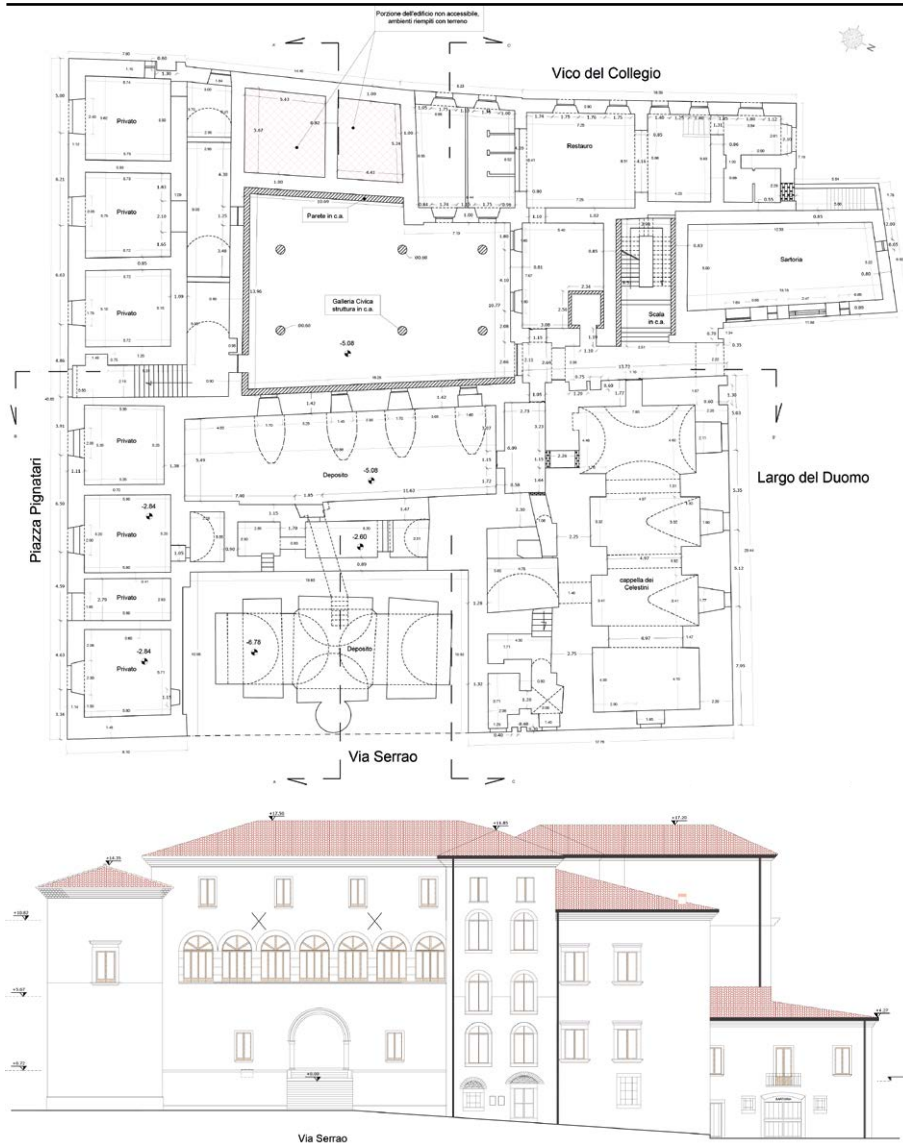


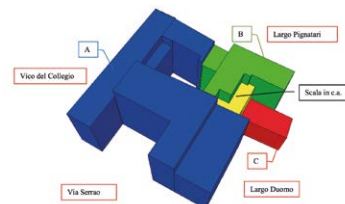
Figura 3.2 - Palazzo Loffredo (PT), definizione del Fattore di Confidenza



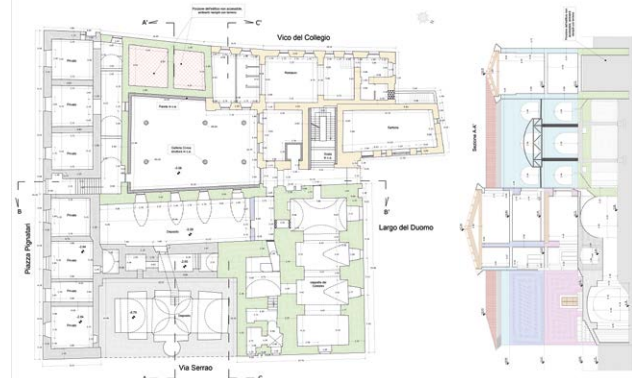
Consistenza del XIX sec.



Consistenza del XX sec. prima del restauro anni '80

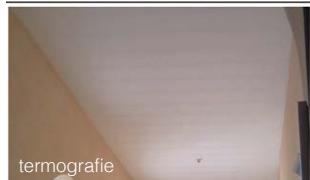
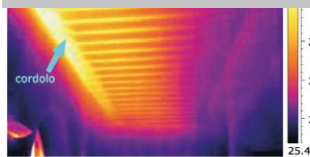


1. Rilievo geometrico 0 10m



- M1: MURATURA IN PIETRA A SPACCO doppio paramento
- M2a: MURATURA A CONCI SBOZZATI a sacco consolidata con iniezioni di malta
- M2b: MURATURA A CONCI SBOZZATI a sacco consolidata con iniezioni di malta e rete
- M2c: MURATURA A CONCI SBOZZATI doppio paramento consolidata con iniezioni di malta
- M2d: MURATURA A CONCI SBOZZATI doppio paramento consolidata con iniezioni di malta e rete
- M3: MURATURA IN PIETREME DISORDIN doppio paramento consolidata con iniezioni di malta e rete
- M4: MURATURA IN MATTONI PIENI
- PIETREME DISORDINATO DI RIEMPIMEN
- STRUTTURA PORTANTE IN C.A.
- LEGNO

3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



4. Indagini specialistiche

P2. MUSEO RIDOLA, MATERA

Il complesso architettonico si trova nel centro storico di Matera situato sul pianoro che si affaccia sul Rione del Sasso Caveoso. Dal 1911 il palazzo è sede del Museo Archeologico della Basilicata intitolato a Domenico Ridola.

Caratteristiche storiche e morfologiche

Il complesso Ridola comprende un fabbricato prevalentemente in muratura portante – principale oggetto della presente descrizione – e un corpo uffici in cemento armato indipendente all'interno della corte del museo. L'edificio murario si inserisce in un aggregato strutturale tra la chiesa di Santa Chiara – con cui condivide la parete nord – e altre abitazioni civili a sud, anch'esse in muratura da quanto osservabile dall'esterno. La superficie di impronta a terra è di circa 1.800 mq e in gran parte ha una consistenza di due elevazioni fuori terra, per un massimo di 12,00 m di altezza alla gronda e non si osservano porzioni svettanti, anzi l'edificio ha un'altezza superiore di mezzo interpiano rispetto agli edifici contigui, ad eccezione del timpano che caratterizza la facciata della chiesa di Santa Chiara.

L'impianto originario dell'edificio non è ben noto. La costruzione risale alla fine del Seicento ed è dovuta al Vescovo del Ryos che la destinò a ospedale civile (funzione che non assolse mai) e durante i primi anni del Settecento diventa sede del monastero di Santa Chiara, inglobando nella proprietà anche l'adiacente chiesa di Santa Chiara (la cui costruzione è di poco successiva al palazzo). Non si hanno notizie dei lavori eseguiti dalle monache appena insediate e l'edificio è adibito a monastero fino ai primi anni del Novecento. Fino a quel tempo l'edificio probabilmente consta di un corpo rettangolare – con chiostro centrale – il cui lato maggiore prospetta sull'attuale via Ridola, e un lungo corridoio conventuale che si affaccia su una corte chiusa su tre lati. L'edificio murario a sinistra – che fa sempre parte del complesso Ridola – probabilmente contiene abitazioni civili e una volta annesso al monastero è destinato a scuola. Nonostante le leggi eversive del 1866, che in parte stronca l'attività del monastero, le monache non abbandonano mai l'edificio che solo nel 1911, alla loro morte, la proprietà passa allo Stato che lo destina a museo archeologico.

A seguito della nuova destinazione d'uso sono eseguiti alcuni lavori. Le prime trasformazioni documentate risalgono agli anni '50 e sono connesse alla necessità di ampliare gli spazi espositivi del museo: sono demoliti i setti murari al piano primo dell'ala a sinistra del corridoio conventuale per formare un grande salone con affaccio sulla corte e sulla via Ridola; sono inserite delle travi in c.a. a copertura dell'ampia luce e il tetto a falda sostituito con un tetto piano. La conformazione attuale del complesso si deve agli ampliamenti avvenuti negli anni '70, che prevedono la costruzione di un nuovo edificio disposto su due livelli fuori terra parallelamente all'originario convento a formare la quinta che chiude il chiostro su quattro lati. Infine, dopo il terremoto del 1980, l'edificio è oggetto di interventi di consolidamento,

quali iniezioni di malta cementizia nelle murature, inserimento di pali radice in fondazione, perforazioni armate su murature e architravi, costruzione di massetto armato sulle volte lapidee.

Attualmente, i fronti esterni dell'edificio sono tutti con murature a faccia vista, quindi favoriscono la lettura diretta delle tessiture, diversamente da quanto accade all'interno, dove gran parte delle pareti sono intonacate, così come gli orizzontamenti voltati – la cui tessitura è leggibile in alcuni casi per la presenza di degrado superficiale che mette in evidenza i giunti tra i conci di calcarenite.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La restituzione della geometria strutturale è definita con strumentazione tradizionale verificando a campione i rilievi di base esistenti ritenuti attendibili, ma non è stata ipotizzata la struttura degli edifici posti in aderenza, assente anche nei rilievi di base; il quadro fessurativo è stato documentato in maniera esaustiva sulle planimetrie del rilievo geometrico. Alla luce di questi risultati è scelto $F_{C1}=0$.

La ricostruzione delle fasi evolutive è definita parziale per l'assenza di materiale bibliografico o archivistico che documenti le fasi seicentesche dell'edificio; non sono eseguite delle indagini specifiche, né un'analisi dell'impianto planimetrico per la individuazione di eventuali accostamenti murari.

L'indagine sui dettagli costruttivi è stata eseguita per confronto e analogia con i riferimenti bibliografici esistenti. Non sono stati eseguiti dei disegni dei dettagli riferiti al palazzo, ma sono riportati esclusivamente i disegni provenienti dal codice di pratica. Sono state eseguite delle indagini specifiche (microcarotaggi-endoscopie) per attestare la fattura delle murature che hanno confermato le informazioni sulle tecniche costruttive descritte nel Codice di Pratica¹⁷⁵, altre indagini (pacometriche, carotaggi) sono eseguite per verificare lo stato delle strutture in cemento armato. Sulla base di questi esiti è scelto un $F_{C2}=0,06$.

Non sono state eseguite indagini di caratterizzazione meccanica dei materiali, che sono desunti dalla tabella C8A2.1 scegliendo i valori medi¹⁷⁶; sulla base delle indagini svolte e delle indagini pregresse è scelto un fattore parziale pari a $F_{C3}=0,06$.

Un analogo ragionamento è stato condotto per la determinazione del fattore parziale della conoscenza di Terreno e Fondazioni, per cui è scelto $F_{C4}=0,03$.

Dalla sommatoria dei fattori parziali si ottiene il valore globale di $FC=1,15$.

¹⁷⁵ Le indagini endoscopiche confermano la conformazione della sezione muraria riportate nel Codice di pratica – doppio paramento con diatoni di collegamento, e vuoti riempiti con scaglie di pietra e malta povera di calce.

¹⁷⁶ Sono scelti i valori medi perché il valore di $FC=1,15$ (totale ottenuto) è equiparato a un LC2 delle NTC08.

Interpretazione delle informazioni

Sono svolte verifiche sismiche secondo i livelli di valutazione LV1 e LV3.

Per le verifiche LV1 è stata utilizzata la piattaforma SIVARS.

Per le verifiche LV3 è stata condotta un'analisi statica non lineare su un modello a telaio equivalente.

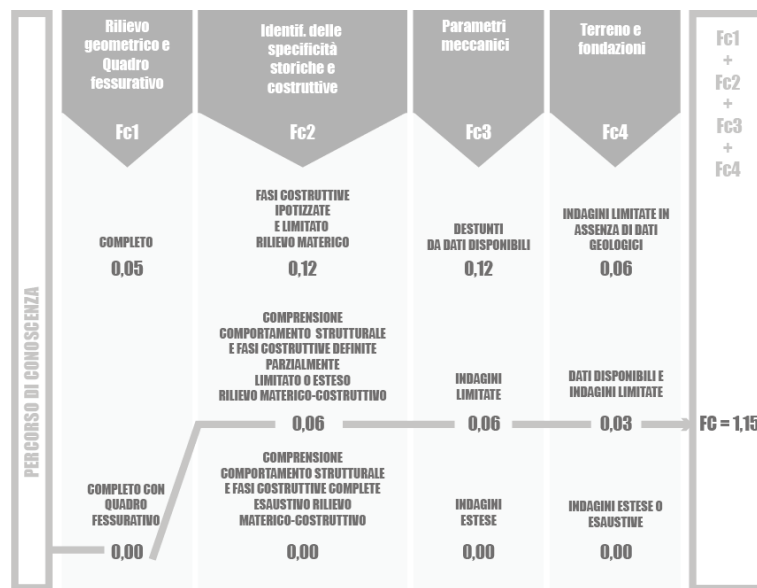
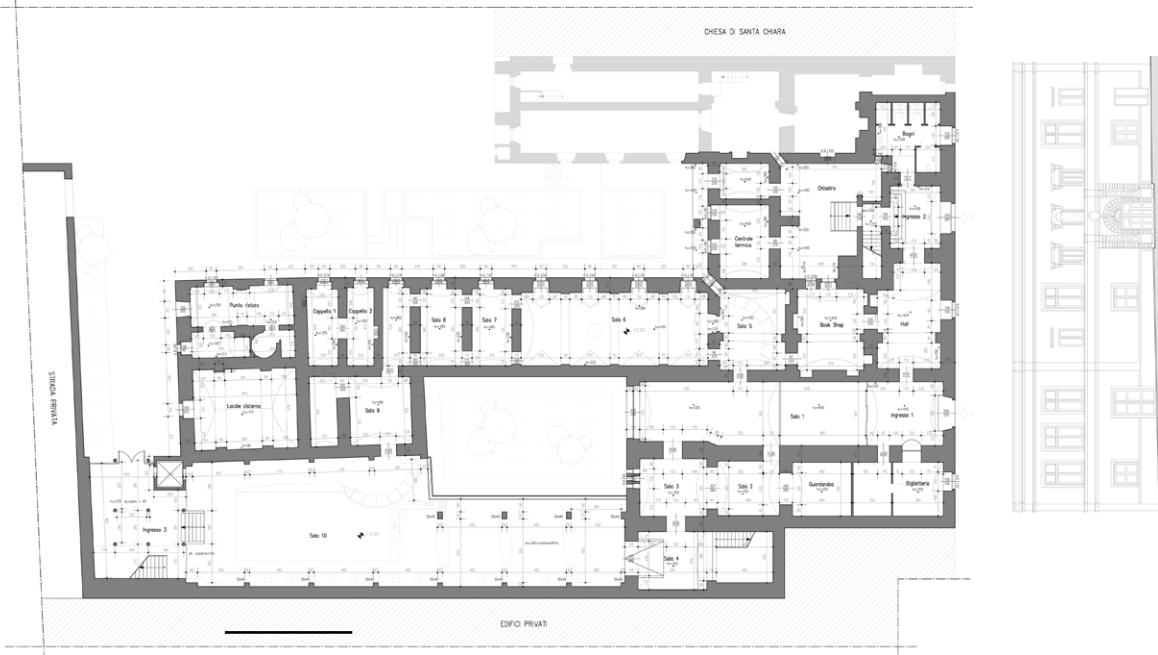


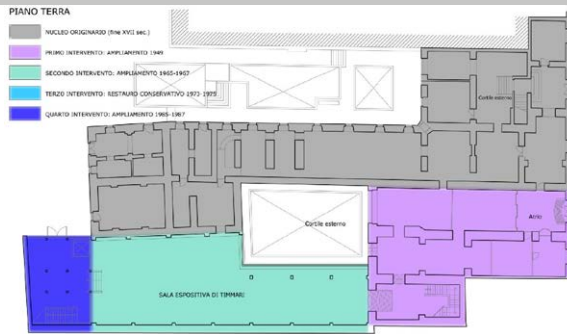
Figura 3.3 - Palazzo Ridola (MT), definizione del Fattore di Confidenza

P2. MUSEO RIDOLA, Matera - Sintesi elaborati della fase conoscitiva



1. Rilievo geometrico

SM	DIMENSIONI	ELEMENTO
(A)		Trave a spessore 30x120 cm in cls. Queste travi sono oscurate da un controssolito in plexiglass opaco
(B)		Trave emergente 30x50 cm in cls
(C)		Trave 40x40 cm in cls
(D)		Pilastro rettangolare 30x40 cm in cls coperte da un rivestimento di spessore di 5 cm ad imitazione della muratura in blocchi di tufo
(E)		Pilastro circolare 30x30 cm in cls
(F)		Pilastro quadrato 30x30 cm in cls
		Profili di acciaio di dimensioni e tipologie non rilevate
		Rivestimento di spessore di 5 cm ad imitazione della muratura in blocchi di tufo
		Tiranti in acciaio
		Muratura a sacco in blocchi di tufo
		Vano ascensore in cls
		Cardali perimetrali in cls
		Rivestimento della copertura in coppi di laterizio
		Solaio in latero-cemento
		Copertura in latero-cemento
		Copertura in acciaio e tavelloni



2. Fasi costruttive



4. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



P3. PALAZZO FERRETTI, ANCONA

Palazzo Ferretti sorge nel centro storico di Ancona a ridosso del porto. Dal 1958 è sede del Museo Archeologico delle Marche.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

Palazzo Ferretti sorge su un sito caratterizzato da un pendio medio su cui l'edificio si attesta sfruttando il dislivello per la formazione di un piano seminterrato. Il palazzo è parte di un aggregato strutturale contenente a nord la chiesa dei Santi Pellegrino e Teresa (anche detta degli Scalzi) – con la quale esistono forti interazioni strutturali – e residenze civili a sud – debolmente interagenti con la torre medievale.

Il complesso ha forma irregolare prossima a una L di impronta a terra pari a circa 1.230 mq, per un'altezza media alla gronda di 18 m. È possibile individuare due corpi di fabbrica distinti per la differente tipologia strutturale: l'edificio in cemento armato e l'edificio in muratura portante – separati da un giunto tecnico.

La costruzione di Palazzo Ferretti, da adibire a residenza signorile, sembra risalire al 1540-43 su progetto dell'architetto Antonio da Sangallo il Giovane. La costruzione, tuttavia, è realizzata fra il 1560 e il 1566 e successivamente ampliata nella seconda metà del Settecento, con la costruzione dello scalone d'onore e del giardino pensile di derivazione vanvitelliana. Nel XX secolo l'edificio è ulteriormente ampliato con l'annessione del nuovo convento degli Scalzi, inaugurato nel secondo dopoguerra.

Il nucleo originario del palazzo, l'adiacente scalone d'onore con loggiato di accesso al giardino pensile (risalenti alla metà del Settecento) – la cui costruzione ha implicato la modifica della facciata principale cinquecentesca – e il corpo centrale adiacente alla chiesa degli Scalzi, sono in muratura portante. Gli spessori e gli allineamenti della maglia muraria in parte denunciano queste trasformazioni, e assumono conformazioni differenti in base alle epoche costruttive. È possibile individuare la forma rettangolare dell'impianto cinquecentesco (14,00 m x 38,00 m) con spesse pareti perimetrali e cellule murarie trasversali disposte con passo costante per i primi due livelli, mentre al piano secondo e terzo l'impianto comprende la presenza di due ampi vani di rappresentanza; il corpo centrale è di piccole dimensioni (16,00 m x 9,00 m), nasce su strutture preesistenti di epoca probabilmente altomedievale che ne costituiscono il piano interrato, mentre ai piani superiori oggi non sono presenti muri di spina e l'edificio ha una parete in comune con una cappella della chiesa degli Scalzi.

L'edificio in cemento armato è stato costruito sui resti del convento degli Scalzi, danneggiato dai bombardamenti della Prima Guerra Mondiale. Gli interrati del vecchio convento costituiscono il piano di fondazione del nuovo edificio che si estende per 4 livelli fuori terra. Infine, il complesso comprende un fabbricato, sempre in c.a., che collega i due corpi di fabbrica.

Il palazzo è stato oggetto di interventi di consolidamento in seguito al terremoto di Ancona del 1972. Le murature sono state consolidate con l'applicazione diffusa di trefoli orizzontali e verticali e disposizione di cordoli di piano e solette collaboranti. Agli inizi del XXI secolo è nuovamente oggetto di intervento: l'ossidazione dei trefoli aveva provocato la formazione di lesioni sulle facciate, sarcite solo per mezzo di scuci-cuci, accompagnato dal trattamento dei ferri.

Il risultato della storia costruttiva di Palazzo ferretti è una discreta eterogeneità delle tecniche costruttive anche molto diverse e visibili solo limitatamente ad alcune zone dell'edificio.

Le difficoltà per il raggiungimento di una conoscenza adeguata del complesso architettonico sono legate proprio alla eterogeneità delle tecniche costruttive e alla presenza di importanti interventi di consolidamento che ne hanno modificato il comportamento strutturale. Un altro elemento è la valutazione delle interazioni con gli edifici contigui - in particolare con la chiesa - costituenti l'aggregato. Questi ultimi aspetti incidono soprattutto nella definizione della geometria strutturale, che dovrebbe comprendere la conoscenza - anche se parziale - della disposizione della maglia muraria degli edifici contigui.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La restituzione della geometria strutturale proviene dalla verifica a campione del rilievo di base disponibile - definito abbastanza attendibile - eseguita con tecniche tradizionali e finalizzata al controllo sistematico degli spessori murari, delle tipologie e delle geometrie degli orizzontamenti, delle altezze di interpiano. Con il laser-scanner sono state eseguite delle verifiche sui fronti esterni che hanno permesso di definire con più precisione il perimetro, la collocazione e i prospetti (assenti o solo abbozzati nel materiale di base); sempre con il laser scanner sono stati documentati anche il degrado - comprese le eventuali lesioni e i fuori piombo - e le interazioni esistenti con gli edifici contigui. Non è presente un quadro fessurativo rilevante e le lesioni osservate sono state documentate attraverso delle fotografie e riportate nelle planimetrie del geometrico. È stato quindi scelto un $F_{C1}=0$.

Il processo costruttivo del complesso architettonico è stato indagato attraverso la ricerca bibliografica e di archivio e le fasi sono state sintetizzate attraverso una rappresentazione volumetrica in cui sono individuati con parallelepipedi di vario colore i corpi di fabbrica dal comportamento "indipendente" funzionali alla analisi numerica, indipendentemente dalle fasi edificatorie.¹⁷⁷

Lo studio dei dettagli costruttivi è stato condotto utilizzando moduli schedografici delle Linee Guida¹⁷⁸. Sono state eseguite delle indagini per la lettura delle murature coperte da intonaco negli ambienti a piano interrato in corrispondenza delle diverse fasi costruttive (endoscopie e prove sonic

¹⁷⁷ Infatti, il corpo A è caratterizzato da due fasi evolutive ma la loro forte interazione - anche dovuta agli interventi di adeguamento sismico - induce a considerarli un unico edificio.

¹⁷⁸ Vedi *supra* §2.4

he). Le indagini pregresse disponibili e le foto di cantiere dei trascorsi interventi di restauro hanno supportato le ipotesi e il giudizio qualitativo sulle murature consentendo di osservare la tessitura muraria oggi nascosta. Alla luce di queste risultanze è scelto $F_{C2}=0$.

Non sono state eseguite indagini di caratterizzazione meccanica e i parametri sono stati desunti dalla tabella C8A2.1 sulla base delle tipologie murarie definite con il supporto delle fonti documentarie e delle indagini in situ. È scelto $F_{C3}=0,12$.

Le informazioni su terreno e fondazioni sono state desunte da indagini disponibili, appartenenti ai progetti di restauro della fine del secolo scorso. Il fattore parziale scelto è pari a $F_{C4}=0,03$.

Dalla sommatoria dei fattori parziali si ottiene il valore globale di $FC=1,15$.

Interpretazione delle informazioni

Il giudizio sulla qualità del comportamento strutturale è nel complesso positivo. Gli interventi di consolidamento hanno modificato radicalmente il funzionamento originario definendo delle “scatole murarie chiuse” e non sussistono vulnerabilità locali.

Sono eseguite verifiche secondo il livelli di valutazione LV1 (eseguito con il SIVARS) e LV3.

Per le verifiche LV3, l’edificio cinquecentesco e gli ampliamenti settecenteschi confluiscono in un unico modello meccanico a elementi finiti a telaio equivalente. Gli esiti delle verifiche sono in buona parte positivi. Tuttavia la semplificazione attuata con i modelli non può tenere conto dell’interazione a livello di fondazione con la chiesa degli Scalzi, con la quale è probabilmente interconnessa. È inoltre sottolineata la necessità di intervenire con manutenzione periodica delle piastre dei trefoli che hanno già inficiato lo stato di conservazione dell’edificio.

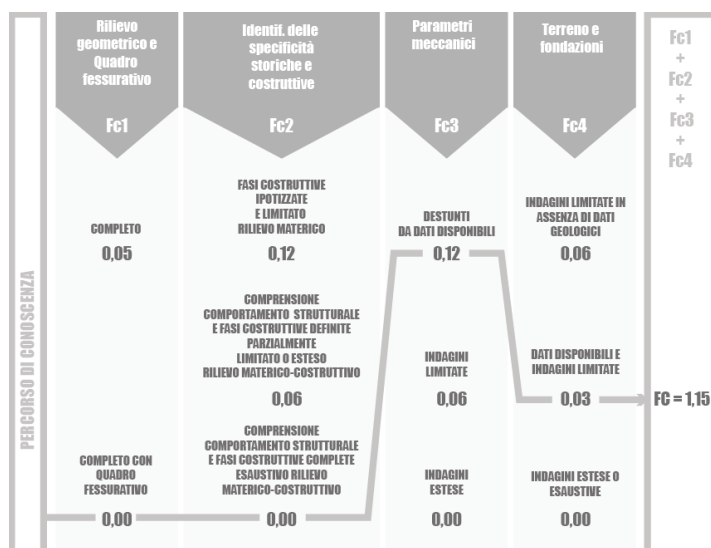
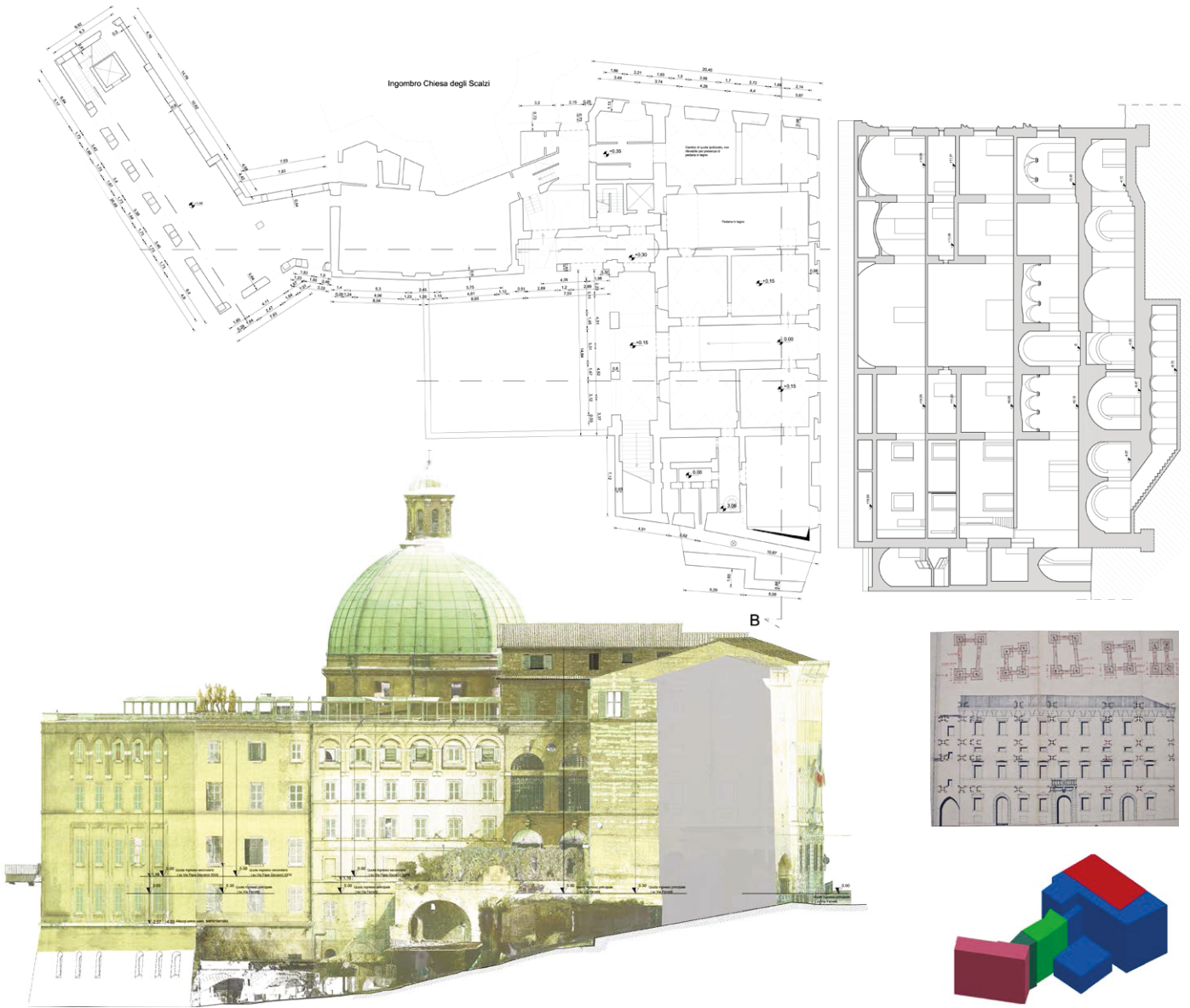
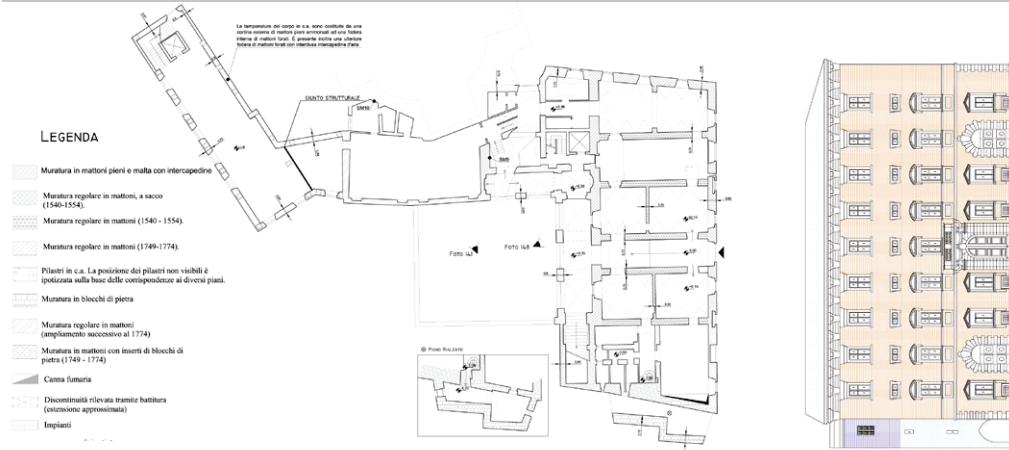







Figura 3.4 - Palazzo Ferretti (AN), definizione del Fattore di Confidenza



1. Rilievo geometrico 0 10m

2. Fasi costruttive



-  Muratura in mattoni con inserti di blocchi di pietra (1749 - 1774)
-  Muratura regolare in mattoni (1749 - 1774)
-  Muratura in blocchi di pietra
-  Muratura regolare in mattoni (ampliamento successivo al 1774)
-  Paramento in mattoni

4. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



5. Indagini specialistiche

P4. PALAZZO DEI PROVVEDITORI VENETI, CIVIDALE DEL FRIULI (UD)

Il Palazzo dei Provveditori Veneti, il cui progetto è attribuito all'architetto Andrea Palladio, si trova nel centro storico di Cividale del Friuli e prospetta sulla piazza del Duomo. Dal 1990 è sede del Museo Archeologico Nazionale.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

Il complesso architettonico sorge su un sito pianeggiante e fa parte di un aggregato strutturale, cui afferiscono sul lato nord-ovest edifici di dimensioni inferiori destinati ad abitazioni civili e sul lato sud-est il Duomo di Santa Maria Assunta, con cui il palazzo è connesso mediante un sovrappasso imposto sull'abside della chiesa.

La consistenza attuale dell'oggetto di studio consta di tre corpi di fabbrica principali: il corpo centrale con portico in facciata (lato ovest), che rappresenta in gran parte il nucleo originario attribuito a Palladio (ca. 846 mq), la cui forma rettangolare pura è alterata in pianta dalla presenza degli altri due corpi di fabbrica addossati sul lato nord-est (ca. 41,30 mq) e sul lato sud-est (ca. 997mq); la superficie totale di impronta a terra è pari a circa 1.885 mq per un'altezza alla gronda dai 4,70 m del corpo nord-est ai 16,40 m del corpo principale. Si osservano, dunque, delle importanti irregolarità in alzato per la differenza di altezza tra il corpo centrale e i due corpi aggiunti; appare importante anche la costruzione che unisce il complesso architettonico all'abside del Duomo di un livello più alto. Le fondazioni del complesso palladiano, inoltre, sorgono sui resti del più antico Palazzo del Patriarca, e individuarne le interazioni è operazione complessa, se non nelle parti visibili ai piani interrati.

Palazzo dei Provveditori nasce come edificio unitario ed è stato costruito in un arco di tempo di circa cinquant'anni dal 1565 al 1615 e la trasformazione più importante è realizzata tra gli anni '70 e '90 del XX secolo. Sono eseguiti lavori di consolidamento a seguito del terremoto del Friuli (1976) e a seguito della nuova destinazione d'uso museale: sono consolidate tutte le murature con iniezioni di malta cementizia e sostituiti molti solai; è realizzata ex novo la porzione nord-ovest dell'edificio - all'epoca non costruita - per l'inserimento di uffici e servizi per il museo. La nuova costruzione è realizzata in muratura di mattoni doppi UNI.

Nel complesso, dunque, il palazzo è caratterizzato da una omogeneità delle tecniche costruttive. La struttura di elevazione è in muratura portante e la maglia muraria appare abbastanza compatta a tutti i livelli, fatta eccezione per i grandi vani localizzati al centro del corpo palladiano che al secondo piano si estendono fino a tutta la profondità dell'edificio in direzione trasversale.

Gli orizzontamenti sono in prevalenza solai piani in legno, mentre al piano terra si osservano volte lapidee in corrispondenza dei vani più piccoli.

Le difficoltà per il raggiungimento di una conoscenza adeguata dell'edificio possono ascriversi alla definizione quanto più accurata possibile delle zone di contatto con il Duomo; la documentazione esistente sull'edificio (foto di cantiere) è cospicua e consente di reperire informazioni sulle tessiture murarie oggi celate alla vista dall'intonaco.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La definizione della geometria dell'edificio è stata realizzata con la verifica sistematica di spessori murari, posizione delle aperture, luci e altezze dei solai, ecc.; con il supporto del rilievo laser scanner sono stati restituiti i prospetti. Il quadro fessurativo è stato documentato puntualmente in elaborati specifici (prospetti interni) in cui per ciascuna lesione si specifica se la stessa è “passante”, “profonda” o “superficiale” e un identificativo che rimanda al database fotografico. Il fattore parziale di confidenza è $F_{C1}=0$.

I dettagli costruttivi sono stati studiati attraverso la puntuale analisi della documentazione archivistica relativa ai trascorsi progetti di consolidamento. Grazie alla presenza di una cospicua quantità di foto di cantiere storiche sono state individuate le tessiture murarie che, in una seconda fase, sono state analizzate con il metodo dell'Indice di Qualità Muraria (IQM).

La ricostruzione delle fasi evolutive è interessata da alcune lacune per la mancanza di fonti documentarie relative ad alcune epoche dell'edificio, che non si tenta di colmare con analisi dell'impianto planimetrico. L'operatore esprime queste incertezze scegliendo $F_{C2}=0,06$.

I parametri meccanici sono stati desunti dall'IQM e non sono state effettuate indagini diagnostiche specifiche; la conoscenza acquisita permette di valutare un $F_{C3}=0,06$ (limitate indagini). Tuttavia questo valore è utilizzato per le verifiche di primo e terzo livello, mentre per LV2 il valore è pari a $F_{C3}=0,12$ ma non è ben comprensibile la motivazione.

Più chiaro è il motivo per cui è differenziato il quarto fattore parziale, relativo a Terreno e Fondazioni. Nel primo caso (LV1 e LV3) il valore è pari a $F_{C4}=0,06$ – probabilmente si considerano le incertezze inerenti la stabilità in seguito ai lavori di scavo realizzati per portare alla luce i resti del palazzo del Patriarca; per le verifiche LV2, effettuate con modelli locali, i dati inerenti al terreno non entrano in gioco per cui si considera $F_{C4}=0$ ¹⁷⁹.

Dalla sommatoria dei succitati fattori parziali – diversi a seconda dei livelli di valutazione – si ottiene comunque il valore globale di $FC=1,18$.

¹⁷⁹ Le Linee Guida offrono la possibilità di considerare $F_{C4}=0$ per le verifiche locali locale «quando le informazioni sul terreno e le fondazioni non hanno alcuna relazione sullo specifico meccanismo di collasso», v. MiBACT 2010 pag. 55

Interpretazione delle informazioni

Il giudizio complessivo sullo stato attuale dell'edificio è positivo ma sono suggeriti degli interventi di miglioramento.

I collegamenti tra i vari elementi strutturali non sono considerati ottimali per cui si suggerisce di inserire tiranti metallici; le murature sono considerate di buona qualità ma è comunque consigliato l'inserimento di diatoni artificiali o di tirantini antiespulsivi (la muratura non è in conci squadri).

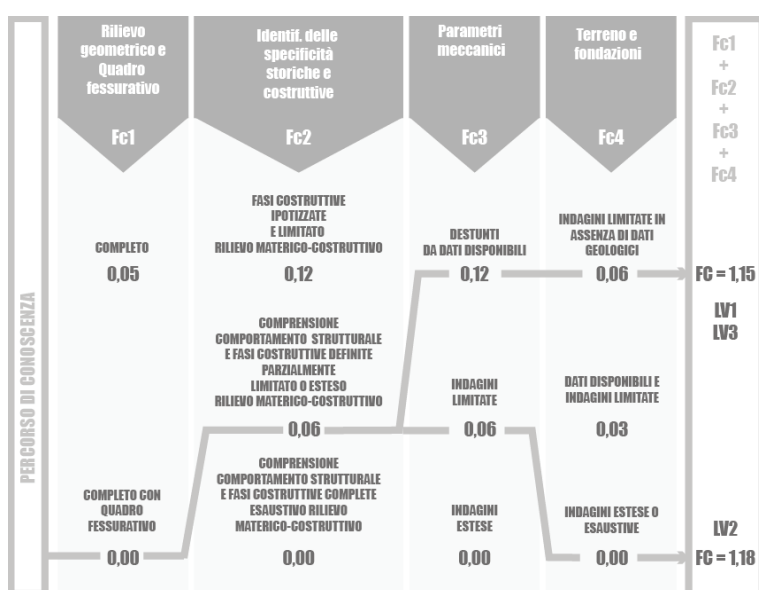
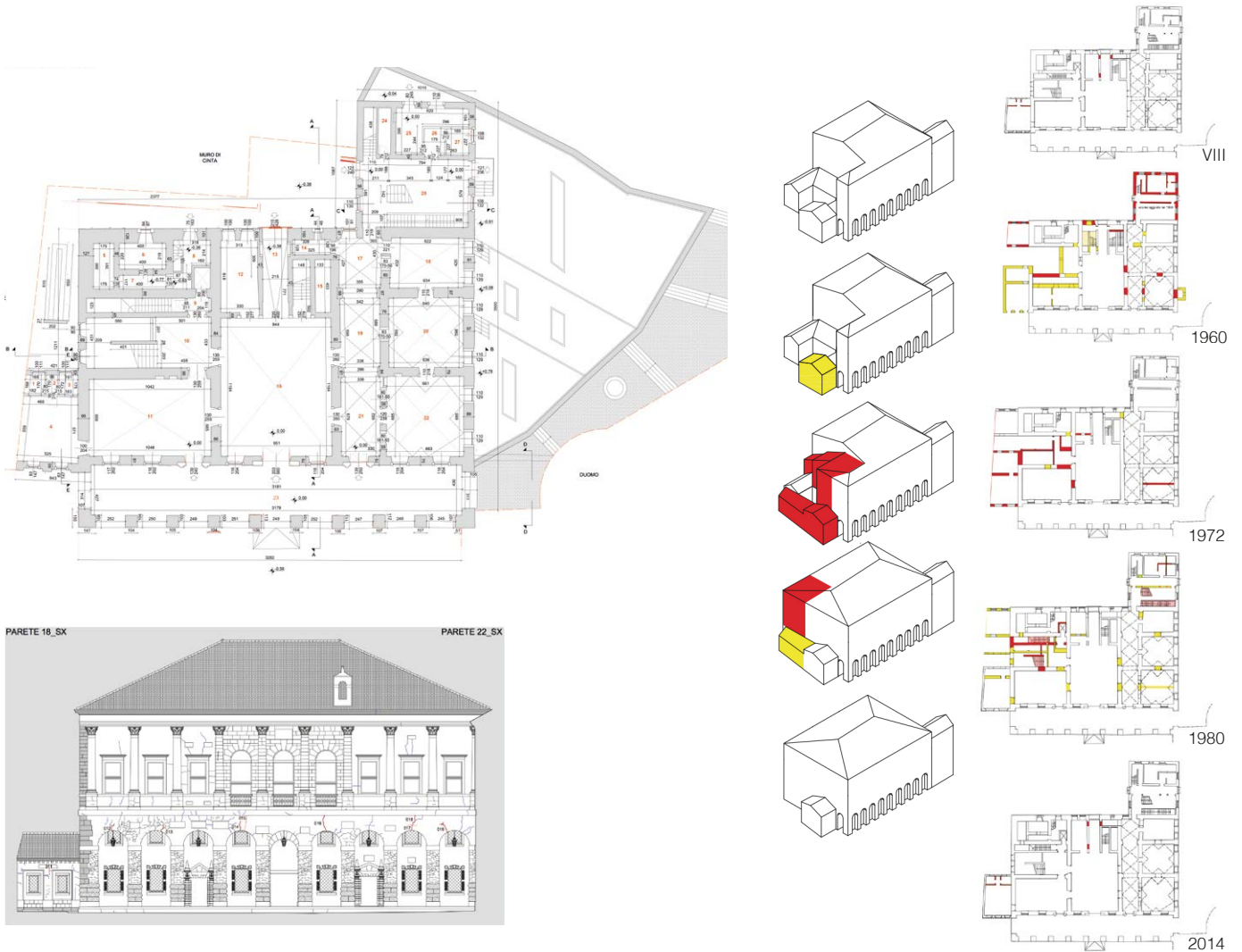


Figura 3.5 - Palazzo dei Provveditori Veneti (UD), definizione del Fattore di Confidenza



1. Rilievo geometrico e quadro fessurativo



2. Fasi costruttive



M01 Muratura in pietre a spacco con buona tessitura

DESCRIZ.
La muratura è costituita da pietre di arenaria di pezzature abbastanza regolari, leggermente sbozzate, di dimensioni medie pari a 20 cm. Malta di calce aerea di prestazioni modeste e posa in opera degli elementi a corsi irregolari con zeppe e assenza di ricorsi e listatura.

Q.R.	P.D.	F.EL.	S.G.	D.EL.	M.A.	R.EL.	Categoria	Metodo punteggi			G*	w*	
								I.Q.M.	A	B			B
PR	PR	PR	NR	PR	PR	R		5,5	5,5	5			
Parametri meccanici								f _c	f _t	E	G*	w*	
valori								(N/cm ²)	(N/cm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/m ³)	
MIN-MAX								320	5,6	1426	475	21	
								504	8,2	2017	672		
Valori medi assunti nelle procedure di valutazione della sicurezza sismica del complesso museale								Valori	412	6,9	1722	574	21

ANALISI I.Q.M.

3. Rilievo materico-costruttivo



4. Indagini specialistiche: nessuna indagine diagnostica. Schede IQM e indagine storica

P5. PALAZZO DUCALE, URBINO

Il Palazzo Ducale sorge nel centro storico della città di Urbino affianco alla Cattedrale e oggi è sede della Galleria Nazionale delle Marche.

Caratteristiche storiche e morfologiche

Palazzo Ducale è situato nel centro della città di Urbino, a fianco del duomo di Santa Maria Assunta, cui il prospetto nord è addossato per circa metà della sua estensione; sul lato sud il palazzo confina con degli edifici privati attraverso un sovrappasso su via Salvalai.

Il complesso architettonico è dunque parte di un aggregato strutturale di cui però rappresenta più di metà della estensione planimetrica; le dimensioni di ingombro a terra, infatti, corrispondono a circa 5.500 mq (totale circa 214.000 mc), per un'altezza media alla gronda di 20 metri. L'impianto ha una forma irregolare e organizza gli ambienti attorno a un chiostro centrale più grande, il Cortile d'Onore, attorno a tre lati del giardino pensile sul fronte nord-ovest, e attorno al giardino di Pasquino sul lato sud; sorge su un sito caratterizzato da un forte pendio in direzione est-ovest, che implica la presenza di due piani seminterrati prospettanti sul lato a valle (ovest) – che si aggiungono ai tre livelli fuori terra – e il conseguente sfalsamento dei piani di fondazione aventi differenze di quota di circa 10 metri; gli unici elementi svettanti sono i due torrioni, tuttavia il complesso architettonico è caratterizzato da irregolarità planimetriche (la maglia segue direzioni diverse) e anche in alzato (interpiani sfalsati).

La maglia muraria è compatta in entrambe le direzioni ai vari livelli, e le luci aumentano in corrispondenza di alcuni ambienti di rappresentanza, come la Sala del Trono al piano nobile (dimensioni 14 x 35 metri, doppia altezza); al piano terra si nota la presenza di portici nel cortile d'onore e sul fronte est del giardino di Pasquino; gli spessori dei muri diminuiscono di piano in piano, coerentemente con la logica costruttiva. Gli allineamenti e gli spessori dei muri denunciano in parte le vicende costruttive della fabbrica avvenute nell'intervallo di circa un secolo sempre all'interno della tecnica costruttiva muraria.

L'attuale compagine architettonica è frutto di diverse fasi edificatorie, caratterizzate anche dall'intervento di architetti di rilievo, quali Luciano Laurana (1464) e Francesco Di Giorgio Martini (1472). La prima fase risale al 1444 e vede la presenza di due palazzi ducali, già utilizzati dalla nobiltà cittadina che dovevano accogliere la residenza di Federico da Montefeltro. Quest'ultimo dà avvio a un ampliamento dei due palazzi esistenti (sopraelevazione) e fa costruire il "palazzo della Jole" per collegare i due edifici e formare una architettura unitaria (1459). Una successiva modifica del palazzo coinvolge l'architetto Luciano Laurana, cui si devono la costruzione dei due torrioni sul lato sud-ovest, la costruzione del portico del cortile d'onore. Nel 1472 Francesco di Giorgio Martini subentra al Laurana e costruisce il giardino pensile sul lato nord definendo il prospetto sul piazzale Duca Federico.

La conformazione attuale del palazzo si raggiunge con gli interventi avvenuti i primi del Cinquecento.

Nel corso del XX secolo, il palazzo è stato oggetto di interventi diffusi che hanno interessato porzioni del complesso strutturale, le coperture e altri elementi strutturali (consolidamento delle volte, sostituzione delle orditure lignee, ...), fino agli interventi di restauro degli anni '90 – alcuni dei quali ancora in corso – che hanno coinvolto l'intera fabbrica. Nel 2001 sono stati avviati – e sono ancora in corso – interventi di miglioramento sismico ai sensi del DM '96, che prevedono l'irrigidimento delle falde di copertura e l'inserimento di nuovi tiranti metallici.

Palazzo Ducale è costruito in muratura portante di mattoni pieni in corrispondenza dei torrioni del Laurana e dell'appendice che contiene gli uffici della Soprintendenza (lato sud), mentre nel resto dell'edificio il paramento in mattoni pieni a due teste contiene un nucleo di pietra sbozzata. Gli orizzontamenti sono voltati con geometria prevalente a padiglione lunettato, costruite sempre in mattoni pieni con frenelli nel caso di luci molto ampie – come il voltone della sala del trono – con uno spessore alla chiave di circa una testa; gran parte delle volte del piano secondo (e alcune del piano primo) sono state oggetto di svuotamento per cui la funzione strutturale è oggi assunta da impalcati lignei posti all'estradosso; sono rintracciabili anche volte in canniccio con intelaiatura lignea; solai in laterocemento sono presenti nel corpo uffici; le orditure di copertura consistono in capriate lignee di varie geometrie.

Le difficoltà conoscitive che impone questo complesso architettonico sono soprattutto ascrivibili alle notevoli dimensioni, che rendono onerosa la verifica completa della configurazione geometrica; tuttavia, la presenza di un cantiere in corso e la reperibilità di progetti recenti, diminuisce sensibilmente le difficoltà legate a questo fattore. La storia costruttiva può essere documentata in modo esaustivo, poiché questo è un edificio che trova posto nei libri di storia dell'architettura. La visibilità delle informazioni sugli assemblaggi strutturali non è garantita in tutto il palazzo (interni intonacati), ma i prospetti sono quasi tutti facciavista.

In definitiva, volendo attribuire un grado di complessità alla conoscenza dell'edificio è plausibile ipotizzare un livello medio.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale è stata definita mediante rilievo diretto condotto a campione su tutto il complesso architettonico, adoperando strumentazioni tradizionali. Il materiale di base è cospicuo, soprattutto per la realizzazione di uno studio recente dell'edificio realizzato con l'obiettivo di un progetto di miglioramento sismico. I rilievi geometrici di base sono considerati attendibili, e le verifiche hanno puntato alla descrizione dell'attuale stato fessurativo. Alla luce di queste risultanze si considera $F_{C1}=0$.

L'identificazione delle specificità storiche e costruttive è definita con il supporto dei rilievi diretti e delle prove diagnostiche. L'analisi della storia costruttiva non descrive diffusamente le vicende trascorse dall'epoca di edificazione fino a oggi, ma punta maggiormente sulla raccolta dei dati relativi alle trasformazioni e agli interventi più recenti che hanno in buona parte modificato il comportamento strutturale. Le fasi evolutive sono state verificate direttamente ma sono rappresentate esclusivamente da schemi volumetrici astratti in cui non sono individuati gli accostamenti murari; sono documentati gli interventi di consolidamento, ricostruiti attraverso la raccolta di documentazione d'archivio, il cui contenuto è stato verificato sul campo, ove possibile.

Il giudizio sulla qualità dei dettagli costruttivi è fornito a seguito di rilievi diretti e con il supporto di indagini diagnostiche non distruttive (soniche per le murature, le pacometriche per gli elementi in cemento armato, resistograph e sclerometro per gli elementi lignei, ecc.); anche le catene storiche sono testate con prove non distruttive per valutarne l'efficacia (identificazione dinamica). Le termografie hanno permesso di individuare vuoti nelle murature e la tessitura degli orizzontamenti voltati, limitando il numero e l'invasività delle indagini. I risultati delle prove e i rilievi diretti confluiscono nella elaborazione di disegni specifici, come piante e dettagli costruttivi (non sempre coerenti con le descrizioni testuali). Il fattore parziale scelto in questo ambito è $F_{C2}=0$.

Il parametri meccanici da attribuire alle murature sono desunti dalla tabella C8A.2.1 senza prevedere indagini specifiche di caratterizzazione dei materiali; in questo caso è scelto $F_{C3}=0.12$.

Un discorso analogo vale per lo studio del terreno e delle fondazioni, le cui informazioni sono desunte da dati provenienti dai progetti di consolidamento precedenti o in corso; il fattore parziale scelto è $F_{C4}=0.06$.

Dalla sommatoria dei succitati fattori parziali si ottiene il valore globale di $FC=1,18$.

Interpretazione delle informazioni

Il giudizio sulla qualità del comportamento strutturale dell'edificio è nel complesso positivo e la compagine strutturale è definita mediamente vulnerabile. Le murature sono considerate di buona fattura e i collegamenti discretamente efficaci.

Sono eseguite verifiche secondo i tre livelli di valutazione LV1, LV2 ed LV3.

Le verifiche secondo LV1 sono eseguite utilizzando il SIVARS ma gli esiti non sono considerati in quanto il programma non è aggiornato alla normativa vigente. Sono compilate le schede degli elementi strutturali per consentire la raccolta dei dati.

Per le verifiche LV2 sono stati individuati 29 macroelementi (pareti perimetrali) e analizzati 77 meccanismi di collasso utilizzando l'analisi cinematica. Gli esiti nel complesso sono positivi, soprattutto considerando il contributo di tiranti di progetto.

La verifica complessiva è condotta mediante l'analisi di un numero esaustivo di meccanismi locali relativi ai macroelementi individuati nella quasi totalità delle pareti perimetrali, maggiormente esposte ai meccanismi di ribaltamento. Gli esiti di LV1, da cui emerge una maggiore vulnerabilità dell'edificio, rispetto agli esiti di LV2-LV3 sono considerati meno attendibili a causa della eccessiva semplificazione del modello.

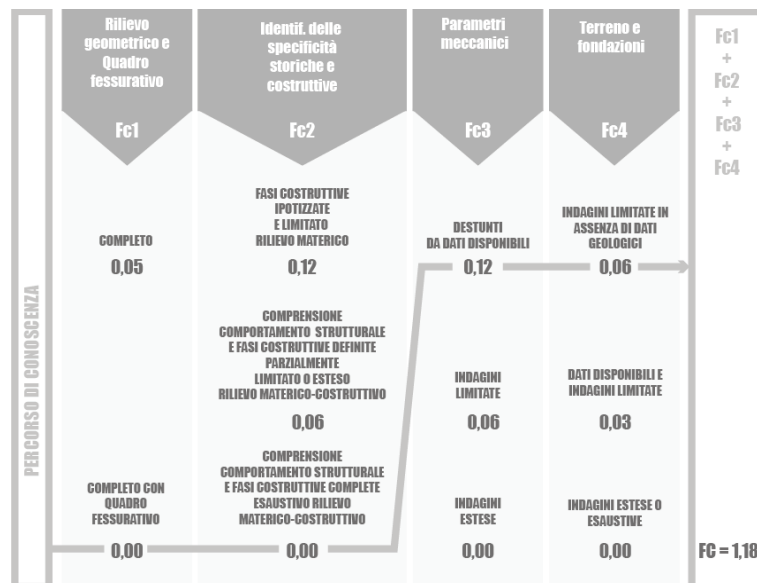
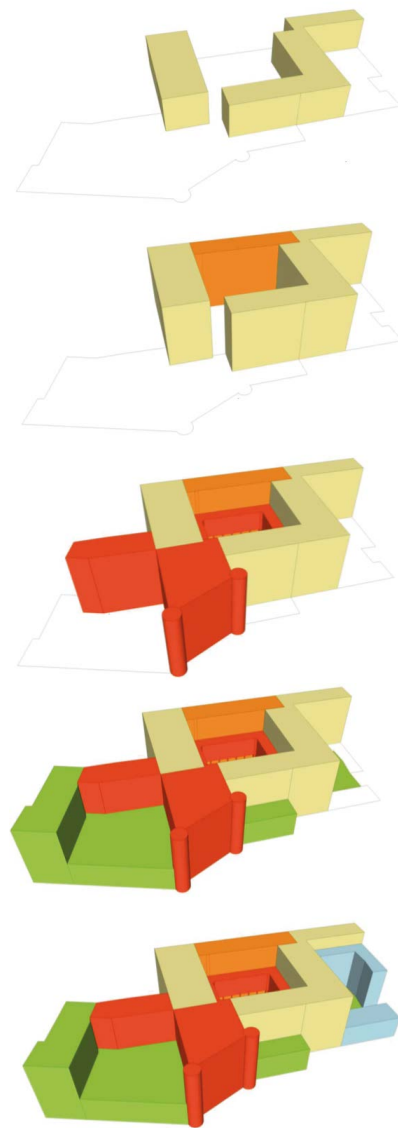
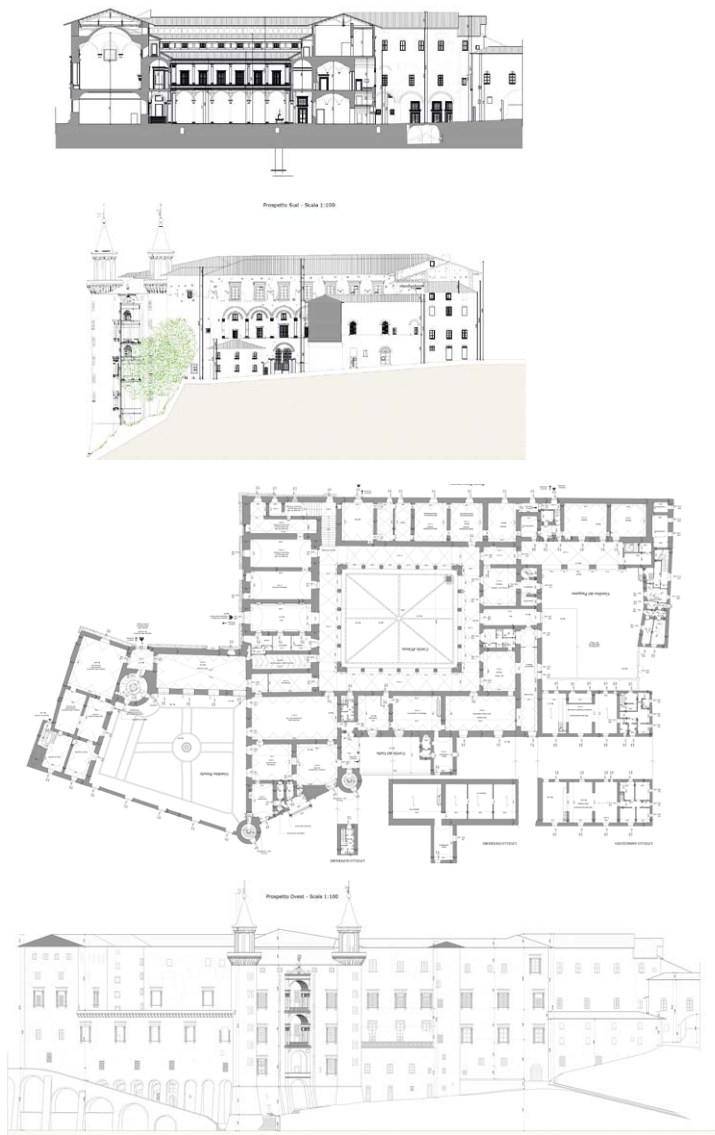
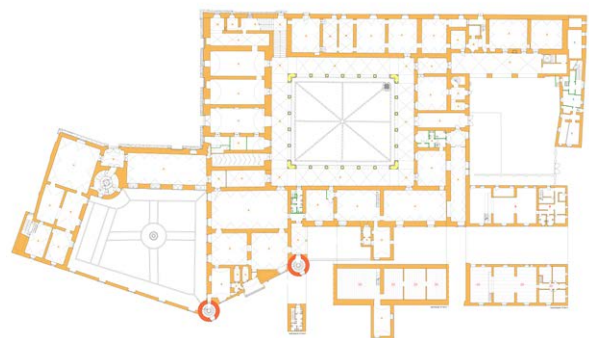


Figura 3.6 - Palazzo Ducale di Urbino (PU), definizione del Fattore di Confidenza

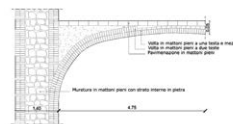


1. Rilievo geometrico 0 10m

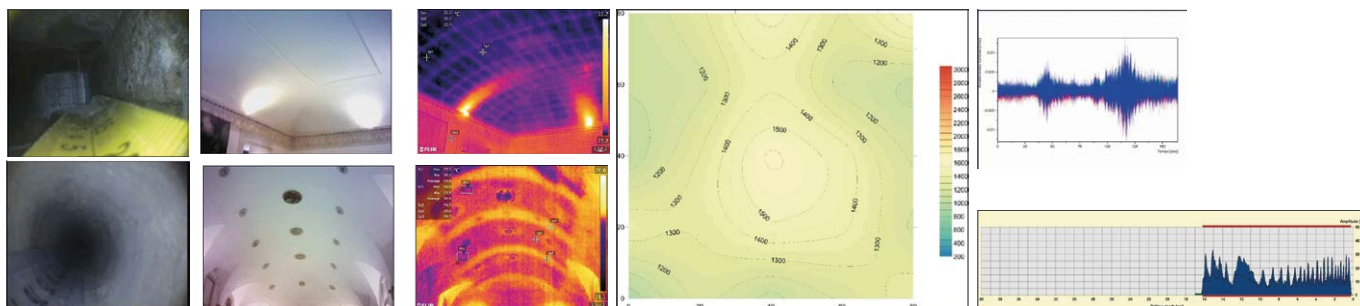
2. Fasi costruttive



LEGENDA	
Elementi Verticali Strutturali	
■	Muratura in mattoni pieni e malta di calce
■	Muratura in mattoni pieni con riempimento interno in pietra
■	Colonna in pietra
	Muro in falso
Elementi Verticali Non Strutturali	
■	Tramezza in forati o cartongesso
Elementi Orizzontali	
	Solaio in travi lignee
	Volte in laterizio
	Solaio in laterocemento
	Copertura in laterocemento



3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



4. Indagini specialistiche

P6. PALAZZO DEI PRIORI, PERUGIA

Il Palazzo dei Priori - o Comunale - fu edificato a Perugia tra il 1293 e il 1443 ed è un illustre esempio di palazzo pubblico dell'età comunale. Ancora oggi ospita alcuni uffici comunali e al terzo piano è sede della Galleria Nazionale dell'Umbria.

Caratteristiche storiche e morfologiche

L'edificio si trova su un pianoro ed è parte di un aggregato strutturale di cui costituisce oltre metà della superficie; è caratterizzato da una forma prossima a un rettangolo molto stretto e lungo ed è libero su tre lati della testata nord che prospettano sulla piazza IV Novembre, su corso Vannucci a est e su via della Gabbia a ovest; a sud un fronte si affaccia su un piccolo vicolo.

Il palazzo è costituito da tre corpi principali collegati tra loro da sovrappassi che lo attraversano trasversalmente; la superficie di impronta a terra è pari a circa 4.000 mq (138 m x 30 m) per un'altezza media alla gronda di 26 m, su cui svetta la torre centrale su corso Vannucci alta 44 m; gli edifici afferenti al medesimo aggregato strutturale sono tutti in muratura portante e hanno tutti un'altezza inferiore rispetto ai volumi di Palazzo dei Priori.

La compagine attuale è frutto di una lunga storia costruttiva, iniziata nel 1293 e protrattasi per circa tre secoli, che prende le mosse dalla costruzione del palazzo del Capitano su un terreno libero nell'angolo nord-est del lotto. Nel corso dei secoli la proprietà comunale si espande annettendo al primo nucleo altre fabbriche preesistenti contigue, riformando le facciate, realizzando elementi di connessione (sovrappassi), ampliamenti e sopraelevazioni.

In epoca recedente – anni '90 – il palazzo è interessato da interventi di miglioramento sismico mediante l'inserimento di nuovi tiranti, l'irrigidimento dei solai con solette di cemento armato, la modifica di alcuni elementi in copertura (sostituzione delle strutture spingenti con capriate e formazione del cordolo sommitale).

Le vicende di questa complessa storia costruttiva sono in parte dichiarate dalla articolata maglia muraria che definisce l'impianto strutturale del palazzo, densa in entrambe le direzioni ma caratterizzata da allineamenti irregolari. Queste irregolarità sono presenti anche in alzato, con solai sfalsati ai vari livelli e vani con altezze doppie (sala dei Podiani).

Le vicende costruttive implicano una sostanziale eterogeneità delle tecniche costruttive sia per la struttura di elevazione sia per gli orizzontamenti. La struttura è quasi interamente in muratura portante (sono presenti alcuni setti in calcestruzzo) con tessiture murarie di vario tipo (blocchi di pietra, mattoni, mista pietra e laterizio, pietra sbozzata); gli orizzontamenti sono costruiti con diverse tecniche (solai in legno, cemento armato, ferro e laterizio, volte in pietra o mattoni). Le informazioni sulla tecnica costruttiva non sono sempre a vista: le pareti interne sono quasi tutte coperte da intonaco, mentre sono a vista le tessiture dei muri perimetrali; solai e volte sono coperti da intonaco.

Il livello di difficoltà per il raggiungimento di una conoscenza adeguata del palazzo dei Priori è abbastanza alto ed è soprattutto legato alle dimensioni e alla complessa articolazione della fabbrica, che appartiene a proprietari differenti. A vantaggio di una buona conoscenza giocano un ruolo di rilievo gli studi esistenti sul palazzo, che consentono di minimizzare le indagini.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale è stata definita mediante il controllo a campione del rilievo geometrico disponibile, eseguendo le integrazioni necessarie anche con il supporto di rilievi laser scanner per gli ambienti particolarmente complessi (sala Podiani). Tuttavia non è stato possibile controllare l'intero complesso architettonico per la mancata accessibilità di molti locali non appartenenti al Comune o alla Galleria Nazionale. Il quadro fessurativo è stato rilevato ove possibile e riportato in elaborati specifici assieme alle informazioni sulla tecnica costruttiva. È assente l'analisi sul piano terra per i problemi di accessibilità di cui si è detto. Malgrado ciò, è scelto un fattore parziale pari al massimo livello di conoscenza, $F_{C1}=0$, considerando la completezza delle informazioni ottenute per la zona occupata dalla Galleria Nazionale – oggetto della verifica sismica.

La storia costruttiva è delineata con il supporto di una ricerca bibliografica e archivistica; in particolare è presente uno studio pregresso sulla evoluzione del palazzo dei Priori fondamentale per la ricostruzione delle fasi evolutive. I risultati dell'analisi storico-critica sono sintetizzate in planimetrie apposite che segnano e datano le trasformazioni sull'impianto strutturale attuale. È inoltre approntato uno studio volumetrico dell'evoluzione dell'aggregato.

Lo studio condotto sui dettagli costruttivi è finalizzato alla elaborazione di un giudizio qualitativo sugli elementi strutturali; le informazioni sono dedotte dai progetti trascorsi (rilievo critico del 1998) e da indagini specifiche eseguite per lo studio recente principalmente sulle murature (endoscopie). Non sono eseguiti disegni d'insieme o di dettaglio degli assemblaggi e negli elaborati grafici si trovano legende sintetiche. Alla luce dei risultati raggiunti in questa fase di analisi è scelto un $F_{C2}=0$.

Non sono eseguite indagini di caratterizzazione meccanica per cui i dati sono desunti dalla tabella C8A2.1; per la mancata conoscenza di alcune zone del palazzo sono scelti i valori minimi della tabella. Si considera raggiunto il livello di conoscenza più basso pari a un fattore di confidenza $F_{C3}=0,12$.

Infine, per quanto concerne il quarto aspetto della conoscenza – terreno e fondazioni – sono eseguite una ricerca dei documenti disponibili su progetti e indagini pregresse, e una campagna di indagini geologiche e geotecniche per la realizzazione del modello di sottosuolo. È così scelto un $F_{C4}=0$.

Dalla sommatoria dei succitati fattori parziali deriva il valore globale di $FC=1,12$.

Interpretazione delle informazioni

Il giudizio sulla qualità del comportamento strutturale del fabbricato è nel complesso positivo ma è ritenuto comunque parziale. L'impossibilità di accedere a tutti i vani del palazzo implica incertezze sostanziali nel percorso della conoscenza perseguito, per cui è sottolineata la necessità di espandere l'indagine a quelle porzioni "ignote" per aumentare l'attendibilità del giudizio.

La struttura è studiata seguendo i tre livelli di valutazione. In particolare sono eseguite delle verifiche locali LV2 per alcune pareti perimetrali considerate più vulnerabili ai meccanismi fuori dal piano (pareti doppia altezza sala Podiani), o per alcune zone il cui comportamento sismico non è inquadrabile come globale.

La verifica complessiva LV3 è eseguita mediante analisi statica non lineare su un modello a elementi finiti suddividendo l'aggregato in unità strutturali coerenti con la configurazione geometrica e le fasi evolutive.

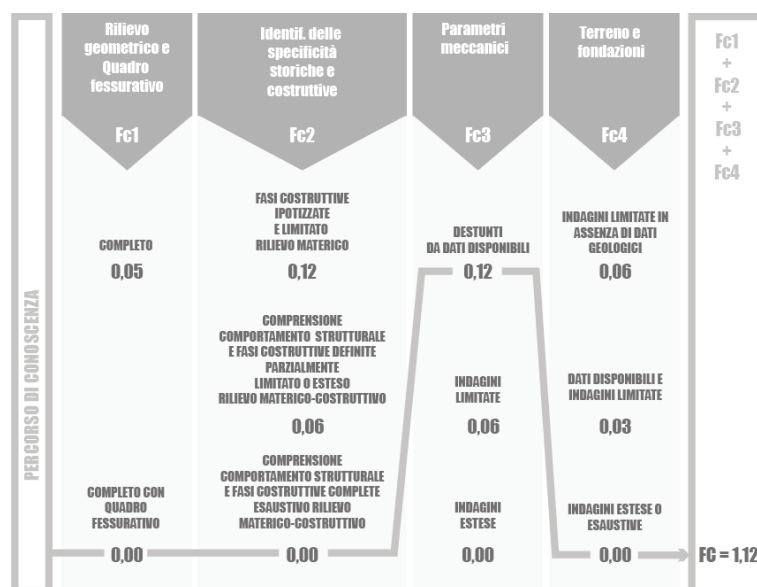
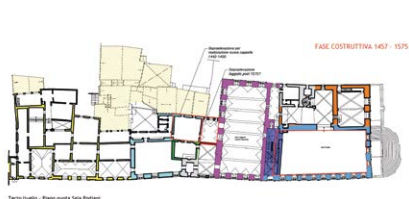
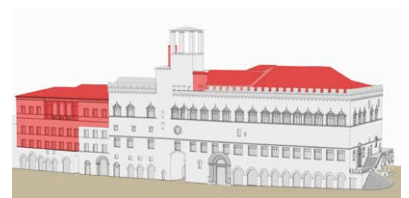
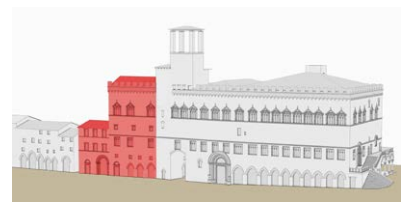
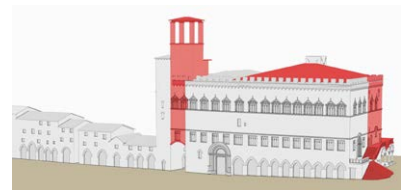
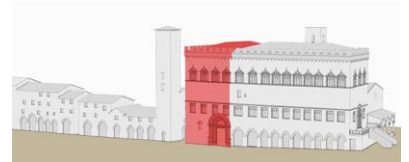
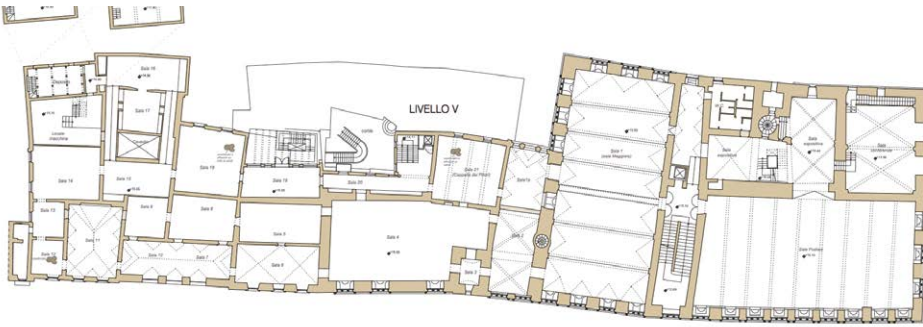
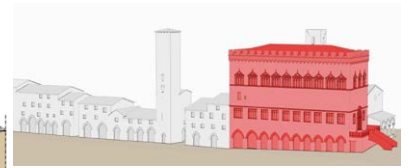


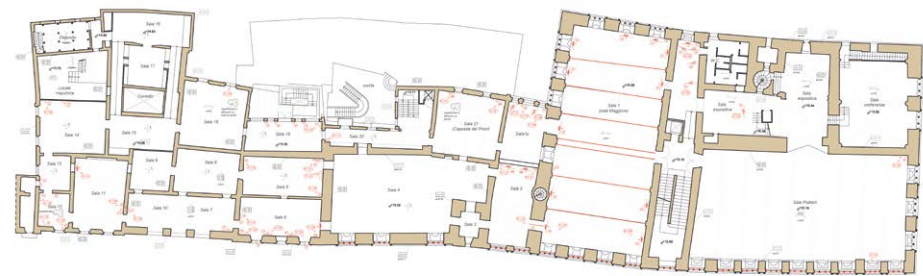
Figura 3.7 - Palazzo dei Priori (PG), definizione del Fattore di Confidenza

P6 - PALAZZO DEI PRIORI, PERUGIA - Sintesi elaborati della fase conoscitiva



2. Fasi costruttive

1. Rilievo geometrico 0 10m



ELEMENTI STRUTTURALI

MURATURE

PIETREME
cristallo squadri. fusto sacco

LATERIZI
pieno semi-pieno forato

BLOCCHI CLS e CLS
pieno semi-pieno sempl. armato

MISTA
pietr. later. piatr. cls later. cls

IMPALCATI

SOLAI E COPERTURE
legno later. c.a. c.a.

later. ferro ferro

VOLTE
c.a. laterizio pietra

ALTRI ELEMENTI
controsolotto capochiave catena

LESIONI

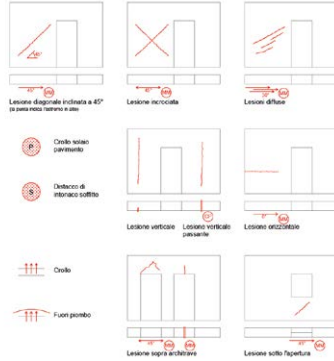
AMPIEZZA LESIONI
capillare idraulica centometrica

Lesione pavimento: Delle soles parzialmente

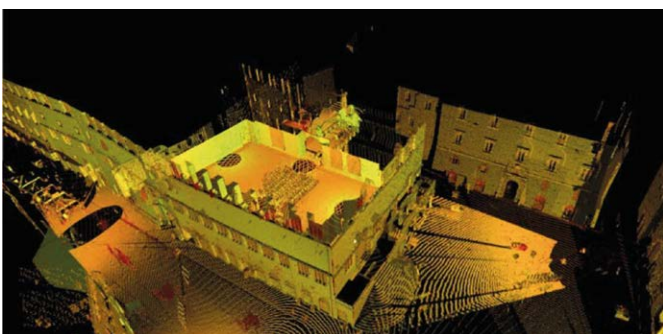
Lesione soffitto: Deterioro di intonaco soffitto

Deterioro parete del soffitto: Delle

Deterioro parete del pavimento: Fuori pannello



3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



4. Metodologie e Indagini specialistiche: Laser scanner, videoendoscopia

06/25/2014 10:59 VD9BAYERZ 026 OLYMPUS

P7. PALAZZO PANICHI, ASCOLI PICENO

Palazzo Panichi (ex Ridolfi) è una residenza cinquecentesca situata nel centro storico di Ascoli Piceno, prospiciente sulla piazza Arringo e oggi è sede del Museo Archeologico Nazionale della città.

Caratteristiche storiche e morfologiche

L'edificio è parte di un aggregato strutturale di cui occupa la porzione di testata e prospetta su via Bonaccorsi a est, su una via più stretta a nord (Rua degli Albanesi) e piazza Arringo a sud; a ovest il palazzo confina con gli altri edifici – anch'essi in muratura – ai quali si addossa formando un chiostro caratterizzato, sui lati est e nord, da portici a doppio ordine.

L'attuale impianto di Palazzo Panichi al pian terreno ha una forma a C sviluppata attorno a un chiostro centrale con un'impronta a terra di circa 950 mq (ca. 21 m x 45 m), mentre ai piani superiori si individuano due corpi di fabbrica divisi da due grandi terrazze sull'angolo nord-est. Il corpo principale, posto sul lato sud è a tre elevazioni fuori terra (circa 16 m), mentre le porzioni su Bonaccorsi sono a due e a un livello fuori terra, per un'altezza alla gronda di 11 m e 5 m; infine su rua degli Albanesi, la consistenza è di tre livelli fuori terra che però si sviluppano per un'altezza massima alla gronda di 11 m. Il palazzo svetta di un piano e presenta solai a quote sfalsate rispetto ai fabbricati adiacenti su piazza Arringo, mentre le porzioni sulla rua hanno consistenza e conformazione analoga agli edifici contigui.

La struttura di elevazione è in muratura portante principalmente in blocchi di travertino squadrati e mattoni pieni con buona tessitura (pareti perimetrali), blocchi sbozzati e mattoni per le pareti di spina, e qualche episodico muro in blocchi non squadrati.

Gli orizzontamenti al piano terra sono volte murarie in mattoni posti di coltello, mentre ai piani superiori sono solai in latero cemento che hanno sostituito gli originari solai in legno. L'orditura lignea è rimasta nelle coperture del corpo principale, mentre gli altri tetti sono stati sostituiti da falde in cemento armato poste su capriate lignee.

Le murature sono completamente a vista nei prospetti est e nord, e nascoste dall'intonaco nel prospetto principale. Anche all'interno i paramenti sono a vista nella maggior parte degli ambienti. Le tessiture delle volte sono a vista nei loggiati ma per il resto sono coperte dall'intonaco.

La lettura della maglia muraria suggerisce la formazione dell'attuale compagine strutturale attraverso la rifusione di edifici contigui. Il corpo principale su piazza Arringo costituisce l'originaria residenza cinquecentesca di forma rettangolare con maglia compatta nelle due direzioni; a questo corpo si annette la fabbrica adiacente formando una L con il chiostro centrale, il cui lato nord confina con un'altra corte, in seguito chiusa per formare l'attuale terrazzo al piano primo, e il fabbricato su rua degli Albanesi.

La consistenza edilizia di questo complesso architettonico sembra non aver subito trasformazioni sostanziali dall'epoca del primo impianto, eccezion fatta per quegli interventi necessari a fondere le due proprietà. Solo nei primi anni del Novecento la costruzione nell'angolo nord-est di un fabbricato in muratura portante e solaio in latero-cemento è realizzata per coprire gli scavi archeologici, dando origine alla attuale forma a C del piano terreno.

Tra gli anni '80 e '90 del Novecento sono stati realizzati importanti lavori di restauro del palazzo per accogliere la nuova funzione di museo archeologico. Molti solai di interpiano lignei sono stati sostituiti da solai in c.a., così come accade per le falde di alcuni tetti. Le volte in laterizio sono state svuotate e ricoperte all'estradosso da una calotta di calcestruzzo per accogliere la nuova pavimentazione.

A valle dell'analisi svolta, il livello di difficoltà della fase conoscitiva di palazzo Panichi è medio, considerando il materiale disponibile per lo studio delle vicende costruttive, le dimensioni abbastanza contenute dell'impianto strutturale e la visibilità delle informazioni, estesa a una buona percentuale degli elementi strutturali.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale è stata definita attraverso un controllo sistematico del complesso architettonico eseguito con strumentazione tradizionale. In aggiunta è stata verificata la collocazione e la consistenza delle cellule murarie connesse alla parete ovest – in comune con gli edifici adiacenti – che giocano un ruolo nel comportamento strutturale del fabbricato in aggregato.

Il quadro fessurativo è anch'esso rilevato con sistematicità e le lesioni sono riportate in elaborati specifici, avendo cura di distinguerne l'entità (diffusa, passante, non passante) – l'operazione è anche facilitata per l'assenza di un quadro fessurativo importante. Alla luce di queste risultanze è ottenuto un $F_{C1}=0$.

La comprensione delle vicende storiche e costruttive della fabbrica è anch'essa apparentemente facilitata dall'assenza di importanti trasformazioni documentate o visibili nel fabbricato. La ricerca bibliografica e archivistica è stata concentrata sul reperimento di catastali storici attestanti la consistenza dell'aggregato edilizio rimasta immutata dalla metà del '500 al XIX e sulla analisi approfondita delle perizie tecniche dei progetti di restauro e consolidamento degli anni '80-'90. Il risultato di quest'analisi è sintetizzato da uno schema volumetrico che inquadra i corpi di fabbrica che compongono il complesso studiato (toni del giallo) e gli edifici adiacenti (in grigio), senza però distinguere una cronologia costruttiva.

È svolta un'analisi puntuale dei dettagli costruttivi eseguendo prove non distruttive o debolmente distruttive sulle murature e sulle volte in mattoni (termografie, soniche, endoscopie, stonacature, prelievi di malta); queste prove avvalorano il giudizio positivo sulla qualità degli elementi strutturali e in alcuni punti attestano la buona ammorsatura tra muri di spina e muri perimetrali. Analogo discorso vale per gli elementi lignei, analizzati con prove resistograph e per i solai in cemento armato sui quali sono state eseguite delle prove con pacometro. Sono eseguiti disegni di particolari costruttivi desunti da rilievi eseguiti *ad hoc*. Sulla base di questi risultati è scelto un $F_{C2}=0$.

Non sono state eseguite prove per la determinazione dei parametri meccanici e questi sono stati desunti dalla tabella C8.A.2.1, sulla base delle tessiture murarie individuate con il rilievo diretto. Nel caso di palazzo Panichi è anche possibile avvalersi dei risultati di prove pregresse (martinetti singoli e doppi)

effettuate nell'ambito dei trascorsi lavori di restauro, ma di queste non se ne è tenuto conto nella scelta del fattore di confidenza parziale. Sulla conoscenza dei parametri meccanici è stato scelto un $F_{C3}=0,12$.

Considerazioni simili valgono per la determinazione delle caratteristiche del terreno di fondazione, analizzato con il supporto delle indagini del CNR-IGAG effettuate nell'ambito dello stesso progetto Arcus. Per la geometria delle fondazioni sono stati realizzati degli schemi di massima basati sull'impianto dei muri al piano terra. Alla luce di questi risultati è scelto un $F_{C4}=0,06$.

Dalla sommatoria dei succitati fattori parziali si ottiene il valore globale di $FC=1,18$.

Interpretazione delle informazioni

Il giudizio sulla qualità del comportamento strutturale dell'edificio è nel complesso positivo. Le murature sono considerate di buona fattura e le connessioni efficaci.

Il primo livello di valutazione (LV1) è condotto mediante il SIVARS, di cui però non si tengono in considerazione i risultati ottenuti, essendo il software non aggiornato all'attuale normativa; esso è invece considerato uno strumento funzionale alla raccolta sistematica di informazioni sull'edificio, dall'anagrafica alle caratteristiche strutturali.

Il secondo livello di valutazione (LV2) è eseguito verificando con analisi cinematica il comportamento fuori piano a tappeto di tutte le pareti perimetrali (20 macroelementi), e i risultati confermano il giudizio qualitativo avanzato sulla struttura.

La valutazione secondo LV3 è condotta mediante l'analisi statica non lineare (push-over) su un modello a telaio equivalente. Questa operazione – è dichiarato – comporta diverse semplificazioni nell'impianto strutturale, sia per quanto concerne gli allineamenti sia riguardo le tipologie di orizzontamenti (voltati in particolar modo).

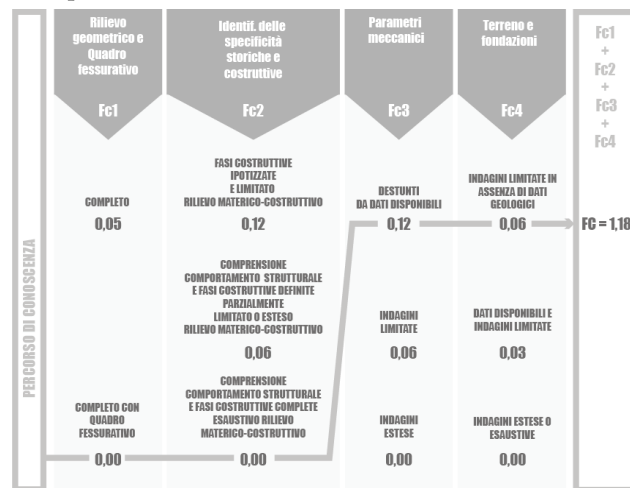
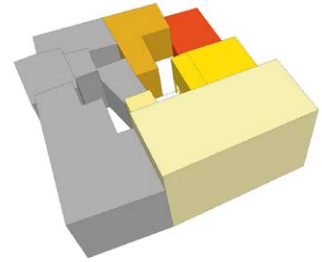
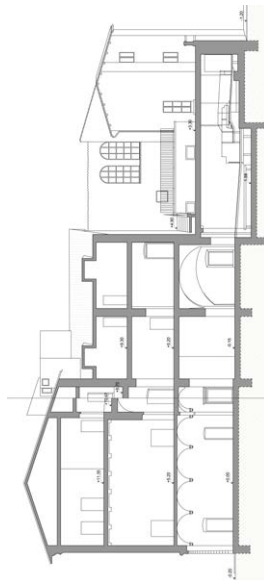
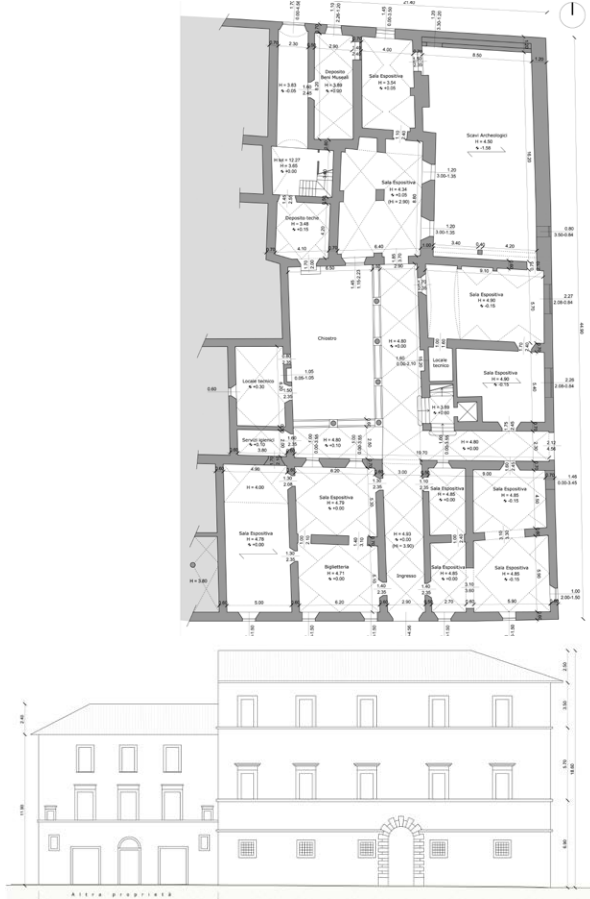


Figura 3.8 - Palazzo Panichi (AP), definizione del Fattore di Confidenza

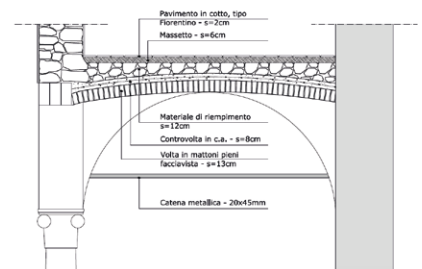
P7 - PALAZZO PANICHI, ASCOLI PICENO- Sintesi elaborati della fase conoscitiva



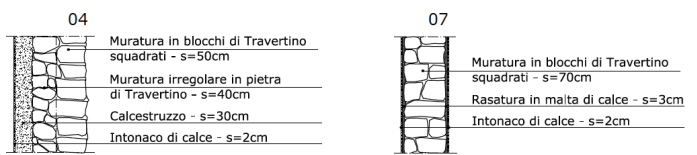
1. Rilievo geometrico 0 10m

2. Fasi costruttive

Piano Terra - Dettaglio costruttivo 01, volta del portico - Scala 1:20

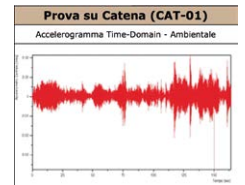
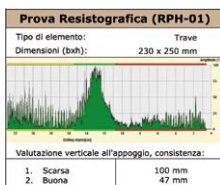
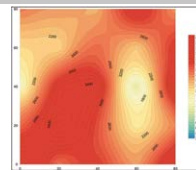
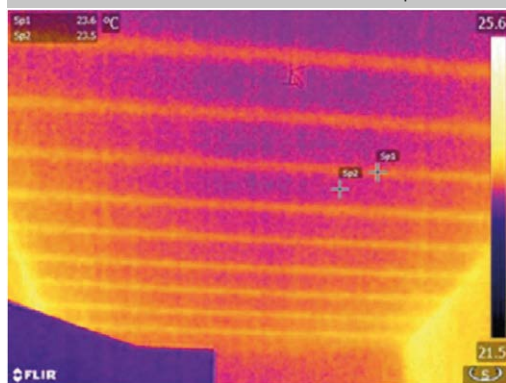


Piano Terra - Dettagli costruttivi delle murature - Scala 1:50



LEGENDA	
Elementi verticali strutturali	
[Color swatch]	Muratura in blocchi di pietra di travertino squadrati
[Color swatch]	Muratura in blocchi di pietra di travertino irregolari
[Color swatch]	Muratura mista in blocchi di pietra di travertino e laterizi
[Color swatch]	Muratura in mattoni pieni
[Color swatch]	Parete in calcestruzzo armato
[Color swatch]	Colonna in pietra
[Color swatch]	Cordolo in calcestruzzo armato
[Color swatch]	Muratura in falso
Elementi orizzontali strutturali	
[Symbol]	Solajo in travi lignee e tavelloni
[Symbol]	Solajo in latero-cemento
[Symbol]	Volte in laterizio
Elementi non strutturali	
[Symbol]	Tramezza in forati o cartongesso
[Symbol]	Controsoffitto in arelle/cannucinato

4. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



5. Indagini specialistiche

P8. PALAZZO BRUNI, AREZZO

Il Palazzo rinascimentale edificato per la famiglia Bruni – probabilmente dall'architetto Bernardo Rossellino – oggi è sede del Museo di Arte Medievale e Moderna di Arezzo.

Caratteristiche storiche e morfologiche

La costruzione risale alla fine del XV secolo ed è frutto dalla riforma del preesistente palazzo Accolti, nel centro storico della città.

La proprietà del palazzo ha una estensione di circa 3000 mq compreso il giardino pensile posto a nord dell'edificio principale, quest'ultimo sede del museo, e l'edificio che ospita il laboratorio di restauro della soprintendenza, del tutto indipendente.

Il palazzo si estende per circa 800 mq di impronta a terra e ha un impianto con chiostro in posizione decentrata, attorno al quale sono disposte altre cellule murarie addossate alle campate porticate sui lati sud-est e sud-ovest che si sviluppano per tre livelli fuori terra (18 m alla gronda), mentre sui lati nord-ovest e nord-est l'edificio si sviluppa in corrispondenza dei portici per due livelli fuori terra (10 m alla gronda). Questo edificio ha in comune con altri fabbricati di altezza molto inferiore (i tetti di questi edifici si impostano a circa metà del primo piano del palazzo) una porzione di parete sul lato est.

La maglia muraria del palazzo non è compatta. Oltre alla presenza del chiostro al piano terra, che implica l'assenza di massa muraria su buona parte dell'impianto, ai piani superiori sono frequenti ambienti molto grandi con pareti libere di lunghezza fino a quasi 27 metri, solo in pochi casi interrotte da muri di spina ma solo su un fronte.

L'attuale compagine di Palazzo Bruni è il risultato di una storia costruttiva priva di trasformazioni importanti. Non appaiono evidenti i segni della riforma attuata sulla preesistenza di palazzo Accolti, e un intervento importante sembra la sostituzione delle coperture del fabbricato eseguita dopo il 1958, anno in cui palazzo Bruni diventa di proprietà statale con l'obiettivo di adibirlo a Museo Nazionale. Le originarie orditure lignee sono state sostituite da strutture in cemento armato. Un intervento di pari importanza è la costruzione della sala conferenze sotto il giardino pensile, costituita da una struttura in cemento armato posta alla quota del piano terra in aderenza alla parete nord del palazzo.

La struttura di elevazione del palazzo - totalmente in muratura portante - è coperta quasi interamente da intonaco. Sono comunque individuate con il supporto di indagini due tipologie murarie: in mattoni pieni e malta di calce, con paramento esterno differente per epoca costruttiva (non ben specificata) e nucleo interno.

Gli orizzontamenti sono volte in mattoni a una o due teste al piano terra, che in parte sono state oggetto di nuovo riempimento, solai in legno e in latero-cemento ai piani superiori.

Le informazioni sulle tecniche costruttive e sui materiali utilizzati sono spesso nascoste dall'intonaco; tuttavia il materiale d'archivio disponibile (perizie, foto di cantiere, ecc.)

rappresenta un valido supporto per avanzare ipotesi sufficientemente attendibili sulla tecnica costruttiva.

In definitiva, però, la mancata visibilità delle suddette informazioni rappresenta l'elemento principale che determina vuoti conoscitivi, comunque colmabili attraverso l'esecuzione di indagini anche non distruttive. In secondo luogo, un minimo impatto sulla conoscenza del comportamento strutturale è determinato dall'assenza dei rilievi murari degli edifici contigui che interagiscono con l'edificio a est.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La restituzione della geometria strutturale è conseguita mediante il controllo sistematico dei rilievi disponibili, verificando gli spessori murari, la luce di solai e volte, le altezze di interpiano, evidenziando eventuali disallineamenti in alzato, il tutto con strumentazione tradizionale. Non è presente una restituzione del rilievo murario dell'edificio contiguo, con il quale il palazzo interagisce sul lato est.

Il quadro fessurativo non è grave ed è in gran parte concentrato nelle pareti di appoggio degli elementi in cemento armato della copertura; le lesioni sono riportate in elaborati dedicati, specificandone la gravità. Alla luce di questi risultati è scelto il valore di $F_{C1}=0$.

La ricostruzione delle trasformazioni importate subite dal manufatto è stata definita con il supporto della ricerca archivistica e bibliografica, i cui risultati hanno guidato la definizione del piano di indagini specialistiche sulle murature. Nonostante ciò non si evince con chiarezza l'avvenuto controllo sul campo delle eventuali zone di accostamento tra cellule murarie in parte suggerite dalla lettura dell'impianto strutturale e la sintesi della conoscenza sulle fasi evolutive è rappresentata da una volumetria estremamente schematica del complesso.

Gli elementi costruttivi sono indagati con il supporto di indagini diagnostiche non distruttive (termografie e soniche) che confermano la generale compattezza delle murature, e prove debolmente distruttive (endoscopie, prelievi di malta) per definire la sezione muraria; inoltre è verificata l'efficacia di alcuni tiranti e la fattura delle strutture in c.a. (pacometriche e sclerometriche). Sono inoltre presenti dei disegni di dettagli costruttivi delle murature o degli orizzontamenti, e degli assemblaggi. La scelta per questo fattore parziale ricade in $F_{C2}=0$.

Non sono state svolte prove per la caratterizzazione meccanica dei materiali, e questi sono stati desunti dalla tabella C.8A.2.1, selezionando i valori medi per ciascuna tipologia. Non sono utilizzati valori correttivi delle malte perché se ne è constatata l'inadeguatezza con le prove di laboratorio. Il valore del fattore parziale per questo aspetto della conoscenza è pari a $F_{C4}=0,12$.

Riguardo infine le indagini sul terreno e le fondazioni, è presente lo studio di uno schema geometrico del piano di fondazione, ricostruito sulla base dell'impianto del piano terra; sono invece assenti delle prove di caratterizzazione del terreno, e le indagini sono limitate allo studio RSL eseguito dal CNR-IGAG. Il valore scelto è dunque $F_{C4}=0,06$.

Dalla sommatoria dei fattori parziali si ottiene un fattore globale $FC=1,18$.

Interpretazione delle informazioni

Il giudizio qualitativo proveniente dalla conoscenza del fabbricato è in generale positivo, in base a quanto si apprende dal giudizio di qualità delle murature e dei solai. Non sono sottolineate particolari situazioni di precarietà strutturali, a eccezione della copertura in cemento armato considerata causa del quadro fessurativo presente nelle murature in sommità. Non emergono chiaramente considerazioni qualitative sulla sicurezza dell'edificio.

Sono state svolte verifiche secondo i tre livelli di valutazione LV1, LV2 e LV3.

LV2 è stato eseguito verificando la risposta al meccanismo di primo modo di un numero cospicuo di macroelementi che comprendono tutte le pareti perimetrali.

In particolare, la verifica complessiva LV3 è stato condotto eseguendo una analisi statica non lineare (push-over) considerando più modelli in cui è stato aggiunto o sottratto il vincolo offerto dagli edifici adiacenti a est. I risultati delle verifiche confermano che l'apporto di questi edifici è quasi nullo, per cui la mancata conoscenza del rilievo murario apparentemente non inficia l'attendibilità di tutto il processo.

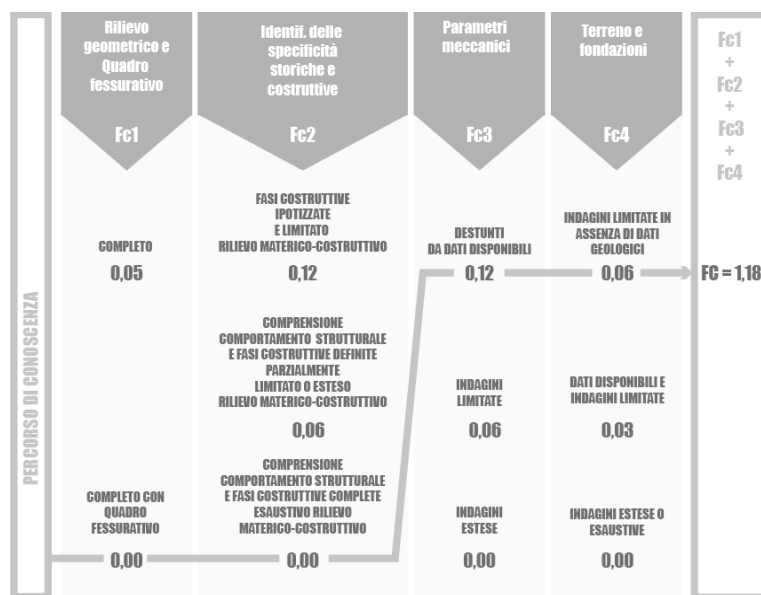
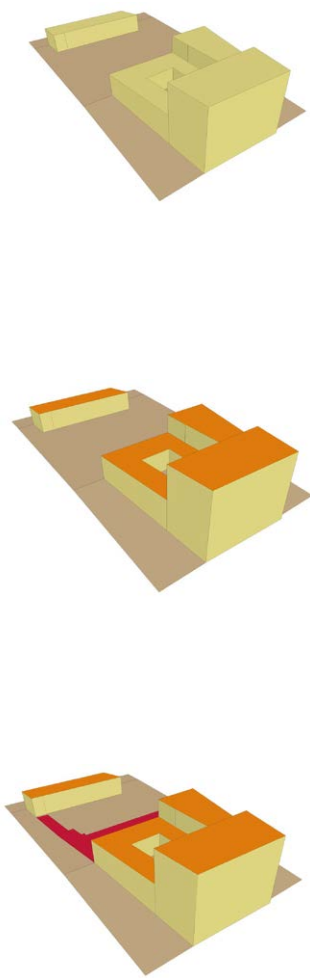
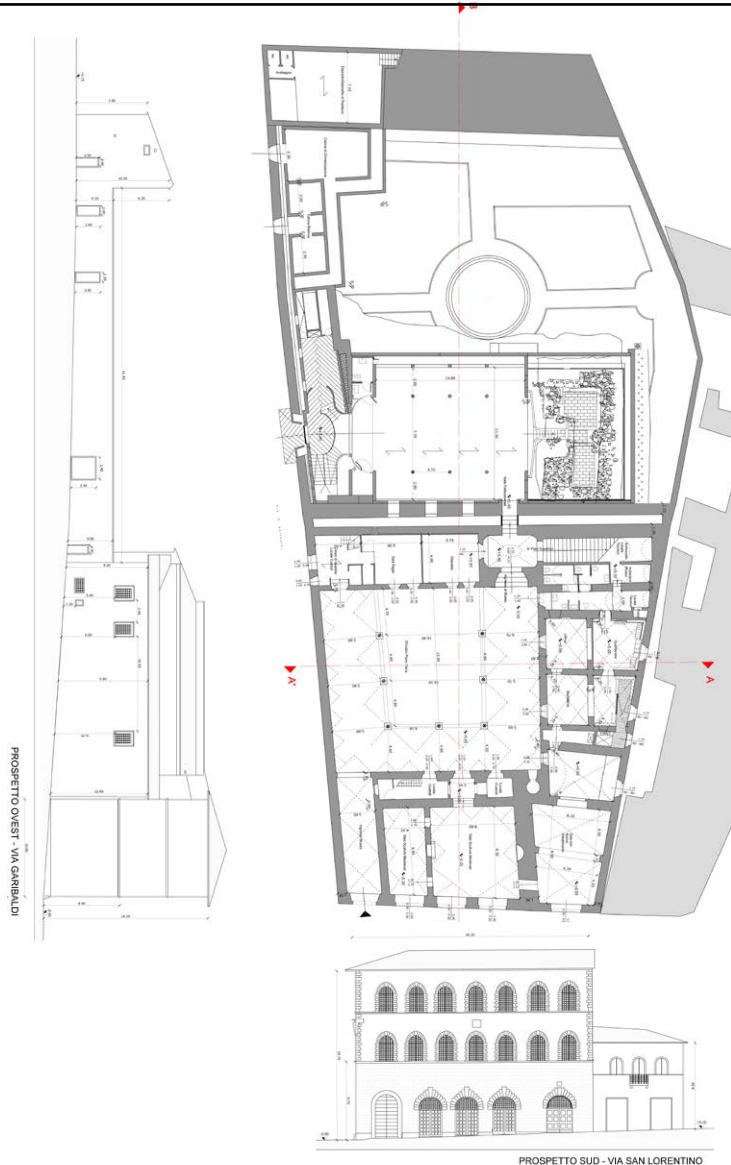
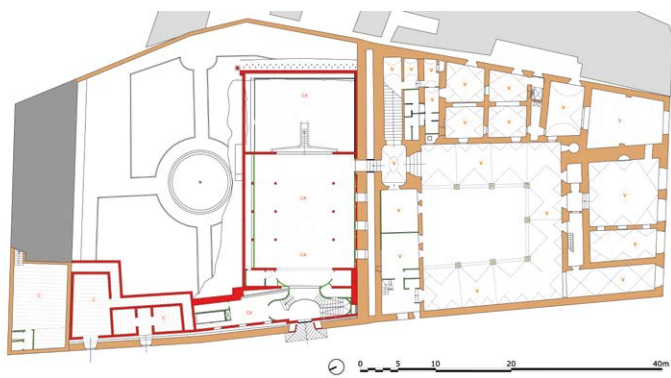


Figura 3.9 - Palazzo Bruni, definizione del Fattore di Confidenza



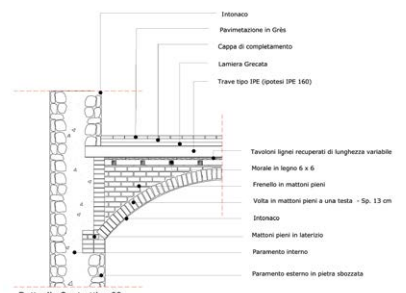
1. Rilievo geometrico 0 10m

2. Fasi costruttive

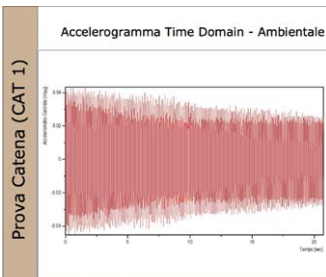
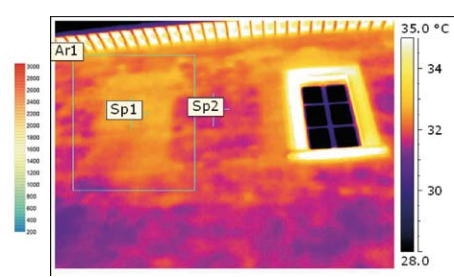
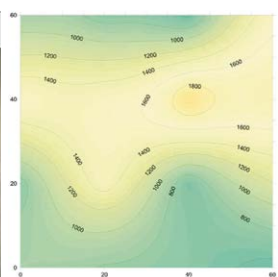


LEGENDA

ELEMENTI VERTICALI STRUTTURALI	
[Orange]	MURATURA IN MATTONE PIENE E MALTA DI CALCE
[Red]	PARETE IN CALCESTRUZZO ARMATO
[Yellow]	MURATURA IN PIETRE A SPACCO CON BUONA TESSITURA
[Light Yellow]	COLONNA IN PIETRA
ELEMENTI VERTICALI NON STRUTTURALI	
[Green]	PARETE IN FORATI O CARTONGESSO
ELEMENTI ORIZZONTALI	
[L]	SOLAIO IN TRAVI LIGNEE
[C]	SOLAIO IN LATEROCEMENTO
[V]	VOLTE IN LATERIZIO
[CL]	COPERTURA IN TRAVI LIGNEE
[S]	SOLAIO CON TRAVI METALLICHE
[CC]	COPERTURA IN LATEROCEMENTO



3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



4. Indagini specialistiche

P9. CASA VASARI, AREZZO

L'edificio oggetto di studio è la residenza cinquecentesca di Giorgio Vasari, divenuta oggi Museo Nazionale.

Caratteristiche storiche e morfologiche

L'edificio è una costruzione isolata che si estende per circa 500 mq di impronta a terra per un'altezza alla gronda di 14 m (4 livelli fuori terra); è costituito da un corpo centrale principale con forma rettangolare al quale si addossano due corpi di dimensioni minori sia in pianta che in alzata e a ovest si trova annesso giardino di pertinenza.

La maglia muraria è abbastanza compatta grazie alla presenza di cellule murarie portanti in entrambe le direzioni trasversale e longitudinale. I mancati allineamenti tra le pareti sono ascrivibili principalmente alla presenza dello scalone che conduce al piano nobile.

Il palazzo è costruito durante la metà del '500 e nasce come edificio unitario da destinare a residenza. Durante i lavori è acquistato dal Vasari (era completo il piano terra) che ne completa la costruzione, apportando qualche modifica alla consistenza del piano nobile. La casa del Vasari sembra non subire trasformazioni di rilievo nel corso della sua storia. Tuttavia è possibile ipotizzare un nucleo originario del palazzo di forma quadrangolare cui si sono aggiunti in fasi diverse un primo corpo chiude l'attuale nucleo centrale e i due fabbricati più piccoli ai lati. Altre trasformazioni hanno riguardato la creazione o la chiusura di vani porta per assecondare delle esigenze distributive.

Tra gli anni '50 e '60 del XX secolo è stato attuato un progetto di "restauro conservativo delle strutture" che ha previsto l'incamiciatura dei setti murari del piano terra con una cortina di mattoni, evidente in alcune foto di trascorsi lavori.

La struttura di elevazione è interamente in muratura portante e gli orizzontamenti sono volte lapidee e solai in legno – oggetto di consolidamento con i recenti lavori di restauro. Le informazioni sugli elementi strutturali sono completamente nascoste dall'intonaco a esclusione del piano sottotetto in cui è possibile leggere le tessiture murarie. In alcune foto storiche scattate durante i lavori degli anni '90, questi dettagli sono visibili, ma dal materiale analizzato non si comprende quanto siano esaustive.

La mancata visibilità di queste informazioni può essere considerata l'unico elemento che determina delle difficoltà conoscitive, perché: le dimensioni sono contenute e l'articolazione degli spazi è semplice da indagare, e inoltre l'edificio è isolato quindi il rilievo geometrico non deve essere esteso al di fuori di Casa Vasari; infine la storia costruttiva appare sufficientemente documentata e comunque priva di trasformazioni importanti.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale è stata restituita mediante la verifica estesa dei rilievi geometrici disponibili, con il controllo sistematico degli spessori murari e delle altezze di interpiano; in aggiunta il laser scanner è stato utilizzato per georeferenziare i dislivelli degli orizzontamenti e verificare la dimensione dell'ispessimento di un solaio messo in evidenza dalla restituzione del rilievo geometrico e verificare la presenza di eventuali muri fuori piombo. Il quadro fessurativo è stato rilevato sistematicamente comprovando l'assenza di stati di dissesto in atto. Alla luce dei risultati ottenuti è scelto un $F_{C1}=0$.

La ricostruzione delle fasi evolutive è stata elaborata consultando fonti bibliografiche e archivistiche, le cui informazioni sulle trasformazioni della maglia muraria sono state poi verificate direttamente eseguendo delle stonacature, che hanno messo in evidenza alcuni accostamenti murari. Queste indagini hanno permesso inoltre di osservare le tessiture murarie presenti nell'edificio – preliminarmente individuate con l'analisi delle fonti documentarie – e di valutarne la qualità seguendo la procedura di identificazione dell'IQM. Indagini specialistiche sono eseguite per accertare la struttura di alcuni orizzontamenti (GPR e pacometriche), per chiarire in particolare la struttura (tecnica costruttiva e orditura) dell'ispessimento del solaio di cui si è accennato sopra.

In definitiva per il secondo aspetto della conoscenza è stato scelto $F_{C2}=0,06$ perché la ricostruzione delle fasi evolutive – seppur definita “completa” – è caratterizzata da diverse incertezze.

Riguardo i parametri meccanici questi sono stati desunti dalla tabella C8A.2.1, avvalorando i riferimenti numerici con i risultati della identificazione dell'IQM e, in alcuni casi, affiancando l'esecuzione di martinetti singoli e doppi. È stato dunque scelto un $F_{C3}=0,06$.

La conoscenza dell'aspetto “Terreno e fondazioni” può contare su dati geologici e geotecnici provenienti da indagini eseguite in prossimità dell'edificio – oltre che all'analisi degli studi di microzonazione sismica – e dell'esecuzione di MASW sul sito indagato. Per queste ragioni è scelto un $F_{C4}=0,03$.

Dalla sommatoria dei succitati fattori parziali si ottiene il valore globale di $FC=1,15$.

Interpretazione delle informazioni

Il giudizio qualitativo sul comportamento strutturale di Casa Vasari mette in evidenza alcuni punti deboli dell'edificio individuati a chiusura del percorso della conoscenza, come la cortina di mattoni non ammorsata alle pareti perimetrali, o gli accostamenti murari dovuti all'avvicinarsi di fasi costruttive distinte.

La valutazione quantitativa procede attraversando due livelli di valutazione LV2 e LV3. Il primo è sviluppato con la verifica a ribaltamento delle pareti perimetrali giudicate più vulnerabili (non ammorsate o con paramenti separati), mentre il secondo prevede l'esecuzione

di una verifica globale secondo il modello del “telaio equivalente” studiato con analisi statica non lineare (push-ver).

Sui risultati delle analisi locali gioca un ruolo importante il Fattore di Confidenza, che passa da 1,15 a 1,21. L’obiettivo è verificare l’influenza del percorso della conoscenza nei risultati delle analisi numeriche.

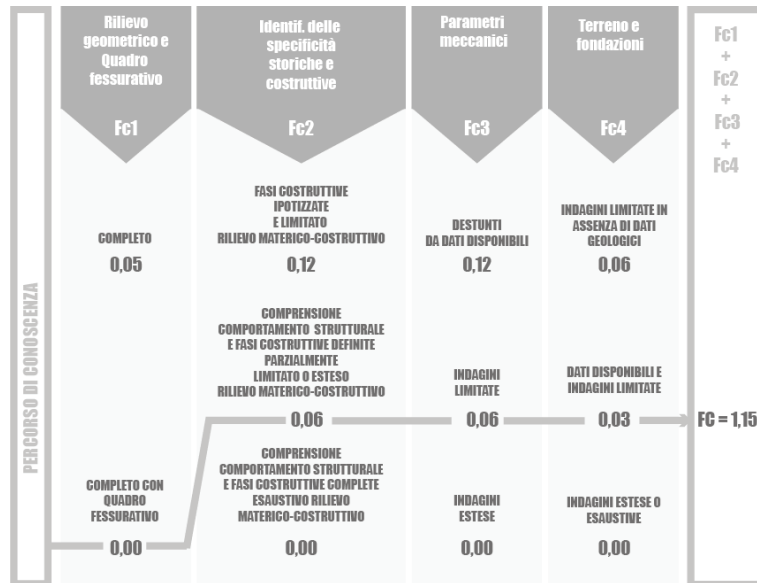
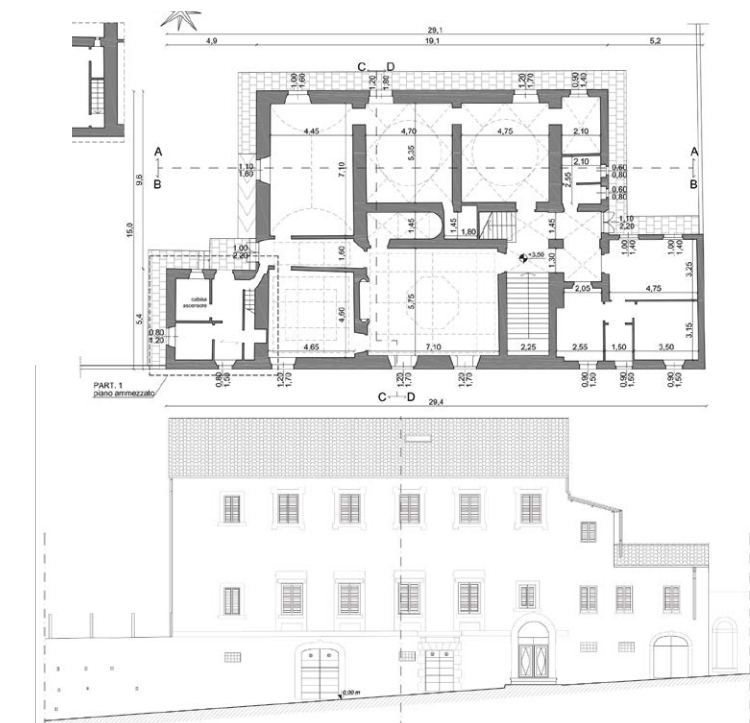
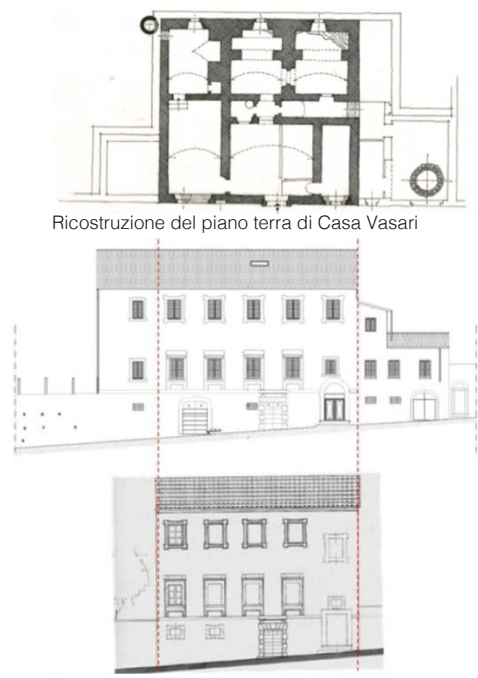


Figura 3.10 – Casa Vasari (AR), definizione del Fattore di Confidenza



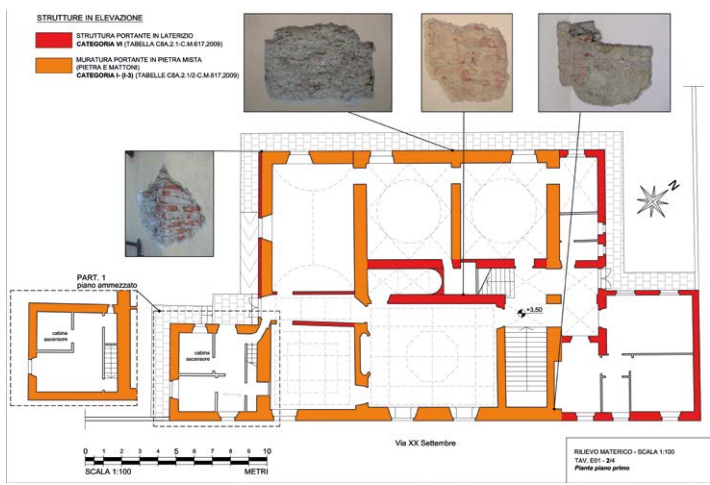
1. Rilievo geometrico 0 10m



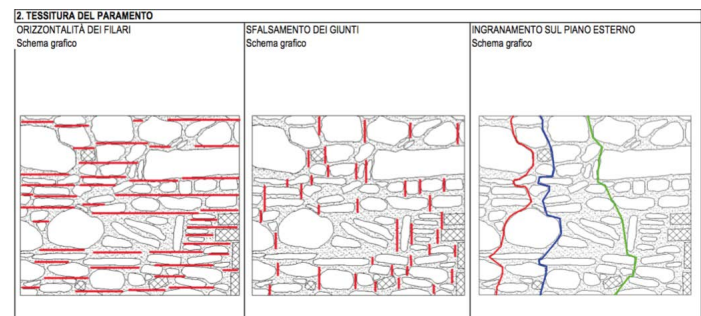
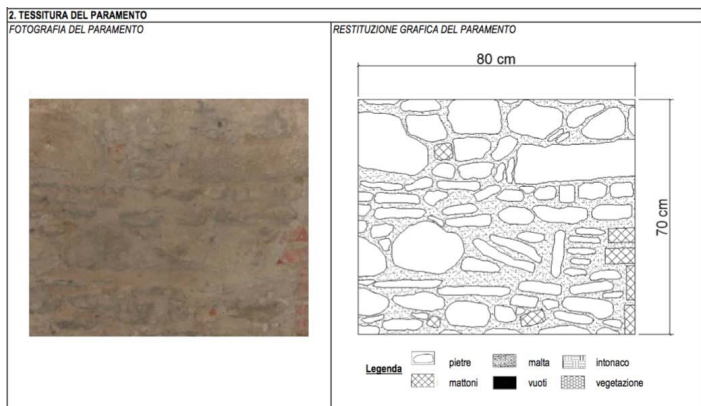
Ricostruzione del piano terra di Casa Vasari

Ricostruzione della facciata originale (in basso) e confronto con il prospetto attuale (in alto)

2. Fasi costruttive



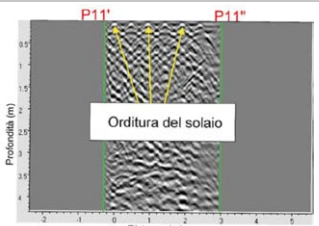
3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



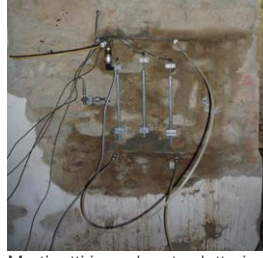
Saggio



Martinetti dia



DRMS per malta



Martinetti in sede e traduttori



Carote

4. Indagini specialistiche

P10. CASA MUSEO DEL POETA GIOVANNI PASCOLI, S. MAURO PASCOLI (FC)

La residenza storica del poeta Giovanni Pascoli si trova nei pressi del centro storico della cittadina di San Mauro (FC). È un palazzo risalente ai primi dell'Ottocento ed è oggi adibito a museo nazionale.

Caratteristiche storiche e morfologiche

La casa del Poeta occupa la posizione di testata di un aggregato strutturale di piccole dimensioni (35m x 12m) costituito da un altro edificio murario, costruito dopo la Seconda Guerra Mondiale. Ha una pianta rettangolare che si estende per circa 167 mq (14x12 m), per un'altezza media alla gronda di circa 5,40 m.

L'impianto planimetrico attuale è rimasto quasi immutato rispetto alla configurazione del 1840 – anno in cui la proprietà passa alla famiglia Pascoli. Le uniche trasformazioni di rilievo sono lo spostamento della scala, e la costruzione di due ampliamenti, che nell'ambito della ricostruzione post-bellica sono stati scorporati dalla proprietà della casa e radicalmente modificati per lasciare il posto all'attuale edificio contermini.

La distribuzione delle cellule murarie è abbastanza regolare in entrambe le direzioni, con l'eccezione del muro di spina centrale che si interrompe sul lato ovest; le pareti hanno luci libere contenute e spessori esigui a tutti i livelli (35 cm).

La storia costruttiva del fabbricato è dunque caratterizzata da poche trasformazioni e ciò ha contribuito al mantenimento di una certa omogeneità nella tecnica costruttiva sia per la struttura di elevazione sia per gli orizzontamenti.

La struttura di elevazione è interamente in muratura portante e in gran parte coperta da intonaco. Rimangono a vista alcune piccole aree di magazzini. La tipologia muraria più diffusa è costituita da mattoni pieni tessuti a due teste per uno spessore massimo di 35 cm.

Gli orizzontamenti sono in gran parte solai in travetti prefabbricati in cemento armato e tavelloni, ma sono presenti anche solai in legno e alcuni solai in putrelle e tavelloni. La copertura è a padiglione e gli elementi portanti sono paradossi lignei angolari e arcarecci orditi parallelamente alle facciate.

Le informazioni sulle tecniche costruttive e sui materiali utilizzati sono spesso nascoste dall'intonaco e il materiale d'archivio disponibile e le fonti documentarie che riportano gli eventi costruttivi antecedenti al XIX secolo sono esigue (se non del tutto assenti).

La mancata visibilità delle suddette informazioni implica lacune conoscitive, comunque colmabili attraverso l'esecuzione di indagini anche non distruttive. Tuttavia, queste difficoltà sono compensate dalla configurazione generale del manufatto – di piccole dimensioni –

semplice e regolare sia in pianta che in alzato, sia dalla storia costruttiva priva di trasformazioni complesse.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La restituzione della geometria strutturale è conseguita mediante il controllo diffuso dei rilievi disponibili, verificando gli spessori murari, la luce di solai e volte, le altezze di interpiano, evidenziando eventuali disallineamenti in alzato, il tutto con strumentazione tradizionale. L'indagine sulla geometria comprende anche l'edificio adiacente al manufatto oggetto di studio.

Le lesioni sono state rilevate sistematicamente e classificate in base alla loro ampiezza con riferimento alla scala proposta da Kaminetzky¹⁸⁰. Queste informazioni sono raccolte in elaborati dedicati. Alla luce di questi risultati è scelto il valore di $F_{C1}=0$.

La ricostruzione delle trasformazioni subite dal manufatto è stata definita con il supporto della ricerca archivistica e bibliografica, verificando con il riscontro sul campo le informazioni delle fonti indirette. I risultati dell'analisi hanno guidato la definizione del piano di indagini specialistiche sulle murature e sugli altri elementi strutturali. La sintesi della conoscenza sulle fasi evolutive è rappresentata da planimetrie in cui le murature sono campite con colori differenti in base all'epoca di costruzione.

Gli elementi costruttivi sono indagati con il supporto di indagini diagnostiche non distruttive (termografie, soniche), e prove debolmente distruttive (endoscopie, stonacature) per definire la tessitura e la sezione muraria. Il giudizio qualitativo su ciascuna tipologia è espresso con riferimento alla classificazione GNDT. Sono quindi redatti elaborati complessivi che mostrano in planimetrie la distribuzione delle tessiture rilevate.

Gli orizzontamenti metallici sono indagati con prove pacometriche per appurarne l'orditura, mentre le endoscopie e le termografie sono utilizzate per indagare le volte. Sono presenti alcuni disegni di dettagli costruttivi. La scelta per questo fattore parziale ricade in $F_{C2}=0$.

Non sono state svolte prove per la caratterizzazione meccanica dei materiali (eccezion fatta per le prove di punzonamento malte e compressione dei laterizi), e i valori delle murature sono stati desunti dalla tabella C.8A.2.1, con il supporto della classificazione GNDT selezionando i valori medi. Il fattore parziale per questo aspetto della conoscenza è pari a $F_{C3}=0,06$.

Riguardo infine le indagini sul terreno e le fondazioni, le informazioni sul terreno sono desunte da indagini pregresse condotte in un'area prossima al sito in cui sorge il manufatto. Il valore scelto è $F_{C4}=0,06$.

Dalla sommatoria dei fattori parziali si ottiene un fattore globale $FC=1,12$.

¹⁸⁰ Kaminetzky D., *Verification of structural adequacy rehabilitation, renovation and preservation of concrete and masonry structures*, Detroit, Mi, ACI 141, 1985.

Interpretazione delle informazioni

Il giudizio qualitativo proveniente dalla conoscenza del fabbricato è nel complesso positivo e non emergono particolari situazioni di precarietà strutturali.

Sono state svolte verifiche secondo i tre livelli di valutazione LV1, LV2 e LV3.

LV1 è eseguito utilizzando il SIVARS.

LV2 è stato eseguito verificando la risposta al meccanismo di primo modo di delle pareti di facciata, e un meccanismo di ribaltamento di un'angolata su cui poggia il paradosso di copertura.

LV3 è stato condotto eseguendo una verifica globale utilizzando due modelli: il primo considera l'edificio come isolato; la seconda lo considera in aggregato con la costruzione adiacente. Sono utilizzati vari tipi di analisi, quali l'analisi dinamica modale, l'analisi statica non lineare mettendo a confronto diversi tipi di software.

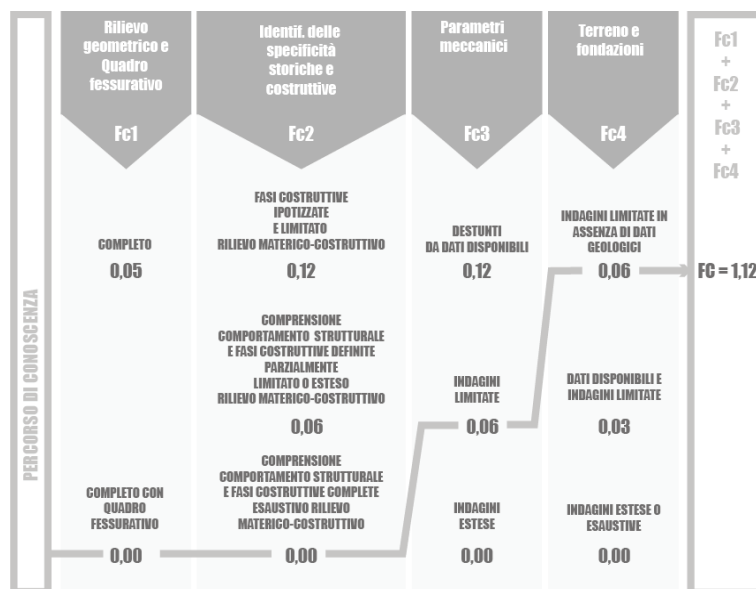
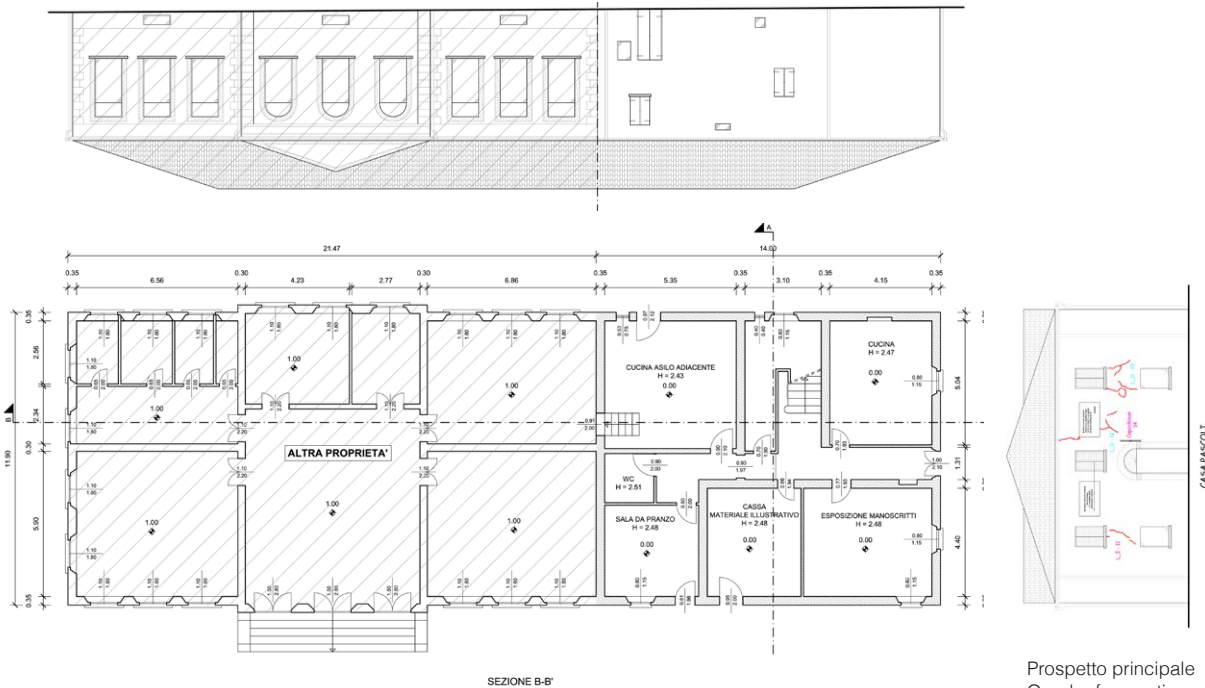
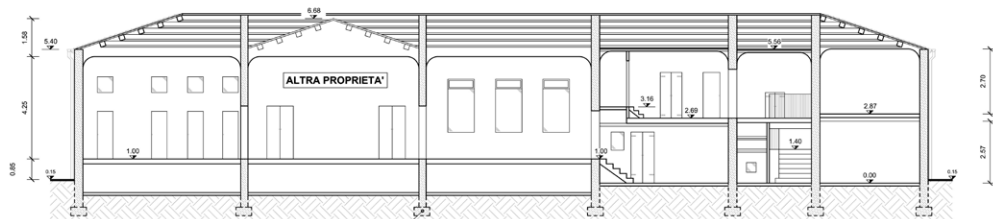


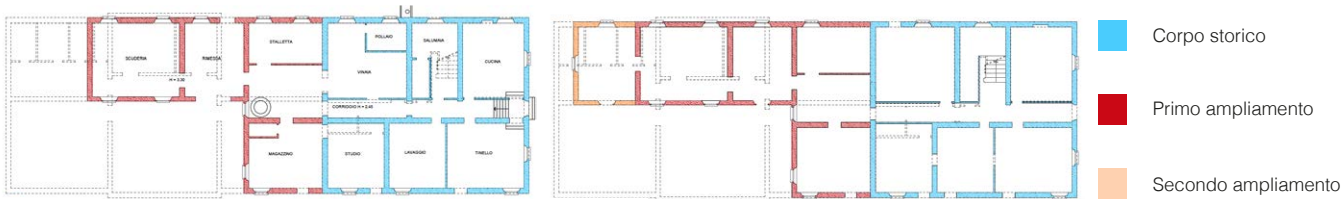
Figura 3.11 – Casa Museo di Giovanni Pascoli, definizione del Fattore di Confidenza



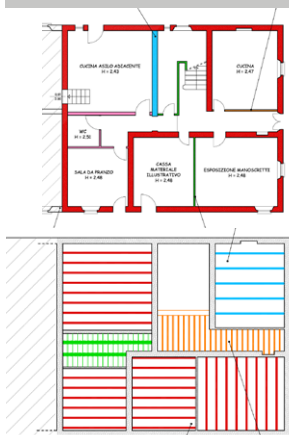
Prospetto principale
Quadro fessurativo



1. Rilievo geometrico 0 10m



2. Fasi costruttive



	"A"	Muratura portante a 2 teste in mattoni pieni sp. 35 cm
	"B"	Muratura portante in blocchi di laterizio forati sp. 10 cm
	"C"	Muratura portante ad 1 testa in mattoni pieni sp. 15 cm
	"D"	Muratura in tavole di laterizio poste in taglio sp. 8 cm
	"E"	Muratura portante a sacco sp. 35 cm
	"LC"	Solaio con struttura in latero-cemento sp. 28 cm
	"AC"	Solaio con struttura in acciaio autoportante sp. 23 cm
	"LE"	Solaio con struttura in legno ad orditura semplice
	"LM"	Solaio con struttura in legno ad orditura mista
	"VD"	Solaio con voltine doppie in legno e cannicciato

4. Rilievo materico-costruttivo

SCHEDA DI ANALISI TIPOLOGIE MURARIE

TIPO MII

DESCRIZIONE
Muratura regolare a due teste in mattoni pieni e malta a base di calce.

DIMENSIONI
Dimensioni laterizio: 25,5 x 13 x 5,5 cm

TESSITURA
Apparecchiatura regolare
Giunti di malta spessi (> 10 mm)
Presenza di diatoni

SCHEMA GRAFICO:

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI MATERIALI

Prove di Compressione dei Laterizi

$f_{b,M}$ (MPa)	Dev. ST. (MPa)	$f_{b,N,M}$ (MPa)
8,80	1,30	5,63

$f_{b,N,M} = f_{b,M} \cdot \sigma^{\epsilon}$
 $\sigma = 0,80$ Coefficiente di forma
 $\epsilon < 0,80$ Fattore di forma

Prove di Doppio Punzonamento sulle Malte

Sp. Giunto (cm)	$f_{p,M}$ (MPa)	Dev. ST. (MPa)
10,37	1,56	0,64

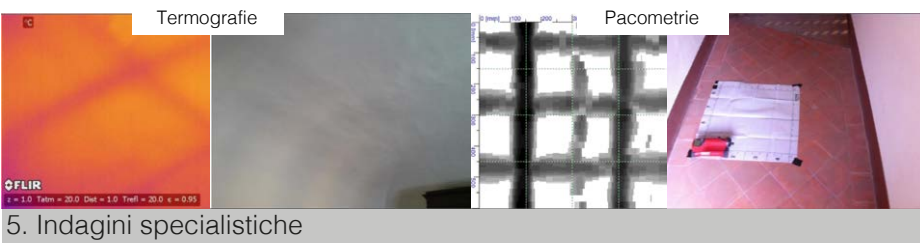
Resistenza Media a Compressione

f_M (MPa)	2,81
-------------	------

PROPRIETÀ MECCANICHE
In riferimento alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (d.m. 14 gennaio 2008), alla Circolare 2 febbraio 2009, n. 617, alle Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del Patrimonio culturale allineate alle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni, e al Decreto n.10 del 25/01/2005 - allegato 3D "Indicazioni per la valutazione delle qualità murarie"

Muratura in mattoni pieni e malta di calce

Classificazione GNDT: II	$f_m = 3,20 \text{ N/mm}^2$
Malta di cattiva qualità	$f_{m,0} = 0,07 \text{ N/mm}^2$
	$E_m = 1500 \text{ N/mm}^2$
	$G_m = 500 \text{ N/mm}^2$
	$w = 18 \text{ KN/m}^2$



5. Indagini specialistiche

P11. MUSEO ARCHEOLOGICO DI SARSINA, SARSINA (FC)

Il museo archeologico nazionale di Sarsina (FC) si trova nel centro storico della città tra la via Cesio Sabino e la via Lezoux ed è costituito da quattro corpi principali connessi da corridoi di collegamento.

Caratteristiche storiche e morfologiche

L'edificio si trova su un sito in lieve pendio, e si configura come un aggregato strutturale costituito da sei unità strutturali: l'edificio originario posto sulla testata, i due corridoi di collegamento, l'edificio intercluso e i due corpi in cemento armato.

L'ingombro massimo del complesso è di 44x34 m per un totale di 1.600 mq, compresa la corte interna, distribuiti su tre livelli fuori terra con altezza alla gronda di circa 11 m.

Il palazzetto che ospitava il primo nucleo del museo (edificio di testata) risale al XIV secolo e solo nel 1890 diventa sede del museo archeologico. Negli anni '40 è annesso al museo l'edificio adibito a scuola elementare risalente ai primi anni del '900 e situato alle spalle del palazzetto a circa 10 m di distanza; a seguito dell'ampliamento è costruito il primo corpo di collegamento.

L'edificio cinquecentesco è stato oggetto di alcuni interventi di restauro post-bellici, quali la sostituzione dei solai lignei originari con solai in travetti tipo Varese.

Negli anni '60 è eseguito un nuovo ampliamento stavolta mediante la costruzione di un edificio addossato al corpo dell'ex scuola; alla stessa epoca risale la costruzione del secondo corridoio di collegamento tra il palazzo cinquecentesco e l'edificio dell'ex scuola. In un primo momento è costruito esclusivamente il piano terra, poi sopraelevato di un piano nel 1967.

L'ultimo ampliamento risale al decennio degli anni '80, nell'ambito del quale è costruito un nuovo edificio in cemento armato addossato mediante giunto tecnico.

Nel 1990 l'edificio cinquecentesco è stato interessato da interventi di miglioramento sismico che hanno previsto la sostituzione dei solai in travetti Varese con solai in latero-cemento, collegati alla struttura di elevazione mediante cordoli in c.a. ricavati in breccia nella muratura; in aggiunta sono state consolidate le fondazioni mediante l'inserimento di cordoli in cemento armato.

Riguardo la tecnica costruttiva, gli edifici più antichi (palazzo cinquecentesco ed ex scuola) sono caratterizzati da una struttura di elevazione in muratura portante di pietra grezza con solai e copertura in latero-cemento (elementi di sostituzione). L'ampliamento degli anni '60 è realizzato in muratura di mattoni pieni, rinforzata su una parete con pilastri di irrigidimento, e solai in latero-cemento. L'edificio più recente è costituito da una struttura in cemento armato.

La compresenza di più corpi di fabbrica aventi strutture differenti rappresenta un elemento di difficoltà della fase conoscitiva, con particolare riguardo alla possibilità di indagare i punti

di discontinuità. Dall'altra parte, le informazioni sulle tecniche costruttive celate dall'intonaco possono essere reperite mediante la esecuzione di indagini diagnostiche anche non distruttive.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La restituzione della geometria strutturale è conseguita mediante il controllo sistematico dei rilievi disponibili, verificando gli spessori murari, la luce di solai e volte, le altezze di interpiano, evidenziando eventuali disallineamenti in alzato, il tutto con strumentazione tradizionale.

Le lesioni sono state rilevate sistematicamente e classificate in base alla loro ampiezza con riferimento alla scala proposta da Kaminetzky¹⁸¹. Queste informazioni sono raccolte in elaborati dedicati. Alla luce di questi risultati è scelto il valore di $F_{C1}=0$.

La ricostruzione delle trasformazioni subite dai vari corpi di fabbrica è stata definita con il supporto della ricerca archivistica e bibliografica, verificando con il riscontro sul campo le informazioni delle fonti indirette. I risultati dell'analisi hanno guidato la definizione del piano di indagini specialistiche sulle murature e sugli altri elementi strutturali. La sintesi della conoscenza sulle fasi evolutive è rappresentata da planimetrie in cui le murature sono campite con colori differenti in base all'epoca di costruzione.

La fattura degli elementi costruttivi è indagata con il supporto di indagini diagnostiche non distruttive (termografie, soniche), e prove debolmente distruttive (endoscopie, stonacature) per definire la tessitura e la sezione muraria. Il giudizio qualitativo su ciascuna tipologia è espresso con riferimento alla classificazione GNDT. Sono quindi redatti elaborati complessivi che mostrano in planimetrie la distribuzione delle tessiture rilevate.

Gli orizzontamenti metallici sono indagati con prove pacometriche per appurarne l'orditura, mentre le endoscopie e le termografie sono utilizzate per indagare le volte. Sono presenti alcuni disegni di dettagli costruttivi. La scelta per questo fattore parziale ricade in $F_{C2}=0,06$.

Non sono state svolte prove per la caratterizzazione meccanica dei materiali (eccezion fatta per le prove di punzonamento malte e compressione dei laterizi e del calcestruzzo), e i valori delle murature sono stati desunti dalla tabella C.8A.2.1, con il supporto della classificazione GNDT selezionando i valori medi. Il fattore parziale per questo aspetto della conoscenza è pari a $F_{C3}=0,06$.

Riguardo infine le indagini sul terreno e le fondazioni, le informazioni sul terreno sono desunte da indagini pregresse condotte in un'area prossima al sito in cui sorge il manufatto. Il valore scelto è $F_{C4}=0,06$.

Dalla sommatoria dei fattori parziali si ottiene un fattore globale $FC=1,18$.

¹⁸¹ Kaminetzky D., *Verification of structural adequacy rehabilitation, renovation and preservation of concrete and masonry structures*, Detroit, Mi, ACI 141, 1985.

Interpretazione delle informazioni

Sono state svolte verifiche secondo i tre livelli di valutazione LV1, LV2 e LV3, considerando modelli distinti per corpo di fabbrica ovvero modelli globali che comprendono gli edifici murari da un lato e l'edificio in c.a. dall'altro. Non emergono considerazioni qualitative sulla sicurezza dell'edificio.

LV1 è eseguito utilizzando il SIVARS attraverso due modelli: il primo comprende l'edificio cinquecentesco e i due corridoi di collegamento, il secondo considera l'edificio della ex scuola.

LV2 è stato eseguito verificando la risposta al meccanismo di primo modo di delle pareti di facciata, e un meccanismo di ribaltamento di un'angolata su cui poggia il paradosso di copertura.

LV3 è stato condotto eseguendo una verifica globale utilizzando due modelli: il primo considera l'edificio come isolato; la seconda lo considera in aggregato con la costruzione adiacente. Sono utilizzati vari tipi di analisi, quali l'analisi dinamica modale, l'analisi statica non lineare mettendo a confronto diversi tipi di software.

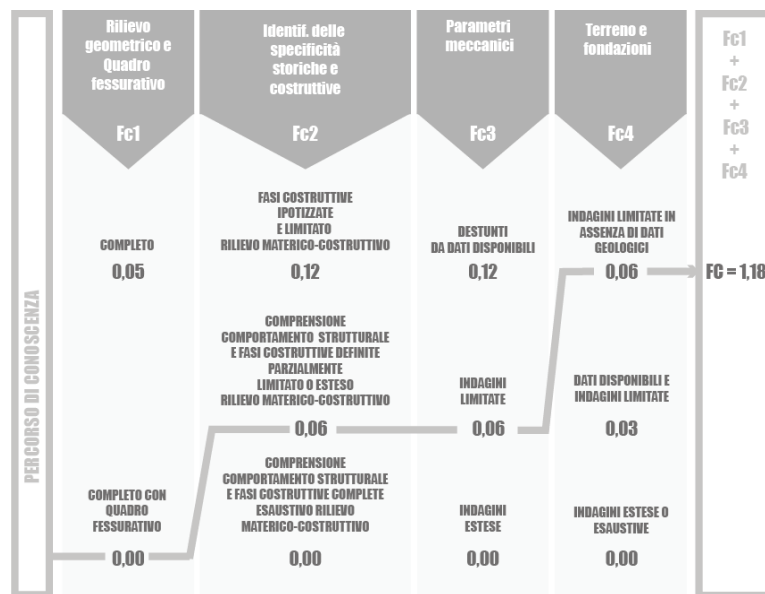
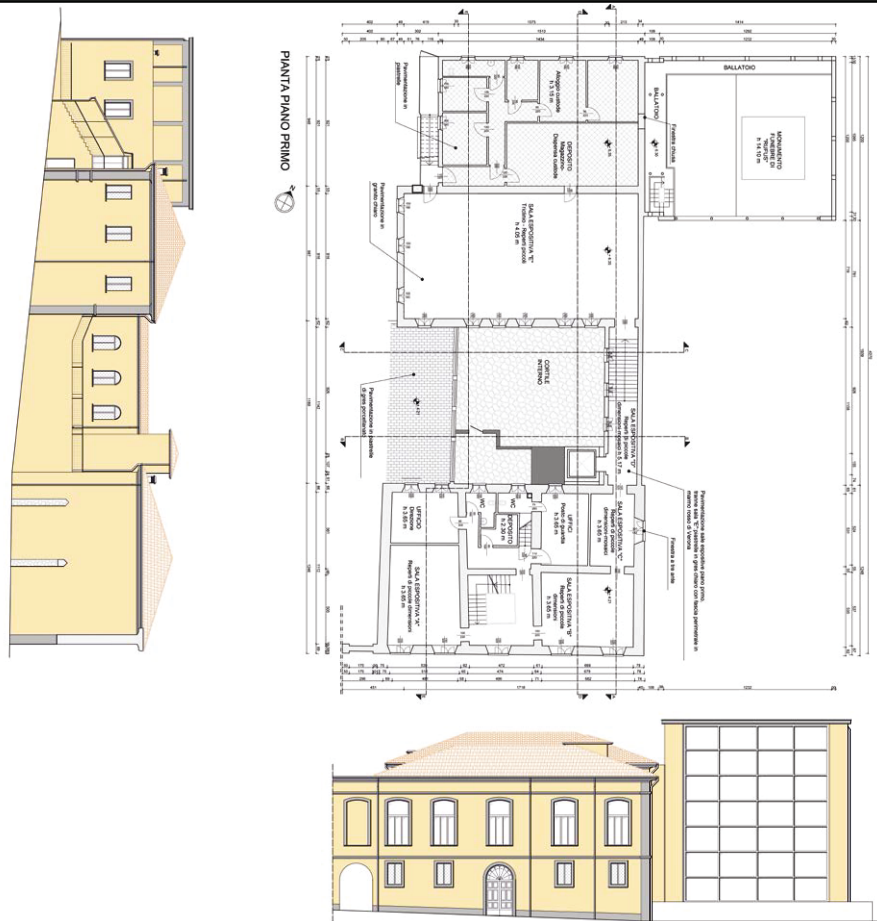


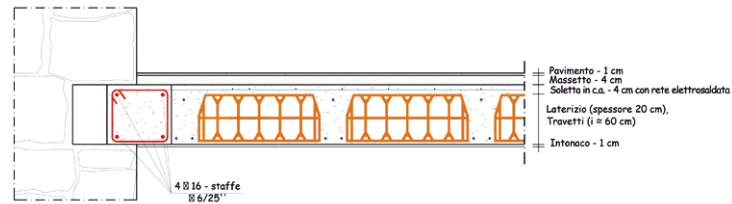
Figura 3.12 – Museo Archeologico di Sarsina, definizione del Fattore di Confidenza



- Palazzo cinquecentesco interessato da interventi di miglioramento sismico nel 1990
- Edificio dell'ex Scuola Elementare, annesso al museo archeologico alla fine degli anni '30
- Corpo di collegamento probabilmente costruito nell'ambito di interventi post-bellici (anni '40)
- Corpi di fabbrica costruiti tra il 1960 e il 1967
- Edificio in c.a. costruito nel 1986

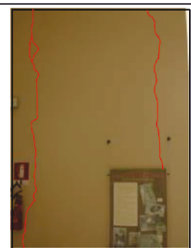
1. Rilievo geometrico 0 — 10m

2. Fasi costruttive



LEGENDA RILIEVO MATERICO - STRUTTURALE	
	PS PROVA SONICA - MURO
	EM ENDOSCOPIA - MURO
	IV INDAGINE VISIVA
	RPP Rilievo Pacometrico - PILASTRI
	RPS Rilievo Pacometrico - SOLAIO
	ES ENDOSCOPIA - SOLAIO
	SC SAGGIO DEMOLITIVO
	TP TERMOCAMERE PARETI
	TS TERMOCAMERE - SOLAI
	PM PRELIEVI CAMPIONI MALTA/MATTONI
	PC PRELIEVI CAROTE CALCESTRUZZO

L_I - 2



La lesione si è originata in corrispondenza di un'apertura tamponata appartenente alla facciata originaria dell'Antica Scuola Elementare.

Dimensioni indicative ~ 1.5 mm

Classificazione: **fessura leggera.**

3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



4. Indagini specialistiche

3.5 Ville e palazzi isolati

V1. VILLA PIGNATELLI, NAPOLI

Il complesso di Villa Pignatelli sorge lungo la Riviera Chiaia di Napoli; è un importante esempio di architettura neoclassica della città - la sua costruzione risale al 1826 – e oggi è un museo nazionale.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

La villa nasce come edificio unitario e si presenta isolato rispetto al contesto costruito. L'edificio ha un impianto quadrangolare con un corpo centrale e due bracci antistanti a formare una corte – oggi chiusa da una copertura metallica – delimitata su un lato da un doppio colonnato dorico, elemento di filtro con il giardino. A livello del piano interrato l'impianto si espande in corrispondenza delle strade adiacenti che circondano la villa, definendo una sorta di scannafosso che isola i muri perimetrali dal terreno e una scalinata che conduce a livello stradale.

La superficie di impronta a terra è pari a circa 1.300 mq (37 m x 36 m); il corpo centrale è a due elevazioni fuori terra per un'altezza alla gronda di 15 m; i due bracci hanno una elevazione di altezza pari a circa 7 m.

La configurazione originaria della villa rimane quasi del tutto immutata rispetto all'epoca della sua costruzione. Risalgono alla fine dell'Ottocento la chiusura del colonnato di ingresso e la costruzione della copertura metallica, e le modifiche distributive del piano nobile. Interventi più sostanziali vengono eseguiti a seguito della nuova destinazione d'uso museale, quali l'introduzione di un solaio metallico sopra una volta del piano terra con chiodature armate nelle murature dello stesso vano e interventi di adeguamento impiantistico con utilizzo del piano sottotetto.

In epoca recedente – anni '90 – il palazzo è interessato da interventi di miglioramento sismico mediante l'inserimento di nuovi tiranti, l'irrigidimento dei solai con solette di cemento armato, la modifica di alcuni elementi in copertura (sostituzione delle strutture spingenti con capriate e formazione del cordolo sommitale).

La storia costruttiva della villa non comprende trasformazioni di grande portata, e ciò permette il mantenimento di una certa omogeneità delle tecniche costruttive sia per la struttura di elevazione sia per gli orizzontamenti, con esigui casi di sostituzione dei solai.

La struttura interamente in muratura portante in conci squadrati di tufo, con muri caratterizzati da spessori da 100 cm al piano seminterrato, a 80 cm al piano primo, fino a 60 cm all'ultimo livello; la medesima tessitura forma gli orizzontamenti che sono volte reali di varia geometria (botte, padiglione, crociera) al piano interrato e al piano terra (qui è presente solo il solaio metallico di cui si è detto); mentre il primo piano è coperto da solai piani a doppia orditura in legno e acciaio e solai a orditura semplice in acciaio; le orditure di copertura sono capriate lignee, mentre i terrazzi calpestabili sono in acciaio.

Le informazioni sulla tecnica costruttiva non sono visibili: le pareti esterne sono interamente intonacate così come le pareti interne sono quasi tutte coperte da intonaco, stucchi, affreschi o altre decorazioni di pregio.

Il livello di difficoltà per il raggiungimento di una conoscenza adeguata della villa è soprattutto legato alla definizione attendibile del rilievo costruttivo, desumibile esclusivamente dall'analisi del materiale di archivio del progetto originario (di epoca relativamente recente e probabilmente più semplice da reperire), dallo studio della tecnica costruttiva locale (su riferimenti bibliografici o di altre architetture coeve) con il supporto di indagini diagnostiche non invasive.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale è stata definita mediante il controllo esteso del rilievo geometrico disponibile, verificando con strumentazione tradizionale spessori dei muri, luci di volte e solai, ecc.; sono state eseguite delle integrazioni anche con il supporto di una stazione totale per alcuni spazi più articolati.

Il quadro fessurativo è stato rilevato in modo sistematico e riportato in elaborati specifici (planimetrie, prospetti esterni e interni). Inoltre, per mezzo della stazione totale è stato definito un modello tridimensionale delle volte che comprende il quadro deformativo attuale.

Sulla base di questi risultati è scelto un fattore parziale pari al massimo livello di conoscenza, $F_{C1}=0$.

La storia costruttiva è delineata con il supporto di una ricerca bibliografica e archivistica. I risultati dell'analisi storico-critica permettono di comprendere l'assenza di trasformazioni sostanziali dell'impianto strutturale, rimasto quasi del tutto invariato dall'epoca della costruzione. Indagini approfondite sono eseguite sui progetti di consolidamento recenti.

Lo studio condotto sui dettagli costruttivi è finalizzato alla elaborazione di un giudizio qualitativo sugli elementi strutturali e a fornire dati sui parametri meccanici; le informazioni sono dedotte dai progetti trascorsi e da indagini specifiche eseguite principalmente sulle murature nell'ambito della verifica sismica (termografie, soniche, stonacature, endoscopie, martinetti piatti). Le prove hanno permesso di appurare la buona qualità delle connessioni tra le pareti e la buona qualità dei materiali. Non sono eseguiti disegni d'assieme o di dettaglio degli assemblaggi e negli elaborati grafici si trovano legende sintetiche riferite alle tipologie di orizzontamento (nelle piante) e alla caratterizzazione delle superfici (nei prospetti). Alla luce dei risultati raggiunti, per l'aspetto inerente "Identificazione delle specificità storiche e costruttive" è scelto un $F_{C2}=0,06$.

Sono eseguite indagini di caratterizzazione meccanica ma i dati sono comunque desunti dalla tabella C8A2.1 considerando i valori medi degli intervalli. Riguardo l'aspetto "Parametri meccanici" è dunque scelto un $F_{C3}=0,06$.

Infine, per quanto concerne le indagini su terreno e fondazioni sono eseguite una ricerca dei documenti disponibili su progetti e indagini pregresse, e una campagna di indagini geologiche e geotecniche per la realizzazione del modello di sottosuolo. Per l'aspetto "Terreno e fondazioni" è scelto un $F_{C4}=0$.

Dalla sommatoria dei succitati fattori parziali deriva il valore globale di $FC=1,12$.

Interpretazione delle informazioni

Il giudizio qualitativo sul comportamento strutturale di Villa Pignatelli proveniente dalla conoscenza del fabbricato è in generale positivo.

Sono state svolte verifiche secondo due livelli di valutazione LV1 e LV3.

LV1 è stato eseguito utilizzando il software SIVARS. I risultati di questo primo livello delineano un indice di sicurezza basso ma in linea con i risultati forniti da questo programma¹⁸². Per il secondo livello di valutazione (LV2) è eseguita la verifica del meccanismo di ribaltamento individuato nell'ala ovest. I risultati sono rilette nell'ambito di un giudizio sulla buona qualità delle murature e delle connessioni e che permette di sostenere che l'attivazione di tale meccanismo può avvenire con geometrie differenti (lesione inclinata con angolo maggiore) legate a moltiplicatori di collasso maggiori.

Le analisi LV3 sono state eseguite mediante una verifica globale pushover (modello a telaio equivalente).

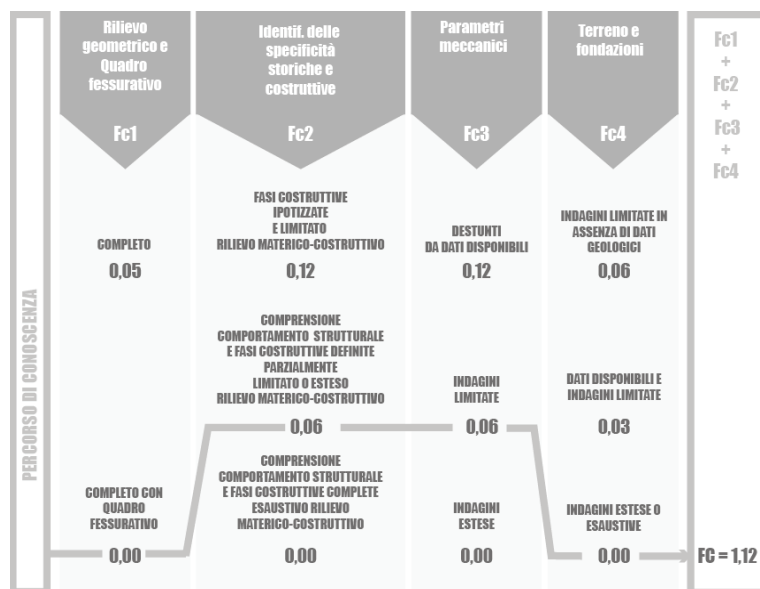
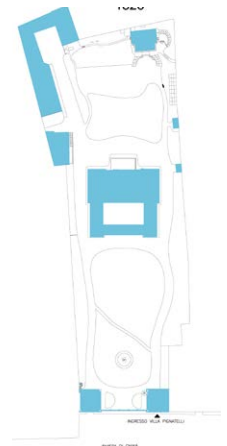
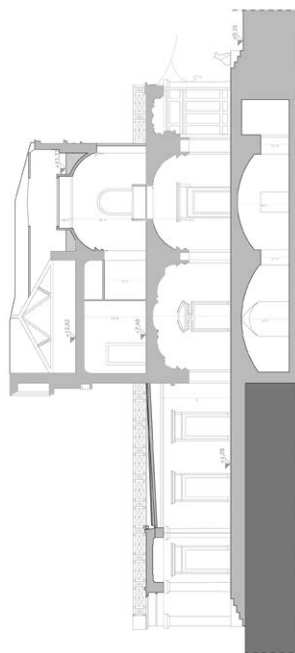
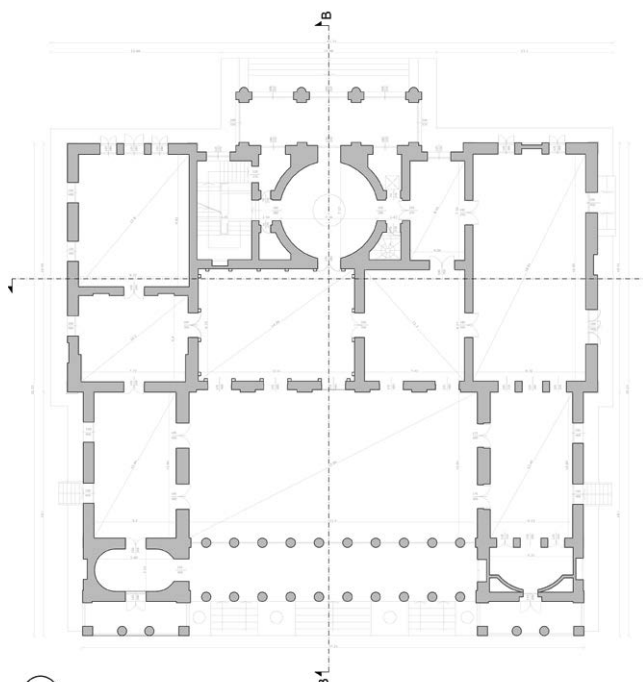
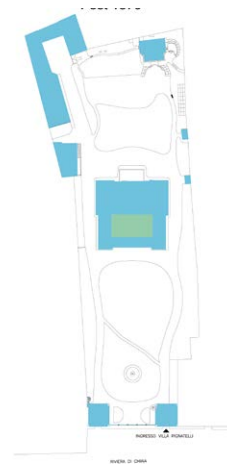


Figura 3.13 – Villa Pignatelli (NA), definizione del Fattore di Confidenza

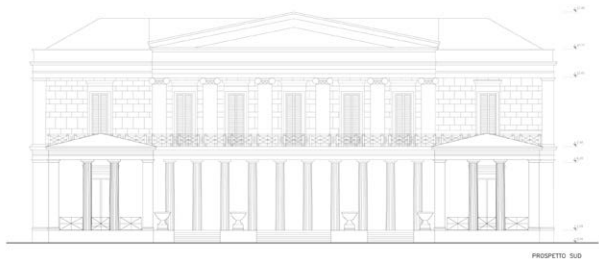
¹⁸² Il software messo a disposizione dal MiBACT nel 2014 risulta aggiornato alla OPCM 3274/2003, per cui in diversi campi della compilazione non è possibile allinearsi alla normativa del 2008 (è il caso dei parametri migliorativi delle murature, incompleti nel SIVARS). Inoltre i risultati della sperimentazione presentata in Damoni&Stocchi 2010 mette in evidenza che le analisi eseguite con il SIVARS raggiungono sempre il medesimo risultato che in media si aggira sempre intorno a un $I_s=0,35$ risultato pertanto poco attendibili.



1826



Post 1870

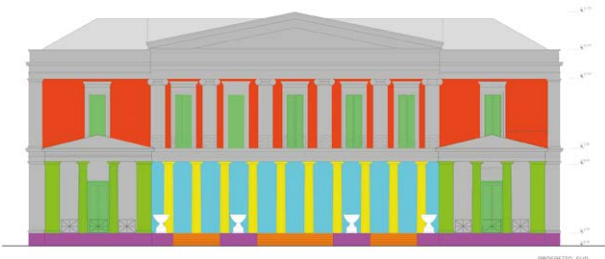
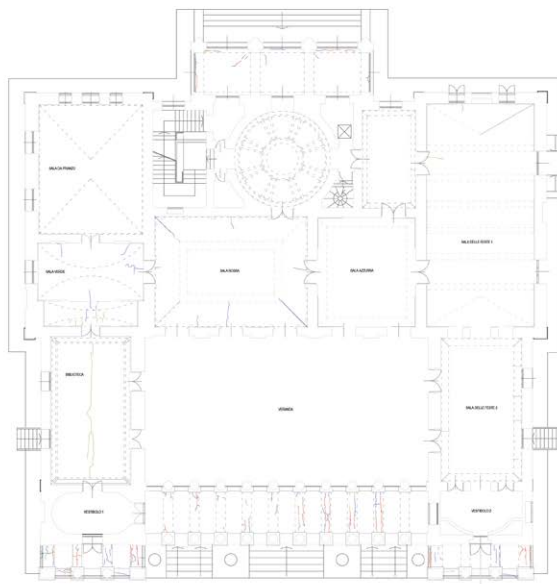
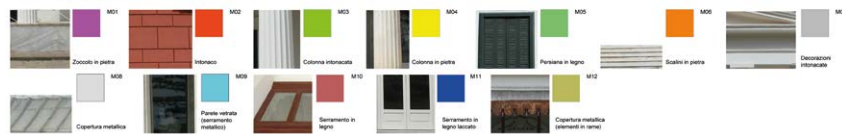


PROSPETTO SUD

1. Rilievo geometrico 0 10m

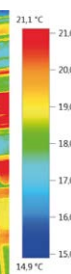
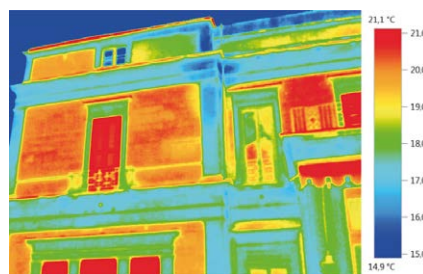
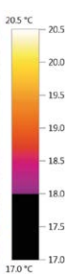
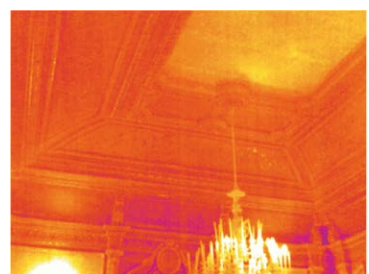
2. Fasi costruttive

LEGENDA DEI MATERIALI



PROSPETTO SUD

3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



4. Indagini specialistiche

V2. VILLA D'ESTE, TIVOLI (RM)

Villa D'Este – oggi museo nazionale e parte dei beni patrimonio dell'umanità – sorge nei pressi del centro storico di Tivoli su un pendio che si affaccia sul giardino monumentale a sud.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

La villa ha un impianto caratterizzato da irregolarità sia in pianta che in alzato, e in particolare il declivio su cui si fonda implica la costruzione di livelli seminterrati – da qui la presenza della sontuosa scalinata di accesso a rampe parallele.

Lo sviluppo planimetrico è prevalentemente longitudinale sull'asse est-ovest, con il fabbricato principale caratterizzato alla quota del secondo livello da due bracci contigui a formare il grande chiostro porticato su tre lati. L'edificio fa parte di un aggregato strutturale ed è posto in aderenza alla chiesa di Santa Maria Maggiore (dell'aggregato fa parte anche l'edificio moderno del Convitto Nazionale, probabilmente separato da giunto tecnico).

La superficie di impronta a terra della villa è pari a circa 1667 mq; il corpo principale consta di un livello seminterrato e di due elevazioni fuori terra, per un'altezza alla gronda di 16 m; sul lato est l'edificio è caratterizzato da 3 piani seminterrati e uno fuori terra per un'altezza alla gronda di circa 11 m.

L'assetto attuale della villa è frutto di una storia costruttiva articolata, che ha inizio nella seconda metà del XI secolo. In quell'epoca il sito è occupato da un monastero benedettino annesso a Santa Maria Maggiore, di seguito occupato dai francescani che operano un ampliamento della struttura. A partire dalla seconda metà del XV secolo l'edificio diviene una residenza per i governatori. Al 1555 appartiene il primo progetto di Pirro Ligorio che mira alla costruzione di un edificio unitario sull'impianto delle preesistenze (palazzo del Comune e convento francescano). Il palazzo è completato – con buone probabilità – circa 20 anni dopo. I primi restauri avvengono nel corso del XIX secolo. Nel corso dei bombardamenti del 1944 la villa viene colpita ed è distrutta l'ala nord-est, ricostruita nel corso del restauro post-bellico.

Gli interventi più recenti di cui si ha notizia riguardano il consolidamento di alcune porzioni murarie avvenuto negli anni Sessanta e l'ultimo progetto di restauro dei primi anni del XXI secolo.

L'impianto attuale della villa è dunque rimasto sostanzialmente immutato dalla seconda metà del XIV secolo poiché la destinazione d'uso è rimasta quella residenziale. Tuttavia, è importante sottolineare che l'edificio nasce dalla rifusione di edifici murari preesistenti per cui è ammissibile la presenza di vari tipi murari ovvero discontinuità costruttive. Le cellule murarie non hanno un passo costante e in varie occasioni sono caratterizzate da luci ampie (circa 14 m).

Il complesso architettonico è caratterizzato da una struttura in gran parte di muratura portante (si esclude il blocco dei servizi in c.a.) costituita da varie tessiture murarie in base agli

elementi costituenti (ciottoli di fiume, blocchi squadrati, ...); i muri hanno spessori da 100 cm ai piani seminterrati, a 80 cm al piano primo, fino a 60 cm all'ultimo livello.

Gli orizzontamenti sono volte reali di varia geometria (prevalentemente a padiglione e a schifo) ai piani seminterrati sono di pietra o di mattoni e alcune sono interessate da interventi di consolidamento con cappe di c.a.; alla quota del chiostro sono presenti solai piani spesso coperti da un cassettonato ligneo, e volte reali in pietra o mattoni; le orditure di copertura sono travi lignee o capriate.

Le informazioni sulla tecnica costruttiva non sono spesso celate dall'intonaco stucchi, affreschi o altre decorazioni di pregio o da controsoffitti.

Il livello di difficoltà per il raggiungimento di una conoscenza adeguata della villa è legato soprattutto alla definizione di un attendibile rilievo geometrico-costruttivo, resa impegnativa dalle ingenti dimensioni della villa e dalla possibilità di indagare a fondo le preesistenze e le caratteristiche costruttive. Indagini non invasive e una lettura attenta dell'impianto strutturale possono essere un utile supporto alla formulazione di ipotesi su questi aspetti.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale è stata definita mediante il controllo a campione del rilievo geometrico disponibile, verificando con strumentazione tradizionale spessori dei muri, luci di volte e solai, ecc.; sono state eseguite delle integrazioni anche con il supporto di una stazione totale per alcuni spazi più articolati. Tuttavia, l'edificio di Villa d'Este si presenta in aggregato con altri edifici (chiesa e convitto) ma ciò non si evince dalle elaborazioni grafiche in cui non sono indagati i punti di accostamento.

Il quadro fessurativo è stato rilevato in modo sistematico e riportato in elaborati specifici (planimetrie, prospetti esterni e interni).

Sulla base di questi risultati è scelto un fattore parziale pari al massimo livello di conoscenza, $F_{C1}=0$.

La storia costruttiva è delineata con il supporto di una ricerca bibliografica e archivistica. I risultati dell'analisi storico-critica permettono di comprendere le trasformazioni dell'impianto strutturale, rimasto quasi del tutto invariato dall'epoca della definizione della villa. Indagini approfondite sono eseguite sui progetti di consolidamento recenti. Le informazioni sono riassunte in grafici bidimensionali molto schematici.

Lo studio dei dettagli costruttivi è finalizzato alla elaborazione di un giudizio qualitativo sugli elementi strutturali e alla definizione dei parametri meccanici; le informazioni sono dedotte da indagini non distruttive eseguite su murature e orizzontamenti (termografie). Le prove hanno permesso di individuare le discontinuità nell'organismo e le tecniche costruttive degli elementi strutturali. Non sono eseguiti disegni d'assieme o di dettaglio degli assemblaggi e negli elaborati

grafici si trovano legende sintetiche riferite alle tipologie di murature e di orizzontamento (nelle piante e negli alzati). Alla luce dei risultati raggiunti in questa fase di analisi è scelto un $F_{C2}=0$.

Non sono eseguite indagini di caratterizzazione meccanica e i dati sono desunti dalla tabella C8A2.1 considerando i valori medi degli intervalli. È scelto un $F_{C3}=0,12$.

Infine, per quanto concerne il quarto aspetto della conoscenza – terreno e fondazioni – sono eseguite una ricerca dei documenti disponibili su progetti e indagini pregresse. È così ottenuto un $F_{C4}=0,03$.

Dalla sommatoria dei succitati fattori parziali deriva il valore globale di $FC=1,15$.

Interpretazione delle informazioni

Il giudizio qualitativo proveniente dalla conoscenza del fabbricato è nel complesso positivo. Non sono sottolineate particolari situazioni di precarietà strutturali.

Sono state svolte verifiche secondo due livelli di valutazione, LV1 e LV2, e alcune verifiche specifiche sulle strutture sostruttive.

LV1 è eseguito utilizzando un software ideato dal gruppo di ricerca, dal quale sono desunti anche i dati per la compilazione dei moduli richiesti dal SIVARS.

Per la verifica LV2 sono stati individuati sei corpi di fabbrica (CF) strettamente legati alla storia costruttiva dell'edificio e per ognuno di essi sono verificati i principali meccanismi di collasso; tuttavia non sono chiare le valutazioni relative alle interazioni con gli edifici di grande dimensioni adiacenti al complesso.

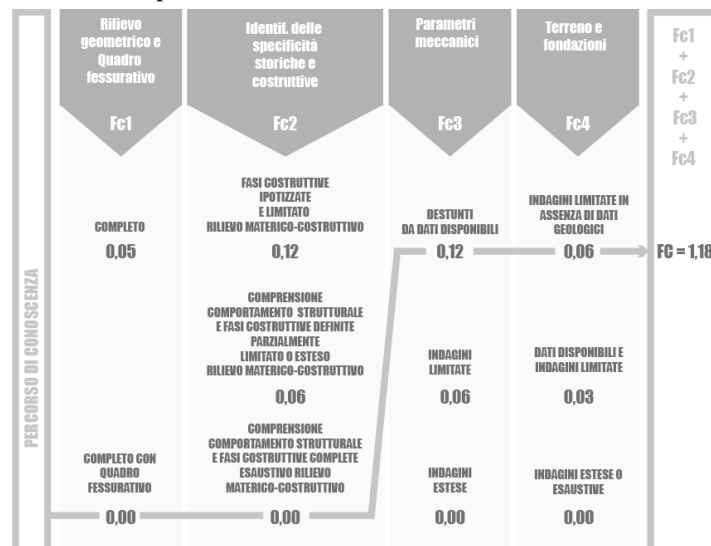
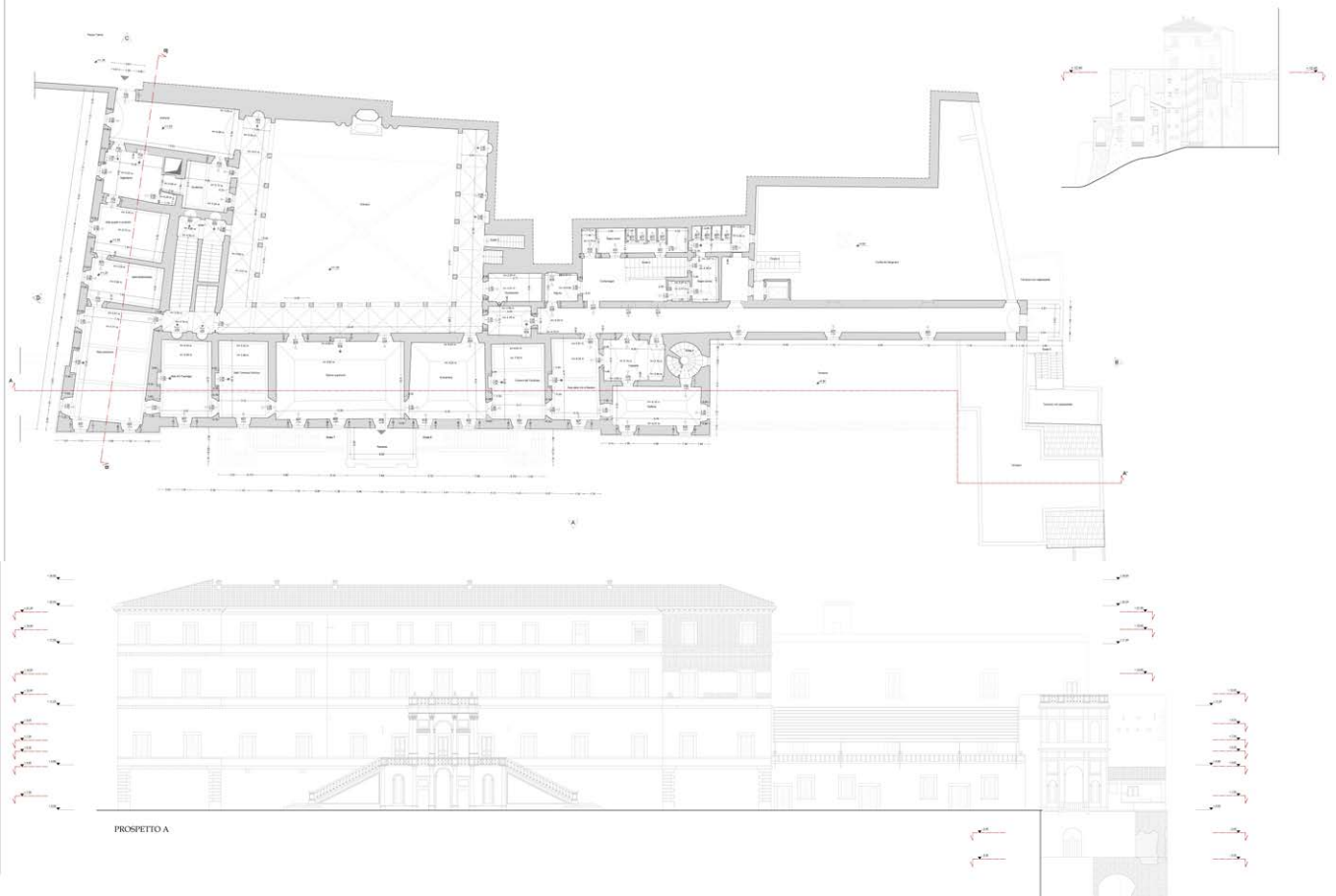
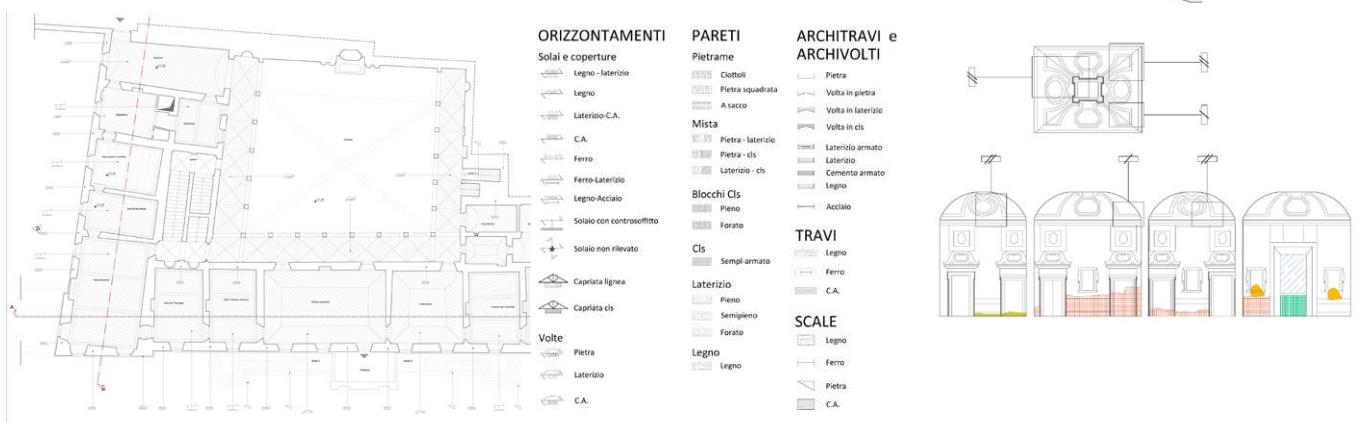


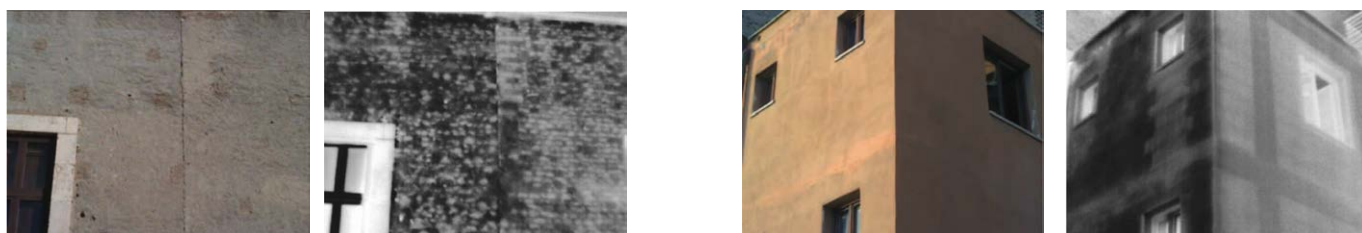
Figura 3.14 – Villa D'Este a Tivoli (RM), definizione del Fattore di Confidenza



1. Rilievo geometrico



4. Rilievo materico-costruttivo e dello stato di conservazione



3. Indagini specialistiche

V3. PALAZZO DEL REAL MUSEO, NAPOLI

Il Palazzo del Real Museo di Napoli sorge nel centro storico della città, al margine del Rione Sanità, e dal 1860 è divenuto Museo Nazionale e ospita una delle più importanti collezioni al mondo di reperti archeologici di epoca romana.

Caratteristiche storiche e morfologiche

L'edificio ha un impianto di forma rettangolare allungata con due corti interne separate da un corpo centrale, individuato in facciata da una campata più alta; sorge su un sito in forte pendenza, il cui dislivello di circa 7 m, sul fronte principale sud-est, è superato da una grande rampa di raccordo con la piazza omonima. La superficie di impronta a terra è di circa 9.100 mq, con il lato maggiore di dimensioni pari a circa 140 m e lato minore pari a 65 m; in alzato si sviluppa su tre livelli fuori terra per un'altezza media alla gronda pari a circa 20 m; inoltre, la pendenza del sito in direzione est-ovest consente la formazione di due piani seminterrato nel corpo orientale. La maglia muraria al piano terra e al piano primo è compatta nelle due direzioni trasversale e longitudinale ed è caratterizzata da cellule rettangolari o quadrate attorno alle due corti sulle quali si aprono con un portico a piano terra; fa eccezione il corpo centrale interamente scandito da pilastri al piano terra e al piano primo e secondo dal grande ambiente a doppia altezza del Salone della Meridiana (circa 58x20 m in pianta per 20 m di altezza). Al piano secondo la maglia è più diradata e costituita da cellule più ampie.

L'edificio è frutto di una lunga storia costruttiva - iniziata nel 1585 e protrattasi per circa tre secoli - che prende le mosse dalla costruzione della Real Cavallerizza, di cui oggi rimangono le fondazioni discontinue su pilastri e volte a vela e l'ingresso sul lato corto a sud-ovest (Via degli Scalzi). Nel 1612 all'architetto Giulio Cesare Fontana è affidato il progetto di ampliamento delle strutture abbandonate della Real Cavallerizza per la realizzazione del Palazzo dei Regi Studi. Il rinnovato impianto comprende il piano terra del corpo occidentale e il corpo centrale sui livelli. La costruzione dell'ala orientale del palazzo è avviata intorno alla metà del Settecento, sotto Ferdinando IV di Borbone, che destina il palazzo a sede del Real Museo e della Real Biblioteca, trasferendo l'Università in altra sede e dislocando la collezione farnesiana nel Museo di Capodimonte. L'impianto è quindi costituito dal corpo occidentale a corte a un livello, il corpo centrale a due livelli e il corpo orientale a un livello costituito dal solo angolo nord-est. Alla fine del XVIII secolo i due corpi laterali sono sopraelevati di un livello, mantenendo il corpo centrale più alto. Il cortile occidentale è completato solo nei primi anni dell'Ottocento con la costruzione dell'angolo nord-est a due elevazioni. Dopo l'Unità d'Italia il complesso diventa di proprietà dello Stato e il Real Museo Borbonico assume nuova denominazione di "Museo Nazionale". Tra il 1927 e il 1937 sono completati gli edifici della Vanella posti in aderenza sul lato nord-ovest.

In epoca più recente (1961 – 1993) il palazzo è interessato da alcuni interventi strutturali di sostituzione delle coperture lignee con orditure metalliche e interventi di adeguamento funzionale del museo, quali nuovi vani scala e ascensori. Tra il 1993 e il 2008 sono eseguiti importanti interventi

strutturali quali: consolidamento delle volte tra piano terra e primo piano della sala degli affreschi (fronte sud-ovest a destra del corpo centrale) mediante posa in opera di tiranti inclinati fissati a un cordolo di bordo in c.a. con una leggera pretensione operata con resine epossidiche; inserimento di tiranti metallici, consolidamento diffuso delle piattabande mediante iniezioni armate e apertura di nuovi vani con architravi in acciaio. Al piano seminterrato, sul lato ovest, si rileva inoltre l'inserimento di archi in cemento armato per il consolidamento delle fondazioni.

Nonostante la realizzazione in fasi costruttive anche molto distanti cronologicamente, l'edificio conserva una sostanziale omogeneità della tecnica costruttiva soprattutto per quanto concerne la struttura di elevazione. Le murature sono in conci di tufo squadriati con un paramento esterno di vario spessore in mattoni pieni (ampliamento di Fontana), ovvero in conci di tufo sbozzati, con spessori che vanno dai 2 m al piano seminterrato ai 90 cm dei livelli primo e secondo. Gli orizzontamenti sono in gran parte volte in muratura di tufo giallo napoletano con varia geometria (a botte, a crociera, a padiglione); al secondo livello sono presenti in maggioranza solai piani di controsoffitto in putrelle e voltine o in acciaio. Le coperture sono costituite da capriate metalliche a eccezione della Sala della Meridiana (corpo centrale) in capriate lignee.

Il livello di difficoltà per il raggiungimento di una conoscenza adeguata del palazzo del Real Museo è soprattutto legato alle dimensioni dell'edificio e alla mancata visibilità delle informazioni sulla tecnica costruttiva, spesso celate da intonaci, affreschi o decorazioni a stucco. A vantaggio di una buona conoscenza giocano un ruolo di rilievo le fonti documentarie disponibili sul palazzo sia sulle fasi storiche sia sui progetti recenti.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale è stata definita mediante il controllo a campione del rilievo geometrico disponibile verificando spessori dei muri, luci di volte e solai, ecc., ed eseguendo le integrazioni necessarie con strumentazione tradizionale. Il quadro fessurativo è stato rilevato in modo sistematico e riportato in elaborati specifici (tutte le planimetrie e quattro sezioni) dove è definita l'entità della lesione (passante, non passante). Sulla base di questi risultati per l'aspetto "Rilievo geometrico" è scelto un fattore parziale pari a $F_{CI}=0$.

La storia costruttiva è delineata con il supporto di una ricerca bibliografica e archivistica con particolare riguardo agli interventi più recenti. I risultati dell'analisi storico-critica sono sintetizzate in planimetrie specifiche che individuano le trasformazioni sull'impianto strutturale attuale mediante campiture differenti. È inoltre approntato uno schema volumetrico che illustra i vari ampliamenti.

Lo studio condotto sui dettagli costruttivi è finalizzato alla elaborazione di un giudizio qualitativo sugli elementi strutturali ed è svolto mediante rilievo visivo e indagini non distruttive (soniche, termografie, endoscopie), in parte già disponibili da studi pregressi. Le tipologie murarie e gli orizzontamenti sono descritti attraverso schede predefinite, con disegni-tipo di prospetti e sezioni murarie, spessori di volte, ecc. Non sono eseguiti disegni d'insieme o di dettaglio degli assemblaggi e

negli elaborati grafici si trovano legende sintetiche per la localizzazione delle varie tipologie di orizzontamento e di murature. Alla luce dei risultati raggiunti in questa fase di analisi è scelto un $F_{C2}=0,06$.

Riguardo l'aspetto "Parametri meccanici" sono disponibili indagini pregresse di caratterizzazione dei materiali, ma i dati sono desunti dalla tabella C8A2.1 (sono scelti i valori minimi della tabella per tener conto della vetustà ed eterogeneità dei materiali). Sulla base delle indagini svolte (termografie, soniche, ecc.) è scelto il fattore parziale $F_{C3}=0,06$.

Infine, per quanto concerne l'aspetto "Terreno e fondazioni" i dati sono desunti dalla fonti documentarie per cui è scelto un $F_{C4}=0,06$.

Dalla sommatoria dei succitati fattori parziali deriva il valore globale di $FC=1,18$.

Interpretazione delle informazioni

Sono state svolte verifiche secondo i tre livelli di valutazione LV1, LV2 e LV3. Le verifiche secondo LV1 sono svolte con un modello a telaio equivalente. Da queste una maggiore vulnerabilità dell'edificio in direzione trasversale (Y).

Per il secondo livello di valutazione (LV2) è eseguita la verifica a ribaltamento fuori piano (semplice) di tutte le pareti perimetrali considerandole prive di vincoli. In particolare, per le pareti nord-est delle due corti l'attivazione di un ribaltamento fuori piano è denunciata dal quadro fessurativo osservato.

Le analisi LV3 sono eseguite mediante una verifica globale push-over (modello a telaio equivalente), da cui emerge una maggiore vulnerabilità nei confronti di meccanismi locali e rispetto alla risposta globale.

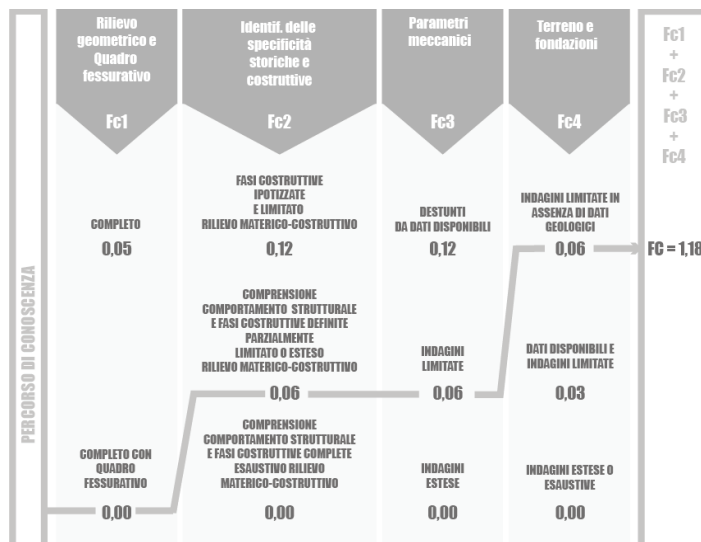
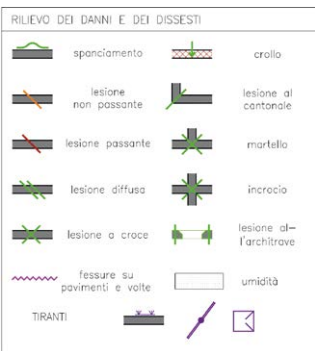
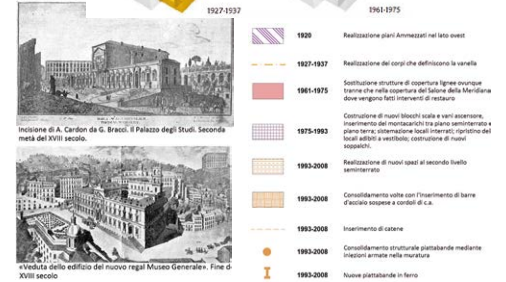
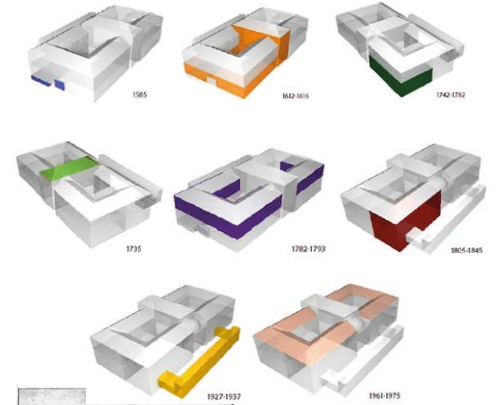
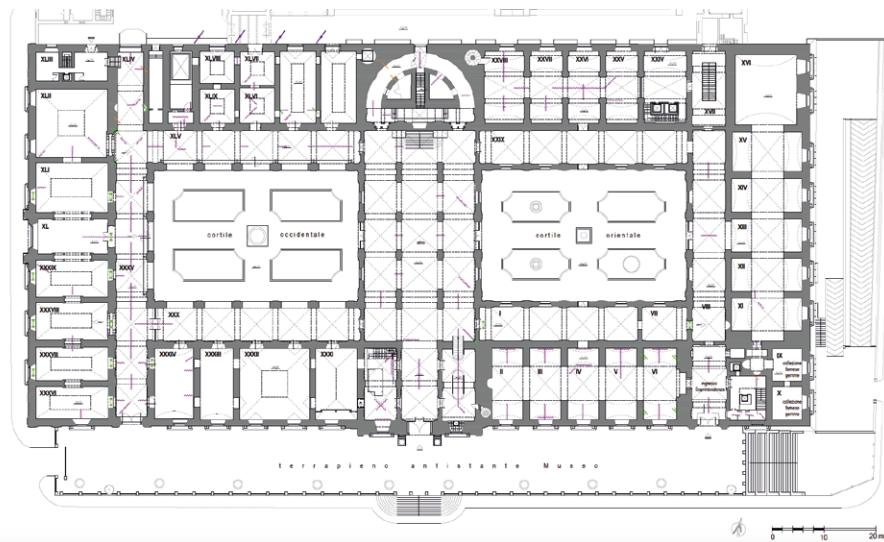
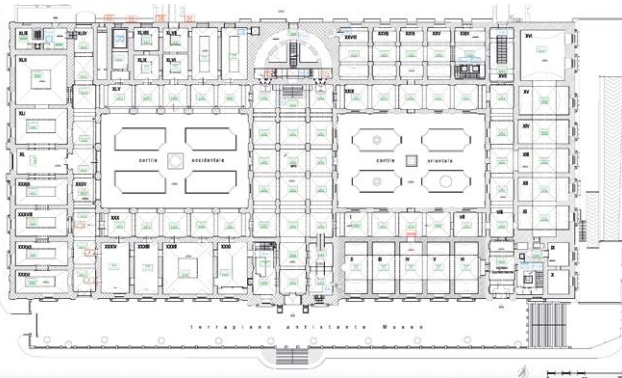


Figura 3.15 - Palazzo del Real Museo (NA), definizione del Fattore di Confidenza

V3 - PALAZZO DEL REAL MUSEO, NAPOLI - Sintesi elaborati della fase conoscitiva



1. Rilievo geometrico / 0 10m

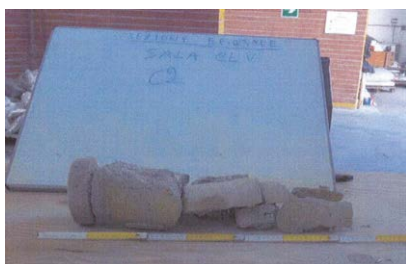


ELEMENTI COSTRUTTIVI			
Materiale:	La pietra	Il mattone	Il ferro
La muratura:	Il muratura a conci di tufo giallo	Il muratura a sacco	Il muratura in tufo con paramento esterno in mattoni
Il tipo:	Il tipo di tufo	Il tipo di mattoni	Il tipo di ferro
Il tipo di conservazione e qualità:	Il tipo di conservazione	Il tipo di qualità	Il tipo di ferro
POSIZIONE DEGLI ELEMENTI			
Il tipo di posizione:	Il tipo di posizione	Il tipo di posizione	Il tipo di posizione
RICORDI DI LISTATE			
Il tipo di ricordo:	Il tipo di ricordo	Il tipo di ricordo	Il tipo di ricordo
SEZIONE TRASVERSALE			
Il tipo di sezione:	Il tipo di sezione	Il tipo di sezione	Il tipo di sezione
COLLEGAMENTI TRA LE PARTI STRUTTURE			
Il tipo di collegamento:	Il tipo di collegamento	Il tipo di collegamento	Il tipo di collegamento
ELEMENTI COSTRUTTIVI			
Il tipo di elemento:	Il tipo di elemento	Il tipo di elemento	Il tipo di elemento
SEZIONI			
Il tipo di sezione:	Il tipo di sezione	Il tipo di sezione	Il tipo di sezione

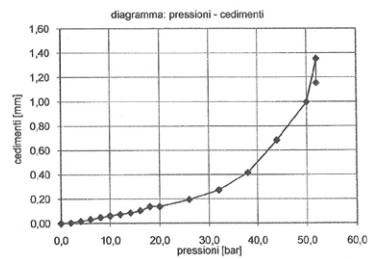
2. Fasi costruttive

RILEVIO MATERICO-STRUTTURALE	
Strutture portanti verticali	Soppalco in acciaio
Muratura piena a conci di tufo giallo	Soppalco latero-cementizio
Muratura a sacco a conci di tufo giallo	Volta in spessore
Muratura in tufo con paramento esterno in mattoni	Volta in foglio
Muratura in tufo consolidata con iniezioni non armata in malta cementizia	Volta alleggerita e collegata ai cordoli in c.a. armato a rete elettrosaldata
Muratura in blocchi di laterizio	Volta ad incannucciata
Muratura a blocchi lapidei squadrati	Copertura lignea a falde inclinate
Muratura in mattoni pieni	Copertura lignea a capriate
Muratura in blocchi di c.a. o argilla espansa	Copertura in c.a. a falde inclinate
Pilastro in c.a.	Copertura in acciaio
Setto in c.a.	Scale e ascensori
Pilastro in acciaio	Scala in legno
Strutture orizzontali	Scala su volta a botte
Trave in c.a.	Scala su volta a crociera
Cordolo in c.a.	Scala su arco rampante
Trave in acciaio	Scala in c.a.
Arco in muratura	Scala in acciaio
Arco in c.a.	Scala in pietra
Architrave in legno	Nucleo ascensore in c.a.
Architrave/piattabanda in pietra	Nucleo ascensore in acciaio
Architrave/piattabanda in laterizio	Consolidamenti e criticità
Architrave in c.a.	Catena
Architrave in acciaio	Cucitura armata
Orizzontamenti	Canna fumaria
Solaio in legno	Cavedi impianti
Solaio in putrelle e tavelloni	Architrave consolidato con iniezioni a quincunce armate
Solaio in putrelle e volte	

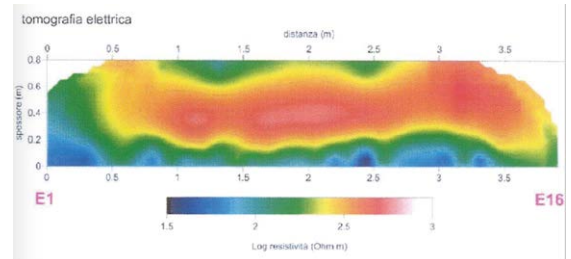
3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



Prova di carotaggio



Martinetto (diagramma pressioni - cedimento)



Tomografia elettrica

4. Indagini specialistiche

V4. REGGIA DI CAPODIMONTE, NAPOLI

La Reggia di Capodimonte è una delle dimore storiche della casa reale dei Borbone e sorge all'interno dell'omonimo bosco a nord centro storico di Napoli. Dal 1957 è divenuta Museo Nazionale che raccoglie in gran parte dipinti rinascimentali e contemporanei.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

L'edificio ha un impianto di forma rettangolare allungata con tre corti interne quadrate e ali esterne aggettanti sui lati lunghi. La superficie di impronta a terra è di circa 11.800 mq, con il lato maggiore di dimensioni pari a circa 160 m e lato minore pari a 60 m (le ali estreme sporgono di circa 20 m in direzione trasversale); in alzato si sviluppa su quattro livelli fuori terra e un ammezzato per un'altezza media alla gronda pari a circa 26 m. Il sito pianeggiante favorisce la definizione di un unico piano di fondazione su cui si impostano pilastri e volte che costituiscono le strutture fondali della reggia. La maglia muraria al piano terra e al piano ammezzato è caratterizzata da cellule di forma pressoché quadrata che costituiscono il perimetro esterno dell'edificio; procedendo verso l'interno, la maglia si dirada nei pilastri dei portici che circondano le tre corti. Al piano primo le cellule murarie assumono varie dimensioni che vanno da 5m x 6m, ai 16m x 16m delle due sale agli angoli nord-est e sud-est (a doppia altezza) fino ai 30 m x 12 m delle due sale che si affacciano sulla corte centrale (di cui una, il Salone delle Feste, a doppia altezza). Al piano secondo la scansione è analoga, ma aumentano le dimensioni minime della cellula, doppie rispetto a quelle sottostanti.

La Reggia di Capodimonte è stata concepita con un progetto unitario nel 1738 dall'ingegnere Giovanni Antonio Medrano durante il regno di Carlo di Borbone, ma la sua costruzione avviene per tre fasi nell'arco di circa un secolo. La prima porzione costruita interamente è il nucleo attorno al cortile meridionale; a causa di problemi fondali, e i lavori sono sospesi. La prosecuzione della costruzione è avviata intorno alla metà del Settecento sotto Ferdinando IV di Borbone, che trasferisce nella reggia la collezione farnesiana. L'impianto è quindi costituito dal corpo meridionale a corte a tre livelli, il corpo centrale a due livelli e il perimetro del corpo settentrionale a una sola elevazione. Nella prima metà del XIX secolo (1830-1840) l'edificio è completo anche dei due collegamenti verticali monumentali della Scala Esagonale sul lato breve sud e lo scalone monumentale sul lato opposto. Dopo l'Unità d'Italia il complesso diventa di proprietà dello Stato, conservando la destinazione d'uso residenziale. Nel 1920 diventa di proprietà demaniale, ma solo nel 1948 la reggia è destinata a Pinacoteca Nazionale. La nuova destinazione d'uso museale implica lavori di adeguamento strutturale e funzionale che sono eseguiti tra il 1952 e il 1957. Gli interventi consistono in demolizione di pareti per la creazione di nuovi spazi espositivi; sostituzione delle orditure lignee di copertura con elementi in cemento armato o in c.a.p. (inserimento di pilastri in c.a. a sostegno delle coperture); realizzazione di nuovi solai in c.a.; prolungamento fino al piano secondo dello scalone monumentale con struttura in cemento armato dissimulata da finiture in stile. Tra gli interventi di adattamento funzionale è eseguito il frazionamento del piano secondo in piccoli appartamenti per i dipendenti. Nell'ultimo ventennio del Novecento, con i fondi FIO 1985-1986, sono realizzati degli interventi per sanare il danno subito a seguito del terremoto del 1980 (oltre che per adeguamento funzionale e impiantistico), quali:

consolidamento diffuso delle piattabande mediante iniezioni armate e cementazioni armate delle lesioni esistenti; cementazione delle murature d'angolo della scala esagonale; cerchiature dei vani porta. Inoltre sono realizzati: nuovi vani espositivi a doppia altezza mediante la demolizione di murature e costruzione di passerelle metalliche; una sala interrata (Sala Causa) posta sotto il cortile meridionale che implica il consolidamento dello scavo mediante una paratia di micropali

L'edificio conserva una sostanziale omogeneità della tecnica costruttiva per quanto concerne la struttura di elevazione. Le murature sono in conci di tufo squadrati con spessori che vanno dai 240 cm al piano terra ai 140 cm (massimo) del piano sottotetto. Fa eccezione la struttura di pilastri in c.a. che sorreggono parte della copertura impostati sulle murature del piano secondo. Gli orizzontamenti sono in gran parte volte in muratura di tufo giallo napoletano con varia geometria (a botte, a crociera, a padiglione, a vela), ma sono presenti anche solai piani in l.c. sopra le volte, o in putrelle e tavelloni. Le coperture sono costituite da capriate in c.a. o in c.a.p., introdotti negli anni '50, come detto poc'anzi.

Il livello di difficoltà per il raggiungimento di una conoscenza adeguata del palazzo della reggia di Capodimonte è legato alle dimensioni dell'edificio e alla mancata visibilità delle informazioni sulla tecnica costruttiva, spesso celate da intonaci, affreschi o decorazioni a stucco, e degli interventi di consolidamento recenti. A vantaggio di una buona conoscenza giocano un ruolo di rilievo le fonti documentarie disponibili sul palazzo sia sulle fasi storiche sia sui progetti recenti.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale è stata definita mediante il controllo a campione del rilievo geometrico disponibile verificando spessori dei muri, luci di volte e solai, ecc., ed eseguendo le integrazioni necessarie con strumentazione tradizionale. Il quadro fessurativo è stato rilevato in modo sistematico e riportato in elaborati specifici (tutte le planimetrie) dove è definita l'entità della lesione (passante, non passante). Cinque pareti del palazzo reale sono rappresentate anche in sezione per illustrare le lesioni che si sviluppano ai vari livelli. Sulla base di questi risultati per l'aspetto "Rilievo geometrico" è scelto un fattore parziale pari a $F_{C1}=0$.

La storia costruttiva è delineata con il supporto di una ricerca bibliografica e archivistica con particolare riguardo agli interventi più recenti. I risultati dell'analisi storico-critica sono sintetizzate in planimetrie specifiche che individuano le trasformazioni sull'impianto strutturale attuale mediante campiture differenti. È inoltre approntato uno schema volumetrico che illustra i vari ampliamenti.

Lo studio condotto sui dettagli costruttivi è finalizzato alla elaborazione di un giudizio qualitativo sugli elementi strutturali ed è svolto mediante rilievo visivo e indagini non distruttive (soniche, termografie, endoscopie), in parte già disponibili da studi pregressi. Le tipologie murarie e gli orizzontamenti sono descritte attraverso schede predefinite, con disegni-tipo di prospetti e sezioni murarie, spessori di volte, ecc. Non sono eseguiti disegni d'assieme o di dettaglio degli assemblaggi e negli elaborati grafici si trovano legende sintetiche per la localizzazione delle varie tipologie di orizzontamento e di murature. Alla luce dei risultati raggiunti in questa fase di analisi è scelto un $F_{C2}=0,06$.

Riguardo l'aspetto "Parametri meccanici" sono disponibili indagini pregresse di caratterizzazione dei materiali, ma i dati sono desunti dalla tabella C8A2.1: sono scelti i valori medi della tabella per tener conto della buona qualità delle murature risultate aderenti alla "regola dell'arte". Sulla base delle indagini svolte (termografie, soniche, ecc.) è scelto il fattore parziale $F_{C3}=0,06$.

Infine, per quanto concerne l'aspetto "Terreno e fondazioni" i dati sono desunti da indagini pregresse di caratterizzazione del terreno e dallo studio di RLS condotto dal CNR-IGAG, per cui è scelto un $F_{C4}=0,03$.

Dalla sommatoria dei succitati fattori parziali deriva il valore globale di $FC=1,15$.

Interpretazione delle informazioni

Sono state svolte verifiche secondo i tre livelli di valutazione LV1, LV2 e LV3.

Le verifiche secondo LV1 sono svolte con un modello semplificato "Palazzi e Ville..." delle LG.

Per il secondo livello di valutazione (LV2) sono selezionati tre macroelementi: la parete 1 (angolo sud-ovest, soggetta a cedimenti fondali storici e con volte non sufficientemente contraffortate), verificata a ribaltamento semplice e composto e ribaltamento del cantonale; la parete 2 (campata centrale ovest, di altezza rilevante con solaio rigido in sommità), verificata a flessione verticale; la parete 3 (lato sud del cortile settentrionale, all'ultimo livello priva di muri di spina per una lunghezza di circa 30 m, su cui si impostano le capriate in c.a.p.) verificata a flessione orizzontale.

Le analisi LV3 sono state eseguite mediante una verifica globale push-over (modello a telaio equivalente). Dalle verifiche emerge che la Reggia di Capodimonte è caratterizzata da un livello di vulnerabilità maggiore nei confronti di meccanismi locali rispetto alla risposta globale.

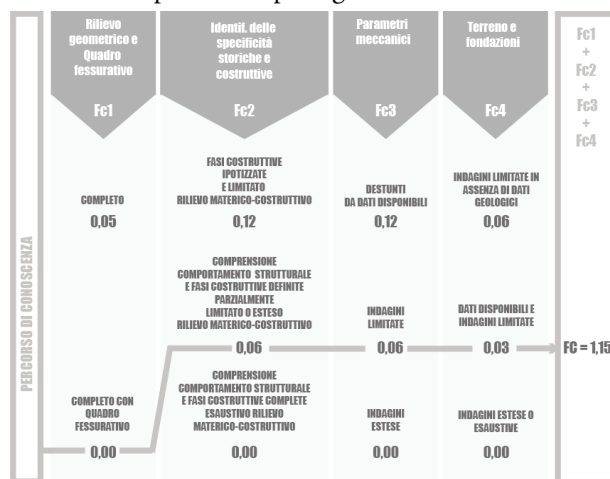
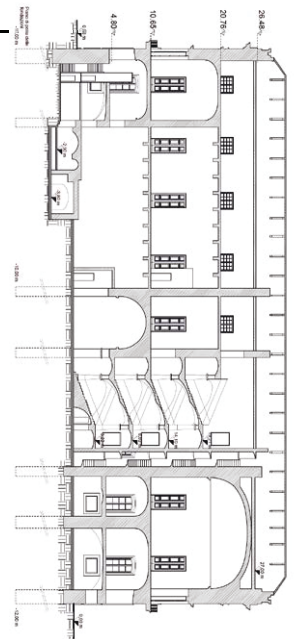
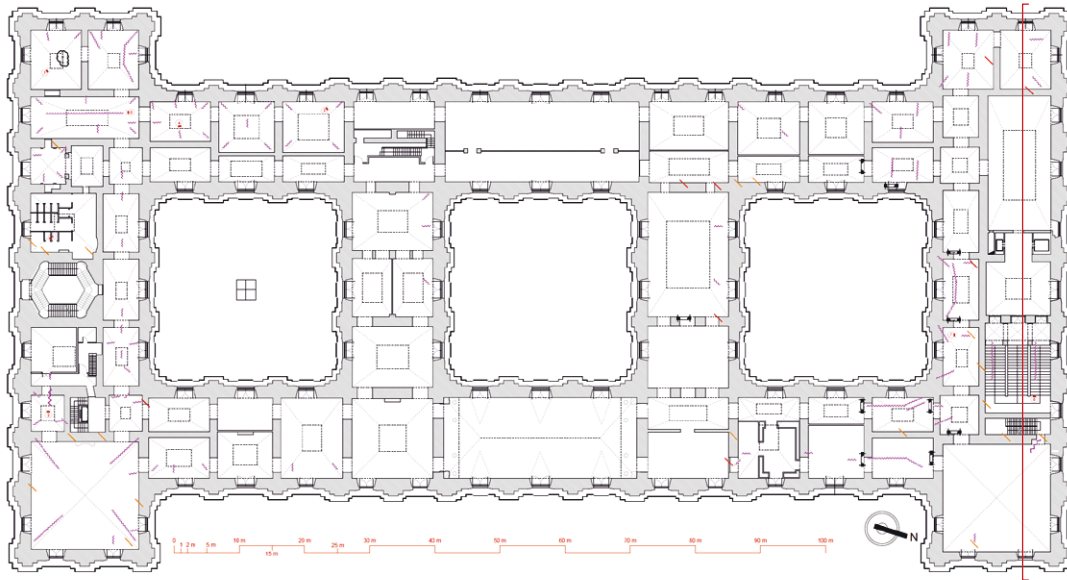


Figura 3.16 – Reggia di Capodimonte (NA), definizione del Fattore di Confidenza

V4 - REGGIA DI CAPODIMONTE, NAPOLI - Sintesi elaborati della fase conoscitiva

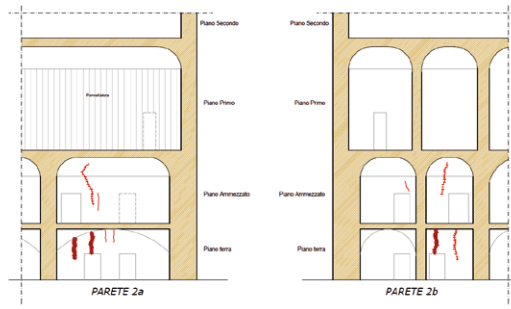
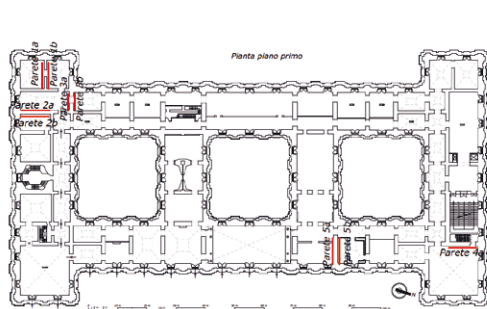


Pianta Primo Piano



Prospetto Est

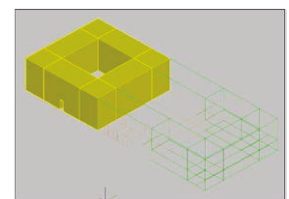
	Spanciamento
	Lesione non passante
	Lesione passante
	Lesione diffusa
	Lesione a croce
	Lesione incrocio
	Lesione al cantonale
	Lesione martello
	Crollo
	Lesione all'architrave
	Lesioni su volte
	Distacco intonaco



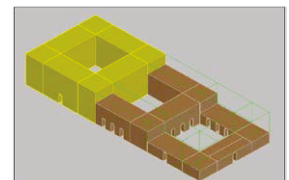
1. Rilievo geometrico

SEZIONE TRASVERSALE			
Tipologia :	<input type="checkbox"/> paramento unico	<input type="checkbox"/> due paramenti accostati	<input type="checkbox"/> due paramenti ammorati
	<input type="checkbox"/> a sacco (incoerente)	<input checked="" type="checkbox"/> a sacco (coerente)	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> paramento unico		<input type="checkbox"/> due paramenti accostati	
<input type="checkbox"/> due paramenti ammorati		<input checked="" type="checkbox"/> a sacco	
Spessori :	totale: 150 cm	paramento esterno: 40 cm	paramento interno: 40 cm
<input type="checkbox"/> Presenza significativa di vuoti <input checked="" type="checkbox"/> Presenza di diatoni : (collegamenti puntuali tra il paramento interno e quello esterno)			
INTONACO			
Spessori :	paramento esterno: 5 cm		paramento interno: 5 cm
Stato attuale :	<input type="checkbox"/> muratura a facciavista	<input type="checkbox"/> mancante	<input type="checkbox"/> in parte mancante <input checked="" type="checkbox"/> presente
Stato di conservazione e consistenza :	<input type="checkbox"/> degradato	<input type="checkbox"/> fessurato	<input checked="" type="checkbox"/> buono

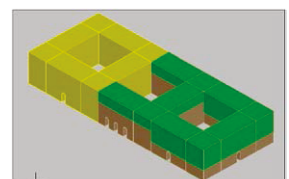
ELEMENTI COSTITUENTI			
Materiale:	<input type="checkbox"/> arenaria	<input type="checkbox"/> calcare	<input checked="" type="checkbox"/> tufo
	<input type="checkbox"/> mattoni cotti	<input type="checkbox"/> mattoni crudi	<input type="checkbox"/> calcarenite
Lavorazione:	<input type="checkbox"/> assente (ciottoli)	<input type="checkbox"/> sbazzatura	<input type="checkbox"/> vario di reimpiego
	<input type="checkbox"/> piccole (< 15cm)	<input checked="" type="checkbox"/> a spigoli finiti	<input checked="" type="checkbox"/> a conci quadrati
Dimensioni (diagonali elemento):	<input type="checkbox"/> medie (15-25 cm)	<input type="checkbox"/> discrete	<input type="checkbox"/> grandi (>25 cm)
Stato di conservazione e qualità:	<input type="checkbox"/> pessimo	<input type="checkbox"/> discreto	<input checked="" type="checkbox"/> buono
MALTA			
Tipo:	<input type="checkbox"/> di calce aerea	<input checked="" type="checkbox"/> di calce idraulica	<input type="checkbox"/> cementizia
Stato di conservazione e consistenza:	<input type="checkbox"/> incoerente	<input type="checkbox"/> friabile	<input checked="" type="checkbox"/> tenace
Funzione:	<input checked="" type="checkbox"/> allietamento	<input type="checkbox"/> riempimento	<input type="checkbox"/> stitatura
TESSITURA DEI PARAMENTI			
<input type="checkbox"/> disordinata	<input type="checkbox"/> corsi regolari	<input checked="" type="checkbox"/> corsi orizzontali	
POSA IN OPERA DEGLI ELEMENTI			
		<input type="checkbox"/> orizzontale/verticale	<input checked="" type="checkbox"/> orizzontale
<input type="checkbox"/> casuale	<input type="checkbox"/> a lisca di pesce	<input type="checkbox"/> orizzontale/verticale	<input checked="" type="checkbox"/> orizzontale
RICORSI O LISTATURE		ZEPPE O SCAGLIE	
<input type="checkbox"/> assenti	<input type="checkbox"/> in mattoni	<input checked="" type="checkbox"/> assenti	<input type="checkbox"/> in pietra
<input type="checkbox"/> assenti	<input type="checkbox"/> in mattoni	<input checked="" type="checkbox"/> assenti	<input type="checkbox"/> in cotto



Fase I (1738 - 1748)



Fase II (1759 - 1765)



Fase III (1830 - 1848)

3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo

2. Fasi costruttive

V5. VILLA FLORIDIANA, NAPOLI

Villa Floridiana sorge all'interno del parco omonimo situato nel quartiere del Vomero a Napoli. Dal 1927 ospita il Museo nazionale della ceramica "Duca di Martina".

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

L'edificio ha un impianto a C con un corpo centrale più profondo e due bracci antistanti, avente superficie di impronta a terra è pari a circa 1340 mq (48 m x 31 m). Si sviluppa su due elevazioni fuori terra per un'altezza alla gronda di 20 m; sorge su un sito in lieve pendenza che consente la formazione di un piano interrato di ampiezza eguale a quella degli altri livelli sovrastanti.

La villa nasce dall'ampliamento di un "casino di caccia" corrispondente con il solo corpo centrale a due elevazioni fuori terra e avente un fabbricato annesso sul lato sinistro destinato a magazzino e stalle. Nel 1827, nell'ottica di realizzare una villa signorile, sono costruite le due ali laterali simmetriche, è demolito l'annesso magazzino e sono realizzati i tetti a terrazza in sostituzione del tetto originario a doppia falda. Le due nuove ali sono addossate all'edificio originario e ad esso collegate internamente con l'apertura di nuovi vani porta. Allo stesso periodo appartiene il vestibolo di ingresso e lo scalone monumentale nel braccio occidentale.

Trasformazioni più recenti risalgono al 1924, anno in cui è deciso di destinare la villa a Museo della ceramica. Tali interventi consistono nella demolizione di alcuni tramezzi e di alcune pareti di spina al piano primo e nella creazione di nuove aperture.

In epoca recente (1989-1998) la villa è interessata da una serie di interventi che ne modificano in maniera incisiva la configurazione strutturale. Alla quota del piano interrato posta tra i due bracci laterali è realizzata una struttura in cemento armato da destinare ad auditorium (la struttura è isolata da giunto tecnico); sono eseguiti allargamenti dei vani porta esistenti prevedendo un telaio in cemento armato e il consolidamento delle aperture maggiori esistenti sempre con telai ad arco in cemento armato; gran parte dei setti murari al piano interrato sono stati cementati.

Nel 2002 è realizzato un intervento di consolidamento mediante i seguenti interventi: riparazione di muri e volte con scuci-cuci; inserimento di tiranti metallici alla quota del calpestio del secondo livello, con capochiavi metallici sottotraccia e ancoraggi a coda di rondine.

La storia costruttiva della villa non comprende trasformazioni di grande portata, ma i lavori eseguiti in epoca recente determinano una certa eterogeneità delle tecniche costruttive, soprattutto per la struttura di elevazione al piano interrato.

La struttura interamente in muratura portante in conci di tufo listati al piano seminterrato, muratura in elementi sbazzati di tufo giallo napoletano con e senza ricorsi orizzontali; gli spessori vanno da 80-140 cm al piano seminterrato, a 60-80 cm al piano primo, fino a 60 cm all'ultimo livello. Le strutture di fondazione sono di tipo continuo e realizzate in muratura di tufo giallo napoletano, in continuità con la struttura; poggiano su un banco tufaceo parzialmente scavato da due cavità ipogee accessibili. Riguardo gli orizzontamenti, il primo e secondo impalcato consistono in volte in muratura

di tufo e di mattoni in foglio di varia geometria (a botte, a padiglione, a crociera); al terzo impalcato sono presenti in gran parte solai piani in varie tecniche costruttive (legno, putrelle e tavelloni, laterocemento).

Le informazioni sulla tecnica costruttiva non sono visibili: le pareti esterne sono interamente intonacate così come le pareti interne sono quasi tutte coperte da intonaco, stucchi, affreschi o altre decorazioni di pregio.

Il livello di difficoltà per il raggiungimento di una conoscenza adeguata della villa è soprattutto legato alla definizione attendibile del rilievo costruttivo, desumibile esclusivamente dall'analisi del materiale di archivio del progetto originario (di epoca relativamente recente e probabilmente più semplice da reperire), dallo studio della tecnica costruttiva locale (su riferimenti bibliografici o di altre architetture coeve) con il supporto di indagini diagnostiche non invasive.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale è stata definita mediante il controllo e l'integrazione del rilievo geometrico disponibile, verificando con strumentazione tradizionale spessori dei muri, luci di volte e solai, ecc.

Il quadro fessurativo è stato rilevato in modo sistematico e riportato in elaborati specifici (tutte le planimetrie e due sezioni) dove è chiarita l'entità della lesione (passante, non passante).

Sulla base di questi risultati per l'aspetto "Rilievo geometrico" è scelto un fattore parziale pari a $F_{C1}=0$.

La storia costruttiva è delineata con il supporto di una ricerca bibliografica e archivistica. I risultati dell'analisi storico-critica permettono di comprendere le trasformazioni dell'impianto strutturale e di individuare le zone di connessione con probabili accostamenti murari, dove sono eseguite delle indagini diagnostiche per il riscontro diretto delle fonti documentarie.

Lo studio condotto sui dettagli costruttivi è finalizzato alla elaborazione di un giudizio qualitativo sulle tipologie murarie e a fornire dati sui parametri meccanici; le informazioni sono dedotte dai progetti trascorsi e da indagini specifiche individuate a valle dello studio storico (termografie, soniche, stonacature, endoscopie). Le prove hanno permesso di appurare la mancata connessione tra alcune pareti di epoche diverse. Sono eseguiti disegni di dettaglio delle murature in prospetto e in sezione; riguardo gli orizzontamenti sono redatte piante con una legenda specifica delle tipologie presenti. Alla luce dei risultati raggiunti, per l'aspetto inerente "Identificazione delle specificità storiche e costruttive" è scelto un $F_{C2}=0,06$.

Non sono eseguite indagini di caratterizzazione meccanica e i dati sono desunti dalla tabella C8A2.1 considerando i valori minimi degli intervalli per tener conto dell'elevata eterogeneità dei materiali presenti. Riguardo l'aspetto "Parametri meccanici" è dunque scelto un $F_{C3}=0,06$.

Infine, per quanto concerne l'aspetto "Terreno e fondazioni" è considerato il livello più basso di conoscenza pari a $F_{C4}=0,06$. Tale scelta è probabilmente motivata dal fatto che non si eseguono

approfondimenti in tal senso, se non per la definizione della geometria delle fondazioni e il rapporto delle stesse con le cavità ipogee.

Dalla sommatoria dei succitati fattori parziali deriva il valore globale di $FC=1,18$.

Interpretazione delle informazioni

Sono state svolte verifiche secondo i tre livelli di valutazione LV1, LV2 e LV3.

Dalle verifiche secondo LV1 emergono indici di sicurezza inferiori all'unità, per cui è affermato che l'edificio non è idoneo a sopportare l'azione sismica di riferimento del sito.

Per il secondo livello di valutazione (LV2) è eseguita la verifica a ribaltamento fuori piano (semplice) di tutte le pareti perimetrali considerandole prive di vincoli, poiché le indagini in situ hanno attestato l'assenza di ammorsamenti efficaci e, inoltre, le catene presenti non sono messe in conto poiché non è stato possibile verificarne l'efficacia. Gli esiti delle verifiche sono accompagnati da considerazioni secondo le quali affermano il ribaltamento semplice non tiene conto di alcuni dettagli che hanno un ruolo importante nella risposta sismica (orizzontamenti, ammorsamenti, catene).

Le analisi LV3 sono state eseguite mediante una verifica globale push-over (modello a telaio equivalente). I risultati di questa terza verifica forniscono indici di sicurezza inferiori all'unità ma comunque superiori agli indici ottenuti nell'ambito di LV1 e più attendibili.

In definitiva, l'edificio di Villa Floridiana è interessato da un livello di vulnerabilità medio-basso nei confronti di meccanismi locali e medio-alto nei riguardi del comportamento globale.

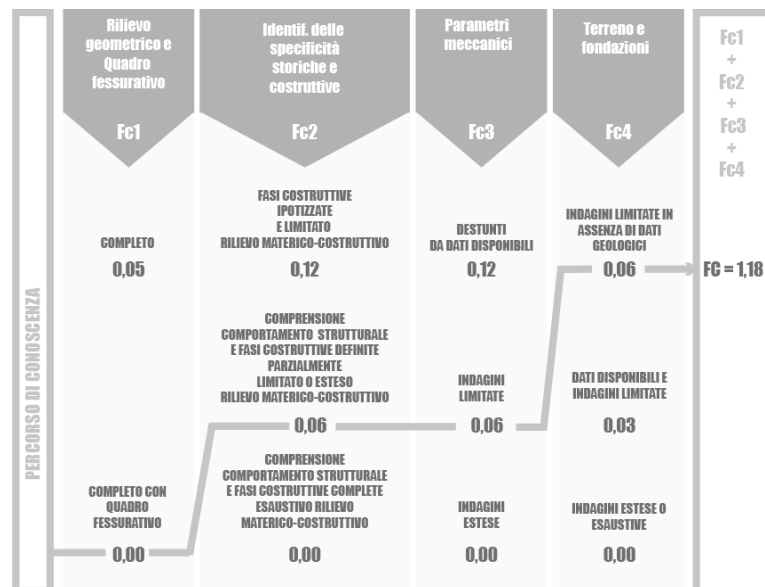
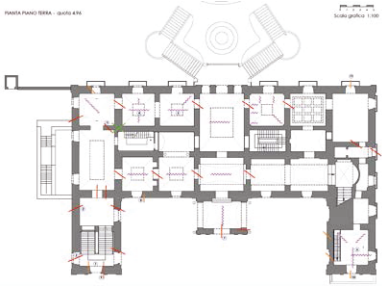



Figura 3.17 – Villa Floridiana (NA), definizione del Fattore di Confidenza




Pianta piano terra

RILIEVO DEI DANNI E DEI DISSESTI

	spanciamiento		lesione al cantonale
	lesione non passante		martello
	lesione passante		incrocio
	lesione diffusa		lesione all'architrave
	lesione a croce		fessure su pavimenti e volte
	crollo		



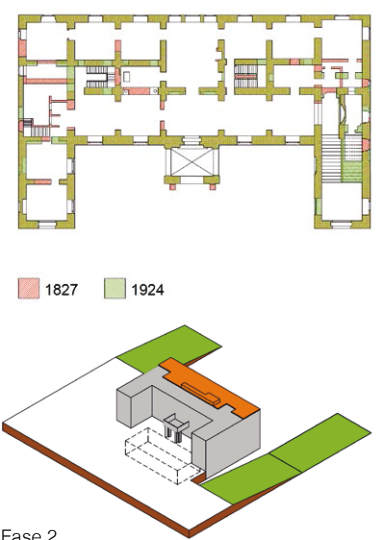
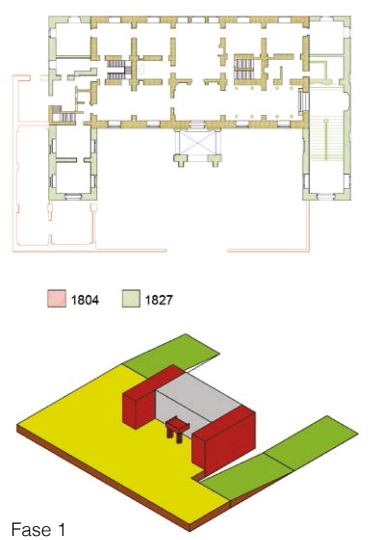
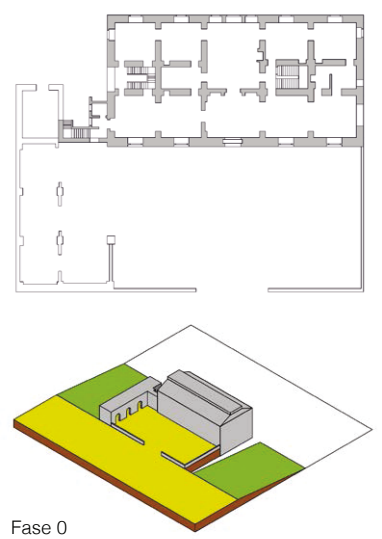
Sezione A - A'



Prospetto Sud

1. Rilievo geometrico

Orizzontamenti	Strutture portanti verticali	Consolidamenti e criticità
Solaio in legno	Muratura piena a conci di tufo giallo	Catena
Solaio in putrelle e tavelloni	Muratura a sacco a conci di tufo giallo	Cucitura armata
Solaio in putrelle e soletta collaborante	Muratura a blocchi lapidei squadreti	Canna fumaria
Solaio latero-cementizio	Muratura in mattoni pieni	Cavedi impianti
Volta in spessore	Muratura in blocchi di cls o argilla espansa	
Volte in foglio	Pilastro in c.a.	
Volta incannucciata	Setto in c.a.	
Cassettonato		
Copertura in acciaio		
Scale e ascensori	Strutture orizzontali	
Scala in legno	Trave in c.a.	
Scala su volta a botte	Cordolo in c.a.	
Scala su volta a crociera	Trave in acciaio	
Scala su arco rampante	Arco in muratura	
Scale in c.a.	Arco in c.a.	
Scala in ecclio	Architrave in legno	
Nucleo ascensore in c.a.	Architrave/piattabanda in pietra	
Nucleo ascensore in acciaio	Architrave/piattabanda in laterizio	
	Architrave in c.a.	
	Architrave in acciaio	



ELEMENTI COSTRUTTIVI			
Materiale:	<input type="checkbox"/> arenaria	<input type="checkbox"/> calcare	<input type="checkbox"/> tufo
	<input type="checkbox"/> mattoni cotti	<input type="checkbox"/> mattoni crudi	<input type="checkbox"/> vario di reimpiego
Lavorazione:	<input type="checkbox"/> assente (ciottoli)	<input type="checkbox"/> sbazzatura	<input type="checkbox"/> a spigoli finiti
Dimensioni (diagonali elemento):	<input type="checkbox"/> piccole (< 15cm)	<input type="checkbox"/> medie (15+25 cm)	<input type="checkbox"/> grandi (>25 cm)
Stato di conservazione e qualità:	<input type="checkbox"/> pessimo	<input type="checkbox"/> discreto	<input type="checkbox"/> buono
MALTA			
Tipo:	<input type="checkbox"/> di calce aerea	<input type="checkbox"/> di calce idraulica	<input type="checkbox"/> cementizia
Stato di conservazione e consistenza:	<input type="checkbox"/> incoerente	<input type="checkbox"/> friabile	<input type="checkbox"/> tenace
Funzione:	<input type="checkbox"/> allettamento	<input type="checkbox"/> riempimento	<input type="checkbox"/> stilatura
TESSITURA DEI PARAMENTI			
<input type="checkbox"/> disordinata	<input type="checkbox"/> corsi regolari	<input type="checkbox"/> corsi orizzontali	
POSA IN OPERA DEGLI ELEMENTI			
<input type="checkbox"/> casuale	<input type="checkbox"/> a lisca di pesce	<input type="checkbox"/> orizzontale/verticale	<input type="checkbox"/> orizzontale
RICORSI O LISTATURE		ZEPPE O SCAGLIE	
<input type="checkbox"/> assenti	<input type="checkbox"/> in mattoni	<input type="checkbox"/> assenti	<input type="checkbox"/> in pietra
<input type="checkbox"/> in mattoni	<input type="checkbox"/> altro	<input type="checkbox"/> in pietra	<input type="checkbox"/> in cotto

SEZIONE TRASVERSALE			
Tipologia:	<input type="checkbox"/> paramento unico	<input type="checkbox"/> due paramenti accostati	<input type="checkbox"/> due paramenti ammortati
	<input type="checkbox"/> a sacco (incoerente)	<input type="checkbox"/> a sacco (coerente)	
	<input type="checkbox"/> paramento unico	<input type="checkbox"/> due paramenti accostati	
	<input type="checkbox"/> due paramenti ammortati	<input type="checkbox"/> a sacco	
Spessori:	totale: 95 cm	paramento esterno: ...	paramento interno: ...
	<input type="checkbox"/> Presenza significativa di vuoti	<input type="checkbox"/> Presenza di dilatori: (collegamenti puntuali tra il paramento interno e quello esterno)	
INTONACO			
Spessori:	paramento esterno: ...	paramento interno: ...	
Stato attuale:	<input type="checkbox"/> muratura a facciavista	<input type="checkbox"/> mancante	<input type="checkbox"/> in parte mancante
Stato di conservazione e consistenza:	<input type="checkbox"/> degradato	<input type="checkbox"/> fessurato	<input type="checkbox"/> presente
	<input type="checkbox"/> fessurato	<input type="checkbox"/> fessurato	<input type="checkbox"/> buono
COLLEGAMENTI TRA LE PARETI MURARIE			
Tipologia:	<input type="checkbox"/> ammortamento scadente	<input type="checkbox"/> collegamenti irregolari	<input type="checkbox"/> alternanza regolare
Elementi costitutivi:	<input type="checkbox"/> analoghi alla muratura	<input type="checkbox"/> di dimensione maggiore	<input type="checkbox"/> a conci squadreti
	<input type="checkbox"/> Differenti tipologia dei muri ortogonali	<input type="checkbox"/> Presenza di catena	

3.6 Chiese e monasteri

M1. CERTOSA DI TRISULTI, COLLEPARDO (FR)

Il complesso monumentale della certosa di Trisulti sorge a circa 6 km a nord-est del centro abitato di Colleparato (provincia di Frosinone), ai piedi del monte Rotonaria. Dal 1878 è monumento nazionale.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

La certosa di Trisulti sorge su un terrazzamento del Monte Rotonaria ed è caratterizzata dalla presenza di diversi corpi di fabbrica distinti anche per tipologia di impianto strutturale – come la Chiesa di San Bartolomeo - e ciò consente di assimilare il complesso a un aggregato strutturale.

La configurazione dell'impianto – tipica dei monasteri certosini – sviluppa i vari ambienti attorno a diversi chiostri di forma quadrata: attorno al Chiostro Grande si trovano le celle dei padri, mentre attorno agli altri chiostri minori si trovano gli ambienti principali di lavoro e di comunità (cucina, cantina, refettorio, appartamento del priore, biblioteca e archivio) e altri ambienti destinati ad attività di vario genere (farmacia, foresteria, granaio, il forno, la lavanderia, ...). La chiesa è inglobata nell'impianto strutturale e prospetta sul chiostro grande.

Il complesso architettonico ha un'impronta a terra di circa 15.700 mq (compresi gli spazi aperti) che si sviluppano per un massimo quattro livelli in corrispondenza della zona di massimo pendio (prospetto sud delle celle), per un'altezza media alla gronda di 15 m.

Sono evidenti delle irregolarità plano altimetriche dovute alla presenza di corpi di fabbrica aventi caratteristiche di impianto differenti, quali la chiesa, e alle caratteristiche del sito in pendio (fondazioni a quote sfalsate).

L'impianto originario della certosa risale al XIII secolo (1204) ed è eretto nei pressi del palazzo di Innocenzo III. In questa prima fase il complesso è costituito dal Grade Chiostro con attorno le celle dei monaci e la chiesa di San Bartolomeo. Nel XVI secolo la chiesa è ampliata con le cappelle laterali a nord ed è costruito il torrino di ingresso, dislocato rispetto agli altri fabbricati. Il primo ampliamento importante risale al XVII secolo, periodo in cui sono costruiti gli ambienti della spezieria (completata nel secolo successivo e isolata rispetto agli altri edifici), il corpo di ingresso che ingloba il torrino, la nuova sala capitolare. Al XVII secolo risalgono altri lavori di ampliamento che prevedono la realizzazione del nuovo refettorio, la sistemazione del chiostro grande, del nuovo campanile e della facciata della chiesa e l'ampliamento del palazzo di Innocenzo III, già inglobato nel complesso monastico.

Nel XX secolo sono stati realizzati diversi interventi di restauro aventi l'obiettivo l'eliminazione dello stato di degrado in cui versava il complesso architettonico (anche colpito dal terremoto del 1915) e la monumentalizzazione di alcune sue parti, quali il palazzo di Innocenzo III, dove vengono demolite tutte le decorazioni settecentesche per ricostituire la *facies* medievale.

Tra gli anni '60 e gli anni '70 sono eseguiti altri lavori di restauro e consolidamento che hanno previsto l'inserimento di cordoli in cemento armato, la sostituzione degli elementi lignei delle coperture con nuovi elementi in acciaio.

La struttura di elevazione è caratterizzata da una complessiva omogeneità della tecnica costruttiva che vede l'uso prevalente di muratura in pietra sbozzata. Gli orizzontamenti presenti in gran parte consistono in volte in muratura.

Le difficoltà della fase di conoscenza della certosa sono in gran parte ascrivibili alle ingenti dimensioni del complesso monumentale che, per un verso, possono implicare lo studio per parti del fabbricato.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale del complesso architettonico è stata restituita effettuando un controllo sistematico dei rilievi esistenti con particolare riguardo agli spessori murari e alla luce degli orizzontamenti utilizzando una strumentazione tradizionale. Per circa 20 mila mq di superficie è stato eseguito un rilievo ex-novo con l'ausilio di una stazione totale.

Il quadro fessurativo e il degrado dei materiali sono stati in modo puntuale e restituite secondo il lessico NorMal.¹⁸³ Sulla base di questi risultati per l'aspetto "Rilievo geometrico" è scelto un $F_{C1}=0$.

La storia costruttiva è delineata con il supporto di una ricerca bibliografica e archivistica. Le trasformazioni rilevate dalle fonti sono in alcuni casi controllate direttamente sul complesso architettonico col supporto di indagini non distruttive (termografie). Una lettura d'insieme dei risultati dell'analisi storico-critica è riportata in un disegno di sintesi della planimetria attuale in cui sono distinte le aree con diverse campiture in base all'epoca costruttiva. Non sono evidenziati i punti di accostamento dei vari setti murari.

Lo studio condotto sugli elementi costruttivi è condotto mediante l'esecuzione di prove diagnostiche non distruttive (termografie e prove soniche) o debolmente distruttive (video-endoscopie) e i risultati sono sintetizzati nelle planimetrie del rilievo geometrico e nei fotoraddrizzamenti. Sono presenti i dettagli costruttivi di alcune capriate metalliche introdotte in recenti interventi di consolidamento.

Riguardo l'aspetto "Identificazione delle specificità storiche e costruttive è scelto" $F_{C2}=0$.

I parametri meccanici sono stati desunti dalla tabella C8A.2.1, selezionando i valori minimi, in quanto non sono effettuate prove di caratterizzazione meccanica. Il fattore parziale di confidenza relativo a questo aspetto è pari a $F_{C3}=0,12$.

¹⁸³ CNR – Centro studi di Milano e Roma sulle cause del deperimento e sui metodi di conservazione delle opere d'arte, ICR – Istituto Centrale per il Restauro, Raccomandazioni NorMal 1/88, "Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico", Roma, 1990.

Riguardo il quarto aspetto della conoscenza “terreni o fondazioni” sono eseguite indagini in situ per la definizione di un modello geologico. Si è assunto un $F_{C4}=0,03$.

Dalla sommatoria dei succitati fattori parziali deriva il valore globale di $FC=1,15$.

Interpretazione delle informazioni

Il giudizio qualitativo complessivo sulla certosa di Trisulti è nel complesso positivo. Tuttavia sono rilevate alcune criticità riguardanti il degrado delle coperture dovuto a infiltrazioni e a una cattiva regimentazione delle acque meteoriche. Inoltre, il quadro fessurativo presente nel monastero rende tale locale più esposto all’attivazione di meccanismi locali.

Per la modellazione e le verifiche sismiche è stata utilizzata una tecnologia integrata del BIM (Building Information Modeling), che ha consentito la gestione di tutte le informazioni della fase conoscitiva su un unico modello tridimensionale.

Sono state svolte verifiche secondo i tre livelli di valutazione LV1, LV2 e LV3.

In particolare, riguardo la valutazione secondo LV2 sono stati analizzate le pareti esterne del monastero eseguendo delle verifiche a ribaltamento fuori piano.

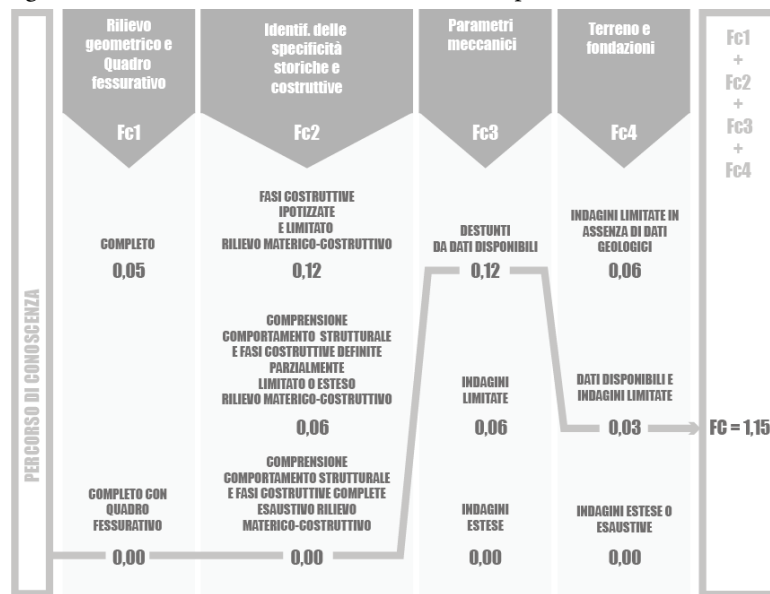
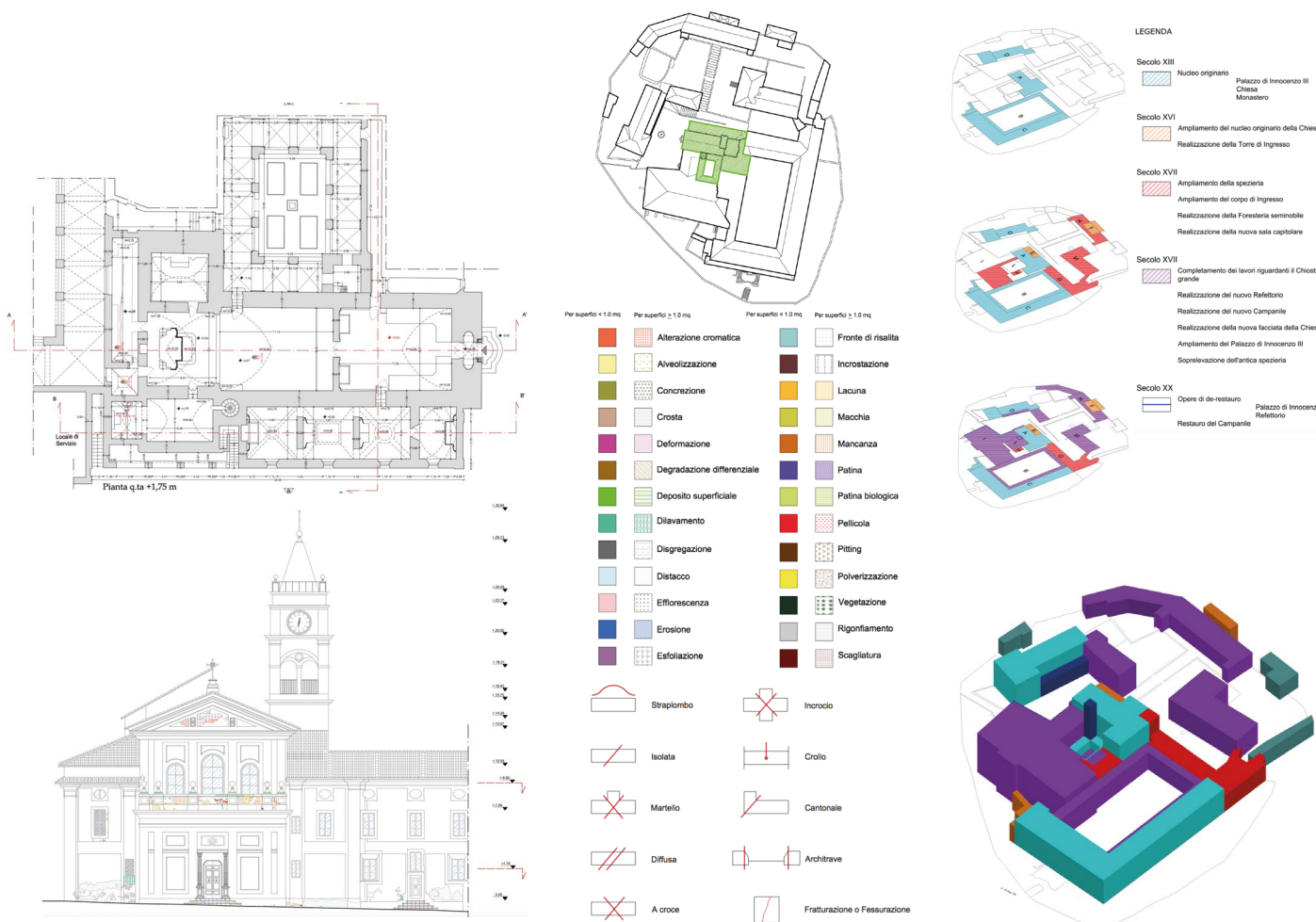


Figura 3.18 – Certosa del Trisulti a Colleparado (FR), definizione del Fattore di Confidenza

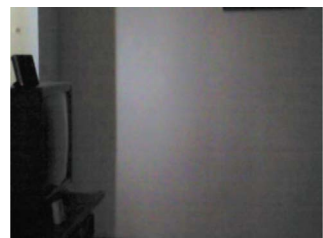


1. Rilievo geometrico e quadro fessurativo 0 10m

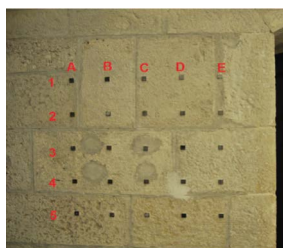
2. Fasi costruttive



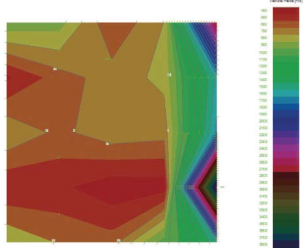
3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



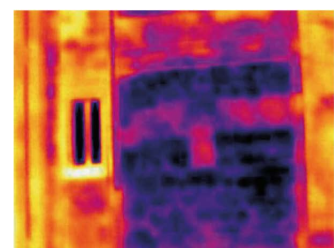
Termografia passiva



Prova sonica



Termografie



4. Indagini specialistiche

M2. CERTOSA DI SAN MARTINO, NAPOLI

Il complesso monumentale della certosa di San Martino è situata nella collina omonima del quartiere del Vomero, insieme a Castel Sant'Elmo – con cui confina a ovest – e si affaccia sul centro storico della città di Napoli. Dal 1886 è museo nazionale.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

La certosa di San Martino sorge su un sito in lieve pendio caratterizzato dalla presenza di terrazzamenti. È caratterizzato dalla presenza di diversi corpi di fabbrica distinti anche per tipologia di impianto strutturale (sono presenti due chiese), e ciò consente di assimilare il complesso a un aggregato strutturale.

La configurazione dell'impianto sviluppa i vari ambienti attorno a due chiostri di forma quadrata (Chiostro Grande e Chiostro dei Procuratori) e il cortile monumentale di forma rettangolare allungata; altre corti minori sono state create nel corso della storia costruttiva e un altro spazio aperto è situato a fianco al chiostro grande e costituisce un giardino pensile. La chiesa principale è inglobata nell'impianto strutturale e prospetta sul cortile monumentale; la Chiesa delle Donne, di minori dimensioni, è invece posta in aderenza al lato nord della certosa.

Il complesso architettonico ha un'impronta a terra di circa 13.000 mq (esclusi i chiostri) che si sviluppano per tre livelli, di cui uno seminterrato (sotterranei gotici), per un'altezza media alla gronda di 12 m.

Sono evidenti delle irregolarità plano altimetriche dovute alla presenza di corpi di fabbrica aventi caratteristiche di impianto differenti (le chiese) e alle caratteristiche del sito in pendio (fondazioni a quote sfalsate); inoltre il sito è caratterizzato dalla presenza di cavità antropiche e cisterne costruite anche a ridosso dei fabbricati.

L'impianto originario della certosa risale al XIV secolo (1325-1328) ed era costituito dal Grande Chiostro con attorno le celle dei monaci e il chiostro piccolo attorno al quale si sviluppavano gli ambienti di lavoro e vita comunitaria (lavanderia, cucina, refettorio); è addossata al chiostro piccolo la chiesa principale, originariamente ad aula unica. Le prime trasformazioni rilevanti sono ascrivibili al XVI secolo e consistono in un ampliamento del complesso conventuale, con la costruzione di ambienti affianco al refettorio, e nella trasformazione della chiesa con l'aggiunta di cappelle laterali, ocludendo delle superfici del chiostro piccolo; è inoltre realizzato il Chiostro dei Procuratori ed è modificata la geometria delle arcate del Chiostro Grande dal sesto acuto al sesto pieno. Al XVIII secolo risalgono altri lavori di ampliamento che prevedono la realizzazione del cortile monumentale mediante la chiusura del quarto lato, e la sistemazione del cortile del Belvedere.

Tra la fine del XIX secolo e il XX secolo sono stati realizzati diversi interventi di restauro in primo luogo dovuti alla nuova destinazione d'uso museale, quali la demolizione di alcune celle per definire collegamenti alternativi tra i vari spazi, la chiusura di alcuni loggiati per la definizione di corridoi, ecc.

In quegli anni complesso è stato oggetto di due eventi calamitosi: il terremoto del 1930 e i bombardamenti della Seconda Guerra Mondiale. Il primo ha causato alcuni dissesti statici in gran parte rilevabili nell'ala dell'ex noviziato (braccio a nord del Grande Chiostro) e i bombardamenti accentuano tali dissesti ma non colpiscono direttamente le strutture dell'edificio. A partire dai primi anni del '900 eseguiti numerosi interventi di restauro

che hanno implicato la diffusa sostituzione delle coperture originarie in alcuni casi con strutture in c.a. dissimulate da controsoffitti voltati. Nel 1980 la certosa è interessata da un altro terremoto cui seguono interventi di consolidamento e restauro aventi il duplice obiettivo di sanare le precarietà strutturali e ricostituire per quanto possibile l'originario assetto del complesso certosino.

La struttura di elevazione è caratterizzata da una omogeneità della tecnica costruttiva che vede l'uso prevalente di muratura in blocchi di tufo napoletano, con dimensioni diverse a seconda dell'epoca costruttiva.

Al contrario, gli orizzontamenti - in varie occasioni oggetto di trasformazioni - sono presenti in varie tipologie: in gran parte consistono in volte in muratura e - in percentuale più esigua - solai in laterocemento, lignei, in putrelle e tavelloni, in graticcio di c.a. o in graticcio di acciaio.

Le difficoltà della fase di conoscenza della certosa sono in gran parte ascrivibili alle ingenti dimensioni del complesso monumentale che, per un verso, possono implicare lo studio per parti del fabbricato.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale del complesso architettonico è stata restituita effettuando un controllo sistematico dei rilievi esistenti con particolare riguardo agli spessori murari e alla luce degli orizzontamenti utilizzando una strumentazione tradizionale. Solo per alcuni ambienti più ampi o articolati è stato eseguito un rilievo laser-scanner. Dagli elaborati non si evincono le misure rilevate. Il quadro fessurativo è stato rilevato in modo puntuale distinguendo per ogni lesione l'elemento strutturale su cui è rilevata e l'entità; sono inoltre evidenziate alcune situazioni di degrado. Sulla base di questi risultati per l'aspetto "Rilievo geometrico" è scelto un $F_{C1}=0$.

La storia costruttiva è delineata con il supporto di una ricerca bibliografica e archivistica. Le trasformazioni rilevate dalle fonti sono di seguito controllate direttamente sul complesso architettonico col supporto di indagini non distruttive (termografie). Una lettura d'insieme dei risultati dell'analisi storico-critica è riportata in tabelle e un disegno di sintesi della planimetria attuale in cui sono distinte diverse aree in base all'epoca costruttiva (ma non sono evidenziate i punti di cesura tra i muri).

Lo studio condotto sui dettagli costruttivi è finalizzato alla elaborazione di un giudizio qualitativo sugli elementi strutturali e alla definizione dei parametri meccanici. Le informazioni sulla tecnica costruttiva sono desunte da fonti bibliografiche sulla tecnica costruttiva locale, dal rilievo diretto e da indagini diagnostiche non distruttive (prove soniche). Sono eseguite delle schede di dettaglio delle tipologie murarie finalizzate alla attribuzione dell'IQM.

Riguardo l'aspetto "Identificazione delle specificità storiche e costruttive è scelto" $F_{C2}=0$.

I parametri meccanici sono stati desunti in riferimento alle schede MADA e ai risultati sull'IQM, a seguito dei quali sono stati scelti i valori medi della tabella C8A.2.1; è stata svolta una analisi di sensitività per identificare le grandezze affette da incertezza che più influenzano la risposta strutturale. Dagli esiti dell'analisi emerge una sensitività del modello ai parametri meccanici dei materiali per alcuni dei quali sarebbe possibile approfondire la conoscenza mediante prove debolmente distruttive o non invasive (martinetti piatti doppi o identificazione dinamica). Il fattore parziale di confidenza relativo a questo aspetto è pari a $F_{C3}=0,06$.

Riguardo il quarto aspetto della conoscenza “terreno e fondazioni” sono eseguite indagini specifiche di caratterizzazione del suolo e sono disponibili gli studi di caratterizzazione eseguiti dal CNR-IGAG. Si considera il valore cautelativo - in assenza dati CNR - ovvero $F_{c4}=0,06$.

Dalla sommatoria dei succitati fattori parziali deriva il valore globale di $FC=1,12$.

Interpretazione delle informazioni

Sono state svolte verifiche secondo i tre livelli di valutazione LV1, LV2 e LV3.

A valle della disamina conoscitiva, è ritenuto attendibile il comportamento globale del complesso architettonico, quindi per la verifica LV1 e LV3 è eseguita una verifica globale push-over adottando il modello di calcolo a telaio equivalente. Il complesso è stato analizzato suddividendolo in quattro corpi di fabbrica modellati separatamente, individuati in base all’entità di interazione (la presenza di corti e spazi non costruiti agevola la distinzione di due corpi) e, in parte, in base alle fasi costruttive.

La valutazione secondo LV1 è eseguita utilizzando un foglio di calcolo e non mediante piattaforma SIVARS, sia per il mancato aggiornamento di quest’ultimo alla normativa vigente sia per la complessità del manufatto.

La valutazione LV2 è stata eseguita verificando 36 meccanismi locali mediante l’analisi cinematica lineare. I macroelementi sono individuati in pareti perimetrali e per ciascuna di esse sono valutate le tipologie di meccanismo fuori piano (ribaltamento semplice, flessione,...) attivabili sulla base della configurazione d’assieme e del quadro fessurativo rilevato.

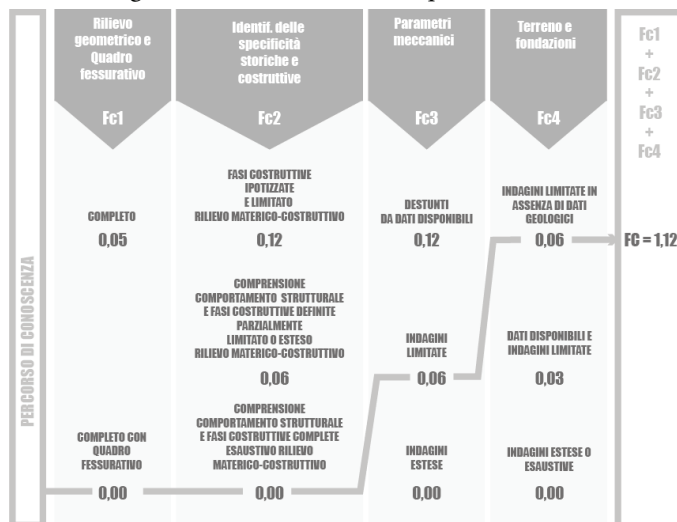
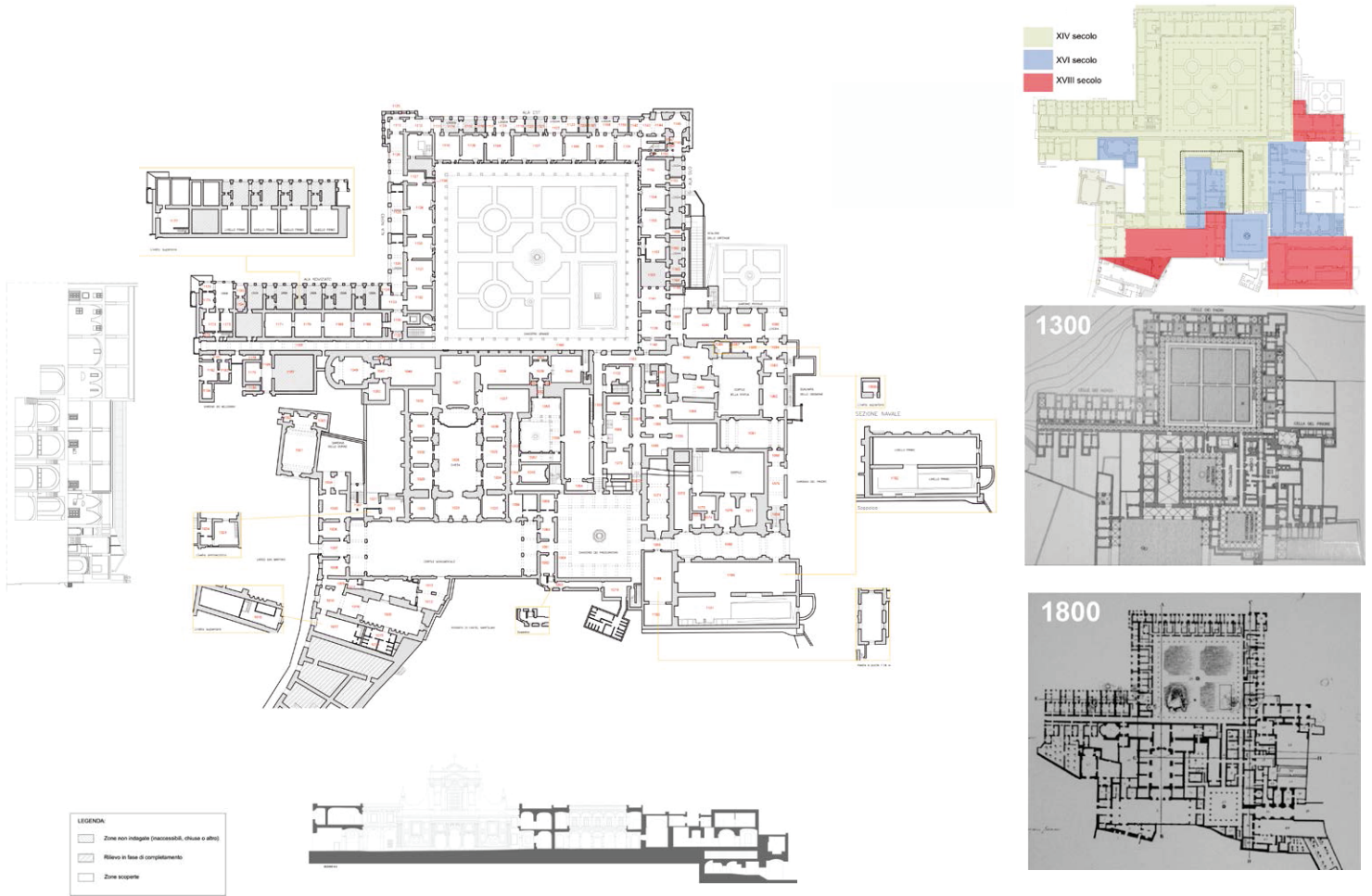
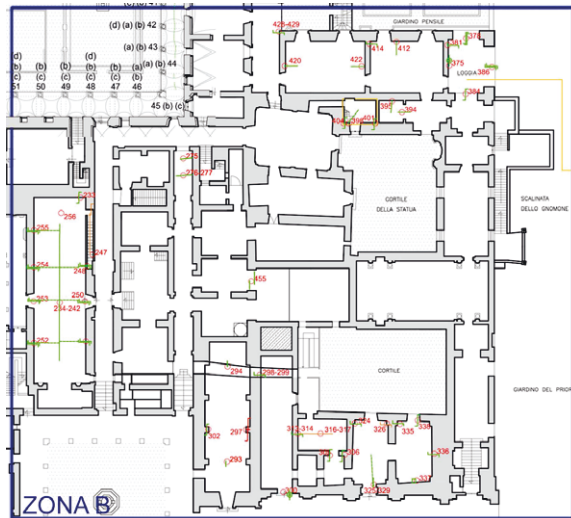


Figura 3.19 – Certosa di San Martino (NA), definizione del Fattore di Confidenza



1. Rilievo geometrico

0 — 10m



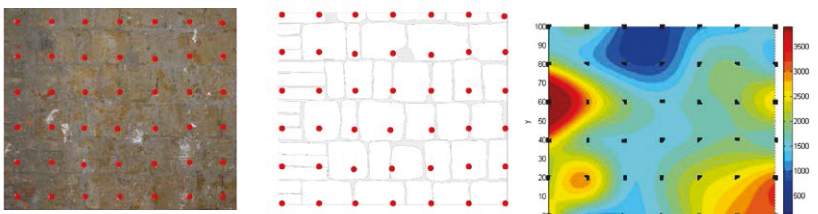
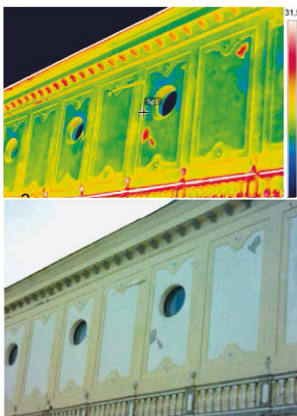
PIANTA	DESCRIZIONE
	Lesione orizzontale
	Lesione verticale o pseudoverificale
	Lesione a taglio
	Proiezione in pianta delle lesioni su volte, archi e solai soprastanti
	Lesioni a pavimento
	(a) Lesioni medie nel fusto
	(b) Lesioni alla base
	(c) Lesioni lievi nel fusto
	(d) Lesioni nel capitello
	Lesioni negli architravi o archi
	Lesioni per aperture tamponate

Caratterizzazione del materiale del paramento				
Elemento lapideo	Lavorazione	Stato di conservazione	Regolarità degli elementi	Dimensione elementi
1 Tufo	A scalpello	Buono	Parzialmente rispettato	25-27x15-20 cm
3 Tufo	Assente	Buono	Parzialmente rispettato	20-26x15-15 cm
4 Tufo	A scalpello	Mediocre	Parzialmente rispettato	20-32x12-20-21 cm
5 Tufo	A spacco	Cattivo	Non rispettato	15-37x15-18x20-24 cm
6 Tufo	A spacco	Buono	Non rispettato	25-50x16-19x15-17 cm
7 Tufo	A spacco	Mediocre	Non rispettato	23-27x17-23x18-30 cm
8 Tufo	A spacco	Mediocre	Non rispettato	10-16x20-39 cm
Molto				
Funzione	Tipologia aggregato	Forma aggregato		
1 Allettamento	Sabbia di mare	Sub-arrotondato		
3 Allettamento	Sabbia di mare	Sub-arrotondato		
4 Allettamento	Sabbia di mare	Angoloso		
5 Allettamento	Sabbia di mare	Sub-arrotondato		
6 Allettamento	Sabbia di mare	Sub-arrotondato		
7 Allettamento	Sabbia di mare	Sub-arrotondato		
8 Allettamento	Sabbia di mare	Sub-arrotondato		

Sezione muraria					
Ruolo struttura	Tipologia	Tipo sezione	Spessore sezione	Presenza di zeppe	Presenza di vuoti
3 Interna	Blocchi di tufo	Paramento unico	115 cm	Assente	Assente

Caratterizzazione materiali della sezione				
Elemento lapideo	Lavorazione	Stato di conservazione	Regolarità degli elementi	Dimensione elementi
3 Tufo	Assente	Buono	Non rispettato	40x20x12-23/8x13x12-23
Molto				
Funzione	Tipologia aggregato	Forma aggregato		
3 Allettamento	Sabbia di mare	Sub-arrotondato		

3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



4. Indagini specialistiche

M3. CERTOSA DI SAN LORENZO, PADULA (SA)

Il complesso monumentale della Certosa di San Lorenzo si trova a Padula nel Vallo di Diano e dal 1957 ospita il museo archeologico provinciale della Lucania occidentale e dal 1998 è stata dichiarata patrimonio dell'umanità dall'UNESCO.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

La certosa di San Lorenzo è costruita su un sito pressoché pianeggiante ed è caratterizzata da un impianto tipico dei conventi certosini, che comprende la chiesa principale, un Chiostro Grande attorno al quale si sviluppano le celle dei monaci e da chiostri di minore dimensioni attorno ai quali sono realizzati gli ambienti di lavoro. Può essere considerato un aggregato strutturale sia per le sue dimensioni complessive, sia per la compresenza di corpi di fabbrica dalle diverse caratteristiche di impianto strutturale, che favorisce una generale irregolarità planoaltimetrica.

La superficie complessiva della certosa di San Lorenzo è pari a circa 50.000 mq (comprese le corti) che si sviluppano su due livelli fuori terra per un'altezza media alla gronda di circa 16 m.

L'impianto strutturale è nel complesso molto articolato con una maglia muraria caratterizzata da passi differenti da una zona all'altra. Le celle sul Chiostro Grande sono tutte caratterizzate da un passo regolare e ampio circa 3,5 m e hanno anche il fronte retrostante libero su una piccola corte. Attorno ai chiostri minori gli ambienti assumono dimensioni maggiori e geometrie anche irregolari.

La costruzione del nucleo originario risale al 1306, ma oggi ne rimangono pochi elementi riconoscibili nel portale e le volte a crociera della chiesa del Capitolo. Il primo importante ampliamento è avviato tra il XVI e il XVII secolo con la trasformazione dell'impianto originario e la creazione degli ambienti attorno ai chiostri minori e, più tardi, la costruzione dell'attuale compagine del Chiostro Grande, probabile ampliamento di un chiostro preesistente. Nella prima metà del Settecento sono realizzati il refettorio e le corti più esterne, mentre è della seconda metà dello stesso secolo l'ultimazione dello scalone monumentale di derivazione vanvitelliana. Nel XIX secolo il complesso architettonico muta la sua destinazione d'uso a seguito delle soppressioni degli ordini (prima nel 1807 e poi nel 1866) e diventa caserma e poi campo di concentramento, per essere definitivamente abbandonata in uno stato di degrado fino alla seconda metà del XX secolo. A partire dagli anni '70 fino agli anni '90 del Novecento sono eseguiti lavori di consolidamento statico che hanno previsto: la sistematica costruzione in breccia di cordoli in cemento armato e il consolidamento delle murature mediante applicazione diffusa di cuciture armate; la sostituzione dei solai lignei originali con solai in latero cemento; il consolidamento delle volte in muratura con cappe estradossali in cemento armato e di innesti a coda di rondine per nuove travi in cemento armato.

Il risultato della storia costruttiva è una sostanziale eterogeneità delle tecniche costruttive, dovuta principalmente alle trasformazioni avvenute lo scorso secolo. La struttura di elevazione è tuttavia interamente in muratura portante di blocchi di pietra calcarea di Padula e, solo in minima parte, di mattoni pieni. Gli orizzontamenti sono in gran parte voltati; sono presenti anche solai lignei e – come detto poc'anzi – solai in laterocemento.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale è stata ottenuta mediante un controllo sistematico dei rilievi esistenti integrati con rilievo laser-scanner. Il quadro fessurativo e di degrado è stato documentato mediante fotografie e riportato seguendo diciture codificate.

Il fattore di confidenza scelto per l'aspetto "Rilievo geometrico" è $F_{C1}=0$.

La storia costruttiva del complesso certosino è ricostruita mediante ricerca bibliografica e di archivio elaborando una sintesi di tutti gli eventi più importanti. Le informazioni sulle fasi costruttive sono state parzialmente riscontrate direttamente sul manufatto e riportate in uno schema planimetrico distinguendo con campiture diverse i vari corpi di fabbrica costruiti in epoche differenti.

Riguardo le tecnica costruttiva, gli elementi strutturali sono descritti attraverso una documentazione fotografica e i risultati di prove diagnostiche. La localizzazione delle indagini è guidata dalle informazioni sulle fasi costruttive. Sono svolte indagini non invasive con l'obiettivo di: verificare gli interventi di consolidamento recedenti e controllare l'omogeneità muraria (prospezioni georadar sulle volte, prove soniche), verificare le frequenze proprie della struttura.

Riguardo l'aspetto "Identificazione delle caratteristiche storiche e costruttive" è scelto un $F_{C2}=0,06$.

Non sono state effettuate prove sui materiali e i parametri meccanici sono scelti i valori medi dalla tabella C8A2.1. Su questo aspetto è scelto $F_{C3}=0$, probabilmente per la conoscenza acquisita sugli interventi pregressi che hanno modificato il comportamento strutturale.

Riguardo l'aspetto "Terreno e fondazioni" sono utilizzati gli studi condotti dal CNR-IGAG sulla caratterizzazione geologica e sulle indagini RLS. Alla luce dei dati reperiti il fattore parziale scelto per questo aspetto è $F_{C4}=0,03$.

Dalla sommatoria dei fattori parziali è ottenuto un fattore di confidenza pari a $FC=1,09$.

Interpretazione delle informazioni

Lo stato attuale della certosa di San Lorenzo è giudicato buono e privo di evidenti precarietà strutturali e tale giudizio è suffragato dalla assenza di un quadro fessurativo e di dissesto di particolare rilievo. Tuttavia è sottolineato che i lavori di consolidamento della seconda metà del XX secolo hanno modificato radicalmente il comportamento strutturale del manufatto

trasformandolo difatti in una struttura ibrida e per tale ragione tale comportamento non può essere rappresentato in maniera attendibile con i classici modelli utilizzati per l'analisi delle strutture in muratura.

Per le verifiche sismiche il complesso è stato suddiviso in 7 macro-volumi significativi, a causa dell'impianto strutturale complesso e per il livello di interazione tra i vari corpi. I criteri adoperati per tale suddivisione sono: le fasi costruttive e la configurazione geometrica.

Sono eseguite verifiche secondo i tre livelli di valutazione LV1, LV2 e LV3.

Per valutazione secondo LV1 è utilizzata piattaforma SIVARS.

Le verifiche secondo LV2 sono state eseguite mediante analisi cinematica lineare e non lineare dei macroelementi utilizzando l'applicativo CINE.¹⁸⁴ Anche in questo caso, le analisi hanno dato riscontri positivi che sono giustificati dalla presenza di interventi di consolidamento diffusi su tutto il fabbricato.

È stata infine condotta un'analisi globale (LV3) mediante analisi modale e spettrale, sempre sui 7 macro-volumi individuati.

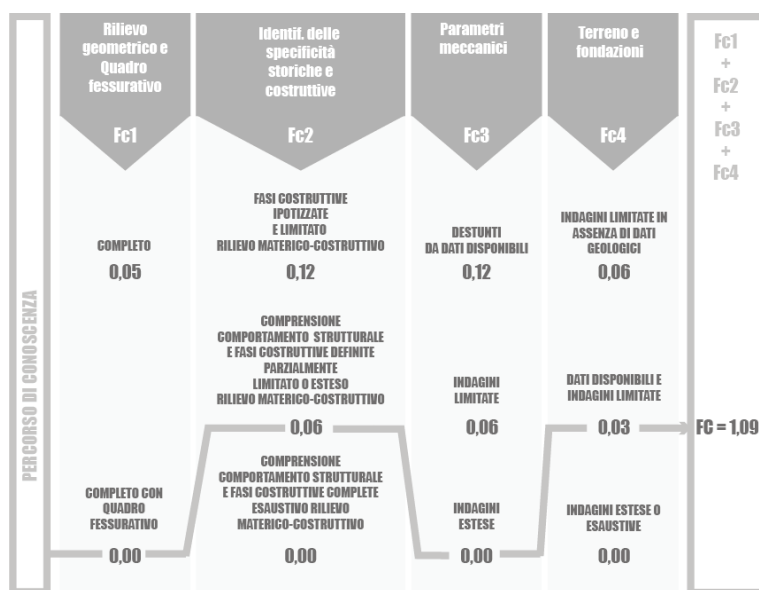
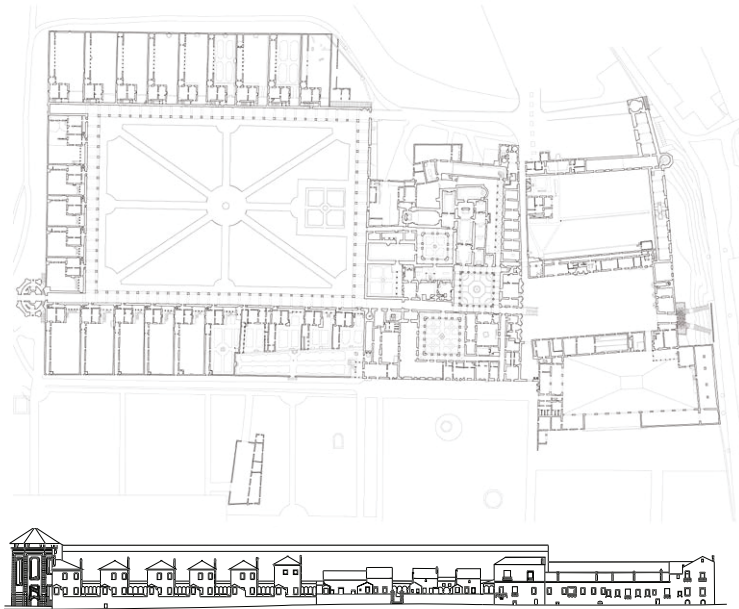


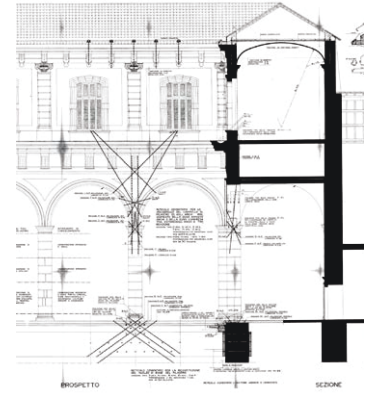
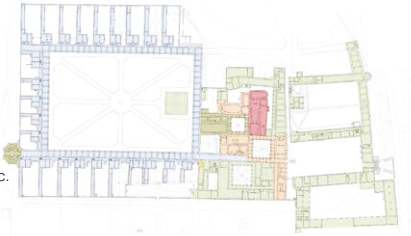
Figura 3.20 – Certosa di San Lorenzo a Padula (SA), definizione del Fattore di Confidenza

¹⁸⁴ Condizioni d'Instabilità Negli Edifici - C.I.N.E. (versione 1.0.4, settembre 2009) disponibile on line ReLUIS http://www.reluis.it/doc/emergenza_terremoto_abruzzo/CINE_1.0.4.xls.

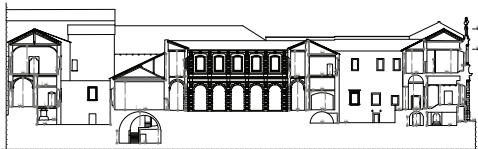
M3_CERTOSA SAN LORENZO, PADULA (SA) - Sintesi elaborati della fase conoscitiva



- prima metà XIV sec.
- prima metà XV sec.
- prima metà XVI sec.
- 1583 - fine XVII sec.
- prima metà XVIII sec.
- seconda metà XVIII sec.



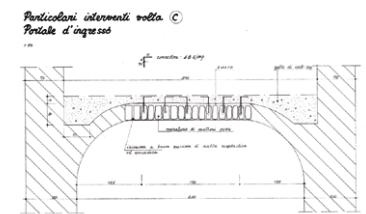
Prospetto



Sezione

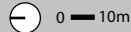


Quadro fessurativo

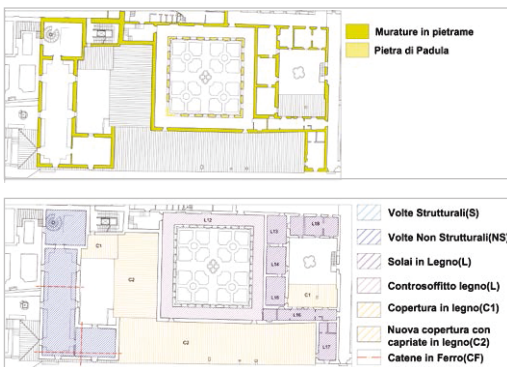


Interventi recenti

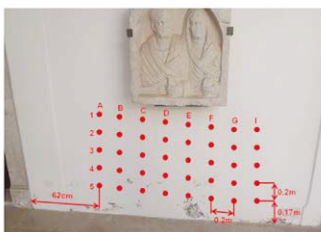
1. Rilievo geometrico



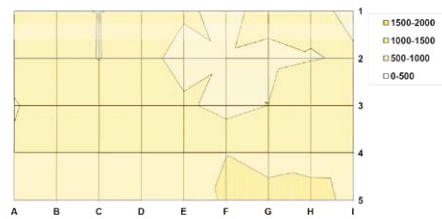
2. Fasi costruttive



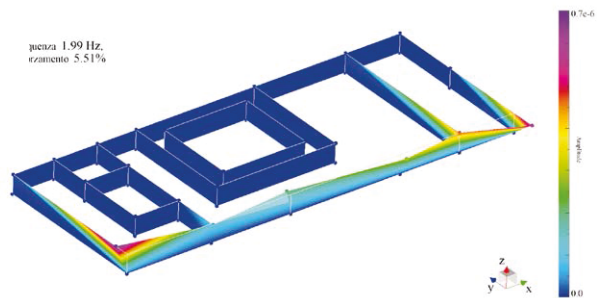
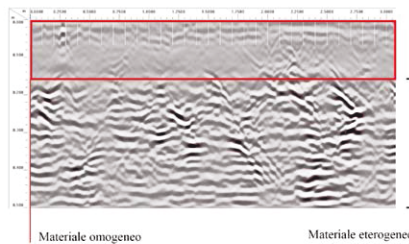
3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



Indagini soniche



Localizzazione e direzione prova georadar
Prova georadar



Identificazione dinamica

4. Indagini specialistiche

M4. CERTOSA DI SAN GIACOMO, CAPRI (NA)

Il complesso monumentale della certosa di San Giacomo è situata su una cima dell'Isola di Capri in prossimità del costone roccioso a strapiombo sul mare nel lato meridionale. Dal 1975 è sede del Museo Nazionale dedicato al pittore tedesco Karl Wilhelm Diefenbach.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

La certosa di San Giacomo sorge su un sito in lieve pendio caratterizzato dalla presenza di terrazzamenti. È caratterizzato dalla presenza di diversi corpi di fabbrica distinti anche per tipologia di impianto strutturale e ciò consente di assimilare il complesso a un aggregato strutturale.

Il complesso architettonico ha un'impronta a terra di circa 13.000 mq (esclusi i chiostri) che si sviluppano per tre livelli, di cui uno seminterrato (sotterranei gotici), per un'altezza media alla gronda di 12 m. Sono evidenti delle irregolarità plano altimetriche dovute alla presenza di corpi di fabbrica aventi caratteristiche di impianto differenti, quali la chiesa; inoltre il sito è caratterizzato dalla presenza di cavità antropiche e cisterne costruite anche a ridosso dei fabbricati.

L'organizzazione e la distribuzione seguono gli schemi tipologici degli impianti certosini. Intorno al chiostro grande sono disposti su tre lati gli alloggi dei monaci, ciascuno costituito da una cella a due livelli coperta a crociera, da un corridoio (passeggiatoio) e da un patio adibito a orto. Sul chiostro piccolo prospetta ad est la chiesa e a ovest la sala del refettorio a tre cellule quadrate affiancate; altri ambienti della vita sociale sono disposti sui due lati restanti, mentre a ovest si trova l'abitazione del priore (quarto del priore). La certosa comprende anche altri edifici isolati all'interno del complesso: una casa che inizialmente ospitava il frate guardiano, la farmacia (o spezieria). A destra una costruzione più piccola, probabile chiesa inferiore dei frati, dopo la Controriforma riservata alle donne, il cui ambiente principale è costituito da una grande sala coperta a botte ad arco rialzato, affiancata da due locali minori.

L'impianto originario della certosa risale al XIV secolo (1363-1365) ed è probabilmente costituito dal chiostro piccolo e la chiesa; è addossata al chiostro piccolo la chiesa principale. La certosa è stata poi ampliata tra il XV e il XVI secolo, al 1400 risale la costruzione della farmacia (restaurata nel 1600).

Con la soppressione degli ordini diventa caserma e di conseguenza è interessata da alcune trasformazioni per adeguarla al nuovo uso (chiusura di vani, rinforzo delle colonne del chiostro piccolo mediante costruzione di un pilastro esterno, costruzione di tetti sopra le volte estradossate).

Durante la Seconda Guerra mondiale la Certosa è progressivamente lasciata in abbandono e alcune sue parti, ancora oggi, versano in uno stato di rudere a causa dell'assenza di un progetto di restauro e rifunzionalizzazione.

Interventi eseguiti negli anni Venti del Novecento, sono attuati per adibire la certosa a ginnasio e riguardano la costruzione di alcuni muri per disimpegnare alcuni ambienti e la demolizione di muri per ampliarne di altri. Sotto il Soprintendente Gino Chierici sono liberate le colonne del

chostro piccolo, demolite le coperture delle volte estradossate e altri lavori di restauro architettonico.

La struttura di elevazione è caratterizzata da una generale omogeneità della tecnica costruttiva che vede l'uso prevalente di muratura di tufo con tessitura di media qualità. Gli orizzontamenti sono in gran parte volte in muratura estradossate.

Le difficoltà della fase di conoscenza della certosa sono in gran parte ascrivibili alle ingenti dimensioni del complesso monumentale che, per un verso, possono implicare lo studio per parti del fabbricato.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale del complesso architettonico è stata restituita effettuando un controllo a campione dei rilievi esistenti utilizzando una strumentazione tradizionale.

Il quadro fessurativo è stato rilevato in modo puntuale distinguendo per ogni lesione l'elemento strutturale su cui è rilevata e l'entità. Sulla base di questi risultati per l'aspetto "Rilievo geometrico" è scelto un $F_{C1}=0$.

La storia costruttiva è delineata con il supporto di una ricerca bibliografica e archivistica. Le trasformazioni rilevate dalle fonti sono di seguito controllate direttamente sul complesso architettonico col supporto di indagini non distruttive (termografie). Non sono evidenziati i punti di cesura tra i muri.

Lo studio condotto sui dettagli costruttivi è finalizzato alla elaborazione di un giudizio qualitativo sugli elementi strutturali. Le informazioni sulla tecnica costruttiva sono desunte da fonti bibliografiche sulla tecnica costruttiva locale, dal rilievo diretto e da indagini diagnostiche non distruttive (prove soniche).

Riguardo l'aspetto "Identificazione delle specificità storiche e costruttive è scelto" $F_{C2}=0$.

Riguardo l'aspetto "parametri meccanici" è eseguita un'analisi di sensitività ai parametri meccanici e geometrici affetti da incertezza. I risultati evidenziano che i parametri meccanici non influenzano in modo sostanziale il comportamento strutturale. Non sono svolte indagini di caratterizzazione per cui è scelto cautelativamente $F_{C3}=0,12$ e i valori minimi per le resistenze e medi per i moduli di elasticità della tabella C8A.2.1.

Riguardo il quarto aspetto della conoscenza "terreno e fondazioni" sono considerati i risultati dello studio di caratterizzazione geofisica del terreno eseguito dal CNR-IGAG e altre indagini pregresse, per cui è scelto $F_{C4}=0$.

Dalla sommatoria dei succitati fattori parziali deriva il valore globale di $FC=1,12$.

Interpretazione delle informazioni

Sono state svolte verifiche secondo i tre livelli di valutazione LV1, LV2 e LV3.

A valle della disamina conoscitiva, il complesso architettonico è suddiviso in corpi di fabbrica differenti a seconda del comportamento sismico (globale o locale) ritenuto prevalente a valle del percorso di conoscenza. I fabbricati a sud del chiostro grande, attualmente allo stato di rudere, e quelli a nord – compresa la chiesa - sono analizzati mediante verifiche locali; mentre gli ambienti a est e ovest del chiostro grande e gli edifici isolati, sono verificati secondo modelli globali e locali.

La valutazione secondo LV1 è eseguita utilizzando un foglio di calcolo e non mediante piattaforma SIVARS, sia per il mancato aggiornamento di quest'ultimo alla normativa vigente sia per la complessità del manufatto.

Per la valutazione LV2 sono mostrate le analisi riferite al modulo della cellula certosina (14,33m x 8,23m per altezza pari a 5,2m e spessore murario di circa 80 cm) e i meccanismi analizzati riguardano il ribaltamento semplice parziale o totale della parete affacciata sull'orto. Sono studiati meccanismi diversi in base al livello di vincolo attribuito alle pareti di spina (ammorsamenti efficaci o no), secondo l'analisi cinematica lineare e non lineare.

Per le verifiche LV3 è eseguita un'analisi statica non lineare (push-over) su modelli formulati secondo l'approccio a telaio equivalente.

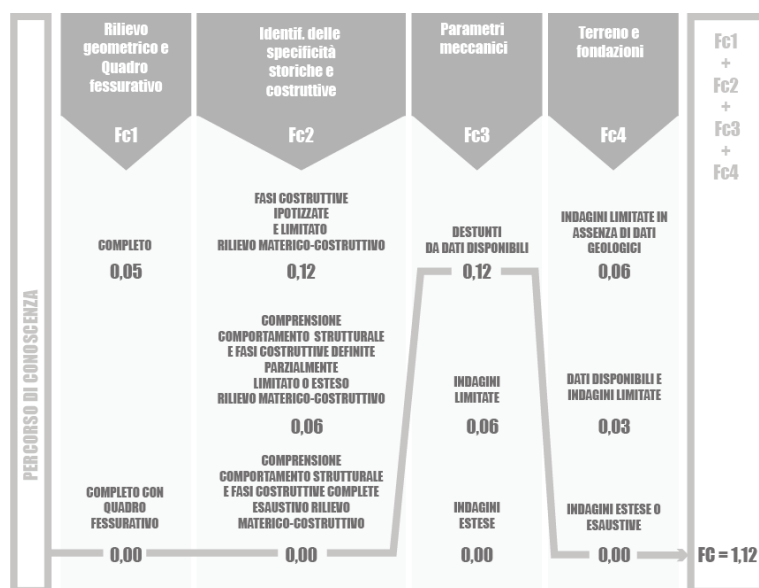
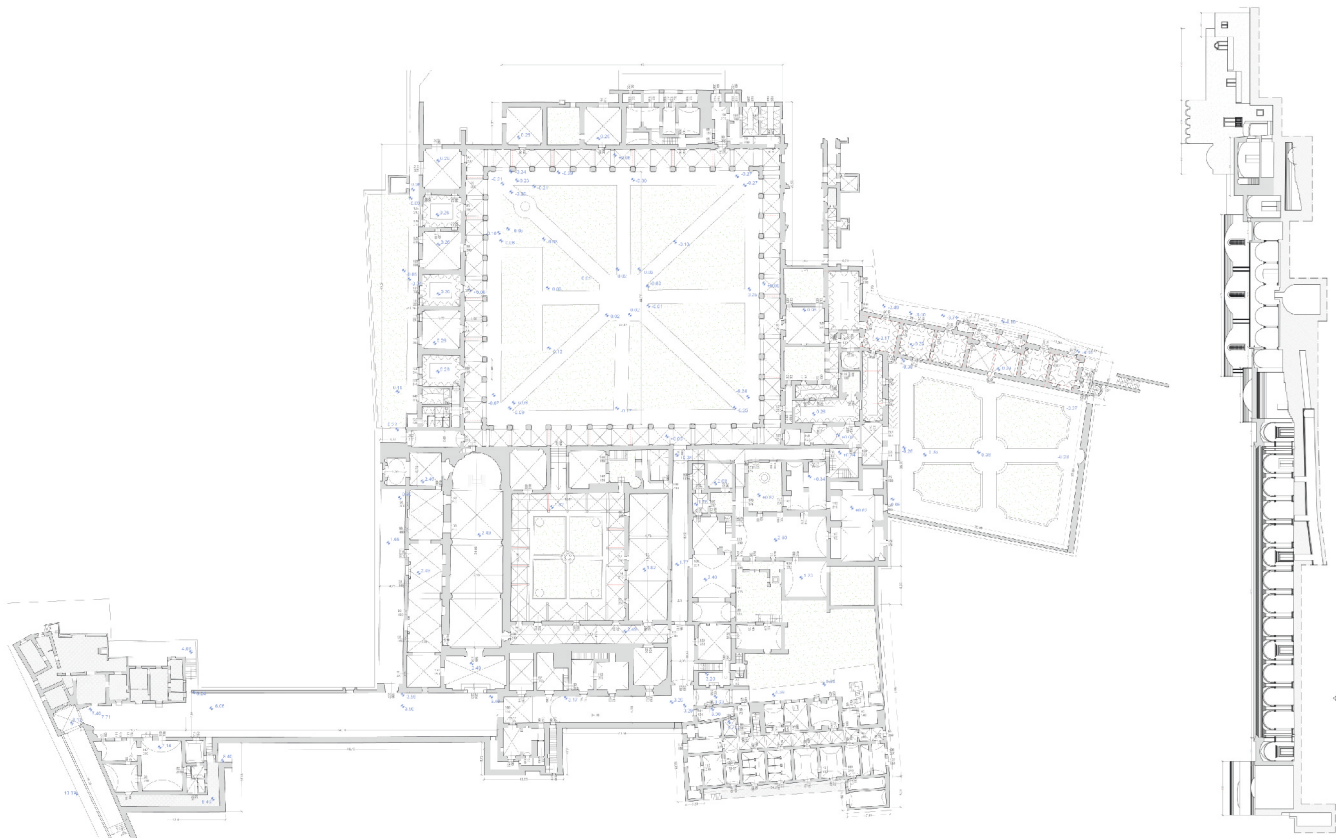


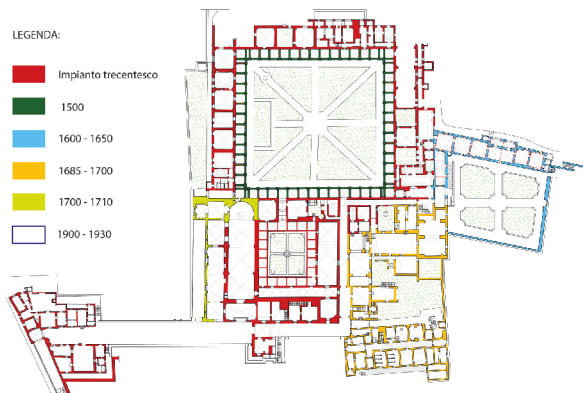
Figura 3.21 – Certosa di San Giacomo a Capri (NA), definizione del Fattore di Confidenza



1. Rilievo geometrico 0 10m

LEGENDA:

- Impianto trecentesco
- 1500
- 1600 - 1650
- 1685 - 1700
- 1700 - 1710
- 1900 - 1930



Parete absidale e copertura della Chiesa dopo il restauro del 1927



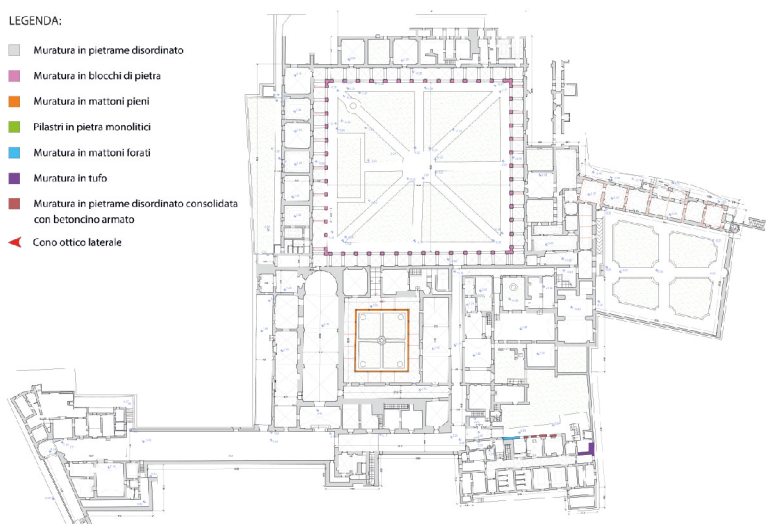
Parete absidale e copertura della Chiesa prima del restauro del 1927



2. Fasi costruttive

LEGENDA:

- Muratura in pietrame disordinato
- Muratura in blocchi di pietra
- Muratura in mattoni pieni
- Pilastri in pietra monolitici
- Muratura in mattoni forati
- Muratura in tufo
- Muratura in pietrame disordinato consolidata con betoncino armato
- ◀ Cono ottico laterale



3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo

M5. ABBAZIA DI CASAMARI, VEROLI (FR)

L'abbazia di Casamari si trova nel territorio del comune di Veroli, in provincia di Frosinone ed è uno dei più importanti monasteri italiani di architettura gotica cistercense.

Caratteristiche storiche e morfologiche

Il complesso monumentale è costruito su un sito in lieve pendenza e si estende per una superficie di circa 3400 mq. L'impianto è tipico dell'architettura cistercense e prevede oltre la chiesa diversi corpi di fabbrica (un tempo edifici conventuali) quali l'edificio oggi adibito a museo e il refettorio, che si affiancano ortogonalmente alla chiesa definendo il chiostro a pianta quadrata racchiuso sui quattro lati da gallerie voltate; dal refettorio si dipartono con direzione obliqua gli edifici stretti e lunghi della foresteria, dell'ufficio parrocchiale e della residenza dell'abate.

La chiesa ha dimensione longitudinale pari a 61 m e trasversale pari a 21 m per un'altezza media pari a 25 m. L'edificio del museo ha un'impronta a terra di circa 550 mq e si estende in alzato per quattro livelli fuori terra più sottotetto, sfruttando il lieve pendio che consente la formazione di un piano seminterrato. Il refettorio si sviluppa per circa 910 mq di superficie e si estende in alzato per tre livelli fuori terra più sottotetto (un piano è seminterrato) per un'altezza media alla gronda di circa 21 m. L'edificio che comprende l'abitazione dell'abate ha una superficie di circa 290 mq, ha due elevazioni fuori terra per un'altezza media alla gronda di 20 m. La foresteria si sviluppa per circa 300 mq per tre livelli fuori terra, così come l'adiacente ufficio parrocchiale, che ha una superficie di circa 230 mq.

L'impianto strutturale dei vari corpi di fabbrica è caratterizzato da una maglia muraria piuttosto irregolare ai vari livelli; elemento a se rimane la chiesa, a croce latina con aula a tre navate voltate a crociera. I fabbricati della foresteria e dell'ufficio parrocchiale, di forma rettangolare allungata, sono caratterizzati dall'assenza di muri di spina che superano i 20 cm, o da grandi ambienti a due campate individuate da pilastri e volte a crociera. Il museo ha un impianto più compatto con cellule murarie rettangolari e grandi ambienti suddivisi in campate da pilastri e volte a crociera.

La storia costruttiva dell'abbazia è legata alle esigenze dei monaci fruitori che l'hanno occupata nel tempo. L'impianto originario (XIII secolo) prevede la chiesa con affiancati gli edifici che si sviluppano attorno al chiostro. Nel XVIII secolo l'abbazia è interessata dalla costruzione di nuovi edifici (foresteria e casa dell'abate) che si affiancano all'impianto cistercense. Ulteriori trasformazioni sono ascrivibili al XIX secolo e riguardano l'ampliamento della casa dell'abate, la costruzione di una nuova sagrestia addossata alla chiesa. Le trasformazioni più recenti sono avvenute nell'ambito di interventi di consolidamento nel XX secolo. Nel 1915, a seguito del terremoto di Avezzano, sono eseguiti lavori di consolidamento che prevedono l'introduzione di catene e il rifacimento di alcuni tetti. Tra il 1978 e il 1988 sono eseguiti interventi di consolidamento statico che hanno previsto l'introduzione di solai in latero cemento e l'inserimento di cordoli in cemento armato.

Riguardo la tecnica costruttiva, il complesso è caratterizzato da una generale omogeneità. La struttura di elevazione degli edifici - totalmente in muratura portante - è priva di intonaco di finitura, per cui sono ben visibili le tessiture murarie caratterizzate da elementi in pietra calcarea e lievemente differenti in base alla fase costruttiva.

Gli orizzontamenti sono prevalentemente volte in pietra sbozzata e poggiano sui muri portanti ovvero sui pilastri.

Le difficoltà della fase conoscitiva sono indubbiamente connesse alle dimensioni estese del complesso architettonico. Di contro, le informazioni sulle tecniche costruttive sono a vista e consentono una più coerente comprensione della compagine strutturale oltre che delle fasi evolutive.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale è stata ottenuta mediante un controllo sistematico dei rilievi esistenti integrati con rilievo laser-scanner con un rilievo topografico eseguito con stazione totale. Il quadro fessurativo è stato documentato mediante fotoraddrizzamenti realizzati con specifici software.¹⁸⁵ In questo caso, l'osservazione sistematica delle lesioni ha chiarito l'assenza di dissesti in atto dovuti a cedimenti fondali, per cui si può asserire che le strutture fondali dell'edificio poggiano su un terreno stabilizzato.

Il fattore di confidenza scelto per l'aspetto "Rilievo geometrico" è $F_{C1}=0$.

La storia costruttiva dell'abbazia è ricostruita mediante ricerca bibliografica e di archivio elaborando una cronistoria ragionata di tutti gli eventi più importanti. Le fasi evolutive sono state ipotizzate anche sulla scorta di confronti tipologici con impianti architettonici analoghi. Infine, le informazioni su cesure e soluzioni di continuità sono state riscontrate direttamente sul manufatto seguendo il metodo stratigrafico¹⁸⁶ e riportate nell'elaborato del rilievo critico.

Riguardo la tecnica costruttiva, gli elementi strutturali sono descritti attraverso disegni di assieme e di dettaglio. Le murature sono indagate anche mediante piccoli saggi che consentono di individuare la disposizione delle pietre nello spessore. Per ogni tipologia muraria è definito l'IQM accompagnato da un giudizio sulla qualità delle diverse tipologie murarie. Riguardo l'aspetto "Identificazione delle caratteristiche storiche e costruttive" è scelto un $F_{C2}=0,06$.

Sono state effettuate anche prove sui materiali (martinetti piatti) in numero contenuto rispetto alla mole dell'edificio. Sono state effettuate anche delle prove a compressione del materiale lapideo che costituisce ogni tipologia muraria individuata (prelievo pietra dal muro); a valle di queste prove, i parametri meccanici sono selezionati dalla tabella C8A2.1. Su questo aspetto è scelto $F_{C3}=0,06$.

¹⁸⁵ Photoscan e 3D Rasper

¹⁸⁶ Cfr. ad esempio F. Doglioni, *Stratigrafia e restauro. Tra conoscenza e conservazione dell'architettura*, Lint, 1997.

Riguardo l'aspetto "Terreno e fondazioni" sono stati eseguiti pozzetti di ispezione per verificare il piano di spiccato; sono inoltre presenti delle indagini sul terreno (sondaggi geognostici). Alla luce dei dati reperiti è $F_{C4} = 0,06$.

Dalla sommatoria dei fattori parziali è ottenuto un fattore di confidenza pari a $FC = 1,12$.

Interpretazione delle informazioni

Il giudizio qualitativo proveniente dalla conoscenza del fabbricato è in generale positivo ed è suffragato dal giudizio sulla qualità delle murature e degli orizzontamenti. Non emergono particolari situazioni di precarietà strutturali.

Sono state svolte verifiche secondo i tre livelli di valutazione LV1, LV2 e LV3.

Per la esecuzione delle verifiche sono considerati modelli distinti per ciascun corpo di fabbrica che costituisce l'abbazia.

Per la valutazione LV1 la chiesa è analizzata considerando modelli semplificati per le strutture a grandi aule prive di orizzontamenti intermedi, mentre per gli altri fabbricati è adoperato il modello "palazzi" (strutture con orizzontamenti intermedi e muri di spina).

Riguardo le verifiche LV2 e LV3, i criteri rimangono i medesimi. In particolare, la sicurezza sismica della chiesa è valutata con modelli locali che considerano i macroelementi, mentre per gli edifici sono eseguite verifiche di meccanismi locali (LV2) e verifica globale push-over (LV3) considerando il modello a telaio equivalente.

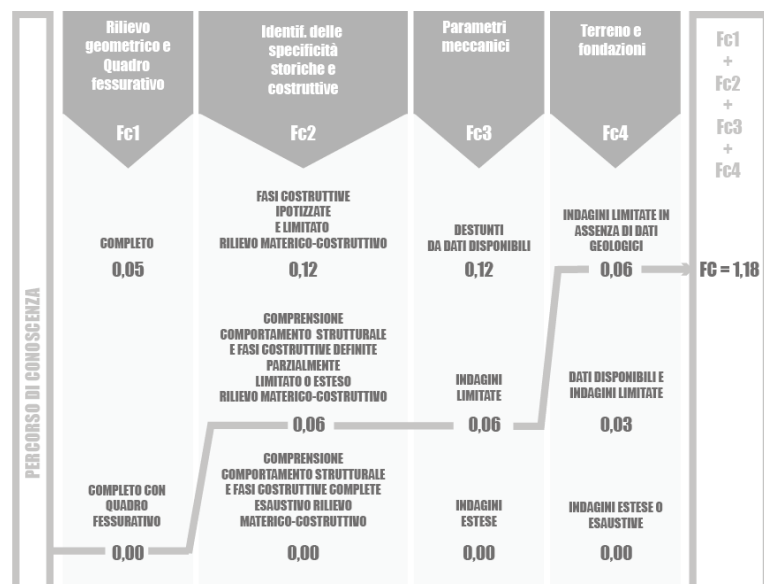
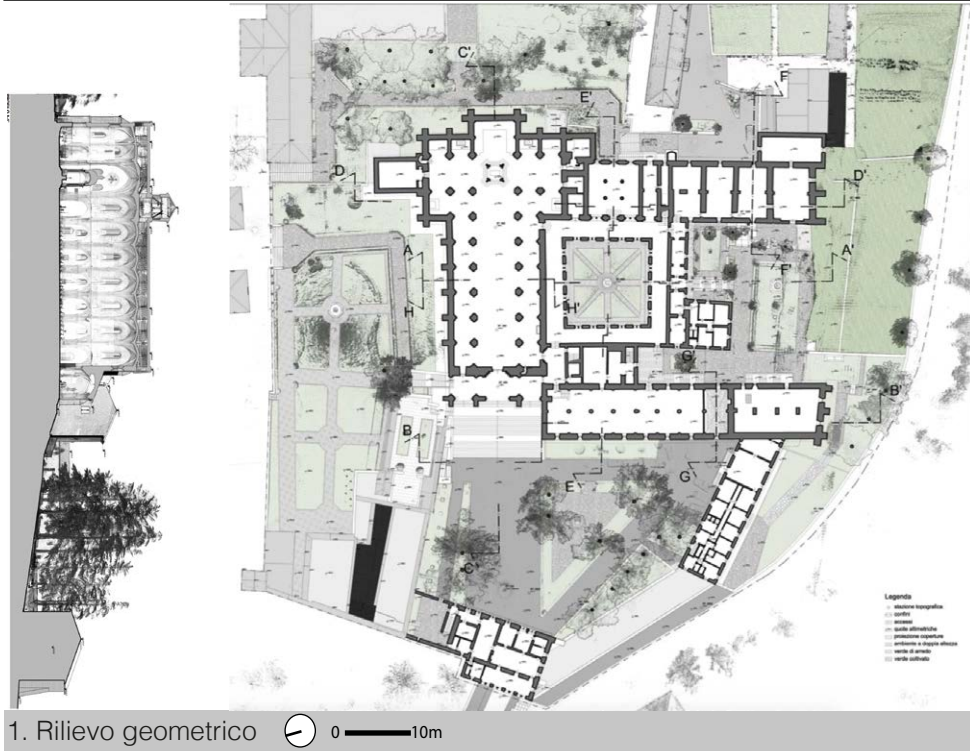


Figura 3.22 – Abbazia di Casamari a Veroli (FR), definizione del Fattore di Confidenza



1. Rilievo geometrico 0 10m

Legenda

Muratura

- TIPO A**
CONCI
SQUADRATI -
CONTRAFFORTI
- TIPO B**
BLOCCHI DI
RIUSO
- TIPO C**
PEZZAME A
FILARI REGOLARI
- TIPO D**
PEZZAME A
FILARI IRREGOLARI
- TIPO E**
PEZZAME A
FILARI IRREGOLARI
CON RIPIANAMENTI
IN LATERIZI

CARATTERIZZAZIONE MECCANICA

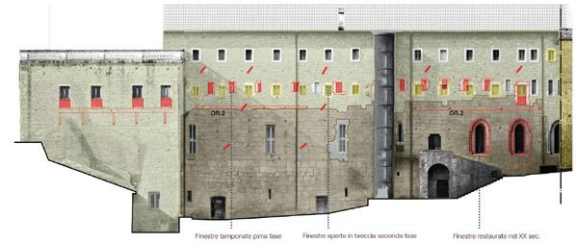
- S06 SCHEDE DI RILIEVO DELLA STRUTTURA MURARIA
- ▨ SF-02 SAGGIO DELLA STRUTTURA DI FONDAZIONE
- MP 01 PROVA CON MARTINETTI PIATTI DOPPI

CARATTERIZZAZIONE DINAMICA

- BIBLIOTECA
- CHIESA
- A 1-2-3 ACCELEROMETRI POSTI NEL PIANO TERRA LIVELLO 0
- A 9 ACCELEROMETRI POSTI NEL PIANO TERRA LIVELLO 0 (+8.00 M)
- A 4-5-6 ACCELEROMETRI POSTI NEL PIANO PRIMO LIVELLO 1
- A 1-2-5-6-7 ACCELEROMETRI POSTI SOPRA LE VOLTE LIVELLO 1 (+27.50 M)
- A 7-8-9 ACCELEROMETRI POSTI NEL SOTTOTETTO LIVELLO 2
- A 3-4 ACCELEROMETRI POSTI NEL CAMPANILE LIVELLO 2
- A 6 ACCELEROMETRI POSTI NEL CAMPANILE LIVELLO 3



XII - XIV sec
fine XIV - inizi XVIII sec
fine XIX sec
stato attuale



2. Fasi costruttive - rilievo critico

Descrizione

Muratura composta da conci tagliati in maniera regolare. Il paramento esterno è costituito da blocchi di pietra squadrata con buona tessitura.

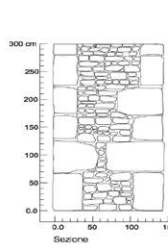
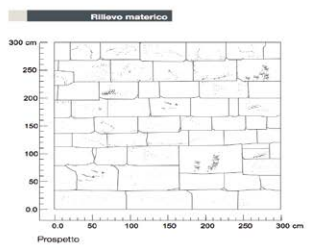
Elementi

TIPO A
Materiale: pietra calcarea
 lavorazione: squadrata
 molto, carata aerea
 apparecchiatura: regolare

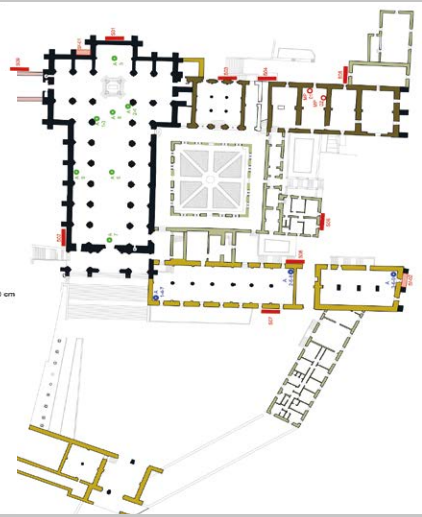
Dimensioni: ricoperti dei blocchi:
L: 110 - 150 cm
S: 30-40 cm
H: 40-45 cm

Definizione N.T.C. 2008

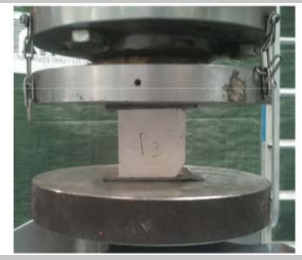
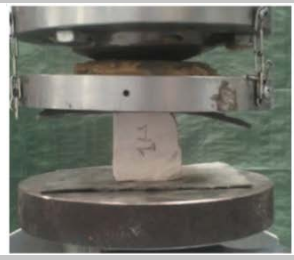
Muratura in blocchi lapidei squadrati					
Cl.	(N/area)	(N/area)	(N/area)	(N/area)	(N/area)
Mis. max	600	600	600	600	600
Mis. min	400	400	400	400	400
Sp. max	120	120	120	120	120
Sp. min	80	80	80	80	80



Modello a Elementi distinti



3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



4. Indagini specialistiche

M6. EX CONVENTO DI SANTA MARIA DEGLI ANGELI, SALERNO

L'ex convento cappuccino di Santa Maria Degli Angeli oggi ospita l'Antiquarium di Sala Consilina, la Biblioteca Comunale e una sala convegni nei locali della chiesa. L'edificio è stato restaurato tra il 2004 e il 2014.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

L'ex convento costituisce un complesso isolato che all'interno del suo impianto comprende una chiesa - ad aula unica con cappelle su un lato - e accanto i locali con gli ambienti di servizio e le celle dei frati; non sono presenti altri edifici posti in aggregato.

Il sito su cui sorge il manufatto è caratterizzato da una lieve pendenza che permette la formazione di un piano seminterrato.

Oggi l'edificio si estende per circa 690 mq di impronta a terra per 6,50 m di altezza media alla gronda per le due elevazioni fuori terra a monte, e 13,40 m per le tre elevazioni a valle.

L'attuale compagine strutturale dell'edificio è stata oggetto di un intervento di adeguamento sismico conclusosi solo nel 2014, che ha rappresentato la trasformazione più incisiva che il complesso abbia mai subito nella sua storia costruttiva. Sebbene non siano disponibili molte fonti documentarie che attestino i cambiamenti occorsi nei secoli dal 1573 (anno di costruzione della fabbrica), sembra che la chiesa sia interessata da lavori nel periodo barocco - risalgono probabilmente a questo periodo le cappelle laterali - e ciò permette di supporre che anche il convento abbia subito delle modifiche, dettate soprattutto dalla crescente richiesta di alloggi per i frati. Tuttavia queste modificazioni non sono state mai radicali e il complesso ha conservato il suo impianto originario fino alla metà del XX secolo, quando - adibito a caserma militare - le celle dei frati sono state trasformate in ampie camerate.

Con gli interventi del 2004 sono state consolidate gran parte delle murature e degli orizzontamenti. In particolare, le strutture del piano seminterrato sono state consolidate con intonaco armato, gli orizzontamenti dei piani superiori sono stati sostituiti con solai in latero-cemento; inoltre, sono state modificate le strutture e le geometrie di alcune falde di copertura, e regolarizzati alcuni fronti modificando o tamponando delle aperture.

Il risultato di questi ultimi lavori rimane in gran parte non visibile, fatta eccezione per la palese modifica di due falde, e ciò che adesso si può ancora percepire è l'impostazione della maglia muraria, abbastanza compatta al piano seminterrato e al piano terra, meno densa al piano primo per l'assenza della spina centrale che individua il corridoio di distribuzione delle ex celle.

Le informazioni sulla tecnica costruttiva oggi sono coperte dall'intonaco, ma le foto di cantiere mostrano le preesistenze e le strutture di sostituzione. Al piano terra è presente una muratura in pietra sbazzata, mentre al primo livello la muratura è in conci di tufo.

In questo caso, l'acquisizione di una conoscenza congrua di questo edificio è determinata dalla possibilità di comprendere l'efficacia degli interventi di consolidamento del XXI secolo, che hanno radicalmente trasformato il comportamento strutturale della fabbrica, con interventi slegati dalla logica costruttiva muraria. Un supporto potrebbe provenire dalla lettura degli effetti del terremoto su costruzioni interessate dai medesimi interventi, ma questo non è sempre possibile; dunque è forse opportuno eseguire delle indagini ad hoc.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale del complesso architettonico è stata restituita effettuando probabilmente un controllo a campione dei rilievi disponibili – sono presenti poche quotature nei disegni – escludendo l'area occupata dalla chiesa, di cui però sono allegati i rilievi pregressi. Dagli elaborati non è possibile accertare le metodologie utilizzate per l'assenza di una relazione descrittiva.

Il quadro fessurativo non è rilevante – grazie ai lavori recenti – ma sono evidenziate alcune situazioni di degrado che potrebbero degenerare. Sulla base di questi risultati è scelto un $F_{C1}=0$.

La storia costruttiva è delineata con il supporto di una ricerca bibliografica e archivistica. Alcune trasformazioni operate nelle facciate sono attestate da un controllo in situ effettuato col supporto di termografie su discontinuità costruttive e aperture tamponate. Non si rileva una lettura d'insieme dei risultati dell'analisi storico-critica; in alcune planimetrie schematiche sono illustrate le modifiche di destinazione d'uso degli spazi, ma non sono evidenziate le trasformazioni a livello di impianto strutturale o consistenza edilizia, che rimangono in parte riassunte in brevi descrizioni testuali. Sono elaborati alcuni confronti ante e post intervento 2004 per illustrare le trasformazioni dell'impaginato delle facciate.

Lo studio condotto sui dettagli costruttivi è finalizzato alla elaborazione di un giudizio qualitativo sugli elementi strutturali; le informazioni sono dedotte dai progetti trascorsi (foto del cantiere 2004) e da indagini specifiche eseguite per lo studio in esame, concentrate principalmente sulle murature (termografie, soniche, martinetti piatti singoli e doppi). Non sono eseguiti disegni d'insieme o di dettaglio degli assemblaggi e negli elaborati grafici si trovano esclusivamente la collocazione delle indagini. Alla luce dei risultati raggiunti in questa fase di analisi è scelto un $F_{C2}=0,06$.

I parametri meccanici sono stati indagati con prove debolmente distruttive eseguite nelle murature del piano seminterrato, a seguito delle quali sono stati comunque scelti i valori indicati dalla tabella C8A.2.1 (valori medi). Il fattore parziale scelto per questo aspetto è pari a $F_{C3}=0$.

Considerazioni analoghe valgono per il quarto aspetto della conoscenza, terreno e fondazioni, per il quale sono eseguite indagini specifiche di caratterizzazione del suolo, di risposta sismica

locale (RLS) ed è approntato uno schema geometrico delle strutture di fondazione. Alla luce di questi risultati è scelto $F_{C4}=0$.

Dalla sommatoria dei succitati fattori parziali deriva il valore globale di $FC=1,06$.

Interpretazione delle informazioni

Il giudizio qualitativo proveniente dalla conoscenza del fabbricato è in generale positivo, viste le considerazioni sulla qualità delle murature. Non sono sottolineate particolari situazioni di precarietà o deficienze strutturali, ma va sottolineato che il complesso è stato di recente oggetto di adeguamento sismico.

Sono state svolte verifiche secondo i tre livelli di valutazione LV1, LV2 e LV3.

Il primo livello di valutazione è eseguito utilizzando il SIVARS, con un modello strutturale estremamente semplificato. I risultati indicano una buona risposta dei primi due livelli fuori terra, grazie agli interventi di consolidamento e una risposta meno buona del piano di sottotetto.

LV2 è stato eseguito verificando la risposta al meccanismo di primo modo di macroelementi individuati in pareti perimetrali non trattenute da muri di spina o da tiranti, ovvero muri interessati da modifiche del prospetto e da discontinuità costruttive.

LV3 è stato condotto eseguendo una verifica globale push-over con un modello giudicato più coerente con il comportamento reale dell'edificio, non vulnerabile a meccanismi locali. I risultati delle verifiche confermano l'apporto positivo del vincolo imposto dalla chiesa e una generale buona risposta del fabbricato.

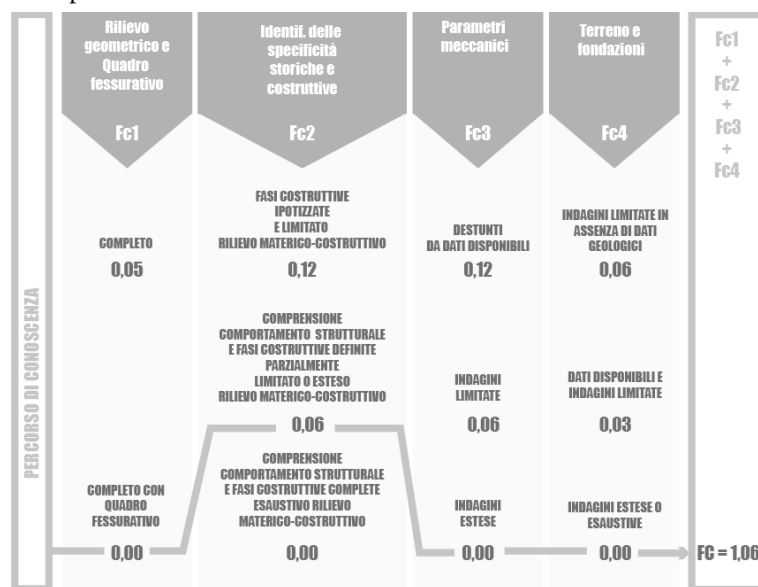
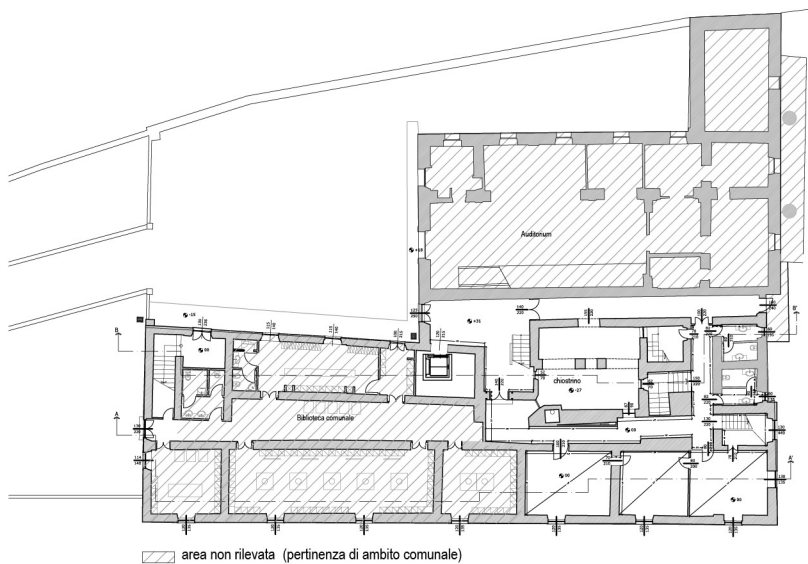
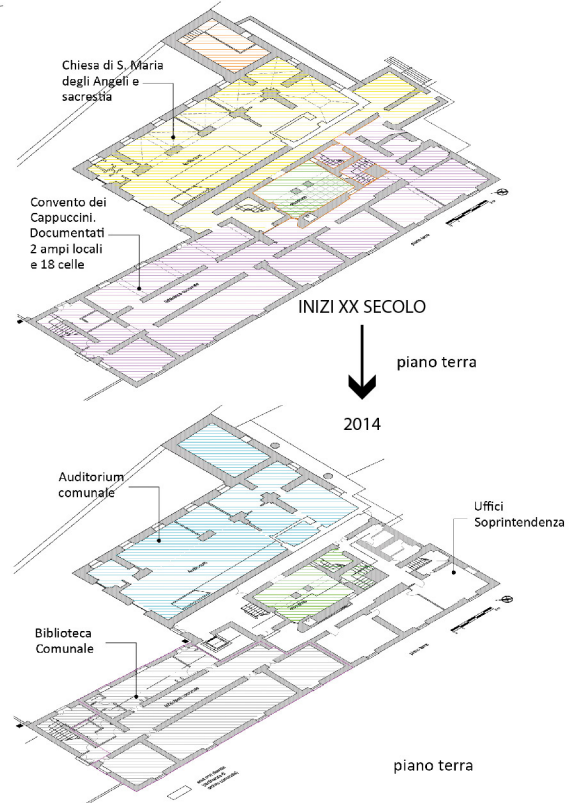


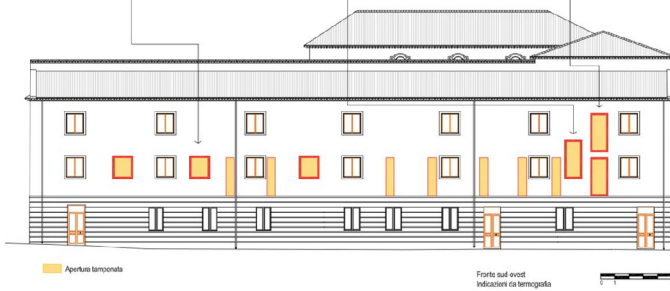
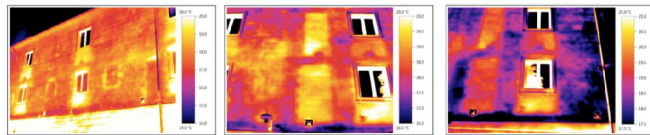
Figura 3.23 – Ex convento di Santa Maria degli Angeli (SA), definizione del Fattore di Confidenza



area non rilevata (pertinenza di ambito comunale)

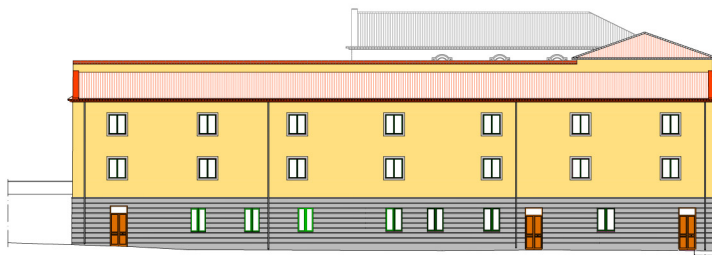


1. Rilievo geometrico

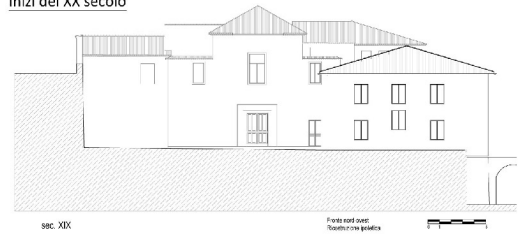


Aperture termovante

Fronto sud-ovest
Indicazioni da termogestore



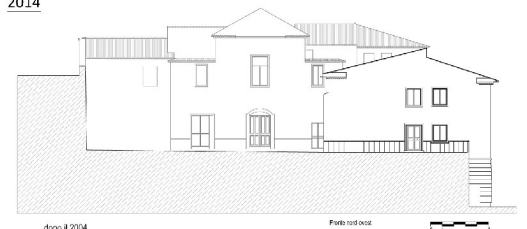
Inizi del XX secolo



sec. XIX

Fronto sud-ovest
Ricostruzione ipotetica

2014

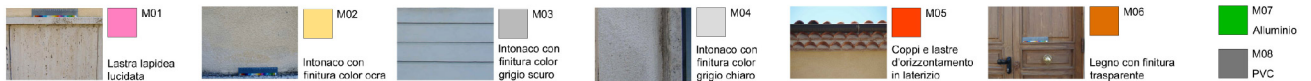


dopo il 2004

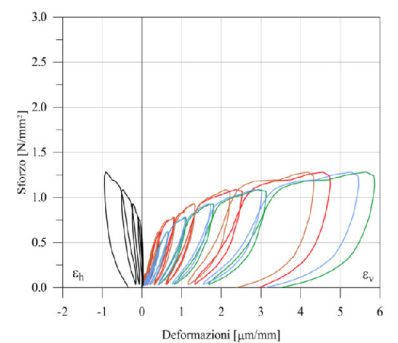
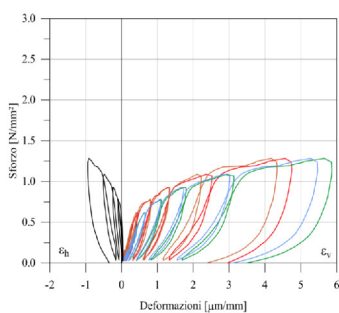
Fronto sud-ovest

2. Fasi costruttive - trasformazioni

LEGENDA DEI MATERIALI



4. Rilievo materico



3. Indagini specialistiche

M7. EX CONVENTO DI SAN DOMENICO, PERUGIA

Il complesso dell'ex convento di San Domenico sorge nel centro storico di Perugia affiancato alla basilica omonima. Il convento è oggi sede del Museo Archeologico Nazionale dell'Umbria, degli uffici della Soprintendenza per i Beni Archeologici di Perugia e dell'Archivio di Stato.

Caratteristiche storiche e morfologiche

Il convento di San Domenico è addossato alla basilica omonima e con essa costituisce un aggregato strutturale. Si sviluppa su un sito in lieve pendenza che permette la formazione di un piano seminterrato sul lato orientale.

Il complesso è costituito da un impianto planimetrico che si sviluppa attorno a due chiostri di diverse dimensioni - il chiostro piccolo a ovest e il chiostro grande a est – per una superficie di impronta a terra pari a circa 10.000 mq compresi gli spazi aperti. Sono presenti evidenti irregolarità planoaltimetriche dovute alle differenti altezze dei corpi che costituiscono il convento, ma soprattutto rispetto alla compagine della basilica adiacente e il campanile. I volumi che definiscono il chiostro piccolo sono a tre elevazioni fuori terra per un'altezza media alla gronda pari a circa 13 m, mentre i volumi che individuano il chiostro grande sono a due elevazioni per un'altezza media pari a circa 9,50 m.

La configurazione attuale è frutto di una articolata storia costruttiva che ha inizio con la fondazione nel XIII secolo della chiesa di San Domenico “vecchio” – ad aula divisa in tre navate e abside quadrangolare – orientata in direzione est-ovest e di un piccolo convento a un livello addossato probabilmente sull'angolo sud. Il primo ampliamento del convento è avviato tra il XIV e il XV secolo e comprende: l'ampliamento e la sovrelevazione del convento da adibire a dormitorio e il suo prolungamento per alloggiare il refettorio; la costruzione di due bracci ortogonali a L a due elevazioni che, accostati alle preesistenze, definiscono l'attuale “chiostro piccolo”; a questo periodo (1304-1459) risale la costruzione della nuova basilica di San Domenico. Una terza fase prevede la costruzione dei bracci sud-est e sud-ovest del “chiostro grande” (1455-1480). Nella seconda metà del 1500 sono costruiti i restanti bracci del chiostro grande, e altre modifiche sono attuate sulle preesistenze, come il portico sul lato est del dormitorio e suo ampliamento in corrispondenza dell'abside della chiesa. Nel XVII secolo il convento è interessato dall'ampliamento del refettorio, prolungandolo verso sud. Nel XVIII secolo è costruita l'ala del nuovo noviziato, addossato a est della vecchia chiesa (lato absidale) e altri vani nella zona interclusa tra la chiesa di San Domenico e il chiostro grande; sono inoltre eseguiti lavori di ammodernamento dei chiostri.

In seguito alla soppressione degli ordini religiosi (1868), il convento è adibito a caserma militare. Il cambio di destinazione d'uso implica modifiche distributive e altre superfetazioni. Dopo la Seconda Guerra Mondiale il convento – ormai di proprietà del Comune - è adibito in parte a Muse Civico e ad Archivio di Stato a seguito di lavori di adeguamento che hanno previsto la demolizione delle superfetazioni di fine Ottocento. A partire dagli anni '80 il convento è stato interessato da lavori di adeguamento funzionale per l'insediamento degli uffici della Soprintendenza. Dopo il sisma del 1997, sono eseguiti interventi di pronto intervento che consistono nell'inserimento di presidi atti a evitare il ribaltamento fuori piano di alcune

pareti. Sempre agli anni '90 sono ascrivibili: interventi di consolidamento delle volte mediante svuotamento e nuovo riempimento con materiale leggero e realizzazione di solaio sovrastante in travi metalliche e tavelloni con soletta armata; la cerchiatura di vani porta. Lavori realizzati intorno al 2002 riguardano il consolidamento in fondazione di una parte del Museo mediante paratia di micropali collegati con cordolo in c.a. sommitale.

Le complesse vicende storiche implicano una sostanziale eterogeneità delle tecniche costruttive che investe soprattutto le strutture orizzontali. La struttura di elevazione del complesso architettonico è totalmente in muratura portante e in parte coperta da intonaco. Sono presenti più tipologie murarie appartenenti a epoche costruttive diverse: muratura in blocchi squadriati, in pietra sbazzata con buona tessitura (con e senza ricorsi) o tessitura scadente (con e senza ricorsi), in mattoni pieni; murature in blocchi di cls e setti di cemento armato sono introdotti in epoca recente. Gli orizzontamenti sono volte in muratura di mattoni pieni tessuti in foglio o di fascia con geometria a botte o a crociera; sono presenti anche solai in legno, solai in putrelle e tavelloni, in laterocemento, con travi d'acciaio e griglie di impalcato (o lamiera grecata), con travetti prefabbricati e tavelloni. Le coperture sono con capriate lignee, ovvero in latero-cemento o in putrelle e tavelloni.

Le informazioni sulle tecniche costruttive e sui materiali utilizzati sono spesso a vista e il materiale d'archivio disponibile (perizie, foto di cantiere, ecc.) è esaustivo dei lavori eseguiti; sono esigue anche le fonti documentarie che riportano gli eventi costruttivi antecedenti al XX secolo.

La mancata visibilità delle suddette informazioni rappresenta un elemento importante nella determinazione di vuoti conoscitivi, comunque colmabili attraverso l'esecuzione di indagini anche non distruttive.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La restituzione della geometria strutturale è conseguita mediante il controllo sistematico dei rilievi disponibili, verificando gli spessori murari, la luce di solai e volte, le altezze di interpiano, evidenziando eventuali disallineamenti in alzato, il tutto con strumentazione tradizionale. Il quadro fessurativo e deformativo è rilevato sistematicamente e riportato in elaborati grafici specifici. Per l'aspetto "Rilievo geometrico" è quindi scelto un fattore parziale $F_{C1}=0$.

La ricostruzione delle trasformazioni subite dal manufatto è stata definita con il supporto della ricerca archivistica e bibliografica, verificando con il riscontro sul campo le informazioni delle fonti indirette. I risultati dell'analisi hanno guidato la definizione del piano di indagini specialistiche sulle murature e sugli altri elementi strutturali, che non è stato eseguito per problemi amministrativi. La sintesi della conoscenza sulle fasi evolutive è rappresentata da planimetrie in cui le murature sono campite con colori differenti in base all'epoca di costruzione. Gli elementi strutturali sono indagati mediante rilievo visivo e catalogati per tipologia. Sono quindi redatte delle planimetrie con individuate le zone ispezionate e i dettagli rilevati.

Riguardo l'aspetto "Identificazione delle specificità storiche e costruttive" è scelto un fattore parziale pari a $F_{C2}=0,06$.

Non sono state svolte prove per la caratterizzazione meccanica dei materiali, e questi sono stati desunti dalla tabella C.8A.2.1 selezionando i valori minimi. Il fattore parziale per questo aspetto della conoscenza è pari a $F_{C3}=0,12$.

Riguardo infine l'aspetto "Terreno e le fondazioni", non sono rilevati dissesti ascrivibili a cedimenti fondali per cui – nonostante l'assenza di dati sul terreno – è scelto un $F_{C4}=0$ affinché il FC globale risulti inferiore a 1,20 come da richieste del contratto di ricerca.

Dalla sommatoria dei fattori parziali si ottiene un fattore globale $FC=1,18$.

Interpretazione delle informazioni

Il giudizio qualitativo proveniente dalla conoscenza del fabbricato indica un discreto livello di vulnerabilità del convento, soprattutto dovuto alla configurazione di impianto di alcune parti. Sono svolte verifiche secondo i tre livelli di valutazione LV1, LV2 e LV3.

Per il primo livello di valutazione LV1 è eseguito utilizzando modelli semplificati "Palazzi e ville..."¹⁸⁷ con particolare riguardo alla porzione corrispondente alla chiesa di San Domenico "vecchio", caratterizzata da una minore percentuale di murature resistenti in direzione trasversale. Le analisi locali secondo LV2 riguardano la verifica ribaltamento semplice delle pareti esterne. I risultati rilevano la maggiore vulnerabilità della parete porticata del chiostro grande, priva di pareti di spina al piano superiore e avente luce libera molto ampia. Per le verifiche LV3 sono considerati sia modelli parziali del convento, sia un modello globale, tutti secondo l'approccio a telaio equivalente, valutati mediante analisi statica non lineare (push-over).

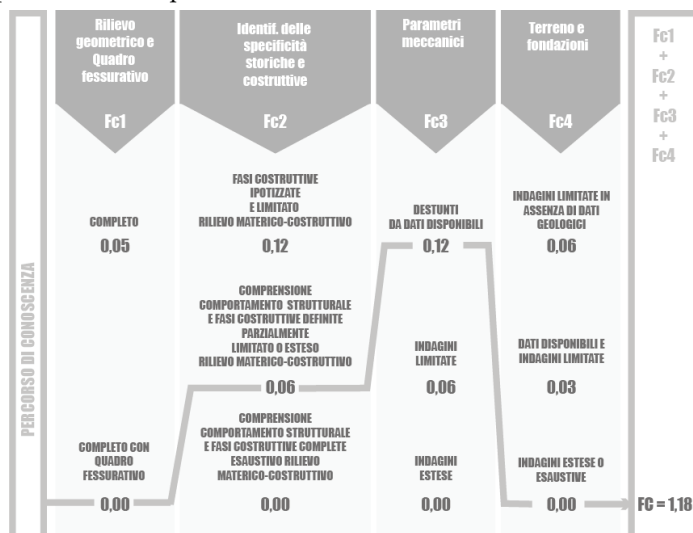
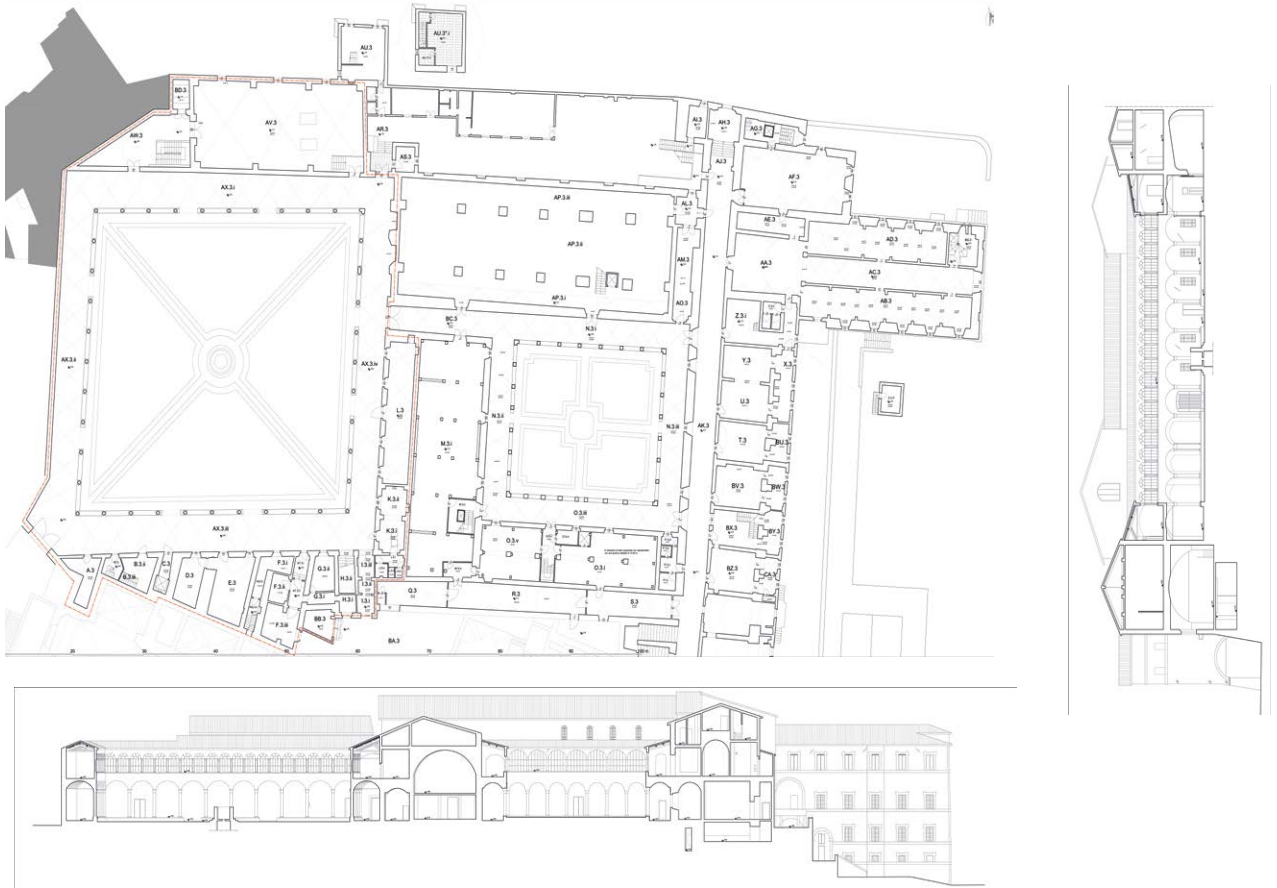


Figura 3.24 – Ex Convento di San Domenico, Perugia; definizione del Fattore di Confidenza

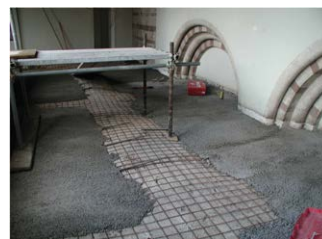
¹⁸⁷ Cfr. Linee Guida, paragrafo §5.4.2 (Palazzi e ville e altre strutture con pareti di spina e orizzontamenti intermedi).



1. Rilievo geometrico 0 10m



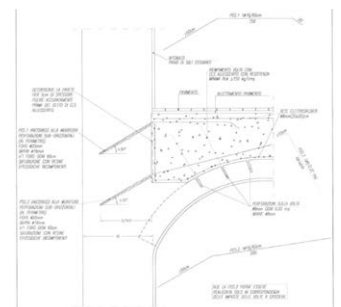
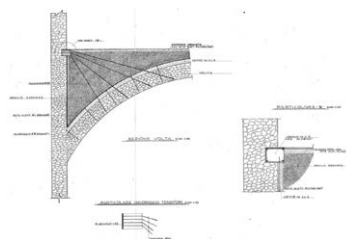
- Legenda**
- 1234-1263
 - XIV - XV sec.
 - 1440-1447
 - 1464-1500
 - 1562-1579
 - 2° metà XV sec
 - 1455-1480
 - 1474-1479
 - XVI sec.
 - 1562-1579
 - 1579-1580
 - 1587
 - 1595
 - 1599
 - 1629
 - XVIII sec.
 - 1730
 - 1° metà XIX sec.
 - 2° metà XIX sec.
 - Interventi recenti
 - Riferimento documentario
 - Nome ambiente
 - Confine museo



trasformazioni int 87



trasformazioni int 97



2. Fasi costruttive



rilievo materico

- Legenda**
- 02a_Muratura in pietrame disordinata
 - 02b_Muratura in pietrame disordinata con ricorsi
 - 03a_Conci calcarei sbazzati
 - 03b_Conci sbazzati e mattoni pieni
 - 04a_Muratura in pietre a spacco con buona tessitura
 - 04b_Muratura in pietre a spacco con buona tessitura e listat
 - 06a_Blocchi lapidei squadrati di pietra calcarea
 - 06b_Blocchi lapidei squadrati a filari di colore alternato
 - 07_Mattoni pieni
 - 11_Blocchi di calcestruzzo
 - 13_Calcestruzzo armato
 - Cordolo metallico
 - Cordolo in c.a.
 - Tirante
 - Capochiave
 - Id
 - Nome ambiente
 - Confine museo

- Legenda**
- Lesione a pavimento
 - Lesione su soffitto (proiezione)
 - Lesione inclinata su parete (proiezione orizzonti A.3)
 - Lesione subverticale su parete
 - Fuoripiombo
 - Venatura profonda del travertino
 - Nome ambiente
 - Confine museo



stralcio pianta quadro fessurativo

3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo

M8. MONASTERO DI SAN BERNARDO, AREZZO

L'ex Monastero di San Bernardo è situato a sud-est della città storica e sorge sui resti dell'antico anfiteatro romano. Dal 1937 è sede del Museo Archeologico Nazionale di Arezzo intitolato a "Gaio Cilnio Mecenate".

Caratteristiche storiche e morfologiche

Il complesso monumentale si estende per circa 1.800 mq per un'altezza media alla gronda di circa 15 m. Non sono presenti edifici contigui alla sua compagine strutturale e si imposta su un sito lievemente in pendenza, che permette la costruzione di un piano seminterrato.

L'impianto planimetrico è fortemente influenzato dalla storia costruttiva del complesso monastico, che è stato costruito nel 1333 sfruttando come fondazioni i resti dell'anfiteatro romano (datato tra fine I e inizi II secolo d.C.). complesso.

L'originario monastero ha un impianto avente un corridoio centrale su cui si innestano le celle; la peculiarità del monastero di San Bernardo è l'andamento di questo corridoio che ha forma di una spezzata aperta parallela alla facciata est, sui resti dell'anfiteatro. Le cellule murarie – il cui spessore varia dal metro del piano seminterrato agli 80-60 cm dei piani superiori – hanno un passo costante in corrispondenza dei primi due livelli fuori terra (seminterrato e piano terra) e sul fronte est al piano terra lasciano spazio al loggiato seicentesco voltato con archi a pieno sesto; al piano primo è presente una tettoia lignea sul medesimo fronte e si perde l'andamento curvilineo della spina centrale, su cui è inserito un corridoio e la maglia diventa più diradata e su lato nord, inoltre, essa è interrotta dalla chiesa di San Bartolomeo.

La storia costruttiva del monastero continua con le trasformazioni realizzate durante il XVIII sec. d.C., nell'ambito delle quali si ha l'inserimento al secondo piano del corridoio rettilineo, avvenuto con la demolizione di parte della maglia muraria. L'acquisizione da parte dello stato ha implicato diverse trasformazioni per adibire il complesso a museo, duramente colpito dai bombardamenti della II Guerra Mondiale, nell'ambito dei quali è andata perduta buona parte dell'ala nord-est (la chiesa e parte del monastero). La ricostruzione post-bellica è realizzata con "tecniche moderne" e restituisce il museo al pubblico negli anni '50. Ulteriori lavori di restauro sono svolti, infine, nel decennio 1985-95. Oltre alla costruzione di solai lignei sopra le volte, la ricostruzione di volte crollate in mattoni in foglio, l'inserimento di un vano ascensore, un intervento di particolare importanza è la sostituzione di tutte le coperture con strutture cemento armato.

La struttura di elevazione del monastero - totalmente in muratura portante - è in parte coperta da intonaco. Sono comunque individuate con il supporto di indagini due tipologie murarie: in mattoni pieni e malta di calce, e murature definite "con paramento esterno e nucleo interno".

Gli orizzontamenti sono prevalentemente volte in mattoni a una o due teste al piano interrato e al piano terra, solai lignei al piano primo.

Le informazioni sulle tecniche costruttive e sui materiali utilizzati sono spesso nascoste dall'intonaco; tuttavia il materiale d'archivio disponibile (perizie, foto di cantiere, ecc.) rappresenta un valido supporto per avanzare ipotesi sufficientemente attendibili sui dettagli costruttivi.

La mancata visibilità delle suddette informazioni rappresenta un elemento importante nella determinazione di vuoti conoscitivi, comunque colmabili attraverso l'esecuzione di indagini anche non distruttive. In secondo luogo, un grande impatto sulla conoscenza del comportamento strutturale può essere determinato dalla interazione con le preesistenze dell'anfiteatro, la cui conoscenza può essere definita al meglio approfondendo i rilievi diretti.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La restituzione della geometria strutturale è conseguita mediante il controllo sistematico dei rilievi disponibili, verificando gli spessori murari, la luce di solai e volte, le altezze di interpiano, evidenziando eventuali disallineamenti in alzato, il tutto con strumentazione tradizionale. Non è presente una restituzione del rilievo murario della chiesa di San Bartolomeo, contigua al monastero sul lato nord-ovest. Per quanto concerne il quadro fessurativo, le lesioni si concentrano soprattutto al piano primo sui pavimenti agli appoggi delle travi lignee sulle pareti (martellamento). Queste informazioni sono raccolte in elaborati dedicati, specificandone la gravità. Alla luce di questi risultati è scelto il valore di $F_{C1}=0$.

La ricostruzione delle fasi evolutive del manufatto è stata definita con il supporto della ricerca archivistica e bibliografica con successivo riscontro sul campo delle informazioni delle fonti indirette. I risultati dell'analisi hanno guidato la definizione del piano di indagini specialistiche sulle murature e sugli altri elementi strutturali. Nonostante ciò non si evince con chiarezza l'avvenuto controllo sul campo delle eventuali cesure tra le cellule murarie; la sintesi della conoscenza sulle fasi evolutive è rappresentata da una volumetria astratta del complesso.

Gli elementi costruttivi sono indagati con il supporto di indagini diagnostiche non distruttive (termografie e soniche, che confermano la generale compattezza delle murature) e prove semi distruttive (endoscopie, prelievi di malta) per definire la sezione muraria; inoltre è verificata l'efficacia di alcuni tiranti e le strutture in c.a. sono indagate con prove pacometriche e sclerometriche. Sono inoltre presenti dei dettagli costruttivi. La scelta per questo fattore parziale ricade in $F_{C2}=0$.

Non sono state svolte prove per la caratterizzazione meccanica dei materiali, e questi sono stati desunti dalla tabella C.8A.2.1, selezionando i valori medi la tipologia "muratura in mattoni pieni". Non sono utilizzati valori correttivi delle malte perché se ne è constatata l'inadeguatezza con le prove di laboratorio. Il valore del fattore parziale scelto per questo aspetto è pari a $F_{C4}=0,12$.

Riguardo infine le indagini sul terreno e le fondazioni, è redatto uno schema geometrico del piano di fondazione, ricostruito sulla base dell'impianto dell'anfiteatro; sono presenti delle prove di caratterizzazione del terreno pregresse, mentre le indagini attuali sono limitate allo studio RSL eseguito dal CNR-IGAG. Il valore scelto è comunque $F_{C4}=0,06$.

Dalla sommatoria dei fattori parziali si ottiene un fattore globale $FC=1,18$.

Interpretazione delle informazioni

Il giudizio qualitativo proveniente dalla conoscenza del fabbricato è in generale positivo, basandosi sul giudizio di qualità delle murature e dei solai. Non sono sottolineate particolari situazioni di precarietà o deficienze strutturali.

Sono state svolte verifiche secondo i tre livelli di valutazione LV1, LV2 e LV3.

LV2 è stato eseguito verificando la risposta al meccanismo di primo modo di un numero cospicuo di macroelementi (tutte le pareti perimetrali).

LV3 è stato condotto eseguendo una verifica globale push-over considerando più modelli in cui è stato aggiunto o sottratto il vincolo offerto dalla chiesa di San Bartolomeo, data la mancata conoscenza del fabbricato. I risultati delle verifiche confermano che l'apporto del vincolo offerto dalla Chiesa è rilevante ma non fondamentale per la stabilità del monastero, che risulta comunque stabile. Quindi la mancata conoscenza dell'organismo della chiesa è stata compensata dalla esecuzione di più modelli di analisi, che hanno supportato l'attendibilità di tutto il processo.

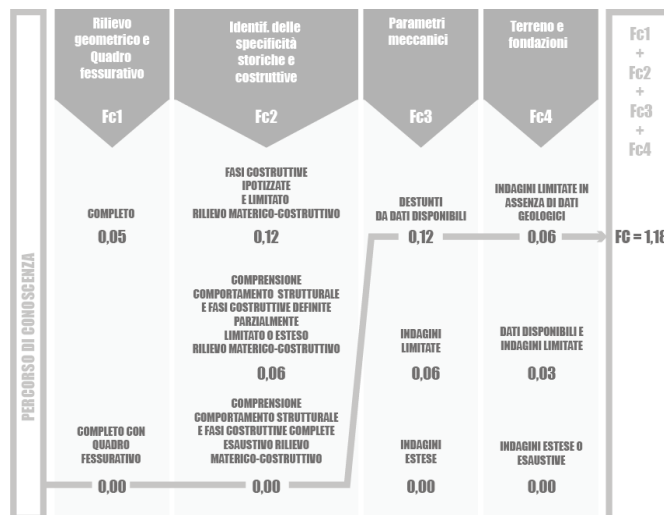
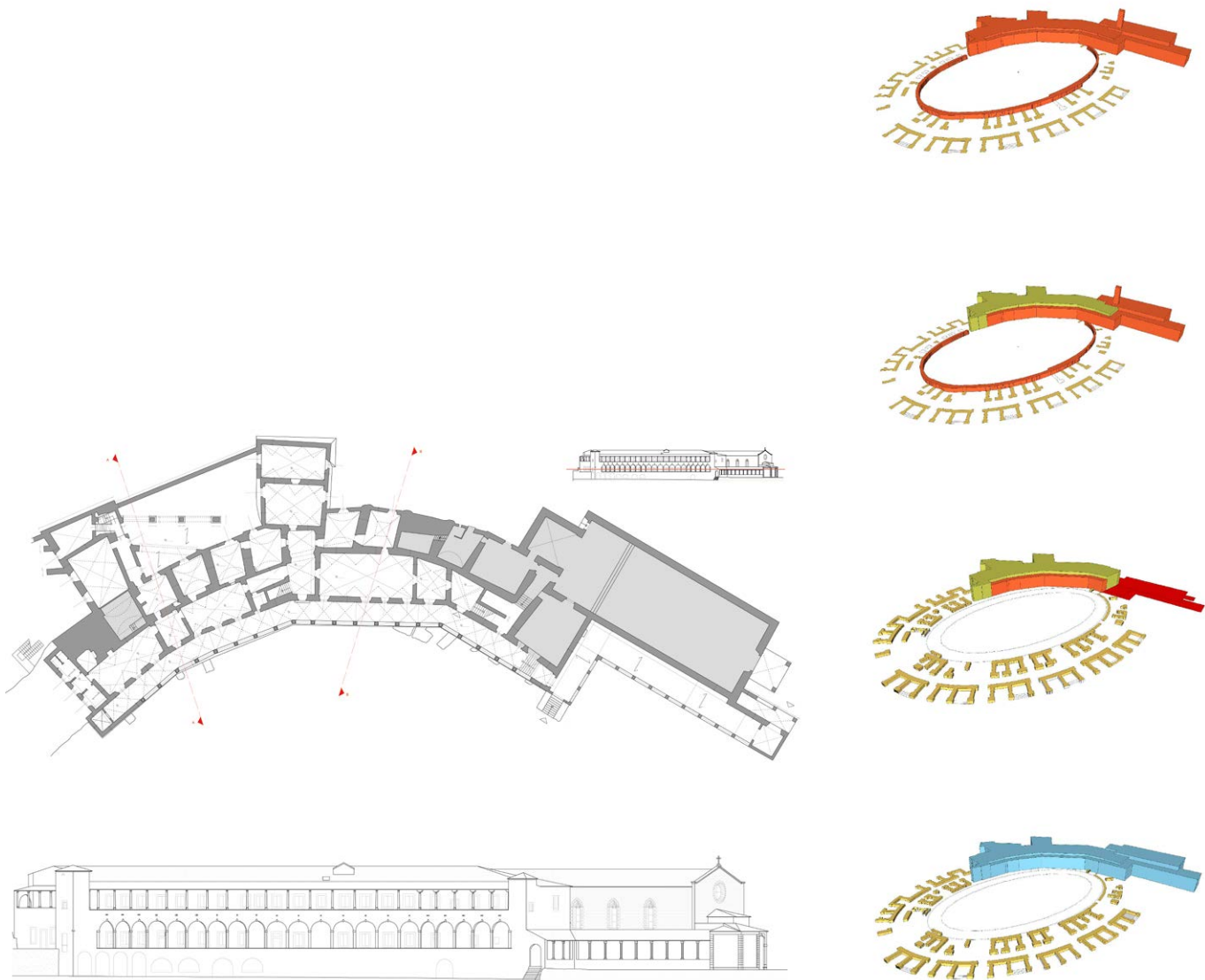
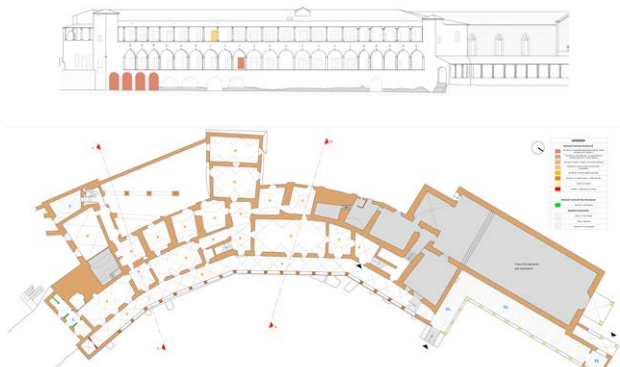


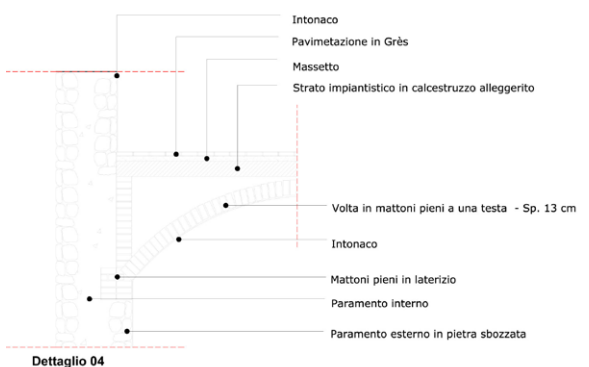
Figura 3.25 – Ex Monastero di San Bernardo, Arezzo; definizione del Fattore di Confidenza



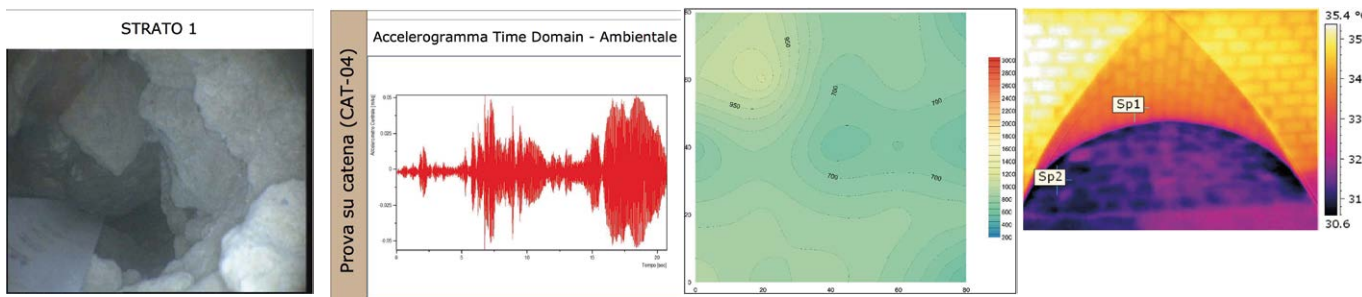
1. Rilievo geometrico 0 10m



2. Fasi costruttive



3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



4. Indagini specialistiche

M9. EX MONASTERO DI SANTA MARIA DELLE MONACHE, ISERNIA

Il complesso monumentale di Santa Maria delle Monache sorge a ridosso del confine sud del centro storico di Isernia. Dal 1934 è sede del Museo Archeologico Nazionale di Isernia e degli uffici della Soprintendenza Archeologica del Molise.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

Il complesso monumentale comprende la chiesa dell'Assunta e l'ex monastero che ingloba una torre campanaria; ha una pianta a L che si estende per circa 6.830 mq, per un'altezza media alla gronda di circa 13 m. Il sito è caratterizzato da un dislivello lieve che permette la formazione di un piano seminterrato su circa metà della superficie totale. Non sono presenti edifici in adiacenza al manufatto che potrebbe definirsi un aggregato strutturale perché formato da più corpi di fabbrica costruiti in epoche differenti.

Il lato nord del complesso è occupato dalla ex chiesa di Santa Maria – oggi spazio espositivo – cui si affianca a sud il primo braccio del monastero di forma trapezoidale, con due chiostri posti lungo l'asse longitudinale; lungo l'asse nord-sud sorge il secondo braccio del monastero, caratterizzato da una estensione di 14 m per 60 m circa; infine, i due bracci inglobano la torre campanaria un tempo isolata.

L'impianto planimetrico attuale è frutto di una articolata storia costruttiva che ha inizio con la fondazione della chiesa dell'Assunta nel VI secolo sui resti delle fortificazioni della cittadella longobarda, costituite da mura di epoca ellenistico-romana. La prima porzione del monastero è costruita durante il secolo VIII sfruttando il fronte sud della chiesa e le preesistenze delle mura di cinta. Il primo ampliamento del monastero è avviato nel corso del XIII secolo e comprende la costruzione lungo Corso Marcelli, caratterizzata da un fronte sulla valle porticato al piano terra e loggiato al piano primo. Con questo secondo ampliamento la torre campanaria (risalente al X secolo) è in parte inglobata nelle strutture del monastero e ne diventa parte integrante con l'ultimo ampliamento realizzato nel XVII secolo contestualmente al rifacimento della facciata della chiesa.

In seguito alla soppressione degli ordini religiosi (1868), il monastero è adibito a caserma militare. Il cambio di destinazione d'uso implica sostanziali modifiche strutturali al corpo sud con suddivisione in piccole celle del piano terra e sopraelevazione del piano sottotetto per creare un'unica grande camerata.

I bombardamenti della Seconda Guerra Mondiale colpiscono duramente il complesso monumentale, in particolare la chiesa, di cui crollano le coperture e coro sopra l'ingresso.

La ricostruzione post-bellica è avviata con l'approntamento di coperture provvisorie sulle navate laterali della chiesa, poi sostituite tra gli anni '70-'90 con coperture in legno definitive, con cordoli in c.a., previsti anche per il corpo sud del monastero. Nell'ambito di questi lavori di restauro operati dalla Soprintendenza sono anche demoliti alcuni corpi di fabbrica.

Le complesse vicende costruttive implicano una sostanziale eterogeneità delle tecniche costruttive che investe soprattutto le strutture orizzontali. La struttura di elevazione è interamente in muratura portante e in parte coperta da intonaco. Rimangono a vista gli speroni di epoca ellenistico-romana (pietra sbazzata con tessitura disordinata e cantonali in pietra squadrata) e alcune piccole aree del monastero lasciate

appositamente a vista dai lavori di restauro che mostrano una muratura in pietra locale appena sbazzata con tessitura disordinata. La stessa tipologia muraria è presente nella chiesa e in gran parte della torre campanaria, il cui basamento presenta una tessitura con pietre sbazzate di dimensioni maggiori fino a un'altezza di circa 2,50 m. Gli orizzontamenti sono volte in muratura con geometria a botte e a crociera per il corpo sud del monastero. Il corpo nord è costituito da solai in putrelle e tavelloni in sostituzione dei precedenti solai lignei. Riguardo la chiesa, due tetti lignei inclinati coprono le navate laterali e un lucernario in acciaio e vetro la nave centrale.

Le informazioni sulle tecniche costruttive e sui materiali utilizzati sono spesso nascoste dall'intonaco e il materiale d'archivio disponibile (perizie, foto di cantiere, ecc.) illustra parzialmente i lavori eseguiti; inoltre sono esigue le fonti documentarie che riportano gli eventi costruttivi antecedenti al XIX secolo.

Le difficoltà connesse al raggiungimento di una conoscenza adeguata sono attribuibili alla mancata visibilità delle informazioni sui dettagli costruttivi, comunque reperibili attraverso l'esecuzione di indagini anche non distruttive.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La restituzione della geometria strutturale è conseguita mediante il controllo sistematico dei rilievi disponibili, verificando gli spessori murari, la luce di solai e volte, le altezze di interpiano, evidenziando eventuali disallineamenti in alzato, il tutto con strumentazione tradizionale.

Le lesioni sono state rilevate sistematicamente e classificate in base alla loro ampiezza con riferimento alla scala proposta da Kaminetzky¹⁸⁸. Queste informazioni sono raccolte in elaborati dedicati. Alla luce di questi risultati è scelto il valore di $F_{CI}=0$.

La ricostruzione delle trasformazioni subite dal manufatto è stata definita con il supporto della ricerca archivistica e bibliografica, verificando con il riscontro sul campo le informazioni delle fonti indirette. I risultati dell'analisi hanno guidato la definizione del piano di indagini specialistiche sulle murature e sugli altri elementi strutturali. La sintesi della conoscenza sulle fasi evolutive è rappresentata da planimetrie in cui le murature sono campite con colori differenti in base all'epoca di costruzione.

Gli elementi costruttivi sono indagati con il supporto di indagini diagnostiche non distruttive (termografie diffuse e soniche), e prove semi distruttive (endoscopie, stonacature) per definire la tessitura e la sezione muraria. Il giudizio qualitativo su ciascuna tipologia è espresso con riferimento alla classificazione GNDT. Sono quindi redatti elaborati complessivi che mostrano in planimetrie la distribuzione delle tessiture rilevate. Gli orizzontamenti metallici sono indagati con prove pacometro per appurarne l'orditura, mentre le endoscopie e le termografie

¹⁸⁸ Kaminetzky, D., ., *Verification of structural adequacy rehabilitation, renovation and preservation of concrete and masonry structures*, Detroit, Mi, ACI 141, 1985

sono utilizzate per indagare le volte. Sono presenti alcuni disegni di dettagli costruttivi. La scelta per questo fattore parziale ricade in $F_{C2}=0,06$.

Non sono state svolte prove per la caratterizzazione meccanica dei materiali, e questi sono stati desunti dalla tabella C.8A.2.1, con il supporto della classificazione GNDT selezionando i valori medi. Il fattore parziale per questo aspetto della conoscenza è pari a $F_{C3}=0,06$.

Riguardo l'aspetto "terreno e le fondazioni" è redatto uno schema geometrico delle fondazioni, ricostruito sulla base dell'impianto al piano seminterrato e il piano terra; le informazioni sul terreno sono desunte da indagini pregresse (2003), ritenute affidabili. Il valore scelto è $F_{C4}=0,06$.

Dalla sommatoria dei fattori parziali si ottiene un fattore globale $FC=1,18$.

Interpretazione delle informazioni

Il giudizio qualitativo proveniente dalla conoscenza del fabbricato è in generale positivo e non emergono particolari situazioni di precarietà.

Sono state svolte verifiche secondo i tre livelli di valutazione LV1, LV2 e LV3.

LV1 è eseguito utilizzando il SIVARS.

LV2 è stato eseguito verificando la risposta al meccanismo di primo modo di di gran parte delle pareti perimetrali e alcuni setti di spina.

LV3 è stato condotto eseguendo una verifica globale push-over considerando più modelli: i corpi che costituiscono il monastero sono analizzati separatamente e con un modello complessivo.

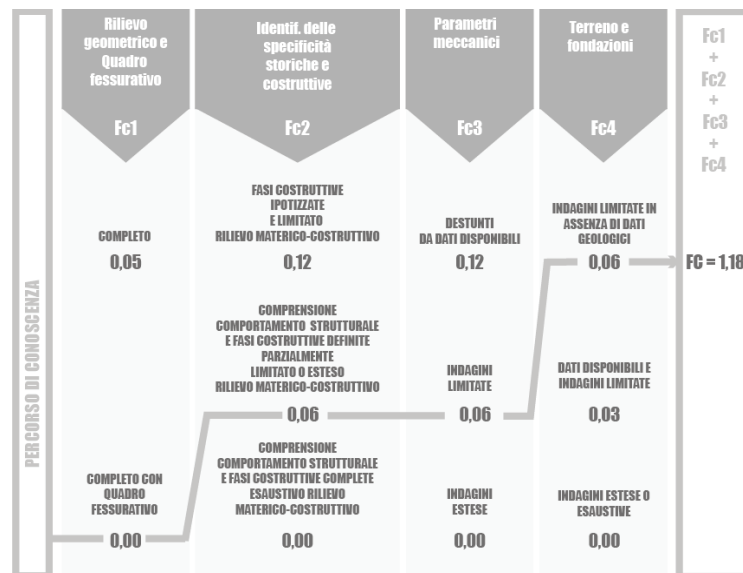
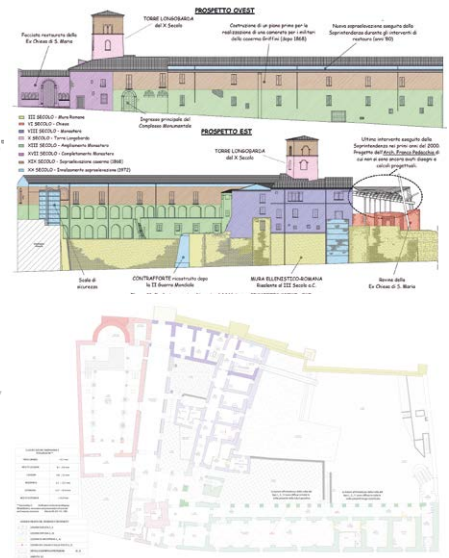


Figura 3.26 – Ex Monastero di Santa Maria delle Monache, Isernia; definizione del Fattore di Confidenza

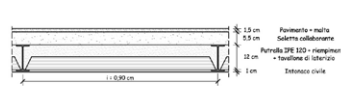


1. Rilievo geometrico 0 10m

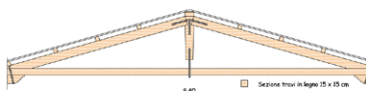
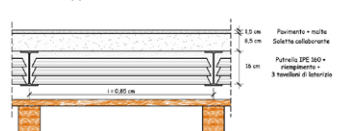
2. Fasi costruttive



TIPOLOGIA (A)



TIPOLOGIA (B)



SCHEDA DI ANALISI TIPOLOGIE MURARIE

GNDT I	
DESCRIZIONE	Muratura irregolare costituita da pietra calcarea grezza generalmente non lavorata o di difficile lavorazione, ciottoli di fiume, elementi in cotto e zeppe di pietra, elementi di forma irregolare di varie dimensioni come scopoli di cotto e spezzoni di pietre.
DIMENSIONI - Piccolo/Medio	variabile: 10 cm ≤ L ≤ 50 cm
TESSITURA	<ul style="list-style-type: none"> Apparecchiatura disordinata Poca degli elementi casuali Assenza di ricorsi o listature Presenza di zeppe in pietra, ciottoli di fiume ed elementi in cotto Malta a base di calce con detriti
PROPRIETÀ MECCANICHE	in riferimento alla NTC 08, alla Circolare 617/09, alle Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del Patrimonio culturale allineate alle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni, e al Decreto n.10 del 25/01/2005 - allegato 3b "Indicazioni per la valutazione delle qualità murarie"
TIPOLOGIA (B)	Muratura in pietrame di forma irregolare con tessitura disordinata e priva di collegamento tra i due paramenti esterni.
Classificazione GNDT: (I)	$f_{m0} = 1.60 \text{ N/mm}^2$ $f_{m0} = 0.028 \text{ N/mm}^2$ $E_m = 816 \text{ N/mm}^2$ $G_m = 272 \text{ N/mm}^2$ $\mu = 20 \text{ kN/m}^2$
Malta a base di calce con detriti	
Nucleo scadente e/o ampio	

3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



4. Indagini specialistiche

M10. EX MONASTERO DI SANT'AGATA E TEATRO ROMANO, SPOLETO

L'ex monastero delle benedettine di Cassinesi di Sant'Agata è costruito sui resti dell'antico teatro romano ed è situato a sud-ovest a ridosso del centro storico. Dal 1985 è adibito a Museo Archeologico Nazionale di Spoleto.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

Il complesso monumentale sorge su un sito in pendenza e la presenza del teatro romano implica un impianto strutturale molto articolato e peculiare. Insieme ad altri edifici affiancati a est costituisce un aggregato strutturale.

L'ex monastero è costituito da più fabbricati aggregati a formare un impianto a L di fronte la cavea del teatro, ampia circa 50 m; sulla testata del braccio piccolo si trova la chiesa di Sant'Agata addossata sul lato lungo e con abside rivolto verso la cavea; i fabbricati hanno impronta a terra pari a circa 1.200 mq e si sviluppano per tre elevazioni per un'altezza media di circa 15 m. Sono presenti irregolarità planoaltimetriche dovute soprattutto alla presenza del teatro cui è addossato il braccio lungo del monastero impostato su piani di fondazione a quote sfalsate.

La configurazione attuale è frutto di una articolata storia costruttiva. Prima dell'arrivo delle monache benedettine, sul sito sono già presenti la chiesa e un palazzo signorile (Palazzo Corvi), risalenti al XII-XIII secolo. La struttura del teatro, del I secolo a.C. è probabilmente interrata. Il primo ampliamento importante risale al XVI secolo, a seguito dell'insediamento di un numero maggiore di monache, e prevede la costruzione del braccio lungo con portico al piano terra e loggiato al piano nobile e al piano secondo, riutilizzando le strutture preesistenti e materiali di spolio del teatro. Il monastero doveva avere una pianta a C con una corte centrale aperta sul lato della cavea, ma gli edifici che chiudevano la pianta non sono più leggibili nell'attuale impianto.

In seguito alla soppressione degli ordini religiosi (1868), il convento è ceduto al Demanio e adibito a carcere giudiziario. Il cambio di destinazione d'uso implica profonde modifiche distributive e volumetriche attuate in vari lotti. In definitiva i lavori realizzano la chiusura del loggiato all'ultimo livello del corpo a ovest con la distribuzione in camerate degli ambienti. Nei primi anni del Novecento sono eseguiti lavori di consolidamento del terreno soggetto a cedimenti franosi. In occasione degli scavi di sbancamento e dei consolidamenti con sottofondazioni emergono i resti del teatro romano, che sono completamente portati alla luce nell'arco di circa dieci anni. In seguito alla dismissione del carcere nel 1954 hanno inizio i lavori di restauro e consolidamento del complesso monumentale. Sono demolite le superfetazioni e alcuni solai lignei con solai in s.a.p. o in putrelle e tavelloni. Negli anni '70 sono avviati i lavori per adibire il monastero a museo archeologico: sono sostituite le orditure lignee di copertura di alcuni tetti con travi in acciaio e tavelloni con soletta in calcestruzzo armata con rete

elettrosaldata; sono introdotti nuovi solai in latero-cemento e consolidate alcune volte con inserimento di perfori armati e catene.

Le complesse vicende storiche implicano una sostanziale eterogeneità delle tecniche costruttive che investe soprattutto le strutture orizzontali.

La struttura di elevazione del complesso architettonico è totalmente in muratura portante e in parte coperta da intonaco. Sono presenti più tipologie murarie appartenenti a epoche costruttive diverse: muratura in blocchi squadrati, in pietra sbazzata con tessitura buona o scadente, in mattoni pieni; murature in blocchi di cls e pilastri di cemento armato sono introdotti nella cavea durante lavori di consolidamento del teatro, costituito da muratura in coccia romana.

Gli orizzontamenti sono volte in muratura con geometria a botte o a crociera; sono presenti anche solai in legno, solai in putrelle e tavelloni, in laterocemento. Le coperture sono con capriate lignee, ovvero in acciaio.

Le informazioni sulle tecniche costruttive e sui materiali utilizzati sono spesso nascoste, ma il materiale d'archivio disponibile (perizie, foto di cantiere, ecc.) illustra discretamente i lavori eseguiti.

La mancata visibilità delle suddette informazioni rappresenta un elemento importante nella determinazione di vuoti conoscitivi, comunque colmabili attraverso l'esecuzione di indagini anche non distruttive.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La restituzione della geometria strutturale è conseguita mediante il controllo sistematico dei rilievi disponibili, verificando gli spessori murari, la luce di solai e volte, le altezze di interpiano, evidenziando eventuali disallineamenti in alzato, il tutto con strumentazione tradizionale. Il quadro fessurativo e deformativo è rilevato sistematicamente e riportato in elaborati grafici specifici. Per l'aspetto "Rilievo geometrico" è quindi scelto un fattore parziale $F_{C1}=0$.

La ricostruzione delle trasformazioni subite dal manufatto è stata definita con il supporto della ricerca archivistica e bibliografica, verificando con il riscontro sul campo le informazioni delle fonti indirette. I risultati dell'analisi hanno guidato la definizione del piano di indagini specialistiche sulle murature e sugli altri elementi strutturali, che non è stato eseguito per problemi amministrativi. La sintesi della conoscenza sulle fasi evolutive è rappresentata da planimetrie in cui le murature sono campite con colori differenti in base all'epoca di costruzione.

Gli elementi costruttivi sono indagati mediante rilievo visivo e catalogati per tipologia. Sono quindi redatte delle planimetrie con individuate le zone ispezionate e i dettagli rilevati.

Riguardo l'aspetto "Identificazione delle specificità storiche e costruttive" è scelto un fattore parziale pari a $F_{C2}=0,06$.

Non sono state svolte prove per la caratterizzazione meccanica dei materiali, e questi sono stati desunti dalla tabella C.8A.2.1 selezionando i valori minimi. Il fattore parziale per questo aspetto della conoscenza è pari a $F_{C3}=0,12$.

Riguardo infine l'aspetto "Terreno e le fondazioni", non sono rilevati dissesti ascrivibili a cedimenti fondali per cui – nonostante l'assenza di dati sul terreno – è scelto un $F_{C4}=0$ affinché il FC globale risulti inferiore a 1,20 come da richieste del contratto di ricerca.

Dalla sommatoria dei fattori parziali si ottiene un fattore globale $FC=1,18$.

Interpretazione delle informazioni

Il giudizio qualitativo proveniente dalla conoscenza del fabbricato indica un discreto livello di vulnerabilità del complesso monumentale, soprattutto dovuto alla configurazione di impianto di alcune parti.

Sono svolte verifiche secondo i tre livelli di valutazione LV1, LV2 e LV3.

Per il primo livello di valutazione LV1 è eseguito utilizzando modelli semplificati (Palazzi e ville...)¹⁸⁹ dai quali emerge la vulnerabilità trasversale della chiesa, caratterizzata da una minore percentuale di murature resistenti.

Le analisi locali secondo LV2 riguardano la verifica ribaltamento semplice delle pareti esterne dell'aggregato, che rilevano una maggiore vulnerabilità del corpo cinquecentesco, caratterizzato da ambienti con ampia luce libera.

Per le verifiche LV3 sono considerati sia modelli parziali del convento, sia un modello globale, tutti secondo l'approccio a telaio equivalente, valutati mediante analisi statica non lineare (push-over).

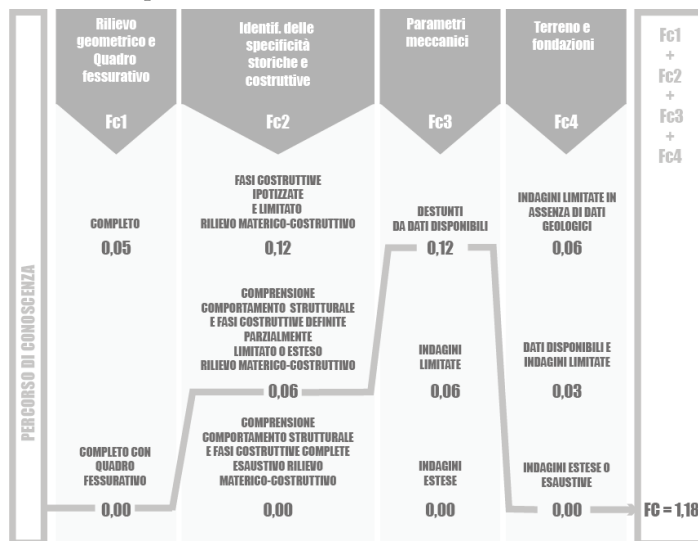
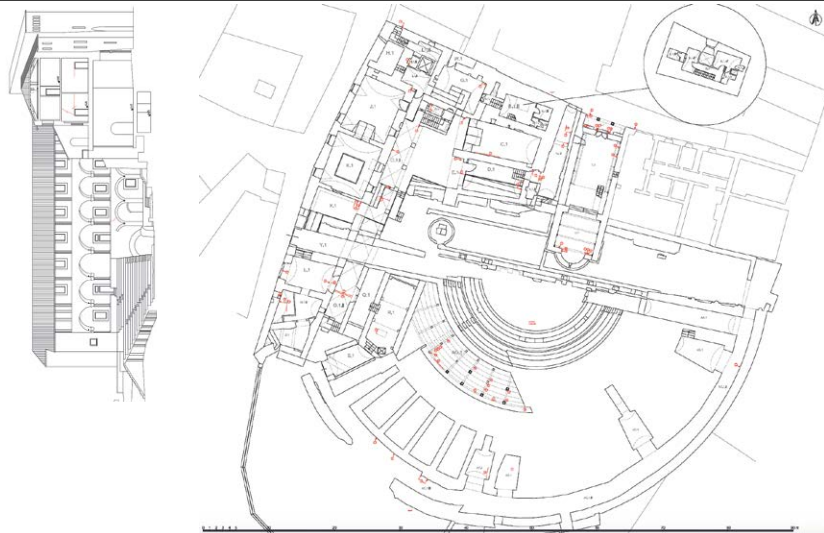







Figura 3.27 – Ex Monastero di Sant’Agata e teatro romano, Spoleto; definizione del Fattore di Confidenza

¹⁸⁹ Cfr. Linee Guida, paragrafo §5.4.2 (Palazzi, ville e altre strutture con pareti di spina e orizzontamenti intermedi).






Pianta primo piano



-  Lesione a pavimento
-  Lesione su soffitto (proiezione)
-  Lesione inclinata su parete (proiezione orizzontale)
-  Lesione subverticale su parete
-  Espulsione copriferro
- 8.34° Fuoripiombo
- +4.07° Entropiombo
- K.1 Nome cella












1. Rilievo geometrico 

Legenda

-  I sec. d.C.
-  XII-XIII sec.
-  XVI sec.
-  XIX sec.
-  1959-1960
-  1966-1969
-  Interventi recenti
-  Riferimento documentario
- K.1 Nome cella



2. Fasi costruttive

-  02_Pietrame disordinato
-  03_Muratura a conci sbozzati
-  04_Muratura in pietre a spacco con buona tessitura
-  06_Muratura a blocchi lapidei squadati
-  07_Mattoni pieni
-  13_Pilastrini in calcestruzzo armato
-  14_Concrezione romana
-  Cordolo metallico
-  Tirante
-  Capochiave
-  Id
- K.1 Nome cella



3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo

M11. BASILICA DI SAN FRANCESCO (CAPPELLA BACCI), AREZZO

La basilica di San Francesco sorge all'interno del centro storico di Arezzo e prospetta sulla piazza omonima. La parte terminale della chiesa è organizzata in tre cappelle, di cui quella centrale, più grande, costituisce la cappella Bacci, tra le più importanti delle cappelle presenti nella basilica per la presenza del ciclo di affreschi "La leggenda della Vera Croce" di Piero della Francesca.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

La basilica è posta a testata di un aggregato strutturale costituito da altri edifici storici di minori dimensioni, tra i quali il convento, posto in adiacenza. La chiesa ha impianto ad aula unica con cappelle poste sul fianco sinistro e ai due lati dell'abside; sopra la cappella di destra sorge il campanile. La scala posta sul fianco sinistro conduce alla cripta posta in corrispondenza dell'area presbiteriale.

La basilica superiore presenta un'aula di dimensioni pari a 17,50 m x 53,50m, coperta da un tetto a doppia falda su un ordito di capriate lignee per un'altezza media di circa 20 m; le cappelle laterali sono coperte con volte a crociera a quota di circa 9,00 m; le cappelle dell'area absidale sono anch'esse coperte da volte a crociera poste a quota di circa 13,00 m. La cripta è coperta da un sistema di 10 volte in muratura con geometria a crociera, mentre la galleria di accesso è coperta con volte a botte. La struttura di elevazione della basilica è in muratura portante di pietra sbazzata con orizzontamenti regolari ed elementi di medie dimensioni, per quanto concerne le porzioni visibili per assenza di intonaco (fronti esterni); la torre campanaria è costituita da murature in pietre più piccole e di forma irregolare.

La prima fase edificatoria della basilica è documentata al periodo 1314-1348 e comprende l'ampliamento del nucleo originario fondato nel 1290 sul preesistente edificio della "domus et casamenti" dei Cacciaconti. È costruita la navata e parte delle cappelle laterali; sono avviati i lavori della facciata, la cui decorazione è rimasta incompleta fino a oggi. La zona absidale è costruita alla fine del XIV secolo, mentre al XVI secolo risalgono la torre campanaria e le cappelle sul fianco sinistro poste nell'area centrale.

Interventi di restauro significativi avvengono a partire dalla fine del XIX secolo: i lavori di modifica dell'assetto urbano circostante implicano il puntellamento del fianco sinistro della chiesa, soggetta già a vari incendi nella cripta, deposito di materiale infiammabile; sempre il lato sinistro, nei primi del Novecento è interessato da crolli che implicano lavori di consolidamento mediante inserimento di tiranti; negli anni '50 sono eseguiti lavori di restauro nella cripta finalizzati alla demolizione di tramezzature per la riconfigurazione dello spazio originario. La cripta è ancora interessata da lavori di consolidamento negli anni '70 per il grave stato fessurativo di un pilastro; l'intervento consiste nell'inserimento di una putrella di acciaio all'interno del pilastro murario.

Le informazioni sulle tecniche costruttive e sui materiali utilizzati sono nascoste dall'intonaco negli ambienti interni, ma il materiale d'archivio disponibile (perizie, foto di cantiere, ecc.) illustra parzialmente i lavori eseguiti e le indagini svolte in precedenza.

Per la basilica di San Francesco il raggiungimento di una conoscenza adeguata è un obiettivo perseguibile attraverso lo studio diretto affiancato dall'analisi delle fonti documentarie, date le dimensioni contenute e la disponibilità di fonti esaustive.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La restituzione della geometria strutturale è conseguita mediante il controllo sistematico dei rilievi disponibili e integrazione degli stessi con sezioni e prospetti realizzati con laser-scanner.

Le lesioni sono state rilevate sistematicamente e raccolte in elaborati dedicati che rappresentano tutte le pareti della basilica, le volte di ciascuna cappella, i pilastri della cripta. Alla luce di questi risultati è scelto il valore di $F_{C1}=0$.

La ricostruzione delle trasformazioni subite dal manufatto è stata definita con il supporto della ricerca archivistica e bibliografica, verificando con il riscontro sul campo le informazioni delle fonti indirette. I risultati dell'analisi hanno guidato la definizione del piano di indagini specialistiche sulle murature e sugli altri elementi strutturali. La sintesi della conoscenza sulle fasi evolutive è rappresentata da planimetrie in cui i setti murari sono campiti con colori differenti in base all'epoca di costruzione.

Gli elementi costruttivi sono indagati mediante rilievo visivo per quanto concerne gli elementi a vista, mentre per le porzioni nascoste dall'intonaco sono stati considerati i risultati di indagini pregresse. Il giudizio qualitativo su ciascuna tipologia è espresso utilizzando le schede per l'identificazione dell'IQM, comprendenti disegni del prospetto di ogni tessitura.

Riguardo l'aspetto di "Identificazione delle caratteristiche storiche e costruttive" è quindi scelto un fattore parziale pari a $F_{C2}=0$.

Non sono state svolte prove per la caratterizzazione meccanica dei materiali, e questi sono stati desunti dalle schede dell'IQM. Il fattore parziale riguardante l'aspetto "Parametri meccanici" è pari a $F_{C3}=0,06$.

Riguardo infine l'aspetto "Terreno e fondazioni", sulla base della disponibilità di indagini geologiche e geotecniche sul sito oggetto di studio e delle indagini MASW è scelto $F_{C4}=0,03$.

Dalla sommatoria dei fattori parziali si ottiene un fattore globale $FC=1,09$.

Interpretazione delle informazioni

Dalla disamina conoscitiva del fabbricato sono desunte considerazioni sulle cause dei dissesti osservabili (probabile cedimento fondale della basilica provoca il fuoripiombo osservabile nella parete est). Un modello globale agli elementi finiti è stato dunque utilizzato motivare il quadro di dissesto rilevato e per la valutazione della risposta sismica globale.

Sono state svolte verifiche secondo i livelli di valutazione LV2 e LV3.

Le verifiche locali di LV2 sono elaborate mediante analisi cinematica lineare su un totale di 14 meccanismi di collasso per ribaltamento fuori piano attivabili su 9 macroelementi individuati a valle delle risultanze del rilievo geometrico e del quadro fessurativo, ma anche in base alla disamina del comportamento esibito a seguito di un sisma di impianti strutturali analoghi. Per ogni macroelemento più tipologie di meccanismo considerando diverse collocazioni della cerniera.

Le analisi LV3 è stato condotto eseguendo una verifica globale push-over considerando 4 modelli distinti in base alla modellazione delle capriate e al loro livello di connessione con le pareti dell'aula. I risultati delle analisi globali confermano la sostanziale assenza di un comportamento d'assieme della basilica dovuto alla mancanza di connessioni tenaci tra i vari elementi strutturali.

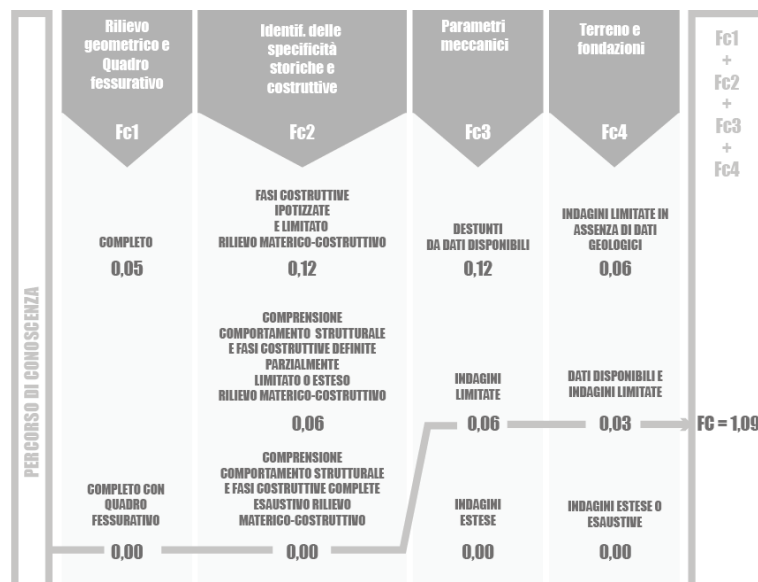
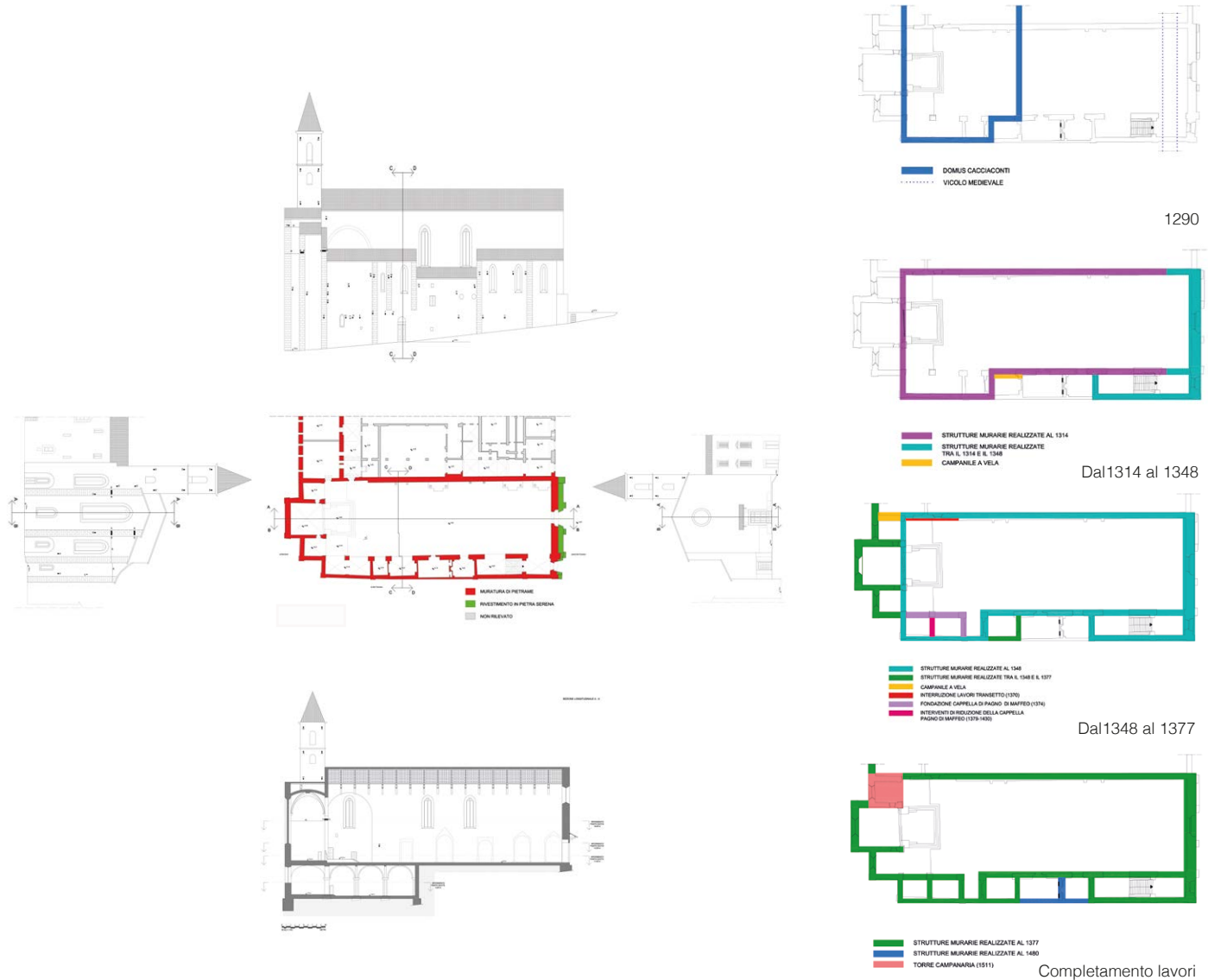


Figura 3.28 – Basilica di San Francesco (Cappella Bacci), Arezzo; definizione del Fattore di Confidenza

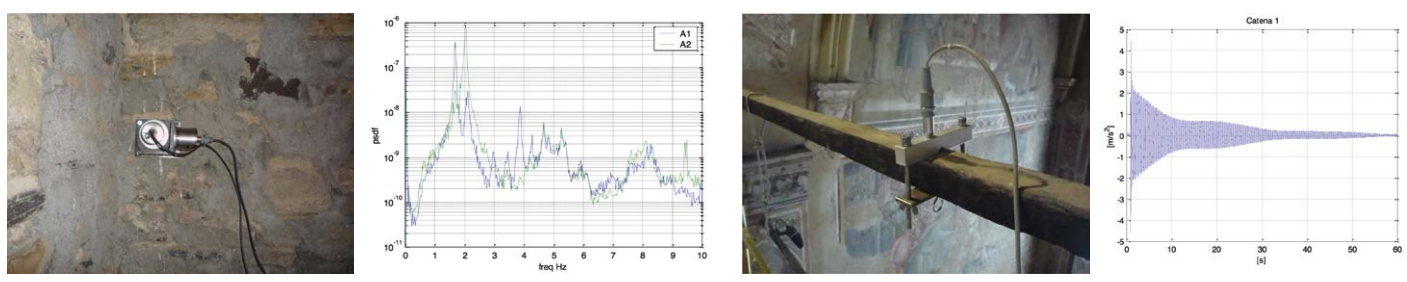


1. Rilievo geometrico

2. Fasi costruttive



3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



4. Indagini specialistiche

3.7 Costruzioni fortificate

F1. CASTELLO PIRRO DEL BALZO, VENOSA (PZ)

Il Castello Pirro del Balzo si trova nel centro storico di Venosa (PZ) e dal 1991 è sede del Museo Archeologico Nazionale.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

Il manufatto è caratterizzato da una forma quadrangolare con bastioni circolari agli angoli collegati da camminamenti coperti, possenti torri collegate dalla cinta muraria e una corte interna.

Le dimensioni del quadrato sono di circa 96 m di lato.

Al piano interrato e sotto il cortile sono ricavati degli ambienti lungo tutto il perimetro. Al piano terra le dimensioni diminuiscono e il castello si sviluppa per circa 50 m per lato, mentre al primo piano la porzione costruita assume una forma ad L con i due bracci nord-ovest e nord-est, la cui altezza media alla gronda è pari a circa 11,00 m.

Non sono presenti forti dislivelli e non si rileva alcuna interazione con edifici adiacenti.

Il castello nasce come opera di fortificazione della città di Venosa nel 1470 per opera del duca Pirro del Balzo Orsini. L'impianto originario presentava con una struttura quadrangolare a cortile centrale e quattro bastioni a scarpa, posti agli angoli, sormontati da robuste torri cilindriche collegate da una cinta muraria. La prima trasformazione importante risale alla metà del Cinquecento ed è determinata dal cambio di destinazione d'uso a residenza signorile: è costruito il primo piano tra le torri nord e ovest ed è avviata la costruzione del corpo tra le torri nord ed est. Piccole trasformazioni hanno interessato il manufatto tra il XVIII e il XIX secolo, con l'aggiunta di altri corpi di fabbrica di modeste dimensioni all'interno della corte.

Nel 1970 sono eseguiti lavori di consolidamento e restauro a causa delle condizioni di degrado del castello anche dovuti agli eventi sismici del 1930 e del 1980. Sono demolite alcune superfetazioni, sostituite le orditure di copertura di una porzione di fabbricato con capriate in acciaio.

Nel 1980 sono eseguiti altri lavori di consolidamento e adeguamento per accogliere la nuova destinazione d'uso museale. Sono state eseguite delle cuciture armate per miglioramento delle connessioni tra elementi strutturali, cappe in cemento armato imperniate alle volte lapidee, cordoli in cemento armato, trasformazione dei solai di camminamento con travi di acciaio e lamiera grecata, la sostituzione di tutte le orditure di copertura dei due corpi di fabbrica cinquecenteschi con capriate in acciaio collegate a cordoli in cemento armato.

Le trasformazioni storiche implicano la compresenza di una discreta eterogeneità delle tecniche costruttive presenti nel manufatto. Riguardo la struttura di elevazione, interamente in muratura portante, sono rilevate 3 tipologie murarie: in pietra grezza (consolidate negli anni '80), in mattoni pieni e malta di calce e in pietra squadrata con nucleo interno. Le informazioni sulle murature sono in gran parte a vista per l'assenza di intonaco.

Riguardo gli orizzontamenti consistono in volte lapidee (con cappa in c.a.) a tutti i livelli. I camminamenti sono caratterizzati da solai piani in putrelle metalliche.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale è stata restituita mediante un controllo a campione dei rilievi disponibili. Il quadro fessurativo – nel complesso limitato – è rilevato sistematicamente e riportato in elaborati ad hoc distinguendo le lesioni diffuse da quelle isolate. Alla luce di questi risultati è scelto $F_{C1}=0,05$.

Le fasi evolutive sono ricostruite mediante un'indagine archivistica-bibliografica, senza prevedere schemi riassuntivi delle fasi. Non appare eseguito il controllo diretto sul manufatto delle informazioni indirette.

Gli elementi strutturali sono analizzati col supporto di indagini specialistiche (indagini visive, termografie, video-endoscopie) con l'obiettivo colmare le incertezze relative alla eterogeneità dei materiali e alla efficacia degli interventi di consolidamento degli anni '80. La localizzazione delle prove ha riguardato gran parte dei punti gli ambienti intonacati del castello. La scelta del numero e della localizzazione delle prove è derivata dalla conoscenza delle trasformazioni storiche e dalle verifiche del rilievo geometrico.

La descrizione della tessitura muraria è eseguita mediante documentazione fotografica accompagnata da brevi didascalie; le informazioni su assemblaggi e connessioni provengono dalle fonti documentarie (progetti di consolidamento). Riguardo l'aspetto di "Identificazione delle specificità storiche e costruttive" è dunque scelto un $F_{C2}=0,06$.

Riguardo l'aspetto "Parametri meccanici" non sono state svolte prove di caratterizzazione meccanica, ma esclusivamente il rilievo visivo delle tessiture a vista (corrispondente a "limitate indagini"), per cui è scelto $F_{C3}=0,06$. I parametri meccanici sono selezionati dalla tabella C8A2.1 scegliendo i valori minimi.

Infine, per l'aspetto "Terreno e fondazioni" sono realizzate delle indagini (MASW) di caratterizzazione del terreno e i risultati sono incrociati con le informazioni disponibili dalle fonti. È dunque scelto un $F_{C4}=0,03$.

Dalla sommatoria dei fattori parziali risulta un fattore di confidenza globale pari a $FC=1,20$.

Interpretazione delle informazioni

A valle della fase di conoscenza sono individuati alcuni aspetti critici nella compagine strutturale.

Essi riguardano in primo luogo le irregolarità plano-altimetriche dovute (i) alla asimmetria tra i bracci nord-ovest e nord-est che si sviluppano per 2 livelli fuori terra e i bracci opposti che comprendono esclusivamente la cinta muraria; aperture non allineate (nessuna criticità), (ii) alla compresenza di elementi dalla configurazione molto differente, per l'appunto la cinta

muraria con le torri e i fabbricati con cellule murarie ordinarie. Altra criticità è rilevata nei meccanismi pregressi e il disallineamento delle aperture del palazzo, le colombaie e i beccatelli della torre ovest.

Sono eseguite verifiche secondo i tre diversi livelli di valutazione LV1, LV2, ed LV3.

Per le verifiche secondo LV1 sono sperimentati due metodi: il “metodo di calcolo VM” (Dolce-Moroni 2005), e il SIVARS. Questa verifica riguarda esclusivamente i fabbricati cinquecenteschi e traslascia la cinta muraria e i bastioni.

Per la verifica secondo LV2, sono valutati meccanismi di ribaltamento (semplice e flessionale) del loggiato settecentesco al primo livello e della parete ad essa contigua.

La verifica secondo LV3 è condotta attraverso un modello globale organizzato che considera i muri come assemblaggio di macro-elementi. In particolare sono analizzati i due fabbricati addossati alle torri, prevedendo due modelli di calcolo che identificano due situazioni distinte, (i) con le torri o (ii) in assenza torri. Dalle verifiche emerge che non sussistono sostanziali differenze nel comportamento sismico.

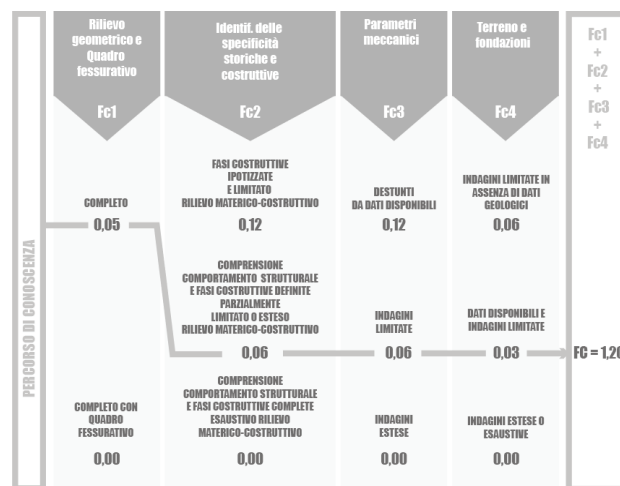


Figura 3.29 – Castello Pirro del Balzo, Venosa; definizione del Fattore di Confidenza

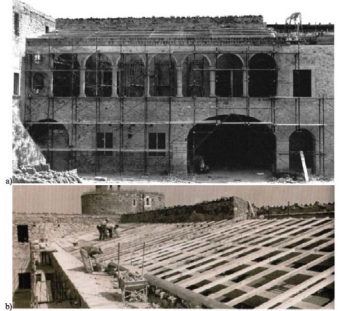
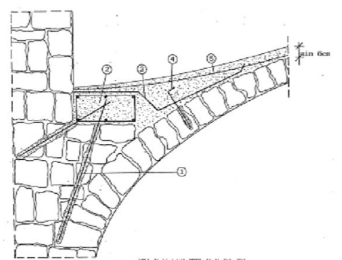


Figura 15 - Rifacimento della copertura del corpo Nord-Est in corrispondenza del loggato



Figura 16 - Consolidamento delle volte mediante allargamento e getto in opera di una cappa in c.a. armata alle strutture murarie. a) in corrispondenza dei piani intermedi e b) in corrispondenza del sottotetto



d) Consolidamento delle volte in pietra

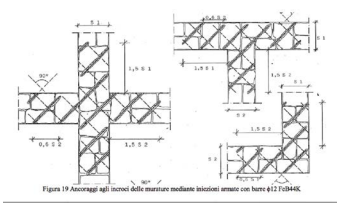
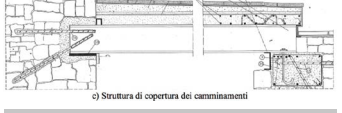
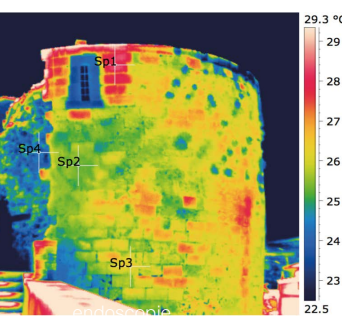


Figura 19 Anzavraggi agli incroci delle strutture mediante braccioli armati con barre #12 T304K6



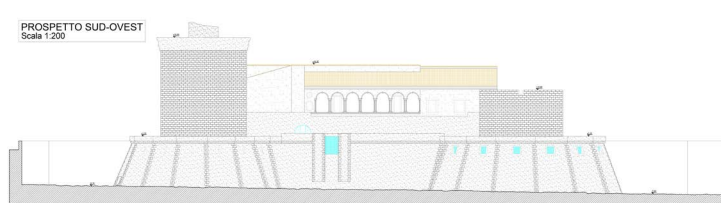
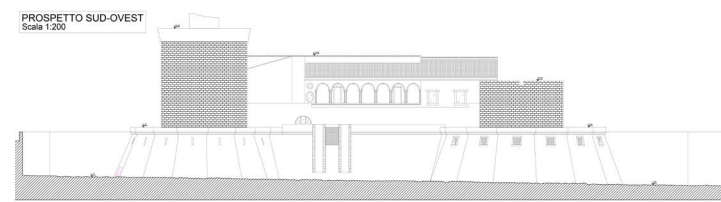
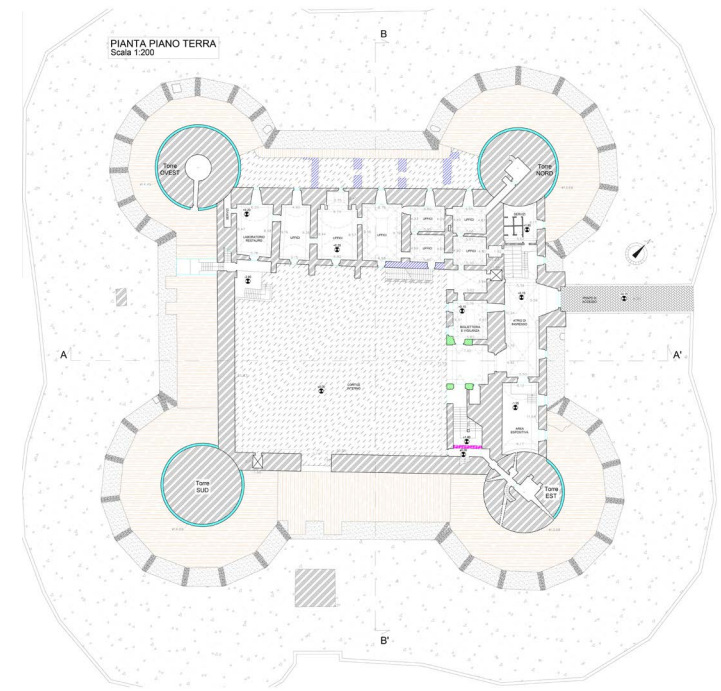
e) Struttura di copertura dei cammini

2. Interventi trascorsi



29.3 °C
29
28
27
26
25
24
23
22.5

4. Indagini specialistiche



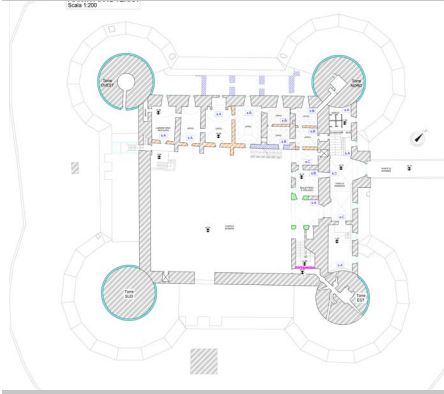
PIANTA

AREA DEL FORNARO	MURATURA DI PIETRE A SACCO
AREA RACCHIUSI	RIVESTIMENTO IN QUADRATA A BLOCCHI LATERALI QUADRATI
CORTESE INTERNO	MURATURA A BLOCCHI LATERALI NON QUADRATI
INCROCCIO E CAMMINAMENTI	NUOVI PARAMENTI MURARI
PROSPETTAMENTO IN PIETRA TERRAZZA	COPIERTURA ANEA E LOGGATA
AREA DI MANOVRA IN PIETRA PERI ANESI COSTANTE STRANZA	COPIERTURA COPRI
STRUTTURE IN PIETRA RACCHIUSI	STRUTTURE IN PIETRA RACCHIUSI
ARCHI IN MURATURA	SOLEI A BOCCHI LATERALI
SOLEI IN PIETRA RACCHIUSI	RIVESTIMENTO CON COPPA IN C.A.
STRUTTURE CON COPPA IN C.A.	SOLEI IN PIETRA RACCHIUSI
SOLEI IN PIETRA RACCHIUSI	SOLEI IN PIETRA RACCHIUSI
TRAVI DI COPPIERTURA IN ACCIAIO	TRAVI DI COPPIERTURA IN ACCIAIO
PIANTATI IN C.A.	TRAVI DI COPPIERTURA IN LEGNO

PROSPETTI

MURATURA DI PIETRE A SACCO	Volte a botte consolidate con cappa in c.a.
STRUTTURE IN PIETRA RACCHIUSI	Volte a crociera consolidate con cappa in c.a.
MURATURA A BLOCCHI LATERALI QUADRATI	Volte rinforzate consolidate con cappa in c.a.
MURATURA A BLOCCHI LATERALI NON QUADRATI	Volte a padiglione consolidate con cappa in c.a.
COPIERTURA	Volte lunettate consolidate con cappa in c.a.
TRAVI IN ACCIAIO	S.X. Solaio / orizzontamento tipo "X"
TRAVI IN LEGNO	Orditura solaio in legno
	Orditura solaio in acciaio
	Archi in muratura
	Travi di copertura in acciaio
	Pilastri in c.a. al piano sottotetto
	Travi di copertura in legno

1. Rilievo geometrico



3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



4. Indagini specialistiche

F2. CASTELLO DI MELFI, MELFI (PT)

Il Castello medievale di Melfi è situato a ridosso centro storico e attualmente è sede del Museo Archeologico Nazionale del Melfese intitolato a Massimo Pallottino.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

Il castello sorge su un'altura e la cinta muraria di forma curva con sette torri a nord-ovest è costruita a ridosso di una zona scoscesa. All'interno delle mura è realizzato un pianoro e l'edificio – oggi contenitore del museo - non è interessato da irregolarità plano-altimetriche.

Il complesso fortificato ha una superficie di impronta a terra pari a circa 5 mila mq, compresa la corte interna. La costruzione all'interno delle mura, da sola, misura circa 3 mila mq e si sviluppa per massimo tre elevazioni fuori terra per un'altezza media alla gronda di circa 20 m.

Non si rileva alcuna interazione con edifici adiacenti, ma il complesso può definirsi un aggregato strutturale perché costituito da edifici costruiti in epoche e con impianti differenti.

Il castello nasce come opera di fortificazione strategica tra i secoli XI e XII per opera del duca Pirro del Balzo Orsini. L'impianto originario normanno presentava con una struttura pressoché quadrangolare con quattro torri quadrate agli angoli (tre delle quali ancora oggi rilevabili). La prima trasformazione importante risale al dominio svevo e consiste nella occupazione del fronte nord scosceso mediante la costruzione della Torre del Marcaglione (connessa all'impianto normanno sull'angolo nord-est) e la Torre dell'Imperatore tra loro connesse da altri edifici costruiti sul pendio. Il completamento della cinta muraria circolare e del fossato si deve agli angioini, insieme al consolidamento mediante pareti a scarpa del fronte nord. Durante il XVI secolo il castello è donato all'ammiraglio Andrea Doria, la cui famiglia ha eseguito la costruzione di alcuni edifici all'interno delle mura. Infine, nel 1954 il castello è ceduto al Demanio dello Stato.

A partire dal 1954 sono eseguiti lavori di consolidamento e restauro a causa delle condizioni di degrado del castello anche dovuti agli eventi sismici del 1930. Altri interventi di restauro sono avviati nel 1968 e successivamente al terremoto del 1980, insieme ai lavori di adeguamento impiantistico e funzionale per la nuova destinazione d'uso museale.

I lavori condotti tra gli anni '80 e '90 hanno previsto: iniezioni armate per miglioramento delle connessioni tra elementi strutturali, cappe in cemento armato imperniate alle volte lapidee, cordoli in cemento armato, irrigidimento dei solai mediante solette in c.a. ovvero rinforzi estradossali imperniati a travetti prefabbricati esistenti, inserimento in breccia nella muratura di cordoli in cemento armato.

Le trasformazioni storiche implicano la compresenza di una eterogeneità delle tecniche costruttive presenti nel manufatto. Riguardo la struttura di elevazione, interamente in muratura portante di pietra sbozzata e – in alcune porzioni – in conci squadrati. Le informazioni sulle murature sono in gran parte a vista per l'assenza di intonaco.

Riguardo gli orizzontamenti consistono in volte lapidee (con cappa in c.a.) e solai in acciaio.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

Oggetto delle attività conoscitive e della verifica sismica è esclusivamente il corpo centrale adibito a museo; non sono considerate la cinta muraria e gli altri edifici non afferenti al museo.

La geometria strutturale è stata restituita mediante un controllo a campione dei rilievi disponibili. Il quadro fessurativo – nel complesso limitato – è rilevato sistematicamente e riportato in elaborati specifici distinguendo le lesioni passanti da quelle superficiali; analogamente il degrado delle superfici è analizzato in riferimento alle categorie del NorMal. Alla luce di questi risultati è scelto $F_{C1}=0$.

Le vicende costruttive sono ricostruite mediante un'indagine archivistica-bibliografica, e i risultati sono riassunti in schemi planimetrici e assonometrici; tali elaborati non comprendono la indicazione dei punti di cesura. Non è chiaro se è stato eseguito il controllo diretto sul manufatto delle informazioni indirette.

Gli elementi strutturali sono analizzati col supporto di indagini specialistiche pregresse (video-endoscopie, prove di carico sui solai).

La descrizione della tipologia muraria è contenuta in brevi didascalie delle indagini endoscopie e riguarda la forma delle pietre, ma non l'apparecchio. Non si rilevano descrizioni degli orizzontamenti. Riguardo l'aspetto di "Identificazione delle caratteristiche storiche e costruttive" è dunque scelto un $F_{C2}=0,06$.

Non sono stati svolti test diagnostici di caratterizzazione meccanica ma erano disponibili prove (martinetti piatti singoli e doppi) eseguite nell'ambito dei progetti trascorsi. Tuttavia, il numero di prove non è giudicato esaustivo in riferimento alle richieste delle NTC08, per cui i parametri meccanici sono selezionati dalla tabella C8A2.1 scegliendo i valori medi, in base al valore globale del FC pari a 1,21. Riguardo l'aspetto "Parametri meccanici" è dunque scelto $F_{C3}=0,12$.

Infine, l'aspetto "Terreno e fondazioni" sono realizzati dei sondaggi per la caratterizzazione del terreno e ulteriori prove diagnostiche, per cui è scelto un $F_{C4}=0,03$.

Dalla sommatoria dei fattori parziali risulta un fattore di confidenza globale pari a $FC=1,21$.

Interpretazione delle informazioni

A valle della fase di conoscenza non sono individuati rilevanti criticità strutturali, e il buono stato di conservazione è attribuito ai numerosi restauri avvenuti anche in epoca recente.

Sono eseguite verifiche secondo il livello di valutazione LV3.

La verifica secondo LV3 è condotta mediante analisi statica lineare secondo con un modello di calcolo a telaio equivalente.

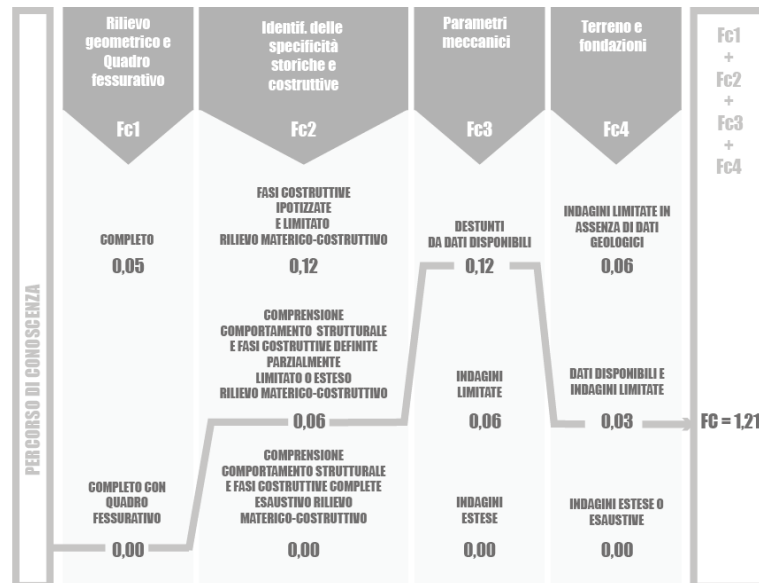
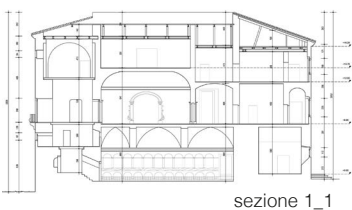
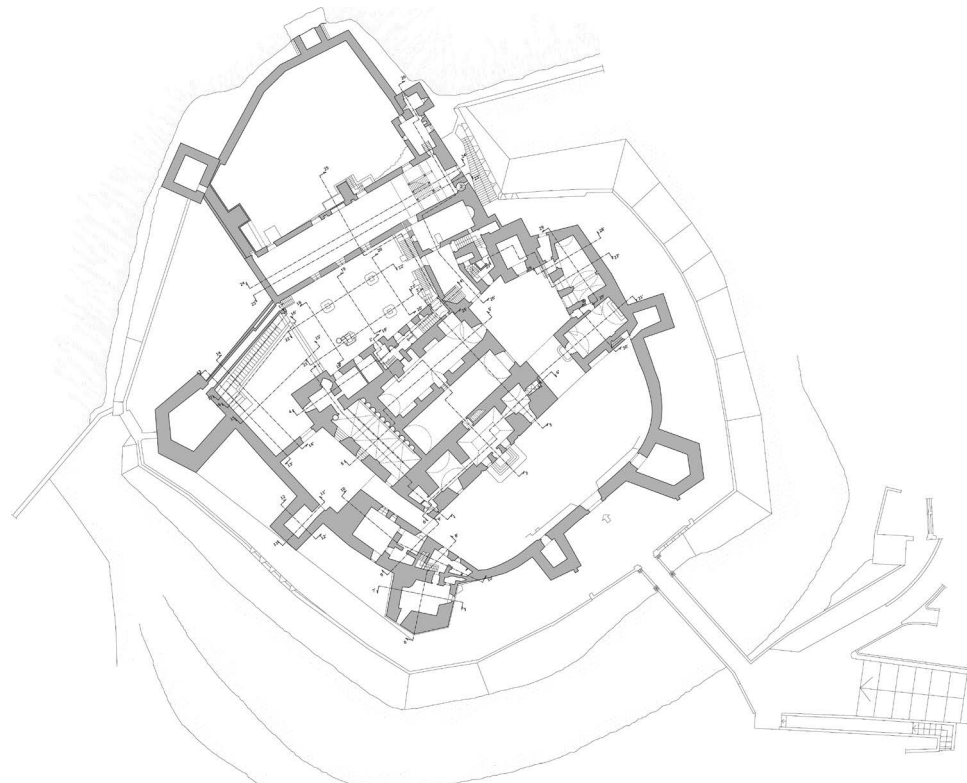
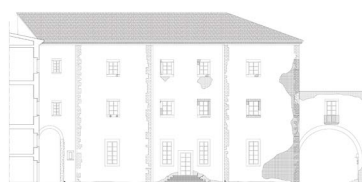


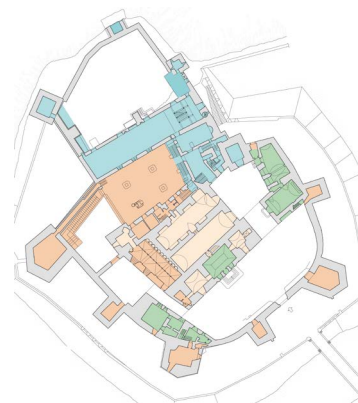
Figura 3.30 – Castello di Melfi, Melfi; definizione del Fattore di Confidenza



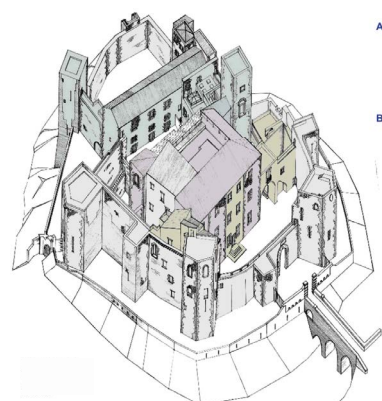
sezione 1_1



prospetto sud

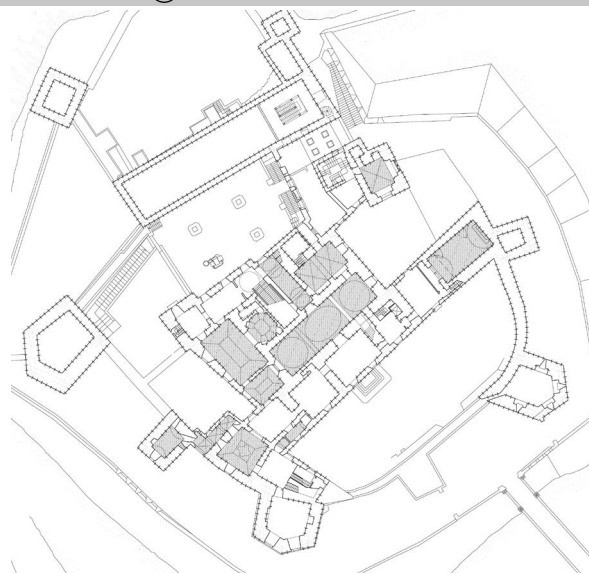


- IMPIANTO NORMANNO (1043-1199)
- IMPIANTO SVEVO (1199-1266)
- IMPIANTO ANGIOLINO (1266-1333)
- IMPIANTO DORIA (1531-1954)



vista assometrica con fasi costruttive

1. Rilievo geometrico 0 10m

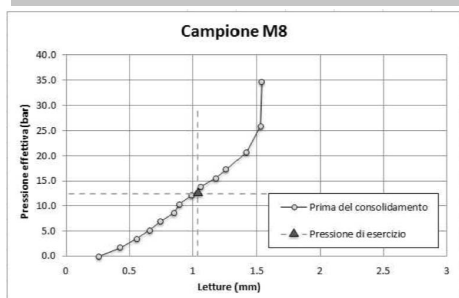


2. Fasi costruttive

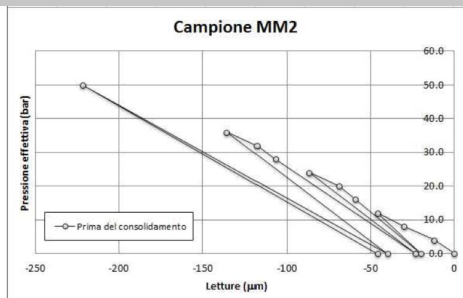
- Iniezione di miscela cementizia
- Iniezioni armate
- Consolidamento della volta con miscela di prodotti a base cementizia
- Irrigidimento del solaio
- Cordolo di ammassamento
- Cordolo in sommità in c.a. imperniato

Lavori eseguiti tra il 1983 e il 1997

3. Rilievo materico-costruttivo



martinetto piatto singolo (pregresso)



martinetto piatto doppio (pregresso)

SAGGIO ESPLORATIVO		S10
CM	DESCRIZIONE CRITICO-VISIVA	
0-9	Massetto con rete el. 8/20x20	
9-...	Volta in blocchi di tufo	
Lo spessore della volta da determinare con il foro dell'endoscopia vicina		
1:50		

saggi esplorativi (endoscopia)

4. Indagini specialistiche

F3. CASTEL SANT'ELMO, NAPOLI

Castel Sant'Elmo è situato sulla collina del Vomero nei pressi del complesso monumentale della certosa di San Martino, a circa 250 m.s.l. Dal 1976 appartiene al Demanio dello stato e nel 1988 diventa museo nazionale.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

Il castello sorge su uno sperone tufaceo, scolpito a formare la cinta muraria di forma stellata allungata con sei punte. All'interno delle mura – circa 30 m sopra il basamento delle mura – è realizzata la Piazza d'Armi che contiene i tre edifici isolati della Palazzina dell'Ex Marina, del Carcere Alto e del Carcere Basso.

Il complesso fortificato ha una superficie di impronta a terra pari a circa 17.800 mq, compresa la piazza interna. La Palazzina dell'Ex Marina misura 1.700 mq con due elevazioni fuori terra per un'altezza alla gronda di 11 m; ha una maglia muraria compatta nelle due direzioni costituita da cellule murarie di circa 5 m, fatta eccezione dell'ambiente ad aula unica e a doppia altezza della chiesetta. Il Carcere Alto ha un'impronta a terra di 1.400 mq con due elevazioni per 12 m di altezza alla gronda; l'impianto prevede cellule murarie rettangolari che si sviluppano attorno a una lunga galleria voltata al piano terra, mentre al piano primo – costruito per metà dell'impronta a terra – lo spazio della galleria è organizzato anch'esso con una infilata di ambienti. Infine, il Carcere Basso si estende per circa 700 mq per una elevazione fuori terra di circa 5 m di altezza; ha una maglia compatta costituita da cellule murarie quadrate ampie circa 5 m.

Un elemento di forte disomogeneità plano-altimetrica oltre che strutturale è rappresentato dall'auditorium sotterraneo costruito al di sotto del Carcere Alto e il Carcere Basso. Inoltre, lo sperone tufaceo è caratterizzato dalla presenza di gallerie scavate al di sotto di piazza d'Armi già dall'epoca del primo impianto angioino.

Castel Sant'Elmo assume conformazione analoga all'attuale per opera di Carlo V che nel 1538 dà avvio all'opera di ricostruzione del castello (il primo impianto doveva essere normanno). A questa fase appartengono la definizione stellata della cinta muraria con le celle a essa addossate; sono costruiti all'interno della Piazza d'Armi l'alloggio del castellano, l'edificio del Comando, il deposito munizioni, e la chiesetta di Sant'Erasmo. Nel 1587 gli edifici della piazza sono parzialmente distrutti a seguito dell'esplosione del deposito munizioni colpito da un fulmine. Sono quindi ricostruiti la dimora del castellano, la chiesa, il Carcere Alto e il Carcere Basso. Il progetto è in parte redatto e diretto da Domenico Fontana. Fino al 1976 il castello è adibito a caserma.

A partire dal 1976, il castello diventa monumento nazionale e sono eseguiti lavori di consolidamento e restauro e di adeguamento funzionale per la nuova destinazione d'uso museale. È costruito l'auditorium di 700 posti con struttura in acciaio e cemento armato al di

sotto della piazza d'Armi. Altri interventi di restauro comprendono iniezioni nelle murature di tufo e un adeguamento impiantistico.

Le trasformazioni storiche sono avvenute mantenendo una continuità nella tecnica costruttiva, interrotta esclusivamente dagli interventi del XX secolo. Riguardo la struttura di elevazione degli edifici essa è interamente in muratura portante di blocchi di tufo, ma le informazioni sulle tessiture sono in gran parte celate dall'intonaco.

Riguardo gli orizzontamenti consistono in volte in muratura di tufo e solai in latero-cemento di sostituzione.

Elementi che generano difficoltà per una completa conoscenza del manufatto possono essere le discontinuità costruttive definite dalla compresenza di fabbricati con strutture totalmente diversi è posti in aderenza. Analogamente, la presenza di cavità antropiche diffuse al di sotto del piano di fondazione degli edifici implica la necessità di verifiche geometriche accurate.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale è stata restituita mediante un controllo a campione dei rilievi disponibili degli edifici di piazza d'Armi, e la redazione ex-novo del rilievo delle cavità sotterranee e dell'auditorium mediante l'utilizzo del laser-scanner. Il quadro fessurativo – più grave negli edifici in aderenza all'auditorium – è rilevato sistematicamente e riportato in elaborati specifici distinguendo le lesioni passanti da quelle superficiali; analogamente il degrado delle superfici è analizzato in riferimento alle categorie del NorMal. Alla luce di questi risultati è scelto $F_{C1}=0$.

Le fasi evolutive sono ricostruite mediante un'indagine archivistica-bibliografica, e i risultati sono riassunti in schemi planimetrici; tali elaborati non comprendono la indicazione dei punti di cesura. Non è chiaro se è stato eseguito il controllo diretto sul manufatto delle informazioni indirette.

Gli elementi strutturali sono analizzati col supporto di indagini specialistiche pregresse (video-endoscopie, prospezioni georadar).

La descrizione della tipologia muraria è contenuta in brevi didascalie delle indagini endoscopie e riguarda la forma delle pietre, ma non l'apparecchio. Non si rilevano descrizioni degli orizzontamenti. Riguardo l'aspetto di "Identificazione delle caratteristiche storiche e costruttive" è dunque scelto un $F_{C2}=0,06$.

Non sono stati svolti test diagnostici di caratterizzazione meccanica riguardo l'aspetto "Parametri meccanici" è scelto $F_{C3}=0$.

Infine, l'aspetto "Terreno e fondazioni" sono realizzati dei sondaggi per la caratterizzazione del terreno e ulteriori prove diagnostiche, per cui è scelto un $F_{C4}=0,03$.

Dalla sommatoria dei fattori parziali risulta un fattore di confidenza globale pari a $FC=1,09$.

Interpretazione delle informazioni

A valle della fase di conoscenza sono individuati alcune criticità dovute alla discontinuità costruttiva imposta dalla struttura dell'auditorium, probabilmente causa del quadro fessurativo osservato nei fabbricati sovrastanti.

Sono eseguite verifiche secondo i livelli di valutazione LV1 ed LV2. Per il Carcere basso non sono valutati meccanismi locali, in quanto si osserva una omogenea distribuzione delle resistenze a taglio nelle due direzioni (maglia muraria compatta). Nel caso del Carcere Alto e della Palazzina dell'Ex Marina sono analizzati alcuni meccanismi locali di ribaltamento fuori piano attivabili in pareti esterne.

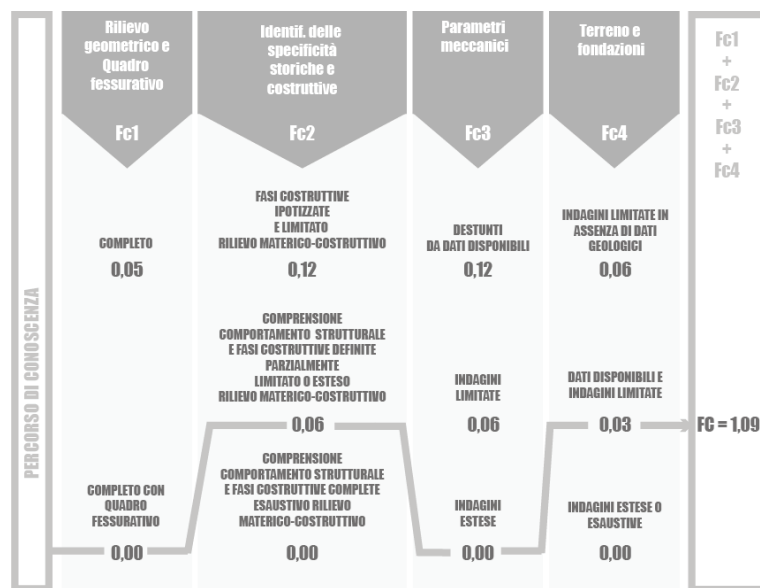
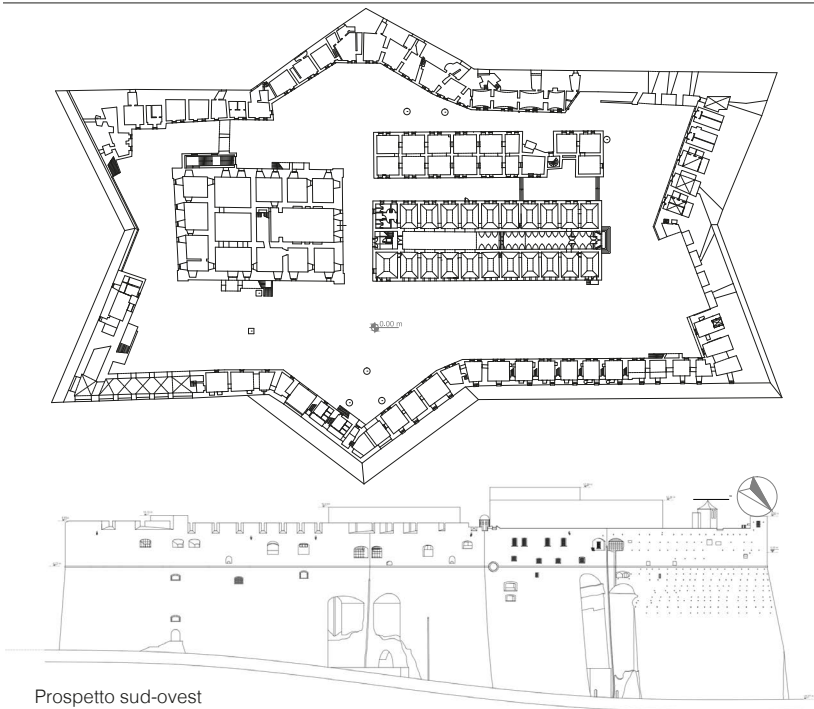


Figura 3.31 – Castel Sant'Elmo, Napoli; definizione del Fattore di Confidenza

F3 - CASTEL SANT'ELMO, NAPOLI - Sintesi elaborati della fase conoscitiva

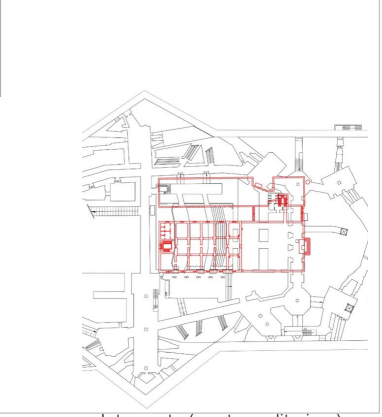
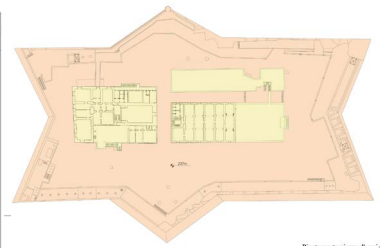


Prospetto sud-ovest

PERIODI FASI COSTRUTTIVE

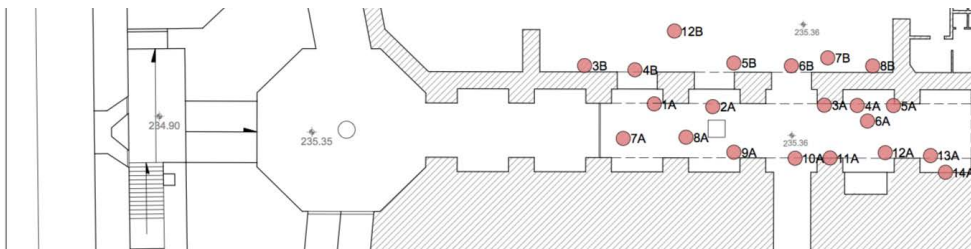
1538-1546
 Carlo V, Re di Spagna, nel 1538 decise di abbattere e ricostruire interamente il castello. L'architetto Carlo Vignola, venne affidato la faccenda ed, in poco tempo, elaborò un ampio progetto. A Piazza d'Armi furono costruiti gli alloggi per il condottiero e per gli ufficiali del presidio. Scelta del colonnato a doppio della manomissione di primo impiego e la soluzione di San Francesco.
 Durante il periodo a lungo di cantiere, nell'area della fabbrica, furono murati nelle nicchie due punti di accesso locali, adibiti a officine, magazzini, depositi di materiali, lavabi, bagni, cucine e vari alloggiamenti per i ragazzi. Furono realizzate anche due grandi cunicoli: lungo la stessa via dove oggi c'è il colonnato; nelle parti più interne, furono realizzate le prigioni.

1599-1610
 Gli edifici presenti in Piazza d'Armi vennero distrutti nel 1599 da un fulmine che cadde in pieno al di sopra delle manomissioni di San Francesco. Successivamente tra il 1599 ed il 1610 il castello è quindi interamente da fondo di rovine nel cui ambito viene stabilizzata la chiesa all'interno del presidio, la chiesa del cardinale, il carcere altro e il...



Intervento (quota auditorium)

1. Rilievo geometrico

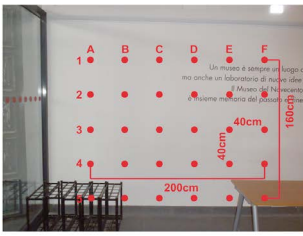


2. Fasi costruttive

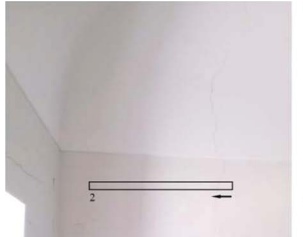
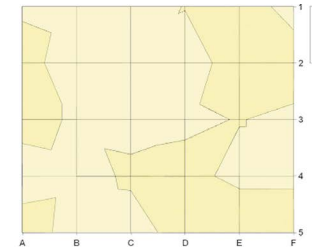


- Macchia**
Alterazione che si manifesta con pigmentazione accidentale e localizzata della superficie; è correlata alla presenza di materiale estraneo al substrato
- Mancanza**
Perdita di elementi tridimensionali.
- Patina biologica**
Strato sottile, omogeneo, costituito prevalentemente da microrganismi, variabile per consistenza, colore e adesione al substrato.
- Fessurazione passante**
Degradazione che si manifesta con la formazione di soluzioni di continuità e che può comportare lo spostamento reciproco delle parti

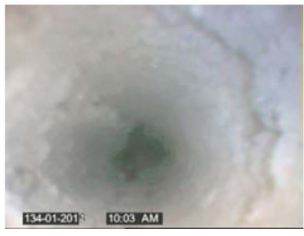
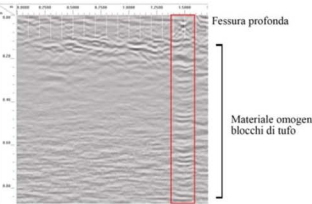
3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



Indagini soniche



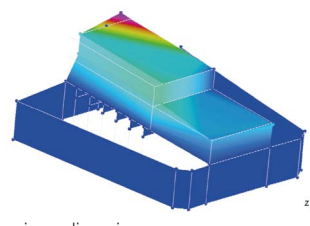
Georadar



Fessura 12.60 Hz, smorzamento 0.68 %



Prove endoscopiche



Identificazione dinamica

4. Indagini specialistiche

F4. CASTELLO SVEVO ANGIOINO, MANFREDONIA (FG)

Il castello svevo angioino di Manfredonia – provincia di Foggia - sorge all'interno del centro storico, posto strategicamente di fronte al mare. Nel 1901 è acquistato dal Comune di Manfredonia che lo dona allo Stato nel 1968 per l'istituzione dell'attuale Museo Archeologico Nazionale.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

Dalla lettura dell'impianto planimetrico del castello si evince come il manufatto sia costituito dal sovrapporsi di due fortificazioni di epoche differenti, una inclusa dentro l'altra, entrambe di forma prossima al quadrato con quattro torri agli angoli. Le dimensioni massime del castello sono date dalla cinta muraria più esterna che misura circa di 78 x 64 m e si sviluppa per circa 4.500 mq di impronta a terra compresa la corte (Piazza d'Armi); in alzato le strutture del castello raggiungono massimo tre livelli fuori terra per un'altezza media alla gronda di 14 m a partire dal piano di Piazza d'Armi.

Il castello è posto su un sito lievemente in pendenza e solo sul lato sud-ovest sono presenti piani seminterrati e fondazioni a quote sfalsate.

Le vicende costruttive più importanti del castello sono legate soprattutto alla evoluzione degli stessi sistemi difensivi. Il nucleo originario è di epoca sveva (1256-1264) ed è costituito dalla cinta muraria del quadrilatero interno (il Mastio) che comprende la torre quadrangolare, ancora oggi visibile sul lato sud-est; nella stessa epoca – sotto la dinastia angioina (1266-1281) – la costruzione è completata con le tre torri circolari e ampliata con la cinta muraria esterna che ingloba il nucleo originario, anch'essa con tre torri circolari poste sui tre angoli verso il mare (nord-est, sud-est, sud). In epoca aragonese (1458) il castello è ulteriormente rafforzato con la sopraelevazione della torre quadrangolare interna e le torri angioine. Agli inizi del XVI secolo, durante la dominazione francese, è costruito il bastione pentagonale verso la città probabilmente sui resti della quarta torre angioina. A partire dai primi anni del Seicento, il castello – persa gradatamente la funzione difensiva – è adibito a carcere e caserma militare. Sul finire dell'Ottocento, il castello si presenta denso di rimaneggiamenti attuati per succedute destinazioni d'uso di vario tipo (residenze, orfanotrofio, ecc...), e permane in questo stato fino alla acquisizione da parte del comune (1901) che ne avvia i lavori di recupero e manutenzione (demolizione di superfetazioni, sistemazione del fossato, ecc...). Negli anni '50 sono rilevati altri lavori di demolizione e ricostruzione di alcuni settori del castello e altri lavori di restauro finalizzati a ripristinare il nucleo svevo-angioino. A seguito della donazione allo Stato, nel 1968 sono avviati lavori di rifunzionalizzazione per la nuova destinazione d'uso museale, nell'ambito dei quali sono demoliti e ricostruiti alcuni solai.

La struttura di elevazione del castello è in muratura di pietra sbozzata o – in quantità più esigua – in pietra squadrata, con spessori murari che raggiungono anche i 2-3 m per le mura

di cinta; la tessitura e la dimensione degli elementi è differente a seconda delle fasi costruttive. Gli orizzontamenti sono volte in muratura in blocchi squadrate e solai piani in legno, in latero cemento o di acciaio con soletta in calcestruzzo armata con rete elettrosaldata.

Il complesso architettonico sembra caratterizzato da una eterogeneità delle tecniche costruttive limitata alla sostituzione di alcuni orizzontamenti.

Le informazioni su accostamenti e tecniche costruttive sono in parte a vista; solo all'interno alcune pareti e alcune volte sono intonacate. Il livello di difficoltà per il raggiungimento di una conoscenza adeguata del castello di Manfredonia potrebbe essere legato alle dimensioni del manufatto, con particolare riguardo agli spessori dei muri, la cui sezione è difficilmente ipotizzabile. Dall'altra parte, però, l'ingente spessore è un elemento che gioca a favore della stabilità complessiva di tutto il manufatto.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale è definita mediante controllo del rilievo esistente con strumentazione tradizionale. Il quadro fessurativo è rilevato esclusivamente nella parete a sud-est e riportato in una tavola specifica con foto delle lesioni. In base a questi risultati per questo primo aspetto della conoscenza – Rilievo geometrico – è scelto un $F_{C1}=0$.

La restituzione delle fasi costruttive è delineata con il supporto di una ricerca bibliografica e archivistica e un successivo controllo diretto sul manufatto eseguito anche mediante prove diagnostiche (termografie). Le fasi costruttive sono sintetizzate in schemi planimetrici in cui i vari ampliamenti sono distinti con campiture differenti.

L'analisi della tecnica costruttiva è elaborata attraverso l'esecuzione di indagini diagnostiche (termografie, video-endoscopie, saggi). In particolare sono indagate le sezioni murarie attraverso endoscopie effettuate sui muri appartenenti alle varie fasi di ampliamento. Sono eseguiti alcuni disegni di dettaglio delle tessiture murarie. Sono state svolte indagini magnetometriche per conoscere la direzione dell'armatura delle travi in c.a. del solaio nell'ambiente a sud-est. Alla luce dei risultati raggiunti per l'aspetto "Identificazione delle specificità storiche e costruttive" è scelto un $F_{C2}=0,06$.

Sono eseguite delle prove di schiacciamento degli elementi prelevanti in situ e i parametri meccanici delle murature sono selezionati direttamente dalla tabella C8A2.1; sono considerati i valori minimi, ma è chiarito che in sede di verifica non sarà applicato il FC perché le prove in situ hanno restituito valori molto più alti di quelli forniti dalle NTC08, per cui un'ulteriore riduzione appare eccessivamente cautelativa. Il fattore parziale scelto per questo aspetto è $F_{C3}=0,06$.

Infine, riguardo le informazioni su "terreno e fondazioni" sono disponibili dati provenienti da indagini pregresse. Alla luce di questi risultati per questo aspetto è scelto un $F_{C4}=0,06$.

Dalla sommatoria dei succitati fattori parziali deriva il valore globale di $FC=1,18$.

Interpretazione delle informazioni

Il giudizio sul comportamento sismico del Castello svevo-angioino di Manfredonia è positivo ed è avvalorato dai risultati delle analisi numeriche.

Sono eseguite verifiche secondo i tre livelli di valutazione LV1, LV2 e LV3. Le analisi secondo LV1 sono eseguite utilizzando il SIVARS, ma solo per una porzione di edificio (salone a sud-est e torre quadrangolare).

Le verifiche secondo LV2 sono eseguite per il muro porticato di Piazza d'Armi a sud-est, considerando un cinematisimo di rottura degli archi ogivali e un meccanismo di ribaltamento fuori piano della parete.

Per le verifiche secondo LV3 sono condotte su diversi modelli analizzati separatamente mediante l'approccio a elementi finiti. Tale ipotesi di scomposizione in "sottosistemi" è giustificata dagli esiti della analisi storica e delle indagini in situ che hanno rivelato la quasi totale assenza di ammorsatura tra le costruzioni di epoche differenti. Tali sottosistemi corrispondono dunque a tre torri circolari della cinta interna, la torre quadrangolare, e il portico in piazza d'Armi. Un modello globale è poi elaborato per analizzare le reciproche relazioni tra i sottosistemi.

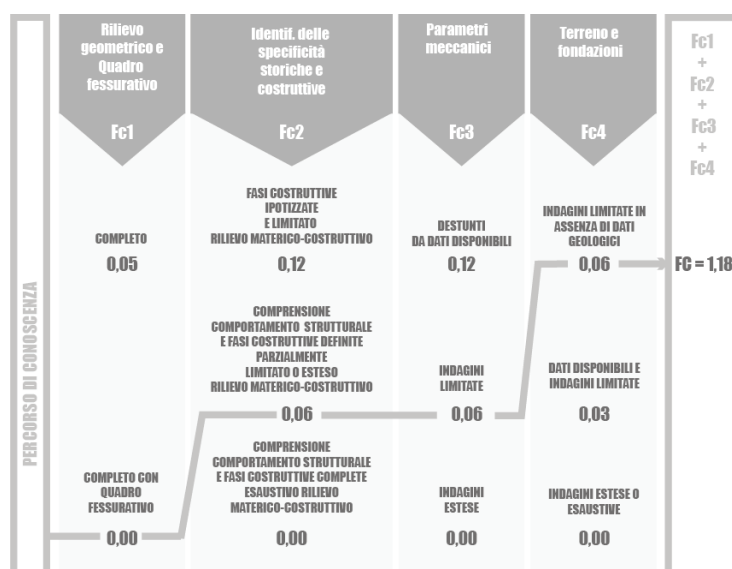
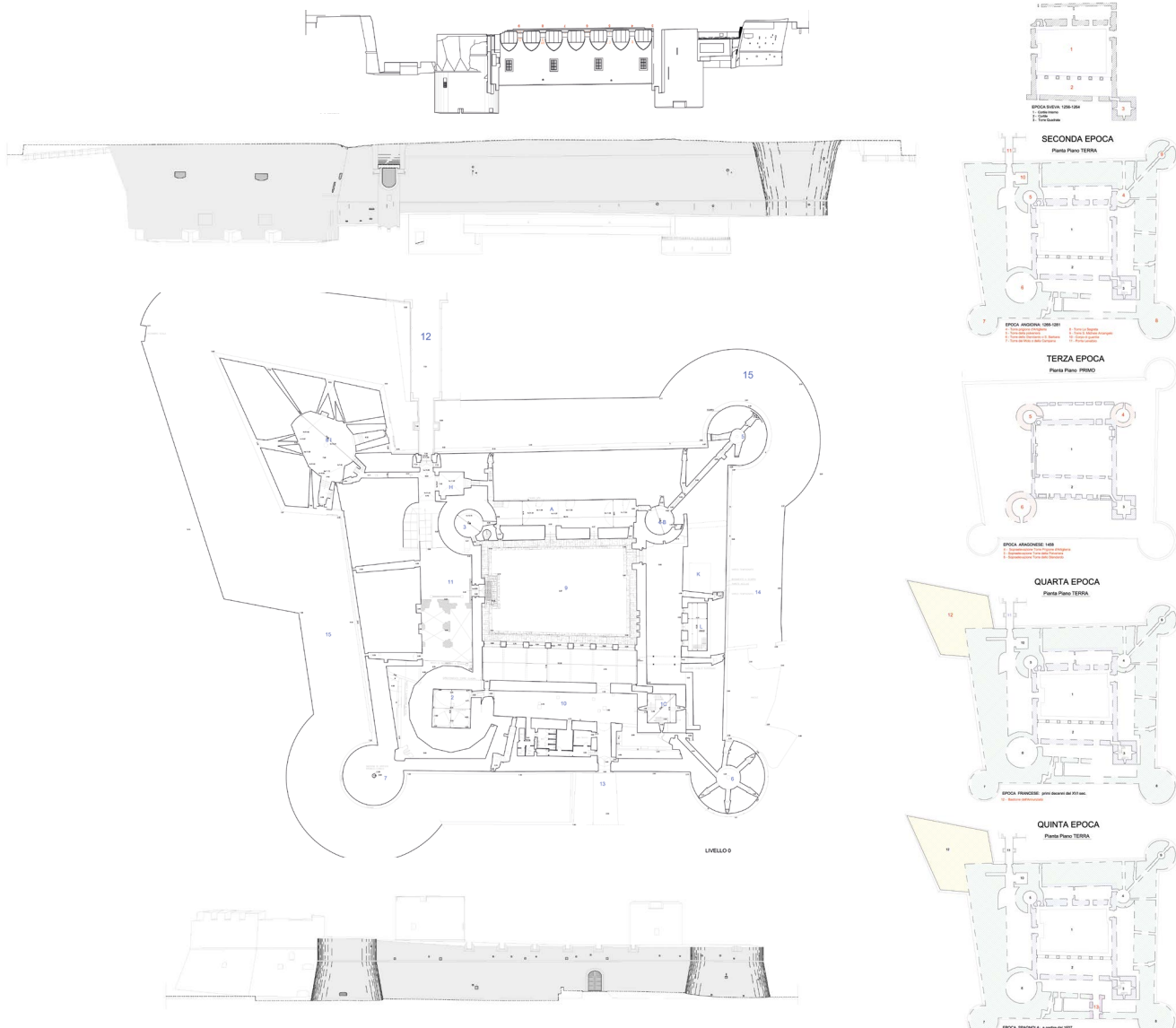
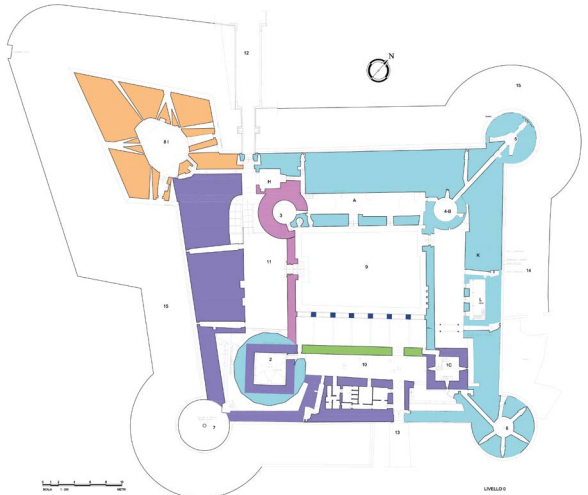


Figura 3.32 – Castello Svevo-Angioino, Manfredonia; definizione del Fattore di Confidenza



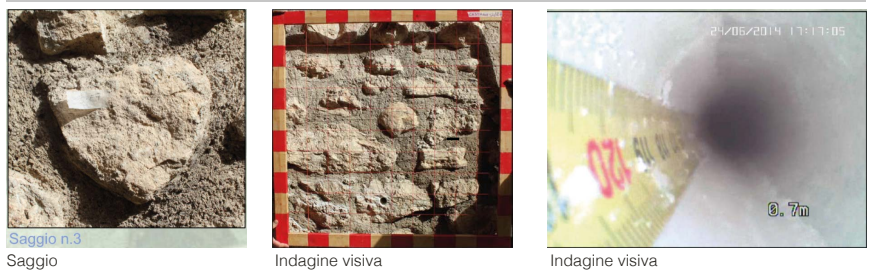
1. Rilievo geometrico 0 — 10m

2. Fasi costruttive



- **TIPOLOGIA MURARIA N°1:** Tipologia muraria: Muratura in pietrame disordinata per forma, dimensione e tipo di materiale degli elementi nucleo incoerente (CAMPIONE S2-S3-S11-S21-E19)
- **TIPOLOGIA MURARIA N°2:** Tipologia muraria: Muratura in pietrame disordinata per forma, dimensione e tipo di materiale degli elementi nucleo con cospicua presenza di malta (CAMPIONE S9-S17-S10)
- **TIPOLOGIA MURARIA N°3:** Tipologia muraria: Muratura in pietrame disordinata per forma, dimensione e tipo di materiale degli elementi nucleo con malta friabile (CAMPIONE S5)
- **TIPOLOGIA MURARIA N°4:** Muratura in pietra da spacco con buona tessitura (CAMPIONE S4-S7)
- **TIPOLOGIA MURARIA N°5:** Muratura a blocchi squadri di pietra non tenera (CAMPIONE S12-S13-S20)
- **TIPOLOGIA MURARIA N°6:** Muratura a blocchi squadri di pietra tenera (pilastri piazza d'armi)

3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



4. Indagini specialistiche

F5. CASTELLO PANDONE, VENAFRO (IS)

Il castello medievale – residenza della famiglia Pandone a partire dal XVI secolo – sorge a nord-est del centro storico di Venafro, in provincia di Isernia e ricade a limite della centuriazione romana. Dal dicembre del 2012, il castello è museo nazionale del Molise.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

L'impianto del castello è a base quadrata di dimensioni massime 26 x 30 m, si sviluppa per circa 1.500 mq di impronta a terra e in alzato raggiunge i tre livelli fuori terra per un'altezza media alla gronda di 22 m a partire dal piano di fossato. La regolarità del quadrato è interrotta dal lato nord, inclinato rispetto agli altri di circa 30°. Sul lato ovest si trovano le due torri circolari aventi diametro di circa 20 m, mentre nell'angolo nord-est trova posto la torre quadrangolare di lato pari a 10 m. Gli edifici costruiti sopra la cinta muraria sono caratterizzati da un impianto strutturale costituito da cellule murarie di forma quadrata o rettangolare che si sviluppano attorno a una corte centrale.

Il castello è posto su un sito in forte pendenza e presenta fondazioni a quote sfalsate. In particolare, la braga merlata a sud-est costituisce un muro di contenimento del terreno che realizza il piano di fondazione degli edifici costruiti all'interno della fortificazione, posto a 15 m dalla quota del fossato.

Le vicende costruttive più importanti del castello sono legate soprattutto alla evoluzione degli stessi sistemi difensivi. Il nucleo originario è longobardo (X secolo) e comprende la torre quadrangolare ancora oggi visibile sul lato settentrionale; nella stessa epoca la costruzione prosegue definendo il "castello-recinto" a base quadrata a corte, caratterizzato dal lato settentrionale inclinato, probabilmente, nella medesima direzione della cinta muraria della città. In epoca angioina (XIV secolo) sono costruite le tre torri circolari. In epoca aragonese (XVI secolo) il castello è ulteriormente rafforzato con l'ampliamento della torre sud-est, di seguito collegata alla braga merlata con camminamenti che incorpora anche la torre sud-ovest. L'ultima trasformazione storica di rilievo risale al XVI secolo, quando il castello diventa residenza della famiglia Pandone, che fa costruire un loggiato in adiacenza alla torre circolare nord.

Dalla metà dell'Ottocento il castello è oggetto di trasformazioni distributive per la creazione di piccole residenze rurali e solo a partire dal 1979 – anno in cui è acquistato dal Ministero dei Beni Culturali – sono avviati interventi di restauro volti a ricostituire la *facies* originaria del monumento.

Tra gli interventi eseguiti nel decennio 1980-1990 si segnalano: l'applicazione di perforazioni armate e iniezioni di cemento nelle murature; la sostituzione dei solai lignei marcescenti e delle coperture pericolanti con solai e capriate metalliche; il consolidamento delle volte mediante asportazione del riempimento e sostituzione dello stesso con argilla espansa e costruzione di soletta in c.a. ammorsata ai muri perimetrali mediante code di rondine; consolidamento del fossato mediante micropali; l'impermeabilizzazione a doppia guaina protetta da massetto armato di rete elettrosaldata del selciato della braga merlata; l'inserimento di tiranti alla quota del solaio del loggiato cinquecentesco.

La struttura di elevazione del castello è in muratura di pietra sbazzata con spessori murari che raggiungono anche i 2-3 m; la tessitura e la dimensione degli elementi è differente a seconda delle fasi costruttive. Pietre squadrate e di grosse dimensioni sono utilizzate per la costruzione dei cantonali della torre longobarda, della torre angioina e per i pilastri e i cantonali della loggia che si affaccia sul lato ovest. Gli orizzontamenti sono in gran parte volte in muratura al piano del fossato e al piano terra, mentre ai piani primo e secondo sono presenti solai piani in putrelle e tavelloni con soletta in calcestruzzo armata con rete elettrosaldata.

Il complesso architettonico è dunque caratterizzato da una eterogeneità delle tecniche costruttive, dovuta alla sostituzione di gran parte degli orizzontamenti originari e alla introduzione di elementi strutturali in cemento armato.

Le informazioni su accostamenti e tecniche costruttive sono in parte dichiarate dai prospetti esterni faccia vista; solo all'interno alcune pareti e alcune volte sono intonacate. Il livello di difficoltà per il raggiungimento di una conoscenza adeguata del castello Pandone è soprattutto legato alla mancata visibilità di alcune informazioni, che giustifica l'utilizzo di prove non distruttive. Inoltre la disponibilità di fonti sugli interventi attuati e di foto di cantiere consentono di ottenere una conoscenza complessiva delle trasformazioni recenti e di alcune parti del manufatto oggi non visibili.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale è definita mediante controllo del rilievo esistente con strumentazione tradizionale e integrazione degli elaborati con le planimetrie degli orizzontamenti ai vari livelli. Il quadro fessurativo è rilevato sistematicamente e le lesioni sono documentate su planimetrie specifiche con una foto di richiamo. In base a questi risultati per questo primo aspetto della conoscenza – Rilievo geometrico – è scelto un $F_{C1}=0$.

La restituzione delle fasi costruttive è delineata con il supporto di una ricerca bibliografica e archivistica e un successivo controllo diretto sul manufatto eseguito anche mediante prove diagnostiche. Le fasi costruttive sono sintetizzate in schemi planimetrici in cui i vari ampliamenti sono distinti con campiture differenti.

L'analisi della tecnica costruttiva è elaborata attraverso l'esecuzione di indagini diagnostiche (soniche, termografie, video-endoscopie). In particolare sono indagate le sezioni murarie attraverso endoscopie effettuate sui muri appartenenti alle varie fasi di ampliamento. Sono eseguiti alcuni disegni di dettaglio delle murature e per il giudizio sulla qualità degli apparecchi è utilizzata la classificazione GNDT I e II livello; sono prodotti elaborati di dettaglio degli orizzontamenti comprensivi degli elementi introdotti con gli interventi di consolidamento. Sono state svolte indagini pacometriche per conoscere gli interassi delle putrelle. Alla luce dei risultati raggiunti per l'aspetto "Identificazione delle specificità storiche e costruttive" è scelto un $F_{C2}=0,06$.

Non sono eseguite indagini di caratterizzazione meccanica e i parametri meccanici delle murature sono selezionati direttamente dalla Circolare 2009 a valle della caratterizzazione con schede GNDT;

sono considerati i valori minimi e medi in base ai risultati delle prove soniche. Il fattore parziale scelto è $F_{C3}=0,06$.

Infine, riguardo le informazioni su “terreno e fondazioni” sono disponibili dati provenienti da indagini pregresse. Alla luce di questi risultati per questo aspetto è scelto un $F_{C4}=0,03$.

Dalla sommatoria dei succitati fattori parziali deriva il valore globale di $FC=1,15$.

Interpretazione delle informazioni

Sono eseguite verifiche secondo i tre livelli di valutazione LV1, LV2 e LV3. Le analisi secondo LV1 sono eseguite utilizzando il SIVARS.

Per le verifiche locali secondo LV2 sono individuati i macroelementi nelle pareti esposte a ribaltamento fuori piano (pareti prospettanti sulla corte e parete prospettante sulla braga merlata) considerando l’attivazione del meccanismo alle tre quote di interpiano. Per le pareti perimetrali della corte è analizzato anche il meccanismo flessionale che considera il vincolo sommitale del cordolo in c.a. e incastro alla base.

Per le verifiche secondo LV3 sono condotte su tre modelli analizzati mediante l’approccio a elementi finiti: un modello che considera il castello nel suo complesso; un modello che considera la torre longobarda sconnessa dal resto del fabbricato - poiché dalla disamina conoscitiva si evince la mancata ammortatura tra i corpi – e un terzo modello che comprende le altre porzioni del castello.

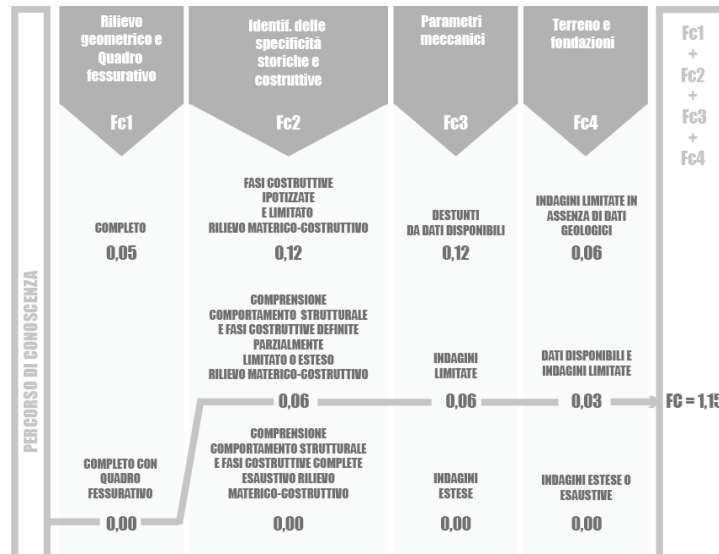
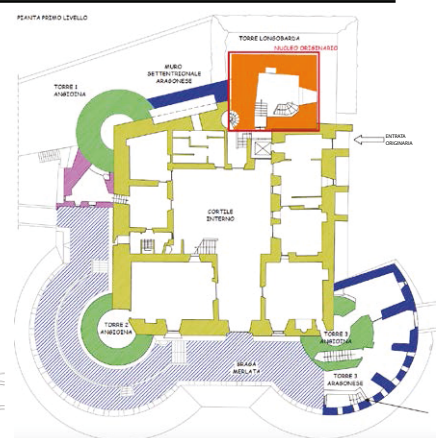
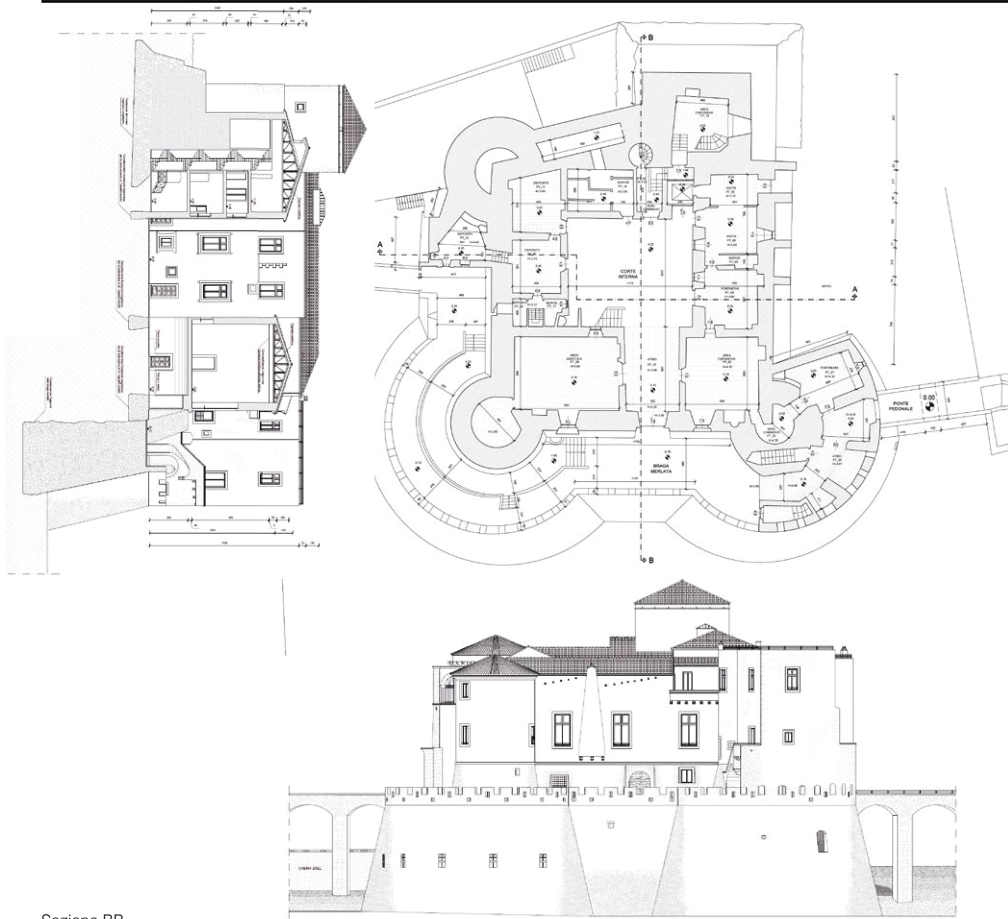
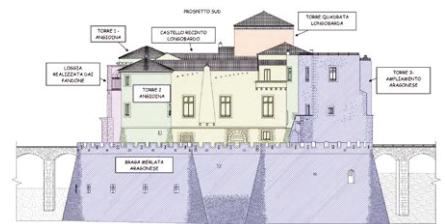


Figura 3.33 – Castello Pandone, Venafro (IS); definizione del Fattore di Confidenza

F5 - CASTELLO PANDONE, VENAFRO (IS) - Sintesi elaborati della fase conoscitiva



Pianta Primo Livello



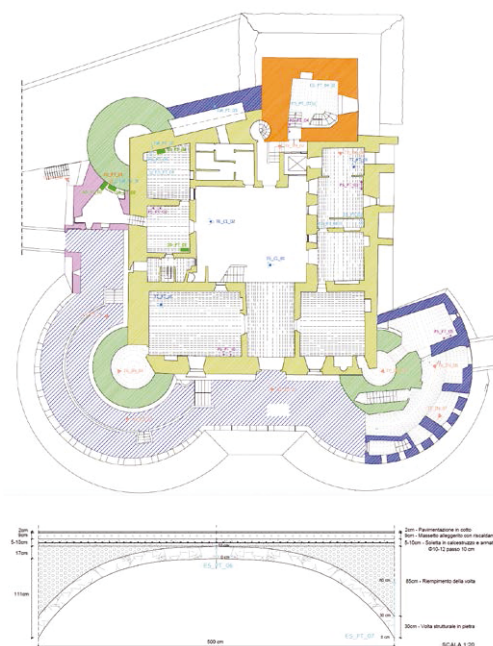
- X Sec. - nucleo originario longobardo
- X Sec. - Completamento costruzione lognobarda
- XIV Sec. - Costruzione delle tre torri angioine
- XV Sec. - Ispezzimento muro nord e della torre est
- XVI Sec. - costruzione del loggiato

Sezione BB

1. Rilievo geometrico

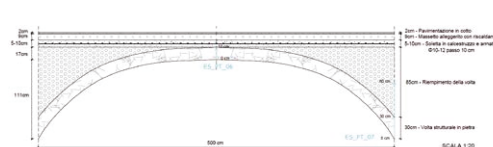


2. Fasi costruttive

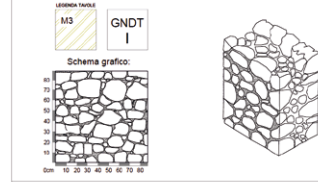


LEGENDA RILIEVO MATERICO - STRUTTURALE	
PS	PROVA SONICA - STR. VERTICALI
EM	ENDOSCOPIA - STR. VERTICALI
IV	INDAGINE VISIVA
CC	CAROTAGGIO CONTINUO - STR. VERTICALI
ES	ENDOSCOPIA - STR. ORIZZONTALI
SD	SAGGIO DEMOLETTIVO
TE	TERMOGRAFIE ESTERNE
TS	TERMOGRAFIE INTERNE

LEGENDA TIPOLOGIE MURARIE	
M1	Apparecchiatura: disordinata Dimensione blocchi: variabile >30 cm (medio - grande) Posa degli elementi: casuale Assenza di ricorsi o listature Assenza di zeppe in pietra vivo in cotto Tipologia a sacco
M2	Apparecchiatura: disordinata Dimensione blocchi: variabile 10-25 cm (medio - piccola) Posa degli elementi: casuale Assenza di ricorsi o listature Assenza di zeppe in pietra vivo in cotto Tipologia a sacco
M3	Apparecchiatura: disordinata Dimensione blocchi: variabile 10-25 cm (medio - piccola) Posa degli elementi: casuale Assenza di ricorsi o listature Assenza di zeppe in pietra vivo in cotto Tipologia a sacco
M4	Apparecchiatura: disordinata Dimensione blocchi: variabile 10-25 cm (medio - piccola) Posa degli elementi: casuale Assenza di ricorsi o listature Assenza di zeppe in pietra vivo in cotto Tipologia a sacco
M5	Apparecchiatura: disordinata Dimensione blocchi: variabile 10-25 cm (medio - piccola) Posa degli elementi: casuale Assenza di ricorsi o listature Assenza di zeppe in pietra vivo in cotto Tipologia a sacco
M6	Apparecchiatura: disordinata Dimensione blocchi: variabile 10-25 cm (medio - piccola) Posa degli elementi: casuale Assenza di ricorsi o listature Assenza di zeppe in pietra vivo in cotto Tipologia a sacco
M8	Apparecchiatura: disordinata Dimensione blocchi: media 15-25 cm Posa degli elementi: casuale Assenza di ricorsi o listature Assenza di zeppe in pietra vivo in cotto Tipologia a sacco
M10	Apparecchiatura: disordinata Dimensione blocchi: variabile 10-25 cm (medio - piccola) Posa degli elementi: casuale Assenza di ricorsi o listature Assenza di zeppe in pietra vivo in cotto Tipologia a sacco



SCHEDE DI ANALISI TIPOLOGIE MURARIE



DESCRIZIONE
Muratura irregolare costituita da pietra calcarea grezza generalmente non lavorata o di difficile lavorazione: elementi di forma irregolare di varie dimensioni come scapioli di cave e spazzoni di pietre. Presenta ristature dei giunti. Muratura esterna castello-recinto (X Secolo)

DIMENSIONI
Variabile: 10-25 cm (medio - piccola)

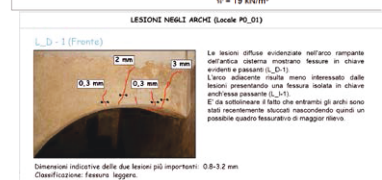
TESTATURA
Apparecchiatura: disordinata
Posa degli elementi: casuale
Assenza di ricorsi o listature
Assenza di zeppe in pietra vivo in cotto
Tipologia a sacco

IMMAGINE:

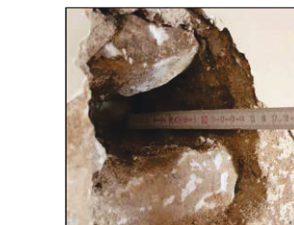
PROPRIETA' MECCANICHE
in riferimento alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008), alla Circolare 2 febbraio 2009, n. 617, alle Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del Patrimonio culturale allineate alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni, e al Decreto n.10 del 25/01/2005 - allegato 3D "Indicazioni per la valutazione delle qualità murarie"

Tipologia A - Muratura in pietra a sacco, maie intessuta e priva di collegamento tra i due fogli.
 $f_{cm} = 0,90 \text{ N/mm}^2$
 $f_{ctm} = 0,018 \text{ N/mm}^2$
 $E_{cm} = 783 \text{ N/mm}^2$
 $G_m = 251 \text{ N/mm}^2$
 $\mu = 113 \text{ kg/m}^3$

Velocità prove sismiche > 1100 m/s

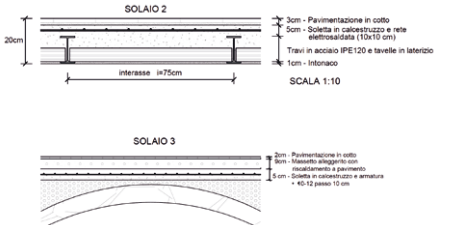


3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



Termografie

Saggio



Dettaglio orizzontamenti

4. Indagini specialistiche

F6. ROCCA ROVERESCA, SENIGALLIA (AN)

La Rocca Roveresca è situata all'interno del centro storico di Senigallia, in piazza del Duca. Attualmente è adibita a museo nazionale e sede di mostre ed eventi culturali.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

La rocca è caratterizzata da un peculiare impianto architettonico frutto di articolate vicende costruttive.

La cinta muraria è di forma quadrata con quattro torrioni circolari agli angoli e racchiude al suo interno la residenza signorile.

È caratterizzato da geometrie semplici e occupa una superficie di impronta a terra di circa 2.000 mq (escluse le corti), per un'altezza media alla gronda di circa 15 m. La compresenza di costruzioni speciali (cinta muraria e torri) in adiacenza al palazzo contribuiscono a una generalizzata irregolarità plano-altimetrica. Il complesso è situato in piano.

L'individuazione di una regolarità nella maglia muraria ai vari livelli è molto complessa. È possibile riconoscere dei corpi abbastanza distinti dell'edificio signorile - costituito da cellule murarie di dimensioni maggiori pari a 6m x10m – e i vani ricavati all'interno della cinta muraria cinquecentesca, di dimensioni variabili ma contenute.

Questa conformazione è frutto di una storia costruttiva complessa che si è svolta nell'arco di circa quattro secoli a partire dalla metà del XIV secolo. Il primo impianto è costituito dai resti di una fortificazione di epoca romana. Nel 1350, la fortificazione albornoziana è fondata riutilizzando le preesistenze prevedendo un ampliamento della cinta muraria, per definire una corte interna, e l'innalzamento della torre. Sotto i Malatesta (1385-1445) la rocca è ulteriormente ampliata e assume forma pressoché quadrangolare con due corti interne e torri quadrate agli angoli. Sempre in questo periodo la rocca è consolidata mediante la costruzione di una scarpa muraria lungo tutto il perimetro. L'attuale configurazione si deve ai lavori voluti dai Della Rovere, da cui il nome, che dal 1480 avviano la costruzione di una cinta muraria quadrata con torri angolari circolari e della residenza signorile della famiglia all'interno, prevedendo una corte rettangolare frapposta tra l'ingresso alla rocca e l'ingresso al palazzo.

Il complesso architettonico ha conservato in gran parte la tecnica costruttiva originaria, per cui è presente una limitata eterogeneità delle tecniche costruttive.

La struttura di elevazione è in muratura portante con tipologie murarie differenti a seconda dell'epoca costruttiva. Le murature risalenti all'impianto romano sono grossi conci di pietra squadrata e bugnata; gli ampliamenti successivi sono caratterizzati da murature di mattoni ovvero in pietra squadrata.

Riguardo gli orizzontamenti, nella rocca sono presenti in maggioranza delle volte in mattoni di varia geometria. Gli interventi del XX secolo hanno interessato soprattutto i torrioni, con

l'introduzione di cordoli in c.a. e di elementi in c.a. in sostituzione dei beccatelli. Sono state inoltre introdotti massetti armati e trefoli.

Le informazioni su accostamenti e tecniche costruttive sono in parte dichiarate dai prospetti esterni faccia vista; solo all'interno alcune pareti e alcune volte sono intonacate.

Il livello di difficoltà per il raggiungimento di una conoscenza adeguata della Rocca Roveresca è soprattutto legato alle dimensioni del complesso e alla conoscenza degli interventi di restauro. A vantaggio di una congrua conoscenza sono le tessiture a vista, che consentono di minimizzare le indagini per la caratterizzazione delle strutture di elevazione; inoltre la disponibilità di fonti sugli interventi attuati e di foto di cantiere consentono di ottenere una conoscenza complessiva delle trasformazioni recenti e di alcune parti del manufatto oggi non visibili.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale è stata definita mediante la restituzione completa del rilievo attraverso laser scanner e un controllo di dettaglio con tecniche tradizionali.

Non è stato osservato un quadro fessurativo rilevante e le lesioni sono localizzate in elaborati grafici e in fotografie.

In base a questi risultati è scelto un $F_{C1}=0$.

La restituzione delle fasi costruttive è delineata con il supporto di una ricerca bibliografica e archivistica e un successivo controllo diretto sul manufatto eseguito anche mediante prove diagnostiche. Il risultato della ricerca storico-critica è sintetizzato in schemi volumetrici in cui sono evidenziati i vari ampliamenti con colori differenti.

L'analisi della tecnica costruttiva è prodotta attraverso la esecuzione di indagini diagnostiche. In particolare sono state indagate le sezioni murarie attraverso endoscopie effettuate su tutti i muri. Non sono eseguiti disegni d'assieme o di dettaglio degli assemblaggi e negli elaborati grafici si trovano legende sintetiche. Sono state svolte indagini specifiche (pacometriche, penetrometriche) per valutare l'efficacia degli elementi in c.a. e in legno.

Alla luce dei risultati raggiunti in questa fase di analisi è scelto un $F_{C2}=0$.

Non sono eseguite indagini di caratterizzazione meccanica e i parametri delle murature sono selezionati direttamente dalla Circolare 2009, considerando i valori minimi. Il fattore parziale di confidenza selezionato è $F_{C3}=0,12$.

Infine, riguardo le informazioni su terreno e fondazioni sono disponibili indagini pregresse e non sono svolti approfondimenti perché non è presente un quadro fessurativo relativo a possibili cedimenti fondali.

Alla luce di questi risultati è scelto un $F_{C4}=0,03$.

Dalla sommatoria dei succitati fattori parziali deriva il valore globale di $FC=1,15$.

Interpretazione delle informazioni

Gli esiti della fase di conoscenza portano a concludere che per la conformazione geometrica la rocca non può esibire un comportamento globale.

Pertanto, le verifiche di sicurezza della rocca sono state effettuate su due elementi specifici che definiscono l'impianto strutturale: la sezione delle mura e i torrioni circolari. È analizzato a parte l'ultimo livello del palazzo perché svettante rispetto alla cinta muraria.

È prodotto un modello tridimensionale a elementi finiti funzionale a individuare i potenziali punti di distacco delle parti e alcune criticità complessive. In seguito è preso in esame il comportamento non lineare del materiale per avere indicazioni più precise sul comportamento post-elastico e sulla configurazione dei meccanismi di collasso.

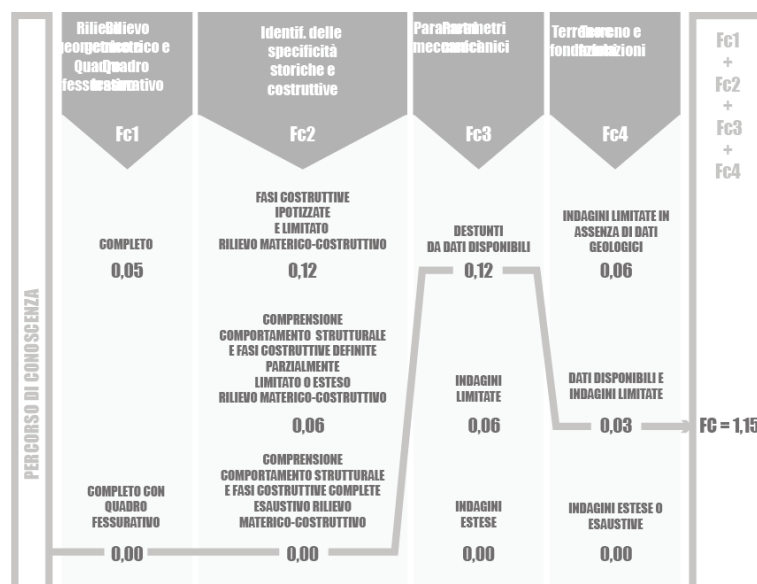
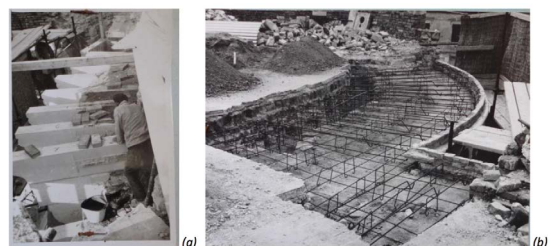
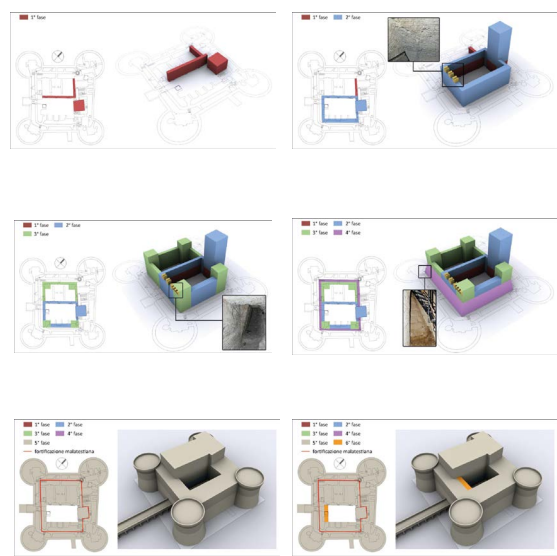
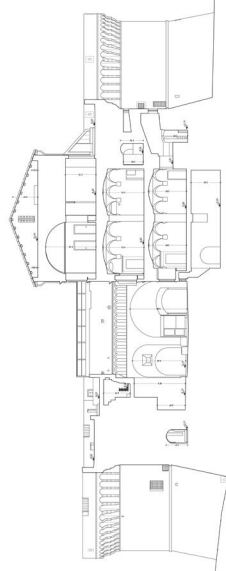
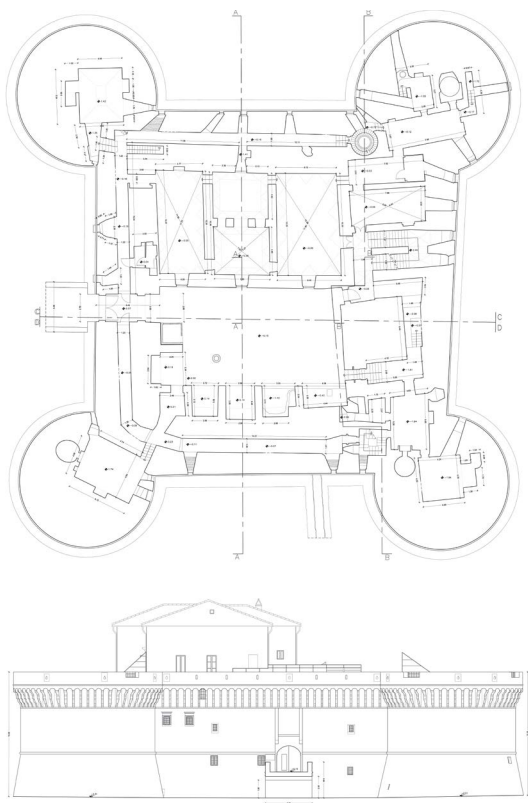


Figura 3.34 – Rocca Roveresca, Senigallia; definizione del Fattore di Confidenza

F6 - ROCCA ROVERESCA, SENIGALLIA (AN) - Sintesi elaborati della fase conoscitiva



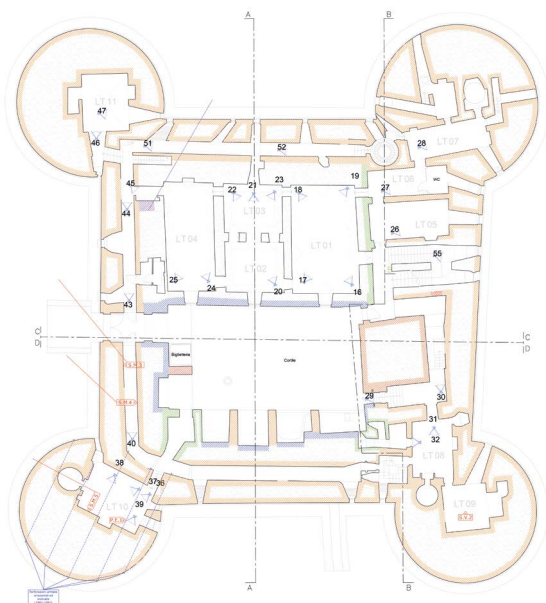
Sostituzione delle mensole in pietra (a) e sostituzione di un cordolo in c.a.al livello del camminamento del torrione Est

1. Rilievo geometrico



0 — 10m

2. Fasi costruttive



	Paramento murario in blocchi di pietra squadrata e/o bugnata (calcare) - I fase
	Paramento murario in blocchi di pietra squadrata (arenaria) - I fase
	Paramento murario in mattoni pieni e malta di calce - II fase
	Paramento murario in mattoni pieni e malta di calce - III fase
	Paramento murario in blocchi di pietra squadrata (arenaria) - IV fase
	Paramento murario in mattoni pieni e malta di calce - V fase
	Paramento murario in mattoni pieni e malta di calce - VI fase
	Tessitura e stratigrafia muraria da indagare
	Sostituzione mensole in pietra (1965-1967)
	Cordolo in c.a. (1965-1967)
	Intervento scuci-cuci (1965-1967)
	Trefolo, cuciture armate, struttura lignea copertura (1975-1981)
	Perforazioni armate (1982-1983)
	Consolidamento murature e cuciture armate mensole in pietra (1983-1987)
	Consolidamento murature e cuciture armate mensole in pietra (1988-1990)
	Cuciture armate incrociate (1993-1996)
	Tiranti (1993-1996)

3. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



4. Indagini specialistiche

F7. ROCCA ALBORNOZIANA, SPOLETO (PG)

La Rocca Albornoziana si trova sulla parte più alta del colle Sant'Elia di Spoleto, all'interno della cinta muraria. La sua costruzione è databile alla seconda metà del XIV secolo.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

Il complesso architettonico costituisce di per se un aggregato strutturale di più fabbricati costruiti in epoche differenti. Solo sul lato est è presente un edificio che accoglie gli uffici della soprintendenza collegato alla Torre del Forno tramite un sovrappasso voltato.

Presenta un impianto tipico delle fortezze medievali, con cinta muraria rettangolare e sei torri quadrangolari agli angoli con addossati altri edifici.

È caratterizzato da geometrie semplici e occupa una superficie di impronta a terra di circa 5000 mq (escluse le corti), per un'altezza media alla gronda di circa 20 m. Sono presenti elementi svettanti (torri) e solai sfalsati che contribuiscono a una generalizzata irregolarità plano-altimetrica.

La maglia muraria è irregolare ai vari livelli, con episodiche cellule aventi luce libera molto ampia.

Questa conformazione è frutto di una storia costruttiva complessa che si è svolta nell'arco di circa quattro secoli a partire dall'epoca della costruzione data 1362. Il primo impianto è già costituito dalla doppia cinta muraria divisa dal corpo centrale e definita a nord da un secondo corpo di fabbrica, e dalle sei torri angolari. In due fasi sono costruiti il corpo est (1399) e il portico interno con fornicati ad arco a sesto pieno impostati su colonne di pietra (1420). A metà dell'Ottocento, con l'istituzione delle carceri, la rocca è ampliata costruendo un corpo sul lato meridionale della corte sud e un primo nucleo delle carceri, di seguito oggetto di ulteriore ampliamento.

Il complesso architettonico ha conservato in gran parte la tecnica costruttiva originaria, per cui è presente una limitata eterogeneità delle tecniche costruttive.

La struttura di elevazione è in muratura portante con tipologie murarie differenti a seconda dell'epoca costruttiva. Le murature risalenti all'impianto originario sono conci di pietra pseudo-rettangolare; gli ampliamenti del XIX secolo sono costituiti da muratura di pietra squadrata e in parte da muri di spina in mattoni pieni. Gli elementi di connessione verticale sono strutture in acciaio in gran parte di recente costruzione.

Riguardo gli orizzontamenti, nella rocca sono presenti in maggioranza delle volte lapidee in pietra o laterizio, cui si aggiungono un numero esiguo di solai lignei (con particolare riguardo al solaio che copre il salone d'onore). Gli interventi del XX secolo hanno inoltre introdotto di impalcati rigidi in c.a. - o semi-rigidi in putrelle e laterizio – in sostituzione delle volte o dei solai originari.

Le informazioni su accostamenti e tecniche costruttive sono in parte dichiarate dai prospetti esterni faccia vista; all'interno le pareti sono intonacate o – in alcuni casi – affrescate.

Il livello di difficoltà per il raggiungimento di una conoscenza adeguata della Rocca Albornoziana è abbastanza alto ed è soprattutto legato alle dimensioni del complesso e alla conoscenza degli interventi

di restauro subito. A vantaggio di una congrua conoscenza sono le tessiture a vista, che consentono di minimizzare le indagini per la caratterizzazione delle strutture di elevazione; inoltre la disponibilità di fonti sugli interventi attuati e di foto di cantiere consentono di ottenere una conoscenza complessiva delle trasformazioni recenti e di alcune parti del manufatto oggi non visibili.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La geometria strutturale è stata definita probabilmente mediante un controllo a campione del rilievo geometrico disponibile. Non sono esplicitate le tecniche di rilievo – tradizionali, laser-scanner, ... - né l'approccio utilizzato per il controllo del rilievo. Inoltre, non appare definito il rapporto tra la Torre del Forno e l'edificio accostato sul lato est. Tuttavia, dalla lettura complessiva degli elaborati grafici è possibile in parte comprendere la sistematicità del metodo nella raccolta delle informazioni e quindi una generale completezza della fase conoscitiva. Nel caso del quadro fessurativo, infatti, le lesioni sono puntualmente localizzate in elaborati grafici (rilievo materico) con l'indicazione dell'inclinazione e della gravità della lesione. In base a questi risultati è scelto un $F_{C1}=0$.

La restituzione delle fasi costruttive è delineata con il supporto di una ricerca bibliografica e archivistica; sono elencati i documenti di archivio consultabili (corrispondenza, pagamenti di tributi, ...) tra i quali, però, solo pochi esemplari sembrano essere una documentazione utile alla comprensione della compagine costruita (elaborati di progetto, rilievi, ...). Il risultato della ricerca storico-critica è sintetizzato in assonometrie della rocca in cui sono evidenziati i vari ampliamenti.

Lo studio condotto sui dettagli costruttivi è finalizzato alla elaborazione di un giudizio qualitativo sugli elementi strutturali, avanzato seguendo la schedatura dell'IQM per ciascuna tipologia muraria. I risultati raggiunti con questo metodo assumono ulteriore valore per la possibilità di confronto con i parametri desunti dalle prove diagnostiche condotte durante il progetto di consolidamento del 1983 (martinetti e carotaggi); la sezione muraria è stata verificata sul campo attraverso endoscopie effettuate su tutti i muri già indagati che ne hanno confermato i risultati. Non sono eseguiti disegni d'insieme o di dettaglio degli assemblaggi e negli elaborati grafici si trovano legende sintetiche. Alla luce dei risultati raggiunti in questa fase di analisi è scelto un $F_{C2}=0$.

Non sono eseguite indagini di caratterizzazione meccanica e i parametri delle murature sono selezionati direttamente dalla Circolare 2009, considerando i valori minimi. Il fattore parziale di confidenza è pari a $F_{C3}=0,12$.

Infine, riguardo le informazioni su Terreno e Fondazioni sono disponibili indagini pregresse di caratterizzazione del sito e in aggiunta sono state eseguite nuove indagini ad hoc per la verifica sismica. Alla luce di queste risultanze è scelto un $F_{C4}=0$.

Dalla sommatoria dei succitati fattori parziali deriva il valore globale di $FC=1,12$.

Interpretazione delle informazioni

L'interpretazione delle informazioni provenienti dalla fase della conoscenza consente di assumere che la Rocca non può esibire un comportamento globale; essa è considerata come un aggregato di più unità strutturali, indipendenti o debolmente interagenti, che possono assumere singolarmente un comportamento globale. Gli edifici sono individuati in base agli esiti dell'analisi storico-critica, soprattutto tenendo conto degli interventi di consolidamento recenti che hanno definito nuove connessioni.

Alla luce di queste considerazioni sono individuate le seguenti unità strutturali (US): il corpo nord, che comprende gli edifici che definiscono il Cortile d'Onore con le quattro torri e l'edificio delle carceri; il corpo sud-ovest; il corpo sud; la palazzina degli uffici e il muro est che definisce il quarto lato del Cortile delle Armi. Su questi corpi sono eseguite le verifiche secondo LV2 individuando alcuni macroelementi all'interno di ciascuna US e verifiche secondo LV3, eseguendo l'analisi statica non lineare. Le verifiche secondo modelli semplificati, LV1, tengono conto di US diverse in base al modello di analisi: sei torri sono analizzate con il modello per "Torri, campanili...",¹⁹⁰ mentre per gli altri edifici è utilizzato il modello "Palazzi, ville..."¹⁹¹. Non è stato utilizzato il SIVARS.

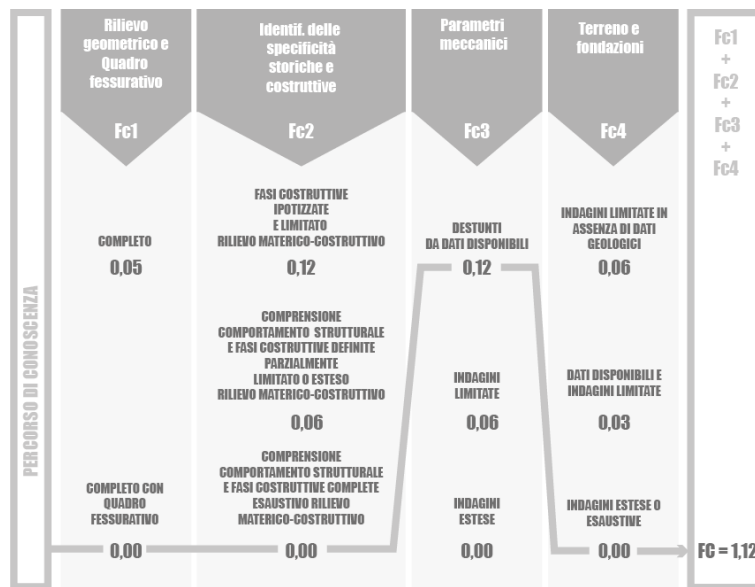
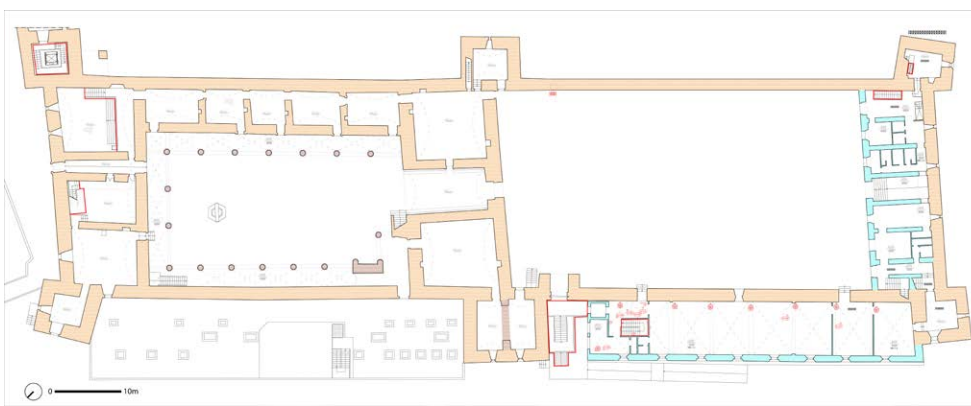
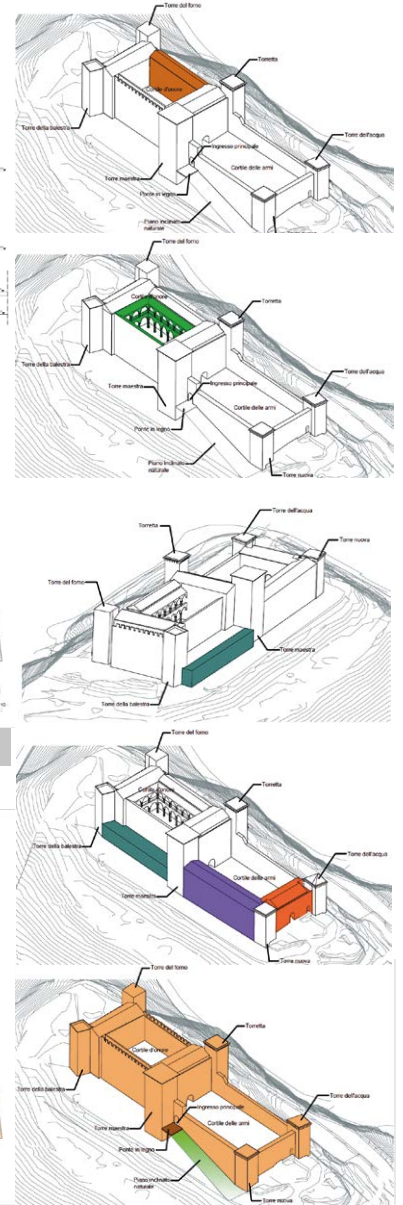
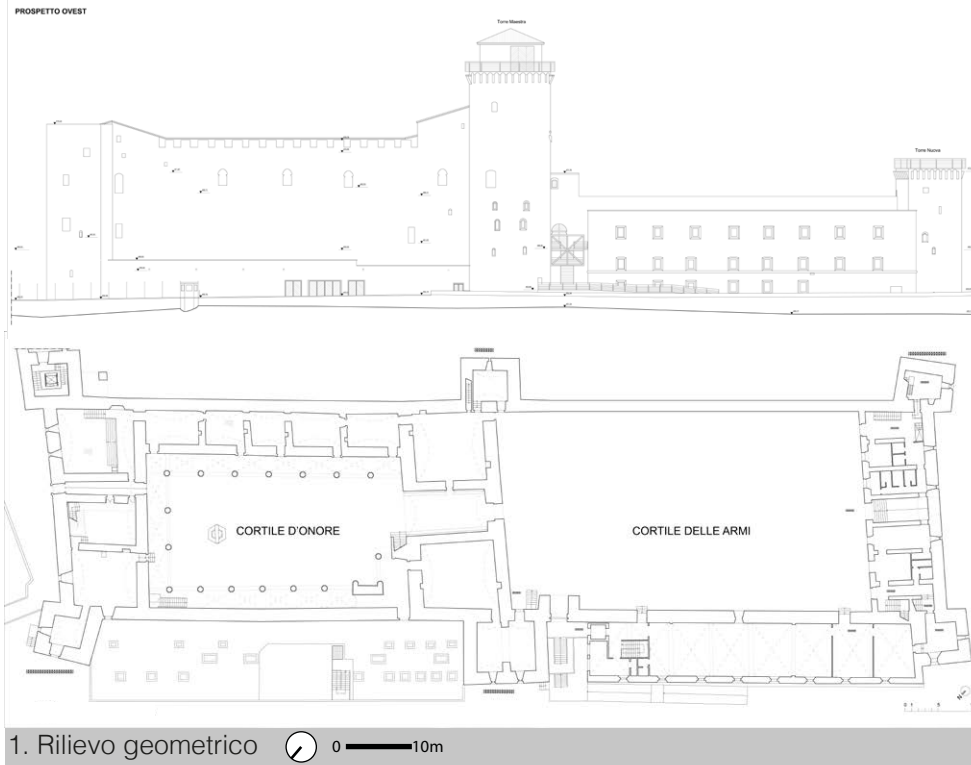


Figura 3.35 – Rocca Albornoiana, Spoleto; definizione del Fattore di Confidenza

¹⁹⁰ Cfr. Linee Guida, paragrafo §5.4.4. (Torri, campanili e altre strutture a sviluppo prevalentemente verticale).

¹⁹¹ Cfr. Linee Guida, paragrafo §5.4.2 (Palazzi, ville e altre strutture con pareti di spina e orizzontamenti intermedi).

F7 - ROCCA ALBORNOZIANA DI SPOLETO - Sintesi elaborati della fase conoscitiva



2. Fasi costruttive

LESIONI

AMPIEZZA LESIONI

- Chiusura
- asimmetrica
- simmetrica

Lesione diagonale inclinata a 45° (a seconda della natura e dell'angolo)

Lesione incrociata

Lesione a 45°

Lesione pavimento: Cricco acciaio pavimento

Lesione soffitto: Detacco di intonaco parete, Detacco di intonaco soffitto

Distacco parete dal soffitto: Cricco

Distacco parete dal pavimento: Fuori piombo

Umidità

Lesione sovrastanziale

Lesione sottoapertura

STRUTTURE VERTICALI

- Muratura in pietrae pseudorettagonale del sec. XIV
- Muratura in pietra squadrate del sec. XIX
- Muratura in laterizio
- Muratura in laterizio forato
- Strutture in dis armato
- Strutture in acciaio

IMPALCATI

SOLAI E COPERTURE

- legno
- later. c.a.
- c.a.

later. ferro

ferro

VOLTE

- c.a.
- laterizio
- pietra

ALTRI ELEMENTI

- controsoffitto
- capochiave
- catena

FOTOGRAFIE

- (IV f.01) pos. fotografie direz. muro
- (IV f.01) pos. fotografie direz. soffitto
- (IV f.01) pos. fotografie direz. pavimento

SAGGI

- (IV s.01) pos. saggi direz. muro
- (IV s.01) pos. saggi direz. soffitto
- (IV s.01) pos. saggi direz. solaio
- VD4 pos. video endoscopie

4. Rilievo materico-costruttivo e quadro fessurativo



F8. ROCCA DEMANIALE, GRADARA (PU)

La Rocca Demaniale di Gradara è una costruzione fortificata medievale che sorge sul pianoro dello sperone roccioso – dove è situato il centro storico della città – ed è oggi museo nazionale.

Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio

La rocca è in parte assimilabile a un aggregato strutturale di per se, perché costituito da vari corpi di fabbrica posti in adiacenza in epoche costruttive differenti a formare un unicum che interagisce esclusivamente con la cinta muraria circostante (lato sud e nord-est). L'impronta a terra è di circa 1.800 mq, con una corte interna di circa 400 mq, per un'altezza media di circa 15 m (tre livelli fuori terra), superata solo dal mastio posto sul lato est.

L'impianto planimetrico risponde alle tipiche strutture fortificate, con cinta muraria quadrangolare e torri poligonali ai quattro angoli. Una particolarità della rocca di Gradara riguarda la conformazione curvilinea degli edifici sul lato est: se da un lato è consueto che la cinta muraria segua l'orografia dello sperone roccioso su cui sorge, dall'altro gli edifici costruiti al suo interno solitamente hanno una forma regolare. Questa particolare conformazione probabilmente è dovuta al riutilizzo delle strutture superstiti di uno stanziamento fortificato avente conformazione di “castello recinto”.

La storia costruttiva della rocca segue con la costruzione intorno al 1150 di una torre (oggi mastio) con rafforzamento della cinta muraria. La rocca assume conformazione tale tra il 1260 e il 1440, con la costruzione di altre due torri merlate con beccatelli negli angoli nord e ovest e ispessimento della cinta muraria; sempre in questo ambito temporale sono costruiti il Palatium e la torre portaia; al periodo più recente (1440) appartengono la torre sud e la formazione della scarpa muraria a rafforzamento dei lati ovest e sud.

La maglia muraria che caratterizza la roccaforte si mantiene costante per i primi due livelli fuori terra, ad eccezione del lato ovest della corte porticato al piano terra e chiuso da setti murari al piano primo. Al secondo piano – in corrispondenza delle merlature – gli spessori delle pareti di facciata diventano più esigui (20 cm), mentre i setti di spina a “L” del lato ovest mantengono spessori fino all'ultima elevazione (da 90 a 75 cm). A questo livello è presente un numero maggiore di ambienti che implicano la presenza di diversi muri “in falso” sui solai sottostanti. La struttura di elevazione della rocca - totalmente in muratura portante - è in gran parte a vista sui paramenti esterni, mentre molti ambienti interni sono coperti da intonaco. Le murature sono tutte a doppio paramento esterno e nucleo interno con presenza di elementi lignei (tronchi di palma). I muri che costituiscono la cinta muraria della rocca sono di maggiore spessore (da 100 a 200 cm) e raggiungono spessori che vanno oltre i 500 cm in corrispondenza delle scarpe murarie. I muri di spina del Palatium interno sono di spessore più ridotto (90-75 cm), ma conservano la medesima tecnica costruttiva.

Gli orizzontamenti sono volte in mattoni a due teste al piano interrato e al piano terra (fa eccezione il solaio con HEB costruito per supportare il muro in falso del piano primo), prevalentemente solai lignei

(due solai in putrelle) al piano primo; le coperture hanno anch'esse orditure lignee semplici o doppie con capriate. Sono presenti anche volte finte in incannucciato.

Le informazioni sulle tecniche costruttive e sui materiali utilizzati sono spesso a vista e il materiale d'archivio disponibile (perizie, foto di cantiere, ecc.) rappresenta un valido supporto per avanzare ipotesi sufficientemente attendibili su interventi di consolidamento non visibili.

Un elemento che può determinare delle difficoltà conoscitive può essere la storia costruttiva del fabbricato particolarmente complessa, soprattutto in caso di scarsa reperibilità di fonti documentarie. L'unico strumento che può sopperire a tale mancanza può essere l'osservazione diretta anche supportata da indagini non distruttive.

Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza

La restituzione della geometria strutturale è conseguita mediante il controllo sistematico dei rilievi disponibili, verificando gli spessori murari – ove possibile - la luce delle volte e dei solai, le altezze di interpiano, il tutto con strumentazione tradizionale. Alcuni ambienti non sono stati rilevati perché non accessibili.

Il quadro fessurativo non è grave. Le lesioni si concentrano soprattutto sul versante est – lato sperone roccioso – e indicano un potenziale scivolamento verso valle del fabbricato. Queste informazioni sono raccolte in elaborati dedicati, specificandone la gravità. Alla luce di questi risultati è scelto il valore di $F_{C1}=0$.

La ricostruzione delle trasformazioni subite dalla fortificazione è stata definita con il supporto della ricerca archivistica e bibliografica, e dal riscontro sul campo delle informazioni delle fonti indirette. I risultati dell'analisi hanno guidato la definizione del piano di indagini specialistiche sulle murature e sugli altri elementi strutturali. Nonostante ciò non si evince con chiarezza l'avvenuto controllo sul campo delle eventuali zone di accostamento tra cellule murarie (tali accostamenti non sono segnalati); la sintesi della conoscenza sulle fasi evolutive è rappresentata da una volumetria estremamente schematica del complesso.

Gli elementi costruttivi sono indagati con il supporto di indagini diagnostiche non distruttive (termografie e soniche) che confermano la generale compattezza delle murature, e prove semi distruttive (endoscopie, prelievi di malta) per cercare di definire la sezione muraria; inoltre è verificata l'efficacia di alcuni tiranti (portico della corte al piano terra) e le strutture in c.a. sono indagate con prove pacometriche e sclerometriche. Sono presenti dettagli costruttivi molto schematici. La scelta per questo fattore parziale ricade in $F_{C2}=0$.

Non sono state svolte prove per la caratterizzazione meccanica dei materiali, e questi sono stati desunti dalla tabella C.8A.2.1, selezionando i valori medi per ciascuna tipologia. Non sono utilizzati valori correttivi delle malte perché se ne è constatata l'inadeguatezza con le prove di laboratorio. Il valore del fattore parziale per questo aspetto della conoscenza è pari a $F_{C4}=0,12$.

Riguardo infine le indagini sul terreno e le fondazioni, è redatto uno schema geometrico del piano di fondazione, ricostruito sulla base dell'impianto dell'anfiteatro; sono presenti delle prove di

caratterizzazione del terreno pregresse, mentre le indagini attuali sono limitate allo studio RSL eseguito dal CNR-IGAG. Il valore scelto è comunque $F_{C4}=0,06$.

Dalla sommatoria dei fattori parziali si ottiene un fattore globale $FC=1,18$.

Interpretazione delle informazioni

Il giudizio qualitativo proveniente dalla conoscenza del fabbricato è nettamente positivo e si sostituisce alle valutazioni numeriche eseguite per la struttura nel suo complesso (LV3).

Sono state svolte verifiche secondo i tre livelli di valutazione LV1, LV2 e LV3. LV1 è eseguito utilizzando il SIVARS, che per il mancato aggiornamento è ritenuto uno strumento utile esclusivamente per la raccolta dati. LV2 è stato eseguito verificando la risposta al meccanismo di primo modo delle pareti perimetrali esterne (merlature e facciate sulla corte). LV3 è stato condotto eseguendo una analisi push-over considerando cinque modelli caratterizzati da una sempre maggiore semplificazione richiesta per evitare risposte sismiche del tutto incoerenti con un comportamento realistico dell'edificio. Il primo modello è il più aderente alla realtà e contiene la torre del mastio e le altre tre torri; il secondo non tiene conto delle torri angolari; un terzo modello non considera le torri e le aperture nelle pareti; un quarto modello esclude le torri e il livello svettante del mastio; il quinto modello è analogo al quarto ma considera il piano del mastio e non comprende le aperture.

I risultati più realistici si ottengono con i modelli più semplificati, quindi meno aderenti alla realtà costruttiva e ciò spinge a concludere che questa tipologia architettonica non può essere valutata in modo attendibile con un modello di calcolo globale.

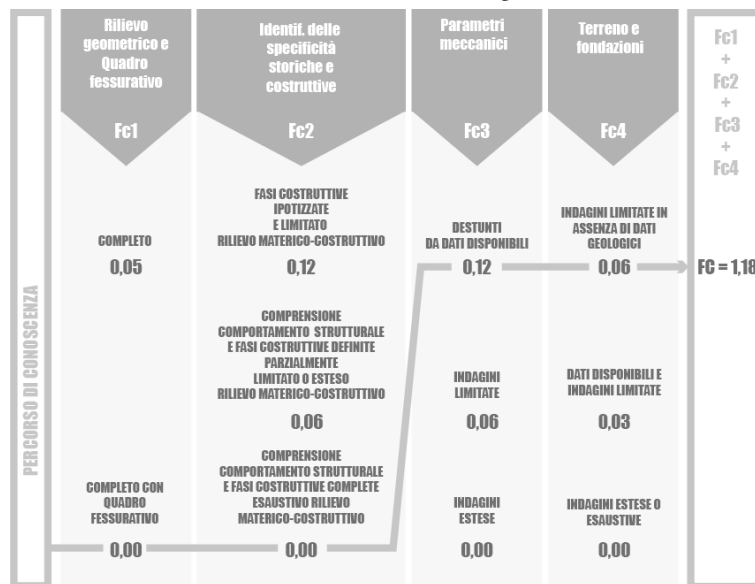
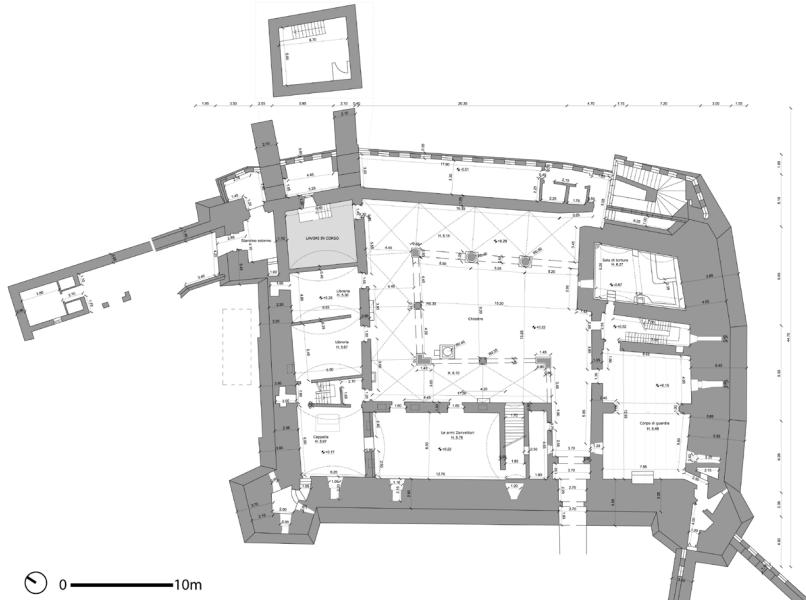
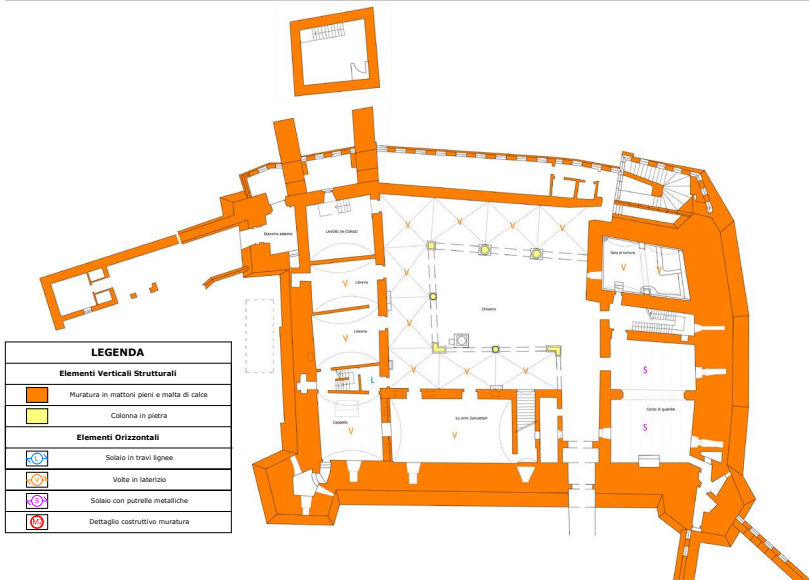


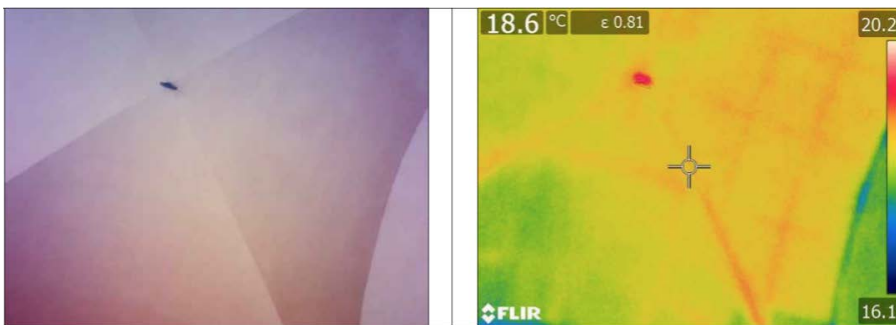
Figura 3.36 – Rocca demaniale di Gradara; definizione del Fattore di Confidenza



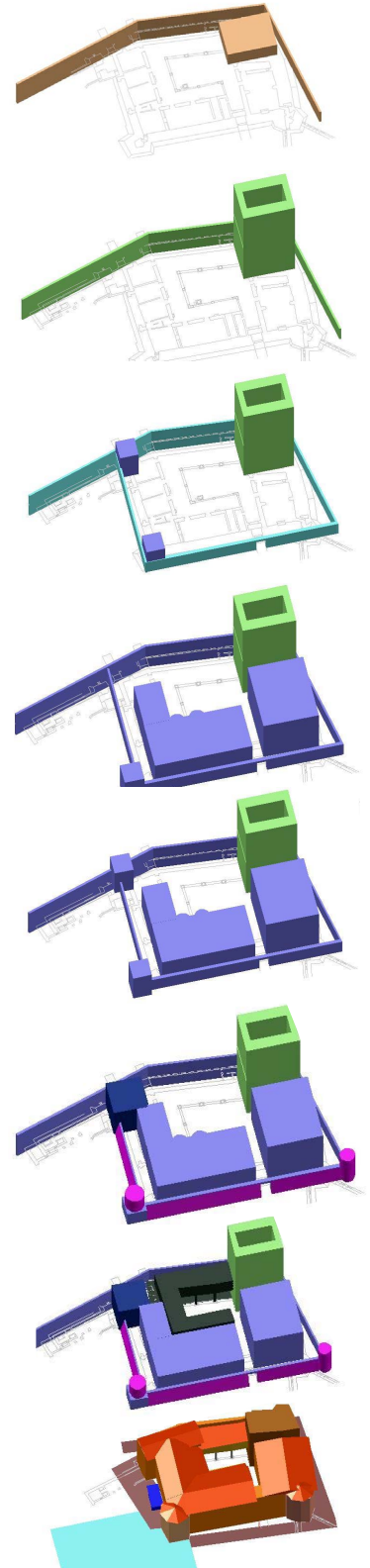
1. Rilievo geometrico



4. Rilievo materico-costruttivo



3. Indagini specialistiche



2. Fasi costruttive

3.8 Crediti

1. I casi studio illustrati nelle schede: **P1, F1** sono stati analizzati dal gruppo di ricerca dell'Università della Basilicata - Scuola di Ingegneria, responsabili scientifici: Prof. Angelo Masi, Prof. Felice Carlo Ponzo; collaboratori: ing. Leonardo Chiauzzi, ing. Antonio di Cesare, ing. Dario Moccia, ing. Giuseppe Ventura.
2. I casi studio illustrati nelle schede: **P2, F2** sono stati analizzati dal gruppo di ricerca dell'Università di Chieti Pescara "G. D'Annunzio" - Dipartimento di Ingegneria e Geologia, responsabile scientifico: Prof. Enrico Spacone; collaboratori: Arch. Cristina Cantagallo, Dott. Daniele Perrucci.
3. Il caso studio illustrato nella scheda: **F4** è stato analizzato dal gruppo di ricerca dell'Università del Salento – Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, responsabile scientifico: Prof. Maria Antonietta Aiello; collaboratori: gruppo di Tecnica delle Costruzioni.
4. Il caso studio illustrato nella scheda **F6** è stato analizzato dal gruppo di ricerca dell'Università Politecnica delle Marche – Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura e dall'Università di Camerino – Scuola di Architettura e Design, responsabili scientifici: Prof. Luigino Dezi (UniMarche), Prof. Andrea Dall'Asta (UniCAM); collaboratori: Laura Ragni (UniMarche), Graziano Leoni, Alessandra Meschini, Enrica Petrucci, Alessandro Zona, Quintilio Piattoni, Filippo Sicurezza (UniCAM). Il gruppo di ricerca dell'Università Politecnica delle Marche ha curato l'analisi del caso studio relativo alla scheda **P3**.
5. I casi studio illustrati nelle schede: **F8, M8, P5, P7, P8**, sono stati analizzati dal gruppo di ricerca dell'Università degli Studi di Padova, responsabile scientifico: Prof. Francesca Da Porto; collaboratori: Ing. Abate Marco Ing. Bettiol Giulia Ing. Bonaldo Diego, Ing. Caliman Martina Ing. Donà Marco Ing. Giaretton Marta, Ing. Marchesini Fabio P. Ing. Pappas Athanasios Ing. Pengo Mattia, Ing. Tecchio Giovanni Dott. Zago Giulia.
6. I casi studio illustrati nelle schede: **P9, M11** sono stati analizzati dal gruppo di ricerca dell'Università di Firenze - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, responsabile scientifico: Prof. Ing. Andrea Vignoli; collaboratori: Dott. Ing. Stefano Renzi, Prof. Ing. Claudia Madiati, Prof. Ing. Giovanni Vannucchi.
7. I casi studio illustrati nelle schede: **M2, M4** sono stati analizzati dal gruppo di ricerca dell'Università di Genova. In particolare, relativamente al caso in M2: responsabili scientifici: prof. Ing. Sergio Lagomarsino, prof. Ing. Serena Cattari, collaboratori: Ing. Margherita Cecchinelli, Ing. Ilaria Marassi, Ing. Stefania Degli Abbati, Ing. Daria Ottonelli, Ing. Michela Rossi. Per il caso in M4: responsabile scientifico: prof. Ing.

- Sergio Lagomarsino, responsabile tecnico: ing. Stefano Podestà; collaboratori: ing. C. Bozzano, ing. C. Ferrero, ing. C. Luchini, ing. L. Scandolo.
8. I casi studio illustrati nelle schede M6 e V1 sono stati analizzati dal gruppo di ricerca del Politecnico di Milano, responsabile scientifico: prof. Maria Adelaide Vittoria Parisi; collaboratori: Chiara Tardini, Lorenzo Cantini, Sandra Tonna.
 9. I casi studio illustrati nelle schede V3, V4, V5 sono stati analizzati dal gruppo di ricerca dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II" - Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, responsabile scientifico: prof. Andrea Prota. Per il caso in V3, il gruppo di lavoro è costituito da: prof. Gaetano Manfredi, ing. Marco Di Ludovico, arch. Claudia Casapulla, arch. Maria Lippiello, arch. Carla Ceraldi, ing. Francesco Portioli, ing. Claudio D'Ambra. Per il caso in V4, il gruppo di lavoro è costituito da: prof. ing. Gaetano Manfredi, arch. Luca Argiento, arch. Claudia Casapulla, ing. Raffaele Frascadore, arch. Carla Ceraldi, arch. Alessandra Maione, ing. Marco Di Ludovico, ing. Francesco Portioli. Per il caso in V5, il gruppo di lavoro è costituito da: Prof. Ing. Gaetano Manfredi, arch. Gilda Florio, arch. Claudia Casapulla, ing. Giuseppina De Martino, arch. Carla Ceraldi Ing. Francesco Portioli, ing. Marco Di Ludovico, arch. Caterina Vasso.
 10. I casi studio illustrati nelle schede M3, F3 sono stati analizzati dal gruppo di ricerca dell'Università IUAV di Venezia - Dipartimento di Progettazione e Pianificazione in Ambienti Complessi, responsabile scientifico: prof. Salvatore Russo, collaboratori: Giosuè Boscato, Alessandra Dal Cin, Silvia Iantile, Laboratorio di Scienza delle Costruzioni LabSCo.
 11. I casi studio illustrati nelle schede V2, M1 sono stati analizzati dal gruppo di ricerca dell'Università degli Studi del Molise, Laboratorio di Dinamica Strutturale e Geotecnica, StreGa, responsabile scientifico: prof. Giovanni Fabbrocino, prof. Massimiliano Savorra, Prof. Gemma Belli, dott. Arch. Adriana Marra.
 12. Il caso studio illustrato nella scheda **M5** è stato analizzato dal gruppo di ricerca dell'Università degli Studi di Roma Tre, responsabile scientifico: prof. Gianmarco de Felice, Rilievo geometrico e architettonico: prof. Marco Canciani (coordinamento), arch. S. Tagliati, arch. A. Ballanti, arch. B. Mammi, arch. M. Michellini, ing. G. Romito, arch. A. Scortecci, arch. S. Strambone. Ricerca storico-critica, rilievo costruttivo: prof. Michele Zampilli (coordinamento), arch. G. Fiorentino, arch. A. Sprega, arch. V. Ceniccola, arch. A. Figorito, H. L. Vásquez Dietiker. Indagini e Analisi strutturali: ing. M. Bellisario, ing. A. Ceschini, ing. S. De Santis, ing. A. Genoese, ing. A. Genoese, Ing. F. Paolacci, arch. L. Sguerri, arch. G. Soriero.
 13. I casi studio illustrati nelle schede P10, P11, M9, F5 sono stati analizzati dal gruppo di ricerca dell'Università di Bologna - Centro Interdipartimentale di Ricerca Industriale - Edilizia e Costruzioni (CIRI-EC), responsabile scientifico: prof. ing.

Marco Savoia, collaboratori: prof. Claudio Mazzotti, ing. Barbara Ferracuti, ing. Andrea Incerti (P10), ing. Lorenzo Bacci (P11), ing. Valentina Rinaldini (M9), ing. Rosa Tilocca (F5)

14. Il caso studio illustrato nella scheda P4 è stato analizzato dal gruppo di ricerca dell'Università degli studi di Trieste - Dipartimento di Ingegneria e Architettura, responsabile scientifico: prof. Natalino Gattesco.
15. I casi studio illustrati nelle schede P6, F7 sono stati analizzati dal gruppo di ricerca dell'Università degli Studi di Perugia - Dipartimento di Ingegneria, responsabile scientifico: prof. Antonio Borri; collaboratori (P6): ing. Giulio Castori, ing. Walter Cecchini, ing. Fabrizio Cristofari, ing. Alessandro De Maria, ing. Riccardo Savelli, ing. Romina Sisti, arch. Roberta Verrecchia, ing. Riccardo Vetturini; collaboratori (F7): Ing. Giulio Castori Ing. Manuela Cecconi, ing. Alessandro De Maria, ing. Andrea Giannantoni, arch. Bruno Gori, ing. Laura Ludovisi, ing. Riccardo Savelli, ing. Romina Sisti, ing. Alessia Vecchietti.
16. I casi studio illustrati nelle schede M7, M10 sono stati analizzati dal gruppo di ricerca dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza" - Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, responsabile scientifico: prof. Domenico Liberatore; referente tecnico: prof. Luigi Sorrentino; collaboratori (M7): Michele Di Girolamo, Veronica Dimitri, Laura Liberatore, Alessandro Trionfetti.

3.9 Confronti

Nel presente paragrafo sono messi a confronto i percorsi della conoscenza eseguiti su ciascun manufatto con l'obiettivo di una valutazione critica dei criteri utilizzati per la stima del livello di conoscenza su ciascuna attività e di sintetizzare le metodiche approntate per la fase conoscitiva.

Il confronto è realizzato attraverso delle tabelle di riepilogo (riportate alla fine di questo paragrafo) nelle quali gli approcci e i risultati di ciascuno studio sono stati ridotti in commenti sintetici generali, che richiamano modalità ricorrenti a valle della lettura critica delle sperimentazioni. Alla tabella sono affiancati degli istogrammi che evidenziano sul piano quantitativo le informazioni oggetto di confronto.

Le tabelle sono articolate in due sezioni (colonne) che in parte richiamano la struttura delle schede illustrate nei paragrafi precedenti.

La prima – “Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio” – riporta i seguenti dati in sotto-colonne: dimensioni, irregolarità plano-altimetriche, isolato/in aggregato, eterogeneità delle tecniche costruttive.

La seconda sezione - “Risultati e metodologie della fase di conoscenza, fattore di confidenza” - illustra i contributi di ciascun aspetto della conoscenza, i relativi fattori parziali e il fattore di confidenza globale. L'articolazione di questa sezione ricalca la tabella 4.1 delle Linee Guida¹⁹² con la sola differenza che la colonna inerente la “Identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica” è qui suddivisa in due sotto-colonne che distinguono l'indagine sulla tecnica costruttiva, dalla identificazione delle fasi evolutive. Tale suddivisione è funzionale a mettere in evidenza le metodiche utilizzate per indagare i due aspetti.

Per quanto concerne il primo aspetto della conoscenza identificato nella tabella 4.1 delle Linee Guida come “rilievo geometrico”, in gran parte dei lavori è stato scelto un $F_{C1}=0$, che nella tabella 4.1 delle Linee Guida corrisponde al livello di conoscenza ovvero a un rilievo completo con la restituzione del quadro fessurativo. In due soli casi è scelto un valore di $F_{C1}=0,05$ (livello di conoscenza più basso) che in tabella 4.1 corrisponde esclusivamente a un “rilievo completo”, nonostante il quadro fessurativo sia stato rilevato.

Le attività svolte riguardano il controllo dei rilievi di base forniti dal ministero. Alcuni gruppi eseguono il controllo (o il rilievo ex-novo) mediante l'uso di laser scanner o della stazione totale.

Riguardo questo aspetto della conoscenza una criticità rilevata riguarda la apparente mancata omogeneità delle informazioni raccolte e del livello di accuratezza del controllo eseguito.

Sono sempre verificati l'ampiezza dei vani, la presenza di nicchie, ecc., ma non si evince se è stato eseguito un controllo sistematico e diffuso – ad esempio – degli spessori murari. Sono

¹⁹² Cfr. Linee Guida, pag. 54

rilevate con accuratezza le tipologie di orizzontamenti, verificando le luci dei solai e delle volte - eseguendo anche indagini endoscopiche per la definizione degli spessori medi delle volte - tutti ritenuti fondamentali per la definizione dei carichi permanenti sulla struttura di elevazione e per la costituzione del modello da sottoporre a verifica.

Come si nota nella Figura 3.37, per buona parte dei rilievi è stato eseguito un controllo sistematico e diffuso dei rilievi che potrebbe oggettivamente corrispondere al livello di conoscenza più alto insieme alla restituzione ex-novo; tuttavia lo stesso livello di conoscenza è scelto anche a valle di un controllo effettuato a campione su alcune zone del fabbricato.

Nel caso dei palazzi in aggregato la restituzione del rilievo geometrico non sempre prevede l'indicazione dei setti murari degli edifici contigui, che ricoprono anch'essi un ruolo nel comportamento strutturale dell'edificio. In alcuni casi, il livello di interazione con gli edifici adiacenti è ipotizzato direttamente nel modello mediante l'apposizione di vincoli.

Nella scelta del fattore parziale F_{C1} , il controllo e la definizione del quadro fessurativo non sembra ricoprire un ruolo determinante e in alcuni casi è scelto di porsi nel livello più alto di conoscenza ($F_{C1}=0$) poiché l'edificio non presenta lesioni o stati deformativi rilevanti. La scelta di porsi sul livello di conoscenza più basso o più alto è legata quasi esclusivamente alla completezza e accuratezza del rilievo.

Tuttavia, le attività compiute per la restituzione della geometria strutturale non possono essere ben comprese in assenza di una relazione specifica atta a chiarire l'effettivo controllo effettuato su un rilievo già esistente ovvero la realizzazione di un nuovo rilievo specificandone il livello di attendibilità.



Figura 3.37 – A sinistra valori scelti per F_{C1} dai gruppi di ricerca; a destra, il grafico evidenzia i vari livelli di accuratezza con cui è stato eseguito il rilievo geometrico.

L'aspetto "Identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica" raccoglie le risultanze inerenti la ricostruzione delle fasi costruttive e il rilievo materico-costruttivo. I fattori parziali scelti per questo aspetto sono $F_{C2}=0$ e $F_{C2}=0,06$.

Il valore $F_{C2}=0$ corrisponde al massimo livello di conoscenza e per la tabella 4.1, prevede:

«restituzione completa delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su un esaustivo rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, eventuali indagini diagnostiche)»

mentre il valore $F_{C2}=0,06$ corrisponde al livello intermedio di conoscenza in tabella 4.1 e prevede:

«restituzione parziale delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su: a) limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione e alla verifica delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, verifica diagnostica delle ipotesi storiografiche); b) esteso rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche)»

Per quanto concerne questo aspetto della conoscenza, la maggior parte degli operatori si pongono sul livello di approfondimento più alto. Tuttavia, si notano approcci e risultati differenti, espressi da un analogo F_{C2} .

Le fasi evolutive sono ricostruite mediante l'analisi delle fonti documentarie e riportate in grafici (piante e/o assonometrie) che sintetizzano le fasi più importanti e un'attenzione particolare è riservata alla individuazione di progetti di consolidamento pregressi.

Alla analisi delle fonti indirette è associato un riscontro delle informazioni – anche col supporto di indagini diagnostiche non distruttive – svolto direttamente sul manufatto con l'obiettivo di individuare accostamenti murari, discontinuità costruttive, presenza ed efficacia degli interventi di consolidamento recenti, ecc.. Il controllo di cesure murarie e discontinuità è agevolato quando le pareti non sono coperte da intonaco, mentre in caso contrario la verifica è eseguita mediante stonacature o indagini termografiche. Questo riscontro consente di confutare o confermare le informazioni desunte dalle fonti, ma non è stato eseguito da tutti gli operatori (Figura 3.38).

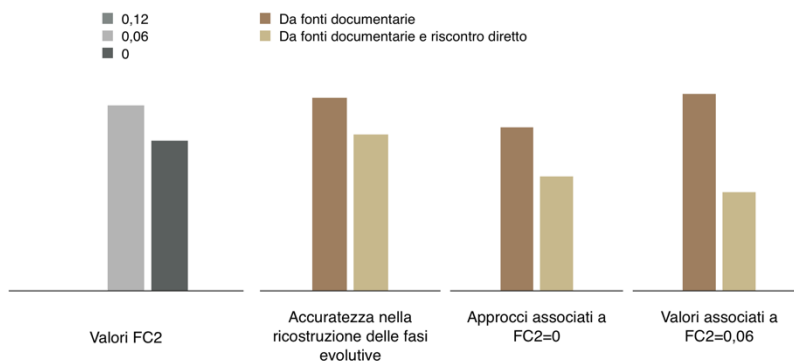


Figura 3.38 – Valori scelti per F_{C2} dai gruppi di ricerca (grafico in grigio). Accuratezza nella ricostruzione delle fasi evolutive e relazione con il fattore di confidenza

Riguardo la restituzione grafica delle fasi costruttive ogni gruppo di ricerca utilizza modalità differenti, ma in gran parte dei casi è realizzata una volumetria astratta costituita da parallelepipedi di colori diversi a distinguere l'epoca di costruzione. Da questi disegni – la cui finalità dovrebbe essere illustrare in modo univoco l'interpretazione delle informazioni desunte dalle fonti – non si evincono gli accostamenti murari e le modalità aggregative dei complessi architettonici, utili a comprendere l'evoluzione della compagine strutturale. Queste informazioni emergono in alcuni casi dagli elaborati del rilievo critico (v. scheda M6) o sono deducibili da alcune planimetrie in cui i muri assumono colori diversi in base all'epoca costruttiva.

Nell'ambito del rilievo materico-costruttivo è analizzata la tecnica costruttiva degli elementi strutturali. Questi sono indagati attraverso ispezioni visive affiancate da indagini diagnostiche non distruttive o debolmente distruttive; in pochi casi non sono svolte prove o saggi perché gli elementi sono a vista o è disponibile materiale documentario contenente tali informazioni (foto di archivio, prove diagnostiche pregresse).

Riguardo l'analisi della struttura di elevazione sono perseguiti due obiettivi principali: (i) individuare le tipologie murarie presenti nel manufatto, (ii) definire la qualità delle murature. Entrambi gli obiettivi sono perseguiti principalmente attraverso l'osservazione diretta della tessitura muraria, quando visibile; in presenza di pareti intonacate sono eseguite riprese termografiche e stonacature (eseguite raramente per ragioni conservative).

La qualità muraria è stabilita osservando le seguenti caratteristiche: geometria e dimensione degli elementi, orizzontalità dei filari e sfalsamento dei giunti, presenza di diatoni, presenza di rinzeppature e qualità della malta. Il giudizio sulla qualità delle murature in alcuni casi è espresso a seguito della compilazione delle schede per l'individuazione dell'Indice di Qualità Muraria (IQM) o delle schede GNDT¹⁹³.

¹⁹³ vedi *supra* § 3.2.1

Solo in pochi casi l'osservazione della tessitura muraria si esaurisce nella scelta della tipologia di muratura dalla tabella C8A2.1, da cui sono desunti i parametri meccanici, e non è espresso un giudizio sulla qualità muraria, ma è comunque scelto un $F_{C2}=0,06$.

Gli orizzontamenti sono analizzati prevalentemente attraverso indagini diagnostiche finalizzate alla definizione della orditura dei solai piani – quando non direttamente osservabile – e della tecnica costruttiva delle volte ricoperte da intonaco (termografie). Come accennato poc'anzi, è frequente l'esecuzione di endoscopie per la determinazione dello spessore in chiave delle volte.

La qualità delle connessioni è indagata attraverso l'esecuzione di indagini termografiche, limitate stonacature, oppure è ipotizzata sulla scorta delle informazioni desunte dalle fonti documentarie.

La restituzione delle informazioni sulla tecnica costruttiva avviene secondo due modalità: (1) dati acquisiti sono illustrati con elaborazioni grafiche dei dettagli costruttivi (tessiture murarie e orizzontamenti), eseguite ex-novo o reperite dalla letteratura, che supportano la comprensione e il giudizio sulla qualità degli elementi strutturali e delle connessioni; (2) non si eseguono disegni di approfondimento e non è sempre chiaro il giudizio che l'operatore avanza sulla tecnica costruttiva, e le indagini eseguite sono finalizzate più alla caratterizzazione meccanica delle murature.

Come si evince dai grafici riportati in Figura 3.38, Figura 3.39, non sussiste una corrispondenza evidente tra il valore del fattore di confidenza parziale e gli esiti delle indagini svolte.

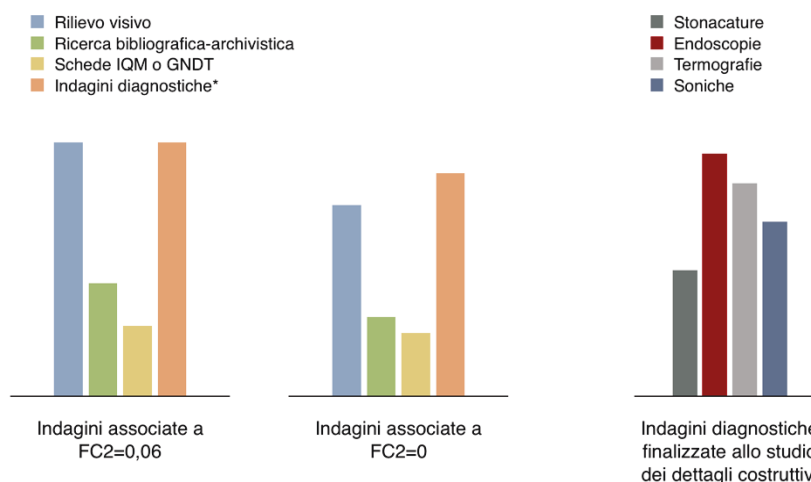


Figura 3.39 - Tipologie di indagini associate ai valori del fattore di confidenza parziale

Per quanto concerne l'aspetto della conoscenza "Proprietà meccaniche dei materiali" i valori dei fattori parziali che emergono dagli studi analizzati corrispondono a $F_{C3}=0$, $F_{C3}=0,06$ e $F_{C3}=0,12$.

Tuttavia, alla luce di questa analisi si evince che i criteri per la selezione di uno o di un altro valore di F_{C3} non sono univoci, soprattutto per quanto concerne il valore intermedio, che corrisponde – in tabella 4.1 – a “limitate” indagini sui parametri meccanici. Questo livello di conoscenza è ritenuto raggiunto sia se sono stati eseguiti test diagnostici sui materiali (martinetti, prove a compressione, ...), sia se sono state eseguite solamente stonacature per lo studio della tessitura muraria¹⁹⁴.

Il medesimo livello di conoscenza è ritenuto raggiunto anche nel caso in cui le murature siano state studiate mediante le schede per l'identificazione dell'IQM.

Ad ogni modo, una criticità legata a questo aspetto riguarda la scelta dei valori dei parametri meccanici riportati in tabella C8A2.1 – che nelle NTC08 è strettamente legata al Livello di Conoscenza raggiunto.

I livelli di conoscenza – nel caso dei musei statali – sono tutti adeguati (LC2), ma da caso a caso la scelta può ricadere sia nei valori minimi della tabella sia nei valori medi, il tutto a discrezione del gruppo di ricerca.

Alla luce di quanto osservato, è possibile affermare che per la procedura delle Linee Guida la scelta dei valori nella tabella C8A2.1 sia apparentemente slegata dal fattore di confidenza relativo alla conoscenza dei parametri meccanici (F_{C3}).

Si nota, inoltre, che in alcuni esempi sono utilizzati F_{C3} differenti a seconda del tipo di analisi, ovvero a seconda del grado di conoscenza di una determinata tipologia di muratura.

I casi in cui si ha $F_{C3}=0$ sono tre in tutto e, a conferma di quanto detto sopra, tale scelta non incide sulla selezione dei parametri meccanici della tabella, ma solo sul FC globale. Nella maggior parte dei casi, infatti, si è scelto di utilizzare i valori medi della tabella, a volte moltiplicati per i coefficienti migliorativi, indipendentemente dal valore di F_{C3} ; in pochi casi, tutti ricadenti in $F_{C3}=0,12$, si assumono i valori minimi della tabella.

¹⁹⁴ Questa apparente incongruenza in verità è legata al fatto che le Linee Guida non forniscono una descrizione del significato di “limitate” o “estese” indagini per cui il riferimento è la Circolare 617 delle NTC08, in cui si legge che per “limitate indagini” sui parametri meccanici si intende un rilievo a vista del paramento murario per una porzione pari a 1m x 1m (cfr. Appendice C8A pag. 377).

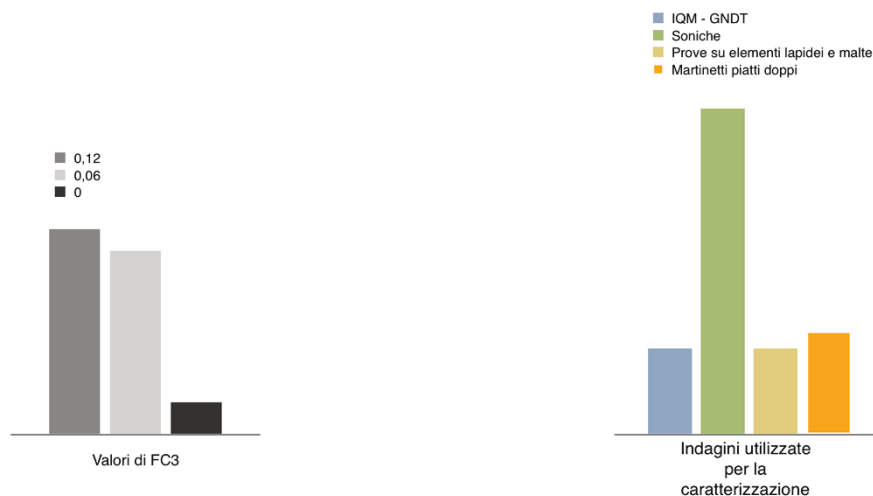


Figura 3.40 - Indagini finalizzate alla caratterizzazione meccanica delle murature

Riguardo l'aspetto della conoscenza "Terreno e Fondazioni", si rilevano tutti e tre i valori $F_{C4}=0$, $F_{C4}=0.03$ e $F_{C4}=0.06$.

Anche per la scelta di questo fattore parziale si nota una diffusa soggettività.

In alcuni casi alle medesime informazioni possedute corrispondono valori differenti di F_{C4} (tra 0,03 e 0,06).

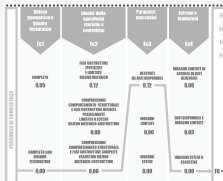
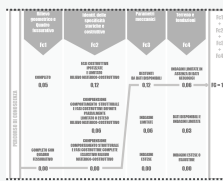
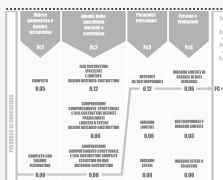
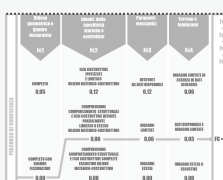


Più significativa è la scelta del valore "0" nei casi in cui l'edificio non presenta lesioni da cedimenti in fondazione, fattore che attesta la compattezza del terreno di sedime; il medesimo valore è assunto anche nel caso di verifica di meccanismi locali, in accordo con quanto indicato nelle Linee Guida¹⁹⁵.

Di seguito si riportano le tabelle di confronto dei 34 casi analizzati, così articolate:

- Tabella 3.1 - Palazzi in aggregato (2 fogli)
- Tabella 3.2 – Ville Palazzi isolati (1 foglio)
- Tabella 3.3 – Chiese e monasteri (2 fogli)
- Tabella 3.4 – Costruzioni fortificate (2 fogli)

¹⁹⁵ Cfr. Linee Guida, §4.2 pag. 55, v. *supra* § 1

Caso studio	Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio				Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza					
	Dimensioni (mq e mc totali)	Irregolarità plano-altimetriche	Isolato / In aggregato	Eterogeneità delle tecniche costruttive	Rilievo Geometrico	Identificazione Specificità storiche e costruttive	Parametri meccanici	Terreno e Fondazioni	FC globale	
P1	Palazzo Loffredo S: 1.600 mq V: 30.000 mc H: 19m H: 8m 1 piano semi-interrato 3 piani fuori terra	In piano. Irregolare in pianta; in alzato i tre corpi conservano una certa regolarità ma presentano altezze differenti.	Deboli interazioni con altri edifici.	Fasi evolutive caratterizzate da tecniche costruttive differenti. Tipologie murarie non sempre a vista.	FC₁ = 0.05 Rilievo geometrico completo. Controllo esteso + verifiche fotogrammetriche (prospetti). Nessun QF grave	Esteso rilievo degli elementi costruttivi. Rilievo visivo + Saggi Esplorativi + Endoscopie	Ricostruzione completa da fonti documentarie + riscontro sul campo (ED). Indagini in situ aggiuntive (TR) + (PAC) per verificare interventi di adeguamento '80.	"Limitate" indagini (SE) + (ED). Valori medi riportati in tabella C8A2.1 e i coefficienti correttivi di tabella C8A2.2 (circolare 617/2009).	Da fonti documentarie + (MASW).	1,20
P2	Museo Ridola S: 1.800 mq H: 12.2 m V: 22.000 mc circa 3 piani fuori terra	In lieve pendio	In aggregato (intercluso)	Aggregazione di due edifici in tecnica costruttiva differente. Tipologie murarie a vista.	FC₁ = 0 Rilievo disponibile definito attendibile. Controllo a campione con strumentazione tradizionale.	Dettagli costruttivi da fonti documentarie + (ED)	Ricostruzione da fonti documentarie	Desunti da letteratura Valori medi tabella C8A2.1	Da fonti e indagini disponibili	1,15
P3	Palazzo Ferretti S: 1.230 mq H: 30 m V: 31000 mc 2 piani seminterrato 3 fuori terra	E' situato su un fianco di un pendio (pendici del colle Guasco)	Edificio Isolato. Interazioni locali con altri edifici.	Corpi A-B: Diverse tipologie murarie di cui molte a vista ai piani seminterrati Corpi C-D: Strutture in c.a. con solai in latero-cemento	FC₁ = 0.00 (con rif. Palaz. Ferretti) Utilizzato rilievo esistente verificato e aggiornato con sopralluoghi + rilievo laserscanner. Nessun QF grave.	FC₂ = 0.00 (con rif. Palaz. Ferretti) Ispezione diretta + (SE) (ED)	Ricostruzione da fonti documentarie	FC₃ = 0.12 (con rif. Palaz. Ferretti) "Limitate" indagini. Sono stati eseguiti saggi esplorativi nelle pareti non a vista. Valori medi tabella C8A2.1	FC₄ = 0.03 Assenza di danni evidenti in fondazione o danni strutturali riconducibili a dissesti in fondazione. Indicazioni CNR-IGAG per definizione spettro input da normativa	1,15
P4	Palazzo dei Provveditori, Cividale del Friuli 3 corpi: corpo principale 845.96 mq (h 16.37 m) corpo sud-est 110 mq (h 6.25 m) corpo nord-ovest 41.27 mq (h 4.69 m) 15000 mc circa in tot	Pianeggiante e degradante verso est	In aggregato, angolo condiviso con chiesa, altre interferenze trascurabili	Muratura in pietra originaria dell'epoca di costruzione e muratura in mattoni doppio UNI realizzata negli anni Settanta	FC₁ = 0 Rilievo eseguito quasi ex-novo in maniera tradizionale+ laserscanner per pareti perimetrali (ingobro aperture, ecc...), QF restituito in modo analitico	Tipologia muraria ricostruita attraverso foto d'epoca e SE + schede IQM.	Ricostruzione da fonti documentarie	FC₃ = 0.12 (LV2) Per murature non definite attraverso IQM = Valori minimi tab. C8A2.1 FC₃ = 0.06 (LV1-LV3) Parametri definiti con metodo IQM = valori medi tab. C8A2.1	FC₄ = 0.06 (LV1-LV3) Nessun danneggiamento dovuto a cedimenti. Fondazioni molto profonde (foto storiche) - Indagini geofisiche e molta letteratura FC₄ = 0 (LV2) In accordo con Direttiva (pag. 52)	1,15-1,18
P5	Palazzo Ducale, Urbino 6595 mq 214337 mc media di piano 2 interrati	6.5 h Su pendio forte; su terreno collinare.	Il complesso è situato nel centro della città di Urbino, a fianco del duomo di Santa Maria Assunta (il prospetto nord vi è addossato). I vari corpi di fabbrica che costituiscono il complesso si articolano intorno a chiostri e giardini	Intera struttura in muratura. Il piano secondo presenta una eterogeneità di tecniche costruttive causa interventi di consolidamento (varie tipologie strutturali interagiscono). Il piano primo e secondo interrato ospitano grandi ambienti voltati	FC₁ = 0 Rilievo disponibile definito attendibile. Eseguite verifiche a campione con strumentazione tradizionale.	Indagate tipologie murarie con prove soniche e termografiche.	Ricostruzione da fonti documentarie + riscontro sul campo	Desunti da letteratura Valori medi tabella C8A2.1	Indagini documentarie + nuove indagini CNR	1,18

Caso studio	Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio				Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza				
	Dimensioni (mq e mc totali)	Irregolarità plano-altimetriche	Isolato / In aggregato	Eterogeneità delle tecniche costruttive	Rilievo Geometrico	Identificazione Specificità storiche e costruttive	Parametri meccanici	Terreno e Fondazioni	FC globale
P6 Palazzo Priori	> 3000 mq altezza media fuori terra 27 m circa	Su pianoro	In aggregato L'articolazione dei volumi, le asimmetrie e le irregolarità dell'impianto evidenziano la lunga fase costruttiva, iniziata nel 1293 e caratterizzata dall'inglobamento di strutture edilizie pre-esistenti.	Uso di differenti tecniche costruttive. Le pareti interne del tutto intonacate ad eccezione di quelle esterne a faccia vista	FC₁ = 0 Rilievo completo. controllo a campione + parziale laser scanner. Restituzione completa del QF	FC₂ = 0 Informazioni dedotte dalla letteratura tra cui il Rilievo critico del 1998 + indagini endoscopiche Restituzione completa delle fasi costruttive da fonti documentarie	FC₃ = 0.12 Valori minimi Tabella C8A2.1 (2009)	FC₄ = 0.00 Da fonti documentarie + nuove indagini CNR-IGAG	1,12 
P7 Palazzo Panichi	mq 950 comprensivi di aree scoperte circa 870 mq superficie media di piano 4.30 m altezza media di piano 3 piani totali con interrati circa 7500 mc	Su pianoro	In aggregato	Struttura verticale portante in muratura mista (pietra squadrata travertino e mattoni pieni) con orizzontamenti voltati al PT e solai in latero cemento ai piani superiori La facciata principale è l' unico lato esterno intonacato	FC₁ = 0 Rilievo di base verificato. Restituzione del QF (non sono presenti lesioni gravi)	FC₂ = 0 Indagini svolte nel 2007 (endoscopiche, martinetti piatti per le murature e rilievo magnetometrico per la localizzazione delle barre di armatura e l'indagine ultrasonica e sclerometria)+ nuove indagini 2014 Ricostruzione da fonti documentarie + riscontro sul campo	FC₃ = 0.12 Da fonti documentarie (Valori medi tab. C8A2.1) test pregressi	FC₄ = 0.06 Prove pregresse (maggio 2006) + nuove indagini eseguite dal CNR-IGAG	1,18 
P8 Palazzo Bruni	1200 mq 23400 mc 6.50 m altezza media di piano n 3 piani con interrati	In piano	La costruzione costituisce la metà ovest e nord di un isolato nel centro della città toscana; la parte est è in adiacenza con altri edifici.	Materiali strutturali principali: muratura e cemento armato La tessitura muraria non è visibile perché intonacata. Solo una piccola porzione è a faccia vista (lato ovest).	FC₁ = 0 Rilievo geometrico completo. Rilievi di base + controllo a campione. Creazione di un 'tour virtuale' Restituzione del QF	FC₂ = 0 Ispezione visiva completata e validata dalle indagini diagnostiche Ricostruzione da fonti documentarie Controllo diretto eseguito a campione	FC₃ = 0.12 Da fonti documentarie (valori medi tab. C8A2.1). No test.	FC₄ = 0.06 Indagini geologiche e geotecniche pregresse+ nuove nel 2014 dal CNR-IGAG	1,18 
P9 Museo di Casa Vasari, Arezzo	Bassa 350 mq circa 3500 mc circa Struttura in muratura articolata in 4 livelli (3 livelli + sottotetto)	In Piano	Posizione isolata	Diverse tipologie materico-costruttive presenti nella fabbrica	FC₁ = 0 Rilievo completo. Controllo diffuso + Laser scanner QF rilevato e illustrato su elaborati specifici	FC₂ = 0.06 Murature: Stonacature + IQM + Fonti doc. Orizzontamenti: (GPR) + (PAC) Restituzione completa delle fasi costruttive da fonti documentarie	FC₃ = 0.06 Parametri da IQM + fonti documentarie	FC₄ = 0.03 Dati geologici e geotecnici in prossimità al sito indagato + esecuzione di MASW	1,15 
P10 Casa Museo del poeta Giovanni Pascoli, S. Mauro Pascoli.	125 mq circa di piano 675 mc 2,70 m altezza media di piano n 2 piani fuoriterra	In piano regolare	Molto	Unità di testata di un aggregato	FC₁ = 0 Rilievo completo. Controllo diffuso + QF rilevato e illustrato su elaborati specifici	FC₂ = 0 Ispezione visiva (schede GNDT) + campagna diagnostica. Esecuzione di alcuni dettagli costruttivi esemplificativi (murature, solai) Ricostruzione da fonti documentarie.	FC₃ = 0.06 Campagna diagnostica (prove di caratterizzazione meccanica delle murature)	FC₄ = 0.06 Relazione geologica (2007) tra la via Casone e la via Bastia	1,12 
P11 Sarsina. Museo Archeologico di Sarsina	S: 800 mq V: 7200 mc H: 4.5 m n 2 piani fuori terra	Pendio leggero	Isolato Edificio a pianta irregolare il cui ingombro planimetrico massimo è pari a circa 44 x 34 m;	Edificio costituito da un corpo originario in muratura e un corpo in c.a. costruito in aderenza mediante giunto sismico nel 1990. Ambienti intonacati	FC₁ = 0 Rilievo completo. Controllo diffuso con strumenti tradizionali QF rilevato e illustrato su elaborati specifici	FC₂ = 0.06 Ispezione visiva (schede GNDT) + campagna diagnostica Esecuzione di alcuni dettagli costruttivi esemplificativi (murature, solai) Ricostruzione da fonti documentarie.	FC₃ = 0.06 Campagna diagnostica + fonti documentarie. Sono state prodotte delle schede di analisi della tipologia muraria combinando l'ispezione visiva con i dati delle indagini. (valori medi ?)	FC₄ = 0.06 Dati cartografia regionale + indagini svolte in occasione della realizzazione dell'Ala Nuova in c.a.	1,18 

VILLE E PALAZZI ISOLATI (V)

Caso studio	Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio				Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza				
	Dimensioni (mq e mc totali)	Irregolarità plano-altimetriche	Isolato / In aggregato	Eterogeneità delle tecniche costruttive	Rilievo Geometrico	Identificazione Specificità storiche e costruttive	Parametri meccanici	Terreno e Fondazioni	FC globale
V1 Villa Pignatelli	Villa nobiliare 1297 mq 14.53 m altezza di gronda circa 14500 mc L'edificio presenta un piano seminterrato e tre piani fuori terra di forma rettangolare. I piani primo e secondo sono caratterizzati da una estensione	In piano fattore di dislivello minore di 30 m	Isolato	Struttura totalmente intonacata_Edificio in muratura (tufo con conci ben squadrate)	F_{C1} = 0 Rilievo geometrico completo. Controllo diffuso con stazione totale + fonti documentarie QF completo + modello tridimensionale	F_{C2} = 0.06 Informazioni dedotte dai precedenti progetti di consolidamento eseguiti nel 1999 + prove termografiche, svolte estensivamente, 2 MS e un MD. Restituzione da fonti documentarie. Il complesso di Villa Pignatelli ha una storia relativamente recente rispetto ad altri edifici museali. Il progetto risale al 1826.	F_{C3} = 0.06 Desunti da dati già disponibili da CMIT (2009)_valori medi C8A2.1. Le prove effettuate in sito e in laboratorio hanno premesso di affermare che la malta utilizzata è di buona qualità.	F_{C4} = 0 Indagini geotecniche disponibili + Campagna geofisica organizzata ad hoc: HVSr, ERT, SR_P, MASW.	1,12
V2 Villa d'Este	6082 mq sup coperta totale h media di gronda singole unità strutturali(e) 99776 mc circa	L'antico edificio è eretto su di una superficie terrazzata sub-pianeggiante la cui quota massima è di 200 m s.l.m.. Conformazione particolare con giardino monumentale	Complesso architettonico collegato ad altri manufatti contermini	Edificio in muratura a conci di pietra tenera a vista e non. Unità strutturali più antiche risalenti al 1256	F_{C1} = 0 Rilievo geometrico completo. fonti doc. + controllo diffuso con stazione totale. QF su disegni dedicati	F_{C2} = 0 Ispezione visiva completata e validata dalle indagini diagnostiche Restituzione da fonti documentarie. L'edificio ha subito diversi interventi, anche di natura strutturale, le tavole grafiche e le relazioni tecniche sono disponibili presso l'Ufficio Tecnico di Villa d'Este.	F_{C3} = 0.12 Ispezione visiva + Desunti da letteratura Valori minimi tabella C8A2.1	F_{C4} = 0.03 Indagini pregresse.	1,18
V3 Palazzo del real museo di Napoli	ca 6.800 mq (120 x 70 - 1600 mq delle corti) ca 136.000 mc (Hmed=20 m)	Su pendio lieve. Unica irregolarità in alzata riguarda il corpo centrale, sveltante rispetto al resto del fabbricato; è inoltre caratterizzato da pareti perimetrali aventi una luce libera molto ampia	Isolato	L'edificio nasce come una architettura unitaria ma è stato costruito in più fasi (4 principali), alcune distanti anche più di un secolo. Le tecniche costruttive che caratterizzano i vari periodi sono analoghe.	F_{C1} = 0 Rilievi di base verificati in situ. Il QF su disegni dedicati	F_{C2} = 0.06 Ricerca di archivio + indagini visive + SO e TR. Le tipologie murarie sono analizzate con l'ausilio di schede sintetiche riportanti informazioni sulla tessitura e un'ipotesi di sezione trasv.	F_{C3} = 0.06 Ricostruzione completa delle fasi costruttive da fonti documentarie + riscontro di evidenze sul campo	F_{C4} = 0.06 Non sono facilmente desumibili i criteri che hanno condotto a scegliere questo fattore parziale	1,18
V4 Reggia di Capodimonte	ca. 10.000 mq (ca. 160 x 62)	In piano. L'impianto strutturale è caratterizzato da simmetria e regolarità sia in pianta che in alzata.	Isolato	L'edificio nasce come una architettura unitaria ma è stato costruito in più fasi. Le tecniche costruttive che caratterizzano i vari periodi sono analoghe.	F_{C1} = 0 Rilievi di base verificati in situ. Il QF è riportato sistematicamente in planimetrie dedicate	F_{C2} = 0.06 Murature analizzate mediante compilazione di schede tipo; la tecnica costruttiva di volte e solai è stata accertata mediante TR e fonti documentarie Ricostruzione completa delle fasi costruttive da fonti documentarie + riscontro di evidenze sul campo mediante prove soniche e termografiche	F_{C3} = 0.06 Valori medi tabella C8A2.1 Nessuna caratterizzazione meccanica, si è accertata l'aderenza delle murature alla regola dell'arte	F_{C4} = 0.03 Indagini CNR e preesistenti	1,15
V5 Villa Floridiana	970 mq circa (sup per piano) 3 piani fuori terra e 1 seminterrato 19 m (H media di gronda) >18000 mc	Situato sulla collina tufacea del Vomero Presenza di cavità che occupano larga parte dell'area d'impronta del fabbricato museale (forse afferenti al sistema idraulico del Vomero).	Isolato	Compresenza di più tecniche costruttive; realizzazione di un auditorium in c.a. nel 1987 (piano interrato). Giunto strutturale tra la vecchia e la nuova struttura interrata.	F_{C1} = 0 Non sono facilmente desumibili i criteri che hanno condotto a scegliere questo fattore parziale. Restituzione del QF e delle cavità ipogee al di sotto del museo.	F_{C2} = 0.06 Ricerca di archivio + indagini visive + piano di indagini (realizzate in modo diffuso e sistematico e utile corollario delle precedenti ipotesi interpretative). Ricostruzione da fonti documentarie	F_{C3} = 0.06 Valori minimi tabella C8A2.1 Si decide di scegliere questi valori per la vetustà, e l'elevata eterogeneità dei materiali presenti in sito, pur afferenti ad una stessa tipologia.	F_{C4} = 0.06 Le strutture di fondazione del museo sono di tipo continuo e realizzate in muratura di tufo giallo napoletano, in continuità con la struttura; poggiano su un banco tufaceo, interessato da due cavità ipogee cui si può accedere.	1,18


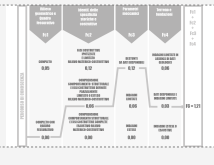

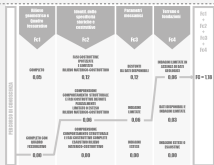
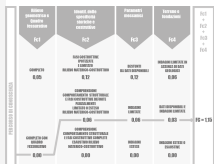

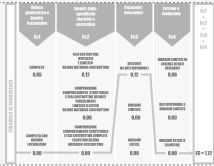

CHIESE E MONASTERI (M)

Caso studio	Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio				Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza				
	Dimensioni (mq e mc totali)	Irregolarità plano-altimetriche	Isolato / In aggregato	Eterogeneità delle tecniche costruttive	Rilievo Geometrico	Identificazione Specificità storiche e costruttive	Parametri meccanici	Terreno e Fondazioni	FC Globale
M1 Certosa del Trisulti	8390 mq sup coperta a piano per un numero medio di piani 3 (Tot.: 25067 mq) h media di gronda singoli edifici(e) 100140 mc circa	Pendio leggero	Complesso architettonico isolato comprendente sia corpi di fabbrica prevalentemente in aggregato (Configurazione di un piccolo borgo)	Aggregazione di più edifici in tecnica costruttiva differente. Diverse tipologie murarie a vista e non, principalmente muratura in pietre a spacco con buona tessitura e muratura a blocchi lapidei squadriati.	F_{C1} = 0 Rilievo geometrico completo, eseguito ex-novo attraverso rilievo strumentale (stazione totale) e rilievo diretto. Restituzione completa del quadro fessurativo e	F_{C2} = 0.00 Indagate tipologie murarie con prove soniche e termografiche. Idem per solai (con termografie e limitate stonacature). Per le volte sono state effettuate limitate endoscopie individuate sulla base dell'evoluzione Ricostruzione da fonti documentarie + parziale riscontro sul campo con l'ausilio di termografia, endoscopie e prove soniche	F_{C3} = 0.12 Ispezioni visive Campagna diagnostica Desunti da letteratura Valori minimi tabella C8A2.1	F_{C4} = 0.03 Sovrastimato a 0.03 perché si poteva considerare 0	1,15
M2 Certosa S. Martino, Napoli	13345 mq impronta a terra 160000 mc (H media 12 m)	In gran parte su piano. Una porzione dell'edificio sorge in corrispondenza di una scarpata.	Complesso monumentale/ aggregato edilizio. Non sono presenti interferenze con edifici adiacenti, non appartenenti al CM	Edificio caratterizzato dall'aggregazione di più corpi di fabbrica in diverse epoche. La struttura di elevazione è caratterizzata da un'Unica tipologia muraria, mentre gli orizzontamenti sono stati oggetto di più manomissioni	F_{C1} = 0 Rilievo eseguito in maniera tradizionale + laserscanner per alcuni vani e alzati, QF restituito in modo analitico. Tutti gli spessori verificati.	F_{C2} = 0 Murature indagate mediante IQM e approfondimenti sulla tecnica costruttiva locale. Orizzontamenti analizzati attraverso Indagine visiva	F_{C3} = 0.06 Ricostruzione da fonti documentarie + riscontro sul campo con l'ausilio di termografie	F_{C4} = 0.06 Riferimenti schede MADA e metodo IQM. Prove su elementi lapidei sciolti Valori medi della tabella	1,12
M3 Certosa di San Lorenzo, Padula	S: 45.000 mq H: 20,5 in media V: 130.000 mc in tot 2 piani fuori terra	L'impianto strutturale è molto articolato: non vi sono apparenti corrispondenze tra setti murari afferenti a corpi diversi (celle, portico, ...); analoga osservazione vale per lo sviluppo in alzata, caratterizzato da corpi di altezze molto diverse accostati tra loro	Il monumento è di per se un aggregato di più edifici. Non sussistono interazioni con altri fabbricati	Monumento caratterizzato dall'aggregazione di più corpi di fabbrica costruiti in diverse epoche con tecniche costruttive omogenee.	F_{C1} = 0 Rilievo di base verificato anche con Laser-scanner.	F_{C2} = 0.06 Ispezione visiva + L'analisi qualitativa di murature e orizzontamenti è supportata da un numero esiguo di indagini diagnostiche	F_{C3} = 0 Si utilizzano i valori medi tabella C8A2.1 Indagini effettuate per gli interventi di consolidamento delle murature presenti nell'analisi storico critica	F_{C4} = 0.03 Caratterizzazione geologica del sito, geotecnica e sismica del terreno da indagini 2014 CNR_IGAG	1,09
M4 Certosa di S. Giacomo, Capri	S: 500 mq circa (sup per piano) (?)	In prossimità di un costone roccioso. Documentazione incompleta. Mancano gli elementi per poter giungere a considerazioni sulle irregolarità planoaltimetriche	Aggregazione di più US di piccole dimensioni.	Edificio caratterizzato dall'aggregazione di più corpi di fabbrica in diverse epoche. La struttura di elevazione è caratterizzata da più tipologie murarie. Dagli elaborati non si evince una sintesi delle fasi costruttive né il rilievo materico	F_{C1} = 0 Rilievo di base verificato (ampiezza vani), ma non si evincono quotature nei grafici. Il QF è riportato nelle planimetrie del rilievo materico.	F_{C2} = 0 Documentazione incompleta	F_{C3} = 0.12 Ricostruzione da fonti documentarie. Differenti corpi di fabbrica sono stati individuati anche con riscontri e indagini diagnostiche sugli ammassamenti	F_{C4} = 0 Dati desunti dagli studi del CNR-IGAG	1,12
M5 Abbazia di Casamari, Veroli	3379 mq 56556 mc	Monumento costituito da diversi corpi di fabbrica non tutti interagenti tra loro. E' posto su un declivio lieve e ciò implica la presenza di piani contro terra. L'impianto planimetrico si presenta irregolare per la compresenza di ambienti molto ampi afferenti a tipologie	Il monumento è di per se un aggregato di più edifici. Irrelevanti sono le interferenze con altri fabbricati contigui, tuttavia esiste il problema dell'interazione tra i diversi corpi del complesso abbaziale	Diverse fasi evolutive caratterizzate da tecniche costruttive pressappoco omogenee. Tessiture murarie in gran parte a vista	F_{C1} = 0 Rilievo di base verificato anche con Laser-scanner. Eseguiti fotopiani per restituzione tessiture e QF.	F_{C2} = 0,06 Ispezione visiva + L'analisi qualitativa di murature e orizzontamenti è supportata da alcune indagini diagnostiche e SE (rimozione elemento lapideo)	F_{C3} = 0.06 Fasi costruttive restituite attraverso l'indagine storica e riscontri sul campo. A questa analisi è associata la restituzione del Rilievo Critico, funzionale alla rappresentazione dei punti di discontinuità costruttiva.	F_{C4} = 0.06 "Limitate" indagini. Sono stati eseguiti SE e prove diagnostiche. Valori medi tabella C8A2.1	1,18
M6 Ex convento di Santa Maria degli Angeli, Sala Consilina	690 mq sup coperta > 9000 mc 13.34 h media di gronda 3 piani fuori terra	Su pendio. Presenza di edifici specialistici	Aggregato complesso articolato su più livelli: comprende l'ex convento (in uso al MiBACT) e l'ex chiesa, parzialmente divisi da cortile.	Struttura in muratura soggetta, a partire dal 2004, a significativo adeguamento sismico (invasivo, tramite diverse tecniche costruttive) Superfici intonacate	F_{C1} = 0 Rilievo geometrico verificato solo per la porzione di edificio destinata a museo (70% del CA). QF non rilevante	F_{C2} = 0.06 Tipologie murarie indagate attraverso Termografia e 1 martinetto S&D	F_{C3} = 0 Ricostruzione da fonti documentarie.	F_{C4} = 0 Eseguito un MS e un MD. Desunti da letteratura Valori medi tab. C8A2.1	1,06

CHIESE E MONASTERI (M)

Caso studio	Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio				Metodologie e risultati delle indagini, fattore di confidenza				
	Dimensioni (mq e mc totali)	Irregolarità plano-altimetriche	Isolato / In aggregato	Eterogeneità delle tecniche costruttive	Rilievo Geometrico	Identificazione Specificità storiche e costruttive	Parametri meccanici	Terreno e Fondazioni	FC Globale
M7 Ex Convento di San Domenico	S: 10.000 mq (compresi gli spazi aperti) V: 64 000 mc (di cui 31 000 di spazi dell'Archivio di Stato e del Comune di Perugia)	Su pendio. Costituito da vari corpi (tra cui una ex chiesa) organizzati intorno a due chiostri. Presenza di muri in falso e di ambienti con limitata densità di murature in una direzione,	Complesso monumentale/ aggregato edilizio. Adiacente alla basilica di San Domenico e al palazzo dell'ex Sant'Uffizio. Il Museo in senso stretto è sovrapposto in buona parte su spazi dell'Archivio di Stato e del Comune di Perugia	Differenti tipi visibili di muratura (n°11), di impalcati piani (n° 14) e voltati (n° 4)	F_{C1} = 0 Rilievo geometrico completo + controllo locale e integrazione del materiale di base. Restituzione del QF	F_{C2} = 0.06 Rilievo materico e degli elementi strutturali riferito a quanto direttamente osservabile. Nessuna indagine diagnostica svolta per difficoltà amministrative nella Direzione Generale Ricostruzione da fonti documentarie + riscontro sul campo	F_{C3} = 0.12 Valori minimi Tabella C8A2.1 (2009) Effettuate analisi strutturali di comparazione assumendo valori medi	F_{C4} = 0 Dati geotecnica non disponibili. Non appaiono comunque fenomeni di instabilità attiva.	1,18
M8 Monastero di San Bernardo, Arezzo	S: 1500 mq V: 16875 mc H: 3.75 altezza media di piano n 3 piani con interrati	In piano. L'impianto planimetrico presenta situazioni di irregolarità dovute alla presenza di edifici specialistici al suo interno (chiesa).	Aggregazione di più US di piccole dimensioni e interferenze con edificio specialistico contiguo.	La struttura si articola sui resti dell'antico anfiteatro romano (al piano seminterrato). Diffusa eterogeneità di tecniche costruttive	F_{C1} = 0 Rilievo geometrico completo. Restituzione del QF Durante il sopralluogo sono stati individuati punti critici.	F_{C2} = 0 Documentazione archivistica + campagna indagini Ricostruzione da fonti documentarie	F_{C3} = 0.12 Desunti da dati già disponibili (valori medi). Non sono state svolte prove per la caratterizzazione meccanica dei materiali.	F_{C4} = 0.06 Indagini pregresse + MASW	1,18
M9 Complesso Monum.di Santa Maria delle Monache, Isernia	S: 1870 mq circa di piano V: 25430 mc H: 3,40 m altezza media di piano 4 piani di cui 1 interrato	In pendio Il fabbricato si colloca nella parte meridionale della città, in corrispondenza dei resti delle mura ciclopiche che contornano la città di Isernia. Il complesso Monumentale presenta una pianta ad "L",	Complesso monumentale/ aggregato edilizio. Non sono presenti interazioni con edifici adiacenti.	Complesso costituito da 3 corpi di fabbrica caratterizzati da tipologie murarie diverse a fasi costruttive di epoche molto distanti.	F_{C1} = 0 Rilievo geometrico completo. Restituzione del QF	F_{C2} = 0.06 Ispezione visiva (schede GNDT) + campagna diagnostica per acquisire informazioni spesso nascoste. Ricostruzione da fonti documentarie + riscontro sul campo. (La ricerca storica ha portato alla definizione delle prove in situ) Particolare attenzione è stata dedicata all'acquisizione della documentazione sui danneggiamenti subiti dal manufatto in occasione di eventi	F_{C3} = 0.06 Campagna diagnostica. Partendo dalla classificazione delle murature elaborata dal GNDT (Tabella 1) e dai risultati delle prove soniche (Tabella 2) si è arrivati a definire una scheda tipologica di ciascuna muratura, in cui si riassumono i parametri fondamentali della muratura oggetto	F_{C4} = 0.06 Indagini documentali (indagini geostitiche realizzate nel sito, condotte per la verifica sismica degli edifici scolastici, 2003 e 2006) Tale studio è stato ritenuto valido in quanto, dalla carta tecnica Regionale del Molise e dalla carta Geologica	1,18
M10 Ex monastero di Sant'Agata e Teatro Romano, Spoleto	S: 1350 mq + 2350 mq (Teatro) V: 21 000 mc (escluso Teatro)	Si lieve pendio. L'impianto strutturale comprende una ex-chiesa, ambienti con limitata densità di murature in una direzione, un Teatro di epoca Romana.	In aggregato. Limitate interferenze con costruzioni contigue (edifici e resti archeologici)	Differenti tipi visibili di muratura (n° 6), di impalcati piani (n° 13) e voltati (n° 5). Il Teatro, la ex chiesa e l'ultimo livello del portico di un'ala, dagli anni 50 in poi, sono interessati da interventi in c.a.	F_{C1} = 0 Ispezione visiva + Nessuna indagine diagnostica svolta per difficoltà amministrative nella Direzione Generale	F_{C2} = 0.06 Ispezione visiva + Nessuna indagine diagnostica svolta per difficoltà amministrative nella Direzione Generale Ricostruzione da fonti documentarie + riscontro sul campo	F_{C3} = 0.12 Valori minimi Tabella C8A2.1 (2009). Effettuate analisi strutturali di comparazione assumendo valori medi	F_{C4} = 0 Disponibili informazioni su un fenomeno franoso. tali fenomeni non appaiono attivi, pertanto nello spirito dell'Allegato Tecnico all'Accordo istituzionale si assume	1,18
M11 Balistica di San Francesco (Cappella Bacci), Arezzo	S: 1700 mq H: 25 m circa h di gronda (6.5 m h cappella inferiore) V: 43000 mc circa	Su pendio debole. Chiesa ad aula Unica con cappelle su un lato	In Aggregato con altri edifici.	Struttura in muratura (esterni a faccia vista, interno intonacato) Edificio unitario	F_{C1} = 0 Rilievi di base considerati attendibili. Geometria (alzati) e QF verificati con laser-scanner 3D.	F_{C2} = 0 Tipologie murarie analizzate con schede IQM e restituzione grafica dei pannelli 100x100. Supporto di indagini pregresse (MS, MD, ED, SO) Ricostruzione da fonti documentarie.	F_{C3} = 0.06 Ricavati con metodo IQM	F_{C4} = 0.03 Disponibilità di dati da prove pregresse + MASW	1,09

COSTRUZIONI FORTIFICATE (F)

Caso studio	Caratteristiche storiche e morfologiche dell'edificio				Risultati e metodologie della fase di conoscenza, fattore di confidenza					
	Dimensioni (mq e mc totali)	Irregolarità plano-altimetriche	Isolato / In aggregato	Eterogeneità delle tecniche costruttive	Rilievo Geometrico	Identificazione Specificità storiche e costruttive		Parametri meccanici	Terreno e Fondazioni	FC globale
Castello Pirro del Balzo					F_{C1} = 0.05	F_{C2} = 0.06		F_{C3} = 0.06	F_{C4} = 0.03	1,20
F1	S: 1100 mq V: 19000 mc H: 17 m	In Piano	Edificio Isolato	Diverse fasi evolutive caratterizzate da tecniche costruttive differenti. Tipologie murarie non sempre a vista	Rilievo geometrico completo. Controllo a campione	Ispezione visiva + Saggi Esplorativi, Endoscopie	Ricostruzione da fonti documentarie	"Limitate" indagini. Sono stati eseguiti SE nelle pareti non a vista. Valori medi tabella C8A2.1	Indagine MASW + altri dati da indagini disponibili	
Castello di Melfi					F_{C1} = 0	F_{C2} = 0.06		F_{C3} = 0.12	F_{C4} = 0.03	1,21
F2	S: 1100 mq V: 22000 mc	Edificio su pianoro (l'oggetto di valutazione della vulnerabilità è riferita al corpo centrale; si esclude la cinta muraria)	Isolato	Edificio in muratura non intonacata ad eccezione di alcuni ambienti interni	Rilievo geometrico completo e doc. disponibile. QF parziale	Indagini pregresse + sopralluoghi in situ	Restituzione completa delle fasi costruttive da fonti documentarie + riscontri pregressi	Desunti da dati già disponibili da CMIT (2009)_valori medi . + indagini pregresse non considerate	informazioni dedotte dalla letteratura_sondaggi condotti agli inizi degli anni 90 (6 sondaggi meccanici a rotazione)	
Napoli. Castel Sant'Elmo					F_{C1} = 0	F_{C2} = 0.06		F_{C3} = 0	F_{C4} = 0.03	1,09
F3	Struttura costituita da 3 macro volumi per un totale di: S: 4.000 mq circa H: 12,00 m in media	Su pendio forte	Isolato	Diverse fasi costruttive con omogenee tecniche costruttive (muratura in tufo) ad eccezione dell'auditorium sotterraneo (acciaio)	Rilievo geometrico completo. Controllo diffuso + laser scanner QF restituito su elab. specifici	Ispezione visiva+ piano di indagini	Restituzione completa delle fasi costruttive da fonti documentarie.	Desunti da letteratura. Si utilizza il valore massimo della Tabella C8A2.1	Studi del CNR_IGAG	
Castello Svevo di Manfredonia	S: 1600 mq ca.				F_{C1} = 0	F_{C2} = 0.06		F_{C3} = 0.06	FC4 = 0.06	1,18
F4		In Piano	Posizione isolata	Diverse fasi evolutive caratterizzate da tecniche costruttive analoghe. Tipologie murarie in gran parte a vista	Rilievo di base verificato Il QF è riportato in una planimetria dedicata	Murature analizzate con (ED)	Ricostruzione da fonti documentarie	Limitate indagini per tessiture murarie e collegamenti. Valori minimi tab. C8A2.1		
Castello Pandone,					F_{C1} = 0	F_{C2} = 0.06		F_{C3} = 0.06	F_{C4} = 0.03	1,15
F5	S: 780 mq V: 9.360 mc H: 4 m in media	Su Pendio debole, sussistono fondazioni a quote differenti	Isolato. Non sono presenti interferenze con edifici adiacenti	Diverse fasi evolutive caratterizzate da tecniche costruttive analoghe. Tipologie murarie in gran parte a vista	Verifica del rilievo esistente con aggiunta delle planimetrie degli orizzontamenti ai vari livelli. Il QF è rilevato sistematicamente; le lesioni sono documentate su	Murature e orizzontamenti indagati attraverso indagini visive, endoscopie, termografie con restituzione dei dettagli costruttivi	Restituzione delle fasi costruttive da fonti documentarie + riscontro sul campo	Murature classificate secondo GNDT I-II e utilizzo dei valori minimi e medi della tab.	Indagini geofisiche disponibili con relazione geologica	
Rocca Roveresca, Senigallia					F_{C1} = 0	F_{C2} = 0		F_{C3} = 0.12	F_{C4} = 0.03	1,15
F6	< 2000 mq > 25000 mc	In piano	Si trova all'interno della struttura muraria della fortificazione. Caratterizzata da importanti stratificazioni costruttive (5 fasi evolutive)	Gran parte delle strutture risulta visibile	Rilievo geometrico completo. Controllo diffuso anche con laser scanner. Restituzione del QF	Murature e Orizzontamenti indagati attraverso ispezione visiva accompagnata da esami diagnostici debolmente distruttivi.	Restituzione delle fasi costruttive da fonti documentarie + riscontro sul campo delle superfici di discontinuità	Valori minimi tab.C8A.2 DM 14-01-2008, Circolare 2/2/2009 amplificati dei valori correttivi. 3 tipologie di tessiture murarie visibili in situ	indagini documentarie + limitate indagini in sito. Assenza di quadri fessurativi, fuoripiombo ascrivibili a cedimenti	
Rocca Albornoziana di					F_{C1} = 0	F_{C2} = 0		F_{C3} = 0.12	F_{C4} = 0	1,12
F7	ca. 3000 mq ca. 52.000 mc (17 m h media di gronda)	Edificio di grandi dimensioni (ma caratterizzato da geometrie semplici) sul pianoro di uno sperone roccioso. Presenza di elementi svettanti (torri) e generale irregolarità altimetrica.	Edificio Isolato	Poche fasi costruttive caratterizzate da tecniche differenti. Paramenti murari esterni a vista, interni intonacati	Rilievo completo. Controllo a campione. QF riportato su planimetrie rilievo mater.	Murature indagate con IQM + Supporto di indagini pregresse (CA, MD) e foto di cantiere.	Restituzione completa delle fasi costruttive da fonti documentarie.	Valori minimi Caratterizzazione meccanica tramite IQM	Disponibilità di studi precedenti (2007) e integrazioni con caratterizzazione geotecnica	
Gradara. Rocca Demaniale					F_{C1} = 0	F_{C2} = 0		F_{C3} = 0.12	F_{C4} = 0.06	1,18
F8	S: 1150 mq V: 13361 mc H: 5.30 m in media 3 piani con interrati	In pendio forte posizionato in una rocca.	Edificio Isolato. Non sussistono interferenze con altri edifici; solo sui lati Sud e NE presenta delle connessioni con la cinta muraria	La Rocca ha avuto una storia lunga e ricca di modifiche strutturali. La struttura portante è in muratura in gran parte a faccia vista. La costruzione si sviluppa sui resti dell'antico insediamento romano.	Rilievo geometrico completo. Verifica della corrispondenza ed aggiornamento dei disegni forniti con integrazione di quelli mancanti. Restituzione del QF.	Indagini diagnostiche (nessuna indagine pregressa) Non sono presenti elaborazioni grafiche dei dettagli costruttivi	Ricostruzione da fonti documentarie + riscontro sul campo. E' stata fatta una ricostruzione volumetrica tridimensionale (sintesi di sviluppo strutturale dell'edificio)	Desunti da dati già disponibili (valori medi)	Nuove indagini nel 2014 dal CNR-IGAG	

3.10 Considerazioni

Il confronto tra i casi analizzati conferma che il fattore di confidenza non esprime in maniera univoca i contenuti delle analisi svolte, ovvero non è sempre rappresentativo del livello di conoscenza acquisito. Per cui istaurare un legame coerente tra risultati della fase di conoscenza – in gran parte qualitativi – e coefficienti numerici risulta un procedimento molto complesso i cui esiti non sono sempre governabili.

La mancata univocità del fattore di confidenza legata principalmente a due aspetti: (i) alla soggettività con cui è possibile selezionare i fattori parziali nella tabella 4.1; (ii) alla possibilità di ottenere valori di FC uguali seguendo percorsi di conoscenza diversi.

Da una parte, potrebbe essere utile specificare, rimodulando la tabella 4.1, quali sono i risultati conoscitivi minimi per poter scegliere un determinato fattore parziale. Per quanto concerne l'aspetto del rilievo geometrico, ad esempio, potrebbe essere utile slegare il livello di conoscenza massimo dalla restituzione del quadro fessurativo e specificare due livelli di accuratezza del rilievo (es. controllo a campione o controllo diffuso). La verifica e la restituzione del quadro fessurativo potrebbe essere considerata nell'ambito del secondo aspetto della conoscenza ("identificazione delle specificità storiche..."), in modo da richiedere una conoscenza organica dello stato attuale proveniente dalla lettura contestuale delle informazioni sulle trasformazioni storiche, della tecnica costruttiva e, per l'appunto, del quadro fessurativo.

Una eventuale rimodulazione dovrebbe comunque mantenere la attuale possibilità di ottenere un livello di conoscenza adeguato ($FC \leq 1,2$) anche senza eseguire prove di caratterizzazione meccanica dei materiali o del terreno di fondazione.

Per un altro verso, gli aspetti problematici della definizione del Fattore di Confidenza rimangono legati a una difficoltà connaturata alla procedura di quantificazione numerica di un contenuto di conoscenza di natura eminentemente qualitativa e caratterizzato spesso da un notevole grado di complessità.

Per questa ragione, il problema maggiore, rilevato anche a valle dell'analisi dei casi studio, non è tanto quello di ottenere un fattore di conoscenza attendibile, ma quello di finalizzare il percorso di conoscenza alla gestione nell'intero processo progettuale; per cui è sulla base degli obiettivi del progetto (la sicurezza e la conservazione) che, in primo luogo, si possono definire l'approccio conoscitivo da privilegiare e conseguentemente le finalità e il livello di approfondimento di ciascuna indagine.

Dal confronto dei casi studio del Progetto Arcus emerge un approccio utilizzato più frequentemente per il raggiungimento di una conoscenza adeguata dell'edificio che, in linea generale, mira ad approfondire le indagini che aiutano a decodificare la realtà costruttiva; la conoscenza dei parametri meccanici dei materiali e del terreno di fondazione assume meno

importanza e si preferisce desumere tali informazioni da dati già disponibili ovvero mediante indagini non distruttive che avvalorano, ad esempio, il giudizio sulla qualità delle murature.

Questa tendenza può essere rappresentata da alcuni percorsi di conoscenza preferenziali nell'ambito della tabella 4.1 (Figura 3.41).

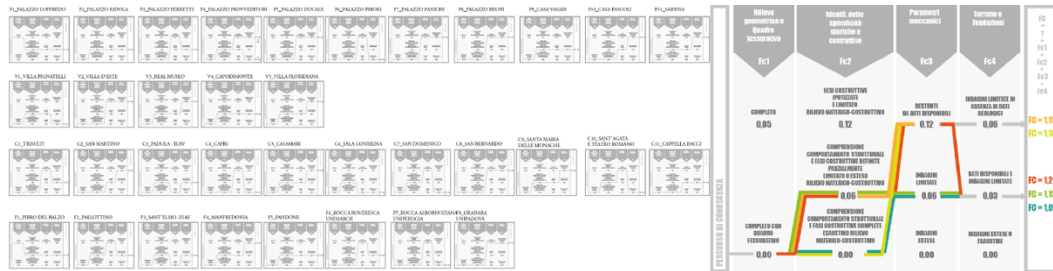


Figura 3.41 – Percorsi di conoscenza prevalenti rilevati a valle dell'analisi dei casi studio del Progetto Arcus. Si nota che il medesimo fattore di confidenza è ottenuto seguendo un percorso diverso; si nota, inoltre, che i percorsi selezionati nel complesso tendono ad approfondire indagini come il rilievo geometrico e costruttivo e la ricerca storica.

L'analisi dei 34 casi studio consente, dunque, di individuare un percorso di conoscenza da privilegiare per il raggiungimento di una conoscenza reale dell'edificio e le indagini più utili che ne favoriscono lo sviluppo.

In questo percorso gli aspetti fondamentali indagati sono: la definizione della configurazione geometrica e dello stato di danno, l'analisi della tecnica costruttiva e la ricostruzione delle fasi evolutive. Sulla base di questi obiettivi si rileva che le indagini fondamentali che consentono di raggiungere un livello di conoscenza adeguato sono il rilievo e l'analisi storica. In mancanza di documentazione storica o limitata accessibilità diretta del manufatto, possono essere utili indagini specifiche atte a superare tali limiti conoscitivi (quali le termografie, le stonacature, dei piccoli saggi esplorativi della sezione muraria).

La restituzione quanto più completa della geometria strutturale e del quadro fessurativo è il primo obiettivo per una conoscenza adeguata dell'edificio. Nell'ambito di questo aspetto è indagata la qualità dell'impianto strutturale (compattezza della maglia muraria, adeguatezza degli spessori murari in relazione alle eventuali spinte delle volte, presenza di catene e dispositivi di connessione, ecc.) e le informazioni che dovranno confluire nel modello meccanico utilizzato per la verifica di sicurezza.

L'utilizzo di strumenti come il laser scanner, la stazione totale o la fotogrammetria per la definizione del rilievo geometrico completo risulta essere di grande supporto, soprattutto nel caso di edifici di notevoli dimensioni o caratterizzati da una configurazione molto articolata (vedi ad esempio i monasteri certosini) ovvero in presenza di stati deformativi non facilmente rilevabili con gli strumenti del rilievo tradizionale.

Tuttavia non appare strettamente necessario perseguire l'accuratezza del rilievo con approssimazione micrometrica, quanto con la sistematica registrazione di tutte le singolarità (discontinuità costruttive, variazione di spessore murario, il quadro delle lesioni e delle deformazioni, presenza di vuoti ecc.) che possono rivelare vicende costruttive la cui conoscenza può essere cruciale per la comprensione del comportamento strutturale e per la scelta di eventuali interventi.

La conoscenza del processo storico-evolutivo, delle trasformazioni e degli interventi più importanti che possono avere introdotto alterazioni del comportamento strutturale è perseguita attraverso la ricerca bibliografica e d'archivio. Si nota come sia necessario eseguire una selezione critica delle informazioni provenienti dalle fonti documentarie mettendo in evidenza i dati che possono essere controllati direttamente sull'edificio e che soprattutto si riferiscono a modifiche effettivamente avvenute. Lo studio della documentazione relativa a progetti non eseguiti è sicuramente interessante per la descrizione delle vicende storiche dell'edificio, ma non è utile alla comprensione del comportamento strutturale attuale. La conoscenza del processo storico-evolutivo, quindi, non è direttamente proporzionale alla quantità, ma alla qualità di informazioni raccolte.

Per l'indagine di archivio si possono individuare degli ambiti di ricerca preferenziali legati alla tipologia del complesso architettonico. In linea generale, è utile concentrare la ricerca sulla individuazione dei passaggi di proprietà poiché l'atto di passaggio è spesso accompagnato da una descrizione della consistenza dell'edificio¹⁹⁶.

Per incrementare il livello di conoscenza sulle fasi costruttive è comunque fondamentale effettuare il riscontro diretto sull'edificio delle informazioni acquisite dalle fonti. A tale scopo risulta utile eseguire indagini diagnostiche non distruttive (quali le termografie o le pacometrie) che consentono di verificare la presenza di cesure murarie e discontinuità costruttive, o di interventi di consolidamento in cemento armato, anche attraverso l'intonaco.

La realizzazione di un rilievo materico costruttivo approfondito è il terzo obiettivo fondamentale della conoscenza, nell'ambito del quale è analizzata la qualità meccanica degli elementi strutturali in termini di efficacia a contrastare i meccanismi di collasso indotti dall'azione sismica. Lo strumento essenziale è sempre il rilievo nella sua declinazione di rilievo costruttivo.

¹⁹⁶ In particolare, nel caso degli edifici conventuali analizzati nel paragrafo § 3.6 risulta utile indagare il periodo storico post-unitario, nell'ambito del quale a seguito delle leggi eversive del 1866, i beni degli ordini e delle congregazioni religiose sono incamerati dal demanio e diventano caserme o carceri militari spesso a seguito di modificazioni di impianto.

L'edificio murario può essere caratterizzato da una eterogeneità delle tecniche costruttive legata a un processo storico-evolutivo più o meno articolato e alla esecuzione di progetti di restauro e consolidamento che possono aver introdotto nuovi elementi strutturali o modificato radicalmente quelli originari¹⁹⁷. Per questa ragione, la redazione di un eventuale piano delle indagini utili ad approfondire la conoscenza degli aspetti costruttivi dovrebbe essere preferibilmente successiva alla definizione delle fasi costruttive e delle trasformazioni. L'obiettivo è selezionare le indagini effettivamente necessarie e utili per incrementare la conoscenza dell'edificio e ottimizzare tempi e costi del lavoro¹⁹⁸.

Riguardo il rilievo materico-costruttivo un livello minimo necessario di conoscenza può essere acquisito attraverso i dati direttamente visibili nell'edificio, con il supporto delle informazioni provenienti dalle fonti documentarie. Qualora le informazioni sulla tecnica costruttiva siano tutte a vista il solo rilievo diretto può essere sufficiente ad acquisire una congrua conoscenza della tecnica costruttiva, probabilmente senza ulteriori indagini.

Un supporto essenziale per l'analisi della tecnica costruttiva rimangono gli abachi e gli studi presenti sulla tecnica costruttiva locale, che consentono di ipotizzare con sufficiente attendibilità gli assemblaggi degli elementi costruttivi anche senza l'esecuzione di ulteriori indagini diagnostiche¹⁹⁹.

Un altro strumento utile per lo studio delle murature è la scheda per la definizione dell'Indice di Qualità Muraria (IQM)²⁰⁰. Il metodo è ritenuto valido non tanto perché tenta di legare il giudizio qualitativo sulla muratura a un coefficiente numerico, quanto piuttosto perché prevede un necessario confronto diretto con l'opera muraria e una conoscenza di base delle caratteristiche di un muro costruito a regola d'arte.

¹⁹⁷ Come si evince dalle schede, gran parte degli edifici analizzati sono stati interessati da interventi strutturali dagli anni '50 agli anni '90 del Novecento, che nella quasi totalità dei casi studio hanno previsto l'uso diffuso del cemento armato e dell'acciaio. Le scelte progettuali – che riflettono la cultura costruttiva dell'epoca – hanno spesso previsto l'applicazione di cappe in c.a. all'estradosso delle volte, perforazioni armate per il consolidamento delle murature e il miglioramento delle connessioni, l'introduzione di cordoli in c.a. in breccia. Cfr. § 3.5 3.6, 3.7 .

¹⁹⁸ Ad esempio, la definizione preliminare delle fasi costruttive consente di individuare i punti di discontinuità non visibili, sui quali eseguire eventuali indagini.

¹⁹⁹ Si veda ad esempio lo studio in P2 nell'ambito del quale sono state svolte delle indagini endoscopiche sulle murature che hanno mostrato una sezione muraria del tutto analoga a quella descritta dalle fonti bibliografiche.

²⁰⁰ La procedura richiede di esprimere un giudizio sul rispetto di sette parametri caratteristici della regola dell'arte: (1) efficace contatto fra gli elementi, (presenza di zeppe, malta di buona qualità); (2) presenza di diatoni, (3) elementi resistenti di forma quadrata; (4) elementi resistenti di grande dimensione rispetto allo spessore del muro; (5) sfalsamento tra i giunti verticali; (6) presenza di filari orizzontali; (7) buona qualità degli elementi resistenti. I livelli di giudizio sul rispetto dei parametri sono tre: (i) rispettato, (ii) parzialmente rispettato; (iii) non rispettato. Cfr. Borri-De Maria 2009. Vedi *supra* 3.2.1

Qualora le informazioni sulla tecnica costruttiva non fossero a vista e non fossero disponibili fonti documentarie o bibliografiche, il livello di conoscenza può essere incrementato mediante l'esecuzione di indagini diagnostiche finalizzate a superare i limiti imposti dalla mancata visibilità delle informazioni. Attraverso le indagini termografiche, ad esempio, è possibile individuare la tecnica costruttiva di elementi coperti da intonaco, eventuali discontinuità costruttive e distinguere orizzontamenti portanti da controsoffitti.

Si nota anche l'utilità delle video-endoscopie per valutare la compattezza della sezione muraria; tuttavia, alle video-endoscopie è opportuno associare una analisi della tessitura muraria e dei disegni di dettaglio delle murature per mettere a sistema le informazioni che supportano il giudizio sulla qualità muraria. Rimane dubbia l'utilità delle video-endoscopie eseguite negli spessi muri di cinta delle costruzioni fortificate, dato che in presenza di spessori oltre i 2 metri la conoscenza della sezione trasversale assume un'importanza relativa.

In conclusione, l'analisi dei 34 casi studio consente di affermare che l'approfondimento della fase di conoscenza non è legato alla quantità delle indagini svolte, ma alla tipologia delle indagini e alla qualità dei risultati ottenuti.

Il percorso di conoscenza può quindi essere descritto con un modello incrementale in cui il livello di conoscenza ottimale è raggiunto col supporto di un rilievo diretto e una ricerca storica approfonditi (Figura 3.42). Se a valle di queste indagini è possibile desumere informazioni esaustive sulla qualità dell'impianto strutturale e sulle trasformazioni subite, l'esecuzione di ulteriori indagini può favorire solo lievi incrementi del livello di conoscenza, magari a fronte di un non trascurabile costo, sia in termini sia economici che di invasività.

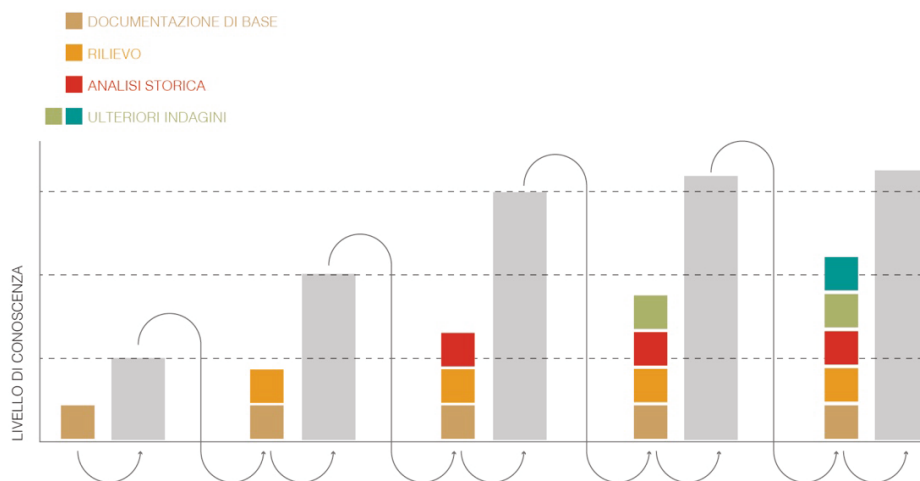


Figura 3.42 – Il percorso di conoscenza descritto da un modello incrementale, in cui il livello di conoscenza ottimale è raggiunto col supporto del rilievo e dell'analisi storica.

4. Proposta per una sistematizzazione del percorso della conoscenza

4.1 Introduzione

La analisi dei casi studio del progetto Arcus mette in evidenza – accanto alle criticità (sopra estesamente commentate) relative alla quantificazione numerica dei livelli di conoscenza – la prevalenza di un approccio alla conoscenza che privilegia la lettura diretta della fabbrica e della sua evoluzione storica per mezzo degli essenziali strumenti del rilievo e della ricerca storica, assegnando un ruolo secondario alla acquisizione di dati quantitativi inerenti i parametri meccanici delle strutture di elevazione e di fondazione.

Questo approccio rappresenta una interpretazione della metodologia proposta dalle Linee Guida che ne sviluppa appieno i concetti e i criteri fondamentali, stabilendo una gerarchia degli obiettivi della conoscenza e delle indagini essenziali e utili a raggiungerli. Ciò consente di individuare un criterio razionale per la valutazione del livello di conoscenza raggiunto e, soprattutto, di ottimizzare le risorse disponibili.

Un ulteriore contributo in questa direzione può provenire dalla sistematizzazione delle attività e da una gestione quanto più possibile coordinata delle informazioni (anche molto eterogenee) provenienti dalle indagini, con l'obiettivo di instaurare un legame diretto tra le acquisizioni conoscitive e il conseguente giudizio qualitativo che consenta di ripercorrere in ogni momento il processo logico delineato e favorisca l'utilizzazione dei risultati ottenuti anche nella successiva fase progettuale.

La proposta per la sistematizzazione del percorso della conoscenza, illustrata mediante la applicazione al caso studio di Palazzo Lanfranchi a Matera²⁰¹, condivide gli aspetti essenziali dell'approccio prevalente e li inserisce all'interno di un quadro concettuale unitario che, oltre a fornire una giustificazione rigorosa della finalità e correlazione reciproca delle singole operazioni, si propone di conferire alla sequenza delle operazioni stesse connotati della ripetibilità (da parte di soggetti diversi) ed esportabilità (ad altri casi).

²⁰¹ Il caso studio di Palazzo Lanfranchi – attualmente Museo dell'Arte Medievale e Moderna della Basilicata – afferisce al già citato progetto di "Verifica Sismica dei musei Statali" ed è stato svolto dal gruppo di ricerca dell'Università di Catania. Responsabile scientifico prof.ssa Caterina Carocci, coordinatore generale prof. Nicola Impollonia; gruppo di lavoro: arch. Chiara Circo, Giuseppe Cocuzza Avellino, Serena Petrella.

La proposta riprende una metodologia già sperimentata in varie occasioni di studio di contesti storici soggetti al rischio sismico²⁰² in cui il processo progettuale è sistematizzato in tre fasi strettamente correlate tra loro: conoscenza, interpretazione, progetto²⁰³ (Figura 4.1).

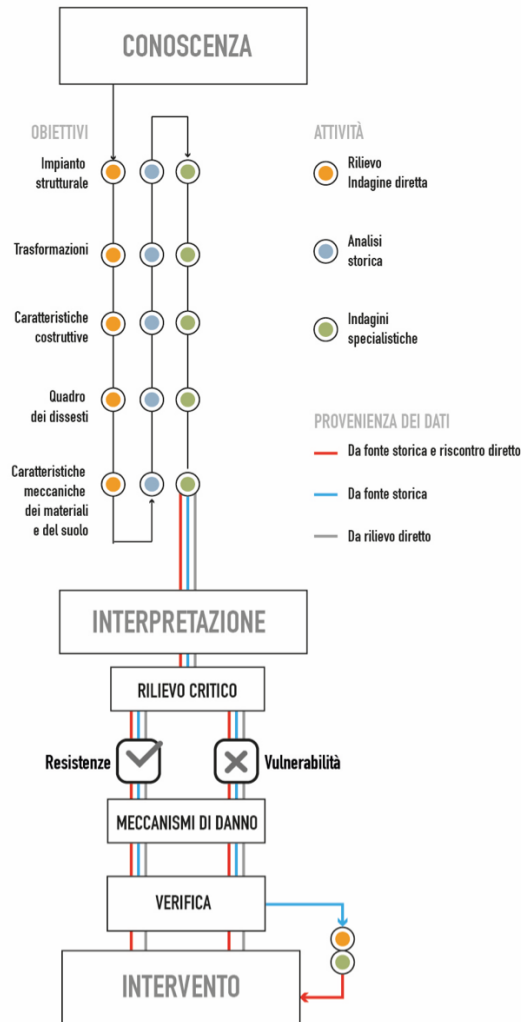


Figura 4.1- Schema logico metodologia conoscenza – interpretazione – progetto

²⁰² la metodologia deve la sua impostazione generale e i criteri di base agli esiti degli studi condotti da Antonino Giuffrè tra gli anni Ottanta e Novanta del secolo scorso (A. Giuffrè, *Sicurezza e conservazione ...*, *op. cit.*) e al naturale affinamento apportato dal successivo lavoro di Caterina Carocci (C.F. Carocci, *Analysis's methodologies for consistent antiseismic intervention on historical masonry architecture*. In: *Seismic Risk Earthquake in North-Western Europe*. Liegi, 11-12 settembre 2008, p. 151-166, LIEGI: Les Editions de l'Université de Liège, ISBN: 978-2-87456-063-7)

²⁰³ C. F. Carocci, *Metodologie di analisi sul costruito storico*, in “Conoscere per abitare. Un seminario di studio su Motta Camastra”, Lombardi Ed., Siracusa, 2008.

Nella fase della conoscenza, lo stato attuale dell'edificio è analizzato nel suo processo storico-evolutivo; nella fase dell'interpretazione, una sintesi critica delle informazioni è eseguita con l'obiettivo di individuare i fattori di vulnerabilità e punti di forza e i potenziali scenari di danneggiamento sismico; nella fase del progetto, sono definiti i criteri di intervento per garantire la sicurezza e la conservazione dell'edificio a partire da vulnerabilità e punti di forza osservati.

All'interno di tale metodologia un ruolo cruciale è svolto dal "rilievo critico"²⁰⁴ qui proposto, oltre che come strumento interpretativo della realtà costruita dell'edificio, anche come strumento di organizzazione e gestione coordinata delle informazioni raccolte (Figura 4.2).

La descrizione dettagliata del caso studio è preceduta dalla preliminare discussione delle ipotesi che costituiscono il fondamento concettuale della metodologia – e, in quanto tali, sono di fatto implicitamente assunte nei casi studio presentati nel capitolo precedente, beninteso quelli la cui impostazione è condivisa dal presente lavoro. Tali ipotesi rendono infatti lecita l'adozione di un approccio nel quale la caratterizzazione meccanica (quantitativa) delle murature, benché comunque auspicabile, non è strettamente necessaria ai fini della valutazione di sicurezza e della definizione degli interventi.

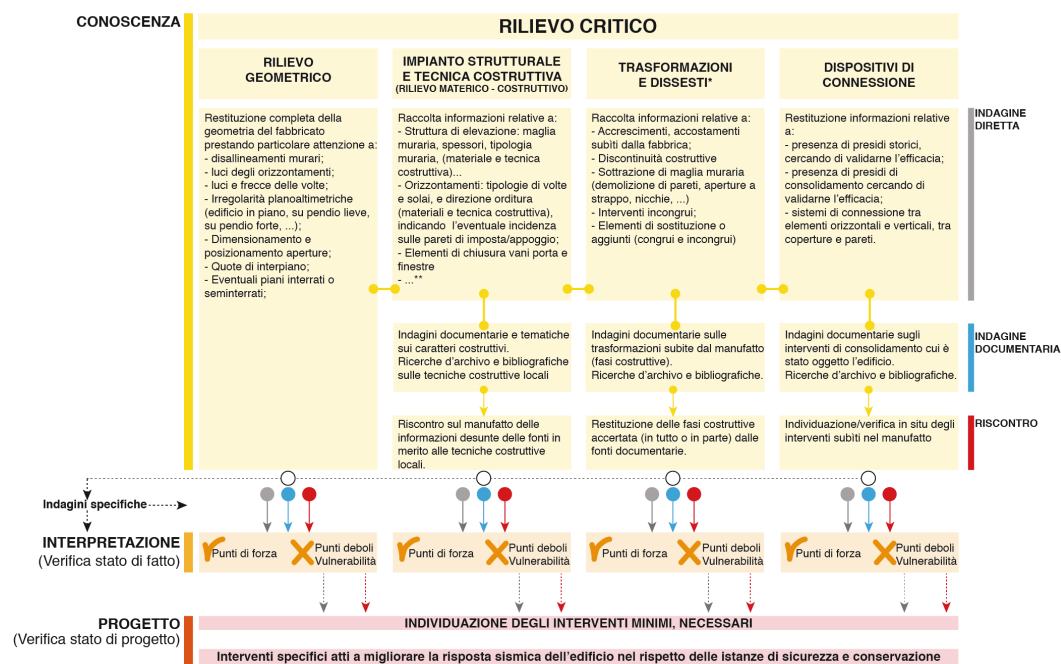


Figura 4.2 - Il ruolo del rilievo critico nella metodologia conoscenza-interpretazione-progetto.

²⁰⁴ C. F. Carocci, *Conservazione del tessuto murario e mitigazione della vulnerabilità sismica. Introduzione allo studio degli edifici in aggregato*, in Blasi C. (a cura di), 2013, Architettura Storica e Terremoti. Protocolli operativi per la coscienza e la tutela, Wolters Kluwer Italia, Milano, 2013, pp. 138-153.

4.2 Interpretazione dei criteri alla base del percorso della conoscenza

La particolare interpretazione dei criteri che le Linee Guida pongono a fondamento del percorso della conoscenza, implicitamente contenuta nell'approccio prevalente riconosciuto nei casi studio del progetto Arcus – e qui applicato, con le precisazioni sopra richiamate, al caso studio di palazzo Lanfranchi –, si basa su due assunti fondamentali: (i) l'edificio murario costruito a regola d'arte è in grado di rispondere efficacemente anche ad azioni sismiche (beninteso nei limiti fissati dalle peculiarità tipologiche e tecnologiche del lessico costruttivo locale)²⁰⁵; (ii) la capacità della costruzione muraria di rispondere al sisma è legata a problemi di stabilità dell'equilibrio più che alla resistenza dei materiali.

Il primo assunto equivale ad affermare che il riconoscimento dell'aderenza dell'edificio alla regola dell'arte contiene implicitamente il giudizio qualitativo sul comportamento meccanico. La “regola dell'arte” è l'insieme di criteri da seguire per la realizzazione un edificio ben costruito. Queste regole sono desumibili dai trattati di architettura storici e costituiscono i requisiti minimi che garantiscono durabilità ed efficienza meccanica.

Il secondo assunto consente di incardinare il percorso di conoscenza precisando che lo scopo di ogni indagine è la acquisizione dei dati necessari a riconoscere se un edificio è costruito a regola d'arte, ovvero la configurazione dell'impianto strutturale, la presenza di connessioni efficaci, la qualità costruttiva degli elementi strutturali con particolare riguardo alle murature. In questi termini la conoscenza della resistenza dei materiali non assume un peso determinante, soprattutto se trattiamo costruzioni di dimensioni ordinarie.

I due assunti e le loro implicazioni si possono condensare nell'unica affermazione secondo la quale: «se si sa riconoscere l'edificio ‘ben costruito’ si è in grado di distinguere ciò che è sicuro da ciò che non lo è»²⁰⁶.

Presupposto essenziale per operare questo riconoscimento è la conoscenza della logica sottesa dalle architetture murarie storiche che ne definisce il comportamento strutturale in condizioni ordinarie e ne governa anche le modalità di risposta al sisma.

4.2.1 La logica strutturale dell'architettura muraria storica

La logica sottesa dalle architetture storiche è riconducibile ad alcune caratteristiche generalizzabili, che ricorrono in tutti gli edifici a prescindere dalla loro collocazione geografica e dalla tipologia architettonica.

Tali caratteristiche sono le seguenti:

1. la costruzione muraria è un sistema organico costituito da più elementi strutturali (muri, solai, volte) tra loro assemblati;

²⁰⁵ Cfr. A. Giuffrè, *Efficacia delle tecnologie storiche in area sismica*, in *Leggendo il libro... op. cit.*, pag. 29-41.

²⁰⁶ A. Giuffrè, *Guida al progetto di restauro... op. cit.*

2. l'assemblaggio è governato da vincoli di semplice appoggio, che costituiscono vincoli monolateri e attritivi²⁰⁷.

Il concetto di assemblaggio è applicabile a varie scale. Alla scala dell'elemento strutturale: i muri sono composti da pietra giustapposte l'una sull'altra, così come le volte, così come i solai. Alla scala dell'edificio i suddetti elementi sono sovrapposti l'uno sull'altro. Alla scala dell'aggregato edilizio: gli edifici si affiancano l'uno all'altro o si sopraelevano sovrapponendo altre porzioni murarie.

Il vincolo di semplice appoggio che caratterizza le connessioni tra i vari elementi strutturali (terreno-muro, muro-muro, muro-solaio,...) è ciò che distingue le architetture murarie dalle strutture contemporanee in acciaio o in cemento armato caratterizzate, di contro, da connessioni tenaci che determinano organismi fortemente iperstatici. Da qui deriva l'impossibilità di utilizzare gli stessi modelli meccanici e gli stessi approcci adoperati per le strutture moderne obbedienti a tutt'altre regole.

La connessione per semplice appoggio condiziona il comportamento strutturale dell'edificio murario, che è concepito principalmente per resistere a carichi verticali e ad eventuali spinte indotte da orizzontamenti voltati. Raramente la costruzione muraria è organizzata per offrire resistenze rilevanti ad azioni diverse da quelle verticali. Ne consegue che gli edifici murari sono intrinsecamente vulnerabili alle azioni indotte dal terremoto.

4.2.2 Qualità meccanica di una costruzione muraria

La qualità di edificio ben costruito o, più propriamente, costruito a regola d'arte è essenzialmente legata alla corretta organizzazione dell'impianto strutturale, alla qualità dei singoli elementi che la compongono, alla efficacia delle connessioni tra gli elementi.

Un impianto strutturale correttamente concepito è realizzato mediante una maglia muraria compatta basata su una organizzazione scatolare delle pareti di elevazione con luci libere non eccessive e comunque commisurate alla scala dell'edificio²⁰⁸. Questo tipo di organizzazione garantisce la presenza di una adeguata resistenza a taglio, in presenza di azioni orizzontali, indipendentemente dalla direzione delle azioni stesse.

Quanto agli elementi che compongono la scatola muraria, il primo e più importante è sicuramente rappresentato dai muri.

²⁰⁷ Tali connessioni sono di tipo monolaterale perché reagiscono ad azioni di compenetrazione ma non rispondono ad azioni di distacco. L'unica componente che si oppone all'azione di trazione è l'attrito (Giuffrè 1993).

²⁰⁸ Tutti i regolamenti edilizi e le norme storiche prevedono tra le prescrizioni per le nuove costruzioni (in muratura) l'organizzazione della maglia muraria siffatta il cui passo cellulare dovrà essere pari a 6-7 m massimo.

I fattori che definiscono la qualità di un muro sono desumibili dalla regola dell'arte muraria introdotta dai trattati di fine Ottocento in riferimento alle murature in pietra grezza²⁰⁹; la "regola" si compendia nei seguenti punti: (1) prevalenza delle pietre grandi sulle pietre piccole, (2) l'ingranamento tra le pietre e l'accortezza di apporre le facce regolari verso il basso e verso l'esterno; (3) sufficiente numero di elementi che attraversano la sezione del muro oltre la mezzeria (diatoni), (4) i vuoti tra le pietre devono essere riempiti con scaglie e pietre più piccole limitando al minimo l'uso della malta; (5) la realizzazione di strati perfettamente orizzontali (conguagli) a intervalli regolari,

Elementi di grande dimensione e di forma più regolare offrono garanzia di buona qualità soprattutto perché possono interessare buona parte dello spessore murario, e favorire la stabilità della muratura senza l'utilizzo eccessivo di malta. Tuttavia, la possibilità di utilizzare pietre grosse e regolari dipende dal materiale a disposizione, per questo risulta fondamentale la sapiente organizzazione delle pietre (punto 2).

La disposizione verso il basso di una faccia regolare garantisce un appoggio adeguato alle pietre sottostanti, mentre l'altra faccia regolare all'esterno protegge la parete dagli agenti atmosferici. Un buon ingranamento prevede lo sfalsamento dei giunti tra le pietre di filari sovrapposti sia sul prospetto che nella sezione della parete. Questa modalità favorisce una corretta distribuzione dei carichi verticali trasmessi dal contatto reciproco tra gli elementi evitando delle vie preferenziali di sconnesione²¹⁰.

La predisposizione accorta dei diatoni che connettono la parete nello spessore favorisce una buona qualità di ingranamento trasversale, e impedisce lo sgretolamento del muro in occasione di azioni orizzontali.

Il ruolo e la qualità della malta assumono un peso meno rilevante in un muro costituito da pietra squadrata, la cui stabilità è in gran parte assicurata dalla superficie regolare degli elementi; di contro, rivestono importanza nel caso di murature di pietre sbazzate o in ciottoli in cui il contatto continuo tra gli elementi è minore a causa della forma irregolare. In queste tipologie murarie, la continuità di contatto tra gli elementi è perseguita circondando ogni pietra con malta ma senza eccesso per assicurare e colmando opportunamente gli interstizi tra le pietre più grandi con pietre più piccole, scaglie e zeppe apparecchiate lungo le giaciture; la finalità è di conferire al muro la massima compattezza lapidea.

La disposizione di conguagli e ricorsi orizzontali a intervalli regolari è realizzata livellando il piano di posa con scaglie di pietra o mattoni ed è funzionale a limitare al minimo le irregolarità associate al processo costruttivo. L'orizzontalità dei filari favorisce la corretta distribuzione dei

²⁰⁹ Valadier 1833, Breymann 1849, Sacchi 1878, Donghi 1923.

²¹⁰ «Il corpo murario non è un solido, ma una struttura costituita da una catena pluriconnessa di corpi resistenti»²¹⁰ e il meccanismo di trasmissione dei carichi da leggere come passaggio da una pietra all'altra secondo la superficie di contatto.», Giuffrè 1990

carichi e il comportamento monolitico della parete. In particolare, in caso di azione sismica essa consente il ribaltamento della parete sollecitata ortogonalmente al proprio piano attorno a una cerniera cilindrica orizzontale senza sconnessioni scomposte del tessuto murario²¹¹.

Riguardo gli orizzontamenti, la qualità meccanica di una volta è legata agli stessi criteri elencati in precedenza per i muri.

La connessione tra volte e muro può avvenire per ingranamento dei primi filari di imposta al muro oppure per un'altezza maggiore migliorando in questo modo la connessione con la struttura di elevazione (rinfianco tessuto con la parete di imposta). Il piano orizzontale di calpestio è ottenuto mediante il riempimento con materiali leggeri (scaglie di pietra, pomice, ...).

Il ruolo giocato dalle volte è quello di diaframma orizzontale che distribuisce i carichi verticali sui muri portanti. Il vincolo che queste strutture offrono con il loro ingranamento evita il movimento all'interno di tutti i muri che costituiscono la cellula che esse coprono, mentre offrono un contributo ribaltante per il movimento all'esterno. La loro spinta è bilanciata all'interno della scatola muraria, ma non lo è per le pareti perimetrali esposte al movimento fuori piano, che saranno (di norma) muri di spessore maggiore e, nel migliore dei casi, provvisti di incatenamenti, sagomati a scarpa oppure dotati degli speroni (anche aggiunti successivamente alla costruzione).

La qualità meccanica di un solaio dipende dalla dimensione delle travi che lo compongono, dall'appoggio e dalla tipologia della tamponatura. Nel caso di solai lignei a semplice orditura con tavolato superiore è utile che quest'ultimo sia disposto sfalsando in giunti tra le tavole che dovranno essere ben chiodate alle travi sottostanti.

La connessione tra il solaio e il muro avviene tramite semplice appoggio: la testa della trave dovrà essere sufficientemente ammorsata al muro (15/20 cm); la trave dovrebbe di norma poggiare su un dormiente (tavola lignea) che evita il contatto diretto con la muratura evitando la marcescenza della testa della trave.

Il ruolo giocato dal solaio nell'organismo strutturale è quello di diaframma di controvento tra le cellule murarie che impedisce il movimento verso l'interno (puntone), ma solo in parte il movimento verso l'esterno. In quest'ultimo caso, il peso scaricato sulle travi riduce l'oscillazione della parete di appoggio con il – seppur minimo – contributo dell'attrito, mentre non interviene nel movimento della parete parallela all'orditura.

Solai di tipo metallico sono diffusi nell'architettura storica a partire dalla fine del XIX secolo e sono costituiti da travi metalliche di tipo doppio T (o IPE) e tamponatura in tavelloni,

²¹¹ Le prescrizioni della regola dell'arte muraria tendono a conferire al muro le caratteristiche di monolitismo e orizzontalità dei ricorsi che ne garantiscono un buon comportamento meccanico sotto l'azione sismica. Dunque è possibile desumere che un muro in pietra grezza può possedere le stesse qualità dell'opera quadrata purché esso sia costruito secondo le regole dell'arte. Cfr. Giuffrè 1990

mattoni, o voltine. Nel caso di un solaio in putrelle valgono analoghi accorgimenti e il ruolo giocato è il medesimo, fatta eccezione per i solai con voltine che offrono un contributo spingente ove eventualmente impostano le voltine delle prime campate.

Ai tetti è riservato il ruolo di chiudere la scatola muraria in sommità. Infine la buona fattura dei tetti è influenzata dagli stessi accorgimenti costruttivi descritti per i solai. L'orditura principale può essere costituita da travi inclinate (punteroni) la cui inflessione o scivolamento può generare delle sollecitazioni sulla cimasa muraria (tetto spingente)

Le connessioni tra i vari elementi strutturali (muri e orizzontamenti) sono un ulteriore elemento da osservare per la valutazione della qualità meccanica dell'edificio.

La condizione ideale di connessione tra i muri si verifica quando le pareti della maglia muraria sono costruite contemporaneamente. Bisogna tener conto della caratteristica intrinseca delle architetture storiche di essere il frutto di addizioni successive: gli edifici si affiancano l'uno all'altro sfruttando il muro di confine che in alcuni casi è dotato di "morse di attesa", ma in altri è chiuso da cantonali; lo stesso vale per gli edifici monumentali che possono essere il risultato di un lungo processo evolutivo. Per questa ragione lo studio analitico della storia costruttiva supporta l'individuazione di eventuali punti di discontinuità a volte denunciate da lesioni verticali altre volte non direttamente visibili.

Le connessioni tra la struttura di elevazione e gli orizzontamenti costituiscono i vincoli per le pareti riguardo il movimento verso l'interno e - in modo meno efficace - verso l'esterno.

I dispositivi di connessione più frequenti sono i tiranti metallici posti affianco o dentro i muri, e alle reni di archi e volte per contenerne la spinta; o i radiciamenti – costituiti da travi lignee ancorate al muro mediante un bolzone metallico ovvero connessi a mezzo legno in corrispondenza degli incroci – posti nello spessore murario che rappresentano dispositivi di connessione tipici delle architetture murarie delle zone del Centro Italia.

L'uso sistematico di questi dispositivi è particolarmente diffuso alle regioni soggette a rischio sismico e l'uso di presidi più efficaci è sovente associato ad azioni sismiche più severe. Le catene e i radiciamenti, infatti, possono essere affiancate dall'uso di speroni murari o pareti a scarpa, oppure non è raro che le teste delle travi siano ancorate alla parete esterna con fasce metalliche provviste di bolzoni. Anche le travi dei tetti presentano dettagli costruttivi analoghi a quelli dei solai e in particolare le capriate possono essere collegate alla parete muraria mediante un paletto ligneo.

Tutti questi dispositivi sono rivolti ad assicurare una chiusura efficace della "scatola muraria" e, in prospettiva sismica, rivestono un ruolo fondamentale nel contenimento del movimento verso l'esterno delle pareti perimetrali.

4.2.3 Comportamento strutturale, vulnerabilità e resistenze, macroelementi, meccanismi di danno.

La comprensione del comportamento strutturale è un nodo centrale nel processo di valutazione della sicurezza e nel successivo eventuale intervento di miglioramento²¹². Per comportamento strutturale possiamo intendere «il modo caratteristico di una costruzione di resistere, deformarsi ed eventualmente disastarsi fino al crollo a fronte delle sollecitazioni indotte dai propri carichi o da azioni esterne. Il comportamento attuale è perciò una manifestazione fondamentale dell'identità strutturale di una costruzione, ossia il modo con cui esso ha reagito e reagisce alle sollecitazioni cui è stato sottoposto e con cui, salvo mutamenti ed evoluzioni, continuerà a reagire anche in futuro»²¹³. Il comportamento strutturale dipende in primo luogo dalle caratteristiche intrinseche dell'edificio murario, dalla sua concezione strutturale di cui si è poc'anzi detto, ed è “prevedibile” fino a quando non intervengono manomissioni che interrompono la continuità con la concezione e l'identità strutturale originaria.

La caratteristica intrinseca della costruzione muraria di essere un assemblaggio di elementi vincolati in modo isostatico (ridotta distribuzione dei carichi) implica l'assenza di un comportamento d'insieme; il danneggiamento ricorrente avviene per *sconnessione* degli elementi e può interessare anche solo alcune porzioni dell'edificio (comportamento locale).

L'individuazione preventiva di tali sconnessioni è possibile attraverso lo studio diretto della fabbrica nel suo stato attuale e nella sua evoluzione storica, dei dettagli costruttivi, degli assemblaggi. La previsione del comportamento sismico passa attraverso la individuazione delle vulnerabilità presenti nella compagine strutturale che determinano la propensione al danneggiamento sismico di una o più porzioni della compagine strutturale.

Alcuni fattori di vulnerabilità possono dipendere dalle caratteristiche intrinseche degli edifici murari, dalle modalità di prima edificazione dell'impianto architettonico, dalla posizione nel tessuto costruito e dalla tecnica costruttiva utilizzata; esse sono dette “vulnerabilità intrinseche”. Sono vulnerabilità intrinseche ad esempio: l'eccessiva distanza tra le pareti della maglia muraria ovvero l'eccessiva altezza di interpiano, entrambe implicano una luce libera (assenza di vincoli) della parete molto ampia e quindi una maggiore vulnerabilità a movimenti fuori piano.

La condizione di degrado degli edifici e le manomissioni antropiche possono determinare delle vulnerabilità aggiuntive che definiamo “vulnerabilità indotte”. Sono esempi di vulnerabilità indotte: la trasformazione di aperture per sottrazione di parete resistente e, analogamente, la demolizione di pareti portanti.

²¹² Carocci C., Tocci C., Cattari S., Lagomarsino S., “Linee guida per gli interventi di miglioramento sismico degli edifici in aggregato nei centri storici”, Report Finale RELUIS, 2009.

²¹³ Doglioni 2009

Il comportamento sismico è influenzato positivamente dalla buona qualità costruttiva dell'edificio che dipende dai fattori di cui si è detto (maglia muraria compatta, muri dotati di monoliticità e orizzontalità, connessioni efficaci tra gli elementi), che costituiscono le risorse residue del fabbricato.

La lettura complessiva dei fattori che determinano vulnerabilità e delle risorse dell'edificio consente di individuare le situazioni di criticità potenziali (o manifeste nel caso di edifici danneggiati dal sisma) e i meccanismi di collasso che possono essere ad esse associate.

È possibile utilizzare convenzionalmente la definizione di *macroelemento* per indicare una porzione significativa della costruzione nella quale è riconoscibile una modalità di danneggiamento specifica²¹⁴.

Per meccanismo di danno si intende il modello di rappresentazione cinematica con cui si interpreta e si descrive il comportamento sismico del macroelemento²¹⁵.

Le modalità di collasso di una parete sotto l'azione sismica sono distinte in due grandi classi: meccanismi di primo modo e meccanismi di secondo modo²¹⁶. Il primo modo di danno prevede il ribaltamento fuori dal piano della parete ed è dovuto alle azioni perpendicolari al piano della parete. Come già enunciato in precedenza, il collasso non dipende dalla resistenza del materiale di cui è composta la muratura ma esclusivamente da problemi di equilibrio, influenzati dalla configurazione strutturale della parete (presenza di catene, luce libera, orizzontamenti spingenti). I meccanismi di primo modo rappresentano la condizione di massima fragilità dell'edificio nei confronti dell'azione sismica e possono attivarsi esclusivamente in presenza di muri di buona qualità in grado di esibire un comportamento monolitico. La mancanza di tale requisito implica il collasso della parete per disgregazione.

Il secondo modo di danno prevede la rottura della parete nel proprio piano ed è dovuta ad azioni parallele al piano della parete. Questa modalità di danneggiamento chiama in causa la

²¹⁴ De Colle, Doglioni, Mazzorana, *La definizione e l'utilizzo del concetto di macroelemento*, in: *Le chiese e il terremoto*, *op.cit.*

²¹⁵ Il concetto di meccanismo, introdotto da Giuffrè (A. Giuffrè, 1993) è stato adottato dalla normativa con forme e modalità differenti a partire dalla OPCM 3431 del 2005 nell'allegato 11.C "Analisi dei meccanismi locali di collasso in edifici esistenti in muratura". Il metodo cinematico è ripreso dalle NTC08, §C8A, e la sua applicazione «presuppone l'analisi dei meccanismi locali ritenuti significativi per la costruzione, che possono essere ipotizzati sulla base della conoscenza del comportamento sismico di strutture analoghe già danneggiate dal terremoto o individuati considerando la presenza di eventuali stati fessurativi anche di natura non sismica»; inoltre «la verifica nei riguardi di questi meccanismi, secondo [l'analisi cinematica], assume significato se è garantita una certa monoliticità della parete muraria, tale da impedire collassi puntuali per disgregazione della muratura» (C8A.4, pag. 395). Le linee guida hanno adottato il concetto di macroelemento nell'accezione di «porzione strutturalmente autonoma della costruzione» in cui è possibile analizzare uno o più meccanismi. L'analisi cinematica è anche per le Linee Guida lo strumento più efficace e agevole per la valutazione della sicurezza (Linee Guida, pag. 68).

²¹⁶ Giuffrè 1993.

resistenza del materiale il cui superamento è evidenziato da lesioni diagonali “di taglio”. I meccanismi di secondo modo si verificano esclusivamente se il primo modo è debitamente contrastato, ad esempio, dalla presenza diffusa di catene e si innescano per un’azione sismica notevolmente superiore rispetto a quelle che genera il ribaltamento fuori dal piano.

4.3 Il caso studio di Palazzo Lanfranchi a Matera

4.3.1 Conoscenza

Palazzo Lanfranchi sorge su uno sperone tufaceo al confine tra la città del Piano – centro storico di Matera – e il Rione del Sasso Caveoso²¹⁷, al quale offre il fronte orientale (Figura 4.3).

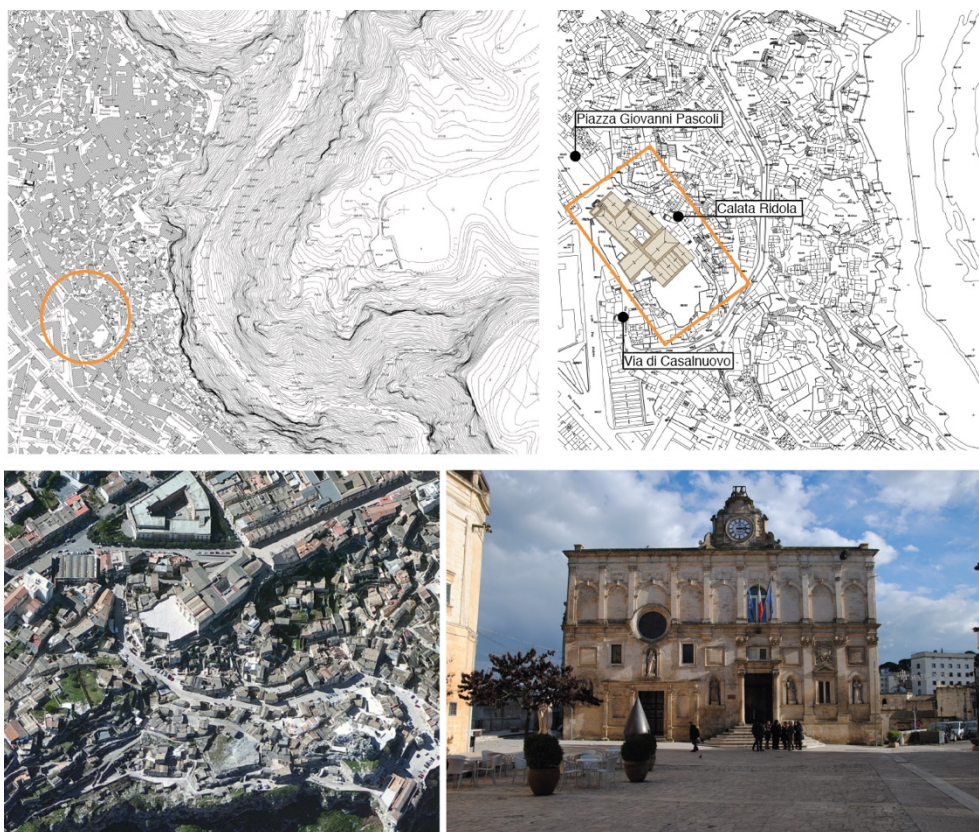


Figura 4.3 - planimetria generale del centro storico di Matera con individuazione dell'edificio. In basso, a sinistra veduta aerea del Sasso Caveoso con evidenziato il palazzo; a destra il fronte principale su piazza Giovanni Pascoli.

Il fabbricato è caratterizzato da un impianto a chiostro centrale a sviluppo longitudinale in direzione nord-sud, con il corpo della biblioteca che avanza sul lato ovest interrompendo la

²¹⁷ La città storica di Matera risalente al XVII secolo (città del Piano) sorge su un altipiano delimitato a est dalla fossa del torrente Gravina che definisce i due antichi rioni della città, il Sasso Barisano e il Sasso Caveoso. L. Rota, *Matera: storia di una città*, Giannatelli, Matera, 2011. P. Laurano, *Giardini di Pietra. I sassi di Matera e la civiltà mediterranea*, Bollati Boringhieri, Torino, 1993. A. Giuffrè, C.F. Carocci, *Codice di Pratica per la sicurezza e la conservazione dei Sassi di Matera*, Ed. La Baitta, Bari, 1997.

continuità del fronte. La consistenza è di due elevazioni fuori terra sul prospetto principale (lato nord su piazza Giovanni Pascoli) e tre sul prospetto sud. La presenza della chiesa del Carmine sul lato nord-est, rappresenta una peculiarità sia dell'impianto planimetrico sia del fronte principale del palazzo, il cui impaginato è caratterizzato dalla presenza del grande rosone sulla sinistra.



Figura 4.4 - Vista generale e foto di dettaglio del fronte ovest su via Casalnuovo



Figura 4.5 – Angolo sud-ovest, a destra fronte sud.



Figura 4.6 -Vista generale e foto di dettaglio del fronte est su via di via San Francesco. In basso a destra è inquadrato l'ingresso secondario al museo, sul fronte retrostante su piazzetta Belvedere.

L'edificio è isolato, tranne che per la presenza di piccole unità edilizie addossate al fronte est, su via di San Francesco (o Calata Ridola); sugli altri fronti sono presenti solo strade (via Casalnuovo a ovest) e spazi aperti - piazza Giovanni Pascoli a nord e il terrazzo a sud (Figura 4.3, Figura 4.4, Figura 4.5). Tuttavia, potrebbe considerarsi un aggregato strutturale per le sue grandi dimensioni (circa 2.700 mq) e per la presenza di un edificio specialistico inglobato nel suo impianto strutturale.

Il sito su cui sorge il palazzo è caratterizzato dalla presenza di cavità antropiche scavate nello sperone tufaceo che costituisce la base fondale dell'edificio. Tali strutture – alcune delle quali molto antiche – hanno determinato le soluzioni costruttive adottate per la elevazione della fabbrica a partire dal suo primo impianto (1672) e fino agli ultimi ampliamenti ottocenteschi, come le fondazioni discontinue collegate da archi di scarico che scavalcano le cavità preesistenti.

Il palazzo, oltre alla destinazione d'uso museale, è sede degli uffici della Soprintendenza ai Beni Storici Artistici ed Etnoantropologici della Basilicata (situati nell'ala nord del piano primo) della Biblioteca e la fototeca del Museo (nel volume settecentesco emergente a ovest) e infine la Fondazione Carlo Levi (posta sul lato est, oltre il chiostro).

Sismicità. Secondo la classificazione sismica introdotta dalla OPCM 3274/2003, il territorio di Matera rientra nella zona 3, con un valore di PGA (a_g) compresi tra 0,038 e 0,235 g, per un periodo di ritorno di riferimento T_R compreso tra 30 e 2.475 anni (Tabella 4.1)

Il Catalogo parametrico dei terremoti italiani,²¹⁸ riporta per Matera 49 eventi tra i quali si evidenziano terremoti di media intensità, che non superano il VII grado della scala macrosismica, verificatisi tra la fine del XVII secolo e la fine del XX secolo (Figura 4.7 e Tabella 1).

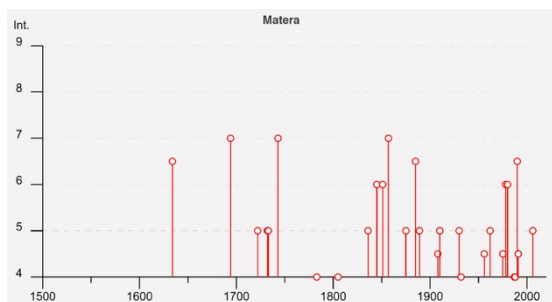


Figura 4.7 - Diagramma dei terremoti registrati nel territorio materano dal 1500. Il diagramma è tratto dal sito del CPTI15-DMI15.

TR [anni]	a_g [g]	F_0 [-]	T_C^* [s]
30	0,038	2,471	0,283
50	0,050	2,516	0,302
72	0,059	2,552	0,320
101	0,073	2,464	0,328
240	0,084	2,475	0,334
201	0,099	2,484	0,337
475	0,139	2,503	0,345
975	0,178	2,540	0,349
2475	0,235	2,592	0,355

Tabella 4.1 – Valori dei parametri per rispettivi tempi di ritorno di riferimento

Anno	Intensità (MCS)	Epicentro	N_p	I_0	M_w
1627	F	Capitanata	64	10	6,66
1634	6-7	Matera	1	6-7	4,86
1694	7	Irpinia-Basilicata	251	10	6,73
1722	5	Matera	1	5	4,16
1732	5	Irpinia	183	10-11	6,75
1733	5	Irpinia	4		
1743	7	Ionio settentrionale	84	9	6,68
1783	4	Calabria centrale	191	10-11	6,74
1805	4	Molise	220	10	6,68
1817	3-4	Potentino	7	4-5	3,97
1826	F	Potentino	18	8	5,74
1836	5	Calabria settentrionale	44	9	6,18
1845	6	Materano	6	5	4,51
1851	6	Vulture	103	10	6,52
1857	7	Basilicata	340	11	7,12
1875	5	Gargano	97	8	5,86
1885	6-7	Basilicata	7	6-7	5,09
1889	5	Gargano	122	7	5,47
1897	F	Ionio	132	6	5,46
1905	NF	Irpinia	122	7-8	5,18
1908	4-5	Materano	21	5	4,31

²¹⁸ La versione aggiornata del Catalogo parametrico dei terremoti italiani 2015 (CPTI15) è disponibile alla consultazione al sito <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>

Anno	Intensità (MCS)	Epicentro	Np	Io	Mw
1910	5	Irpinia-Basilicata	376	8	5,76
1910	5	Basilicata meridionale	36	5-6	4,62
1912	2-3	Tavoliere delle Puglie	49	5	4,55
1913	3	Calabria settentrionale	151	8	5,64
1930	5	Irpinia	547	10	6,67
1932	4	Bassa Murgia	28	5	4,54
1933	2-3	Irpinia	42	6	4,96
1956	4-5	Materano	45	6	4,72
1962	5	Irpinia	562	9	6,15
1967	F	Adriatico centrale	22		4,36
1973	3	Appennino campano-lucano	29	5-6	4,75
1975	4-5	Gargano	61	6	5,02
1978	6	Materano	121	6	4,75
1980	F	Alta Val d'Agri	26	5-6	4,83
1980	6	Irpinia-Basilicata	1394	10	6,81
1982	3	Golfo di Policastro	125	7-8	5,23
1984	NF	Umbria settentrionale	709	7	5,62
1987	4	Potentino	62	5	4,54
1988	4	Pollino	169	7	4,7
1988	3	Golfo di Taranto	272	6-7	4,86
1990	6-7	Potentino	1375		5,77
1991	4-5	Piana di Metaponto	26		4,13
1991	4-5	Potentino	597	7	5,08
1994	NF	Golfo di Taranto	26		4,03
1996	2-3	Irpinia	557	6	4,9
1998	3	Valle dell'Ofanto	45	5	4,31
2006	5	Gargano	384		4,64
2006	NF	Costa calabra settentrionale	161		4,7

Legenda

Np: Numero osservazioni macrosismiche **Mw:** Magnitudo
Io: Intensità epicentrale **F:** avvertito (*felt*)
NF: non avvertito (*not felt*)

Tabella 2 – Terremoti rilevati a Matera elencati nel Catalogo Parametrico dei Terremoti italiani del 2015

La ricerca storica

La ricerca storica è finalizzata a due obiettivi principali: la ricostruzione delle fasi evolutive e la comprensione del comportamento strutturale esibito nel tempo²¹⁹.

Entrambi gli obiettivi sono stati perseguiti eseguendo in primo luogo una disamina sistematica delle fonti selezionando le informazioni inerenti trasformazioni e interventi importanti (lettura indiretta)²²⁰. Lo scopo è estrapolare informazioni sugli interventi subiti nel tempo, che possono fornire le ragioni di peculiarità costruttive o di dissesti altrimenti difficilmente comprensibili, ma anche notizie relative a danni sismici dalle quali può ricavarsi la recidività della risposta del fabbricato.

In secondo luogo, tutte le informazioni raccolte sono messe in relazione al manufatto (lettura diretta).

Le principali fasi costruttive secondo le fonti documentarie (lettura indiretta). Palazzo Lanfranchi è edificato a partire dal 1668 quale sede del Seminario della diocesi di Matera, come prevedevano le disposizioni del Concilio di Trento²²¹. La costruzione si deve all'arcivescovo Vincenzo Lanfranchi, che attribuì incarico della progettazione al frate cappuccino Francesco da Copertino²²².

²¹⁹ Cfr. C.F. Carocci, S. Cocina, *Come l'analisi strutturale utilizza la ricerca storica*, in E. Boschi, E. Guidoboni (a cura di), Catania, terremoti e lave dal mondo antico alla fine del Novecento, Editrice Compositori, Bologna, 2001, pp. 277-289

²²⁰ L'analisi storica di Palazzo Lanfranchi è stata avviata a partire dalla disamina della bibliografia disponibile. Le fonti bibliografiche hanno veicolato le successive ricerche di archivio condotte presso l'Archivio di Stato di Matera (ASM), l'Archivio Storico Comunale (ASC) e l'Archivio Diocesano (AD). Dall'indagine presso la Fototeca del Museo è stata rinvenuta una raccolta di foto dell'edificio prima degli anni '80 e del cantiere di adeguamento impiantistico dell'anno 2001. Notizie importanti sono state rinvenute in V. Baldoni, *Palazzo Lanfranchi. Appunti sui rinvenimenti nel corso del restauro*, in cui Vincenzo Baldoni – architetto progettista e direttore dei lavori dell'ultimo restauro eseguito sul palazzo – riporta alcune informazioni sulla storia costruttiva dell'edificio desunte dall'osservazione diretta di tracce emerse durante il cantiere del restauro.

²²¹ Con il decreto *De Reformatione*, approvato nella XXIII sessione del Concilio di Trento del 15 luglio 1563, al capitolo 18 venne decretata l'istituzione dei Seminari diocesani, che dovevano essere strutture dedicate alla formazione dei candidati al presbiterato. Il testo del Decreto in lingua latina si trova in De Fraia, 1923, in Appendice. Vedi anche M. Bendiscioli, *La Riforma cattolica*, Studium, Roma, 1973 (pag. 91-99).

²²² De Fraia, 1923. Per informazioni sulla figura dell'architetto Francesco Da Copertino e alcuni suoi lavori si veda Guida A. F., Francesco da Copertino (1617-1692). Il frate cappuccino architetto del seminario di Matera, Edizione univ. Romane (Collana "Gli Argonauti"), 2010

Il sito scelto per l'edificazione – collocato in posizione marginale rispetto al centro urbano – non era privo di costruzioni: infatti, l'area era già sede di cripte rupestri con relativa necropoli medievale²²³.

A partire dall'anno 1608, sulla stessa area era stata costruita la Chiesa del Carmine con l'annesso piccolo convento per volontà e con il contributo economico del nobile Marcello di Noia²²⁴. Le fonti consultate descrivono una chiesa molto ampia e coperta da una volta a botte “lamiata” e un Convento con camere e i servizi per i frati carmelitani²²⁵. La vita del convento dura pochi decenni a causa di problemi economici, tanto che nel 1652 il convento è presente nell'elenco dei Conventi soppressi della *Bolla Instaurandae* di Innocenzo X.

Dal giorno di posa della prima pietra passano quattro anni per il compimento della costruzione del Seminario (De Fraia 1923). Probabilmente chiesa e convento sono inglobati nel nuovo progetto del Seminario (Festa 1875, Baldoni 1993). L'importanza dell'edificio nella città induce alla apertura di una nuova strada (via San Francesco) destinata a collegare direttamente il Sasso Caveoso con il Seminario (Rota 2011).

Nel 1776 L'arcivescovo Zunica esegue un ampliamento dell'edificio costruendo il corpo ad ovest, introducendo inoltre decorazioni in stile tardobarocco-neoclassico negli ambienti del Seminario e della Chiesa (altari laterale e altare maggiore con effigie di S. Maria degli Armeni). Per collegare l'edificio preesistente al nuovo corpo di fabbrica sono aperti dei vani nella parete originariamente esterna, ciò implica la demolizione di parte delle volte (lunette) che coprivano l'ambiente adiacente alla nuova fabbrica. Il contrafforte che sostiene il fronte sud dell'ampliamento, probabilmente è aggiunto in una fase successiva per sopraggiunti cedimenti (Baldoni 1993, p. 27).

Negli anni tra il 1798 e il 1801 il seminario è adibito a Caserma durante i moti che portano alla fondazione della Repubblica Partenopea.

Nei primi anni dell'Ottocento, sotto il vescovado di monsignor Di Macco (1822-1853), il seminario riacquista lentamente un numero corposo di allievi, per cui è realizzato un ampliamento verso sud prolungando le lunghe sale voltate a botte sia al piano terreno sia al piano nobile. Il computo dei lavori (annotazione di costi e misure) è di 3.587 ducati (De Fraia 1923, p. 72).

²²³ Durante i lavori di restauro del palazzo (anni '80 del secolo XX) sono state identificate tracce di un cimitero barbarico (VI-VII sec.), al di sotto del quale vennero poi scavate quattro chiese rupestri, tra le quali S. Maria degli Armeni (e il complesso monastico dei Benedettini ad essa adiacente) e San Niccolò La Cupa.

²²⁴ 16 luglio 1608, posa della prima pietra della Chiesa del Carmine. Cfr. Nelli s.d., Gattini 1916, De Fraia Luigi, *Il Convitto Nazionale di Matera*, Matera, Tipografia Conti, 1923.

²²⁵ Cfr. Nelli N.D., *Descrizione della città di Matera fino al 1751*, trascrizione ad opera della Dott.ssa Padula, della Soprintendenza i Beni Storici Artistici ed Etnoantropologici della Basilicata.

Dalla veduta di Matera del 1707 (affresco conservato nel Palazzo Arcivescovile) appare evidente che in quel periodo il fronte principale aveva un'altra configurazione (Baldoni 1993, p. 17).

Nel 1853, una parte dell'ala sud dell'edificio è sopraelevata di un livello; contestualmente è realizzata la cappella all'interno del seminario.

Successivamente all'Unità di Italia, il seminario rimane quasi deserto in parte perché i seminaristi sono direttamente coinvolti nei moti rivoluzionari, in parte dell'opposizione politica dell'Arcivescovo Rossini alla monarchia di Vittorio Emanuele II (De Fraia 1923, p.77). L'edificio rimane utilizzato per altri 3 anni come scuola media statale e seminario, fino all'esproprio avvenuto nel 1864, a seguito del quale il palazzo viene adibito a Liceo-ginnasio "Emanuele Duni" e Convitto. Tra il 1882 e il 1904, a seguito delle proteste da parte del Comune per l'eccessivo onere del mantenimento, si prosegue alla nazionalizzazione degli istituti che diventano Regio Liceo-Ginnasio e Convitto Nazionale, e il loro mantenimento passa interamente a carico dello Stato (De Fraia 1923, p. 92-100). La nuova destinazione d'uso del palazzo implica diversi lavori di adeguamento funzionale come la suddivisione di aule e dormitori mediante la realizzazione di nuove tramezzature, e la chiusura di alcuni fornicci del chiostro per la definizione di un nuovo corridoio. Questa configurazione dell'edificio è in parte leggibile negli schemi planimetrici presenti in De Fraia 1923 (Figura 4.8).

Lo stesso autore nel 1923 denuncia uno stato di precarietà delle condizioni igienico-sanitarie dell'edificio, oltre che una generale critica alla funzionalità degli spazi giudicati insufficienti per ospitare le due funzioni di Liceo-ginnasio e Convitto. È dunque probabile che siano stati eseguiti lavori di ammodernamento tra il 1923 e il 1950. Appartengono a questo periodo: la costruzione del volume a sud-est del secondo piano, che negli schemi di De Fraia è rappresentata come un terrazzo; la costruzione di un volume di distribuzione sui camminamenti in copertura al piano secondo, e la tamponatura del fornicci sul chiostro, la costruzione di un volume in c.a. di collegamento tra piano terra e primo piano, addossato sul lato est (Baldoni 1993, p. 22-24).

Intorno agli anni '50 sono realizzati consolidamenti fondali mediante l'inserimento di alcuni muri di sostegno visibili in alcune grotte sottostanti il palazzo. Altri interventi minori (rifacimento del manto di copertura e alcune opere di finitura) hanno interessato l'edificio subito dopo la Seconda Guerra Mondiale, periodo in cui il palazzo è stato usato come caserma (Archivio di Stato di Matera, Versamento del Genio Civile, 1868-1973).

Dopo il disastroso terremoto dell'Irpinia (cui si devono molte vittime e danni ai beni storico-artistici anche in Basilicata), nella fase di immediata emergenza post-sismica Palazzo Lanfranchi diventa il luogo ove le opere provenienti dai siti danneggiati (Atella, Balvano, Castelgrande, Muro Lucano, Pescopagano) sono messe in salvo grazie alla azione immediata delle Soprintendenze. In questo contesto, la Chiesa del Carmine diventa il grande ricovero per gli oggetti messi in salvo – provenienti soprattutto dalle chiese della regione.

In questa epoca il Comune ha già previsto una nuova destinazione d'uso per una parte del palazzo ovvero quella di Istituto Museografico; al primo piano del palazzo sono già collocati gli uffici della Soprintendenza. L'incarico per il restauro è affidato all'arch. Vincenzo Baldoni nel 1976²²⁶. Baldoni realizza un rilievo dello stato di fatto che ci informa sulla configurazione dell'edificio nel 1980 (Figura 4.9), in cui si notano le aggiunte realizzate nell'epoca del Liceo-ginnasio e Convitto, come il volume di collegamento al piano secondo.

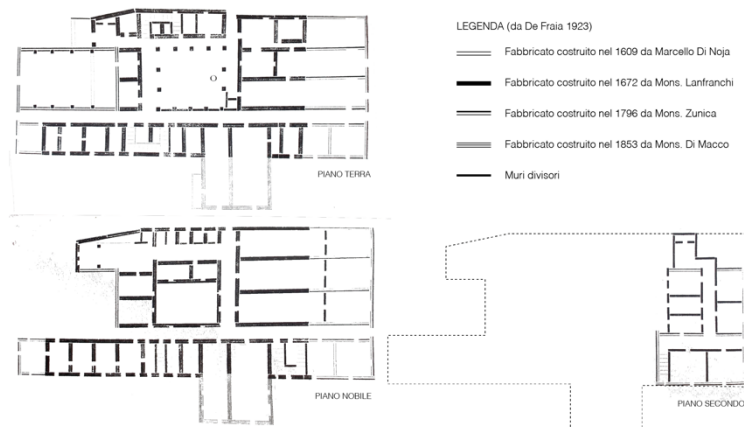


Figura 4.8 - Schemi planimetrici elaborati da De Fraia; nello schema del secondo piano è inserito il contorno dell'edificio per evidenziare la consistenza della sopraelevazione nel 1923. Si nota che l'angolo sud ovest non è costruito ed è occupato da un terrazzo.

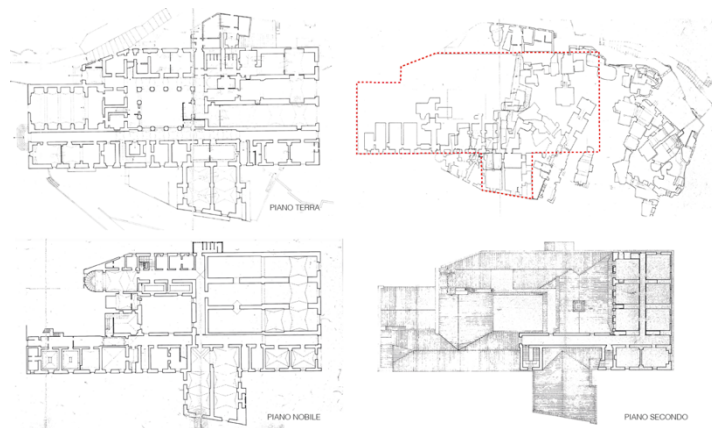


Figura 4.9 - arch. Vincenzo Baldoni, rilievo dello stato di fatto di Palazzo Lanfranchi, 1980 (conservato presso l'ASC). In alto a destra è riportato il rilievo delle cavità antropiche eseguito nell'ambito del progetto di restauro.

²²⁶ Archivio Storico Comunale, Relazione al progetto di “Ristrutturazione e restauro palazzo ex Seminario da adibirsi ad Istituto museografico e teatro all'aperto”, progettista: arch. Vincenzo Baldoni, arch. Livia Bertelli, 10 luglio 1980.

Il progetto di restauro prevede i seguenti lavori: demolizione delle superfetazioni in muratura e in cemento armato, di tutti i tramezzi e delle tamponature del chiostro; modifiche all'impaginato del prospetto sud con la creazione di una nuova finestra a ovest uguale alle preesistenti; sostituzione di gran parte delle coperture lignee con capriate metalliche fissate a cordoli di cemento armato poggiati sulle cimase murarie; consolidamenti delle fondazioni con micropali dell'angolo sud-est²²⁷. Nei primi anni '90, i lavori sono in gran parte conclusi come si evince dalle immagini pubblicate in Baldoni 1993.

Con la successiva conversione a Museo Nazionale sono effettuati lavori di inserimento di impianti e allestimento sale espositiva, in parte individuabili dalla lettura di alcuni elaborati del progetto esecutivo di adeguamento impiantistico curato dalla Soprintendenza BBAASS della Basilicata, reperibili presso il museo.

I lavori prevedono la sostituzione della pavimentazione al piano terra; si effettuano tracce nel pavimento ai piedi delle pareti per il passaggio delle canalizzazioni sopra il rinfiacco delle volte; sono impiantate diverse UTA ai vari livelli del museo e in copertura.

Nel 2003 è inaugurato il Museo dell'Arte Medievale e Moderna della Basilicata.

Il riscontro delle fonti sull'edificio (lettura diretta). L'impianto e la consistenza originari della chiesa sono individuabili con discreta certezza (Figura 4.10). Più complessa è la individuazione della consistenza del convento, che si ipotizza di due livelli per la presenza di tracce di volte affrescate al piano nobile del palazzo. È stato accertato l'accostamento alla Chiesa del corpo est che contiene l'ingresso alla fondazione Levi. Tale accostamento è visibile sia all'esterno (Figura 4.10, foto 1 in alto a sinistra), sia all'interno in una porzione di parete lasciata a vista da un saggio di intonaco (Figura 4.10, foto 1 - in alto a destra): si notano due blocchi di tufo le cui superfici hanno colore differente, probabilmente perché quello di sinistra (più scuro) appartiene a un muro originariamente esterno.

La consistenza dell'edificio all'anno 1676 (fine della costruzione) è stata in gran parte accertata da tracce evidenti sul fabbricato (Figura 4.11). Sulle "lamie" al piano terra si notano degli ammorsamenti un po' allentati in corrispondenza dell'ampliamento ottocentesco a Sud e l'accostamento tra il corpo del convento e quello dell'ampliamento lanfranchiano.

Le tracce che attestano il primo ampliamento a ovest del 1776 sono molteplici (Figura 4.12). In primo luogo lo sfalsamento dei filari tra il corpo lanfranchiano e quello aggiunto; altra anomalia è l'assenza di allineamento planimetrico tra i muri dell'ampliamento con quelli dell'impianto preesistente (Figura 4.12, Foto 1), dovuta alla scelta, forse obbligata, di costruire

²²⁷ Il progetto – in parte messo a disposizione già dal Ministero – è stato rinvenuto presso l'Archivio Storico Comunale, ma non sono stati trovati i vari stati di avanzamento per cui è difficile stabilire in modo preciso l'andamento dei lavori.

su dei corpi di fabbrica preesistenti. In secondo luogo, il taglio di alcuni peducci della volta che copre la sala di ingresso alla biblioteca attesta l'inserimento di un vano porta di maggiori dimensioni rispetto alla originaria finestra (Figura 4.12, foto 4).

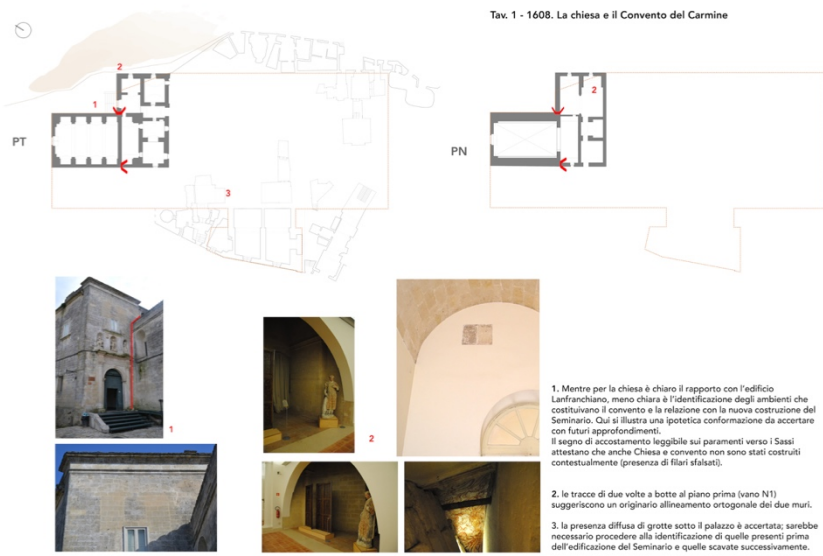


Figura 4.10 - Primo impianto del palazzo: la chiesa e il convento del Carmine.

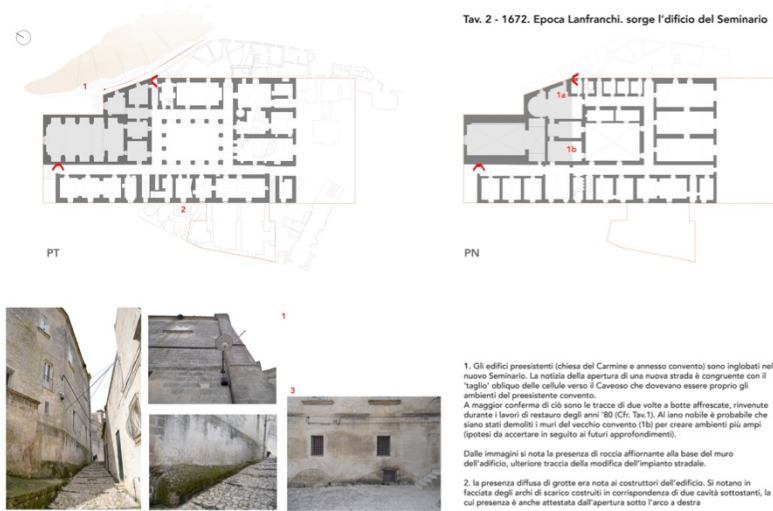
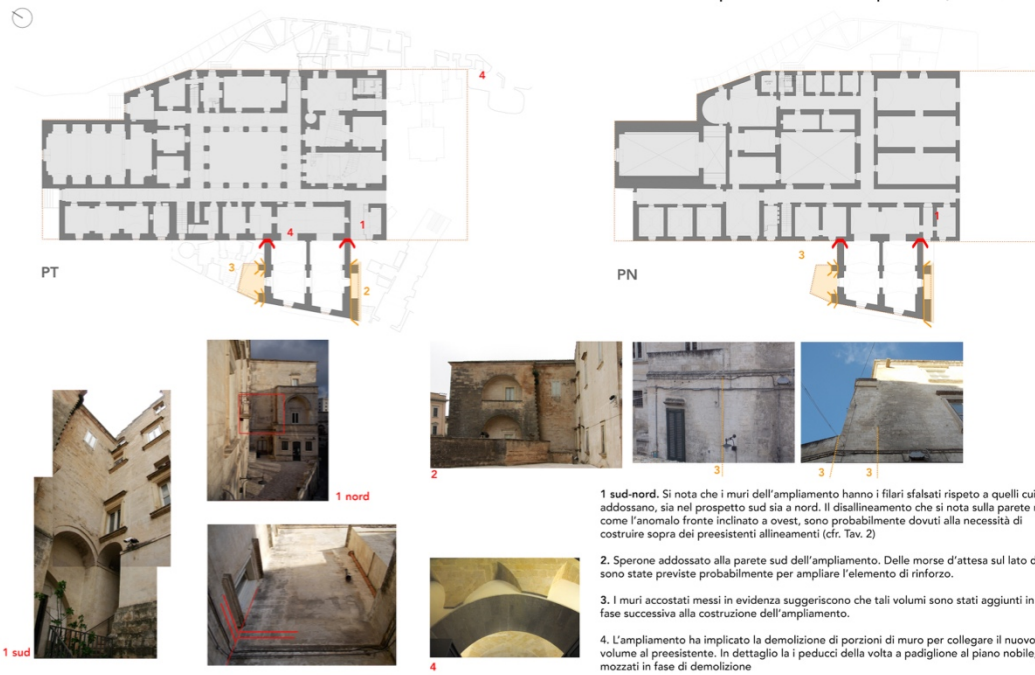


Figura 4.11 - Costruzione dell'edificio del Seminario (1672).

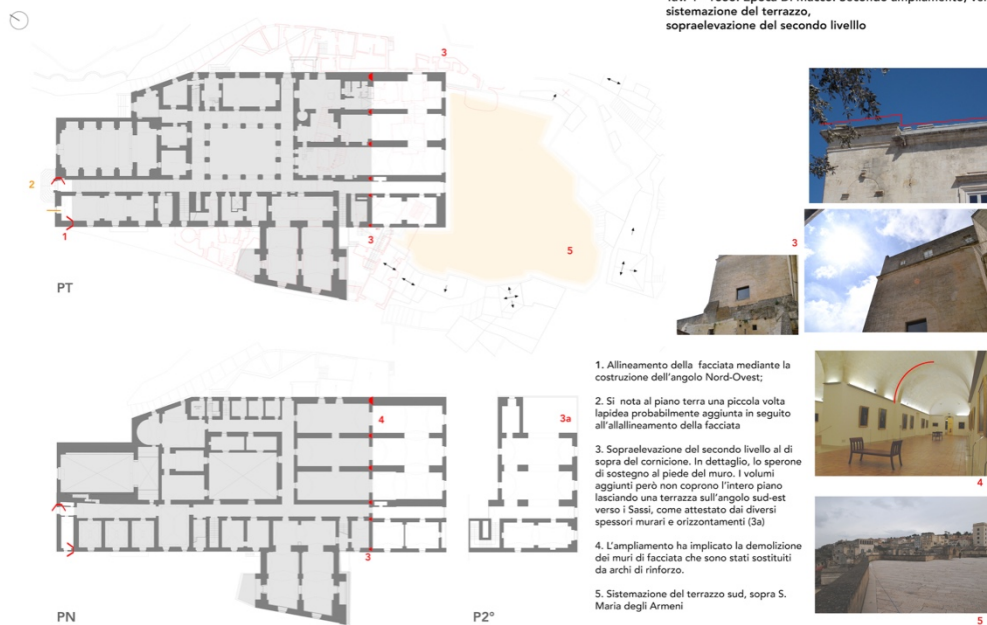
Tav. 3 - 1776. Epoca Zunica. Primo ampliamento, verso Ovest



- 1 sud-nord. Si nota che i muri dell'ampliamento hanno i filari sfalsati rispetto a quelli cui si addossano, sia nel prospetto sud sia a nord. Il disallineamento che si nota sulla parete nord, come l'anomalo fronte inclinato a ovest, sono probabilmente dovuti alla necessità di costruire sopra dei preesistenti allineamenti (cfr. Tav. 2)
2. Sperone addossato alla parete sud dell'ampliamento. Delle morse d'attesa sul lato destro sono state previste probabilmente per ampliare l'elemento di rinforzo.
3. I muri accostati messi in evidenza suggeriscono che tali volumi sono stati aggiunti in una fase successiva alla costruzione dell'ampliamento.
4. L'ampliamento ha implicato la demolizione di porzioni di muro per collegare il nuovo volume al preesistente. In dettaglio la i peducci della volta a padiglione al piano nobile, mozzati in fase di demolizione

Figura 4.12 – Primo ampliamento verso ovest (1776).

Tav. 4 - 1853. Epoca Di Macco. Secondo ampliamento, verso sud; sistemazione del terrazzo, sopraelevazione del secondo livello



1. Allineamento della facciata mediante la costruzione dell'angolo Nord-Ovest;
2. Si nota al piano terra una piccola volta lapidea probabilmente aggiunta in seguito all'allineamento della facciata
3. Sopraelevazione del secondo livello al di sopra del cornicione. In dettaglio, lo sperone di sostegno al piede del muro. I volumi aggiunti però non coprono l'intero piano lasciando una terrazza sull'angolo sud-est verso i Sassi, come attestato dai diversi spessori murari e orizzontamenti (3a)
4. L'ampliamento ha implicato la demolizione dei muri di facciata che sono stati sostituiti da archi di rinforzo.
5. Sistemazione del terrazzo sud, sopra S. Maria degli Armeni

Figura 4.13 – Ampliamento del 1853.

Nell'ambito del medesimo volume sono evidenti le tracce di alcuni elementi realizzati dopo il 1776 (Figura 4.12, foto 3): l'aggiunta di un contrafforte a sud (sfalsamento filari); l'accostamento sulla parete nord del contrafforte che sostiene contestualmente un balcone al piano nobile. La costruzione di presidi di rinforzo è associabile ad eventi direttamente collegabili al comportamento strutturale del nuovo corpo di fabbrica, probabilmente soggetto a cedimenti o assestamenti dovuti al riutilizzo di strutture preesistenti o alla presenza di cavità antropiche.

Anche l'ampliamento eseguito nel 1853 è attestato da varie tracce ancora oggi leggibili sul manufatto (Figura 4.13). All'esterno, sul lato ovest, si nota l'accostamento di tessiture murarie costituite da blocchi di diversa pezzatura; mentre nelle lamie delle sale espositive si notano filari sfalsati tra le due campate nord e sud, divise da un arco in muratura costruito in sostituzione delle pareti perimetrali lanfranchiane, demolite in occasione dell'ampliamento (Figura 4.13, foto 4). Meno evidenti sono le tracce sul lato est del palazzo, dove non si notano tessiture marcatamente differenti.

Secondo alcune fonti (De Fraia 1923) a questa fase appartiene anche la riconfigurazione del fronte principale allineando alla facciata della chiesa la facciata del seminario mediante la costruzione della porzione angolare a nord-ovest. Vi sono evidenze di questo accostamento sia nel fronte principale, sia nel prospetto ovest; tuttavia non è possibile distinguere con assoluta certezza l'impaginato originario dalle modifiche ottocentesche.

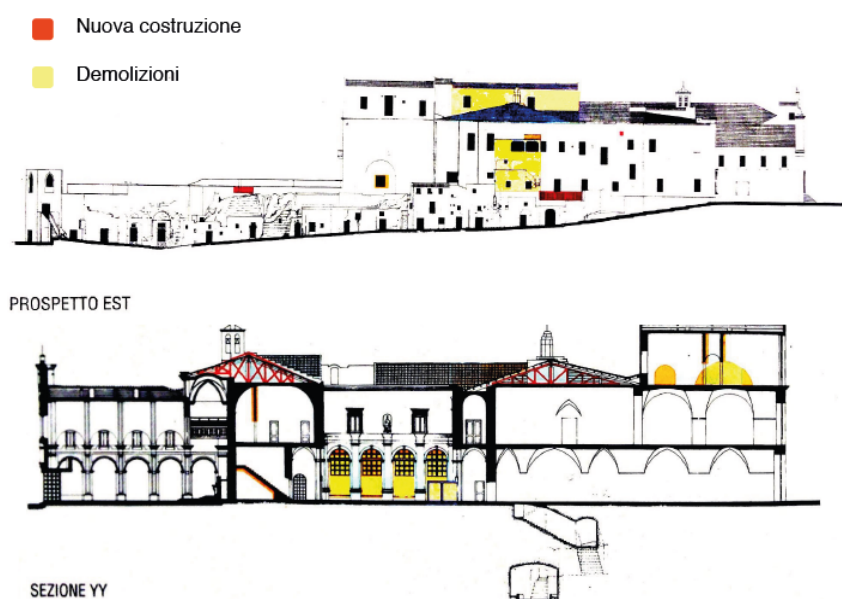


Figura 4.14 - Progetto di restauro di Palazzo Lanfranchi, 1980, architetto Vincenzo Baldoni, prospetto e sezione (v. Baldoni 1993, *op.cit.*)

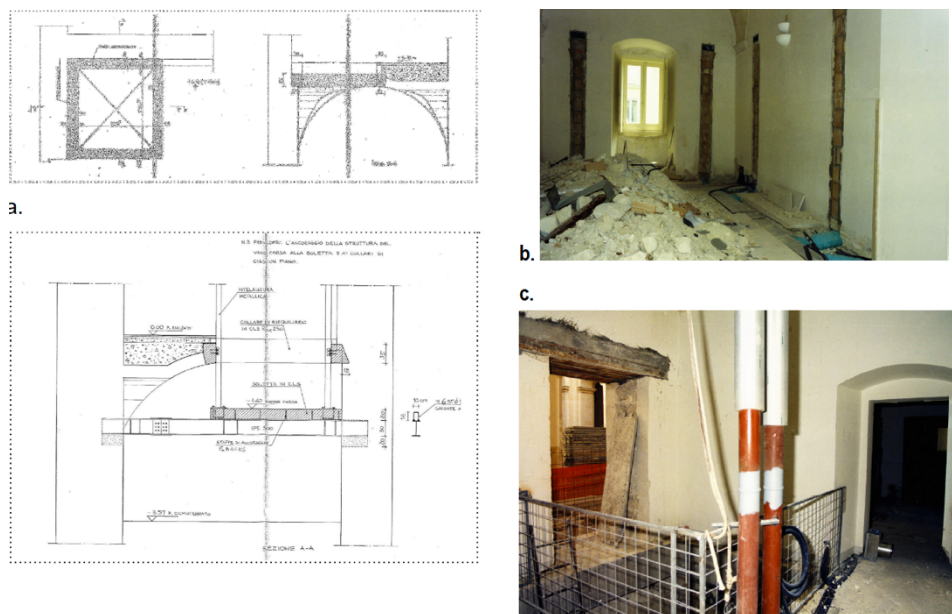


Figura 4.15 - Progetto di adeguamento impiantistico, foto di cantiere (Fototeca del Museo dell'Arte Medievale e Moderna della Basilicata in Palazzo Lanfranchi).

L'ultima fase costruttiva significativa per il palazzo si realizza con il progetto di restauro dell'arch. Baldoni (Figura 4.14). Le tracce di queste trasformazioni non sarebbero chiaramente leggibili senza il supporto dei grafici di progetto. In Figura 4.14 sono illustrati alcuni interventi previsti per adibire il palazzo alla destinazione d'uso museale. Si notano, in giallo, le demolizioni di una superfetazione in c.a. sul prospetto est, della superfetazione in copertura e delle tamponature dei fornicelli nel chiostro – costruiti nel periodo in cui nel palazzo coesistevano il Liceo-ginnasio e il Convitto Nazionale. Al piano secondo, Baldoni definisce le tre arcate, demolendo dei setti murari che definivano le aule. Altri interventi riguardano il consolidamento del corpo Sud con trefoli in acciaio e delle murature mediante scuci-cuci (intervento difficile da individuare con certezza), la sostituzione di gran parte delle orditure lignee con capriate metalliche fissate a cordolo di cemento armato (Figura 4.14, Sezione YY).

Infine, gli ultimi lavori di adeguamento impiantistico (anno 2001-2002) sono documentabili dalle foto di cantiere e un elaborato planimetrico (Figura 4.15). I lavori in questione consistono nella esecuzione dell'impianto di climatizzazione in tutte le sale del palazzo, secondo diverse soluzioni (fan coil, UTA, ...) e l'inserimento di un vano ascensore. Questi interventi hanno comportato alcune trasformazioni, quali la demolizione parziale delle volte a stella in corrispondenza del corpo ascensore (Figura 4.15a), l'apertura di alcuni vani nei muri per il passaggio delle canalizzazioni, la costruzione di una pedana metallica nel sottotetto (Figura 4.15 b, c).

Rilievo dello stato di fatto

Geometria e quadro fessurativo. Una fase preliminare del lavoro è stata finalizzata alla analisi dei rilievi di base facenti parte del materiale documentario a nostra disposizione. Questo controllo ha permesso di pianificare le operazioni di rilievo diretto e concentrarle in prima istanza sulle porzioni dell'edificio oggetto dell'ultimo intervento di restauro (Figura 4.16).

Mediante il rilievo diretto sono stati definiti la geometria strutturale e lo stato di conservazione degli elementi strutturali, eseguendo il controllo sistematico del rilievo di base con strumentazione tradizionale, con particolare riguardo agli spessori murari, alle luci e frecce delle volte. Il prodotto di questo controllo sistematico sono planimetrie e alzati in scala 1:100.



Figura 4.16 - Studio preliminare rilievi. La sovrapposizione delle planimetrie attuali e quelle del progetto di restauro degli anni '80 mette in evidenza alcune trasformazioni (demolizioni di muri, nuovi varchi, ecc.) attuate nel palazzo per la nuova destinazione d'uso museale.

La maglia muraria ha un passo non sempre costante: è caratterizzata da cellule di dimensioni comprese tra i 5 m e i 6 m sul fronte occidentale e sul fronte orientale in corrispondenza del chiostro a tutti i livelli; a sud il passo murario nella direzione trasversale (direzione Y) è costante, mentre nella direzione longitudinale (direzione X) le luci crescono fino a 20 m in corrispondenza dalle *lamie* (sale voltate a botte con direttrice parallela alla direzione della lunghezza maggiore); a nord si nota l'impianto ad aula unica della chiesa del Carmine, che costituisce uno degli ambienti più ampi.

Tra il piano terreno e il piano nobile è presente una anomalia in corrispondenza del fronte est: si nota la costruzione di piccole cellule murarie attestate su un muro parallelo al fronte e impostato in falso sulla volta sottostante.

Contestualmente al controllo della configurazione geometrica sono state rilevate le lesioni, precisandone la collocazione (a pavimento, a soffitto, sul muro) e l'entità (lieve, passante).

Il quadro fessurativo presente a palazzo Lanfranchi è comunque limitato a poche evidenze in prossimità degli accostamenti delle volte a botte sulle pareti perimetrali e nelle zone di accostamento di fasi costruttive diverse.

Una congrua interpretazione del quadro fessurativo e della configurazione d'assieme è stata eseguita con il supporto delle acquisizioni raccolte con le successive indagini – rilievo costruttivo e la ricerca storica – che permesso di confermare, confutare o chiarire quanto ipotizzato in via preliminare.

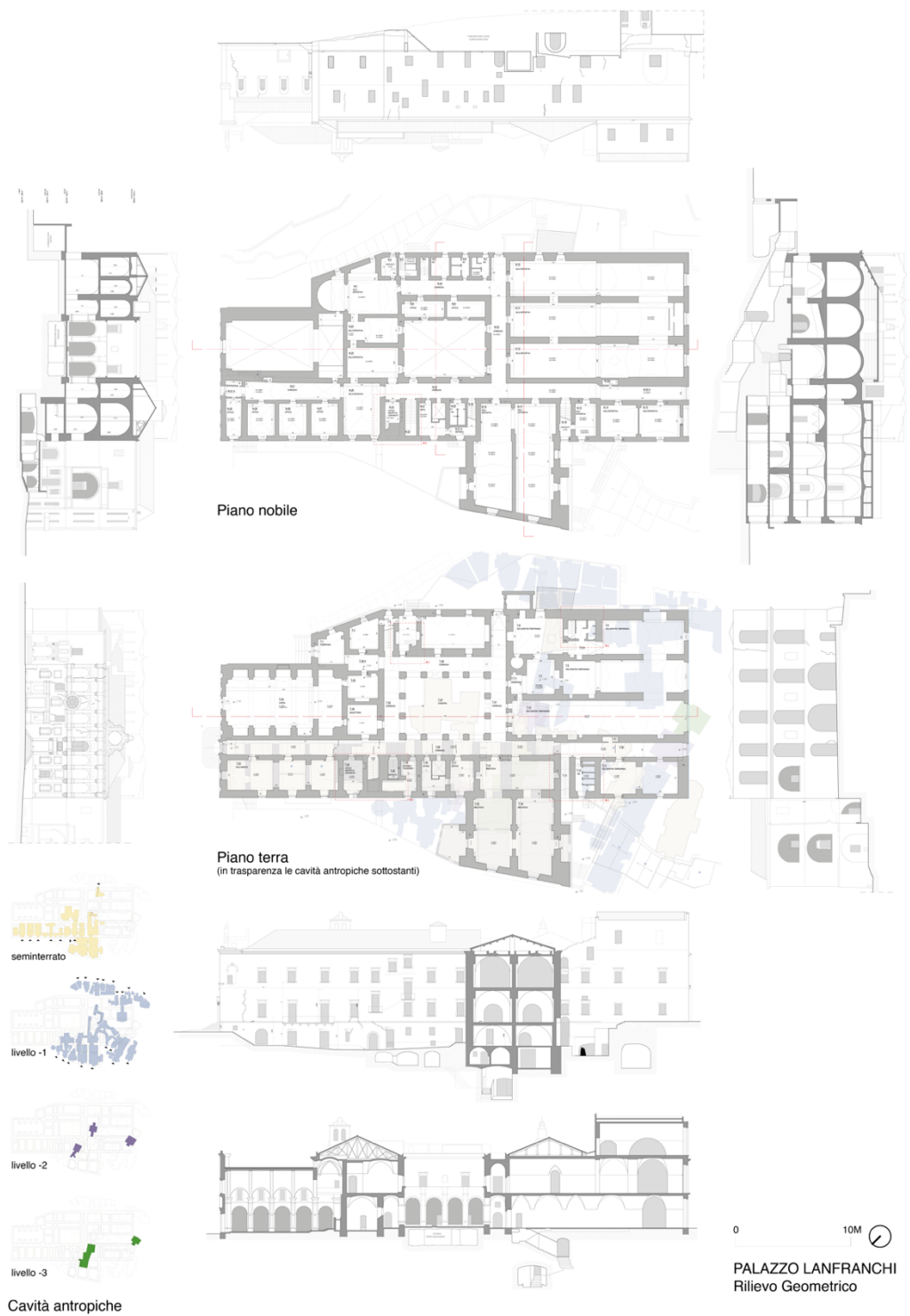


Figura 4.17 - Rilievo geometrico: piante, prospetti, sezioni, cavità antropiche.

Rilievo materico-costruttivo. La disamina delle peculiarità costruttive di palazzo Lanfranchi è avviata a partire dallo studio della tecnica muraria materana sul principale riferimento bibliografico: il Codice di pratica.²²⁸ L'analisi degli elementi strutturali è inoltre agevolata dalla assenza di intonaco nelle facciate e all'intradosso delle volte, la cui fattura può essere osservata direttamente.

Il materiale prevalente nella costruzione di palazzo Lanfranchi è la calcarenite, detta anche “tufo di Matera”, la cui facile lavorabilità ha consentito alle maestranze l'uso di blocchi perfettamente squadrati, sbazzati in cava e lavorati a piè d'opera (con dimensioni ricorrenti di 22x27x60 cm).

Il materiale e la tecnica costruttiva della struttura di elevazione definisce anche gli orizzontamenti voltati che indipendentemente dalla geometria (a padiglione e a botte, “a stella” tipiche dell'architettura storica materana) sono caratterizzate da una tessitura in blocchi squadrati interamente a vista. Sono esigui i casi di orizzontamenti piani, osservabili esclusivamente in un vano al piano terra e in un ambiente al piano secondo.

L'analisi delle caratteristiche costruttive è stata dedicata principalmente al rilievo delle tessiture murarie e alla identificazione delle peculiarità dell'assemblaggio costruttivo. In particolare, sono stati rilevati 12 pannelli murari rappresentativi delle diverse fasi costruttive del palazzo. Di ogni muro è stata analizzata la tessitura a vista (paramento esterno) e incrociando il rilievo diretto con le informazioni contenute nel Codice di pratica è stato possibile ipotizzare degli schemi costruttivi delle sezioni trasversali delle murature, distinti in relazione allo spessore, che hanno permesso di avanzare un giudizio sulle qualità meccaniche dei muri.

La sistematica presenza dei diatoni - leggibile sulla faccia a vista - garantisce la connessione tra i due paramenti (interno ed esterno) del muro, favorendo il comportamento monolitico. Gli elementi disposti ‘di punta’ (P), in prospetto sono alternati a blocchi disposti ‘di fascia’ (F); in sezione si ipotizza la presenza di un vuoto tra gli elementi ‘fascia’, funzionale al raggiungimento dello spessore desiderato (Figura 4.18). Questi vuoti non sono mai consecutivi e sono riempiti con terra pressata o scaglie di tufo²²⁹.

²²⁸ A. GIUFFRÈ - C.F. CAROCCI, *Codice di pratica per la sicurezza dei Sassi di Matera*, Edizioni La Bauta, Matera, 1997.

²²⁹ Cfr. GIUFFRÈ - CAROCCI, *Codice di pratica... op.cit.* pag. 86-90

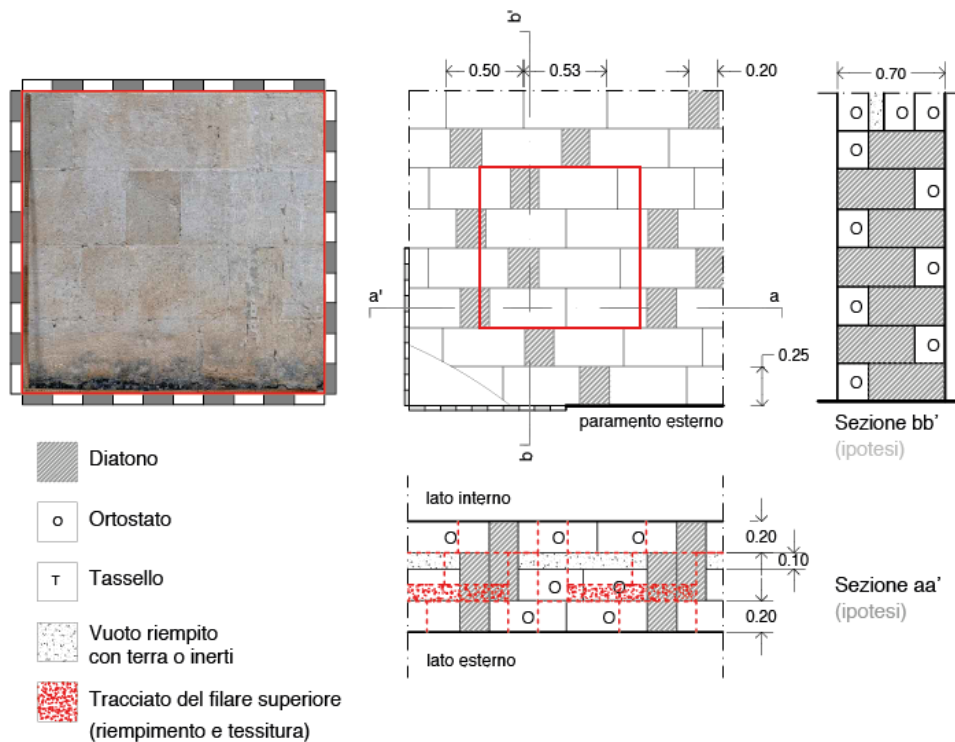


Figura 4.18 - Analisi delle tessiture murarie di Palazzo Lanfranchi. Elaborazione grafica del prospetto a vista, ipotesi della tessitura interna (pianta e sezione)

Gli spessori variano seconda del carico agente sul muro e proveniente soprattutto dagli orizzontamenti voltati. La dimensione più diffusa è quella compresa tra 70 e 80 cm (tre teste), anche al piano terra in presenza di grandi volte lapidee, la cui disposizione a contrasto consente di evitare l'uso di spessori maggiori. Di contro, dimensioni che superano il metro si osservano in alcuni muri di facciata. È il caso dell'ambiente posto al piano terra nell'angolo sud-ovest coperto da una volta a botte impostata sul muro perimetrale che assume spessore di 120 cm per contenere la spinta della volta.

Riguardo le aperture ricavate nei muri, nel palazzo si osservano soluzioni architettoniche differenziate, in relazione alla attenzione formale del prospetto.

In linea generale, però tutte le bucatore sono caratterizzate da medesimi sistemi costruttivi. Gli architravi esterni sono spesso realizzati con un concio unico o con tre conci disposti a piattabanda e in corrispondenza dell'apertura all'interno il muro dispone un arco spesso ribassato. I conci sovrastanti gli architravi sono disposti in modo tale da non far confluire un carico eccessivo in mezzera, scaricandolo sugli stipiti laterali. Questo sistema appare analogo al 'sordino' ottocentesco ed è realizzato con modalità differenti a seconda dell'epoca costruttiva.

Per quanto concerne gli orizzontamenti, la volta a botte più imponente è quella che copre l'aula della Chiesa, impostata su possenti muri in cui sono ricavate le cappelle laterali. La stessa

volta è coperta da un manto di tegole che seguono la curvatura a botte e poggiano – probabilmente – su materiale di riempimento costituito da terra e piccole pietre o malta povera di calce che realizza uno strato coibente²³⁰.

L'analisi sulle caratteristiche costruttive, prosegue con la formulazione delle ipotesi sulla fattura degli assemblaggi (rapporti reciproci tra gli elementi costruttivi dell'organismo murario), che sono stati ipotizzati mediante un confronto tra gli elementi visibili nel palazzo e il Codice di pratica.

L'analisi è stata approfondita per alcune porzioni dell'edificio selezionate tra quelle contenenti situazioni rappresentative della capacità tecnica dei mastri materani o che evidenziavano nodi costruttivi che presentano criticità a livello di configurazione geometrica (Figura 4.19).

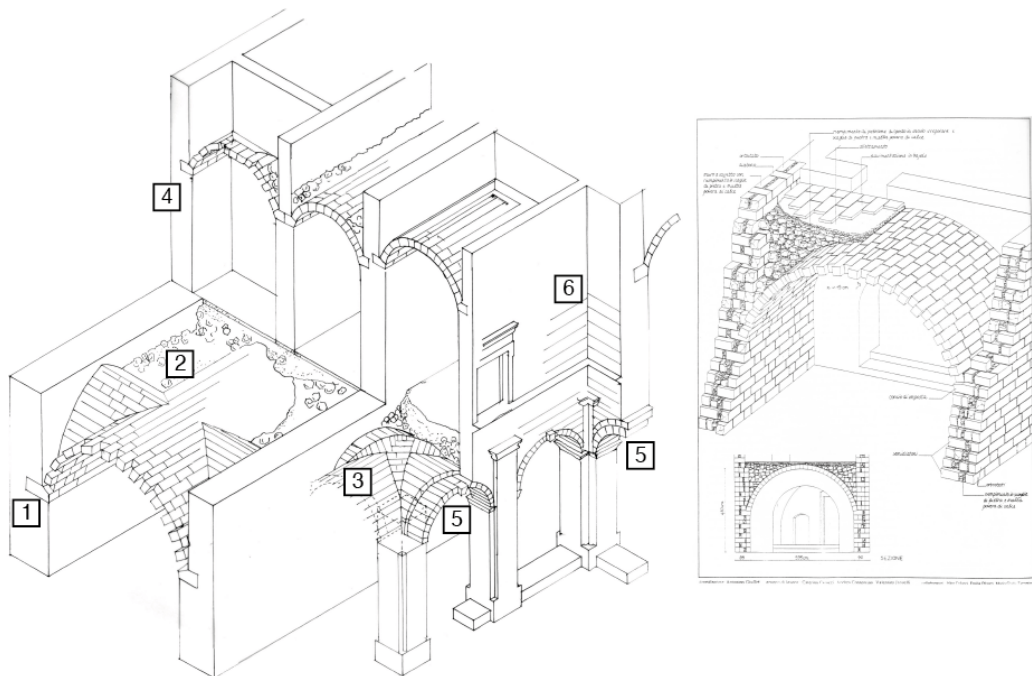


Figura 4.19 - Analisi degli assemblaggi costruttivi, esemplificazione realizzata per Palazzo Lanfranchi. 1. Volta a botte in conci di calcarenite, si nota il concio di imposta sagomato secondo la curvatura dell'arco; 2. Riempimento in scaglie di pietra e terra; 3. Volta a stella; 4. Volta a padiglione; 5. Arco a una testa (a sinistra) con sovrastante muro di 40 cm e arco a due teste (a destra) con sovrastante muro di 80 cm; 6. I filari sfalsati indicano che i muri sono accostati (assenza di ammorsatura). A sinistra rilievo costruttivo tratto da GIUFFRÈ – CAROCCI, *op. cit.*, pag. 106)

²³⁰ Ivi, pag. 114

Indagini specialistiche

Per avvalorare il giudizio sulla qualità delle murature e sulla loro compattezza è stato eseguito un approfondimento conoscitivo sulle tessiture murarie mediante prove non distruttive - in questo caso tomografie soniche - al fine di confrontare i risultati ottenuti con l'analisi costruttiva dei campioni murari effettuata mediante rilievo diretto.

Il piano delle indagini è stato definito sulla scorta delle fasi evolutive in modo tale da effettuare i test su campioni murari attinenti a periodi costruttivi differenziati.

Dalle tomografie emergono delle differenze tra i muri perimetrali e quelli di spina. I primi sono caratterizzati da una sezione generalmente meno omogenea (Figura 4.20-A); i secondi, invece, sono caratterizzati da sezioni più compatte in prossimità del martello murario (Figura 4.20-B), mentre meno compatta è la parete di spina nel resto del suo sviluppo (Figura 4.20-C).

Sulla scorta della conoscenza della tecnica costruttiva muraria materana illustrata nel Codice è possibile ipotizzare che queste lievi differenze possano essere dovute alla qualità del materiale di riempimento dei vuoti (terra, scaglie, ...) e non tanto a una qualità più scadente del muro.

Una sezione piena, invece, caratterizza i pilastri del portico (Figura 4.20-D.), evidentemente ben concepiti per supportare i carichi provenienti da muri sovrastanti, archi e volte.

Riguardo la caratterizzazione meccanica delle murature di palazzo Lanfranchi si è scelto di utilizzare i valori riportati nella tabella C8A.2.1, traendo vantaggio dalla facilità con la quale, nel caso in questione, è possibile procedere alla identificazione della tipologia muraria, riconducibile alla "muratura in conci di pietra tenera" delle NTC2008²³¹.

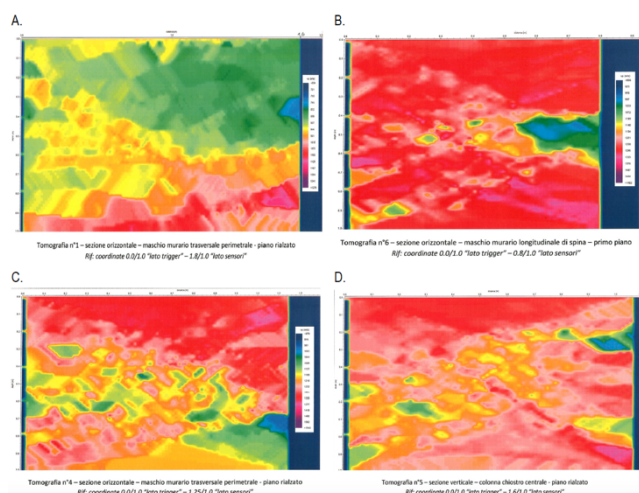


Figura 4.20 - Selezione delle tomografie soniche più significative eseguite su palazzo Lanfranchi

²³¹ Ricordiamo che i paramenti murari esterni sono tutti faccia vista e la tecnica muraria - prevede blocchi squadrati di calcarenite caratterizzata da pezzature che si ripetono con costanza.

4.3.2 Interpretazione

Rilievo Critico

Il “rilievo critico”²³² dell’edificio consente l’organizzazione delle informazioni provenienti dalle attività eseguite nella fase di conoscenza (rilievo materico costruttivo, ricerca storica e fasi evolutive, indagini specialistiche) per facilitare la loro lettura contemporanea e comparata. Tale lettura favorisce la interpretazione dello stato di fatto dell’edificio in una visione evolutiva e consente di individuare fattori che influenzano la risposta sismica in modo negativo (vulnerabilità) o positivo (resistenze)²³³.

L’efficacia rilievo critico, per come proposto in questo studio, è strettamente connessa alla graficizzazione delle informazioni sulla base del rilievo geometrico-architettonico.

A questo scopo, sulla base di una legenda tipo, è precisata quella da utilizzare per l’edificio in esame.

La legenda del rilievo critico di palazzo Lanfranchi, è suddivisa in tre sezioni tematiche che riguardano gli elementi fondamentali a definire la qualità dell’edificio murario (Figura 4.21):

1. impianto strutturale e tecnica costruttiva: raccoglie le informazioni relative ai materiali, alla tecnica costruttiva e alla geometria della struttura di elevazione e degli orizzontamenti, dei sistemi di chiusura di vani porta e finestra.
2. dispositivi di connessione e presidi antisismici (incatenamenti, speroni, scarpe murarie).
3. trasformazioni e quadro fessurativo: raccoglie le informazioni sulle lesioni presenti insieme alle più evidenti manifestazioni di discontinuità costruttive e di trasformazioni (ampliamenti, chiusura-apertura-allargamenti di vani, eliminazione di porzioni murarie, addizioni con tecnica incongrua, ecc.).

I simboli sono definiti sia per la rappresentazione in pianta sia per quella in alzato.

²³² Il “rilievo critico” cui ci riferiamo in parte rimanda a strumenti tipici della disciplina del restauro e in parte anche dell’analisi stratigrafica. Nell’organizzazione l’elaborato appare analogo a quello obbligatorio richiesto dalla Circolare Ballardini e dalle prime Istruzioni del Ministero dei Beni Culturali per i progetti di restauro con miglioramento sismico (§ Cap. 1).

²³³ C.F. Carocci, *Conservazione del tessuto murario... op.cit.*

	pianta	prospetto	
Elementi strutturali e tecnica costruttiva			Struttura di elevazione Muri in pietra di tufo squadrate di spessore da 1 a 7 fesse (in bianco tramezzi e pareti in cartongesso)
			1. muri retrostanti; 2. spessori della parete in prospetto (1-7 fesse) T1 (36 cm) T2 (50 - 60 cm) T3 (70-90 cm) T4 (90-110 cm) T5+ (120-180 cm) 3. archi/sottarchi di rinforzo 4. piedritti di imposta delle volte
			Orizzontamenti Si osservano quattro diverse tipologie di volte in murature di conci in tufo squadrate: 1. Volta a stella (più diffusa: esercita spinte contro la parete di prospetto analizzata) 2. Volta a crociera (esercita spinte contro la parete di prospetto analizzata) 3. Volta a padiglione (esercita spinte contro la parete di prospetto analizzata) 4. Volta a botte (non esercita spinte contro la parete di prospetto analizzata se creata ortogonalmente alla parete, come nell'esempio)
			Elementi di chiusura vani porta e finestre 1. Piattabanda con sordino 2. Piattabanda semplice 3. Architrave
			Archi di scarico, sott'archi di rinforzo / archi di fondazione (nella planimetria D.0.2)
Prescrizioni			Catene storiche (si indica la quota rispetto al calpestio)
			Muri a scarpa/Speroni 1. Muri di consolidamento anni '50 (non accertato) 2. Proiezione dei muri del PT
			Consolidamenti anni '80/'90 1. Trefoli (si indica la quota rispetto al calpestio) 2. Micropali 3. Chiodature
Disegni e trasformazioni			Lesioni 1: su parete 2: su volta 3: su pavimento
			Accrescimenti/Ampliamenti 1. accostamenti privi di ammassatura (discontinuità); 2. accostamenti con ammassatura 3. accostamenti leggibili negli orizzontamenti (non ammassati/ammassati)
			Chiusure vani porta/finestre 1. tamponati 2. ammassati
			Apertura/allargamenti vani porta/finestre 1. a trappo 2. scuci-cuci
			Vuoti/Sottrazione di muratura 1. Nicchie 2. Canne fumarie/scassi/cavedi 3. Tracce impianto di condizionamento (vedi TAV I.1)
		Elementi in Cemento Armato Corbelle di appoggio capriate di copertura Collarini di irrigidimento volte vano ascensore	
		Elementi di sostituzione/aggiunti 1. Elemento sostituito 2. Elemento aggiunto 3. Elemento modificato (la nota aggiunge informazioni)	

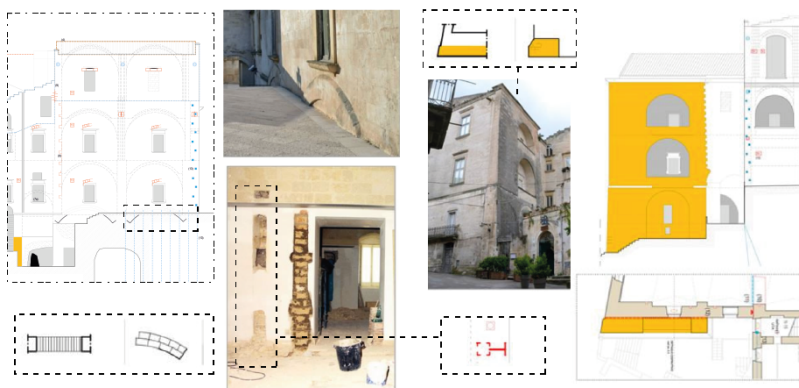


Figura 4.21 - Palazzo Lanfranchi, legenda del rilievo critico: a) Simboli della leggenda suddivisi nelle tre categorie e ideati per la rappresentazione in pianta e in alzato; b) esemplificazione di alcuni simboli (archi di fondazione, speroni, tracce degli impianti)

Nel rilievo critico le voci e i corrispondenti segni grafici di cui si compone la legenda sono stati elaborati *ad hoc* per ordinare e rappresentare le informazioni necessarie alla costruzione del giudizio sul comportamento sismico.

Il colore attribuito al simbolo dichiara la qualità e la provenienza di ciascun dato (rilievo diretto, fonte storica) e il suo grado di attendibilità (accertato, non accertato). In particolare la legenda segnala quando la medesima informazione è avvalorata sia dalle fonti dirette sia indirette, ciò che aumenta la sua attendibilità. Nello specifico, un ‘dato accertato’ è quello che è derivato da una fonte storica ed è stato identificato direttamente sul manufatto; un ‘dato storico’ è quello derivato da una fonte storica ma non trova riscontro sull’edificio; un ‘dato diretto’ è desunto dalla lettura del manufatto ma non è indicato da nessuna fonte storica (Figura 4.22).

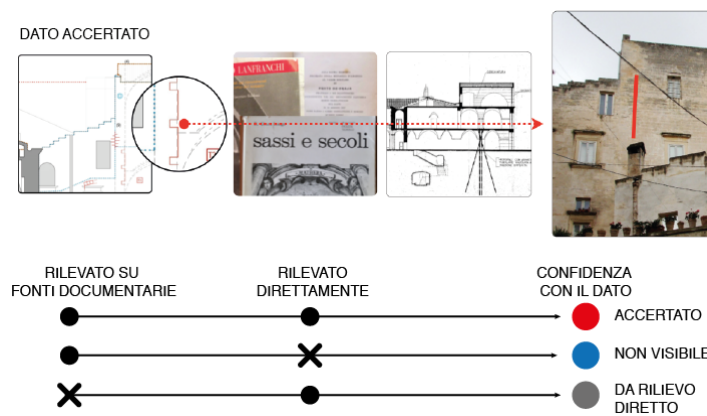


Figura 4.22 - Legenda Rilievo critico, identificazione delle fonti. Ogni dato rilevato è riportato nelle piante o nei prospetti con un colore che ne attesta la provenienza.



Stralcio piano terra

Stralcio piano nobile

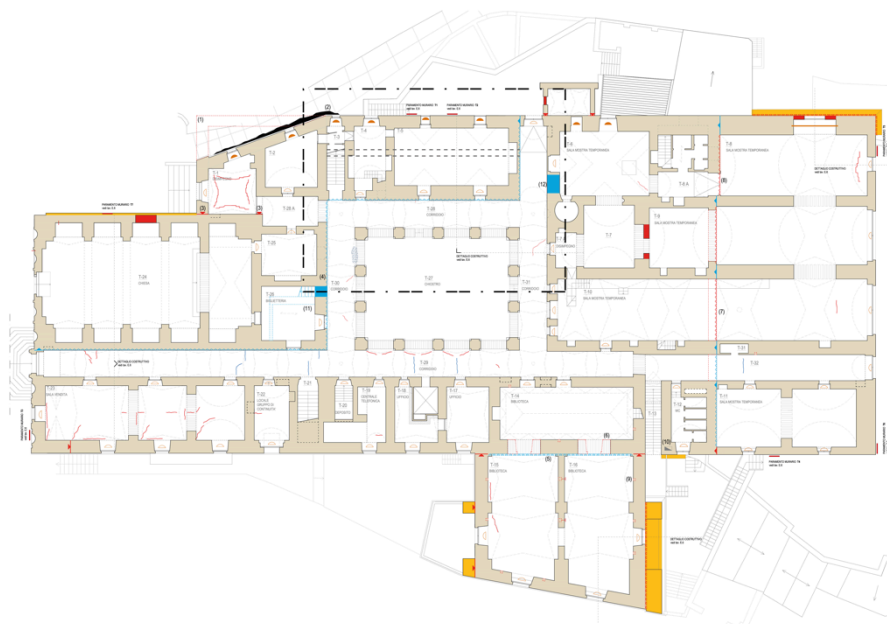


Figura 4.23 - Rilievo critico Palazzo Lanfranchi: Planimetria piano primo e zoom sulla parete est del chiostro.

Per spiegare meglio questi tre gradi di attendibilità delle informazioni e il risvolto che questa specificazione assume nella prefigurazione del danno potenziale (o nella comprensione del danno manifesto) è utile riferirsi alla ricostruzione delle fasi evolutive e in particolare al rilievo degli accostamenti murari. Un accostamento murario visibile direttamente sull'edificio che attesta una trasformazione storica indicata anche dalle fonti è indicato come dato "accertato". L'attendibilità di questa informazione è massima e ci consente di dire che il nostro livello di conoscenza in quel punto è accurato. Ne deriva che l'eventuale vulnerabilità legata a questo tipo di informazioni e i relativi meccanismi di danno prefigurati rappresentano una schematizzazione molto aderente alla realtà osservata. Da qui emerge l'utilità di tale processo rigoroso nella fase di progetto, che consente di limitare al minimo necessario gli interventi di miglioramento.

Attraverso la specializzazione della legenda, il palazzo è descritto in modo dettagliato facilitando la lettura dei livelli di informazioni. Ai dati sulla configurazione muraria (geometria delle parti e tecniche di realizzazione) sono correlati quelli inerenti alla cronologia delle trasformazioni antiche e recenti e in ultimo – quale tema basilare per la valutazione del comportamento in caso di sisma – le informazioni specifiche sulla localizzazione dei sistemi di rafforzamento o di consolidamento.

Dagli elaborati del rilievo critico emergono dunque ricorrenze e particolarità degli assetti della configurazione muraria e degli elementi costruttivi.

La notevole quantità di informazioni leggibili contestualmente consente di evidenziare le eventuali situazioni di carenza costruttiva e/o di possibile vulnerabilità, distinguendole dalle caratteristiche riferibili alla tecnica costruttiva locale e alle consolidate modalità edificatorie e di trasformazione storicamente attuate.

Per fare un esempio, al piano nobile, si nota che la parete che si affaccia sul chiostro è semplicemente accostata alle pareti (sono evidenti i filari sfalsati), probabilmente perché è stata costruita in una fase diversa (dato non attestato dalle fonti documentarie, quindi in grigio); inoltre essa è caratterizzata da uno spessore ridotto rispetto alle altre e su di essa si impostano delle volte lapidee a padiglione senza prevedere catene a contenimento delle spinte (Figura 4.23).

Precisazione e sintesi delle fasi costruttive. La lettura contestuale delle informazioni permessa dal rilievo critico su impianto strutturale e accostamenti murari osservati direttamente consente di precisare alcune trasformazioni non esplicitamente documentate dalle fonti. Dalla lettura della maglia muraria, al piano secondo è leggibile l'impianto di forma quadrata costituito dalle spesse pareti attorno al chiostro: sui tre lati nord-ovest-est le pareti si impostano direttamente sui pilastri sottostanti e prospettano sul chiostro, mentre la spessa parete a est è interna e si trova in corrispondenza della parete che al piano terra chiude un ambiente voltato a botte. La parete che prospetta sul lato est del chiostro ha uno spessore inferiore rispetto alle contigue e i

filari sfalsati attestano che questa parete è stata accostata successivamente ai muri contigui. Da queste tracce è possibile ipotizzare che i due ambienti a est originariamente fossero un terrazzo, o un affaccio sul chiostro di ambienti riservati agli insegnanti. Una trasformazione intermedia ipotizzabile prevede la chiusura del terrazzo per formare un corridoio di distribuzione analogo a quello sul lato opposto. Infine, l'attuale impianto è definito ricavando due ambienti che si affacciano sul chiostro e la definizione di un corridoio di distribuzione con la costruzione del muro di spina centrale in falso sulla volta del piano terra.

In conclusione, dalla lettura contestuale di tracce osservabili e informazioni indirette è possibile desumere una sintesi delle fasi costruttive principali riprodotta in Figura 4.24. Le varie fasi - distinte da colori diversi - sono messe in relazione alle tracce leggibili nel manufatto che ne attestano l'effettiva realizzazione.

Con riferimento alla Figura 4.24 sono messe in evidenza le discontinuità in corrispondenza dell'angolo nord-ovest del fabbricato (punto 1): (i) differenti spessori murari, (ii) orizzontamenti non coevi (punto 1a), la lesione sulla volta aggiunta al piano terreno in corrispondenza dell'ammorsamento alla volta preesistente.

Sono evidenziati, sul lato ovest, gli archi di scarico costruiti in corrispondenza alle sottostanti cavità (punto 1b), sia nella costruzione Lanfranchiana sia nel volume dell'ampliamento ottocentesco che attestano la continuità della tecnica costruttiva anche a distanza di due secoli.

In corrispondenza del primo arco (punto 1c) si nota l'interruzione del marcapiano Lanfranchiano ed è evidente la differenza di dimensioni e cornici delle finestre ottocentesche rispetto a quelle dell'edificio lanfranchiano, probabilmente accentuata nell'ambito dei lavori di restauro del 1980 per marcare le fasi costruttive.

Si notano differenti tessiture murarie che attestano la costruzione successiva del secondo livello.

Inoltre, come mostrano differenti spessori murari e la lesione in corrispondenza dell'ammorsatura (punto 1d) il volume a est è stato chiuso in un periodo differente. Inoltre, la grande apertura che illumina il volume aggiunto è stata creata durante i lavori di restauro degli anni '80.

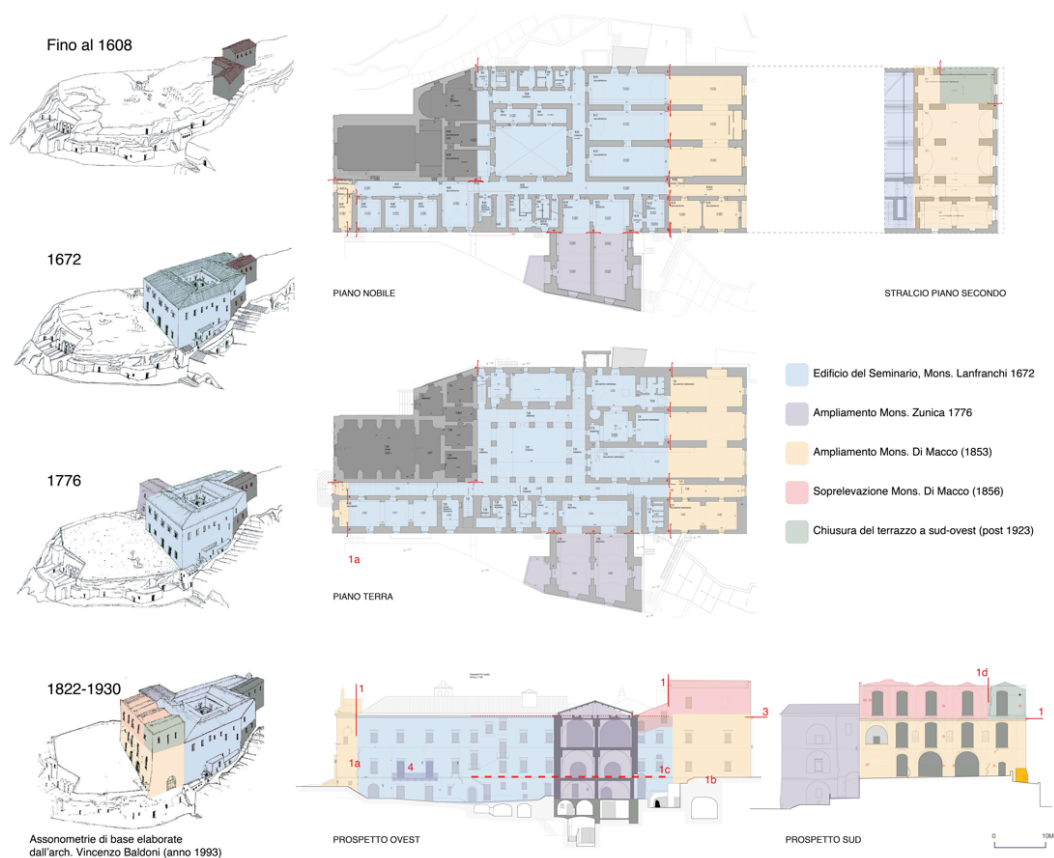


Figura 4.24 - Sintesi delle fasi costruttive. Pianta del piano terra, prospetto ovest e prospetto sud, viste assonometriche. Le assonometrie sono desunte dal progetto di Baldoni, ma sono qui reinterpretate criticamente (attraverso campiture) a valle dei riscontri sul campo e dell'analisi delle fonti.

Fattori di vulnerabilità e fattori di resistenza, giudizio qualitativo

Il giudizio qualitativo sulla efficacia antisismica del manufatto è delineato in termini rigorosamente logici con riferimento agli esiti della fase di interpretazione dei fattori di vulnerabilità e di resistenza²³⁴.

La sintesi conoscitiva è prodotta attraverso una interpretazione delle informazioni acquisite ed è articolata seguendo l'organizzazione della legenda del rilievo critico: (1) impianto strutturale e tecnica costruttiva, (2) connessioni e (3) trasformazioni e danneggiamento.

Le considerazioni sui tre punti succitati costituiscono i termini del giudizio qualitativo delineato per il palazzo.

²³⁴ A. Giuffrè, *Restauro in zona sismica, op. cit.*

Riguardo il punto (1) le soluzioni costruttive adottate sia in fase di primo impianto che nei successivi ampliamenti del palazzo rispettano le regole che definiscono un edificio di buona qualità sia nella configurazione generale che nei singoli elementi costruttivi.

Si osservano pareti disposte a distanza regolare in entrambe le direzioni principali riconoscibili nell'edificio e di spessore adeguato a sopportare il carico degli orizzontamenti voltati, anch'essi ben tessuti e ben disposti sulla struttura di elevazione.

Le tessiture murarie sono caratterizzate dalla presenza sistematica di diatoni e di giunti sottili (inferiori al centimetro), accorgimenti che favoriscono il comportamento monolitico delle pareti. Le tomografie soniche eseguite sui muri, in linea generale, confermano il giudizio qualitativo sulla compattezza delle tessiture. La densità differente che le indagini hanno riscontrato tra le murature non indicano necessariamente una qualità più scadente; piuttosto tale differenza può essere dovuta alla consistenza del materiale di riempimento dei vuoti all'interno dei muri (terra o scaglie di pietra), tipici dell'apparecchio materano.

La qualità della tessitura muraria è dunque un punto di forza di Palazzo Lanfranchi. Tuttavia, fenomeni di dissesto locale potrebbero verificarsi a causa dei tagli eseguiti sui muri per l'inserimento degli impianti di climatizzazione.

Anche la fattura degli orizzontamenti voltati è di ottima qualità e rappresenta un elemento di resistenza del fabbricato. Nonostante non si noti la presenza diffusa di incatenamenti, non sono presenti fenomeni di instabilità delle volte lapidee. Questa stabilità è favorita sia dal corretto dimensionamento della struttura di elevazione, sia dalla sapiente disposizione degli elementi voltati, posti sempre a contrasto in modo da controbilanciare le spinte.

A favorire la corretta distribuzione dei carichi verticali contribuiscono anche le strutture ad arco diffuse per tutto l'impianto strutturale, dalle fondazioni fino agli ultimi livelli (Figura 4.25).

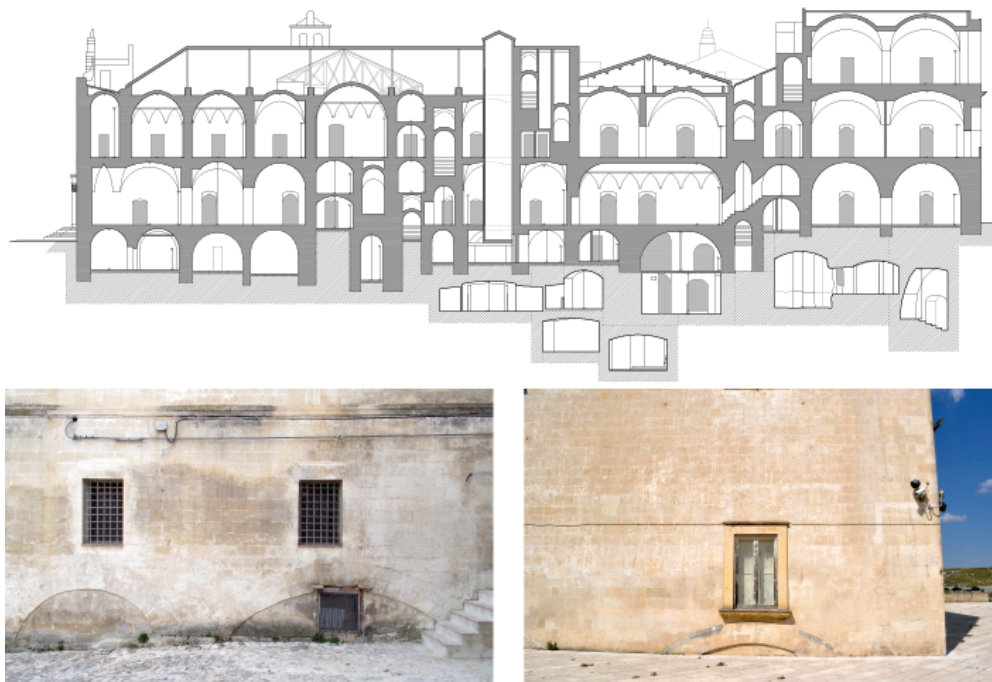


Figura 4.25 - Sezione longitudinale retrostante la parete ovest del palazzo. Si nota la presenza diffusa di orizzontamenti voltati su tutti i livelli disposti in modo tale da controbilanciare le spinte. In basso, foto del prospetto ovest, primo impianto (a sinistra) e ampliamento ottocentesco (a destra). Gli archi di scarico sotto le aperture sono costruiti in corrispondenza di cavità ipogee

Un ruolo di particolare importanza è svolto dagli archi fondazione. Le cavità sottostanti il palazzo hanno indotto le maestranze a predisporre fondazioni discontinue, costituite da archi che scavalcano il vuoto convogliando i carichi verticali sulle porzioni roccia non scavata (Figura 4.25).

In tale condizione, in generale confortante, si osserva una situazione di potenziale vulnerabilità nella presenza di una parete di spina al piano nobile elevata in falso sull'estradosso della volta a botte sottostante. A tale soluzione apparentemente anomala non corrispondono evidenze di dissesto. Dal controllo geometrico effettuato in fase di rilievo si evidenzia come la parete in questione sia posta in chiave alla volta costituendo così un carico concentrato ma agente simmetricamente sulla volta stessa; lo spessore della volta non è invece stato accertato.

In conclusione, si può dunque affermare che la tecnica costruttiva locale rappresenta un punto di forza dell'intero complesso architettonico, parimenti alla sapiente concezione dell'impianto strutturale.

Riguardo il punto (2), non si osserva la presenza diffusa di incatenamenti o presidi antisismici. Fanno eccezione: il muro a scarpa sul lato est della chiesa; lo sperone sull'angolo sud-est, probabilmente inserito per problemi di cedimento dovuti alla presenza di cavità

antropiche; gli incatenamenti metallici presenti sul lato ovest (uffici Soprintendenza), atti a contenere la spinta delle volte a padiglione.

Riguardo le connessioni tra i vari elementi strutturali, dall'osservazione diretta delle strutture a vista (fronti esterni, cantonali, volte lapidee) anche in questo caso si può avanzare un giudizio positivo. I cantonali appaiono ben tessuti, così come i martelli murari visibili al piano secondo, dove le murature sono tutte lasciate a vista.

Si osserva la mancanza di ammorsamento (i) tra la parete est del chiostro e i setti ad essa ortogonali, (ii) tra le pareti perimetrali dell'ampliamento settecentesco e il corpo edilizio di primo impianto; (iii) in fine anche gli speroni di consolidamento di fine Settecento sono semplicemente accostati al volume della Biblioteca. Tuttavia, l'unica situazione di precarietà sembra essere quella della parete del chiostro; al contrario, i muri della biblioteca sono caratterizzati da spessori maggiori e, in aggiunta, sono coadiuvati dai piedritti nel supportare le sollecitazioni delle volte a stella.

L'interpretazione del quadro fessurativo (3) – eseguita col supporto delle informazioni suesposte – è un passo fondamentale per la individuazione dei *macroelementi*, intesi come porzioni di fabbricato significative nelle quali è ipotizzabile un meccanismo di danno potenziale, sulla base della configurazione geometrico-costruttiva e dell'eventuale quadro di danneggiamento.

La lettura delle lesioni sistematicamente indicate su orizzontamenti e struttura di elevazione è condotta sulla scorta delle conoscenze delle peculiarità costruttive dell'architettura materana. Ciò consente di distinguere lesioni patologiche - ascrivibili a trascorsi terremoti o cedimenti in fondazione, inefficacia o sottrazione di vincoli - dalle lesioni fisiologiche - riferibili ad assestamenti in fase di costruzione o di trasformazione o a cicli termo-igrometrici.

Per il caso in oggetto, non si osserva un quadro fessurativo rilevante e le lesioni sono in gran parte fisiologiche.

È il caso, ad esempio, delle lesioni ricorrenti in prossimità degli appoggi delle volte sulle pareti: esse sono ascrivibili all'assestamento dell'orizzontamento in seguito allo smontaggio della centina lignea e non a un particolare dissesto²³⁵. Un discorso analogo può valere per le lesioni presenti nelle voltine del portico al piano terra.

Per quanto concerne le lesioni sulle facciate, sussistono evidenze in prossimità degli accostamenti di setti murari appartenenti a fasi costruttive differenti. L'apertura della lesione (la cui entità rimane comunque lieve) è dovuta all'assestamento dei muri, in alcuni casi privi di morse di collegamento.

Sul fronte ovest, angolo fronte nord, si nota un allentamento dei giunti in corrispondenza del volume aggiunto (probabilmente nell'Ottocento) per allineare la facciata del seminario con la facciata della chiesa; inoltre, la presenza di un canale di scolo incassato nella muratura costituisce una concausa all'apertura della lesione. A questa fa riscontro una lesione in

²³⁵ Cfr. GIUFFRÈ & CAROCCI 1997, pag. 147-152.

corrispondenza dell'attacco delle due volte lapidee del vano d'angolo al piano terra, segno che testimonia l'accostamento di due fasi differenti e non una particolare precarietà strutturale.

Anche le lesioni leggibili sul prospetto principale in corrispondenza dell'accostamento del palazzo alla chiesa denunciano il succitato ampliamento.

Una analoga considerazione vale per le lesioni sul prospetto ovest, in corrispondenza dell'ampliamento ottocentesco. In questo caso, i setti murari più recenti sono caratterizzati da elementi di pezzatura maggiore rispetto ai muri preesistenti, e l'ammorsamento in alcuni punti risulta allentato probabilmente a causa di assestamenti immediatamente successivi alla costruzione.

In secondo luogo, le lesioni in corrispondenza dell'ampliamento settecentesco a ovest sono dovute all'assenza di morse tra i muri di epoche diverse.

Alla luce di queste considerazioni, si può affermare che il quadro fessurativo che interessa il fabbricato non è imputabile a dissesti in atto ovvero a precarietà costruttive su cui bisogna intervenire; bensì, in buona parte dei casi, le lesioni rappresentano evidenze delle trasformazioni storiche del palazzo, avvenute secondo modalità aggregative tipiche dell'architettura muraria, ovvero di assestamenti della struttura di elevazione.

Riguardo il rilievo di eventuali vulnerabilità introdotte da trasformazioni, una considerazione va avanzata nei riguardi del corpo sul lato est del chiostro, la cui parete di prospetto non è ammorsata ai setti ortogonali. La compresenza di orizzontamenti spingenti (volte a padiglione) impostate sul muro esterno di esiguo spessore (40 cm) non collegato e l'assenza di catene di contegno della spinta, potrebbe favorire - sotto l'azione di un sisma - l'attivazione di un meccanismo di ribaltamento fuori piano della parete di facciata. Allo stato attuale non vi sono evidenze di questo cinematismo (non si osservano lesioni sulle volte a padiglione in corrispondenza delle ipotetiche cerniere), ma è opportuno segnalare questa condizione come una vulnerabilità da valutare anche con il supporto di analisi numeriche.

Riguardo le strutture di copertura, in corrispondenza degli ambienti a ovest, in occasione del restauro degli anni '80 del XX secolo le orditure lignee originali sono state sostituite con capriate metalliche bullonate a piastre in acciaio fissate su travi in cemento armato realizzate sulle cimase dei muri di spina. In condizioni statiche tale configurazione non sembra implicare particolari vulnerabilità. Tuttavia, in prospettiva sismica è necessario tenere presente che i cordoli cemento armato esibiscono un comportamento sostanzialmente differente rispetto alle murature sottostanti a causa della loro maggiore rigidezza (modulo elastico più elevato negli elementi in c.a.).

La copertura in corrispondenza della sala absidata (la sola non sostituita) ha un'orditura costituita da una trave principale poggiata sui muri di timpano e ulteriormente sorretta - in mezzeria - da alcuni puntelli poggiati sulla chiave della volta sottostante. Questa configurazione è ascrivibile al lessico costruttivo materano, nel quale il legno non costituiva un

tipico materiale da costruzione. In questo caso, la struttura lignea è molto povera²³⁶ e i puntelli sono predisposti in opera per suddividere la luce della trave in segmenti più piccoli. Ad oggi non sono osservabili evidenze di instabilità della volta dovute a questa configurazione.

In conclusione, alcune trasformazioni hanno implicato la sottrazione di muratura per la realizzazione di nuove aperture al piano terra del lato ovest, (probabilmente in occasione dei lavori del 2001). Tuttavia, anche in questo caso si nota che le bucatore sono state trasformate in modo consapevole, mantenendo delle luci contenute, avendo cura di ammorsare gli stipiti al muro preesistente e realizzando architravi di adeguato spessore.

Un elemento oggetto di valutazioni specifiche è la zona dell'orologio, elemento svettante aggiunto nel corso dell'Ottocento, durante i lavori per il nuovo impaginato della facciata. L'inserimento dell'orologio ha comportato varie trasformazioni in quest'area, quali la modifica degli orizzontamenti voltati del corridoio ovest al piano nobile e l'aggiunta di un volume in muratura per contenere la scaletta in pietra che conduce al torrino. Dallo spaccato assonometrico sulla chiesa, si osserva come la struttura che contiene la scaletta è costruita sopra lo spesso muro della chiesa, che risulta perfettamente in grado di supportare il carico aggiunto. Per cui è possibile asserire che questo elemento non introduce vulnerabilità nell'impianto dell'edificio. Tuttavia, essendo questo svettante su tutti i lati, in condizione sismica è maggiormente esposto a ribaltamento fuori dal piano delle pareti, con eventuale danneggiamento ad altre porzioni del palazzo.

Riguardo la sopraelevazione ottocentesca della porzione sud del fabbricato, sebbene essa non comporti un peggioramento in condizioni statiche (le pareti sottostanti sono solide e ben dimensionate per poter supportare il carico di un ulteriore livello), in condizione sismica le pareti esterne sono maggiormente vulnerabili al meccanismo fuori dal piano, per l'apparente assenza di catene o altri vincoli a tale moto. La porzione più debole è l'angolo sud-est, poiché i setti murari - aggiunti intorno agli anni Trenta del Novecento - non sembrano efficacemente collegate alle pareti contigue, oltre ad essere caratterizzati da uno spessore minore.

È plausibile che tali precarietà siano state evidenziate durante gli ultimi lavori degli anni '80, poiché il progetto ha previsto dei trefoli di collegamento su tutti i muri perimetrali e su tutti i muri di spina. La presenza di questi presidi incide positivamente sul comportamento strutturale del fabbricato, poiché incrementa la capacità delle pareti nella risposta fuori dal piano.

4.3.3 Definizione del fattore di confidenza

Riguardo il primo aspetto della conoscenza "Rilievo geometrico", si considera raggiunto il livello massimo di conoscenza, corrispondente a un $F_{CI}=0$.

²³⁶ Cfr. GIUFFRÈ & CAROCCI 1997, pag. 98-99

Le risultanze dell'attività svolta a tavolino e il controllo diretto diffuso su tutto il palazzo degli spessori murari, delle discontinuità costruttive, delle nicchie ecc., hanno permesso la restituzione di un rilievo geometrico completo associato al rilievo e alla interpretazione del quadro fessurativo. È stato effettuato un controllo sistematico degli spessori e degli allineamenti che costituiscono la maglia muraria.

Per l'aspetto "Identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica" è ritenuto raggiunto il massimo livello di conoscenza corrispondente a $F_{C2}=0$.

Riguardo la ricostruzione del processo storico-evolutivo e delle trasformazioni, è stato effettuato il riscontro di gran parte delle informazioni desunte dalle fonti documentarie, ricercando le tracce e le discontinuità costruttive direttamente sul manufatto. Le fasi costruttive e le trasformazioni sono state precisate col supporto del rilievo critico mediante una lettura degli allineamenti murari e dell'impianto strutturale nel suo complesso.

Nonostante ciò, sussistono alcune incertezze sugli interventi del progetto del 1980 effettivamente eseguiti, che non sono direttamente visibili e dei quali non è stata rinvenuta documentazione completa, anche a causa del mancato riordino dell'ASC. Il livello di attendibilità dei dati riguardanti il progetto esecutivo è puntualmente riconoscibile negli elaborati del rilievo critico dal colore utilizzato.

Il rilievo materico-costruttivo in tema di elementi e assemblaggi costruttivi è stato indirizzato principalmente alla analisi delle tessiture murarie e degli apparecchi degli orizzontamenti voltati ed è stato condotto ritenendo altamente attendibile la relazione tra la tecnica costruttiva osservabile a palazzo Lanfranchi con quella delle case dei Sassi documentata nel codice di pratica, nell'ambito del quale sono illustrate le qualità meccaniche in relazione alle regole dell'arte muraria. Sono dunque elaborati disegni specifici per il caso studio con l'obiettivo di un confronto critico con quanto appreso dal codice. L'analisi dimostra che la tecnica costruttiva è perfettamente sovrapponibile, per cui non si è ritenuto necessario eseguire indagini specifiche per indagare la sezione muraria, che è stata comunque ipotizzata a valle dell'osservazione diretta dei paramenti murari a vista²³⁷.

Riguardo la conoscenza dei parametri meccanici è scelto $F_{C3}=0,12$ perché non sono state svolte indagini di caratterizzazione meccanica dei materiali. Tuttavia è opportuno sottolineare che l'analisi svolta sulle tipologie murarie ha consentito di valutare le qualità meccaniche dei muri di Palazzo Lanfranchi per cui potrebbe considerarsi un FC inferiore. I parametri meccanici sono desunti direttamente dalla tabella C8A.2.1, selezionando la tipologia muraria in "blocchi di tufo".

Per l'aspetto di terreno e fondazioni, sono disponibili gli studi di RLS condotti dal CNR, ma in prima istanza è stato cautelativamente assunto un fattore parziale pari a $F_{C4}= 0,06$.

²³⁷ Le video-endoscopie eseguite su Palazzo Ridola (v. Scheda P2), hanno dimostrato che anche la tecnica muraria del palazzo è analoga a quella che caratterizza le case dei Sassi.

Il Fattore di Confidenza così determinato è pari a 1,18 come si evince anche dalla tabella che segue (Figura 4.26).

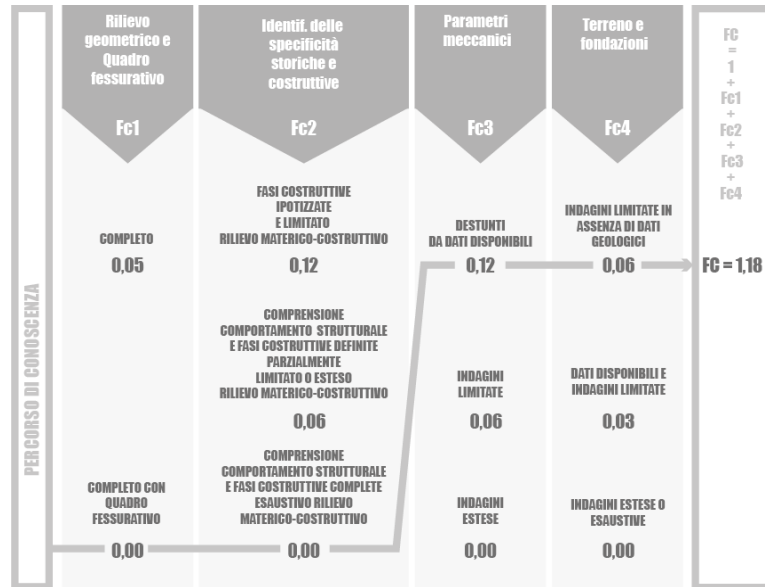


Figura 4.26 – Palazzo Lanfranchi, Matera; definizione del fattore di confidenza.

È possibile avanzare alcune considerazioni sul FC ottenuto.

La scelta del fattore parziale $F_{C2}=0$ non tiene conto delle incertezze relative agli interventi di consolidamento eseguiti, che sono tenute in considerazione direttamente nei modelli meccanici mediante la modifica dei parametri del modello; il valore è invece coerente per l'approfondimento raggiunto sull'analisi dei dettagli costruttivi.

Il valore di F_{C3} può considerarsi cautelativo perché in base alle indagini condotte sulle murature è possibile assumere $F_{C3}=0,06$; una considerazione analoga si è già avanzata sul valore di F_{C4} . Quindi, nel valore complessivo di $FC=1,18$ i valori scelti per F_{C2} e F_{C3} si compensano.

È da notare che se scegliessimo di ridurre il livello di conoscenza sulle trasformazioni storiche – considerando dunque le incertezze sul progetto esecutivo – e considerassimo un livello di conoscenza più alto per i parametri meccanici otterremmo comunque $FC=1,18$. In aggiunta, se considerassimo in via meno cautelativa anche il quarto fattore parziale relativo a terreno e fondazioni, potremmo finanche ottenere un $FC=1,15$.

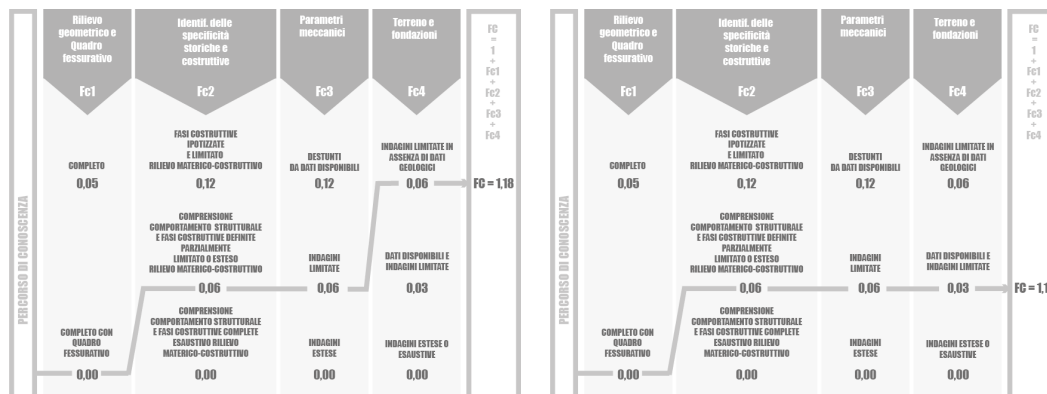


Figura 4.27 – Ulteriori percorsi di conoscenza rappresentativi dell'approccio utilizzato per Palazzo Lanfranchi

4.3.4 Verifica sismica

Prefigurazione degli scenari di danno. La lettura interpretativa di vulnerabilità e fattori di resistenza delineata a valle della conoscenza approfondita del palazzo ci consente di raggiungere una congrua consapevolezza della compagine strutturale e della sua potenziale risposta sismica, tanto da poter affermare che il giudizio qualitativo sulla sicurezza del palazzo è implicitamente contenuto nella precedente disamina.

Nel presente paragrafo sono, quindi, descritte tutte le porzioni significative per le quali si riconosce un potenziale meccanismo di danneggiamento in condizioni sismiche, pur non manifestando particolari precarietà in condizioni ordinarie.

1) La porzione superiore della facciata della chiesa (probabilmente risultato della rimpaginazione ottocentesca) appare vincolata a nord-est da un maschio murario ortogonale di circa 1 m, mentre non è accertata la qualità dell'ammorsamento con la facciata del seminario. In via cautelativa questa porzione di facciata è considerata libera (porzione a vela) e quindi più vulnerabile anche in relazione alle dimensioni della luce libera evidentemente superiori alla norma e induce a ipotizzare un meccanismo di ribaltamento fuori piano con cerniera in corrispondenza del marcapiano interrotto dal rosone (Figura 4.28-C.).

2) Una delle quattro pareti del chiostro presenta uno spessore inferiore rispetto alle altre e non risulta ammorsata ai setti contigui. Inoltre su di essa impostano delle volte a padiglione senza l'ausilio di tiranti. In prospettiva sismica, per questa configurazione è ipotizzabile l'attivazione di un meccanismo fuori dal piano della parete (Figura 4.28-B), nonostante oggi non vi siano evidenze di instabilità.

3) La lunga parete che costituisce la facciata del palazzo verso i Sassi costituisce, nel suo tratto terminale, il piedritto per due ordini di volte a botte. Anche in questo caso non sono visibili lesioni che denunciano un movimento fuori dal piano, il che in parte attesta il congruo

dimensionamento del muro. Ciononostante, riteniamo questa configurazione maggiormente vulnerabile a ribaltamento, escludendo – in via cautelativa – l'apporto migliorativo dei dispositivi di consolidamento (trefoli) la cui presenza, attestata dalla documentazione del progetto degli anni '80, non è stata accertata direttamente.

4) La parete muraria che insiste – in direzione delle generatrici – sulla volta a botte sottostante non costituisce un errore se riguardata all'interno della logica costruttiva locale ove disposizioni di tal genere sono piuttosto diffuse. Ciononostante – anche in assenza di dissesti – si ritiene opportuno considerare tale organizzazione come una particolarità nel contesto di Palazzo Lanfranchi e di procedere anche a un controllo numerico (Figura 4.28-A).

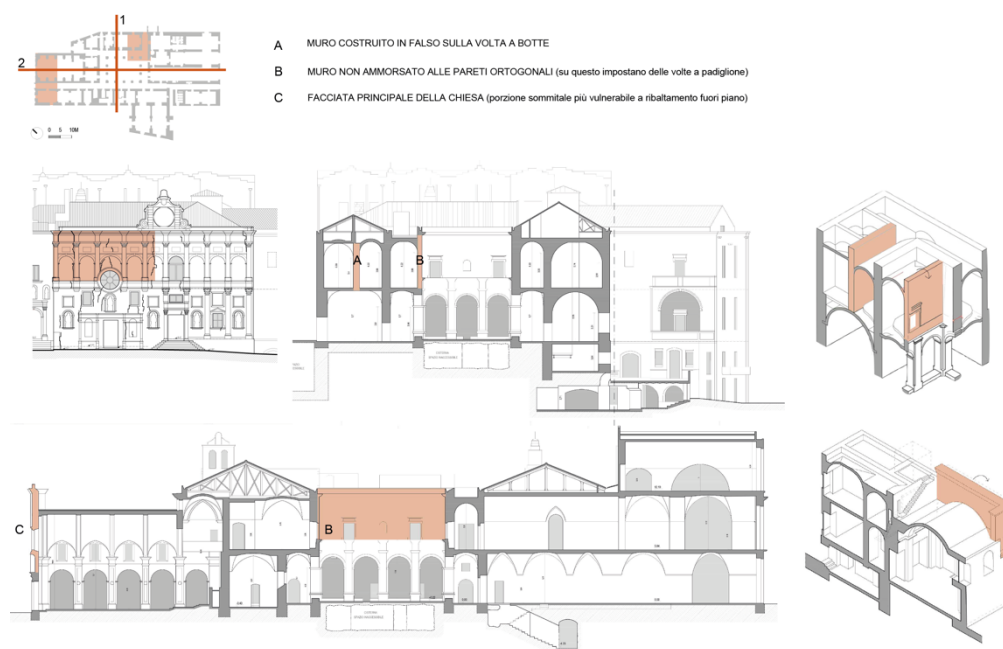


Figura 4.28 - Condizioni di maggiore vulnerabilità individuate per palazzo Lanfranchi: A. muro in falso sulla volta; B. parete del chiostro non ammorsata; C. facciata principale della chiesa (porzione sommitale).

Analisi numeriche. Il giudizio qualitativo avanzato sulla base della interpretazione della configurazione attuale del palazzo è affiancato dal controllo numerico eseguito sulle parti considerate più vulnerabili.

Sono eseguiti i tre livelli di valutazione previsti dalle Linee Guida.

La verifica LV1 è condotta utilizzando modelli semplificati analizzati attraverso la piattaforma SIVARS, che ha messo in evidenza la maggiore vulnerabilità della sopraelevazione dell'ala meridionale. Nonostante il software non sia alle NTC08, si è comunque proceduto alla implementazione dei dati relativi agli elementi costruttivi e alla geometria per consentire la definizione del database nazionale da parte del MiBACT.

Il secondo livello di valutazione (LV2) è eseguito mediante modelli locali analizzati seguendo l'approccio dell'analisi limite dell'equilibrio.

I macroelementi analizzati sono le porzioni del fabbricato ritenute più vulnerabili al meccanismo di primo modo, descritte al paragrafo precedente. In aggiunta a queste ultime, le analisi hanno riguardato anche altre pareti perimetrali, verificate anch'esse al meccanismo di ribaltamento semplice.

Gli esiti di questo livello di valutazione confermano le considerazioni qualitative sottolineando la maggiore vulnerabilità della parete del chiostro al movimento fuori dal piano. L'analisi dimostra, inoltre, che eseguendo degli interventi minimi, come l'introduzione di catene, si ottiene un incremento di capacità della parete corrispondente a una buona risposta sismica. Riguardo le pareti perimetrali, l'analisi numerica rivela la stabilità delle suddette pareti per ciascuna delle due collocazioni della cerniera (al piede o in corrispondenza dell'impalcato).

In base al numero e alla tipologia di modelli locali analizzati, sarebbe possibile considerare compiuto anche la valutazione complessiva del manufatto LV3 (eseguito per l'appunto con sommatoria di una quantità congrua di modelli locali). Trattandosi di una sperimentazione si è scelto di eseguire la valutazione LV3 anche attraverso un modello globale secondo lo schema a telaio equivalente, indagato mediante l'analisi statica non lineare (push-over). Il modello, che presuppone un comportamento scatolare dell'edificio, è finalizzato alla verifica dei meccanismi di II modo (verifica a taglio) delle pareti. Gli esiti di questa analisi confermano una buona risposta sismica globale, inficiata in gran parte dalla vulnerabilità al meccanismo di I modo della parete del chiostro.

La riduzione della vulnerabilità della parete sul chiostro, incrementerebbe considerevolmente gli indici di sicurezza che sarebbero a quel punto influenzati solo dal ribaltamento della facciata principale e dalla rottura dei maschi murari della sopraelevazione.

Per quanto concerne il muro in falso al piano primo, non essendo presenti evidenze di dissesto, la verifica ha avuto l'obiettivo di individuare lo spessore della volta necessario a sopportare il carico del muro sovrastante. È stata eseguita una analisi inversa (*back analysis*) che consiste nella definizione della curva delle pressioni relativa allo spessore che non produce il cinematismo. Da questa analisi risulta che lo spessore medio della volta si attesta sui 50 cm (due teste).

Gli esiti delle verifiche numeriche sostanziano quanto già enunciato dal giudizio qualitativo aggiungendo elementi a supporto della definizione di strategie di intervento di mitigazione della vulnerabilità sismica.

4.4 Considerazioni

Dai risultati ottenuti con lo studio di Palazzo Lanfranchi emerge l'importanza di una sistematizzazione del percorso di conoscenza che consente di individuare le relazioni che intercorrono tra le acquisizioni conoscitive e il giudizio sul comportamento strutturale.

Nella fase di conoscenza la verifica puntuale della configurazione geometrica dell'edificio eseguita mediante il controllo diretto ha consentito di definire l'impianto strutturale e di evidenziare alcune anomalie quali muri in falso o spinte non debitamente contenute.

La ricerca storica ha consentito di ottenere due risultati principali: la ricostruzione delle fasi evolutive e la comprensione del comportamento strutturale esibito nel tempo.

Ciò è stato possibile attraverso una disamina sistematica delle fonti e la selezione delle informazioni inerenti trasformazioni e interventi importanti (lettura indiretta). Tutte le informazioni raccolte, in seguito, sono state messe in relazione all'edificio (lettura diretta), ricercando le tracce direttamente sul manufatto con l'obiettivo di pervenire a una lettura interpretativa attendibile delle fasi costruttive. Ciò ha permesso di comprendere le cause di alcune anomalie costruttive e di quadri fessurativi che caratterizzavano l'edificio e di conseguenza di escludere la presenza di dissesti in evoluzione.

L'analisi della tecnica costruttiva è stata condotta analizzando i vari elementi strutturali secondo due livelli di lettura – il primo incentrato sulla fattura del singolo elemento costruttivo, il secondo sugli assemblaggi e le connessioni tra i vari elementi – e ha permesso di formulare un giudizio meccanico qualitativo per confronto con la regola dell'arte, comprendendo il ruolo giocato dal singolo elemento e l'efficacia delle connessioni.

La lettura incrociata ("rilievo critico") delle informazioni riguardanti la configurazione d'insieme, la tecnica costruttiva locale e le trasformazioni storiche, ha permesso di individuare i fattori che giocano un ruolo positivo nella risposta sismica (resistenze) e i fattori che con segno opposto costituiscono punti di debolezza dell'edificio (vulnerabilità). Questa sintesi conoscitiva ha consentito la interpretazione del comportamento sismico e la conseguente prefigurazione degli scenari di danno che sono i presupposti di base per la formulazione di un modello numerico aderente alla realtà osservata.

Si nota, infine, come la raccolta sistematica delle informazioni nell'unico elaborato del rilievo critico favorisca una gestione coordinata della mole di informazioni acquisite offrendo un quadro complessivo e organizzato della conoscenza raggiunta sull'edificio, nonché il grado di confidenza (e quindi l'attendibilità) con ogni informazione.

5. Conclusioni

La ricerca si è posta come obiettivo di base la individuazione di un approccio conoscitivo adeguato per la valutazione della sicurezza sismica e parimenti per la definizione di un progetto di miglioramento sismico conservativo dell'edificio murario storico.

Dalla disamina della normativa tecnica emerge il contributo essenziale offerto dalle Linee Guida con la formulazione del percorso della conoscenza nell'ambito del quale le indagini proprie della materia del restauro diventano gli elementi di base per la definizione del modello meccanico utilizzato per le verifiche.

Le Linee Guida forniscono le indicazioni per l'esecuzione di ogni attività, dal rilievo geometrico alle indagini diagnostiche, ciascuna delle quali può essere condotta con ampi margini di soggettività col risultato che il percorso della conoscenza può essere sviluppato seguendo approcci finanche opposti, finalizzati in alcuni casi a una conoscenza della realtà costruita ottenuta attraverso l'esecuzione di indagini quali la ricerca storica e il rilievo, in altri casi a una conoscenza più approfondita dei parametri meccanici dei materiali e del terreno di fondazione mediante l'esecuzione di indagini diagnostiche. Il fattore di confidenza, per come formulato dalle Linee Guida non riesce a tener conto di queste differenze sostanziali per cui risulta che questo coefficiente non può esprimere in maniera univoca la qualità della conoscenza acquisita. Inoltre, anche all'interno delle singole attività conoscitive, la discrezionalità con la quale vengono quantificati i fattori di confidenza parziali sembra tutt'altro che trascurabile.

Le problematiche relative alla definizione del fattore di confidenza sono connaturate alla difficoltà di tradurre univocamente in un coefficiente numerico un contenuto di conoscenza di natura eminentemente qualitativo e caratterizzato da un notevole grado di complessità. Tale contenuto di conoscenza, peraltro, costituisce un imprescindibile prerequisito non solo per una modellazione meccanica affidabile, ma anche per la definizione di una strategia di intervento conservativa. Da questo punto di vista, il problema maggiore non è tanto quello di pervenire a una quantificazione attendibile del grado di incertezza connaturato al livello di conoscenza raggiunto (ciò che agisce immediatamente nella onerosità delle verifiche di sicurezza), quanto di finalizzare il percorso della conoscenza alla gestione dell'intero processo progettuale (ciò che può fornire un criterio razionale per scegliere un particolare "percorso di conoscenza" tra quelli possibili).

Il corpo della ricerca consiste nell'analisi di 34 casi studio del Progetto Arcus i cui risultati per un verso confermano - o consentono di precisare - le criticità desumibili dalla semplice lettura critica delle Linee Guida e, per altro verso, suggeriscono una traccia interpretativa del

percorso della conoscenza – peraltro coerente con l’impianto concettuale delle Linee Guida – che sembra prestarsi più di altre a ridurre o, quanto meno, contenere entro limiti costantemente controllabili e rimodulabili il peso delle assunzioni soggettive.

Con riferimento alla discrezionalità implicitamente connaturata alla quantificazione dei fattori di confidenza parziali è evidente come identici valori parziali corrispondano a livelli di conoscenza significativamente diversi. L’esempio forse più chiaro è rappresentato dal rilievo geometrico per il quale nella quasi totalità dei casi studio del progetto Arcus si è assunto $F_{C1} = 0$, indipendentemente dal fatto che solo in un numero limitato di casi si sia effettivamente proceduto a un controllo sistematico ed esteso mentre in molti altri casi l’indagine si sia limitata al semplice controllo a campione o, addirittura, non siano state effettuate reali verifiche in situ. Ma altrettanto chiaro sembra il discorso relativo alle proprietà meccaniche dei materiali per le quali il valore $F_{C3} = 0.06$ (17 casi sui 34 casi studiati) – che le Linee Guida legano alla esecuzione di “limitate” indagini sui parametri meccanici – è stato assunto indipendentemente dalla effettuazione di prove diagnostiche in situ. Discorsi analoghi, sia pure più articolati²³⁸, si possono ripetere per le specificità storiche e costruttive della fabbrica.

Con riferimento alla possibilità di raggiungere valori confrontabili del fattore di confidenza seguendo percorsi di conoscenza diversi, valga l’esame comparato dei percorsi di conoscenza per i 34 casi studio²³⁹. Rispetto alla situazione che, da un punto di vista puramente teorico, le Linee Guida non escludono che si potrebbe assegnare lo stesso FC a percorsi concettualmente opposti, come sopra richiamato, l’analisi dei casi studio dimostra come, nella realtà, la situazione sia assai meno problematica. È vero che con diversi percorsi di conoscenza si riesce comunque a raggiungere una conoscenza adeguata (FC circa pari a 1,20) ma è altrettanto vero che detti percorsi non si configurano come approcci conoscitivi completamente diversi e risultano, invece, ottimamente confrontabili dal punto di vista della selezione delle informazioni che si ritiene utile approfondire.

Più precisamente, dall’analisi dei casi studio emerge che l’approccio conoscitivo più frequentemente usato è quello che assume come attività centrali quelle connesse al rilievo e alla ricerca storica. Ed è questa la traccia interpretativa (cui si accennava sopra) che sembra poter ridurre significativamente le incertezze connaturate alla procedura di quantificazione della conoscenza per come definita nelle Linee Guida. Essa dimostra infatti come l’adozione di un particolare approccio allo studio della costruzione muraria - che privilegia la conoscenza diretta degli assemblaggi strutturali rispetto alla caratterizzazione meccanica dei materiali che li compongono – conduca a fattori di confidenza di fatto attestati attorno al valore corrispondente alla conoscenza adeguata (FC = 1,20) con scarti assai modesti che più che

²³⁸ Vedi *supra* § 3.10

²³⁹ Vedi *supra* § 3.9 e tabelle di confronto a partire da pag. 205

riflettere una reale differenza di conoscenza porgono forse una misura della (ineliminabile) incertezza associata all'intero processo conoscitivo.

La adozione pressoché generalizzata di tale approccio da parte dei diversi gruppi di ricerca coinvolti nel progetto Arcus è una rassicurante conferma della sostanziale condivisione da parte della comunità scientifica di quali siano gli aspetti essenziali del comportamento strutturale delle antiche costruzioni murarie che occorre comunque saper valutare e di quanto sia difficile ridurre la complessità delle fabbriche storiche a modelli meccanici sintetici.

Peraltro l'approccio emerso come prevalente sembra poter efficacemente conciliare i due obiettivi che la conoscenza deve consentire di perseguire: quello della costruzione di un modello meccanico con il quale effettuare la valutazione di sicurezza e quello della definizione degli eventuali criteri per l'intervento di miglioramento sismico conservativo.

La proposta di affinamento del percorso della conoscenza avanzata in questo lavoro consiste proprio nella sistematizzazione dei risultati provenienti dalle attività di indagine in modo che essi siano coerentemente utilizzabili sia nella fase di verifica che in quella di progetto.

Il "rilievo critico", proposto quale strumento di gestione coordinata delle informazioni provenienti dalle indagini, favorisce una sintesi conoscitiva essenziale per la definizione del giudizio qualitativo sul comportamento strutturale e, in fase di progetto, per l'individuazione degli interventi minimi necessari alla conservazione e sicurezza dell'edificio.

In questo modo è instaurato un legame inscindibile tra le fasi del processo progettuale che consente di ripercorrere in ogni momento le ragioni del giudizio qualitativo, di verificare la effettiva necessità degli interventi e la coerenza delle scelte progettuali con la logica muraria che rappresentano requisiti imprescindibili per un progetto di miglioramento sismico conservativo.

6. Bibliografia

- Adam J-P, *L'arte di costruire presso i Romani, materiali e tecniche*, XI edizione, trad. a cura di M.P. Guidobaldi, Longanesi, Milano, 2014.
- Besana D., *Progettare il costruito tra conoscenza e interpretazione*, Alinea, 2008, ISBN: 9788860552280.
- Blasi C. (a cura di), *Architettura storica e terremoti. Protocolli operativi per la coscienza e la tutela*, Wolters Kluwer Italia, Milano, 2013.
- Cairolì Giuliani F., *L'edilizia nell'antichità*, Carocci editore, Roma, 2006.
- Cangi C., *Manuale del Recupero Strutturale e Antisismico*, DEI Tipografia del Genio Civile di Roma, 2005.
- Carocci C. F., *Metodologie di analisi sul costruito murario storico*, in Carocci C. F. (a cura di), *Conoscere per Abitare. Un seminario di studi a Motta Camastra*, a cura di Carocci, C.F., Lombardi Editori, Siracusa, 2008 - pp. 16-42
- Carocci C. F., Tocci C., *Sicurezza e conservazione degli edifici storici monumentali. La chiesa di San Nicolò l'Arena a Catania*, Gangemi, 2009.
- Carocci C.F., Tocci C., (a cura di), Giuffrè A., *Leggendo il libro delle antiche architetture. Aspetti statici del restauro. Saggi 1985 – 1997*, Gangemi, Roma, 2010.
- Croci G., *Conservazione e Restauro strutturale dei beni architettonici*, II edizione, Ed. Città Studi, Novara, 2012.
- Di Pasquale S., *L'arte del costruire tra conoscenza e scienza*, Marsilio, Venezia, 1996.
- Di Pasquale S., *Il contributo della storia nel restauro strutturale monumentale*, in Sarà G. (a cura di) *Restauro Strutturale*, Liguori, 1989.
- Di Pasquale S., *Architettura e Terremoti. Il caso di Parma: 9 novembre 1983*, Edizioni Pratiche, Parma, 1986.
- Dogliani F., Petrini V., Moretti A., (a cura di), *Le chiese e il terremoto: dalla vulnerabilità constatata nel terremoto del Friuli al miglioramento antisismico nel restauro, verso una politica di prevenzione*, LINT, Trieste, 1994.
- Dogliani F., *Nel restauro. Progetti per le architetture del passato*, Marsilio, Venezia, 2008.
- Dogliani F., Mazzotti P. (a cura di), *Codice di pratica per gli interventi di miglioramento sismico nel restauro del patrimonio architettonico. Integrazione alla luce delle esperienze nella Regione Marche, Regione Marche P.F. "Beni Culturali e Programmi di Recupero"*, Ancona, 2007.
- Dogliani F., *Stratigrafia e restauro. Tra conoscenza e conservazione dell'architettura*, LINT, 1997.
- Giovannetti F. (a cura di), *Manuale del recupero di Città di Castello*, Roma, Edizioni DEI-Tipografia del Genio Civile, 1992.

- Giuffrè A., *Sicurezza e conservazione dei centri storici. Il caso di Ortigia*, Laterza, Bari, 1993.
- Giuffrè A., Carocci C. F., *Codice di Pratica per la sicurezza e la conservazione dei Sassi di Matera*, Ed. La Bauta, 1997.
- Giuffrè A., Carocci C., *Codice di pratica per la sicurezza e conservazione del centro storico di Palermo*, Laterza, Bari, 1999.
- Giuffrè A., *Lecture sulla meccanica delle murature storiche*, Kappa, Roma, 1991.
- Marconi P., Giovanetti F., Pallottino E., Direzione Scientifica, *Manuale del Recupero del Comune di Roma*, Roma, Edizioni DEI-Tipografia del Genio Civile, 1989.
- Tocci C., 2011, *Il controllo strutturale del progetto di architettura*, in Barbera P., Carocci C.F., Dotto E. Tocci C., Giuseppe Damiani Almeysa. *Arte e Scienza in Architettura*, Lombardi, Siracusa.
- Boscolo Bielo M., *Vulnerabilità sismica degli edifici storici*, Legislazione Tecnica, 2013
- Braga F. (coordinatore), *Commentario al DM 16 gennaio 1996 e alla Circolare n. 65 del 10 aprile 1997 del Ministero LL.PP., a cura di ANIDIS e Servizio Sismico Nazionale*, Potenza, Lamisco, 1998.
- David P.R., Guccione M., (a cura di), *La protezione del patrimonio culturale. La questione sismica*, Roma, Gangemi, 1998.
- Gavarini C., 1999, *Introduzione all'ingegneria antisismica*, Edizioni Sole 24 ore, Milano
- Giuffrè, *Cento anni di norme sismiche italiane*, *Ingegneria Sismica* n. 2 anno 1987.
- Lenza P., Ghersi A., *Edifici in muratura alla luce della nuova normativa sismica*, Dario Flaccovio Editore, 2011.
- Moro L., *Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale*, a cura di L. Moro, Gangemi Editore, Roma, 2006.
- Podestà S., 2012, *Verifica sismica di edifici in muratura. Aggiornato a NTC e Linee guida per la visualizzazione e riduzione della vulnerabilità sismica*, Dario Flaccovio Editore, Palermo.
- Santoro L., 2007, *Rischio sismico e patrimonio monumentale. Linee guida. Valutazione e riduzione del rischio sismico secondo le norme vigenti*, Dario Flaccovio Editore.
- Sorrentino L., Caiafa F., *Le prescrizioni edilizie dell'Isola d'Ischia emanate dopo il terremoto del 1883 per gli edifici in muratura ordinaria: considerazioni strutturali*, Atti del XII Convegno ANIDIS L'Ingegneria Sismica in Italia, Pisa, 10-14 giugno 2007.
- Vallucci S., Quagliarini E., Lenci S., 2014, *Costruzioni storiche in muratura. Vulnerabilità sismica e progettazione degli interventi*, Wolters Kluwer.
- Relazione della Commissione incaricata di studiare e proporre *Norme Edilizie Obbligatorie per i Comuni colpiti dal terremoto di Calabria e Messina*, Archivio della Regia Accademia dei Lincei, Roma.

Riferimenti normativi

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Ministero dell'Interno, Decreto 14 gennaio 2008, approvazione *Norme Tecniche per le Costruzioni* (G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008 suppl. ord. n. 30).

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Circolare n. 617 del 2/02/2009, recante Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008», (G.U. 26 febbraio 2009, n. 47)

Ministero dei Beni e le Attività Culturali, Circolare n. 26 del 2 dicembre 2010 avente come oggetto «Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale allineate alle nuove Norme tecniche per le costruzioni». Documento approvato dal Consiglio Superiore Dei Lavori Pubblici, Assemblea Generale del 23 luglio 2010, prot. n. 92.

Legge 2 febbraio 1974, n. 64, Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche, (G.U. 21 marzo 1976, n. 76).

Icomos, *Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*, International Scientific Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage, 2003.

Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. ENV 1998-3, CEN: Brussels, 2005.

FEMA 356. (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. ATC: Washington. Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. (2007). ASCE Standard ASCE-SEI 41-06. ISBN-13: 978-0-7844- 0884-1

CIB W023 Commission, 2010, Guide for the Structural Rehabilitation of Heritage Buildings, ISBN: 978-90-6363-066-9

International Organization for Standardization ISO13822 (2001-2010), Bases for design of structures — Assessment of existing structures.

Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istruzioni per la Valutazione Affidabilistica della Sicurezza Sismica di Edifici Esistenti, CNR-DT212, Roma, 2013. <https://www.cnr.it/it/node/2632>.

Norme storiche

Le norme in elenco sono reperibili al sito internet www.staticaesismica.it/staticaesismica_normativa.html (ultima consultazione: giugno 2017)

R.D. n.193 18 aprile 1909, Norme tecniche ed igieniche obbligatorie per le riparazioni ricostruzioni e nuove costruzioni degli edifici pubblici e privati nei luoghi colpiti dal terremoto del 28 dicembre 1908 e da altri precedenti elencati nel R.D. 15 aprile 1909 e ne designa i Comuni. (G.U. n.95 del 22 aprile 1909)

R.D. n. 1080 del 6 settembre 1912, Norme obbligatorie per le riparazioni, ricostruzioni e nuove costruzioni degli edifici nei comuni colpiti dal terremoto, in sostituzione di quelle approvate col R. D. 18 aprile 1909, n. 193 (G.U n. 247 del 19 ottobre 1912)

R.D. n. 1261 del 12 ottobre 1913, Testo Unico delle leggi emanate in conseguenza del terremoto del 28 dicembre 1908. (G.U. n. 274 del 25 novembre 1913)

R.D.L. 29 aprile 1915 n. 573, Norme tecniche ed igieniche da osservarsi per i lavori edilizi nelle località colpite dal terremoto del 13 gennaio 1915. (G.U. n.117 del 11 maggio 1915)

R.D.L. 25 marzo 1935 n. 640, Nuovo testo delle norme tecniche di edilizia con particolari prescrizioni per le zone sismiche. (G.U. n.120 del 22 maggio 1935)

Ministero dei Lavori Pubblici, Ministero dell'Interno, Decreto Ministeriale 3 marzo 1975, recante *Approvazione delle norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche*. Supplemento ordinario G.U. 8 aprile 1975, n. 93.

Ministero dei Lavori Pubblici, Decreto Ministeriale 2 Luglio 1981, *Normativa per le riparazioni ed il rafforzamento degli edifici, danneggiati dal sisma nelle regioni Basilicata, Campania e Puglia*, supplemento ordinario G.U. del 21 luglio 1981, n. 198.

Circolare LL.PP. 21745, Istruzioni relative alla normativa tecnica per la riparazione ed il rafforzamento degli edifici in muratura danneggiati dal sisma (DM81), ai sensi della Legge 14 Maggio 1981, n. 219 - art. 10

Decreto del Ministro dei Lavori Pubblici del 24 gennaio 1986, Norme tecniche relative alle costruzioni antisismiche, G.U. 12 maggio 1986, n. 108.

Circolare del Ministero LL.PP. n. 27690 del 19 luglio 1986 recante "Istruzioni per l'applicazione del DM 24 gennaio 1986".

Circolare Ministero BB.CC.AA. n. 1032 del 18 Luglio 1986, Interventi sul Patrimonio monumentale a tipologia specialistica in zone sismiche: raccomandazioni.

D.M. 20 novembre 1987, Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento.

Circolare del Ministero BB.CC.AA. n. 1841 del 12 marzo 1991, *DIRETTIVE per la redazione ed esecuzione dei progetti di restauro comprendenti interventi di miglioramento antisismico e manutenzione, nei complessi architettonici di valore storico-artistico in zona sismica*, redatte dal Comitato nazionale per la prevenzione del patrimonio culturale dal rischio sismico recante.

Commissione Recupero del patrimonio culturale della Vali di Noto, di cui al DL 25 marzo 1996, n. 162, art.3, (convertito in legge 25 settembre 1996, n. 496), *LINEE GUIDA per la redazione dei progetti esecutivi concernenti interventi di recupero e di conservazione di costruzioni appartenenti al patrimonio culturale del Val di Noto, con particolare riferimento alla esigenza di conciliare gli aspetti di restauro con quelli della sicurezza sismica*, Siracusa, 30 agosto 1996.

Comitato nazionale per la prevenzione del patrimonio culturale dal rischio sismico, *ISTRUZIONI generali per la redazione di progetti di restauro nei Beni Architettonici di valore storico-artistico in zona sismica*, testo approvato il 28 novembre 1997 dall'Assemblea Generale dl Consiglio Superiore dei LL.PP.

Saggi e articoli scientifici

Baila A., Donà C., *La regola dell'arte nei trattati storici*, in Ponte - Progettare Recupero, Mensile di Progettazione, Gestione e Tecnica per Costruire, n. 4/2011, DeiT Tipografia del Genio Civile, Roma.

Belletti B., Damoni C., *Valutazione del Livello di rischio sismico di edifici storici tramite analisi globale e locale*, Atti del Convegno ANIDIS 2011.

Bosiljkova V., Uranjekb M., Zarnic r., Bokan-Bosiljkova V., 2010, *An integrated diagnostic approach for the assessment of historic masonry structures*, Journal of Cultural Heritage n. 11, pp. 239–249

Capitani C., *Rischio sismico. Il passato e le indicazioni per il futuro nel quadro normativo del MiBACT*, Notiziario dell'Arte inserto del fascicolo n. 6 del Bollettino d'Arte.

Carocci C. F., Ceradini V., Cremonini I., Mazzotti P. Panzetta M., *Fase attuativa dei programmi di recupero (art. 3, L. n. 61/1998): criteri per la valutazione degli interventi unitari*, *Bollettino Ufficiale della Regione Marche*, vol. 32, 1999, edizione speciale.

Carocci C. F., *Conoscenza, interpretazione, progetto. Gli interventi sull'esistente: la cupola del Duomo di Marsala*, in Barbera P., Carocci C.F., Dotto E. Tocci C., "Giuseppe Damiani Almeyda. Arte e Scienza in Architettura", Lombardi, Siracusa, 2011.

Carocci C. F., Cocina S., *Come l'analisi strutturale utilizza la ricerca storica*. In: Boschi E., Guidoboni E., "Catania, terremoti e lave. Dal mondo antico alla fine del novecento". Editrice Compositori, Bologna, 2002, pp. 277-289.

Cattari S., Lagomarsino S., *PERPETUATE Project: the proposal of a performance-based approach to earthquake protection of cultural heritage*, Atti del Convegno ANIDIS 2013.

Cattari S., Lagomarsino S., Bosiljkov V., D'Ayala D., 2014, *Sensitivity analysis for setting up the investigation protocol and defining proper confidence factors for masonry buildings*, Bulletin of Earthquake Engineering, DOI 10.1007/s10518-014-9648-3

Curti E., Podestà S., *Prevenzione sismica del patrimonio culturale: il complesso monumentale degli Uffizi a Firenze* in Progettazione Sismica n. 1/2010.

Doglion F., *Il rilievo critico su base stratigrafica. L'individuazione di elementi e di ambienti del manufatto edilizio*, in R. Francovich, R. Parenti (a cura di), *Archeologia e restauro dei monumenti*, Firenze, 1988.

Donà C., *Sicurezza strutturale e conservazione del costruito storico: alla ricerca di una reciproca conciliabilità*, in Atti del XIII Convegno Nazionale ANIDIS, L'ingegneria sismica in Italia, Bologna, 28 giugno – 2 luglio 2009.

Donà C., *Il restauro strutturale dell'edificio storico*, in Ponte - Progettare Recupero, Mensile di Progettazione, Gestione e Tecnica per Costruire, n. 10 ottobre 2011, DeiT Tipografia del Genio Civile, Roma

Donà C., *Miglioramento ed adeguamento antisismico: criteri concettuali e limiti nell'approccio al costruito storico*, in Atti del XIII Convegno Nazionale ANIDIS, L'ingegneria sismica in Italia, Bologna, 28 giugno – 2 luglio 2009.

Salvatore W. (Univ. Pisa), Iannelli P. (MiBACT), *Verifica della sicurezza statica ed analisi della vulnerabilità sismica dell'edificio 'La Sapienza' di Pisa*, dicembre 2013.

Franchin P., Pinto P.E., Rajeev P., *Confidence In The Confidence Factor*, in E. Cosenza (a cura di), Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint Workshop, 25-38, © 2009 Doppiavoce, Napoli, Italy.

Franchin P., Pinto P.E., Rajeev P., 2010, *Confidence Factor?*, Journal of Earthquake Engineering, 14:989–1007, DOI: 10.1080/13632460903527948

Lagomarsino S., *Le nuove Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, allineate alle Norme Tecniche per le Costruzioni 2008*, Seminario CIAS (Centro Internazionale di Aggiornamento Sperimentale-Scientifico), “Riabilitazione del costruito e adeguamento sismico”, Genova, 2010, disponibile on-line <http://www.cias-italia.it/bibliografia.php>

Lombardini N., Caspani S., *Sostenibilità come ottimizzazione del progetto di conservazione*, in atti del Convegno di Studi Quale Sostenibilità per il Restauro, Bressanone 1-4 luglio 2014, 2-11.

Lombardini N., *Consolidamento: nuova normativa sismica “livello di confidenza*, in Ananke n. 60, 2010.

Carlo Pellegrino, Mariano Angelo Zanini, Paolo Zampieri, Claudio Modena, *Il ruolo del livello di conoscenza nella verifica sismica di tipologie ricorrenti di ponti in c.a. e in muratura*, Atti del Convegno ANIDIS 2013.

Prandi C., Zirpoli A., Sattamino P., *Valutazione della vulnerabilità sismica del Palazzo dei Principi di Correggio (RE)*, in Progettazione Sismica n. 1/2014.

Pellegrino C., Zanini M. A., Zampieri P., Modena C., *Il ruolo del livello di conoscenza nella verifica sismica di tipologie ricorrenti di ponti in c.a. e in muratura*, Atti del Convegno ANIDIS 2013.

Podestà S., Romano C., 2012, *Structural pre-analysis for cultural heritage knowledge planning*, Structural Analysis of Historical Constructions - SAHC 2012, Jerzy Jasienko (ed), Wroclaw, Poland.

Reale C., Scheibel B., Vignoli F., Decanini F.D., Sorrentino L., 2004, *Il Regolamento Edilizio della città di Norcia del 1860: fra storia sismica e storia urbanistica*, Atti del XI Congresso “L'ingegneria Sismica in Italia”, Genova, 25-29 gennaio 2004.

Tempesta G., 2011, *La vulnerabilità sismica dell'edilizia storica e dei monumenti*, in Costruire in Laterizio n. 140, pp. XII-XVI

Jalayer F., Elefante L., Iervolino I., Manfredi G., *Confidence Factors And Structural Reliability*, in E. Cosenza (a cura di), Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint Workshop, 25-38, © 2009 Doppiavoce, Napoli, Italy

Monti G., Alessandri S., *Application Of Bayesian Techniques To Material Strength Evaluation And Calibration Of Confidence Factors*, in E. Cosenza (a cura di), Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint Workshop, 25-38, © 2009 Doppiavoce, Napoli, Italy

Tondelli M., Rota M., Penna A., Magenes G., 2012, *Evaluation of Uncertainties in the Seismic Assessment of Existing Masonry Buildings*, Journal of Earthquake Engineering, DOI: 10.1080/13632469.2012.670578, pp. 36–64

Progetti di ricerca

Ministero dei beni e delle Attività Culturali e del Turismo, Progetto di “Verifica sismica dei musei statali. Applicazione dell’Ordinanza PCM 3274/2003 s.m.i. e della Direttiva PCM 12/10/2007” , Ente finanziatore Arcus, Il Responsabile Unico del Procedimento: arch. Pia Petrangeli, Gruppo Tecnico: MiBACT con Consorzio Interuniversitario ReLUIS, (materiale inedito)

Ministero dei beni e delle Attività Culturali e del Turismo, Progetto “Sisma Abruzzo, risorse CIPE delibera 35/2005 - linea di attività verifiche della vulnerabilità sismica”, coordinato dalla DG PaBAAC e sviluppato con Convenzione del dicembre 2009 con il Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni dell’Università di Genova, in collaborazione con la Direzione Regionale e le Soprintendenze territoriali dell’Abruzzo, (materiale inedito).

Università degli Studi di Padova (leader) NIKER, New Integrated Knowledge Based Approaches To The Protection Of Cultural Heritage From Earthquake-Induced Risk, 7° programma di finanziamenti europei. <http://www.niker.eu/>

Lagomarsino S. (coordinatore), *PERPETUATE Project. Guidelines for the seismic performance-based assessment of cultural heritage assets*, 7° programma di finanziamenti europei, <http://www.perpetuate.eu/>

Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM), Berlin, Germany (Leader), ONSITEFORMASONRY On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings. EU Project funded within the 5 Framework Programme, Contract number EVK4-CT-2001- 00060, 2002-2004