

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale
Sezione: Ingegneria delle Infrastrutture Viarie e dei Trasporti

PAOLA SAPIENZA



**UN SISTEMA DI SUPPORTO ALLE DECISIONI
PER LA GESTIONE DELLA MANUTENZIONE
DEI PONTI DI UNA RETE VIARIA**

XXIV CICLO

Tesi di Dottorato di Ricerca in

Ingegneria delle Infrastrutture Viarie

Tutor:

Prof. Rosario Colombrita

Prof. Maria Grazia Augeri

Prof. Ivo Calìo

Prof. Salvatore Greco



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale
Sezione: Ingegneria delle Infrastrutture Viarie e dei Trasporti

PAOLA SAPIENZA



**UN SISTEMA DI SUPPORTO ALLE DECISIONI
PER LA GESTIONE DELLA MANUTENZIONE
DEI PONTI DI UNA RETE VIARIA**

XXIV CICLO

*Tesi di Dottorato di Ricerca in
Ingegneria delle Infrastrutture Viarie*

Tutor:

Prof. Rosario Colombrita

Prof. Maria Grazia Augeri

Prof. Ivo Calìo

Prof. Salvatore Greco

Indice

Indice	I
1. LA MANUTENZIONE DEI PONTI STRADALI E INQUADRAMENTO	
NORMATIVO	3
1.1 INTRODUZIONE	3
1.2 NASCITA DEI SISTEMI DI GESTIONE DELLA MANUTENZIONE DEI PONTI	4
1.3 LO STATO DI CONSERVAZIONE DELLE OPERE IN ITALIA	8
1.4 QUADRO NORMATIVO ITALIANO	11
1.5 IL PROBLEMA DELLA MANUTENZIONE DEI PONTI IN ITALIA	13
BIBLIOGRAFIA	16
2. I SISTEMI DI GESTIONE DELLA MANUTENZIONE DEI PONTI	19
2.1 INTRODUZIONE	19
2.2 CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI GESTIONE	19
2.2.1 Database	20
2.2.2 Ispezioni	20
2.2.3 Valutazione delle condizioni	27
2.2.4 Valutazione della stabilità del ponte	28
2.2.5 Predizione del tasso di deterioramento	28
2.2.6 Determinazione dei piani ottimali di manutenzione	29
2.3 STUDI DI LETTERATURA	30
2.3.1 Sistemi di gestione completi	31
2.3.2 Indici per la valutazione delle condizioni	34
2.3.3 Predizione del tasso di deterioramento e ottimizzazione	47
2.4 SISTEMI DI GESTIONE INFORMATIZZATI	49
2.4.1 Pontis	49
2.4.2 Bridgit	52
2.4.3 Danbro	53
2.4.4 Most (Moscow Bridge Management System)	54
BIBLIOGRAFIA	56
3. I PONTI: TIPOLOGIE COSTRUTTIVE, CAUSE DI DEGRADO E INTERVENTI MANUTENTIVI.....	59
3.1 INTRODUZIONE	59
3.2 TIPOLOGIE COSTRUTTIVE DEI PONTI	60
3.3 ELEMENTI COSTITUENTI I PONTI	62
3.3.1 Impalcato	63
3.3.2 Arco	63
3.3.3 Spalle	65

3.3.4 Pile.....	65
3.3.5 Pulvino.....	66
3.3.6 Fondazioni.....	66
3.3.7 Apparecchi d'appoggio.....	66
3.3.8 Giunti.....	67
3.3.9 Dispositivi antisismici.....	68
3.3.10 Cavi di precompressione.....	69
3.3.11 Sistema di smaltimento delle acque.....	70
3.4 TIPOLOGIE DI PONTI PRESENTI SULLE STRADE ITALIANE.....	70
3.4.1 Ponti ad arco in muratura.....	71
3.4.2 Ponti ad arco in calcestruzzo armato.....	72
3.4.3 Ponti a travata in calcestruzzo armato e in c.a.p.....	73
3.4.4 Ponti a travata misti.....	74
3.5 I MATERIALI E LE CAUSE DEL DEGRADO.....	75
3.5.1 Azioni interne.....	77
3.5.2 Azioni chimiche.....	77
3.5.3 Azioni elettro-chimiche.....	80
3.5.4 Azioni fisiche.....	82
3.5.5 Azioni chimico-fisiche.....	83
3.5.6 Azioni meccaniche.....	84
3.5.7 Azioni biologiche.....	85
3.5.8 Azioni naturali.....	85
3.6 LA MANUTENZIONE AI GIORNI NOSTRI.....	90
3.6.1 Diagnostica strumentale.....	91
3.6.2 Identificazione strutturale.....	93
3.6.3 Materiali innovativi.....	94
3.6.4 Tipologie di interventi manutentivi.....	95
3.7 LA VITA UTILE DEI PONTI.....	99
BIBLIOGRAFIA.....	101

4. L'ANALISI MULTICRITERIALE: TEORIA DEL DOMINANCE

BASED ROUGH SET.....	105
4.1 INTRODUZIONE.....	105
4.2 CLASSIFICAZIONE DEI PROBLEMI DECISIONALI.....	106
4.3 FASI DEL PROCESSO DECISIONALE.....	106
4.4 EVOLUZIONE DALL'ANALISI MONOCRITERIALE ALL'ANALISI MULTICRITERIALE.....	107
4.5 NOZIONI SULLE STRUTTURE DI PREFERENZA.....	110
4.5.1 Relazioni binarie.....	111
4.5.2 Strutture di preferenza.....	112
4.6 TECNICHE DI ANALISI MULTICRITERIALE.....	114
4.6.1 Modello dell'utilità multicriteriale.....	114
4.6.2 I metodi di surclassamento.....	115
4.6.3 I metodi interattivi.....	115
4.6.4 I modelli basati sulle regole decisionali.....	116

4.7 L'APPROCCIO DEI ROUGH SETS ALL'ANALISI DELLE DECISIONI.....	117
4.7.1 Tabella delle informazioni e relazione di indiscernibilità.....	117
4.7.2 Approssimazione inferiore e superiore.....	118
4.7.3 Frontiera.....	118
4.7.4 Qualità dell'approssimazione.....	119
4.7.5 Ridotti e Core.....	119
4.7.6 Regole decisionali.....	120
4.8 TEORIA DEL DOMINANCE BASED ROUGH SET.....	121
4.8.1 Tabella delle informazioni e relazione di dominanza.....	121
4.8.2 Classi decisionali.....	122
4.8.3 Approssimazioni basate sulla dominanza.....	122
4.8.4 Qualità dell'approssimazione, insiemi ridotti e core.....	126
4.8.5 Estrazione delle regole decisionali.....	127
BIBLIOGRAFIA.....	131
5. SVILUPPO DI UN SISTEMA DI SUPPORTO ALLE DECISIONI PER LA GESTIONE DELLA MANUTENZIONE DEI PONTI.....	135
5.1 INTRODUZIONE.....	135
5.2 IL SISTEMA DI SUPPORTO DECISIONALE PROPOSTO.....	136
5.3 ACQUISIZIONE DEI DATI: PROPOSTA DI UNA NUOVA SCHEDA PER IL RILIEVO DEL DEGRADO.....	138
5.4 APPLICAZIONE DEL DRSA DOMINANCE BASED ROUGH SET APPROACH PER DEFINIRE L'URGENZA DELLE ATTIVITA' MANUTENTIVE 157	
5.4.1 Definizione dei criteri che guidano il processo decisionale.....	159
5.4.2 Tabella delle informazioni e relazione di dominanza.....	163
5.4.3 Approssimazioni basate sulla dominanza.....	169
5.4.4 Qualità dell'approssimazione, insiemi ridotti e core.....	175
5.4.5 Estrazione delle regole decisionali.....	178
5.4.6 Definizione del grado di urgenza delle attività manutentive.....	180
5.5 PROCESSO DI OTTIMIZZAZIONE PER L'ALLOCAZIONE DELLE RISORSE PER GLI INTERVENTI MANUTENTIVI SUI PONTI.....	181
5.5.1 Definizione delle tipologie di intervento e stima dei costi.....	182
5.5.2 Procedura di ottimizzazione per l'allocazione delle risorse.....	183
5.6 VANTAGGI DEL SISTEMA PROPOSTO.....	193
BIBLIOGRAFIA.....	194
6. CASI DI STUDIO.....	195
6.1 INTRODUZIONE.....	195
6.2 FASI DELLO STUDIO.....	195
6.3 1° CASO DI STUDIO: PONTI SULLA STRADA STATALE 385.....	196
6.3.1 Acquisizione dei dati.....	198
6.3.2 Determinazione del grado di urgenza delle attività manutentive.....	238
6.3.3 Stima dei costi.....	242

6.4 2° CASO DI STUDIO: PONTE SUL FIUME CASSIBILE	244
6.4.1 Acquisizione dei dati	244
6.4.2 Determinazione del grado di urgenza delle attività manutentive	253
6.4.3 Stima dei costi	254
6.5 3° CASO DI STUDIO: PONTE D'AGRO' E FIUMEDINISI.....	255
6.5.1 Acquisizione dei dati	255
6.5.2 Determinazione del grado di urgenza delle attività manutentive	259
6.5.3 Stima dei costi	260
6.6 FASE DI OTTIMIZZAZIONE.....	260
BIBLIOGRAFIA	271
CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	273

PREMESSA

La sicurezza delle reti stradali costituisce un presupposto fondamentale per lo sviluppo delle attività economiche e sociali di qualunque Paese industrializzato. Gli elementi più vulnerabili all'interno di una rete stradale sono rappresentati dalle opere d'arte e, in particolare, fra queste ritroviamo i ponti, i viadotti e i cavalcavia. La costruzione di tali opere richiede un impegno importante sia da un punto di vista economico che ingegneristico, sia nella fase iniziale ma anche durante la fase di esercizio. Da alcuni decenni l'osservazione dei ponti presenti nel panorama mondiale ha messo in luce fenomeni di degrado che ne possono compromettere la sicurezza. Il problema è tanto più grave quanto più aumentano i flussi veicolari e i carichi ad essi connessi.

La sicurezza ed efficienza dei ponti, e più in generale delle reti stradali, è legata a un'attività di manutenzione costante, rivolta a mantenere le opere in "buone" condizioni. Tuttavia affinché la manutenzione sia efficace è necessario che venga compiuta con una tempistica adeguata, vale a dire prima che il degrado abbia compromesso la possibilità di intervenire o reso antieconomico l'intervento.

La pianificazione della manutenzione nasconde problematiche di non semplice soluzione legate all'elevato numero di ponti gestiti, alle molteplici tipologie di opere e di cause di degrado, alle limitate risorse economiche destinate agli interventi.

E' possibile affermare che, nel nostro Paese, molte amministrazioni non sono dotate di una completa catalogazione del patrimonio infrastrutturale gestito e non dispongono di dati sufficienti per la corretta valutazione dello stato di salute di tali opere. La carenza di tali informazioni rende impossibile pervenire ad una programmazione razionale degli interventi manutentivi da eseguire.

Negli ultimi decenni molti studiosi e diverse società di gestione di reti stradali hanno rivolto il loro interesse alla definizione di Sistemi di Gestione per i Ponti (SGP) o con dizione anglosassone Bridge Management System (BMS). Si tratta di procedure standardizzate che, a partire dal rilievo dello stato di degrado dell'opera, generalmente tramite ispezioni visive, e mediante l'applicazione di opportuni modelli matematici, determinano la tipologia degli interventi da eseguire e il momento in cui devono essere eseguiti.

Nel presente lavoro viene proposto un nuovo sistema di gestione che si basa su una analisi di tipo multicriteriale (Dominance Based Rough Set Approach) che serve da supporto alla gestione delle attività manutentive dei ponti e alla programmazione degli interventi finalizzata ad una ottimale allocazione delle risorse disponibili. La metodologia messa a punto è suddivisa in due fasi:

- in una prima fase, l'applicazione della procedura consente di ordinare i ponti secondo una scala di priorità delle attività manutentive, sulla base di decisioni relative a "casi esemplari" che lo stesso decisore contribuisce a fornire e che possono essere modificati e integrati man mano che si arricchisce l'esperienza diretta (anche dati proprie) o indiretta (letteratura tecnica) a disposizione dell'ente gestore e che può essere di volta in volta modificata in base alle sue esigenze e/o politiche di gestione;

- in una seconda fase, la metodologia viene applicata nel processo di ottimizzazione degli interventi, attraverso un metodo interattivo che utilizza ancora una volta il Dominance Based Rough Set Approach.

L'applicabilità del metodo è stata verificata mediante dei casi di studio su un insieme di ponti, aventi caratteristiche diverse, collocate sulla viabilità secondaria della Sicilia orientale.

I risultati ottenuti, presentati nel capitolo sei, hanno confermato l'adeguatezza del metodo proposto nel fornire una descrizione oggettiva del complesso delle opere esaminate e nel fornire un quadro operativo della manutenzione. Naturalmente a questa prima fase di studio dovrà eseguire una successiva fase di sperimentazione sul campo, applicando il metodo alla gestione di una intera rete viaria, unitamente con altre metodologie standard già consolidate.

CAPITOLO 1

LA MANUTENZIONE DEI PONTI STRADALI E INQUADRAMENTO NORMATIVO

1.1 INTRODUZIONE

La manutenzione delle opere infrastrutturali rappresenta, ai giorni nostri, un elemento fondamentale per lo sviluppo delle attività economiche e sociali del nostro Paese. L'obiettivo della gestione della manutenzione dei ponti e delle opere d'arte in una rete stradale è quello di garantire l'efficienza al fine di facilitare lo spostamento di merci e persone e ridurre i costi di intervento.

Nel caso specifico dei ponti si parla di Sistema per la Gestione dei Ponti (SGP), o con dizione anglosassone, *Bridge Management System* (BMS), e comprende il complesso delle attività che permettono di mantenere in efficienza la struttura garantendo elevati standard di sicurezza e funzionalità, sin dalla fase di progettazione e costruzione per continuare durante la fase di esercizio [1], è quindi “*uno strumento di assistenza dei gestori delle opere d'arte stradali nella scelta delle migliori strategie di gestione, in accordo con le loro esigenze politiche, sociali e soprattutto economiche*” (definizione dell'OECD, Road Research, Francia).

I sistemi di gestione dei ponti possono operare su due livelli [2]:

- *Project Level Bridge Management*, che si occupa della gestione della manutenzione di ogni singolo ponte, considerato come isolato dalla rete stradale a cui appartiene. In questo caso il processo decisionale si basa principalmente sullo stato di degrado funzionale e strutturale in cui versa l'opera.
- *Network Level Bridge Management*, in cui viene considerata la funzione dell'opera all'interno della rete stradale. In questo caso il processo decisionale si basa anche su considerazioni politiche e socio-economiche.

Il processo di gestione della manutenzione è legato al processo di gestione della rete viaria al fine di incrementare:

- la qualità del servizio offerto (sia in termini di livello di servizio che in termini di continuità),
- la sicurezza degli utenti e del territorio circostante (persone e cose poste in prossimità delle sedi stradali).

Gli enti gestori hanno, da un lato, il compito di garantire il mantenimento in efficienza dei ponti stradali e della rete e dall'altro l'esigenza di ottimizzare il budget disponibile.

Un sistema di gestione dei ponti consta di alcune fasi principali:

1. *fase di acquisizione*: comprende la catalogazione delle opere, del loro stato di conservazione, identificazione dei fattori di rischio ambientali, individuazione del traffico sulla rete, etc..;

2. *fase di elaborazione*: a partire dai dati raccolti viene eseguita una classificazione in termini di urgenza delle attività manutentive;

3. *fase decisionale*: è rivolta alla definizione degli interventi manutentivi necessari al mantenimento o al ripristino della funzionalità dell'opera, ottimizzando il budget a disposizione.

Il gran numero di variabili in gioco che in genere caratterizza le fasi 2 e 3 rende il processo di gestione della manutenzione estremamente complesso; la soluzione può passare attraverso tecniche rigorose (che mirano a restituire la soluzione ottimale) o tecniche euristiche (in cui la soluzione non è quella ottimale, ma è prossima ad essa ed è disponibile in tempi ragionevoli). Nella letteratura sono stati proposti diversi sistemi di gestione che sfruttano tecniche diverse e algoritmi a supporto delle decisioni (Decision Support System – DSS) che aiutano l'ente gestore sia nella definizione delle scelte operative, che nella definizione delle scelte strategiche.

1.2 NASCITA DEI SISTEMI DI GESTIONE DELLA MANUTENZIONE DEI PONTI

In America l'esigenza di attuare un sistema di gestione nasce come risposta al crollo del Point Pleasant Bridge (fig.1-2), conosciuto anche come Silver Bridge, avvenuto il 15 dicembre 1967 [3] [4], 39 anni dopo la sua ultimazione causando la morte di 46 persone. Era un ponte sospeso di 213 m di luce i cui cavi principali erano costituiti da catene che nella zona centrale coincidevano con il corrente superiore delle travi reticolari che

supportavano l'impalcato. Il motivo del crollo fu proprio la rottura per fatica di alcuni elementi delle orecchiette che formavano le catene [5].



Figura 1 Point Pleasant Bridge prima del crollo [6]



Figura 2 Point Pleasant Bridge dopo il crollo [6]

Tale crollo mise in evidenza la quasi totale mancanza di informazioni relative all'effettivo stato di degrado dei ponti da cui è scaturita la necessità di attuare un adeguato programma delle ispezioni e della manutenzione [7]. La Federal Highway Administration (FHWA) istituì, allora, il Bridge Inventory Program, nel quale vennero stabiliti degli standard nazionali per le procedure relative alle ispezioni (NBIS - National Bridge Inspection Standards) e per l'aggiornamento dei dati relativi ai ponti (NBI - National Bridge Inventory). Successivamente, nei primi anni '90, ordinò a tutti gli Stati l'adozione di un Bridge Management System.

Ad ogni stato fu lasciata la possibilità di scegliere tra diversi sistemi di gestione, già presenti e implementati in opportuni software:

- Pontis (Network Level Analysis)
- BRIDGIT (Project Level Analysis)

In alternativa gli stati sono stati lasciati liberi di sviluppare un proprio sistema, tale opportunità è stata attuata dagli stati dell' Alabama, Indiana, New York State, North Carolina and Pennsylvania. Attualmente il sistema di gestione maggiormente diffuso negli stati uniti è stato implementato in un software denominato "Pontis".

In Europa al momento ogni paese utilizza un proprio sistema di gestione. Su proposta del Forum of European National Highways Research Laboratories (FEHRL), nel 1998 è stato avviato il Progetto BRIME (Bridge Management in Europe) con l'obiettivo di sviluppare un sistema unificato per la gestione dei ponti, da applicarsi all'intera rete stradale europea, partendo proprio dallo studio dei sistemi di gestione utilizzati dai singoli Paesi membri.

La raccolta dei dati necessari a caratterizzare i diversi sistemi di gestione è avvenuta attraverso l'invio di un questionario agli stati facenti parte dell'unione europea e ad alcuni stati extraeuropei noti per essere a buon punto nello sviluppo dei sistemi di gestione dei ponti (Canada, Giappone e USA). Solo alcuni Paesi hanno risposto al questionario, e tra questi non è presente l'Italia:

- ✓ D - Germania - Bundesanstalt für Strassenwesen: Dr. Peter Haardt
- ✓ E - Spagna - CEDEX: Rafael. Astudillo
- ✓ F - Francia - Road Directorate: J.L. Astruc
- ✓ UK – Gran Bretagna - Highways Agency: Parish Tailor
- ✓ NO - Norvegia- Directorate of Public Roads: Borre Stenvold
- ✓ SI - Slovenia - Road Directorate of the Republic of Slovenia: Miklavz Cepon
- ✓ BE - Belgio - Ministry of Equipment and Transportation of Wallonie: P. Demars
- ✓ CRO - Croazia - Croatian road Administration: Vlasta Zugelj
- ✓ DK - Danimarca - Danish Road Directorate: Jorn Lauridsen
- ✓ FIN - Finlandia - Finnish National Road Administration: Mrs Maria-Kaarina Söderqvist

- ✓ IE - Irlanda - National Roads Authority: Tom McCormack
- ✓ PT - Portogallo - Motorways of Portugal -BRISA: Mario Cardoso & Mrs Sonia Santos
- ✓ SE - Svezia - National Road Administration: Lennart Lindblad
- ✓ FHWA - USA - Federal Highway Administration: Edgar P. Small
- ✓ NY - New York City DOT: Bojidar Yanev
- ✓ CA - California DOT: Richard W. Shepard

Le risposte ricevute dalla FHWA degli Stati Uniti d'America sono state trattate in modo differente, per tenere conto delle differenti caratteristiche delle reti viarie e dei ponti rispetto a quelli europei.

La ricerca è stata organizzata in sette gruppi di lavoro, ciascuno di essi era diviso in due parti: la prima si è occupata di esaminare lo stato dell'arte sui sistemi di gestione utilizzati e l'altra si è occupata di identificare le esigenze che un BMS dovrebbe soddisfare. I sette sottogruppi erano suddivisi come segue:

- ✓ Gruppo 1: classificazione delle condizioni di una struttura;
- ✓ Gruppo 2: valutazione della capacità di carico dei ponti;
- ✓ Gruppo 3: valutazione degli effetti di deterioramento della capacità di carico;
- ✓ Gruppo 4: determinazione della velocità di deterioramento delle strutture soggette a corrosione;
- ✓ Gruppo 5: decidere se una struttura deteriorata debba essere riparata o sostituita;
- ✓ Gruppo 6: stabilire la priorità dei ponti di una rete stradale in termini di necessità di interventi di riparazione, riabilitazione o miglioramento;
- ✓ Gruppo 7: sviluppare una struttura per un sistema di gestione dei ponti.

Tale studio ha evidenziato che i Paesi Europei adottano sistemi di gestione, parziali o totali, notevolmente disomogenei tra loro in termini di dati di partenza, di procedure utilizzate e di criteri per la valutazione dei risultati ottenuti.

Dei sedici Paesi che hanno risposto, undici utilizzano un BMS computerizzato, tre non utilizzano un BMS ma ne stanno sviluppando uno, e due di loro utilizzano un sistema parzialmente computerizzato. Nella maggior parte dei Paesi il sistema è utilizzato per la gestione dei ponti della rete autostradale nazionale e per le strade a scorrimento veloce.

Alcuni sistemi di gestione adottano metodi qualitativi nella valutazione delle condizioni di un ponte e procedure quantitative nella valutazione strutturale, mentre altri utilizzano determinazioni quantitative di parametri di durabilità o metodi di affidabilità per la valutazione strutturale [8]; inoltre la maggior parte dei Paesi non utilizza modelli di deterioramento per predire le condizioni future. Nessun paese ha il suo BMS collegato ad un sistema di gestione delle strade.

I risultati del progetto sono stati riportati all'interno di 13 documenti e in un rapporto finale nel quale vengono evidenziati gli aspetti più rilevanti dei BMS utilizzati dai Paesi partecipanti al progetto, è delineato un sistema di gestione dei ponti che potrebbe essere applicato all'intera rete stradale europea.

Tale progetto è risultato essere una guida in Europa nella proposizione di tecniche di pianificazione degli interventi di manutenzione dei ponti stradali ispirando alcuni metodi sviluppati in Italia in cui l'approccio al problema ha previsto la strutturazione di sistemi dove lo stato di conservazione del ponte viene identificato dall'andamento di specifici indicatori di prestazione dedotti sulla base di ispezioni visive (Proverbio et al., 2002 [9], Franchetti et al., 2003[10], Gori, 2006 [11]).

1.3 LO STATO DI CONSERVAZIONE DELLE OPERE IN ITALIA

Il patrimonio di ponti e viadotti sulla rete viaria italiana è piuttosto rilevante, soprattutto lungo la viabilità principale, a causa dell'orografia piuttosto irregolare che caratterizza il nostro Paese. La maggior parte di essi sono stati realizzati in assenza di norme che introducevano i concetti di durabilità, qualità dei materiali, manutenzione programmata,...; inoltre le infrastrutture viarie sono spesso state pensate come un bene durevole nel tempo e tale considerazione ha fatto sì che gli interventi fossero di volta in volta realizzati solo quando il degrado si era palesemente manifestato, quindi una parte considerevole dei ponti presenti, oggi richiede interventi di manutenzione e/o di valutazione delle sicurezze sia nelle condizioni di normale esercizio che in previsione di eventi eccezionali come ad esempio alluvioni, terremoti etc... (NTC 2008 [12]).

L'esigenza di eseguire interventi di manutenzione è resa ancora più evidente dal crollo delle opere d'arte a cui si è assistito e si continua ad assistere negli ultimi anni.

L'immagine sotto riportata (fig. 3) si riferisce ad un crollo improvviso, avvenuto nel 1999, di un ponte in cemento armato precompresso lungo la litoranea SS 114, in Sicilia, dopo circa 50 anni di servizio. Il tutto è avvenuto senza nessun segnale premonitore. Il crollo ha interessato la prima campata in direzione nord- sud, la quale ha ceduto secondo una linea di frattura trasversale, rispetto alla direzione del ponte, e posta a circa 1/3 della lunghezza della campata.

Il collasso è stato caratterizzato dall'apertura dei giunti tra i conci prefabbricati e dalla fuoriuscita dei cavi di precompressione dagli alloggiamenti. L'ispezione dei conci collassati e delle campate del ponte ancora in opera ha evidenziato la presenza di un quadro fessurativo molto esteso e orientato secondo lo sviluppo dei condotti di post-tensionamento.

Gli accertamenti hanno dimostrato che le cause sono da ricercarsi, oltre che da errori costruttivi, nell'assenza di alcun tipo di ispezione programmata[13].



Figura 3 Crollo del Ponte S. Stefano [14]

L'immagine sotto riportata (fig. 4) si riferisce, invece, al crollo di un ponte a Piacenza, lungo la strada che collega Piacenza a Lodi, avvenuto nell'aprile del 2009. Il collasso è stato causato dall'ondata di piena del fiume Po che sommata ai detriti trasportati dall'acqua ha causato il cedimento dell'arcata, seguito dal crollo dell'intera struttura.



Figura 4 Crollo del ponte sul fiume Po [15]

Un altro esempio è costituito dal crollo del ponte sul fiume Aterno tra la SS261 e Fossa (fig.5), causato dal terremoto che ha colpito il territorio dell'Aquila nell'aprile del 2009.



Figura 5 Crollo del ponte sul fiume Aterno [16]

Tali fenomeni, che vanno via via aumentando a causa dei processi degenerativi a cui sono sottoposti i materiali nel tempo, o ancora agli eventi eccezionali come sismi e alluvioni, ogni volta sensibilizzano i tecnici, l'opinione pubblica e la classe politica sui problemi legati alla sicurezza delle strutture; tutto ciò si è tradotto in un processo di revisione radicale dei criteri di progettazione a livello normativo, per i ponti di nuova progettazione, e evidenzia la necessità da parte degli enti gestori di attuare un sistema di

sorveglianza adeguato e costante delle opere d'arte a cui dovrebbe seguire la successiva programmazione degli interventi di manutenzione, per i ponti in esercizio.

1.4 QUADRO NORMATIVO ITALIANO

L'impianto normativo relativo all'ispezione e alla manutenzione delle opere d'arte stradali è costituito essenzialmente dalle seguenti disposizioni:

- *Circolare n° 6736/61/AI del 19.07.1967* emanata dal Ministero dei Lavori Pubblici sul “*Controllo delle condizioni di stabilità delle opere d'arte stradali*” [17]; nella circolare sono stabilite le regole per l'ispezione delle strutture mettendo in evidenza l'importanza di ispezioni accurate e periodiche, della vigilanza assidua del patrimonio di opere d'arte stradali e di conseguenza , delle operazioni di manutenzione e ripristino. I punti principali della Circolare del 1967, sono l'esecuzione di una ispezione trimestrale, eseguita da tecnici, e da un ispezione annuale eseguita da ingegneri; la Circolare ne illustra le modalità per l'esecuzione e prevede la compilazione di un rapporto d'ispezione e di una scheda con i dati del manufatto e delle sue caratteristiche principali.
- *Circolare LL.PP n° 34233 del 25.02.1991* “*Istruzioni relative alla normativa dei ponti stradali*” [18], la quale tratta le problematiche inerenti la manutenzione e la gestione delle opere d'arte stradali. Nella Circolare del 1991 vengono riprese le medesime questioni della Circolare del 1967 ma con minore determinazione, pertanto il punto di riferimento è sempre la circolare del '67 [19].
- *Norma C.N.R. (Boll. Uff. n° 165/93)* “*Istruzioni sulla pianificazione della manutenzione stradale ponti e viadotti*” [20], in cui vengono dettagliatamente descritte tutte le fasi del processo manutentivo, con particolare riferimento alla vigilanza, alle ispezioni, alla manutenzione ed agli interventi statici di restauro, adeguamento e ristrutturazione.
- *D. M. 14/01/2008* “*Norme tecniche per le costruzioni*”[12] e successiva *Circolare n°617 del 2.02.2009* “*Istruzioni per l'applicazione delle “Nuove norme tecniche per le costruzioni” di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008*” [21] in cui vengono introdotti i concetti di *durabilità* definita come “conservazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali e delle strutture, proprietà

essenziale affinché i livelli di sicurezza vengano mantenuti durante tutta la vita dell'opera, che deve essere garantita attraverso una opportuna scelta dei materiali e un opportuno dimensionamento delle strutture, comprese le eventuali misure di protezione e manutenzione” e di *vita nominale* di una struttura definita 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”.

- *D. P. R. n° 207 del 5.10.2010 “Regolamento di esecuzione ed attuazione del Decreto Legislativo n°163 del 12.04.2006 recante Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture in attuazione delle direttive 2004/17/CE e 2004/18/CE”* [22] che prevede all'articolo 38, comma 1, la redazione del *piano di manutenzione* nel quale deve essere pianificata e programmata l'attività di manutenzione dei manufatti al fine di mantenere nel tempo la funzionalità, le caratteristiche di qualità, l'efficienza ed il valore economico delle strutture.

Dall'analisi delle disposizioni che regolano la sorveglianza e la manutenzione dei ponti è possibile evidenziare tre aspetti:

- ✓ progressivo passaggio da una normativa prescrittiva ad una normativa prestazionale: nel '67 si parlava di ispezioni trimestrali/annuali a tappeto su tutti i ponti, eseguite da geometri/ingegneri, ma già nel 1991 non viene più indicata la qualifica di chi deve eseguire le ispezioni, che viene definito “tecnico incaricato” e soprattutto si perde l'imposizione di una frequenza prefissata delle ispezioni, bensì questa deve essere commisurata alla tipologia del manufatto o decisa a seguito delle operazioni di vigilanza delle opere;
- ✓ maggiore attenzione nei riguardi della conservazione delle opere di nuova concezione che si attua già in fase di progettazione attraverso l'utilizzo di materiali opportuni, l'adozione di misure di protezione e la redazione dei piani di manutenzione;
- ✓ nonostante esistano delle normative che regolano la vigilanza, le ispezioni e la manutenzione, non è obbligatorio per gli enti gestori l'adozione di un sistemi di gestione (BMS).

1.5 IL PROBLEMA DELLA MANUTENZIONE DEI PONTI IN ITALIA

In Italia, la sorveglianza delle opere d'arte iniziò verso la fine degli anni '60 a seguito del crollo nel 1967 di una campata del Ponte Ariccia (fig. 6) sulla via Appia presso Roma causata dal cedimento di un pilone. Il ponte costruito nell'800 era un viadotto con campate ad arco alcune delle quali distrutte durante i bombardamenti della II guerra mondiale e successivamente mal ricostruite [23]. A seguito di tale crollo venne emanata la *Circolare LL. PP. n° 6736/61/AI del 19.07.1967* [17] che stabiliva le modalità e i tempi per effettuare le ispezioni delle opere d'arte.



Figura 6 Crollo ponte Ariccia [24]

Dal 1994, con l'emanazione della legge Merloni [25], si inizia a parlare di manutenzione a livello nazionale. Bisogna però aspettare il 1999, con l'entrata in vigore del regolamento *DPR n° 554/99 "Regolamento d'attuazione della legge quadro in materia di lavori pubblici 11/02/1994 n°109, e successive modificazioni"* [26], che si inizia a parlare nello specifico di che cos'è un piano di manutenzione, di quali sono le sue finalità e di come deve essere composto.

Tali norme tuttavia hanno riguardato i ponti di nuova realizzazione. Per i ponti già costruiti, invece, il processo di manutenzione, che si genera a partire dalla sorveglianza dei ponti, in Italia, risulta particolarmente complesso a causa delle seguenti circostanze:

- la gestione delle strade è affidata a enti diversi (Anas, Autostrade, Province, Comuni,...), infatti con l'emanazione del *D. L. n° 112 del 31.03.1998 "Conferimento di funzioni e compiti amministrativi dello Stato alle regioni ed agli enti locali, in attuazione del capo I della L. 15 marzo 1997, n. 59"* [27] lo Stato trasferisce la proprietà e delega agli Enti Locali (Regioni e Province) la responsabilità della gestione delle strade; le Amministrazioni Locali, pertanto, vengono chiamate a rispondere della funzionalità e sicurezza del patrimonio loro affidato;

- molto spesso gli enti non possiedono neanche un database delle opere d'arte per le quali risultano responsabili, quindi l'eventuale consultazione dei dati relativi alle opere contenute all'interno di copie cartacee, file differenti,... risulta difficoltosa;

- la catalogazione delle opere d'arte, quando è stata eseguita, risulta limitata ad un numero ristretto di manufatti, con schedature contenenti informazioni sommarie e incomplete spesso riguardanti solo una descrizione superficiale delle opere;

- non esiste un protocollo comune nella gestione e nella manutenzione delle reti viarie e delle opere d'arte;

- le visite programmate, quando effettuate, spesso vengono attuate sulla base di semplici ispezioni visive e senza il supporto dei necessari protocolli di ispezione, e da parte di personale che in molti casi non possiede le conoscenze tecniche necessarie.

-i protocolli di ispezione, quando esistenti, spesso non sono di supporto al processo decisionale che non può prescindere dal ruolo dell'opera all'interno della rete viaria;

- spesso la responsabilità di vigilanza sul territorio è delegata a pochi soggetti che hanno il compito di garantire sicurezza ed efficienza su diverse centinaia di km di reti viarie;

- gli enti gestori hanno, da un lato, l'obbligo di garantire il mantenimento in efficienza della rete e dall'altro l'esigenza di ottimizzare il budget disponibile, in molti casi insufficiente a soddisfare le prescrizioni di legge.

I fattori sopra esposti fanno sì che il rispetto delle normative non venga sempre garantito. E' chiaro quindi che nonostante gli sforzi attuati dagli enti gestori, molte opere versano in uno stato di degrado evidente (fig. 7-8).



Figura 7 Ponte sulla SP 182



Figura 8 Ponte sulla SP 20/III

Negli ultimi decenni, inoltre, la politica economica ha preferito investire sulla realizzazione di opere nuove piuttosto che canalizzare le risorse disponibili sugli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria volti al ripristino funzionale e strutturale delle opere esistenti [28].

A partire dalle considerazioni sopra esposte è chiaro che l'attuazione di un adeguato sistema di gestione, che venga guidato preferibilmente attraverso delle direttive comunitarie, potrebbe aiutare gli enti gestori nella coordinazione delle fasi necessarie alla manutenzione (vigilanza, ispezioni, interventi), evitando spreco di risorse (economiche e intellettuali), consentendogli di avere un quadro sempre chiaro e aggiornato del patrimonio gestito.

BIBLIOGRAFIA

- [1] B. Godart, P. R. Vassie (2001) "Bridge management systems: extended review of existing systems and outline framework for a European systems". *Deliverable D13* BRIME.
- [2] A. Pipinato (2008) "Nuovi approcci per il management, la manutenzione e il controllo delle reti di ponti" *Rivista Strade e Autostrade* n°72 anno XII Nov./Dic. 2008.
- [3] K. L. Rens; C. L. Nogueira; and D. J. Transue (2005) "Bridge Management and Nondestructive Evaluation" *Journal of performance of constructed facilities*, ASCE, 19, 3-16.
- [4] J. Aldayuz , D. Mascia (2007) "A Vision for a State-of-Art Bridge Management System", *Atti del convegno "Manutenzione programmata delle infrastrutture e sicurezza"* Genova.
- [5] L. F. Troyano (2006) "Terra sull'acqua – Atlanta storico universale dei ponti" *Dario Flaccovio Editore*.
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Silver_Bridge
- [7] R. A. Hartle, W.J. Amrhein, K.E. Wilkinson III, D.R. Baughman and J. J. Tkacs "Bridge inspector's training manual 90".
- [8] R. Astudillo (2002) "BRIME: Le basi per un sistema europeo di gestione dei ponti", *Atti del convegno di Messina*, 30 settembre 2002.
- [9] Proverbio, E., Venturi, V., (2002) – "Metodologie per la gestione delle ispezioni visive e delle indagini strumentali", *La valutazione del degrado dei ponti ed i sistemi di gestione in Europa*, *Atti del convegno di Messina*, 30 settembre 2002.
- [10] Franchetti, P., Pellegrino, C., Soffiato, A., Modena, C. (2003) - "La manutenzione programmata di ponti e viadotti: criteri per la valutazione dell'efficienza in servizio", *XIII Convegno Nazionale SIV* (Società Italiana Infrastrutture Viarie), Padova, Italia, 30-31 ottobre 2003.
- [11] Gori, R. (2006) - "Preservation of historical metal bridges: evaluation of their structural reliability", *TICCIH Congress*, 14-18 settembre, Terni, Italia, 2006.
- [12] D. M. del 14.01.2008 "Norme tecniche per le costruzioni "(G.U. n° 29 del 4 febbraio 2008).

- [13] P. Pedefferi – “Cedimenti strutturali e corrosione delle armature”, Rivista *L'edilizia*, settembre 2003 n. 129.
- [14] <http://www.4emme.it/PDF/4.%20INDAGINI%20SUI%20PONTI.pdf>
- [15] <http://www.lodiedintorni.com/crollo-ponte-sul-po-tredici-indagati-per-disastro-colposo-11351>
- [16] http://www.amracenter.com/doc/news/UniSANNIO_CIMA_UniNA_Report_v1.5_br.pdf
- [17] Circolare n° 6736/61/AI del 19.07.1967 “Controllo delle condizioni di stabilità delle opere d'arte stradali”.
- [18] Circolare LL.PP n° 34233 del 25.02.1991 “Istruzioni relative alla normativa dei ponti stradali”.
- [19] R. Romagnolo, A. Ascenzi “Priorità di intervento nella manutenzione della rete autostrade ed esempi significativi di lavoro di ripristino eseguiti” *La valutazione del degrado dei ponti ed i sistemi di gestione in Europa, Atti del convegno di Messina*, 30 settembre 2002.
- [20] Norma C.N.R. (Boll. Uff. n° 165/93) “Istruzioni sulla pianificazione della manutenzione stradale ponti e viadotti”.
- [21] Circolare n°617 del 2.02.2009 “Istruzioni per l'applicazione delle “Nuove norme tecniche per le costruzioni” di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008”.
- [22] D. P. R. n° 207 del 5.10.2010 “Regolamento di esecuzione ed attuazione del Decreto Legislativo n°163 del 12.04.2006 recante Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture in attuazione delle direttive 2004/17/CE e 2004/18/CE”.
- [23] G. Camomilla “Le chiamiamo opere d'arte ma le trascuriamo come se lo fossero” Rivista “*Le strade*” n°6 giugno 2008.
- [24] <http://archiviofoto.unita.it/index.php?f2=recordid&cod=858&codset=CRO&pagina=34>
- [25] D. L. n° 109 del 11.02.1994 “Legge quadro in materia di lavori pubblici”.
- [26] D. P. R. n° 554/99 “Regolamento d'attuazione della legge quadro in materia di lavori pubblici 11/02/1994 n°109, e successive modificazioni”.
- [27] D. L. n° 112 del 31/03/ 1998 "Conferimento di funzioni e compiti amministrativi dello Stato alle regioni ed agli enti locali, in attuazione del capo I della L. 15 marzo 1997, n. 59".

[28] G. Laganà “Il monitoraggio delle opere d’arte nella rete ANAS in Sicilia” *Atti del convegno di Messina*, 30 settembre 2002.

CAPITOLO 2

I SISTEMI DI GESTIONE DELLA MANUTENZIONE DEI PONTI

2.1 INTRODUZIONE

Un sistema di gestione comprende un insieme di procedure mirate ad assicurare un'adeguata manutenzione di tutti i ponti gestiti. Essa include i metodi e i modelli analitici, gli strumenti per l'elaborazione dei dati, la definizione dei processi organizzativi e decisionali, la costituzione di banche dati necessarie all'implementazione del sistema. In letteratura sono presenti numerosi studi che si occupano delle problematiche connesse alla manutenzione, in relazione ai differenti sistemi di gestione applicabili. Alcuni studi sono confluiti in software commerciali che facilitano la gestione della manutenzione rendendo alcuni processi automatizzati.

2.2 CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI GESTIONE

Come ampiamente descritto nel capitolo uno, diversi Paesi attuano un sistemi di gestione della manutenzione dei ponti ma ognuno di essi possiede delle caratteristiche diverse; inoltre alcuni Paesi adoperano dei sistemi di gestione più avanzati e completi di altri. Il sistema di gestione deve aiutare l'ente gestore nella definizione dei piani di manutenzione ottimali. In genere, la struttura di un sistema di gestione completo è così organizzata:

- ✓ costruzione di un database;
- ✓ pianificazione delle ispezioni;
- ✓ valutazione delle condizioni dei ponti;
- ✓ valutazione della stabilità del ponte;
- ✓ predizione del tasso di deterioramento e delle condizioni future;
- ✓ valutazione delle diverse alternative di manutenzione e dei relativi costi e determinazione dei piani ottimali di manutenzione.

Nei paragrafi che seguono verranno descritti i diversi moduli che compongono un BMS (Bridge Management System).

2.2.1 Database

Il database è costituito da tutte quelle informazioni che riguardano i ponti della rete (dati anagrafici, attività manutentive, stato di degrado, valutazione delle condizioni, tipologia di interventi, costi,...). Il database dovrebbe essere aggiornato periodicamente a seguito delle ispezioni visive o strumentali.

In America è stato istituito il National Bridge Inventory (NBI) che è un database compilato dalla Federal Highway Administration che contiene informazioni relative ai ponti e ai tunnel presenti negli Stati Uniti, realizzato al fine di unificare le informazioni. I dati vengono spesso utilizzati per le analisi sui ponti e includono informazioni relative all'ubicazione dell'opera, alla tipologia costruttiva, alle caratteristiche geometriche, alla condizione operativa e funzionale, ai dati sulle ispezioni visive comprensive del valore sulle condizioni, assegnato dagli ispettori a seguito di tali ispezioni, etc... I ponti considerati nel database sono quelli aventi lunghezza superiore a 6 m (20 piedi). Il National Bridge Inventory contiene informazioni relative ad almeno 16.000 ponti [1].

In Europa, come evidenziato dal progetto BRIME [2], diversi stati utilizzano sistemi di gestione informatizzati che adoperano dei sistemi di database commerciali, tra cui il più utilizzato è ORACLE.

Le informazioni contenute nei diversi database sono estremamente variabili, così come le modalità di aggiornamento: alcuni database vengono aggiornati a intervalli regolari, altri occasionalmente; alcuni vengono aggiornati giornalmente, altri annualmente o ogni due anni. La scelta dell'intervallo temporale dipende dalla tipologia dei dati utili all'implementazione del sistema di gestione [3].

2.2.2 Ispezioni

Nel programma di manutenzione delle opere d'arte stradali, la fase principale è rappresentata dalle ispezioni visive. Dalle ispezioni scaturiscono tutta una serie di operazioni che permettono di garantire sicurezza e durata dei ponti e contemporaneamente di ottimizzare i costi della manutenzione. Dal risultato delle visite ispettive dipenderà la

scelta di effettuare un ulteriore sopralluogo con esperti e/o la decisione di svolgere indagini più approfondite o la chiusura temporanea della viabilità [4].

L'ispezione deve essere effettuata in modo rigoroso e a intervalli regolari su tutti gli elementi di ciascun opera. Il ritardo negli interventi ha dimostrato quanto sia più costosa l'opera di recupero rispetto ad una manutenzione sistematica [5], inoltre le conseguenze del degrado possono manifestarsi in maniera repentina portando, nei casi più gravi, anche al collasso definitivo. Per questi motivi la programmazione di un'adeguata cadenza delle verifiche ispettive assume particolare rilevanza.

2.2.2.1 Pianificazione delle ispezioni

La pianificazione delle ispezioni riguarda la definizione degli intervalli temporali in cui devono essere eseguite le ispezioni e le modalità con cui devono essere eseguite (ispezioni visive, prove di laboratorio, prove in situ, ...).

Il processo di danneggiamento di un ponte è dovuto a diversi fattori: deterioramento dei materiali, incremento dei volumi di traffico, incremento dei carichi di traffico, riduzione della vita utile, calamità naturali, ... pertanto le ispezioni devono:

- ✓ identificare e classificare dei diversi tipi di strutture;
- ✓ identificare il danneggiamento e le cause del degrado;
- ✓ prevenire i crolli.

Ogni Paese ha definito 3 o 4 livelli di ispezioni differenti, ed attua procedure diverse a seconda del tipo di ispezione considerata. Le principali strategie relative alle ispezioni possono essere così riassunte:

- ✓ ispezioni generali: sono ispezioni periodiche eseguite ad intervalli prefissati. Tali ispezioni sono principalmente ispezioni visive eseguite da personale addetto alla manutenzione che abbia familiarità con le procedure di sicurezza per lavorare su strada ma che non ha conoscenze specialistiche relative alle diverse patologie dei ponti. Lo scopo principale è quello di rilevare i difetti più importanti (barriere di sicurezza danneggiate, ...)
- ✓ ispezioni dettagliate: sono ispezioni periodiche eseguite ad intervalli di tempi prefissati che solitamente sono multipli dell'intervallo di tempo delle ispezioni generali. La frequenza raccomandata varia di solito tra uno e tre anni.

Normalmente, vengono effettuate da tecnici che hanno ricevuto una formazione specifica finalizzata all'individuazione delle diverse patologie. Nel caso di strutture più complesse viene impiegato personale maggiormente qualificato.

- ✓ ispezioni approfondite: sono anch'esse ispezioni visive ma includono anche test eseguiti in situ. La frequenza consigliata per tali ispezioni varia tra cinque e dieci anni, da parte di tecnici qualificati.
- ✓ valutazione strutturale: vengono realizzate solo quando, a seguito delle ispezioni dettagliate, vengono evidenziati difetti importanti che richiedono una più dettagliata investigazione, o a seguito di eventi eccezionali (alluvioni, sismi,...). Se, nel corso dell'ispezione, diventa evidente che il deterioramento delle parti critiche della struttura del ponte potrebbe minacciare la sicurezza degli utenti, l'ispettore può raccomandare una o più misure provvisorie che includono: limitazioni carico temporaneo, puntellamento o la chiusura del ponte, installazione di un sistema di monitoraggio permanente. La valutazione strutturale può includere prove di laboratorio, prove in situ, prove di carico statiche e dinamiche.

Man mano che consideriamo un livello di ispezione più alto, il livello di dettaglio delle informazioni rilevate assume una maggiore precisione.

Gli enti gestori solitamente stabiliscono delle linee guida relative alle modalità con cui devono essere eseguite le ispezioni. Tali disposizioni sono spesso racchiuse all'interno di manuali tecnici e applicativi [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12,13,14] che contengono:

- ✓ modalità per eseguire i rilievi;
- ✓ qualifiche del personale addetto alle ispezioni;
- ✓ schede dei difetti, in cui vengono descritte in maniera dettagliata le diverse tipologie di difetti che possono presentarsi;
- ✓ schede per il rilievo dello stato di degrado.

2.2.2.2 Schede per il rilievo dello stato di degrado

Le ispezioni visive, nella pratica, sono condotte attraverso la compilazione di schede opportunamente predisposte per consentire il rilievo dello stato di conservazione di ciascuno degli elementi (strutturali e non) del ponte. Le schede solitamente sono suddivise in:

- una sezione contenenti i dati generali (localizzazione, caratteristiche geometriche, caratteristiche costruttive,...);
- una sezione specifica per ciascun elemento strutturale e non (spalle, pile, giunti, impalcati,..) .

Lo stato di conservazione dell'opera viene caratterizzata attribuendo dei giudizi qualitativi. Alcuni BMS prevedono l'individuazione l'estensione e l'intensità dei difetti, altri invece associano a ciascun elemento un indice qualitativo relativo alla condizione in cui ogni elemento versa. L'elemento potrà essere definito ad esempio "buono" se presenta solo problemi lievi oppure 'critico' se la capacità strutturale dell'elemento è compromessa dallo stato avanzato di degrado, o in alternativa individuando una condizione di non deterioramento fino a 'stato 5' che rappresenta la condizione di avanzato stato di deterioramento.

I dati contenuti nelle schede, unitamente a una documentazione fotografica, eseguita durante le ispezioni, devono fornire un quadro sufficientemente completo dello stato di conservazione dell'opera, al fine di consentirne la "valutazione delle condizioni".

Nel seguito (fig.1 – fig. 4) si riportano degli esempi di schede contenute all'interno di alcuni importanti manuali per le ispezioni.

PDT Form D-450A (Oct. 1998) **Site Data** **BRIDGE MANAGEMENT SYSTEM** **BRIDGE INSPECTION REPORT** BMS Updated By: _____ Date: _____

A01 0 2 7 4 2 1 0 0 0 0 9 0 8 1 C05 Structure Type (Dept.) STL RIVETED I-BEAM 1 9 1 1 0

CHARTIERS CREEK BRIDGE User CHARTIERS CREEK Approach

Inspection Date E06 0 6 2 3 0 0 Name of Consultant and/or Inspector E12 MICHAEL BAKER JR., INC.

Inspection Type E07 1 Inspected by E08 8 Hired by E13 8 Time started 7:30 A.M. Weather Conditions Temp 84

CRAFTON Time completed 4:30 P.M. MOSTLY SUNNY

City Borough Township

Optional Reminder: Check boxes if Maintenance Address are needed →

Bridge Signing Verification

BMS Item	Type of Sign	Required Sign	SIGNING IN FIELD				Comments
			Near Advance	Bridge Site		Far Advance	
D15	Bridge Weight Limit	N/A T					NONE POSTED
D15	Except Combination	N/A T					
D14	One Truck at a Time	Yes (No)					
B22/B23	Vert. Clearance - On	N/A					See Sketch
B22/B23	Vert. Clearance - Und	N/A					See Sketch
	One Lane Bridge	Yes (No) (Opt)					(Opt)
	Narrow Bridge	Yes (No) (Opt)					(Opt)
	Hazard Clearance	Yes (No)					
	Other (Opt)						

Key → OK: Signs properly installed M: Signs missing D: Signs damaged/incorrect New Wearing Surfaces Under Bridge: YES NO

Notes

Vert. Clear. Sign On Feature: B01 = B31 = Under Feature: B01 = B31 =

E26 Underclearance Appraisal 5 Controlling: Lateral 12'-2" Vertical 38'-7"

E28-A Traffic Safety Features (Subfields shown vertically) Posted Speed Limit _____ mph

6 Bridge Rating PARAPET - JERSEY BARRIER. (GOOD CONDITION - MINOR CRACKING THROUGHOUT)

8 Transition PARAPET EXTENSIONS.

8 Approach Barrier ON RIGHT - CONTINUOUS NJ BARRIER - GOOD. W-BEAM AND STL. POSTS ON NEAR LT. AND FAR LT.

6 Approach Rail/Ends FLARED AND TURNED DOWN W-BEAM ON NEAR LT. AND FAR LT.

E28 Approach Alignment 8 NO SPEED REDUCTION. GOOD SIGHT DISTANCE.

E15 Approach Roadway 8 NEW PAVEMENT GOOD CONDITION.

Pavement GOOD
Drainage GOOD (ALL NEW CONSTRUCTION)
Shoulders GOOD

E14 Approach Slab 8 NEW CONSTRUCTION.

Bump at Bridge Yes No


C19 Relief Joint 1


Figura 1 Esempio di scheda di rilievo dei dati generali [6]

PDT Form D-450C **Abutment Data** Inspected On Date
 (DEC 1990) A01 0 2 7 4 2 1 0 0 0 0 9 0 8 1 E06 0 8 2 3 0 0


E20 Substructure 7 Details on Sheet _____


NAB - Near Abutment (Use same notation as W00)


Backwall GOOD CONDITION - NEW CONSTRUCTION. 

Bridge Seats GOOD CONDITION - NEW CONSTRUCTION. VERY MINOR DEBRIS. 

Checkwalls _____

Stem GOOD CONDITION - NEW CONCRETE CONSTRUCTION AT TOP ON EXISTING STONE MASONRY BASE. SOME LOCATIONS HAVE MINOR CRACKING AND LOOSENING OF MORTAR. 

Wings GOOD CONDITION - NEW CONSTRUCTION. 


Footing NOT VISIBLE. 

Piles NOT VISIBLE.

Scar / Underpile Yes No See Details on Form _____ Sheet _____


ABUTMENT IS NOT IN CHANNEL. ALSO, CHANNEL IS CONCRETE LINED.


Settlement NONE NOTED.

Embank-Slope-Wall GOOD CONDITION - HEAVY VEGETATION. 


Wall Drainage _____


FAB - Far Abutment (Use same notation as W00)


Backwall GOOD CONDITION - NEW CONSTRUCTION. 

Bridge Seats GOOD CONDITION - NEW CONSTRUCTION. MINOR DEBRIS. 

Checkwalls _____

Stem GOOD CONDITION - SAME AS NEAR ABUTMENT. 

Wings GOOD CONDITION - NEW CONSTRUCTION. 


Footing NOT VISIBLE. 

Piles NOT VISIBLE.

Scar / Underpile Yes No See Details on Form _____ Sheet _____

ABUTMENT IS NOT IN THE CHANNEL.

Settlement NONE NOTED.

Embank-Slope-Wall HEAVY VEGETATION. 

Wall Drainage _____

Figura 2 Esempio di scheda di rilievo dello stato di conservazione delle spalle [6]

Scheda Ispezione Ponti										Nome amministrazione	
1 Spalle										N _____ Posizione _____	
Struttura: _____ Località: _____										Materiale: calcestruzzo	
										data: __/__/__	
										Ispettore: _____	
										LOGO	
N°	Descrizione difetto	v	G	Estensione K ₁			Intensità K ₂			N° Foto	Note
				0,2	0,5	1	0,2	0,5	1		
1.1)	Macchie di umidità passiva	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
1.2)	Macchie di umidità attiva	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
1.3)	Cis dilatato / ammolorato	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
1.4)	Vespai	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
1.5)	Distacco del copriferro	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
1.6)	Armatura ossidata	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
1.13)	Lesioni a ragnatela modeste	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
1.14)	Fessure orizzontali	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
1.15)	Fessure verticali	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
1.16)	Fessure diagonali	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
1.25)	Riprese successive deteriorate	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
1.29)	Danni da urto	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
1.30)	Danni causati dagli app. d'appog.	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
5.1)	Fuori piombo	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
5.2)	Scalzamento	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
5.3)	Dilavamento del rilevato	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
5.4)	Dissesto del rilevato	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
5.5)	Difetti d'appoggio in neoprene	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
5.6)	Difetti pendoli	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
5.7)	Difetti carrelli	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
5.8)	Difetti d'appoggio compositi	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		

Figura 4 Esempio di scheda di rilievo dei difetti sulle spalle tratta da [14]

2.2.3 Valutazione delle condizioni

La valutazione delle condizioni viene solitamente effettuata a partire dai dati raccolti durante le ispezioni, e permette di attribuire un ordine di preferenza delle opere che necessitano di interventi. Tale risultato costituisce il punto di partenza per la programmazione degli interventi di manutenzione delle opere.

A tal fine vengono definiti opportuni indici, espressi in genere come combinazione lineare dei parametri definiti nelle schede, con un relativo peso attribuito sulla base dell'esperienza o dei dati riportati in letteratura. Una volta eseguita la valutazione delle condizioni, i ponti vengono classificati in diverse categorie. Queste categorie sono solitamente ordinate rispetto alla gravità delle condizioni e determinano l'urgenza dell'intervento [15].

I dati sulle condizioni vengono, successivamente, utilizzati per valutare la capacità di carico, la durabilità della struttura, e nel processo decisionale che mira ad aumentare la sicurezza nel periodo di tempo considerato [16].

2.2.4 Valutazione della stabilità del ponte

Alcuni ponti possiedono una riserva di resistenza rispetto ai carichi agenti che gli consente di tollerare anche deterioramenti significativi con un certo livello di sicurezza. Per questi ponti è sufficiente una valutazione delle condizioni determinata a seguito delle ispezioni visive. Altre tipologie di ponti (schemi isostatici, presenza di elementi suscettibili ad instabilizzarsi,...), invece, richiedono un approccio più rigoroso. Per questi ponti la valutazione della stabilità costituisce un elemento fondamentale per la loro gestione.

Tale valutazione viene eseguita mediante opportune metodologie dell'analisi strutturale seguendo un approccio deterministico o semiprobabilistico. Questi metodi sono però considerati conservativi vista l'incertezza delle variabili coinvolte, pertanto sempre più spesso si ricorre a metodi probabilistici (metodi di affidabilità). Tali metodi si basano su:

- individuazione dei criteri che determinano il raggiungimento dello stato limite ultimo;
- studio della variabilità delle parametri considerati stocasticamente indipendenti;
- calcolo della probabilità che il criterio dello stato limite non venga raggiunto.

Questi metodi tuttavia presentano delle limitazioni perché spesso non esistono dati statistici e alcune grandezze sono difficili da misurare. Il risultato di un approccio probabilistico dipende fortemente dalle assunzioni che vengono fatte circa le incertezze associate alle variabili. Se queste ipotesi non sono basate su dati adeguati, le stime potrebbero essere fuorvianti.

La valutazione della stabilità del ponte fornisce anche un importante contributo per la valutazione dei costi e delle diverse strategie di manutenzione; inoltre tale informazione permette una gestione più sicura del traffico in riferimento all'instradamento dei veicoli che trasportano carichi eccezionali.

2.2.5 Predizione del tasso di deterioramento

Il degrado dei ponti è, in genere, un processo naturale che si traduce in una riduzione della vita utile e nel tempo porta ad una completa inefficienza della struttura. L'obiettivo di un ente gestore dovrebbe essere quello di controllare il processo di degrado, andando ad effettuare gli interventi manutentivi nei tempi più opportuni, in modo tale da garantire quanto meno la vita utile prevista. Infatti la situazione dei disagi agli utenti a causa dei lavori di manutenzione è anche influenzata, in una certa misura, dal fatto che la

manutenzione viene eseguita o troppo presto o troppo tardi. Se la manutenzione viene eseguita troppo presto quasi sicuramente il numero di interventi manutentivi, durante la vita utile, saranno maggiori, se viene eseguita troppo tardi l'intervento manutentivo sarà sicuramente più complesso e verrà eseguito in tempi più lunghi.

Tuttavia, è difficile fare una previsione del deterioramento perché spesso il deterioramento è frutto di una serie di concause e questo lo rende un processo difficile da modellare; inoltre molto spesso il degrado sugli elementi non si manifesta in maniera uniforme. I principali approcci alla stima del deterioramento avvengono attraverso:

- modelli fisici-matematici;
- modelli stocastici (catene di Markov,...).

Tali modelli sono in continua evoluzione. Dal progetto BRIME è emerso che gran parte dei Paesi non utilizza modelli di deterioramento per predire le condizioni future.

2.2.6 Determinazione dei piani ottimali di manutenzione

Le procedure di ottimizzazione sono procedure che permettono di allocare le risorse disponibili al fine di preservare i ponti, mantenendo un livello di servizio accettabile sulla rete, cercando di minimizzare i costi.

Tali procedure vengono eseguite a partire da un prefissato orizzonte temporale, che può variare da pochi anni all'intera vita del ponte, tenendo conto delle diverse strategie manutentive che potrebbero essere attuate e dei vincoli che guidano il processo manutentivo.

E' particolarmente importante scegliere la strategia di manutenzione più appropriata per minimizzare i costi e massimizzare l'efficacia della manutenzione. Le principali strategie di manutenzione prevedono:

- non eseguire nessun tipo di manutenzione fino a quando il ponte non necessita di interventi sostanziali;
- non eseguire nessun tipo di manutenzione fino a quando le condizioni del ponte non si deteriorano fino ad una valore di riferimento;
- effettuare regolarmente la manutenzione preventiva riducendo così il tasso di deterioramento in modo tale da evitare o ritardare la necessità degli interventi manutentivi.

Le strategie manutentive per la rete sono decisioni che dipendono dalla politica dell'ente gestore.

Il numero di vincoli, invece, varia da procedura a procedura, ma alcuni di essi vengono considerati nella maggior parte delle procedure di ottimizzazione come per esempio il budget disponibile, i livelli accettabili delle condizioni, la vita utile residua, ecc.

Nella letteratura vengono proposti diversi approcci per eseguire l'ottimizzazione, che possono suddividersi in due grandi categorie:

- formulazioni matematiche classiche (programmazione lineare, programmazione quadratica, minimizzazione non vincolata, minimizzazione vincolata, ecc.);
- tecniche di soft computing (reti neurali, algoritmi genetici, ecc).

Ogni qualvolta si effettua l'ottimizzazione, la scelta strategica che si ottiene a livello di rete spesso non coincide con quella di ogni singolo ponte.

Le decisioni relative alla manutenzione dovrebbero tener conto di diversi aspetti: sicurezza, durabilità, funzionalità, economicità, aspetti ambientali e sociologici. Gli ultimi due aspetti sono difficili da stimare in termini monetari, pertanto non vengono considerati nei sistemi di gestione esistenti attualmente in uso.

Per quanto riguarda i costi dell'intero ciclo di vita del ponte (whole-life costing (WLC)), questi in genere includono i costi di progettazione, costruzione, ispezione, valutazione, prove, manutenzione preventiva, rifacimento, demolizione, gestione del traffico, ecc.

2.3 STUDI DI LETTERATURA

In letteratura sono presenti diversi studi nei quali sono stati proposti modelli matematici e algoritmi da utilizzare per le diverse fasi di un BMS. Alcuni autori si sono limitati a studiare alcuni aspetti particolari: la valutazione delle condizioni, la predizione del tasso di deterioramento, la determinazione dei piani ottimali di manutenzione, ecc. Altri autori hanno proposto sistemi di gestione completi. Nel seguito del paragrafo si riporta una sintesi della letteratura tecnica a riguardo.

2.3.1 Sistemi di gestione completi

D. T. Hai (2008) [17] ha proposto un sistema di gestione della manutenzione che utilizza una banca dati informatizzata dei ponti autostradali in Vietnam.

Nel sistema di gestione proposto:

- ✓ la *valutazione delle condizioni del ponte* viene eseguita sulla base di informazioni ottenute attraverso visite ispettive, prove non distruttive, analisi strutturali, prove di carico, ecc., mediante l'utilizzo di un indicatore (priority maintenance index);
- ✓ la *predizione del deterioramento* viene eseguita attraverso un metodo proposto dall'autore stesso che si basa sulle seguenti ipotesi:
 - 1) Il deterioramento del ponte nel tempo avviene secondo una curva d'integrazione convessa;
 - 2) Le curve di degrado partono al tempo zero quando il ponte appena costruito entra in servizio, e la capacità di carico ha il valore ottimale di progetto;
 - 3) La manutenzione, che influenza le condizioni fisiche e la capacità di carico, è inclusa nella previsione del deterioramento;
- ✓ l'*analisi dei costi* dell'intero ciclo di vita (Life cycle cost (LCC)), secondo Frangopol (1999) [18] può essere effettuata considerando tre contributi additivi:

$$LCC = \text{costi}_{\text{iniziali}} + \text{costi}_{\text{gestione}} + \text{costi}_{\text{manutenzione}}$$

In particolare si considerano nulli i costi iniziali che si riferiscono ai costi di progettazione realizzazione dell'opera perché sostenuti prima dell'anno zero (fissato precedentemente), costanti i costi di gestione per l'intero ciclo di vita del ponte e i costi di manutenzione sono riferiti a tre possibili scenari manutentivi (fig.5):

- Scenario 1: non viene eseguito alcun intervento manutenzione (costi manutenzione pari a 0) mentre i costi di gestione sono costanti per tutta la vita dell'opera e pari a LCC1.
- Scenario 2: viene eseguito un intervento di manutenzione essenziale al tempo t2 (vedi grafico in figura 5), i costi di manutenzione subiscono un incremento dei costi totali
- Scenario 3: viene eseguito un intervento di manutenzione preventiva al tempo t3 (antecedente al tempo t2) anche se il ponte si trova in condizioni fisiche ancora

ragionevoli, i costi subiscono un incremento minore rispetto allo scenario 2 ma anticipati nel tempo.

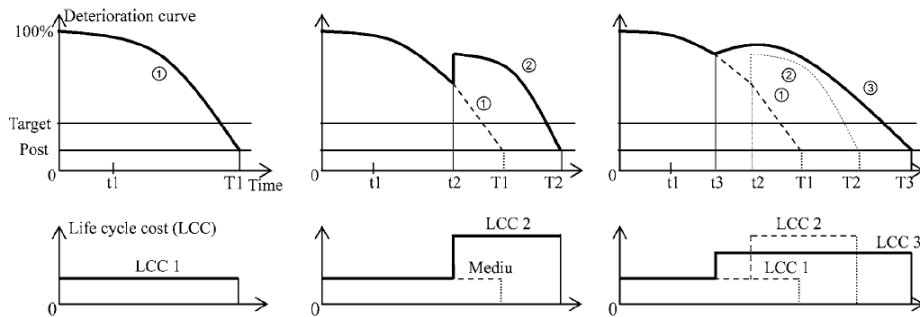


Figura 5 Curve di deterioramento e costi del ciclo di vita nello scenario 1, 2 e 3

✓ L'analisi costi-benefici viene effettuata considerando:

- costi: si riferiscono ai soli costi di manutenzione, definiti come la spesa totale sostenuta per migliorare le condizioni fisiche e di efficienza del ponte e per eliminare i difetti attuali;
- benefici: si riferiscono ai benefici dovuti alla manutenzione espressi in termini monetari come somma dell'incremento dei veicoli a seguito della manutenzione, del tempo risparmiato come risultato della migliore funzionalità. Al contrario se la manutenzione non viene eseguita bisogna considerare i possibili ritardi o deviazioni dovuti a interventi di manutenzione straordinaria e urgente.

A. D. Orcesi et al. (2011) [19] hanno proposto una ottimizzazione delle strategie di manutenzione per la gestione dei ponti in Francia. Il modello proposto è basato sulla previsione dello stato di degrado attraverso un un approccio di tipo Markoviano, inoltre sono stati proposti modelli di previsione per l'analisi dei costi e delle diverse strategie di manutenzione. In particolare:

- ✓ la *valutazione delle condizioni del ponte* viene eseguita sulla base di informazioni ottenute attraverso visite ispettive. Durante le ispezioni del ponte ad ogni elemento (strutturale e non) viene assegnato un punteggio (IQOA score (fig. 6)).

Score	Apparent condition
1	Good overall state
2	Equipment failures or minor structural damage. Nonurgent maintenance required.
2E	Equipment failures or minor structural damage. Urgent maintenance required.
3	Structural deterioration. Nonurgent maintenance required.
3U	Serious structural deterioration. Urgent maintenance required.

Figura 6 IQOA score

Il punteggio finale sarà pari al valore peggiore che risulta dal confronto fra i valori di tutti i componenti. Viene quindi definito un indicatore di qualità (fig. 7) che stabilisce l'urgenza delle attività manutentive.

Index	Objective	Target value within 15 years (%)
$I_3=1+2$	Routine maintenance to prevent repairs	≥ 55
$I_4=2E$	Specialized maintenance to prevent repairs	≤ 30
$I_5=3+3U$	Structural maintenance to prevent collapse	≤ 15
$I_6=3U$	Urgent structural operation to prevent disruption and to ensure safety of the road network	≤ 1

Figura 7 Indicatori di qualità

Vengono definiti i costi unitari necessari alla manutenzione in funzione del valore dell' IQOA score. Il costo totale indica l'efficienza del strategia manutentiva e rappresenta il costo medio per spostare il valore dell'IQOA fino ad 1;

- ✓ la *predizione del deterioramento* viene eseguita attraverso un approccio di tipo Markoviano;

- ✓ l' *ottimizzazione delle strategie manutenzione* viene determinata andando a minimizzare i costi annuali di manutenzione a partire dalla definizione di tre scenari diversi:
 - Scenario 1: mantenimento della politica manutentiva corrente (nessun processo di ottimizzazione);
 - Scenario 2: applicazione di vincoli sugli indicatori di qualità e sui costi di manutenzione;
 - Scenario 3: applicazione di vincoli sugli indicatori di qualità e sul budget annuale per la manutenzione.

2.3.2 Indici per la valutazione delle condizioni

R.Gori (2006) [20] ha proposto una classificazione del degrado dei ponti metallici in funzione del parametro adimensionale S indicativo delle condizioni effettive del ponte. La formula proposta è stata concepita in modo da essere sufficientemente rigorosa ma allo stesso tempo poco complessa ed articolata. Il criterio proposto si basa su un'ispezione di tipo visivo della struttura.

La valutazione delle condizioni è data dall'espressione seguente:

$$S = \sum_i^N \sum_j^M G_j \cdot q_i \cdot K_{ij}^1 \cdot K_{ij}^2$$

In cui:

- ✓ N = numero considerato di possibili tipologie di elementi costitutivi, strutturali e non; gli *elementi costitutivi* sono i diversi elementi costruttivi che solitamente costituiscono il ponte metallico e sono stati suddivisi in due categorie:
 - *elementi costitutivi strutturali* (struttura principale, struttura secondaria, collegamenti, spalle, pile e giunti di dilatazione);
 - *elementi costitutivi non strutturali* (soletta in cemento e pavimentazione, traversine binari, arredi e scarichi);
- ✓ i = tipo di elemento strutturale corrente;
- ✓ M = numero considerato dei diversi tipi di danno; sono state considerate diverse tipologie di danno (danni superficiali, corrosione e ruggine, rotture, deformazioni, cedimenti ed instabilità) suddivise in:

- *danni riferiti alle parti metalliche del ponte* (travi principali, ad anima piena o reticolari, diaframature secondarie, elementi di collegamento, appoggi, arredi, ecc.);

- *danni riferiti alle parti in cemento armato o muratura o simili* (spalle, pile, soletta, arredi, ecc.).

- ✓ j = tipo di danno corrente;
- ✓ G = numero base del danno; il *fattore* G , è un numero adimensionale, che varia da 1 a 6, che attribuisce un “peso” al danno in senso assoluto, ignorandone l’estensione, l’intensità o il luogo in cui questo si verifica. Si può dire che esso valuti la “gravità” del danno in riferimento alla stabilità ed alla sicurezza della struttura.
- ✓ q_i = numero base dell’elemento strutturale; il *fattore* q_i , è un coefficiente finalizzato alla valutazione dell’importanza dell’elemento corrente strutturale o non strutturale, in rapporto alla capacità portante e alla sicurezza dell’intera struttura. Il valore del *fattore* q_i è calcolato tramite la seguente formulazione:

$$q_i = Q_i / \sum Q_i$$

dove il valore di Q_i varia da 1 a 4 a seconda dei diversi elementi strutturali.

- ✓ K^1 = fattore di estensione del danno; il *fattore* K^1 , valuta l’estensione del tipo di danno. Per la valutazione dell’estensione, come poi per l’intensità, si è proceduto alla suddivisione in 5 categorie, a cui sono stati assegnati 5 relativi coefficienti variabili da 0.1 a 1.
- ✓ K^2_{ij} = fattore di intensità del danno. Il *fattore* K^2 , è un coefficiente che dà una valutazione qualitativa del danno. In termini analitici, può essere definito come il rapporto fra il danneggiamento j occorso al tipo di *elemento costitutivo* i ed il massimo livello della gravità del danno sopportabile dallo stesso. Anche in questo caso, si è proceduto ad una suddivisione in 5 categorie.

A seconda del valore assunto da S il ponte potrà appartenere ad una delle seguenti sei classi di degrado (fig. 8):

	<i>CLASSI</i>	<i>Valore di S</i>	<i>Valore di S x 100</i>
1	Danno molto leggero	0-0,11	0-11
2	Danno leggero	0,09-0,30	9-30
3	Danno medio	0,26-0,49	26-49
4	Danno severo	0,43-0,95	43-95
5	Danno molto severo	0,85-2,00	85-200
6	Perdita totale	>2	>200

Figura 8 Valori di S e relativa classificazione del degrado

L'autore sottolinea la sovrapposizione delle classi quando i coefficienti si avvicinano ai valori limite che separano le classi stesse; in questo modo manca una distinzione netta fra le classi ad indicare il carattere non assoluto della metodologia.

A. Montepara et al. (2008) [21] definiscono un *Indicatore dello stato di conservazione della struttura (SCS)* definito a seguito delle ispezioni visive andando ad individuare degradi funzionali e strutturali considerando il ponte come isolato dal sistema viario (project level). Passando alla definizione successiva dell'*Indice di Priorità di intervento (IP)*, in cui ad ogni opera viene assegnato un livello di importanza che la identifica come elemento all'interno della rete territoriale dei trasporti (network level).

In particolare si calcola prima l'*Indice di condizione della classe di elementi (ICE)*:

$$ICE_j = W_j \cdot \sum S_i \cdot F_i \cdot Es_i \cdot Ev_i$$

In cui:

- ✓ S_i = severità dell'i-esimo difetto, il suo valore può essere pari a 2 (severità bassa), 5 (severità media), 10 (severità alta);
- ✓ F_i = frequenza dell'i-esimo difetto, il suo valore può essere pari a 1 se il difetto è localizzato, 2 se il difetto è diffuso;
- ✓ Es_i = estensione dell'i-esimo difetto, il suo valore è pari a 1 se l'entità del difetto è lieve, 2 se l'estensione del difetto è moderata, 5 se l'entità del difetto è intensa;

- ✓ Ev_i = evoluzione dell'i-esimo difetto, il suo valore è pari a 1 se il gradiente di evoluzione è nullo, 1.5 se il gradiente di evoluzione è lento, 2 se il gradiente di evoluzione è veloce;
- ✓ W_j = peso relativo della j-esima classe di elementi strutturali, il suo valore è pari ad 1 per elementi di rilevanza strutturale, è minore di 1 per elementi di rilevanza prevalentemente funzionale .

L'indice ICE, pur essendo relativo a singoli elementi dell'opera, diviene quindi il nucleo centrale della valutazione dello stato di conservazione dell'intera struttura. Il suo valore varia tra 0 e 100. Ciò è tradotto nel modello analitico tramite la valutazione dell'*Indicatore dello stato di conservazione della struttura (SCS)* attraverso il massimo valore degli ICE relativi alle diverse classi di elementi strutturali:

$$SCS = \text{MAX} \{ICE_j\}$$

Il peso della collocazione strategica all'interno della rete territoriale dei trasporti è reso esplicito dal *Coefficiente di importanza (Ki)*, il cui valore è definito come funzione di tre parametri:

$$Ki = 1 + \frac{Kc + Kt + Ks}{100}$$

dove:

- ✓ Kc = parametro di classificazione della rete stradale; i valori numerici che classificano il tipo di strada in relazione alla rete vengono assegnati in analogia a quanto previsto dal DM 05.11.2001 "Norme Funzionali e geometriche per la costruzione delle strade":
 - rete primaria (*transito e scorrimento*): $KC = 30$;
 - rete principale (*distribuzione*): $KC = 20$;
 - rete secondaria (*penetrazione*): $KC = 10$;
 - rete locale (*accesso*): $KC = 0$.
- ✓ Kt = parametro di entità del traffico; l'entità del traffico circolante lungo un'infrastruttura è stata suddivisa in tre classi in funzione del Traffico Giornaliero Medio (TGM), cui sono stati attribuiti i seguenti punteggi in ordine decrescente di importanza:
 - $TGM > 5000$ ($KT = 30$);

- $1500 < TGM < 5000$ ($KT = 15$);
- $TGM < 1500$ ($KT = 0$).
- ✓ K_s = parametro di viabilità strategica. Il peso attribuito a tale campo assume i seguenti valori estremi:
 - Infrastruttura non facente parte di un tratto di viabilità strategica ($KS = 0$);
 - Infrastruttura facente parte di un tratto di viabilità strategica (percorso militare, rete protezione civile) senza possibilità concreta di percorsi alternativi ($KS = 40$);
 - Infrastruttura facente parte di un tratto di viabilità strategica con la possibilità di percorsi alternativi di lunghezza variabile ($0 < KS < 40$).

Il suo valore varia tra 1 (ponti di importanza ridotta) e 2 (ponti importanti).

Si calcola, infine, l'*Indicatore di Priorità di Intervento (IP)*:

$$IP = K_i \cdot SCS$$

L'algoritmo di calcolo prevede che IP sia sempre nullo quando l'opera presenta condizioni di conservazione ottimali ($SCS = 0$), indipendentemente dal valore assunto dal coefficiente di importanza K_i . Ne consegue che a parità di condizioni, l'intervento più urgente è quello relativo all'opera con K_i più elevato. Sulla base dei risultati scaturiti dall'analisi degli indicatori di stato viene proposta una suddivisione delle opere in diverse categorie, ognuna delle quali associata ad una differente *priorità di intervento* (fig. 9) a diverse condizioni di gestione:

Categoria	Priorità	IP	SCS	ICG	Condizioni operative
P1	Bassa	0÷50	0÷25	0÷10	Nessuna operazione prima dell'ispezione successiva
P2	Media	50÷100	25÷50	10÷30	Anticipazione dell'ispezione successiva e monitoraggio
P3	Alta	100÷200	50÷100	>30	Necessità di verifica statica ed analisi strumentali

Figura 9 Categorie di priorità di intervento

P. Franchetti et al. (2003) [22] definiscono l'*Indice di efficienza dell'elemento (ESR)* e l'*Indice di efficienza del ponte (TSR)*, che permettono di trattare il problema della gestione

della manutenzione sia per quanto riguarda il *Project Level* sia per quanto riguarda il *Network Level*.

L'*Indice di efficienza dell'elemento* (ESR) viene espresso attraverso la seguente relazione:

$$ESR = CF \cdot LF \cdot (RF \cdot NBI \cdot AF)$$

in cui:

- ✓ CV= stato di condizione (Condition Value), il suo valore varia tra 0 e 5;
- ✓ CF= fattore di condizione (Condition Factor), è funzione del CV (fig.10);

CV	0	1	2	3	4	5
CF	0	10	7	4	2	1

Figura 10 Conversione dell'indice CV a CF

- ✓ LF = fattore di posizione (Location Factor), che rappresenta l'importanza dell'elemento all'interno del ponte, il suo valore varia tra 5 (elementi principali) e 10 (elementi non strutturali);
- ✓ RT = tipo di strada (Road Type) il suo valore varia tra 0.80 (nel caso di autostrade) a 1 (nel caso di strade comunali);
- ✓ TI = traffico sul ponte (Traffic Index), il suo valore varia tra 0.90 (traffico elevato) a 1 (traffico basso);
- ✓ RF = fattore stradale (Road Factor) funzione di RT e TI;
- ✓ NBI = importanza del ponte all'interno della rete (Network Bridge Importance), tale parametro cerca di legare l'importanza del ponte con il disagio per un'eventuale chiusura del ponte, il suo valore varia tra 0.96 (deviazione lunga su strada alternativa non adeguata) a 1 (deviazione breve su strada alternativa adeguata);
- ✓ AF = età del ponte (Age Factor), il suo valore varia tra 0.97 (ponti costruiti prima del 1900) a 1 (ponti costruiti dopo il 1971);
- ✓ PF = (RF · NBI · AF): fattore di penalizzazione.

L'ESR può assumere valori tra 1 e 100 e stabilisce l'urgenza dell'intervento a livello dei singoli elementi (fig.11).

Livello di efficienza	Livello di urgenza di intervento	ESR
1	Massima urgenza di intervento	1 – 10
2	Intervento a breve termine	11 – 20
3	Intervento a medio termine	21 – 30
4	Intervento a lungo termine	31 – 100

Figura 11 Livelli di efficienza e livelli di urgenza per i singoli elementi

Viene definito successivamente l'Indice di efficienza del ponte (TSR):

$$TSR = \frac{TSR_{reale} \cdot 100 + TSR_{min} \cdot CoF}{100 + CoF}$$

dove:

✓ CoF: fattore di confidenza (Confidence Factor) $CoF = 100 \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^t W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right)$;

✓ TSR_{reale} : $TSR_{reale} = \left(\frac{\sum_{i=1}^t CF_i \cdot W_i}{\sum_{i=1}^t W_i} \right) \cdot PF \cdot 10$;

✓ TSR_{min} : valore del TSR nella situazione peggiore;

in cui

- ✓ CF_i : fattore di condizione degli elementi valutati;
- ✓ W_i : pesi degli elementi valutati;
- ✓ PF: fattore di penalizzazione;
- ✓ t: elementi valutati sugli n elementi presenti.

Il TSR può assumere valori tra 1 e 100 e stabilisce l'urgenza dell'intervento a livello del singolo ponte (fig. 12).

Livello di efficienza	Livello di urgenza di intervento	TSR
1	Massima urgenza di intervento	1 – 30
2	Intervento a breve termine	31 – 40
3	Intervento a medio termine	41 – 60
4	Intervento a lungo termine	61 - 100

Figura 12 Livelli di efficienza e livelli di urgenza dei ponti

D. T Hai (2008) [17] ha proposto il “*Priority maintenance index (PMI)*” la cui espressione è data da:

$$PMI = \alpha_1 BI + \alpha_2 BH$$

In cui

- ✓ BI (Bridge Importance Index) rappresenta l'importanza del ponte
- ✓ BH (Bridge Health Index) rappresenta le condizioni fisiche e funzionali del ponte.
- ✓ La somma di $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$

L'indice BI è dato dalla seguente espressione:

$$BI = I_L + I_W + I_T$$

In cui:

- I_L è l'indice relativo alla localizzazione del ponte, il suo valore varia tra 5 (strade comunali) e 40 (strade urbane);
- I_W è l'indice relativo alla larghezza del ponte, il suo valore varia tra 3 (larghezza minore di 6.5 m) e 20 (larghezza maggiore di 17 m),
- I_T è l'indice relativo al volume di traffico, il suo valore varia tra 5 (traffico basso) e 40 (traffico alto);

L'indice BH è dato dalla seguente espressione:

$$BH = SF + SV + TP$$

In cui:

- SF è il grado di sicurezza del ponte, il suo valore dipende dalle condizioni fisiche degli elementi che compongono il ponte, il suo valore massimo è 50;
- SV è il grado di manutenzione del ponte, il suo valore dipende da alcune caratteristiche del ponte (capacità di carico del ponte, larghezza dell'impalcato,...), il suo valore massimo è 40;
- TP rappresenta l'impatto del ponte su terzi, il suo valore dipende dalla localizzazione del ponte, dalle condizioni fisiche,..., il suo valore massimo è 10.

Nel corso della pianificazione della manutenzione, i ponti con PMI più alto avranno la massima priorità, quindi nei ponti con PMI maggiore verranno eseguiti i lavori di manutenzione entro i primi anni nei limiti del bilancio; mentre nei ponti con PMI più basso i lavori verranno rinviati.

S. Valenzuela et al. (2010) [23] hanno proposto l'*Integrated Bridge Index* (IBI), la cui espressione è data da:

$$IBI = -1.411 + 1.299 \cdot BCI + 0.754 \cdot HV + 0.458 \cdot SR - 0.387 \cdot SI$$

In cui:

- ✓ BCI è l'indice che rappresenta il danno sulla struttura rilevato attraverso le ispezioni visive.

$$BCI = \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot m_i \cdot ECI_i}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot m_i} \right)$$

In cui:

- ECI_i è l'indice di condizione dell'elemento, il suo valore varia tra 1 (degrado avanzato) a 5 (degrado lieve);
- w_i è il peso di ogni elemento, il suo valore varia tra 1 (elementi non strutturali) e 5 (elementi strutturali);
- m_i si riferisce al materiale con cui è realizzato ogni elemento, il suo valore varia tra 1 e 4 in funzione del tipo di materiale.
- ✓ HV è l'indice relativo alla vulnerabilità idraulica e viene stimato a seguito delle ispezioni visive idrauliche eseguite per valutare le condizioni del letto del fiume, della riva, della portata, il suo valore varia tra 1 (vulnerabilità alta) e 5 (vulnerabilità bassa).
- ✓ SR è stimato in base al livello di danneggiamento della struttura attraverso dei modelli numerici (gli autori propongono il metodo di Fischer [24]), il suo valore varia tra 1 (vulnerabilità alta) e 5 (vulnerabilità bassa).
- ✓ SI riflette l'importanza del ponte nella rete, ed è pari a:

$$SI = 0.261 \cdot EA + 0.206 \cdot T + 0.1933 \cdot SEE + 0.093 \cdot W + 0.133 \cdot L + 0.114 \cdot R$$

In cui:

- EA esprime la presenza o meno di strade alternative, il suo valore varia tra 1 (presenza di percorsi alternativi in prossimità della rete) e 5 (non esistono percorsi alternativi);
- T è il traffico medio annuo giornaliero, il suo valore varia tra 1 (traffico basso) e 5 (traffico elevato);

- SEE è l'indicatore socio-economico relativo alle attività economiche servite dalla strada in cui insiste il ponte, il suo valore varia tra 1 e 5;
- W è l'indice della larghezza del ponte, il suo valore varia tra 1 (condizioni non soddisfacenti) e 5 (condizioni soddisfacenti);
- L è l'indice della lunghezza del ponte, il suo valore varia tra 1 (lunghezza del ponte inferiore a 30 m) e 5 (lunghezza del ponte superiore a 300 m);
- R si riferisce alle restrizioni del carico, il suo valore varia tra 1 (alte restrizioni) e 5 (nessuna restrizione).

Il valore dell'IBI varia tra 1 e 10.

Il sistema per la gestione dei ponti 4EMME [14] è stato sviluppato in collaborazione con il CIAS (*Centro Internazionale di Aggiornamento Sperimentale-Scientifico*). Il sistema si sviluppa a partire dalla raccolta dei dati attraverso le ispezioni visive. Le ispezioni vengono condotte attraverso delle schede appositamente predisposte (*Schede di Valutazione*) mediante cui vengono raccolte le informazioni necessarie.

Si definisce *Difettosità Relativa*, DR, il valore finale della valutazione fatta per singoli elementi strutturali e rappresenta l'indice dello stato di degrado:

$$DR = \sum(G \cdot K1 \cdot K2)$$

In cui:

- ✓ G deriva da una valutazione numerica, variabile da 1 a 5, del peso che il difetto assume rispetto alla gravità e deriva dalle seguenti considerazioni:
 - a) costituire un pericolo (rischio attuale);
 - b) possibilità di ridurre le capacità portanti (rischio potenziale);
 - c) costituire un innesco di altri difetti (rischio indotto);
 - d) alto onere economico per il ripristino (rischio economico).

Il peso $G=5$ è attribuito solo a difetti dove è presente anche una delle condizioni *a* o *b*.
- ✓ K1 è il coefficiente di *estensione* e può assumere valore variabile tra 0,2 (estensione piccola) e 1 (estensione elevata).
- ✓ K2 è il coefficiente di *intensità* e può assumere valore variabile tra 0,2 (intensità piccola) e 1 (intensità elevata).

Si definisce *Difettosità Assoluta*, DA, il numero derivante dalla sommatoria dei difetti moltiplicati per il numero N dei singoli elementi strutturali:

$$DA = \Sigma(N \cdot G \cdot K1 \cdot K2)$$

DA rappresenta l'indice complessivo del degrado ed indica, attraverso la sua grandezza, la dimensione dell'onere economico che si dovrà affrontare per un risanamento.

Nello studio eseguito nell'ambito del progetto BRIME sono riportati gli indici che vengono utilizzati dai diversi Paesi Europei per la valutazione del degrado [16].

Vediamone alcuni:

- In Austria la valutazione delle condizioni è data dall'espressione seguente:

$$S = \sum_i^{32} G_i \cdot k_{1i} \cdot k_{2i} \cdot k_{3i} \cdot k_{4i}$$

in cui:

- ✓ G_i = Tipologia di danno, il suo valore varia tra 0 e 1 e dipende dalla severità del danneggiamento;
- ✓ K_{1i} = Estensione del danno, il suo valore varia tra 0 e 1 ed è espresso attraverso un giudizio qualitativo;
- ✓ K_{2i} = Intensità del danno, il suo valore varia tra 0 e 1 ed è espresso attraverso un giudizio qualitativo;
- ✓ K_{3i} = Importanza del componente strutturale, il suo valore varia tra 0 e 1 a seconda del tipo di componente strutturale che presenta il danneggiamento.
- ✓ K_{4i} = Urgenza dell'intervento, il suo valore varia tra 0 e 10 e dipende dal tipo, dalla severità e dal rischio di collasso della struttura o di parte di essa.

Il valore di S serve ad identificare la classe del danneggiamento (fig.13) e può assumere valore da 0 a > 50.

Damage class	Definition	Condition rating value S
1	No or very little deterioration	0-3
2	Little deterioration	2-8
3	Medium to severe deterioration	6-13
4	Severe deterioration	10-25
5	Very severe deterioration	20-70 ($k_4=10$)
6	Very severe or total deterioration	>50 ($k_4=10$)

Figura 13 Classificazione del danneggiamento in funzione di S

- In Danimarca la valutazione è effettuata in maniera qualitativa, esclusivamente attraverso ispezione visiva, con punteggio da 1 (se non ci sono danneggiamenti significativi) a 5 (se ci sono componenti totalmente danneggiati). Le condizioni vengono valutate per 15 componenti diverse. Le condizioni del ponte non potranno essere più alte del valore assegnato al componente più danneggiato e non potranno essere più basse del valore assegnato alle altre componenti principali.
- In Slovenia la valutazione delle condizioni è data dall'espressione seguente:

$$R = V_D = \sum B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot K_{4i}$$

dove:

- ✓ V_D è il valore del tipo di danno;
- ✓ B_i è il valore base associato al tipo di danno, il suo valore varia tra 1 e 4 e esprime i potenziali effetti della tipologia di danneggiamento sulla sicurezza e la durabilità dell'elemento strutturale osservato;
- ✓ K_{1i} è il fattore che descrive l'estensione del danno, il suo valore varia tra 0 e 1 ed è espresso attraverso un giudizio qualitativo;
- ✓ K_{2i} è il fattore che descrive l'intensità del danno, il suo valore varia tra 0 e 1 ed è espresso attraverso un giudizio qualitativo;
- ✓ K_{3i} è l'importanza del componente strutturale, il suo valore varia tra 0 e 1;
- ✓ K_{4i} è l'urgenza dell'intervento, il suo valore varia tra 0 e 10 e dipende dal tipo, dalla severità e dal rischio di collasso della struttura o di parte di essa.

Il valore di R serve ad identificare la classe del danneggiamento (fig.14) e può assumere valore da 0 a > 20.

Condition class	Definition	Condition rating R
1	Critical	>20
2	Bad	14-22
3	Satisfactory	8-17
4	Good	3-12
5	Very good	0-5

Figura 14 Classificazione del danneggiamento in funzione di R

- Nel Regno Unito la valutazione delle condizioni è data dall'espressione seguente:

$$TA = 4 \cdot Ra + 2 \cdot Rf + Rd + Rv + Ru + Ri$$

Dove:

- ✓ Ra è l'età del ponte, il suo valore varia tra 1 e 5;
- ✓ Rf è la forma del ponte, il suo valore varia tra 1 e 5;
- ✓ Rd è la vulnerabilità, il suo valore varia tra 1 e 5 ;
- ✓ Rv è il volume di traffico (traffico medio giornaliero annuale nelle 24 ore), il suo valore varia tra 1 e 5 ;
- ✓ Ru è il volume di traffico (flusso medio giornaliero annuale in prossimità del ponte), il suo valore varia tra 1 e 5;
- ✓ Ri è l'importanza della strada, il suo valore varia tra 0 e 5.

Il valore di TA stabilisce la scala di priorità delle attività manutentive (fig.15) e può assumere valore da 0 a 50.

Total assessment rating TA	Priority rating RA
43 - 50	1
36 - 42	2
29 - 35	3
22 - 28	4
8 - 21	5

Figura 15 Scala di priorità delle attività manutentive in funzione di TA

Dall'analisi di queste proposte metodologiche relative alla valutazione delle condizioni dei ponti sono stati individuati alcuni orientamenti pressoché comuni a tutti i sistemi; tali indirizzi possono essere riassunti nella tendenza a:

- 1) valutare la struttura suddividendola in *parti strutturali*, più o meno generiche;
- 2) far dipendere la gravità del degrado principalmente dalla sua *natura*, dalla sua *estensione* e dalla sua *intensità*, assegnando ad ognuno di questi aspetti dei coefficienti di valutazione del danno rispetto all'integrità della struttura; solo alcuni metodi introducono parametri relativi alla vulnerabilità idraulica e sismica o relativi all'importanza del ponte nella rete;

3) esprimere la valutazione delle condizioni attraverso degli indicatori espressi mediante equazioni lineari del tipo:

$$R = \sum_i K_i \cdot f_i(a, b, c, \dots)$$

In cui

K = peso di ogni criterio considerato,

$f_i(a, b, c, \dots)$ = funzione che descrive ogni criterio considerato.

a, b, c, ... = parametri scelti.

L'obiettivo dell'equazione è quello di assegnare un numero ad ogni ponte in modo tale da effettuare una classificazione degli stessi al fine di valutare la priorità delle attività manutentive.

4) formulare classificazioni dello stato di degrado in un numero di *categorie* variabili principalmente da 3 a 6, stabilendo di conseguenza l'urgenza delle attività manutentive.

2.3.3 Predizione del tasso di deterioramento e ottimizzazione

D. M. Frangopol et al. (2001) [25] mostra che il sistema di gestione dei ponti basati sui modelli di deterioramento utilizzando un approccio Markoviano hanno diverse limitazioni e che questi limiti possono essere superati utilizzando un approccio basato sull'affidabilità. L'autore propone di caratterizzare gli interventi sui ponti in base al cambiamento degli "stati di affidabilità" della struttura. Infine l'applicazione dell'analisi costi-benefici al processo decisionale basato sull'affidabilità guida la scelta della strategia ottimale in condizioni di incertezza e di vincoli sul budget.

L. C. Neves et al. (2004) [26] hanno proposto un modello probabilistico per la predizione del deterioramento delle strutture valutato in funzione delle condizioni (basate sulle ispezioni visive), della sicurezza (basata su analisi strutturali) e dei costi di manutenzione (utilizzando studi economici) sulla base di tre scenari (nessuna manutenzione, manutenzione preventiva, manutenzione essenziale). Il modello proposto considera l'interazione tra le condizioni e la sicurezza attraverso la correlazione tra le variabili casuali che definiscono i due profili associati e le relazioni deterministiche tra gli stessi. Viene quindi utilizzata una simulazione di Monte-Carlo per valutare le proprietà statistiche di condizioni, sicurezza e costi di manutenzione.

L. A. C. Neves et al. (2006) [27] hanno proposto un approccio probabilistico multiobiettivo per la manutenzione dei ponti. L'ottimizzazione multiobiettivo proposta viene eseguita utilizzando algoritmi genetici (Gas). In questo studio la valutazione del deterioramento viene eseguita a partire dall'indice delle condizioni, calcolato attraverso le ispezioni visive, e dall'indice di sicurezza, calcolato attraverso analisi strutturali, basate su un approccio probabilistico. Il decisore baserà quindi la sua scelta andando a scegliere il miglior compromesso possibile tra i fondi disponibili, i livelli accettabili di sicurezza, il livello accettabile di deterioramento, a seconda della specifica situazione, mantenendo le preferenze dell'ente gestore ponte e la politica manutentiva.

M. Liu et al. (2004)[28] hanno proposto l'applicazione di algoritmo genetico multiobiettivo (GA) per ottimizzare il ciclo di vita della manutenzione. In questo studio, la valutazione delle condizioni, la sicurezza e i costi di manutenzione dell'intero ciclo di vita sono stati considerati come funzioni obiettivo separate ma simultaneamente considerate nel processo di ottimizzazione. La procedura automatizzata proposta produce un insieme di soluzioni alternative di manutenzione.

M. Liu et al. (2006) [29] hanno proposto un modello matematico per la valutazione delle prestazioni di una rete di ponti utilizzando la teoria delle reti. La metodologia proposta può aiutare le agenzie di trasporto a sviluppare un sistema di gestione della manutenzione a livello di rete (network level) in grado di fornire l'efficienza economica e mantenere l'intera rete funzionalmente operativa, individuando i "migliori" interventi di manutenzione da un'analisi costi-benefici. In questo studio la connettività della rete di ponti è stata valutata con la tecnica dell'albero degli eventi andando a considerare 2 eventi: connessione e disconnessione della rete, la valutazione della soddisfazione dell'utente è basata sulla capacità di traffico e sulla domanda di ogni ramo della rete, e la valutazione dell'affidabilità strutturale è calcolata in termini di probabilità di sopravvivenza dei ponti considerati critici.

S. B. Chase et al. (2000) [30] presentano un metodo per modellare le relazioni tra la capacità di carico ultima e il deterioramento fisico del ponte utilizzando una combinazione tra l'analisi di regressione e le catene di Markov. Questo metodo è suddiviso in tre step. Nel

primo step viene determinata la relazione fra le condizioni del ponte (condizioni di stato) e la capacità di carico a partire dall'analisi di dati disponibili su una popolazione di ponti attraverso l'utilizzo di equazioni di regressione. Nel secondo step viene determinato un modello per il deterioramento delle condizioni del ponte con l'età attraverso l'utilizzo delle catene di Markov per simulare la dipendenza dal tempo del degrado del ponte. Nel terzo step viene combinato il modello di deterioramento di Markov con le relazioni di regressione per predire l'andamento della capacità di carico nel tempo. Il modello di deterioramento si basa sull'assunzione che gli intervalli tra due transizioni successive sono brevi e che non ci sono miglioramenti delle condizioni dovuti ad interventi di riparazione o riabilitazione.

2.4 SISTEMI DI GESTIONE INFORMATIZZATI

Nel presente paragrafo si riportano alcuni tra i più diffusi sistemi BDS utilizzati nella gestione di importanti reti stradali nel mondo. Tali sistemi sono stati implementati in software specifici, circostanza che ne ha facilitato l'utilizzo e quindi la diffusione.

2.4.1 Pontis

Il sistema per la gestione dei ponti Pontis è stato sviluppato dalla Federal Highway Administration (FHWA) statunitense congiuntamente ai Department of Transportation (DOT) di una serie di Stati e con la partecipazione del Transportation Research Board, della Cambridge Systematics, della Optima Inc. e dell'Urban Institute.

Il sistema viene implementato a partire da un database che contiene le informazioni sui ponti della rete. Il database viene aggiornato periodicamente a seguito delle ispezioni.

Gli elementi che caratterizzano il ponte (es. impalcato, pile, spalle,...) vengono scomposti in un certo numero di elementi base per migliorare il livello di dettaglio della descrizione. Nella versione standard di Pontis, gli elementi base sono quelli specificati dalla AASHTO e vengono definiti CoRe (commonly recognized elements); le varie agenzie possono poi aggiungere, ma non eliminare, ulteriori elementi per tener conto delle proprie politiche di gestione e delle caratteristiche peculiari di alcuni ponti della loro rete [31].

A seguito delle ispezioni ogni elemento viene caratterizzato da un indicatore che permette di valutare lo stato di degrado dell'elemento. Tale indicatore può assumere un

valore che varia tra 1 (condizione di non deterioramento) fino ad un massimo di 5 (condizione di deterioramento avanzato). Associato ad ogni indicatore, con riferimento al tipo di elemento e al suo stato di degrado, vengono suggeriti da 1 a 3 possibili interventi di manutenzione e i costi unitari ad essi associati (fig. 16).

CONDITION STATE	DESCRIPTION	FEASIBLE ACTIONS
1	"Good" The element shows little or no deterioration. There may be discoloration, efflorescence, and/or superficial cracking but without affect on strength and/or serviceability.	
2	"Fair" Minor cracks and spalls may be present and there may be exposed reinforcing with no evidence of corrosion. There is no exposure of the prestress system.	
3	"Poor" Some delaminations and/or spalls may be present. There may be minor exposure but no deterioration of the prestress system. Corrosion of non-prestressed reinforcement may be present but loss of section is incidental and does not significantly affect the strength and/or serviceability of either the element or the bridge.	<ul style="list-style-type: none"> • Clean steel and patch (and/or seal)
4	"Serious" Delaminations, spalls and corrosion of non-prestressed reinforcement are prevalent. There may also be exposure and deterioration of the prestress system (manifested by loss of bond, broken strands or wire, failed anchorages, etc). There may be sufficient concern to warrant an analysis to ascertain the impact on the strength and/or serviceability of either the element or the bridge.	<ul style="list-style-type: none"> • Replace strands by splicing, patch concrete • Rehab Element • Replace Element

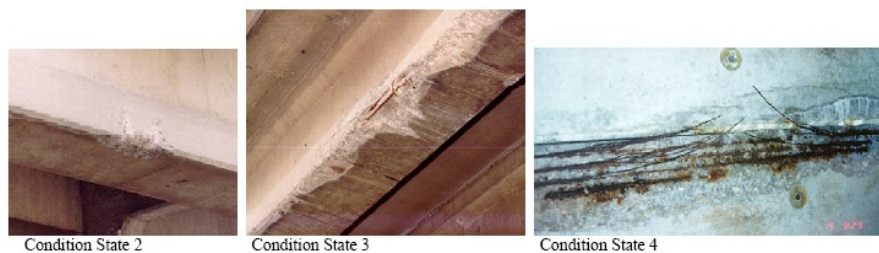


Figura 16 Indicatori relativi agli elementi in calcestruzzo precompressi e possibili interventi tratta da [11]

Il software Pontis è caratterizzato dai seguenti moduli principali:

- ✓ *Condition State and Feasible Action* che contiene le informazioni generali relative ai ponti e allo stato di degrado;
- ✓ *Deterioration Prediction*, in cui viene stimata l'evoluzione dello stato di degrado nel tempo, e quindi il passaggio da una condizione all'altra (per esempio dallo stato 2 allo stato 3). Tale stima viene effettuata attraverso un approccio di tipo Markoviano andando a definire le matrici di transizione probabilistica.
- ✓ *MR&R (maintenance, repair and rehabilitation Optimisation)* che a partire dai dati dei moduli precedenti e dei costi unitari degli interventi elabora una procedura di ottimizzazione, i cui risultati sono degli scenari ottimizzati di

riparazione, manutenzione o riabilitazione per ogni elemento e per ogni possibile condizione.

- ✓ *Functional Improvement Optimization*, confronta i benefici ottenuti da un miglioramento funzionale, come ad esempio l'aumento della dimensione della carreggiata, con i suoi costi e ordina in base alla priorità i ponti che necessitano di adeguamenti.
- ✓ *Integrated Project Programming* che combina i risultati di questi due ultimi moduli e suggerisce un programma di gestione sia per i singoli ponti che per la rete, a lungo termine, in funzione delle risorse economiche disponibili, della crescita del livello del traffico e del livello di servizio richiesto [32].

L'ottimizzazione è basata a livello di rete utilizzando il minimo costo del ciclo di vita atteso su un orizzonte di pianificazione infinito. I benefici sono calcolati comparando i costi risparmiati eseguendo l'intervento rispetto al rinvio di un anno. Viene riportato di seguito il diagramma dei principali componenti del sistema di gestione Pontis (fig. 17).

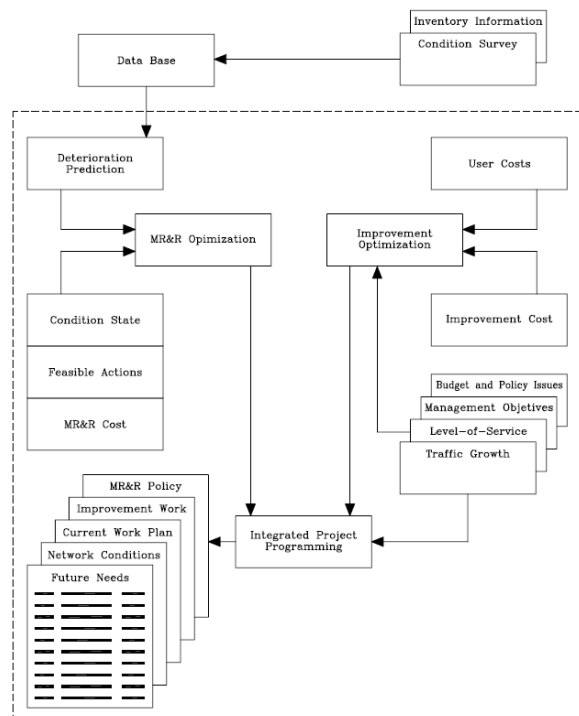


Figura 17 Componenti principali del software Pontis tratta da [31]

2.4.2 Bridgit

Il sistema per la gestione dei ponti Bridgit è stato sviluppato dalla National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) per soddisfare le esigenze operative dello Stato e degli enti locali, nonché i requisiti proposti dalla Federal Highway Administration [33].

Il sistema si occupa di pianificare e programmare la manutenzione a livello di progetto (project level). Il sistema comprende diversi moduli che permettono di archiviare e modificare i dati di inventario, delle ispezioni e della manutenzione; Il software è utilizzato negli Stati del Maine, Washington e nella Louisiana [34]

Bridgit è simile al Pontis ma è diversa la filosofia con cui viene eseguita l'ottimizzazione: in Bridgit vengono determinati prima gli interventi che riguardano i singoli ponti e successivamente vengono selezionati individualmente i progetti in base ad una ottimizzazione a livello di rete, in Pontis invece, vengono prima determinati gli obiettivi per l'intera rete e poi in base a questi obiettivi vengono individuati i singoli progetti riguardanti i singoli ponti.

I principali moduli che compongono il sistema sono i seguenti [35]:

- ✓ *Inventory Module* : costituito da un database in grado di gestire sia i dati derivanti dall'NBI (*National Bridge Inventory*), sia i dati definiti dall'utente;
- ✓ *Inspection Module* : contiene i dati raccolti durante le varie ispezioni e consente di classificare la condizione dei vari elementi con un sistema simile a quello usato in Pontis;
- ✓ *MR&R Module* : consente di programmare, catalogare e monitorare programmi pluriennali di preservazione ed inoltre di conservare le informazioni che riguardano gli interventi effettuati e i relativi costi per i singoli ponti della rete;
- ✓ *Analysis Module* : è il modulo nel quale viene effettuata l'ottimizzazione in base ai dati raccolti nei moduli precedenti;
- ✓ *Models Module* : è il modulo che permette di visualizzare o modificare i modelli e i reports che vengono utilizzati nella procedura di ottimizzazione, in maniera tale da consentire agli utenti di personalizzare Bridgit per tener conto delle risorse e delle strategie delle diverse agenzie.

2.4.3 Danbro

DANBRO è un sistema computerizzato per la gestione dei ponti sia stradali che ferroviari, sviluppato ed attualmente utilizzato in Danimarca. DANBRO può essere utilizzato per progetti di manutenzione/riparazione a diversi livelli: esecutivo, di progettazione degli interventi, amministrativo o di semplice manutenzione. Il sistema è composto principalmente da un insieme di attività collegate alla gestione dei ponti, un insieme di codici e regole per la gestione delle attività, un insieme di database ed un insieme di programmi per il trattamento ed il processo dei dati raccolti [32]. I principali moduli del software sono [36]:

- ✓ *Basic Module* contiene tutti i dati amministrativi e strutturali, nonché tutti i dati derivanti dalle ispezioni.
- ✓ *Maintenance Module* raccoglie tutte le informazioni relative ai componenti del ponte che devono essere adeguati o soggetti a manutenzione ad intervalli regolari di tempo; nel modulo è anche presente un database di possibili interventi sui componenti.
- ✓ *Price Catalogue* è responsabile della stima dei costi di riparazione connessi ai risultati delle ispezioni generali e speciali oltre che ai dati di progetto. Il database presente in questo modulo contiene i prezzi unitari dei vari e possibili interventi sugli elementi. Un programma interno al modulo assicura inoltre, che tutti i prezzi siano riportati al valore attuale per tener conto del tasso di sconto del denaro (*discount rate*).
- ✓ *Optimisation Module*, contiene i dati economici relativi alle varie alternative di intervento di manutenzione o riparazione. Questi dati vengono quindi processati attraverso un algoritmo di ottimizzazione all'interno del modulo che opera a livello di rete di ponti, includendo, comunque, informazioni derivanti dal livello di progetto (singoli ponti). Attraverso un procedimento iterativo, il programma di ottimizzazione è in grado di determinare gli interventi di riparazione economicamente più favorevoli, inoltre determina gli interventi meno costosi da effettuarsi quando i limiti sul budget disponibile non permettono di effettuare tutti gli interventi ottimali previsti. Il programma è

anche in grado di prevedere nuovi scenari nel caso di budget inferiori a quelli effettivamente richiesti.

- ✓ *Budget and Cost Module*, che contiene le informazioni sul budget per la manutenzione e le riparazioni.
- ✓ *Experience Module* che contiene tutti i dati relativi al danneggiamento dei componenti del ponte riscontrati durante le ispezioni. Questi dati riguardano sia la posizione del danno, che il tipo di danno, le cause, così come i materiali coinvolti. Nel modulo vengono raccolti anche i dati relativi sia alle misure effettuate sul campo sia a quelle effettuate in laboratorio su provini raccolti durante le ispezioni.

2.4.4 Most (Moscow Bridge Management System)

Software che è stato implementato nel 2002 e viene utilizzato da Gormost che è un'agenzia di Mosca responsabile della manutenzione dei ponti.

Il software MOST è suddiviso in 7 moduli principali [37]:

- ✓ *Navigator*: è basato su una mappa interattiva della città dove sono segnati tutti i ponti e in cui sono riportate le informazioni relative alle caratteristiche principali (nome, lunghezza,...);
- ✓ *Inventory Module and Archive*: questi moduli mostrano la struttura in dettaglio (dati amministrativi, geometria, foto, ...) una volta individuato il ponte attraverso il modulo Navigator;
- ✓ *General Catalogue*: i ponti vengono considerati come un insieme di elementi strutturali standard a ognuno dei quali viene assegnato una condizione di stato diversa;
- ✓ *Inspection module*: questo modulo supporta la procedura di controllo del ponte. Le ispezioni standard vengono eseguite ad intervalli non superiori a 2 anni. Prima di ogni ispezione è necessario avere uno Schema d'Ispezione che stabilisca la corrispondenza bidirezionale tra i disegni del ponte e gli elementi standard. I risultati delle ispezioni vengono poi riportati in maniera dettagliata localizzando tutti gli elementi strutturali standard e le loro condizioni. E' possibile quindi valutare le condizioni generali della struttura;

- ✓ *MRR optimization module* questo modulo fornisce a breve e a lungo termine la:
 - previsione delle condizioni di stato dei ponti;
 - pianificazione del budget;
 - pianificazione della riparazione e l'assegnazione delle procedure standard di riabilitazione.

Si determina il numero di procedure standard di riparazione che dovrebbe essere applicata ad ogni elemento strutturale standard durante un certo periodo per minimizzare i costi durante il ciclo di vita del singolo ponte o di una rete di ponti.

La strategia ottimale può, comunque, variare in funzione di diversi fattori: vincoli di bilancio, degrado degli elementi strutturali, ecc.

BIBLIOGRAFIA

- [1] P.D. Thompson, J.O. Sobanjo, R. Kerr (2003) "Florida DOT Project-Level Bridge Management Models" *Journal of Bridge Engineering*, 8 (6), 345-352.
- [2] Progetto BRIME <http://www.trl.co.uk/brime/workp.htm>
- [3] B. Godart, P.R. Vassie (1999) "Review of existing BMS and definition of inputs for the proposed BMS" *Deliverable D4 BRIME*.
- [4] E. Manzini (1983) "La manutenzione questa sconosciuta", *Rivista Recuperare*, n.5.
- [5] C. Bertoluzza (2005) "Valutazione numerica dei degradi", *Rivista Le Strade*, n.1-2.
- [6] FHWA (2002) "Bridge Inspector's Reference Manual", *NHI Publication*.
- [7] AASHTO (1994) "Manual for Condition Evaluation of Bridges", *American Association of State Highway and Transportation Officials Publication*.
- [8] WSDOT (2010) "Washington State Bridge Inspection Manual", *Washington State Department of Transportation Administrative and Engineering Publications*.
- [9] NYSDOT (1997) "Bridge Inspection Manual", *State of New York Department of Transportation*.
- [10] MnDOT (2009) "Bridge Inspection Manual", *Minnesota Department of Transportation*.
- [11] MDOT (2009) "Pontis Bridge Inspection Manual", *Michigan Department of Transportation*.
- [12] FHWA (1995) "Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges".
- [13] FHWA (1991) "Bridge Inspector's Training Manual 90".
- [14] 4Emme (2005) "Manuale per la valutazione dello stato dei ponti" Pubblicato da CIAS (*Centro Internazionale di Aggiornamento Sperimentale-Scientifico*).
- [15] L. Bevc, B. Mahut, I. Peruš, K. Grefstad, (2001) "Review of existing procedures for Optimisation" *Deliverable D3 BRIME*.
- [16] L. Bevc, B. Mahut, K. Grefstad, (1999) "Review of current practice for assessment of structural condition and classification of defects", *Deliverable D2 BRIME*.
- [17] D.T. Hai (2008) "Computerized Database for maintenance and management of Highway Bridges in Vietnam" *Journal of Bridge Engineering* 13 (3), 245-257.

- [18] Frangopol, D. M. (1999). "Life-cycle cost analysis for bridges." *Bridge safety and reliability*, D. M. Frangopol, ed., ASCE, Va., 210–236.
- [19] A. D. Orcesi, C. F. Cremona (2011) "Optimization of Maintenance Strategies for the Management of the National Bridge Stock in France" *Journal of Bridge Engineering*, 16 (1), 44-52.
- [20] R. Gori (2006) "Preservation of historical metal bridges: evaluation of their structural reliability" *TICCIH Congress 2006* Terni 14-18 september 2006.
- [21] A. Montepara, F. Merusi, F. Giuliani (2008) "Sviluppo di una nuova metodologia per la valutazione delle priorità d'intervento di manutenzione di ponti e viadotti" *17° Convegno Nazionale della Società Italiana Infrastrutture Viarie*, Enna 10-12 Settembre 2008.
- [22] P. Franchetti, C. Pellegrino, A. Soffiato, C. Modena (2003) "La manutenzione programma di ponti e viadotti: criteri per la valutazione dell'efficienza in servizio" *13° Convegno Nazionale della Società Italiana Infrastrutture Viarie*, Padova, 30-31 Ottobre 2003.
- [23] S. Valenzuela, H. de Solminihac, T. Echaveguren (2010) "Proposal of an Integrated Index for Prioritization of Bridge Maintenance" *Journal of Bridge Engineering*, 15 (3), 337-343.
- [24] Fischer, T., Alvarez, M., de la Llera, J. C., and Riddell, R. (2002). "An integrated model for earthquake risk assessment of buildings." *Eng. Struct.*, 24(7), 979–998.
- [25] D. M. Frangopol, J.S. Kong, E. S. Gharaibeh "Reliability-Based Life-Cycle Management of Highway Bridges" *Journal of Computing in Civil Engineering*, 15 (1) 27-34.
- [26] L. C. Neves, D. M. Frangopol (2004) "Condition, safety and cost profiles for deteriorating structures with emphasis on bridges" *Reliability Engineering & System Safety*, 89(2), 185-198.
- [27] L. C. Neves, D. M. Frangopol (2006) "Probabilistic Lifetime-Oriented Multiobjective Optimization of Bridge Maintenance: Single Maintenance Type" *Journal of Structural Engineering*, 132(6), 991-1005.
- [28] M. Liu, D. M. Frangopol (2005) "Multiobjective Maintenance Planning Optimization for Deteriorating Bridges Considering Condition, Safety, and Life-Cycle cost", *Journal of Structural Engineering* 131(5), 833-841.

- [29] M. Liu, D. M. Frangopol (2006) "Probability-Based Bridge Network Performance Evaluation", *Journal of Bridge Engineering* 11(5), 633-641.
- [30] S. B. Chase, L. Gàspàr (2000) "Modeling the reduction in load capacity of highway bridges with age" *Journal of Bridge Engineering* 5 (4), 331-336.
- [31] W.E. Robert, A. R. Marshall, R. W. Shepard, J. Aldayuz (2003) "Pontis Bridge Management System" *9th International Bridge Management Conference Transportation Research Circular Number E- C049 Orlando, Florida*.
- [32] R. Astudillo Pastor, J.M. Arrieta Torrealba, C. Velando Cabañas, C. Lozano Bruna (1999), "Decision on repair/replacement", *Deliverable D7*, BRIME.
- [33] K. L. Rens; C. L. Nogueira; and D. J. Transue (2005) "Bridge Management and Nondestructive Evaluation" *Journal of performance of constructed facilities*, ASCE, 19, 3-16.
- [34] B. Godart, P. R. Vassie (2001) "Bridge management systems: extended review of existing systems and outline framework for a European systems". *Deliverable D13* BRIME.
- [35] H. Hawk "BRIDGIT: User-Friendly Approach to Bridge Management" *TRB Transportation Research Circular 498*.
- [36] N. H. Andersen (2000) "DANBRO – A Bridge Management System for many levels" *Deliverable D7* BRIME.
- [37] G. Brodski, E. Brodskaja, A. Gozman, Y.A. Enutin, V. A. Hitrov, V. M. Kuznetsov, V. I. Shesterikov, A. Tseitlin, G. Tseitlin, J. U. Zaitchik, (2003) "Bridge Management System for the City of Moscow" *9th International Bridge Management Conference Transportation Research Circular Number E- C049 Orlando, Florida*.

CAPITOLO 3

I PONTI: TIPOLOGIE COSTRUTTIVE, CAUSE DI DEGRADO E INTERVENTI MANUTENTIVI

3.1 INTRODUZIONE

Nel momento in cui un'opera infrastrutturale viene ultimata ed entra in esercizio comincia il suo decadimento. Se tali opere non vengono sottoposte a manutenzione andranno incontro ad una completa inefficienza prima della loro vita utile prevista. Un ponte, infatti, pur essendo concepito come opera che potrebbe avere una vita utile di circa cento anni, è soggetto a degrado dovuto a molti fattori quali l'aumento del traffico e delle velocità agenti (vedi fenomeni di fatica), le condizioni ambientali aggressive quali l'esposizione a cloruri, cicli di gelo e disgelo, gli eventi eccezionali, i fenomeni lenti, che si sommano ad altre concause. In alcuni casi tra le cause di degrado vi sono aspetti legati all'uso dei materiali come l'utilizzo di materiali da costruzione non idonei o il cui comportamento, alle condizioni ambientali di servizio, non risultava perfettamente noto all'epoca della costruzione; oppure la scelta di soluzioni progettuali non orientate alla durabilità dell'opera. Se a questo si aggiunge la cronica insufficienza della manutenzione, è facilmente spiegabile come una buona parte del patrimonio di opere presenti problemi legati a carenze strutturali o a obsolescenza funzionale.

Il processo di deterioramento è molto rapido, mentre si stanno costruendo due nuovi ponti, tre di quelli esistenti si stanno degradando come affermato da uno studio di Yanev [1] condotto su 720 degli 860 ponti della città di New York. Da osservazioni sul campo e utilizzando procedure statistiche, lo stesso studio conclude che, non sottoponendo a manutenzione gli elementi di un ponte, essi andranno incontro ad una completa inefficienza molto prima dei cento anni di vita della struttura: in particolare già dopo quaranta anni per le solette non dotate di giunti di espansione, dopo trenta anni per gli elementi principali in acciaio o calcestruzzo armato, gli apparecchi di appoggio, le pile, i marciapiedi e le solette dotate di giunti, e già dopo dieci anni per gli stessi giunti di espansione [2]. Oltre alle operazioni di manutenzione, si distinguono gli interventi di adeguamento dell'opera a

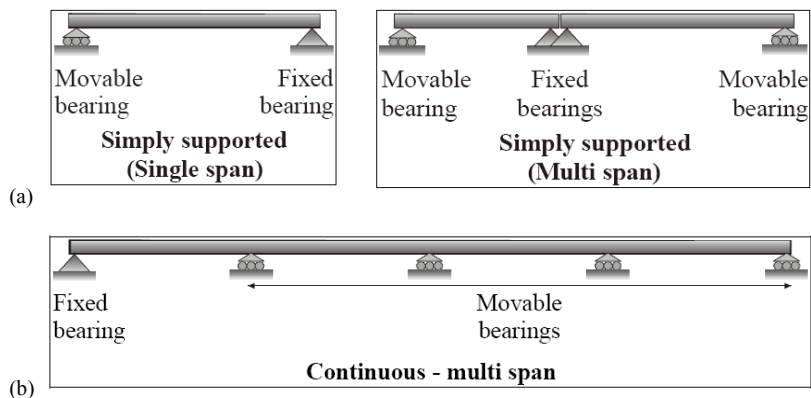
esigenze attuali, non espressamente considerate o scarsamente prevedibili in fase di progetto: adeguamento funzionale, adeguamento sismico, ecc.

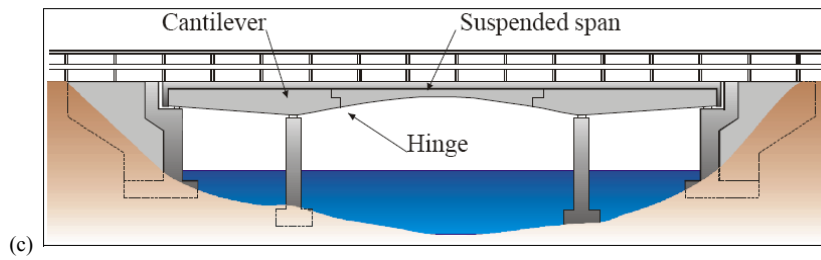
Si sottolinea inoltre che le azioni di manutenzione intraprese al momento adeguato permettano un aumento della vita utile del ponte stesso e una riduzione dei costi di manutenzione[3].

3.2 TIPOLOGIE COSTRUTTIVE DEI PONTI

Nella fase di progettazione di un ponte la scelta della tipologia strutturale è il risultato di un esame approfondito che tiene in considerazione numerosi aspetti di natura topografica, statica, costruttiva, economica, architettonica ed ambientale. Fra gli elementi principali che hanno determinano la tipologia dei ponti, la luce che il manufatto doveva superare è stata sicuramente quella più rilevante; tale aspetto ha inciso sia sulla scelta dei materiali, che sullo schema statico del ponte. Le principali tipologie strutturali dei ponti stradali in base allo schema statico sono:

- *Ponti a travata*, in cui la struttura principale è composta da una o più travi longitudinali appoggiate alla sottostruttura e sollecitate prevalentemente da sforzi di taglio e momenti flettenti (fig.1);





(c)

Figura 1 Principali schemi statici dei ponti a travata: (a) travi semplicemente appoggiate (b) travi continue (c) travi a mensola[4]

- *Ponti ad arco*, in cui la struttura principale è composta da uno o più archi, ed è sollecitata prevalentemente a compressione (fig. 2);



Figura 2 Ponte Pietra a Verona

- *Ponti a telaio*, nei quali degli elementi disposti a puntone collegano l'impalcato con le pile. Può essere considerato una struttura intermedia tra l'arco e la trave (fig. 3);

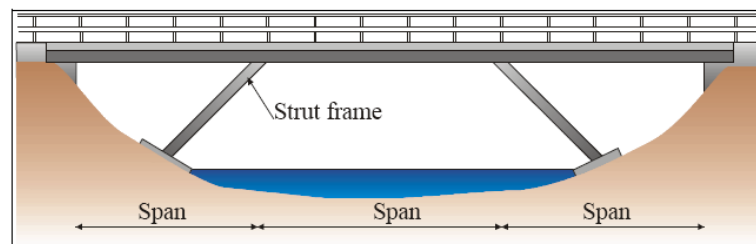


Figura 3 Schema del ponte a telaio [4]

- *Ponti sospesi*, caratterizzati da funi dotate di rigidità flessionale, in grado quindi di assumere una conformazione curvilinea stabile che, attraverso gli elementi di sospensione, sorregge l'impalcato (fig. 4);

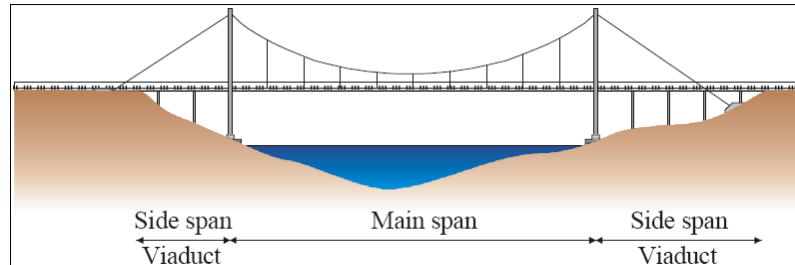


Figura 4 Schema del ponte sospeso [4]

- *Ponti strallati*, caratterizzati da cavi rettilinei ancorati a un pilone (antenna) e all'impalcato. A causa dell'inclinazione delle funi, l'impalcato è soggetto, oltre alle azioni flettenti, a sforzi di compressione o di trazione (fig. 5).

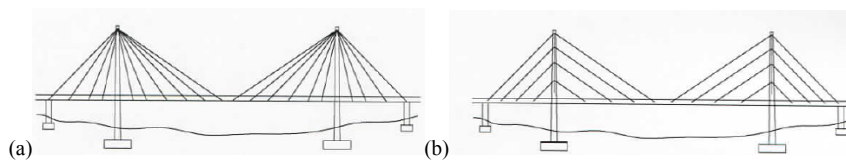


Figura 5 Esempi di ponte strallato: (a) strallatura a ventaglio, (b) strallatura ad arpa [5]

3.3 ELEMENTI COSTITUENTI I PONTI

Un ponte può essere visto come l'insieme di diversi componenti che interagiscono fra loro e con l'ambiente circostante. Le componenti principali possono essere suddivise in 3 grandi categorie:

- ✓ **Sovrastruttura**, che comprende tutti gli elementi strutturali che si trovano al di sopra degli appoggi (impalcato, arco, piedritti);
- ✓ **Sottostruttura** che comprende tutti gli elementi strutturali che si trovano al di sotto degli appoggi (spalle, pile, pulvini, fondazioni);
- ✓ **Accessori**, che comprende tutti gli altri elementi costituenti il ponte (apparecchi d'appoggio, giunti, dispositivi antisismici, cavi di

precompressione, sistema di drenaggio, pavimentazione, cordoli, barriere stradali, illuminazione, ecc.).

Vediamo di descrivere più in dettaglio alcuni fra gli elementi più importanti.

3.3.1 Impalcato

L'impalcato è la struttura orizzontale che sorregge il piano viabile e che trasferisce i carichi alla sottostruttura mediante gli appoggi. L'impalcato può essere realizzato in acciaio o in calcestruzzo.

Esistono diverse tipologie di impalcato, fra le più comuni ritroviamo (fig. 6):

- *a travata*: se la struttura portante è costituita da travi;
- *a cassone*: se la struttura portante è costituita da elementi scatolari;
- *reticolare*: se la struttura portante è costituita da travi longitudinali collegate da elementi irrigidenti trasversali;
- *a solettone*: se la struttura portante è costituita da travi longitudinali accostate e annegate all'interno di un getto di calcestruzzo.

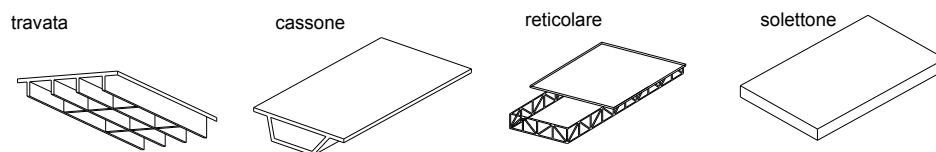


Figura 6 Tipologie di impalcato

3.3.2 Arco

L'arco è un elemento strutturale a forma curva che si poggia su due piedritti e tipicamente sospeso su uno spazio vuoto. L'arco è caratterizzato dalla *freccia* che è la distanza massima verticale tra la sommità dell'intradosso e la linea di imposta dell'arco; e dalla *luce* che è la distanza tra i due piedritti. Il rapporto tra la freccia e la luce ci permette di calcolare il *ribassamento* attraverso cui distinguiamo (fig. 7) [6]:

- *arco a tutto sesto* (semicircolare): $0.4 < f/l < 0.5$
- *arco ribassato* (circolare, policentrico, molto raramente semiellittico), in cui si ha: $0.10 < f/l < 0.4$;

- *arco a sesto acuto o ogivale*, in cui gli archi di circonferenza non sono raccordati (si tratta spesso di una tipologia medievale e tardo medievale tipica del gotico e del neogotico): $f/l > 0.5$.

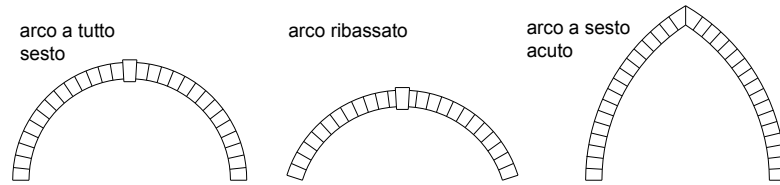


Figura 7 Tipologie di arco

L'arco può essere realizzato in muratura, in acciaio o in calcestruzzo.

Nell'ambito dei ponti ad arco si possono distinguono diverse tipologie:

- *arco a via superiore*: se l'elemento strutturale si trova al di sotto del piano viario ed è connesso allo stesso mediante dei setti lungo le estremità (fig.8).

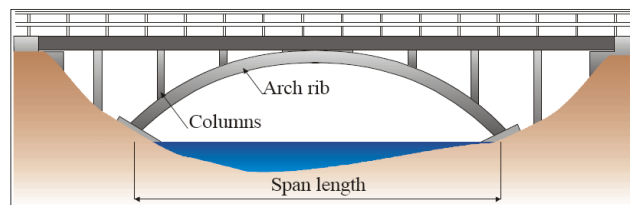


Figura 8 Esempio di ponte ad arco a via superiore [4]

- *arco a via inferiore*: se l'elemento strutturale arco si trova al di sopra del piano viario ed è connesso allo stesso mediante una successione di tiranti (fig. 9).

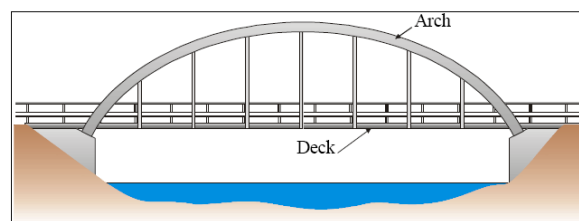


Figura 9 Esempio di ponte ad arco a via inferiore [4]

- *arco a via intermedia*: quando l'impalcato si trova ad una quota intermedia tra l'imposta dell'arco e la chiave; in tale soluzione l'arco si sdoppia in due elementi laterali o in uno centrale e l'impalcato viene sostenuto da tiranti nella zona centrale e poggiato all'arco con dei setti alle estremità.

3.3.3 Spalle

Le spalle costituiscono i supporti di estremità dell'impalcato. Il loro compito solitamente è duplice: devono trasmettere le reazioni dell'impalcato alle fondazioni e contemporaneamente devono garantire il contenimento del terrapieno. Esistono diverse tipologie di spalle, fra le più comuni vi sono quelle:

- *a gravità*: si tratta di elementi monolitici di grandi dimensioni le cui condizioni di resistenza e stabilità dipendono principalmente dal peso proprio. Possono essere realizzati in muratura, di mattoni o elementi lapidei, oppure in calcestruzzo non armato o debolmente armato.
- *a sbalzo*: sono costituite da pareti in calcestruzzo armato incastrate ad una suola di base che ne garantisce la stabilità sfruttando il peso del terrapieno. Il comportamento delle spalle e da trave a mensola verticale, caricata dalla spinta delle terre.
- *a telaio*: la struttura portante è di tipo intelaiata in modo da consentire una sistemazione del terreno secondo la scarpa naturale.

3.3.4 Pile

Le pile costituiscono i supporti intermedi della struttura nel caso di ponti a più campate. Le pile possono essere realizzate in calcestruzzo o in muratura. Esistono diverse tipologie di pile, fra le più comuni ritroviamo quelle:

- *singola*: nel caso in cui la pila è costituita da un unico elemento (pilastro o setto);
- *telaio*: nel caso in cui la pila è costituita da più pilastri, allineati secondo l'asse maggiore della pila, e collegati tra loro in sommità dal pulvino ed eventualmente a quote intermedie da traversi.

3.3.5 Pulvino

Il pulvino è l'elemento strutturale, solitamente a forma di piramide tronca rovesciata, posto al di sopra delle pile, e che funge da appoggio per l'impalcato. Nel caso di pila a singola colonna assume una conformazione a sbalzo su ambo i lati, in modo da raccordare e coprire l'intero spessore dell'impalcato. Nel caso di pila a telaio ha la funzione di collegare le teste delle colonne costituenti la pila.

3.3.6 Fondazioni

I sistemi di fondazione più frequentemente utilizzati sono i seguenti:

- *plinti di fondazione*: si tratta di fondazioni superficiali gettate direttamente sul terreno dopo aver realizzato uno scavo a cielo aperto. Tale tipologia è proponibile nel caso in cui il terreno in superficie è adatto per sostenere i carichi trasmessi dalle pile;

- *fondazioni profonde per mezzo di pali*: se il terreno di fondazione non è idoneo ad assorbire i carichi trasferiti dalle pile vengono utilizzati pali che diffondono le sollecitazioni agli strati di terreno più profondi, caratterizzati da parametri meccanici più elevati. Esistono svariate tipologie di pali, diversi per diametro e capacità di carico, sistemi di scavo e di costruzione.

3.3.7 Apparecchi d'appoggio

Sono dei dispositivi meccanici utilizzati per collegare l'impalcato con le strutture di sostegno sottostante: pulvino e quindi pile o spalle. Tali elementi devono assolvere la funzione di ripartizione degli sforzi e di assorbimento delle deformazioni dell'impalcato, in modo da prevenire fenomeni di degrado per fatica o da contatto.

Nel tempo essi hanno subito una notevole evoluzione tecnologica, sia per l'impiego dei materiali che per la funzione che viene loro affidata. Inizialmente pensati come appoggi fissi o scorrevoli in una sola direzione, oggi gli apparecchi d'appoggio sono concepiti come vincoli tridimensionali e in molti casi sono costituiti da isolatori sismici come specificato più avanti nel paragrafo 3.3.9. Esistono diverse tipologie di appoggi (fig. 10) [7]:

- *fissi oscillanti con contatto lineare*, permettono la rotazione attorno ad un asse;
- *fissi oscillanti con superficie a Teflon*, permettono la rotazione attorno a qualsiasi asse in un piano;

- *fissi oscillanti a disco elastomerico*, permettono la rotazione attorno a qualsiasi asse in un piano;
- *mobili oscillanti a disco elastomerico*, permettono la rotazione attorno a qualsiasi asse e lo spostamento in qualsiasi direzione;
- *fissi oscillanti con superfici di scorrimento al PTFE (teflon)*, permettono la rotazione attorno a qualsiasi asse in un piano;
- *mobili a rullo*, permettono la rotazione attorno ad un asse e lo spostamento perpendicolare a tale asse;
- *mobili a strisciamento*, permettono rotazioni e spostamenti secondo qualsiasi asse di un piano.

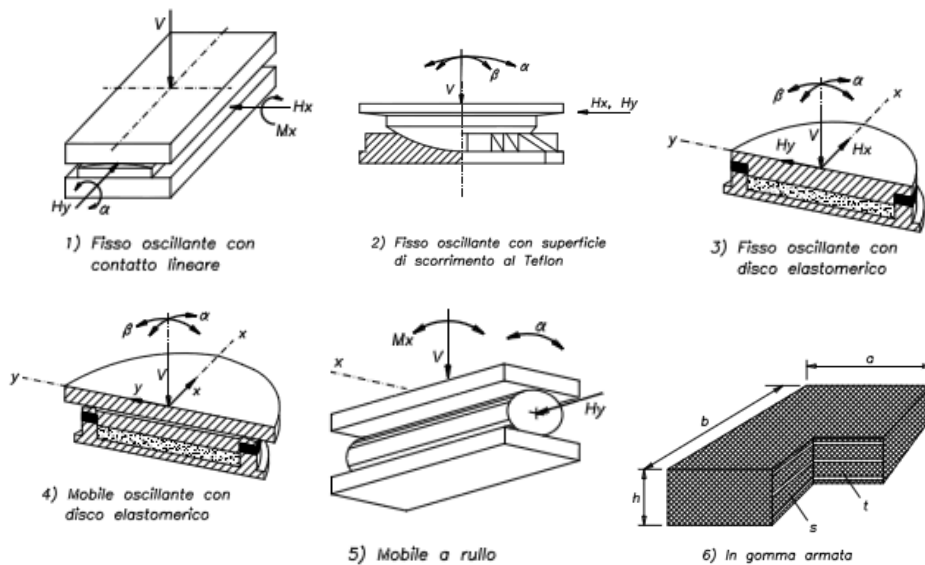


Figura 10 Tipologie di appoggi [7]

3.3.8 Giunti

Sono delle discontinuità strutturali tra due campate contigue o tra le campate di estremità e il terrapieno sovrastante le spalle. Vengono progettati per permettere traslazioni e rotazioni relative causate da: dilatazioni termiche e contrazioni della sovrastruttura, ritiri ed assestamenti del calcestruzzo, restringimenti elastici dovuti al pre-tensionamento, movimenti della struttura sotto carico, o qualsiasi altro movimento a cui è sottoposto

l'impalcato. I giunti devono garantire la continuità del piano viabile e un'efficace tenuta all'acqua.

I giunti possono essere realizzati attraverso delle reti costituite da fibre sintetiche poste a cavallo del giunto ed annegate nel manto bituminoso, o attraverso l'utilizzo di profilati elastomerici in gomma interposti tra due angolari metallici e fissati in modo solidale alla soletta sottostante, o tramite l'utilizzo di strisce in gomma opportunamente sagomate, o ancora attraverso l'utilizzo di pettini in acciaio eventualmente rivestiti da neoprene o mediante l'inserimento sotto la pavimentazione di profili metallici a "T" muniti di ala superiore interna sagomata (giunti tampone) (fig. 11).

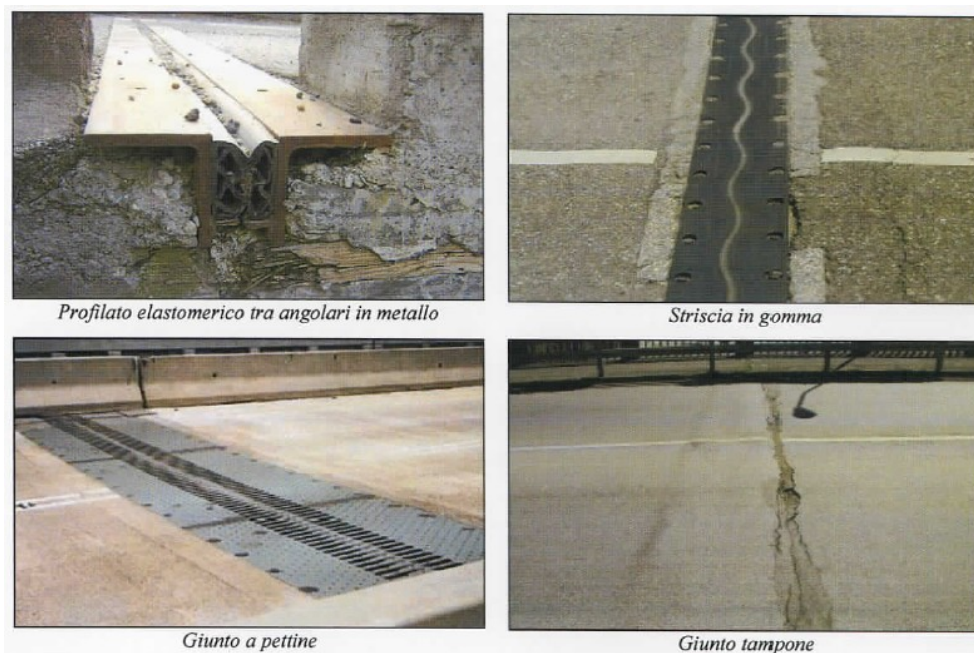


Figura 11 Tipologie di giunti [5]

3.3.9 Dispositivi antisismici

Al fine di ridurre la vulnerabilità dei ponti soggetti ad azioni sismiche vengono inseriti opportuni dispositivi antisismici, in accoppiamento o sostituzione dei classici apparecchi di appoggio. Tali dispositivi possono essere distinti in due grandi categorie (fig.12):

- *sistemi di isolamento* (isolatori elastomerici, isolatori a scorrimento,...). Hanno la funzione di sconnettere la sovrastruttura dalla sottostruttura con conseguente riduzione delle forze di inerzia associate a un evento sismico. Di contro a seguito dell'installazione di dispositivi di isolamento vengono incrementati gli spostamenti massimi della sovrastruttura, pertanto gli apparecchi di appoggio dovranno essere opportunamente dimensionati. Parallelamente gli apparecchi di isolamento introducono una dissipazione energetica che aiuta a contenere l'incremento di spostamento.
- *sistemi di dissipazione*: in commercio esistono molte tipologie di dissipatori, ad esempio viscosi, isteretici, visco-elastici, ecc. Si tratta di meccanismi meccanici che generano forze resistive (sempre in opposizione al verso del moto) capaci di dissipare energia sfruttando le continue inversioni del moto (risposta ciclica).

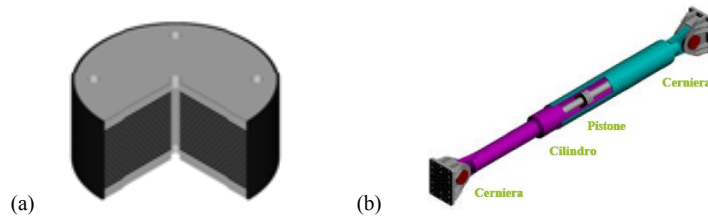


Figura 12 Alcune tipologie di dispositivi antisismici: (a) isolatori elastomerici, (b) dissipatori viscosi [8]

3.3.10 Cavi di precompressione

Sono cavi in acciaio o in fibre di carbonio che, opportunamente posizionati e messi in trazione all'interno o all'esterno dell'elemento trave, permettono a quest'ultima di raggiungere una resistenza maggiore e di conseguenza coprire luci più elevate.

A seconda della tecnica di precompressione, si possono distinguere:

- *Cavi scorrevoli o post-tesi*: i cavi vengono alloggiati all'interno di guaine e tesati a getto indurito con la possibilità di riprendere il tiro in qualsiasi momento.
- *Cavi aderenti o pre-tesi*: i cavi vengono messi in tensione prima del getto dell'elemento che va ad inglobarli, ad indurimento avvenuto, si procede al taglio alle testate provocando il trasferimento al calcestruzzo della forza di pretensione.

3.3.11 Sistema di smaltimento delle acque

I sistemi di smaltimento permettono di allontanare l'acqua piovana che viene raccolta dalla sede stradale, in modo tale da evitare ristagni sulle componenti del ponte, al fine di evitare fenomeni di infiltrazione delle acque sugli stessi. La raccolta delle acque avviene a mezzo di una presa superiore, che se è orizzontale è generalmente una griglia e se è verticale (ad esempio ricavata sul ciglio del marciapiede) è a bocca di lupo. L'acqua così catturata è convogliata in un pozzetto di raccolta che consente la sedimentazione del materiale trasportato dall'acqua. Successivamente l'acqua viene allontanata attraverso un bocchettone di scarico (fig.13).

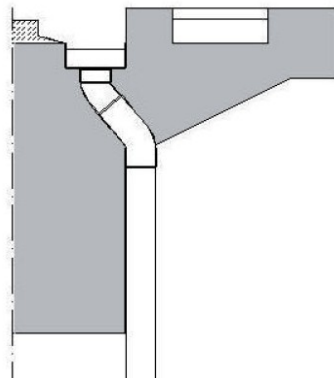


Figura 13 Sistema di smaltimento delle acque

3.4 TIPOLOGIE DI PONTI PRESENTI SULLE STRADE ITALIANE

I ponti maggiormente presenti sulle strade italiane sono realizzati con materiali e tipologie strutturali diverse. Tale diversità è principalmente funzione dell'epoca di costruzione, possiamo quindi distinguere:

- i ponti storici, che comprendono:
 - i ponti ad arco in muratura (ad esempio quelli di origine romana), che pur essendo stati generalmente modificati o ampliati in varie epoche, conservano ancora le impostazioni originali [9];
 - i ponti ad arco in calcestruzzo armato.

Tali tipologie di ponti sono principalmente presenti sulla viabilità secondaria;

- i ponti moderni, che comprendono:
 - ponti in c.a. e c.a.p. con impalcato a travi o a cassoni;
 - ponti misti in acciaio-calcestruzzo con impalcato a travi o a cassoni.Tali tipologie sono presenti prevalentemente sulla rete autostradale italiana [10].

3.4.1 Ponti ad arco in muratura

I ponti ad arco in muratura sono stati per molto tempo (dal periodo romano fino al XIX secolo) l'unica alternativa ai ponti in legno. I Romani furono i primi ad applicare la 'volta' per la costruzione dei ponti. I ponti ad arco romani erano realizzati con archi semicircolari ed avevano dei piloni di sostegno con una larghezza compresa tra $1/3$ ed $1/5$ della luce.

Ancora oggi è possibile ammirare alcuni esempi di ponti in muratura e una gran parte di essi sono ancora in servizio (fig.14).



Figura14 Ponte Elio (Sant'Angelo), Roma [11]

I ponti ad arco sono caratterizzati da una struttura portante principale ad arco o da un insieme di archi, su cui l'impalcato poggia, che vengono sollecitati prevalentemente da azioni di compressione. L'assenza di azioni di trazione consente di costruire archi con materiali che non resistono a trazione come nel caso di strutture a conci (murature di mattoni o pietre squadrate grossolanamente). In genere la forma dell'arco non si adatta a quella della piattaforma stradale, necessita pertanto di una sovrastruttura che la sorregga (rinfianco, cappa e riempimento) (fig 15).

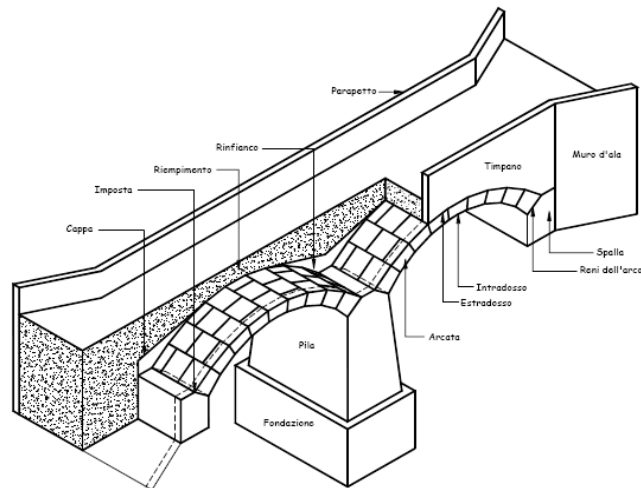


Figura15 Spaccato assonometrico di un ponte a due campate uguali [12]

3.4.2 Ponti ad arco in calcestruzzo armato

Alla fine del XIX secolo, con l'avvento del cemento armato vengono realizzati i primi ponti ad arco in calcestruzzo. Il calcestruzzo era un materiale che si prestava bene per la realizzazione di ponti di piccola e media luce. I primi ponti ad arco furono realizzati con lo schema ad arco a via superiore (fig.16) che sono più simili a quelli ad arco in muratura, successivamente vennero realizzati i ponti ad arco a via inferiore (fig 17).



Figura16 Ponte Carlo Emanuele III, Torino [13]

I ponti ad arco a via inferiore in calcestruzzo sono realizzati con lo schema strutturale di *'impalcato sospeso con spinta eliminata (bowstring)'*, in cui l'impalcato e l'arco vengono solidarizzati in maniera tale che l'impalcato funga da catena assorbendo così le spinte orizzontali.



Figura17 Ponte sul fiume Cassibile, Siracusa[14]

3.4.3 Ponti a travata in calcestruzzo armato e in c.a.p.

I primi ponti a travata in calcestruzzo armato ad armatura lenta vennero realizzati contemporaneamente ai ponti ad arco in calcestruzzo e si imposero per la realizzazione di ponti a media luce fino alla metà del XX secolo, quando comparve il cemento armato precompresso che ha permesso di superare luci maggiori.



Figura18 Viadotto SS385, Siracusa

I ponti a travata si sviluppano principalmente in rettilineo (fig.18). Tale tipologia è caratterizzata da una struttura principale composta da uno o più travi longitudinali appoggiate alla sottostruttura (pile e spalle) e sollecitate prevalentemente da azioni taglianti e momenti flettenti. I ponti a travata rappresentano probabilmente lo schema più intuitivo per la realizzazione di un ponte (da un punto di vista statico è in tutto simile a una passerella in legno). Tuttavia la resistenza e deformabilità del sistema dipendono principalmente dall'inerzia delle travi, di contro all'aumentare della sezione aumentano anche il peso proprio che, per luci rilevanti, può diventare predominante rispetto agli altri carichi. Per tale ragione nella progettazione dei ponti sono state utilizzate soluzioni costruttive che prevedevano l'utilizzo di sezioni trasversali dotate della massima inerzia ma aventi area minima in modo tale da minimizzare il peso.

Nel caso di ponti di piccole e medie luci le tipologie più comuni sono:

- soletta piena in c.a. o c.a.p.;
- travi ad anima piena in c.a. o c.a.p. costituite da una serie di travi longitudinali unite superiormente tra di loro dalla soletta superiore e molto spesso collegate inferiormente da un sistema trasversale di travi detti traversi che consentono la ripartizione dei carichi.

Nel caso di ponti di grande luce, invece, si trovano impalcato costituiti da:

- travi reticolari che permettono di alleggerire l'anima;
- travi a cassone che massimizzano la capacità resistente della sezione a parità di area trasversale.

3.4.4 Ponti a travata misti

I ponti misti sono ponti il cui impalcato ha una sezione composta da travi in acciaio e da una soletta collaborante in calcestruzzo (fig. 19); l'acciaio ha la funzione di assorbire gli sforzi di trazione mentre il calcestruzzo assorbe gli sforzi di compressione.

Le principali tipologie utilizzate, nel caso di luci medie, sono [15]:

- bitrave, costituite da due travi ad I normalmente non solidali alla soletta e saldati agli irrigidimenti verticali delle due travi principali;
- a cassone, ottenuta con una trave metallica aperta superiormente. Tale soluzione anche se più costosa costituisce un'ottima soluzione quando è richiesta un'elevata rigidità torsionale o quando si vuol ridurre l'altezza dell'impalcato.



Figura19 Viadotto Fontescodella, Macerata [15]

3.5 I MATERIALI E LE CAUSE DEL DEGRADO

Al fine di classificare le cause che portano al degrado dei ponti, si può distinguere tra cause intrinseche della struttura, specifiche di ogni singolo ponte, e cause legate a fattori esterni ed ambientali. Nella prima categoria rientra il naturale invecchiamento del materiale che costituisce l'opera, trascurando l'influenza delle azioni esterne; tale tipologia di degrado può essere considerato funzione del tempo. Inoltre si possono avere fonti di degrado legate a errori progettuali, che sono generalmente causati dalla scarsa conoscenza dei fattori influenti sulla specifica materia, e alla cattiva esecuzione, provocati spesso dalla inesperienza o dal desiderio di economizzare che coinvolge sia il committente, che tende al risparmio per carenze di fondi, sia le ditte esecutrici, che tendono a massimizzare il guadagno.

Nella seconda tipologia, quella legata a fattori esterni, rientrano le fonti di degrado legate all'ambiente circostante, agli agenti atmosferici e a quelli provocati da cause accidentali (sismi, alluvioni,...)

Ogni manifestazione del degrado può avere all'origine una o più cause di innesco (alcune delle quali contribuiscono solo all'innesco del fenomeno, altre invece contribuiscono al suo aggravarsi) che interagiscono in modo sinergico. Quindi è fondamentale conoscere le cause ai fini della determinazione di un corretto intervento di ripristino: mirato in una prima fase ad eliminare gli aspetti responsabili dell'evolversi del degrado, e in una seconda fase all'eliminazione delle cause di innesco.

Un'ulteriore considerazione bisogna farla con riferimento alla differenza tra le strutture in muratura e calcestruzzo, nei quali il degrado si mostra attraverso dei segnali inequivocabili (fessurazioni, corrosioni,...), e le strutture in c.a.p.. Nelle prime è possibile intervenire in tempi relativamente lunghi, mentre per le strutture in c.a.p. i cedimenti possono avvenire in maniera repentina, senza alcun preavviso, e con conseguenza strutturali importanti se non addirittura catastrofiche [16].

In conclusione le cause di degrado possono essere riassunte in modo schematico come segue:

- ✓ *Cause interne*
 - effetti del tempo (ritiro, fluage,...);
 - errori progettuali (errori di calcolo, sottostima dei carichi di traffico,...);
 - errori esecutivi (errata posa in opera, materiali non idonei,...).
- ✓ *Cause esterne ambientali*
 - *azione chimica* (carbonatazione, attacco dei cloruri, attacco solfatico, reazione alcali-aggregati..);
 - *azione elettrochimica* (infragilimento da idrogeno dell'acciaio di precompressione, corrosione delle armature,...);
 - *azione fisica* (cicli di gelo e disgelo,..);
 - *azione chimico-fisica* (dilavamento,...);
 - *azione meccanica* (fatica,...);
 - *azione biologica* (vegetazione infestante,...).
- ✓ *Cause esterne accidentali*
 - *azione naturali* (terremoti, frane, assestamenti del terreno, inondazioni,...);
 - *azioni antropiche* (urti, incendi,...).

Nei paragrafi successivi descriveremo brevemente alcune delle principali cause di degrado che riguardano i ponti in calcestruzzo ad armatura lenta, i ponti in c.a.p. e i ponti in muratura.

3.5.1 Azioni interne

3.5.1.1 Ritiro

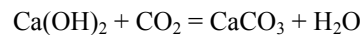
Quando l'umidità relativa scende al di sotto del 95% il calcestruzzo tende ad essiccarsi e a contrarsi, l'acqua presente nel calcestruzzo evapora verso l'ambiente esterno e può generare, attraverso l'insorgere di variazioni dimensionali, uno stato tensionale nel calcestruzzo. Da un punto di vista pratico è utile distinguere il ritiro in "plastico" e "igrometrico" a seconda che esso si manifesti nel periodo in cui il calcestruzzo è ancora plastico o quando è già indurito. Quando è ancora allo stato plastico il calcestruzzo presenta un modulo elastico estremamente basso, le tensioni che si creano sono modeste ma la resistenza a trazione è nulla. Le fessurazioni in questa fase sono da ritenere molto probabili. Il ritiro del calcestruzzo allo stato indurito coinvolge le strutture per un lungo periodo di tempo anche se gran parte del fenomeno si manifesta entro i primi sei mesi dal getto. Il ritiro genera tensioni di trazione che possono causare stati fessurativi non facilmente prevedibili.

3.5.2 Azioni chimiche

3.5.2.1 Carbonatazione

La carbonatazione è la progressiva neutralizzazione dell'alcalinità del calcestruzzo ad opera dell'anidride carbonica presente nell'atmosfera.

Il processo si può rappresentare con la seguente reazione:



Il pH della soluzione acquosa si riduce fortemente passando da oltre 13 fin quasi alla neutralità (pH=7). Si raggiungono così valori ben al di sotto della soglia minima di 11,5 che assicura le condizioni di passività dei ferri di rinforzo in assenza di cloruri. Una volta che l'armatura risulta depassivata e sono presenti sulla sua superficie acqua e ossigeno, si produce una corrosione di tipo generalizzato [17].

La penetrazione della carbonatazione dalla superficie esterna verso l'interno avviene secondo una legge del tipo:

$$s = K * t^{1/n}$$

dove s=spessore dello strato di calcestruzzo carbonato, K = coefficiente di velocità di penetrazione che dipende dalle condizioni ambientali (umidità relativa e temperatura) e

dalla permeabilità del calcestruzzo, n =coefficiente che dipende dalla porosità, t =tempo. La carbonatazione diminuisce quindi nel tempo più o meno velocemente a seconda dei valori di n e K .

3.5.2.2 Attacco dei cloruri

Una riduzione dell'alcalinità o la presenza di ioni aggressivi come i cloruri possono portare alla distruzione del film di ossido protettivo, che ricopre il metallo nelle condizioni originarie, e alla propagazione della corrosione.

La presenza di ioni cloruro nel calcestruzzo può avere differente origine [17]:

- durante il confezionamento del calcestruzzo (acqua di impasto, aggregati non lavati, additivi)
- durante la fase di esercizio, ioni presenti nell'ambiente esterno (acqua di mare o salmastre, aerosol marino, o nei sali disgelanti (cloruro di sodio, cloruro di calcio)).

I cloruri agiscono perforando il film di ossido protettivo: la zona sottostante funge da anodo rispetto alle zone circostanti catodiche e si corrode. Il pH può scendere fino a valori inferiori a 5.

La penetrazione nel calcestruzzo dei cloruri può avvenire attraverso un meccanismo di diffusione in fase acquosa o per assorbimento capillare [18].

L'attacco dei cloruri si manifesta con estrema frequenza soprattutto nelle zone costiere marine o sui viadotti montani a causa del massiccio uso di sali da disgelo.

3.5.2.3 Attacco solfatico

Questo tipo di attacco si manifesta nel calcestruzzo successivamente al:

- contatto con acque che possiedono un'alta concentrazione di solfati (come per esempio l'acqua di mare);
- contatto con terreni che possiedono un'alta concentrazione di solfati;
- presenza di atmosfere industriali ricche di vapore d'acqua e anidridi solforose o solforiche.
- presenza negli inerti di solfato di calcio anidro, che a contatto con l'acqua, per idratazione, passa a gesso con conseguente espansione.

L'attacco solfatico, in alcuni casi, può provocare la formazione di ettringite o thaumasite [17]:

- ✓ $C-A-H + 3CaSO_4 - 2H_2O = C_3A - 3CaSO_4 - 32H_2O$ (ettringite);
- ✓ $C-S-H + CaSO_4 * 2H_2O + H_2O + CaCO_3 = CaSiO_3 - CaSO_4 - CaCO_3 - 15H_2O$ (thaumasite).

La reazione di formazione dell'ettringite avviene con forte aumento di volume che, se si manifesta quando il calcestruzzo è indurito, provoca rigonfiamenti, delaminazione e disgregazione dei manufatti.

In presenza di particolari condizioni climatiche (basse temperature, ed elevata umidità relativa) ed in presenza di $CaCO_3$ l'attacco solfatico può dar luogo a formazione di thaumasite. Questa reazione è ancora più pericolosa di quella che da luogo alla formazione dell'ettringite, in quanto l'attacco avviene nei confronti degli idrosilicati C-S-H da cui essenzialmente dipendono le caratteristiche meccaniche e di adesione delle paste cementizie. L'effetto che si produce è particolarmente grave e si manifesta con fenomeni di espulsione di materiale.

3.5.2.4 Reazione alcali-aggregati

Questo tipo di attacco noto come ASR (alcali-silica-reaction) riguarda gli aggregati che contengono una particolare forma di silice che reagisce con gli alcali (ioni Na^+ e K^+) presenti nel cemento (come componenti dalle frazioni argillose della carica) o anche provenienti dall'esterno (Sali disgelanti). Na_2O e K_2O si idratano formando $NaOH$ e KOH in grado di combinarsi con la SiO_2 amorfa e poco cristallina. La reazione produce silicati di sodio o di potassio poco cristallizzati che attraverso processi osmotici acquisiscono acqua con notevoli effetti espansivi. L'effetto della reazione si manifesta sulla superficie dei getti a distanza di anni e si presenta con microfessurazioni da cui emergono prodotti in forma gelatinosa biancastra o i caratteristici sollevamenti di piccoli conici di calcestruzzo (pop out). [17].

3.5.2.5 Croste

Le croste sono generalmente prodotti dalla reazione tra materiali lapidei e gli acidi dovuti all'inquinamento ambientale. Di spessore variabile (da 0,5 a 2-3 mm) sono, normalmente

dure, fragili e distinguibili dalle parti sottostanti per le caratteristiche morfologiche e per il colore.

Le più comuni sono le cosiddette “croste nere” (causate dal fenomeno della solfatazione). Questo tipo di crosta col tempo tende ad ispessirsi, ad indurirsi sempre di più ed a diventare meno porosa accentuando così la diversità di comportamento meccanico e termico tra essa e la pietra sottostante (la crosta essendo nera tende ad assorbire più della pietra le radiazioni solari, con conseguente maggiore dilatazione).

La crosta grigia è più frequente su pareti e superfici poco umide e dove l'acqua piovana non si può diffondere: si formano così aree costituite da strati sottili di deposizione secca da cui deriva la colorazione grigia.

3.5.3 Azioni elettro-chimiche

3.5.3.1 Corrosione delle armature

La corrosione delle armature, si manifesta a causa della carbonatazione o per la penetrazione nel copri ferro, fino alle armature, di cloruri nelle strutture esposte all'ambiente marino, o all'azione dei sali antigelo a base di cloruro di sodio e calcio. In entrambi i casi si rompe la condizione di passività delle armature, che ne garantisce la pratica assenza di corrosione, ed è quindi possibile l'innescò di fenomeni di corrosione localizzata o generalizzata, se contemporaneamente sono presenti acqua e ossigeno nel calcestruzzo [19]. L'attacco corrosivo, una volta innescato, porta dopo un certo tempo (detto di propagazione), ad un danneggiamento della struttura e alla comparsa sulla superficie del calcestruzzo, di segni tipici quali fessurazioni, spallature e delaminazioni, affioramenti di ruggine.

Si possono quindi individuare due fasi nettamente distinte: la fase di innescò della corrosione, nella quale si producono i fenomeni che portano al venir meno delle condizioni di passività, cioè alla distruzione locale o generalizzata del film protettivo, e una fase di propagazione, più o meno veloce, che ha inizio al momento in cui il film protettivo viene totalmente distrutto (fig.19).

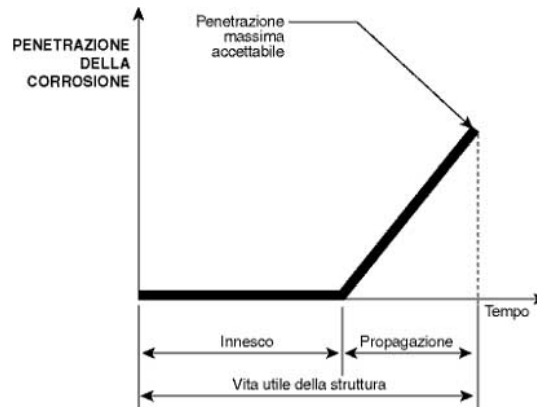


Figura19 Innesco e propagazione della corrosione nelle strutture in c.a. [20]

Le principali conseguenze strutturali dell'attacco corrosivo sono connesse con: la riduzione della sezione resistente delle armature e di conseguenza con la diminuzione della capacità portante e della resistenza a fatica; la formazione di prodotti di corrosione che possono provocare fessure nel copriferro, una sua locale espulsione o una sua totale delaminazione; la riduzione di aderenza delle armature, che può addirittura causare la perdita di ancoraggio con gravissime conseguenze.

3.5.3.2 Infragilimento da idrogeno

Le armature ad alta resistenza di strutture precomprese, costituite da acciai ferritici, possono essere soggette a cedimenti causati dall'idrogeno atomico.

Il cedimento provocato dall'idrogeno, che rientra nella famiglia di fenomeni detti di *corrosione sotto sforzo*, viene spesso detto *infragilimento da idrogeno*. Tale fenomeno porta a una rottura apparentemente fragile del materiale, che non si produce nel momento dell'applicazione del carico, ma si manifesta dopo un ritardo, detto tempo di incubazione, variabile da qualche giorno a molti anni, in funzione delle caratteristiche del materiale, dello sforzo applicato e del contenuto di idrogeno.

Il cedimento può aver luogo in modi diversi: lo sviluppo di idrogeno atomico può provocare la formazione e la propagazione di cricche che partono dalla superficie esterna del materiale, soprattutto in presenza di intagli o in altri casi l'idrogeno atomico penetra all'interno delle armature, si accumula nelle regioni soggette ai massimi sforzi di trazione,

soprattutto in corrispondenza di difetti reticolari, e le porta a rottura fragile a partire da uno di questi siti d'accumulo[19].

Condizione necessaria per il prodursi dell'infragilimento è che la superficie dell'acciaio si ricopra di uno strato di idrogeno atomico adsorbito. L'idrogeno atomico si può formare per riduzione di idrogenioni ($H^+ + e^- \rightarrow H_{ad}$) oppure per decomposizione dell'acqua ($H_2O + e^- \rightarrow H_{ad} + OH^-$). Altre situazioni di possibile sviluppo di idrogeno si riscontrano quando:

- le armature sono soggette a corrosione acida in strutture carbonatate;
- sono protette catodicamente;
- sono accoppiate con un materiale meno nobile;
- sono soggette all'azione di correnti disperse;

Tale fenomeno si manifesta attraverso una diminuzione della duttilità, della resistenza meccanica a trazione e mediante dei fenomeni di fessurazione. Di conseguenza il materiale può giungere nel tempo a rottura fragile per valori di carico decisamente inferiori a quelli di progetto.

3.5.4 Azioni fisiche

3.5.4.1 Cicli di gelo e disgelo

Le condizioni indispensabili perché il calcestruzzo subisca il degrado sotto l'azione del gelo e disgelo sono l'alternarsi della temperatura ambiente attorno a 0°C, la presenza di umidità all'interno del cemento e l'assenza di micro bolle di aria inglobate nella pasta cementizia. Il procedere del degrado dipende ovviamente dalla qualità del calcestruzzo e cioè dalla porosità, dalla distribuzione dei pori, dalla permeabilità, dalla resistenza meccanica, nonché da fattori esterni quali il numero di cicli di gelo e disgeli, la velocità di raffreddamento e le temperature raggiunte. Il danno è legato all'aumento di volume dovuto alla formazione di ghiaccio che provoca sforzi sul calcestruzzo. La presenza di cicli di gelo e disgelo provoca fenomeni di delaminazione [21].

3.5.4.2 Efflorescenze e subefflorescenze saline

I cicli umido-secco producono la soluzione e successiva cristallizzazione dei sali solubili (talvolta provenienti anche dall'aerosol marino) con formazione di efflorescenze in superficie e subefflorescenze entro i pori del materiale. La cristallizzazione dei sali solubili

contenuti nell'acqua avviene dopo che la soluzione ha raggiunto il grado di saturazione. In fase di evaporazione dell'acqua, i sali iniziano ad aggregarsi e a formare cristalli entro gli spazi porosi, i quali, alimentandosi con la soluzione presente, aumentano di volume ed esercitano una pressione di cristallizzazione sulle pareti dei capillari.

La formazione di efflorescenze o subefflorescenze dipende dalle particolari condizioni atmosferiche: con aria umida e poco vento, la velocità di diffusione del vapore è superiore alla velocità di migrazione della soluzione e quindi i sali cristallizzano all'interno del materiale, dando luogo alle subefflorescenze; viceversa in presenza di aria secca e vento la velocità di diffusione del vapore è inferiore alla velocità di migrazione della soluzione, l'equilibrio tra i due fenomeni sarà raggiunto all'esterno dando luogo alle efflorescenze. Le subefflorescenze sono le più pericolose, poiché generano concentrazione degli sforzi in strati al di sotto della superficie.

Le efflorescenze saline possono avere aspetto e caratteristiche diverse a seconda del tipo di sale che precipita [22]:

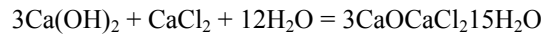
- se i precipitanti sono costituiti da solfati alcalini (di sodio e potassio), le efflorescenze sono, in genere, costituite da depositi voluminosi con aspetto di barbe e filamenti di colore bianco;
- se i precipitanti sono costituiti da gesso, le efflorescenze (generalmente scarsamente solubili) assumono un aspetto cristallino e saccaroide;
- se precipitano i nitrati la concentrazione umida avviene lungo strisce di ridotte dimensioni (da 10 a 50 cm di larghezza) a fasce ondeggianti o puntiformi; l'area al di sopra della zona attaccata, si può presentare con ombreggiature.

3.5.5 Azioni chimico-fisiche

3.5.5.1 Dilavamento

Il dilavamento consiste in un'azione chimico-fisica per cui la pasta cementizia può essere privata dei prodotti solubili in acqua. La presenza di acidi di qualsiasi natura rende l'azione dilavante particolarmente pericolosa. Anche le acque molto pure come quelle derivanti dallo scioglimento dei ghiacciai, ricche di CO₂ e povere di sali, possono essere pericolose [10]. Il cloruro di calcio abbondantemente utilizzato come agente disgelante

nelle strade e autostrade può contribuire al dilavamento secondo la reazione che produce un ossicloruro di calcio piuttosto solubile:



3.5.6 Azioni meccaniche

3.5.6.1 Fatica

Il conglomerato, come ogni materiale, se soggetto ad un carico ciclico raggiunge uno stato di crisi per un'intensità del carico minore di quella che causa la rottura per carico monotono. I fenomeni di microfrattura fanno sì che ad ogni ciclo di carico (ad esempio il verificarsi di un dato flusso di traffico veicolare) l'azione esterna agisce su una struttura leggermente *modificata*, così che le fratture aperte durante la fase di trazione non possono richiudersi completamente durante la fase di compressione, causando una serie di tensioni residue che favoriscono la propagazione della frattura stessa.

Nel fenomeno della rottura per fatica si possono individuare tre fasi distinte: una prima fase caratterizzata dalla formazione improvvisa di numerose micro-fessure da fatica, una seconda fase nella quale le micro fessure crescono lentamente in dimensione, orientandosi lungo una direzione preferenziale. Nella terza fase le fessure raggiungono ampiezze e dimensione elevate, sviluppandosi nella direzione preferenziale individuata [23].

Nell'impalcato, particolarmente soggetto ad un notevole flusso di traffico veicolare, questa problematica assume un'importanza di assoluto rilievo. Se non ben valutata, può indurre un danneggiamento che può manifestarsi con accentuate fessurazioni e perdita di aderenza delle armature, e nei casi più gravi portare alla rottura dell'elemento strutturale [24].

I principali parametri che influenzano la risposta del conglomerato soggetto a fatica sono legati alle caratteristiche del ciclo di carico (forma delle onde di carico, tensione massima e minima, sequenza di carico, periodi di riposo).

La rottura per fatica può avvenire secondo uno dei seguenti meccanismi:

- snervamento dell'acciaio;
- sfilamento delle barre di armatura longitudinale (pull-out);
- frattura del calcestruzzo.

3.5.7 Azioni biologiche

3.5.7.1 Attacco biologico e vegetazione infestante

Il degrado biologico (o biodeterioramento) è un'alterazione irreversibile causata dall'azione metabolica di animali o di piante. Tale degrado viene manifestato maggiormente in presenza di umidità o temperature relativamente alte, ventilazione scarsa, presenza di fonti luminose, ecc. Il biodeterioramento, nel caso di muratura e pietrame, è provocato dai microrganismi autotrofi come alghe, batteri, licheni, alghe, muschi, e piante superiori.

Sia nel caso di batteri che di licheni il tipo di alterazione rinvenuto sulle pietre è simile a quello provocato dall'inquinamento atmosferico. Per ciò che concerne le alghe, a differenza dei batteri e dei licheni, non penetrano in profondità ma formano sulla pietra degli strati di consistenza e colorazione differente, a seconda che il supporto sia asciutto o umido. Anche nel caso dei muschi viene attaccata solo la superficie, senza che vi sia una infiltrazione negli stati interni del materiale. Questi si sviluppano dove si hanno depositi di humus o accumuli di residui organici generati da altri batteri organici o vegetali.

Le piante superiori causano un forte degrado meccanico, perché le radici, penetrando nei giunti tra i conci di pietra, esercitano una dannosa azione di cuneo. Inoltre, creano corsie preferenziali che facilitano la penetrazione di acque meteoriche, con tutti i danni che ne conseguono.

3.5.8 Azioni naturali

3.5.8.1 Perdita d'appoggio

La perdita d'appoggio consiste nella fuoriuscita degli elementi dell'impalcato dal loro alloggio con conseguente perdita del grado di vincolo e stabilità statica (fig.20). Tale fenomeno può avvenire per mutuo scorrimento tra le superfici a contatto a seguito delle oscillazioni sismiche, o di cedimenti delle pile. Le principali cause sono da ricercarsi in carenze nella fase di progettazione: lunghezza inadeguata degli appoggi, assenza di efficaci meccanismi di connessione tra le campate o tra una campata e le pile [25] [26]. Gli appoggi devono assicurare lo schema statico di progetto consentendo quindi tutti gli spostamenti previsti, con un adeguato margine di sicurezza. La perdita dell'appoggio porta al collasso

completo dell'impalcato, o perlomeno di una campata di esso; si tratta pertanto di un evento estremamente pericoloso.



Figura 20 Perdita d'appoggio ponte Nishinomiya-ko, Giappone, Kobe 1995[26]

3.5.8.2 Martellamento

Il martellamento consiste in urti reciproci tra elementi della struttura o tra un elemento della struttura e superfici fisse esterne, durante un evento sismico. Esso è legato ad errori avvenuti in fase di progettazione con particolare riferimento al dimensionamento dei giunti o alla concezione cinematica [26]. A causa del martellamento si può avere il danneggiamento delle testate degli impalcati, dei pulvini delle pile o delle spalle.

3.5.8.3 Crisi pile in calcestruzzo

In caso di eventi eccezionali che producono azioni orizzontali nelle pile (sisma, vento, onde di piena), queste possono mostrare dei deficit di resistenza o duttilità che possono produrre rotture a flessione e/o a taglio (figg. 21-22). Soprattutto nelle cosiddette zone critiche, dove cioè tende a concentrarsi il danno, la struttura delle pile deve garantire la necessaria duttilità a flessione e resistenza a taglio.

Le principali cause, generate da errori o carenze progettuali, consistono in una insufficiente lunghezza di sovrapposizione o di ancoraggio delle barre longitudinali, o in una armatura trasversale inadeguata, incapace di svolgere un'efficace azione di confinamento del calcestruzzo e delle barre longitudinali compresse inadeguati [26].

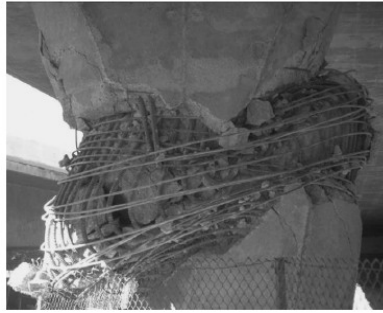


Figura 21 Collasso per flessione e taglio, Viadotto Gothic Avenue (terremoto di Northridge, California, 1994)

[26]



Figura 22 Collasso per taglio, Viadotto Wushi (terremoto di Chi Chi, Taiwan, 1999) [26]

3.5.8.4 Rottura delle spalle

Il danneggiamento delle spalle è, in genere, legato alla presenza di terreni particolarmente scadenti. Infatti se il suolo è deformabile e non consolidato a sufficienza, sotto le accelerazioni longitudinali, un eventuale impatto dell'impalcato con il muro frontale della spalla può determinare pressioni negative molto elevate [25].

3.5.8.5 Distacco dell'arco portante

Questa manifestazione di degrado è piuttosto frequente nei ponti in muratura, ed è accompagnata dalla formazione di fessure alternate a livello dei conci dell'arco (fig. 23). Il quadro fessurativo che si genera evidenzia la tendenza dell'arco portante ad innescare un cinematismo liberandosi da ogni tipo di costrizione iperstatica al contorno. Tale fenomeno è fortemente influenzato da numerosi fattori fra cui [27]:

- caratteristiche meccaniche della muratura;
- entità del carico verticale stabilizzante sui piedritti;
- geometria dell'arco;
- larghezza dei piedritti;
- simmetria geometrica e di carico del sistema;
- spinte orizzontali indotte dall'azione del riempimento contro il muro di testa;
- infiltrazioni d'acqua e successivo fenomeno di gelo e disgelo.

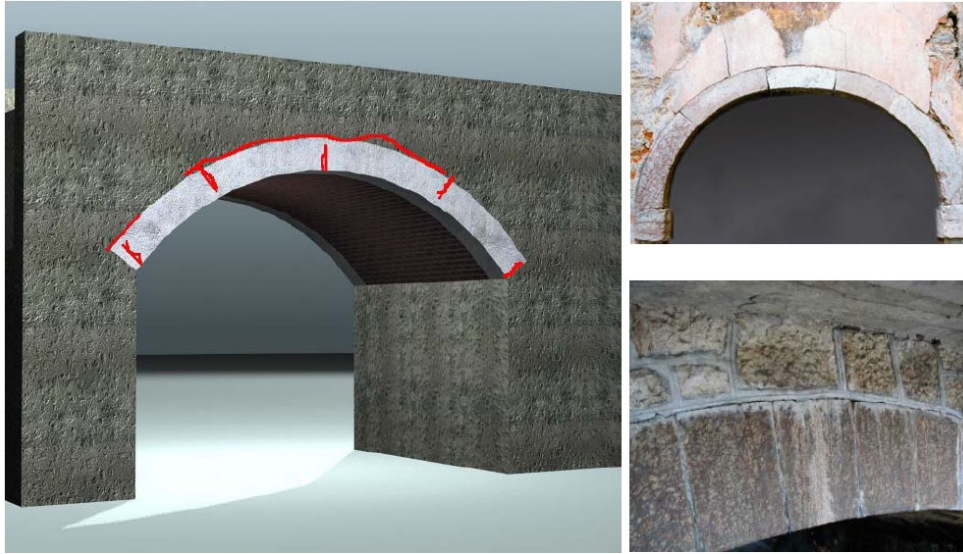


Figura 23 Distacco dell'arco portante [27]

3.5.8.6 Schiacciamento di pile e spalle

Il fenomeno dello schiacciamento (fig. 24), accompagnato quasi sempre da problemi di instabilità locale della compagine muraria, si manifesta soprattutto in situazioni caratterizzate da una tessitura irregolare dei paramenti. Può risultare circoscritto ad aree limitate dell'imposta dell'arco in cui si concentrano elevate compressioni, o può estendersi a zone più ampie dei piedritti o delle spalle per via del deterioramento degli allettamenti causato da vibrazioni e da azioni di degrado fisico-chimico. Tale fenomeno, tuttavia, non si verifica spesso [27].

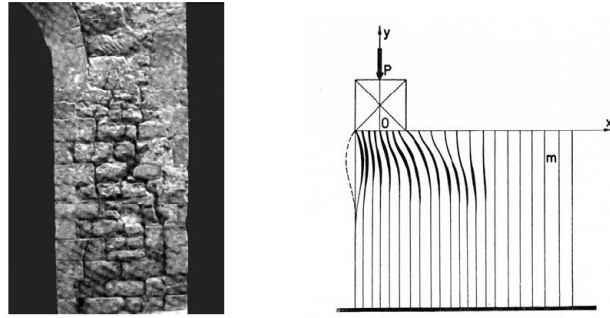


Figura 24 Schiacciamento della pila [27]

3.5.8.7 Traslazioni e rotazioni di pile e spalle

Il comportamento ultimo dell'arco è fortemente condizionato dalle caratteristiche delle imposte. Si può dunque verificare un collasso della struttura per cedimento dei piedritti determinato dal superamento della spinta orizzontale sollecitante rispetto a quella resistente. Il collasso può avvenire per ribaltamento o per scorrimento degli stessi. La grande maggioranza dei crolli documentati di ponti in muratura è da attribuire a movimenti anomali delle pile e delle spalle. Le spalle, sottoposte alla spinta della volta da un lato e a quella del terrapieno dall'altro, possono presentare (ove le due azioni non siano in equilibrio) rotazioni non trascurabili che possono indurre dissesti nella sovrastruttura.

I fattori che maggiormente influenzano questi tipi di fenomeno sono [27]:

- entità ed inclinazione della spinta dell'arco;
- snellezza delle pile;
- simmetria delle spinte nel caso di ponti a più arcate;
- caratteristiche fondazioni;
- caratteristiche terreno di fondazione.

Se la spinta dell'arco è superiore a quella del terrapieno si verifica il classico cedimento con apertura della spalla e conseguente abbassamento della chiave che, nel caso di spostamenti eccessivi, dà luogo al collasso della struttura.

Se la spinta del terrapieno supera quella dell'arco, la rotazione della spalla determina un avvicinamento delle imposte e una variazione dello stato tensionale nella volta, in questo caso le lesioni, si presentano in maniera evidente nell'intradosso delle reni.

3.6 LA MANUTENZIONE AI GIORNI NOSTRI

Per la realizzazione dei ponti, dal passato sino ai nostri giorni, sono stati utilizzati materiali diversi: pietra o mattoni, acciaio e calcestruzzo. Fino alla fine del XVII secolo i ponti venivano realizzati in muratura; non essendo ancora noti molti concetti che stanno alla base della statica delle strutture, la forma dei ponti era determinata dalla regola dell'arte propria per ciascun materiale utilizzato.

Dalla fine del XVII sino alla prima metà del XX secolo i ponti sono stati realizzati principalmente in acciaio e calcestruzzo armato; in questo periodo si è sviluppata, parallelamente ai nuovi materiali, la teoria delle strutture e dell'elasticità che ha contribuito in maniera determinante all'evoluzione ed allo sviluppo dei ponti; è in questo momento che si può definire in primo luogo la struttura e dopo il materiale.

La maggior parte dei ponti che vengono realizzati oggi sono in calcestruzzo armato precompresso, mentre i grandi ponti vengono realizzati in acciaio in quanto la resistenza specifica dell'acciaio è maggiore di quella del cemento armato e quindi a parità di luce, il peso proprio di una struttura metallica risulta minore di quella in calcestruzzo.

Una grande quantità dei ponti europei è stata realizzata tra la metà degli anni cinquanta e i primi anni settanta, senza tenere conto della durabilità, cioè della capacità di una struttura di mantenere inalterate nel tempo le proprie prestazioni. Questa esigenza, nota in parte ai progettisti di strutture in acciaio, era totalmente ignorata da chi si occupava di costruzioni in calcestruzzo armato che, a torto, venivano considerate eterne. Tali circostanze hanno fatto sì che dopo 25-30 anni, cioè nell'ultimo decennio del novecento, si ponesse in modo economicamente rilevante la domanda di interventi per la riparazione ed il ripristino (sia estetico che funzionale) di molti ponti esistenti. Altre volte, specie in Italia, Giappone e Stati Uniti, gli interventi di rinforzo o di modifica di opere in esercizio si sono resi necessari per migliorarne le prestazioni in caso di sisma. Ciò a seguito delle maggiori conoscenze acquisite sia in merito all'effettivo grado di sismicità, sia in merito al calcolo della risposta delle strutture alle azioni indotte da sismi violenti. Inoltre si sono avuti molti esempi di adeguamento geometrico dei ponti per soddisfare le crescenti richieste dovute all'aumento del traffico (nuove corsie, banchine, etc.).

La problematica del mantenimento dei ponti in una condizione utile è resa estremamente complessa dalla presenza di una grande variabilità di tipologie strutturali

presenti sul territorio. Ogni tipo di struttura si comporta diversamente, soffre di diversi tipi di degrado ed ha bisogno di interventi di manutenzione diversi.

In generale i costi degli interventi di manutenzione sono paragonabili ai costi di costruzione. La necessità di contenere e ottimizzare tali costi ha comportato importanti innovazioni in almeno quattro campi:

- diagnostica strumentale: indagini in situ e prove di laboratorio rivolte all'acquisizione di parametri meccanici e dettagli costruttivi dell'opera e dei materiali di cui è composta;
- identificazione strutturale: tecniche di calcolo rivolte a interpretare le misure di determinati parametri di risposta (accelerazioni, velocità, spostamenti, ecc) durante una fase di monitoraggio, con l'obiettivo di stimare l'effettivo stato di conservazione dell'opera o il progredire del danno;
- utilizzo di materiali innovativi: materiali caratterizzati da elevate caratteristiche meccaniche e peso ridotto, da utilizzare per gli interventi di riparazione, miglioramento o adeguamento;
- tipologie di intervento: tecniche innovative da utilizzare nella messa in sicurezza o rinforzo dei ponti minimizzando i tempi di intervento e quindi di disservizio.

3.6.1 Diagnostica strumentale

Le tipologie di prove e indagini si dividono, dal punto di vista del luogo in cui vengono eseguite in:

- ✓ Prove di laboratorio: si tratta di prove condotte in laboratorio su provini, indisturbati o parzialmente disturbati, prelevati in situ. In genere si tratta di prove che restituiscono misure estremamente accurate; tuttavia permane l'incertezza relativa alla valutazione del grado di disturbo del provino, generato durante la fase di estrazione e di trasporto.
- ✓ Prove in situ: mirano a caratterizzare proprietà fisiche, chimiche o meccaniche del manufatto mediante misure condotte direttamente sulla struttura. Tali prove si dividono in: non distruttive, semi-distruttive e distruttive, a seconda del danneggiamento prodotto durante la prova nella porzione indagata. In genere le prove distruttive o semidistruttive sono quelle che forniscono risultati più

attendibili, mentre le prove non distruttive (o prove indirette) forniscono spesso una stima di massima dei parametri cercati, legata a relazioni di natura empirica, di contro sono prove più economiche e che mantengono la struttura integra. Quando possibile si cerca di affiancare un numero limitato di prove distruttive (o dirette) con un significativo di prove indirette che verranno "tarate" utilizzando i risultati delle prove indirette.

La classificazione delle prove è variabile a seconda delle tipologie strutturali esaminate e del tipo di materiale. In particolare nel caso di elementi in calcestruzzo armato e in c.a.p. è possibile eseguire:

- misure del potenziale libero di corrosione per la valutazione dello stato di degrado dovuto ai fenomeni ossidativi agenti sulle armature lente;
- valutazioni della profondità della carbonatazione e della profondità di penetrazione dei cloruri per la valutazione della probabilità di corrosione dei cavi;
- prove di compressione monoassiale condotte su provini cilindrici (carote) estratti dalla struttura. Tramite questa prova è possibile determinare la resistenza ultima del materiale, il modulo secante;
- prove sclerometriche, si tratta di prove non distruttive che consistono nel misurare la resistenza offerta dal calcestruzzo all'urto di un pistone metallico. La resistenza viene stimata in base a delle correlazioni empiriche che dipendono dallo strumento utilizzato.
- prove di "pull-out", sono prove semi-distruttive consistenti nell'infiggere dei tasselli con caratteristiche standard e misurando la forza necessaria ad estrarli.

Nel caso di elementi in muratura è possibile eseguire le seguenti prove:

- misura della velocità degli ultrasuoni per identificare la qualità di paramenti murari, la presenza di fessure o cavità;
- prove di flessione e di compressione su provini: si tratta di prove distruttive condotte in situ su provini isolati della struttura o in laboratorio su prototipi con caratteristiche analoghe alla muratura indagata.
- prove di compressione e prove di deformabilità in situ (martinetti piatti), si tratta di prove semi-distruttive. Il campione viene isolato in situ mediante due tagli

orizzontali paralleli praticati nella muratura, all'interno dei tagli vengono inseriti due martinetti piatti all'interno dei quali viene iniettato fluido a pressione.

A prescindere dalla tipologia strutturale, per indagare sulla presenza di acqua all'interno del materiale o la presenza di fasi cristalline, si possono eseguire le seguenti prove:

- prove diffrattometriche;
- valutazione del coefficiente di saturazione per stimare l'assorbimento dell'acqua e il rischio di gelività;
- prove termogravimetriche per valutare la presenza di acqua.

Per indagare il comportamento globale della struttura o l'evolversi del degrado è possibile eseguire le seguenti prove:

- monitoraggio delle fessure tramite estensimetri;
- prove di carico statiche;
- prove di carico dinamiche posizionando accelerometri per il rilievo del periodo di oscillazione.

3.6.2 Identificazione strutturale

Sono delle procedure che consentono di determinare una serie di parametri meccanici, o geometrici, incogniti a partire dalla misura di determinati parametri di risposta globali.

Una procedura di identificazione strutturale in genere si affianca ai normali metodi d'indagine (rilievo geometrico e prove sui materiali) che consentono lo sviluppo di un modello di calcolo (ad esempio agli elementi finiti) sufficientemente dettagliato. In particolare un'analisi di "Identificazione dinamica", maggiormente utilizzata, consente di valutare sperimentalmente le proprietà dinamiche del sistema. Dalla conoscenza delle prime frequenze e dei corrispondenti modi di vibrazione è quindi possibile aggiornare il modello numerico (*Model Updating*) allo scopo di giungere ad una rappresentazione numerica attendibile delle reali condizioni del manufatto.

Una volta completata la fase di aggiornamento, si disporrà del modello del ponte come in una realtà virtuale e risulterà pertanto possibile prevedere il comportamento del manufatto soggetto ad azioni sismiche severe, individuando l'evento tale da determinare il collasso strutturale nelle varie condizioni di esercizio.

3.6.3 Materiali innovativi

Tutti i materiali che vengono utilizzati per la riparazione o il rinforzo dei ponti devono garantire idonee caratteristiche in termini di resistenza e duttilità, inoltre devono essere certificati dal produttore. Fra i materiali innovativi, per il vasto campo di impiego, vanno menzionati senz'altro i materiali compositi fibrosi a matrice polimerica (Fiber Reinforced Polymer – FRP). Tali materiali vengono impiegati nel campo dell'ingegneria civile a partire dagli anni '70, prima di allora hanno trovato applicazione nel settore aeronautico e navale. Tali materiali sono costituiti da lamine di fibre lunghe e sottili accostate l'una all'altra o intrecciate, impregnate in una matrice polimerica costituita generalmente da resina epossidica o da poliestere. La matrice ha lo scopo di proteggere le fibre. Le fibre più utilizzate sono quelle di carbonio o quelle di vetro. Le fibre di carbonio possiedono un'elevata resistenza a trazione e resistono a corrosione; le fibre di vetro hanno delle proprietà meccaniche minori ma sono meno costose. La loro maggiore applicazione riguarda il rinforzo a flessione delle travi e la fasciatura di elementi compressi. Rispetto alle tecniche tradizionali di rinforzo, l'intervento mediante l'utilizzo di materiali a fibre composite offre i seguenti vantaggi:

- ✓ I tempi necessari per l'applicazione del rinforzo sono ridotti, il che determina anche una riduzione dei costi di manodopera e quindi dei costi totali dell'intervento;
- ✓ L'impiego di tale tecnica di rinforzo, in genere, non richiede la chiusura del traffico veicolare transitante sul viadotto, riducendo i disagi che da esso possono scaturire;
- ✓ La scelta garantisce, buona durabilità dell'intervento di rinforzo essendo caratterizzato anche da una buona risposta agli agenti atmosferici.

Ulteriori materiali innovativi sono rappresentati dai materiali cementizi come malte colabili o tixotropiche o betoncini fibrorinforzati che solitamente possiedono una buona resistenza agli agenti aggressivi dell'ambiente, alla fessurazioni e che vengono impiegati per il ripristino delle strutture in c.a.

3.6.4 Tipologie di interventi manutentivi

Una volta che, a seguito delle ispezioni visive, vengono individuate delle situazioni di degrado avanzato o di diminuzione dei livelli di sicurezza e funzionalità della struttura è necessario andare a definire l'intervento più opportuno da eseguire. Bisognerà quindi:

- eseguire delle indagini (prove non distruttive, indagini di laboratorio,...) per l'individuazione delle cause dei fenomeni di degrado e per valutare la gravità dei difetti;
- scegliere le tecniche d'intervento più opportune, in funzione del tipo di elemento strutturale (orizzontale o verticale), degli spessori e dell'estensione dell'intervento;
- definire i materiali da utilizzare per il ripristino verificando che le prestazioni fornite soddisfino i requisiti necessari al ripristino della funzionalità del ponte.

In particolare le *Norme tecniche per le costruzioni del 2008 (NTC2008)*[28] suddividono gli interventi sulle strutture in tre grandi categorie:

- riparazioni o interventi locali che interessino elementi isolati, e che comunque comportino un miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti;
- interventi di miglioramento statico-sismico, atti ad aumentare la sicurezza strutturale esistente, pur senza necessariamente raggiungere i livelli richiesti dalle presenti norme;
- interventi di adeguamento statico-sismico, atti a conseguire i livelli di sicurezza previsti dalle stesse norme.

Gli effetti degli interventi manutentivi possono consistere nel rallentare la velocità di propagazione del degrado o migliorare le condizioni della struttura nei confronti di specifici eventi. Per quanto detto nella prima parte del capitolo, le molteplici cause di degrado riducono drasticamente la vita utile di un ponte, al fine di prolungare la fase di esercizio della struttura è indispensabile garantire interventi di ripristino adeguati. Nei paragrafi successivi viene fornita una sintetica presentazione delle principali tipologie di intervento, così come definite nelle *NTC2008* [28] nel caso di interventi sui ponti.

3.6.4.1 Interventi di riparazione o interventi locali

Gli interventi di riparazione più frequenti riguardano:

- il ripristino delle armature corrose che viene eseguito attraverso l'idrodemolizione del calcestruzzo, la sostituzione delle armature corrose, l'applicazione di malta cementizia

anticorrosiva delle armature a vista, la ricostruzione del copriferro con malte o betoncino fibrorinforzato a ritiro compensato;

- la riparazione delle fessure nel calcestruzzo che viene eseguita attraverso l'idropulizia del calcestruzzo, la saturazione delle fessure con malta antiritiro e la ricostruzione del copriferro con malte a betoncino fibrorinforzato a ritiro compensato;

- la riparazione delle fessure negli elementi in muratura che viene eseguita attraverso il riempimento delle fessure mediante malta antiritiro, e realizzando delle cuciture armate perpendicolari alle fessure;

- il ripristino di porzioni di muratura ammalorata che viene eseguita attraverso la pulitura meccanica della muratura, il lavaggio con acqua a pressione, interventi di scuoi - cucì e ristilatura dei giunti, ed eventualmente l'applicazione di biocidi.

- la sostituzione degli appoggi che viene eseguita attraverso il sollevamento dell'impalcato, la ricostruzione e regolarizzazione delle superfici con malte o betoncini reoplastici, e la sostituzione degli appoggi con elementi di nuova concezione;

- il ripristino dei giunti degradati che viene eseguita attraverso la rimozione o demolizione dei giunti esistenti e la posa in opera dei giunti nuovi;

- il ripristino del sistema di smaltimento delle acque che prevede l'eventuale rimozione di eventuali ostruzioni delle tubazioni e dei pozzetti.

3.6.4.2 Interventi di miglioramento statico-sismico

Gli interventi di miglioramento più diffusi riguardano principalmente gli interventi sulle pile e sulle spalle ma anche sull'impalcato e comprendono:

- ✓ L'incamiciatura in calcestruzzo delle pile (fig. 25): l'intervento consiste nella costruzione intorno alla pila esistente di una nuova sezione in cemento armato. La connessione tra le due porzioni di calcestruzzo avviene attraverso una serie di barre inserite in appositi fori, praticati nel calcestruzzo esistente dopo la rimozione del copriferro, e iniettati con malta cementizia o resine epossidiche.

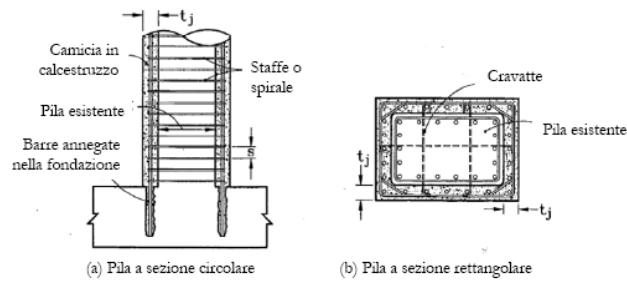


Figura 25 Esempio di incamiciatura in c.a. [26]

- ✓ L'incamiciatura in acciaio delle pile (fig. 26): l'intervento consiste, nel saldare la camicia, normalmente di spessore tra i 6-12 mm, in opera e nel riempire lo spessore che la separa dalla pila con l'iniezione di malta cementizia o resine.



Figura 26 Esempio di incamiciatura in acciaio [26]

- ✓ Fasciatura delle pile con materiali fibro-rinforzati (fig. 27): l'intervento consiste nel fasciare la pila con vari avvolgimenti di tessuti in FRP. Al fine di aumentare l'effetto del confinamento le fibre più adatte sono quelle di carbonio caratterizzate da un modulo elastico più elevato e da un comportamento elastico lineare fino a rottura. Questi materiali vengono forniti in fogli e vengono normalmente utilizzati trasversalmente all'asse della pila. Un altro tipo di fibre utilizzate sono quelle di

arramidio, che sono meno rigide di quelle di carbonio, motivo per cui sono più adatte all'utilizzo su pile a sezione leggermente variabile. Un altro materiale utilizzato è composto da fibre di vetro mescolate a resine; questo viene spruzzato sulla superficie della pila da rinforzare, sulla quale normalmente viene disposta anche una rete metallica.

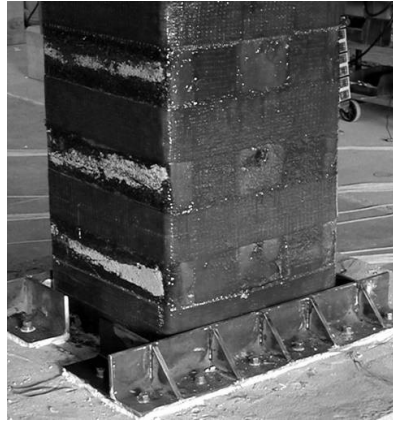


Figura 27 Esempio di incamicatura con materiali fibro-rinforzati [26]

- ✓ Realizzazione di tiranti per l'assorbimento della spinta della terra sulle spalle; al fine di ripartire le azioni dei tiranti viene realizzata una parete in c.a. a ridosso del paramento a valle della spalla (fig.28). Le file di tiranti possono essere più di una nel caso di spalle a gravità alte che presentano un deficit di resistenza flessionale anche al di sopra della sezione di base.

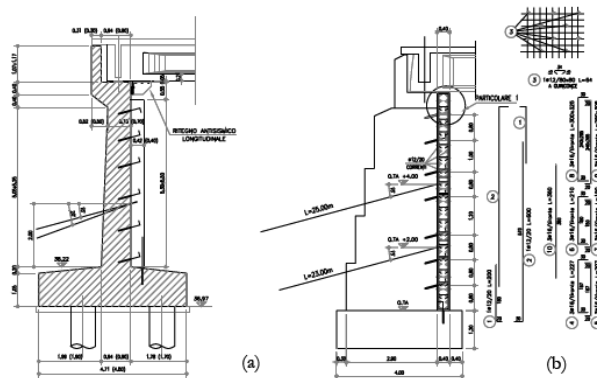


Figura 28 Rinforzo delle spalle mediante camicia in c.a. e tiranti[26]

- ✓ Rinforzo a flessione o a taglio di travi in c.a. o c.a.p. mediante l'incollaggio di lamine o tessuti fibro-rinforzati.

3.6.4.3 Interventi di adeguamento statico-sismico

Tra i principali interventi di adeguamento citiamo:

- ✓ la modifica dello schema statico del ponte da isostatico a continuo realizzando uno schema di catena cinematica in modo tale da scaricare le azioni sismiche longitudinali sulle spalle eliminando ogni effetto sulle pile alle quali andrebbero trasmesse solo le sollecitazioni trasversali;
- ✓ l'inserimento di dissipatori in modo tale da assorbire l'energia cinetica dovuta al sisma e ridurre gli spostamenti relativi tra gli impalcati e le pile;
- ✓ l'inserimento di isolatori sulle pile in modo tale da modificare il periodo di oscillazione dell'impalcato.

3.7 LA VITA UTILE DEI PONTI

La vita utile di un ponte è il periodo di tempo nel quale l'opera mantiene i requisiti minimi di sicurezza e funzionalità. La vita utile di un ponte dipende quindi dalle condizioni fisiche e di degrado dell'opera, dai flussi di traffico presenti ed infine dalla convenienza economica nell'eseguire gli interventi di manutenzione rispetto alla ricostruzione totale. A tal proposito in letteratura [29] sono state distinte tre tipologie di vita utile (fig. 29):

- a) vita fisica: decresce nel tempo ed è legata al degrado della struttura; al tempo T_P il ponte non è più strutturalmente sicuro;
- b) vita funzionale: decresce nel tempo ed è legata alla domanda di traffico (sempre crescente); al tempo T_S il ponte è funzionalmente obsoleto e dovrebbe essere sostituito;
- c) vita economica: i costi di manutenzione aumentano nel tempo; al tempo T_E i costi di manutenzione uguagliano i costi di ricostruzione pertanto diventa economico rifare il ponte.

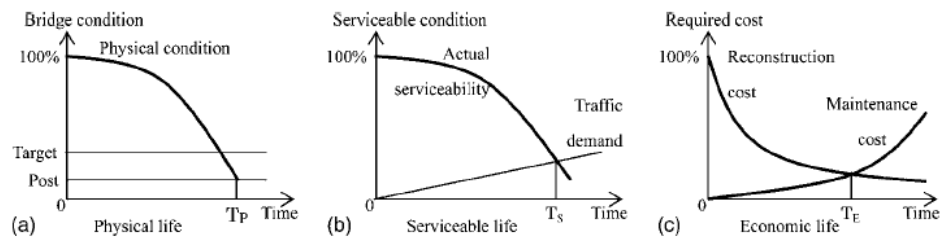


Figura 29 Vita utile per i ponti autostradali

Queste considerazioni dovrebbero aiutare l'ente gestore nella definizione della politica di gestione manutentiva, al fine di andare a definire sia l'intervento più opportuno da eseguire, sia il momento più opportuno per eseguirlo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] B. Yanev (1998), "Management of bridges in New York City", *Engineering Structures*, 20(11), 1020-1026.
- [2] A. Pipinato, , "Nuovi approcci per il management, la manutenzione ed il controllo delle reti di ponti", *esempi Di Architettura On line*.
http://www.esempidiarchitettura.it/ebcms2_uploads/oggetti_articolo_117_ITA_9JKFjcSyd9VK9vX8AkmAszHjZnEaGuEF3fbbhUAn.pdf
- [3] S. E. Lipkus (2004) "Bridgit Bridge Management System Software" *Transportation Research Circular* No. 423.
- [4] R. J. Woodward (2001) "Glossary of terms used in bridge engineering", *Deliverable D14 AppendixIII* BRIME.
- [5] 4Emme (2005) "Manuale per la valutazione dello stato dei ponti" Pubblicato da *CIAS (Centro Internazionale di Aggiornamento Sperimentale-Scientifico)*.
- [6] S. Resemini (2003) "Vulnerabilità sismica dei ponti ferroviari ad arco in muratura" *Tesi di dottorato*, Dipartimento di ingegneria strutturale e geotecnica, Università di Genova.
- [7] A. Guadagni (2003) "*Prontuario dell'ingegnere*" Editore Hoepli
<http://www.manualihoepi.it/media/doc/pr155.pdf>
- [8] FIP Industriale S.P.A. http://www.fip-group.it/fip_ind/prodotti.html
- [9] Comitato tecnico C.4.4.(2006) "Aumento della vita utile dei ponti: linee guida per le fasi di progettazione, costruzione e manutenzione" XXV Convegno Nazionale Stradale.
- [10] N. Scibilia, D. Anello, A. Mangiapane (2000) "Interventi di adeguamento di impalcati in c.a.p. e in acciaio" Atti del convegno "Degrado delle opere d'arte stradali" 15 febbraio 2000, Palermo.
- [11] <http://www.flickr.com/photos/40346962@N04/5658726202/>.
- [12] S. Resemini (2003) "Vulnerabilità sismica dei ponti ferroviari ad arco in muratura" *Tesi di dottorato*, Dipartimento di ingegneria strutturale e geotecnica, Università di Genova.
- [13] <http://www.museotorino.it/view/s/cb7e94760bef4465b6821c510eab98c6>.
- [14] S. Liseni (2006) "Identificazione dinamica di un modello per la stima della vulnerabilità sismica del *Ponte sul Cassibile* attraverso l'analisi delle vibrazioni indotte dal traffico" Università degli Studi di Catania.

- [15] L. Dezi (2007) “I ponti a sezione composta acciaio-calcestruzzo” Atti del convegno “Evoluzione nella sperimentazione per le costruzioni” Cipro 21-28 Aprile 2007.
- [16] P. Pedefferri (2001) “La prevenzione del degrado” Rivista *Building and Construction for Engineering L’edilizia*, Speciale durabilità n° 3 giugno-luglio anno XV.
- [17] L. Massida (2001) “Analisi delle cause di degrado del calcestruzzo e delle opere in calcestruzzo armato”, Rivista *Building e Construction for Engineering L’edilizia*, Speciale durabilità n° 3 giugno-luglio anno XV.
- [18] M. Berra, F. Bolzoni, T. Pastore (2001) “Corrosione delle armature in calcestruzzo” Rivista “*Building e Construction for Engineering L’edilizia*, Speciale durabilità n° 3 giugno-luglio anno XV.
- [19] P. Pedefferri, L. Bertolini (2000) “La durabilità del calcestruzzo armato” Mac-Graw Hill Italia
- [20] P. Pedefferri (2000) “La corrosione delle armature nel calcestruzzo armato e l’impiego di barre in acciaio inossidabile” Atti del convegno “Degrado delle opere d’arte stradali” Palermo
- [21] A. Barbucci (2000) “Degrado e protezione delle strutture in calcestruzzo armato” *Ciclo di seminari tecnico-didattici* Marzo-Maggio 2000 Università degli studi di Genova.
- [22] S. Franceschi, L. Germani (2007) “Il degrado dei materiali nell’edilizia. Cause e valutazione delle patologie” Editore Dei, Roma
- [23] Prof. Ing. R. Calzona, Prof. Ing. E. Dolara (1996) “Fatica e decadimento dei materiali e delle strutture sottoposte ad azioni cicliche”, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”
- [24] http://www.ingegneriastrutturale.net/Tematiche/5PS/5PSpontiB/5PSpontiB_fatica/5PSpontiB_fatica.htm
- [25] “Metodologie di intervento per il rinforzo statico e sismico dei ponti in esercizio” (2010), *XXVI Convegno Nazionale Stradale AIPCR* 27-30 Ottobre, Roma
- [26] P. E. Pinto, P. Franchin, A. Lupoi (2009) “Valutazione e consolidamento sismico dei ponti esistenti”, *Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia*
- [27] M. Mazzoleni, L. Jurina (2006) “Ponti in muratura: difetti e patologie”, , Politecnico di Milano, Estratto dal convegno organizzato dal CIAS Ponti e viadotti: ispezioni visive e tecniche di risanamento Bolzano , 18-19 ottobre 2006

[28] D. M. del 14.01.2008 “Norme tecniche per le costruzioni “(G.U. n° 29 del 4 febbraio 2008).

[29] D.T. Hai (2008) “Computerized Database for maintenance and management of Highway Bridges in Vietnam” *Journal of Bridge Engineering* 13 (3), 245-257.

CAPITOLO 4

L'ANALISI MULTICRITERIALE: TEORIA DEL DOMINANCE BASED ROUGH SET

4.1 INTRODUZIONE

I problemi decisionali affrontati nella realtà sono complessi in quanto diversi e di varia natura, sia con riferimento alle diverse tipologie di problematiche affrontate che al contesto che li caratterizza. Tale complessità suggerisce l'adozione di un'adeguata metodologia che tenga in considerazione la molteplicità e la conflittualità degli obiettivi propri di tale problema.

Anche il problema della manutenzione dei ponti è un problema complesso e la scelta della migliore strategia manutentiva deve tener conto di molteplici aspetti come per esempio il budget disponibile, la vita utile dei ponti, la loro importanza all'interno della rete e lo stato di conservazione dei ponti.

La teoria dell'analisi multicriteriale che si è sviluppata intorno agli anni '60 ha consentito di risolvere problemi decisionali caratterizzati da una molteplicità di obiettivi spesso in conflitto fra loro.

Negli ultimi anni sono stati sviluppati diversi approcci per la risoluzione dei problemi di ottimizzazione multicriteriali che descriveremo nel seguito con particolare riferimento al metodo delle "regole decisionali" nel quale le preferenze del decisore vengono espresse attraverso una serie di regole del tipo "se...allora...".

Fra quest'ultime ritroviamo la "Teoria del Dominance Based Rough Set" che adotta la teoria degli insiemi approssimati basata sul principio di dominanza. Tale tecnica sta alla base del sistema di supporto alle decisioni sviluppato nell'ambito della presente tesi al fine di individuare il grado di urgenza delle attività manutentive e la migliore strategia per l'allocatione delle risorse per la manutenzione dei ponti.

4.2 CLASSIFICAZIONE DEI PROBLEMI DECISIONALI

I principali problemi decisionali possono essere distinti in tre categorie [1]:

1) Problemi di *classificazione* (classification and sorting): assegnare ogni azione ammissibile (**A**) ad una delle categorie predefinite. Si parla di ‘classification’ se le azioni vengono descritte da un insieme di attributi regolari e le classi non sono necessariamente ordinate. Si parla di ‘sorting’ se le azioni vengono descritte attraverso dei criteri, che sono degli attributi che hanno un’preferenza ordinata nel dominio. Quindi lo scopo della decisione è quello di assegnare gli oggetti a classi predefinite.

2) Problemi di *scelta* (choice): selezionare il più piccolo sottoinsieme di **A** (possibilmente una sola azione) che contenga le azioni considerate “migliori” o soddisfacenti con riferimento all’insieme di criteri (**G**). Quindi lo scopo della decisione è quello di scegliere l’oggetto migliore.

3) Problemi di *ordinamento* (ranking): ordinare le azioni di **A** (se finito) dalla migliore alla peggiore in classi di equivalenza. In altre parole, lo scopo della decisione è quello di ordinare gli oggetti dal migliore al peggiore.

4.3 FASI DEL PROCESSO DECISIONALE

Nel processo decisionale abbiamo 2 figure di riferimento che sono:

- ✓ l’*analista*, che è responsabile della costruzione e gestione del modello decisionale. All’analista compete l’interpretazione dei dati iniziali, dei risultati finali e la stesura del rapporto finale.
- ✓ il *decisore* (Decision Maker), che prende la decisione finale, fornisce i giudizi di merito per la procedura e supervisiona il lavoro. Al decisore compete l’interpretazione dei risultati finali.

L’analista e il decisore possono a volte coincidere ma sono di solito figure distinte. In particolare all’analista spetta il compito di:

- identificare la problematica da affrontare e individuare l’insieme di alternative da valutare;
- esaminare le conseguenze di ciascuna alternativa attraverso la definizione di criteri;
- costruire un modello che permetta un’analisi globale delle alternative;
- analizzare i risultati ottenuti per verificarne la coerenza e per trarre delle conclusioni.

Se tali risultati dovessero dimostrarsi insufficienti ai fini della decisione, occorrerà sviluppare delle procedure per l'acquisizione di nuove informazioni e per il trattamento delle stesse in modo da poter proseguire l'analisi.

4.4 EVOLUZIONE DALL'ANALISI MONOCRITERIALE ALL'ANALISI MULTICRITERIALE

I problemi decisionali sono dei problemi caratterizzati da diversi aspetti (tecnici, economici, sociali,...) che possono essere anche in conflitto fra loro, descritti attraverso dei criteri (anche qualitativi) che spesso sono espressi attraverso unità di misure diverse.

Il "decisore" è rappresentato da una pluralità di soggetti che tendono a perseguire ognuno i propri obiettivi e le proprie priorità.

Qualsiasi problema decisionale, per essere risolto, si avvale di tecniche di supporto alla decisione. Secondo D. Bouyssou "uno strumento di supporto alle decisioni è un modello che cerca di fornire risposte a questioni avanzate da soggetti coinvolti in un processo decisionale". Tali tecniche non si sostituiscono al decisore ma lo aiutano ad individuare, evidenziandole, quelle soluzioni che più di altre rispondono ai prerequisiti iniziali ossia agli obiettivi della decisione.

Gli strumenti di supporto alle decisioni, vengono adottati perché permettono di giustificare le scelte effettuate, aiutano il decisore a chiarire i propri obiettivi, ad organizzare in modo organico le informazioni a disposizione, permettono di individuare e quantificare le variabili in gioco e le loro reciproche relazioni, e l'analisi di scenari alternativi.

Sino agli inizi degli anni '60, i problemi decisionali venivano affrontati attraverso un approccio monocriteriale in cui la complessità del problema decisionale veniva ridotto su un'unica dimensione, su una sola scala numerica, spesso monetaria.

La formulazione tradizionale di un problema di decisione era basata sui seguenti tre elementi:

- 1) Un insieme "A" di alternative possibili ben definito;
- 2) Un'unica funzione obiettivo "G" (criterio) a valori reali definita in "A" che riflette le preferenze del decisore ("decision maker");

3) Un problema matematico ben formulato descritto nei termini di una funzione obiettivo da massimizzare nel rispetto degli eventuali vincoli: la “soluzione” del problema è pertanto l’alternativa che massimizza (o minimizza) la funzione obiettivo.

Il problema decisionale così definito presupponeva che il confronto tra due o più alternative venisse effettuato sulla base della valutazione delle alternative rispetto al criterio indicato. Il processo decisionale, quindi, mirava a trovare l’alternativa a cui corrisponde la valutazione più elevata rispetto al criterio considerato.

L’analisi costi-benefici rientra in questo tipo di approccio, ma essendo una metodologia di valutazione di tipo monetario, presenta notevoli difficoltà nel ricondurre tutti gli obiettivi a un’unica unità di misura, appunto quella monetaria.

Più recentemente sono state sviluppate tecniche di analisi multicriteriali in cui non è richiesto alcun ricorso a un’unica unità di misura, ma è invece possibile confrontare tra loro dati quantitativi e qualitativi senza la necessità di definire i cosiddetti “prezzi ombra”, tipici dell’analisi costi-benefici.

Una delle principali implicazioni dell’approccio multicriteriale (MCDM) è stata la rinuncia al paradigma dell’ottimalità: mentre nell’analisi costi-benefici la soluzione scelta era quella corrispondente alla soluzione ottima, nelle nuove tecniche di analisi, data la presenza di obiettivi eterogenei, spesso anche in conflitto tra loro, in genere non è possibile individuare soluzioni che perseguono contemporaneamente tutti gli obiettivi e il problema decisionale si risolve cercando la soluzione più “soddisfacente”, o meglio “più coerente” con la logica dei decisori.

La scelta va quindi effettuata all’interno dell’insieme delle soluzioni non dominate, cioè quelle soluzioni che realizzano un certo livello di conseguimento dei vari obiettivi tale che non è possibile migliorare il livello di uno di essi senza provocare un peggioramento del livello di almeno un altro obiettivo (soluzioni pareto efficienti).

Un problema decisionale multiobiettivo viene così risolto trasformandolo in una serie di problemi di ottimizzazione mono-obiettivo vincolati, in cui uno degli obiettivi viene scelto come funzione da ottimizzare nel rispetto di vincoli (target) sul livello di conseguimento degli altri obiettivi.

Al fine di prendere in esplicita considerazione tutti questi aspetti, spesso conflittuali, è stato proposto un differente approccio ai problemi di decisione, basato su una appropriata riformulazione dei punti 2) e 3):

2') Un insieme di "obiettivi" rappresentati da funzioni a valori reali (criteri), aggregati per mezzo di una funzione di utilità che assegna una valutazione complessiva a ogni possibile alternativa, rendendone possibile il confronto sulla base del principio che maggiore è la valutazione complessiva, migliore è l'alternativa considerata.

3') Un problema matematicamente ben formulato, consistente nel trovare la (o le) alternative che massimizzano la funzione di utilità o funzione valore (soluzione di "compromesso").

In questo caso il processo di analisi è governato da due relazioni:

- ✓ relazione di preferenza forte (P): $aPb \Leftrightarrow g(a) > g(b) \quad \forall a, b \in A$;
- ✓ relazione di indifferenza (I): $aIb \Leftrightarrow g(a) = g(b) \quad \forall a, b \in A$.

Anche in questo caso però, vengono evidenziate alcune limitazioni [1]:

- l'insieme delle azioni possibili è spesso approssimato e caratterizzato da vaghezza;
- le preferenze del decisore molto spesso non sono ben strutturate ma sono contraddistinte da incertezza, ambiguità, o, persino conflittuali e contraddittorie;
- le informazioni che caratterizzano il problema decisionale sono spesso granulari;
- non è possibile affermare se una decisione è buona o cattiva considerando esclusivamente un modello matematico bisogna anche considerare gli aspetti organizzativi, sociali e culturali che emergono durante il processo decisionale e che contribuiscono alla qualità della decisione stessa.

Sulla base di queste considerazioni è stata proposta una nuova formulazione del problema di decisione, che prende in considerazione l'intero processo decisionale. Essa si caratterizza per i seguenti punti [1]:

1'') un insieme A non necessariamente stabile di azioni potenziali: le azioni considerate possono non essere tutte ammissibili (realizzabili), perché anche alcune azioni "ideali" possono essere prese in considerazione durante il processo decisionale, per esempio come punti di riferimento per degli utili confronti. Inoltre, l'insieme delle azioni può evolvere durante il processo decisionale.

2'') un insieme G di criteri che rappresentino i differenti punti di vista dai quali studiare il problema di decisione: questi criteri dovrebbero prendere in considerazione anche le diverse fonti di incertezza e la loro modellizzazione dovrebbe inoltre consentire alcune forme di esitazione espresse dal decisore.

3'') un problema matematicamente non ben definito: in questo caso non esiste alcuna funzione da ottimizzare, bensì il supporto alla decisione mira a costruire un modello che permetta di confrontare le azioni potenziali sulla base dell'insieme di criteri G considerato al fine di affrontare coerentemente il problema decisionale affrontato.

In questo caso il processo di analisi è governato da quattro relazioni:

- ✓ relazione di preferenza forte: $aPb \Leftrightarrow g(a) > g(b) \quad \forall a, b \in A$;
- ✓ relazione di indifferenza: $aIb \Leftrightarrow g(a) = g(b) \quad \forall a, b \in A$;
- ✓ relazione di incomparabilità (J): aJb ;
- ✓ relazione di preferenza debole (Q): aQb .

Le ultime due relazioni tengono conto della possibile incomparabilità tra due o più azioni e della incapacità del decisore di esprimere con certezza una preferenza.

Questa metodologia di supporto alla decisione è definita aiuto multicriteriale alla decisione (Multiple Criteria Decision Aid - MCDA). Durante una prima fase del processo, l'analista aiuta il decisore a costruire i propri convincimenti mediante dei modelli appropriati per il problema di decisione affrontato, lasciando al decisore medesimo la scelta della decisione finale.

Possiamo quindi affermare che l'evoluzione del processo decisionale, che si è espressa principalmente attraverso il rifiuto della forzata riduzione della realtà ad un'unica dimensione esaustiva, si è tradotto in un passaggio dell'approccio decisionale che va dal "razionalismo" alla "razionalità e coerenza".

4.5 NOZIONI SULLE STRUTTURE DI PREFERENZA

Ogni qualvolta abbiamo un insieme di alternative e bisogna effettuare una scelta, oltre a stabilire i criteri che caratterizzano ogni alternativa bisognerà andare a valutare l'importanza di ogni criterio a partire dalle preferenze del decisore. Bisognerà quindi definire un modello attraverso cui esprimere le preferenze del decisore che in genere non sono note a priori. Nell'approccio classico le preferenze del decisore vengono

rappresentate attraverso la funzione di utilità $U:A \rightarrow R$ che assegna ad ogni azione $a \in A$ un valore che cresce con la preferibilità dell'azione considerata; quindi maggiore è il valore di $u(a)$ assegnato all'azione $a \in A$ tanto più l'azione a sarà preferibile; cioè si verifica che:

se $u(a) > u(b) \quad \forall a, b \in A$ allora l'azione a è preferibile all'azione b ;

se $u(a) = u(b) \quad \forall a, b \in A$ allora l'azione a è indifferente all'azione b .

La funzione di utilità implica la:

- transitività dell'indifferenza (se a e b sono indifferenti e b e c sono indifferenti allora lo sono anche a e c);

- transitività della preferenza (se a è preferita a b e b è preferita a c allora anche a è preferita a c).

Queste implicazioni comportano che date due alternative si riesca sempre a confrontarle fra loro; tuttavia nelle situazioni reali questo non è sempre possibile (vedi Paradosso di Condorcet [2] in cui viene violata la transitività delle preferenze e Paradosso di Luce in cui viene violata la transitività dell'indifferenza [3]).

Si è quindi introdotto il concetto di *relazione binaria di preferenza su A* che non necessariamente soddisfa le proprietà di completezza e di transitività; in quest'ottica la funzione di utilità è solo una delle possibili rappresentazioni delle relazioni binarie di preferenza.

4.5.1 Relazioni binarie

Una relazione binaria R su A è un sottoinsieme del prodotto cartesiano $A \times A$. Se la coppia ordinata $(a, b) \in R$ allora si scrive aRb , nel caso contrario si scrive $a \neg Rb$.

Data una relazione binaria R su A si possono definire le seguenti proprietà[4]:

- riflessiva se aRa ;

- irriflessiva se $a \neg Ra$;

- simmetrica se $aRb \rightarrow bRa$;

- antisimmetrica se aRb e $bRa \rightarrow a=b$;

- asimmetrica se $aRb \rightarrow b \neg Ra$;

- debolmente completa se $a \neq b \rightarrow aRb$ o bRa ;

- completa se aRb o bRa ;

- transitiva se aRb e $bRc \rightarrow aRc$;

- *negativamente transitiva* se $a \neg Rb$ e $b \neg Rc \rightarrow a \neg Rc$;

- *Ferrers* se $[aRb \text{ e } cRd] \rightarrow [aRd \text{ o } cRd]$;

- *semitransitiva* se $[aRb \text{ e } bRc] \rightarrow [aRd \text{ o } dRc]$

$\forall a, b, c, d \in A$

Poiché le relazioni binarie sono degli insiemi si possono applicare le operazioni classiche della Teoria degli insiemi (unione, intersezione, prodotto,...).

4.5.2 Strutture di preferenza

Supponiamo che nel confrontare due alternative a e b , il decisore possa assumere uno dei seguenti atteggiamenti:

- ✓ preferenza per un'azione: aPb se a è preferito a b (bPa , viceversa),
- ✓ indifferenza fra le due azioni: aIb se a e b sono indifferenti,
- ✓ rifiuto o incapacità di esprimere un giudizio: aJb se a e b sono incomparabili.

Le relazioni $\{P, I, J\}$ solitamente verificano le suddette proprietà:

$aPb \Rightarrow b \neg Ra$: P è *asimmetrica*,

aIa : I è *riflessiva*,

$aIb \Rightarrow bIa$: I è *simmetrica*,

$a \neg Ja$: J è *irriflessiva*,

$aJb \Rightarrow bJa$: J è *simmetrica*.

$\forall a, b \in A$

Se le relazioni $\{P, I, J\}$ verificano le suddette proprietà e se, dati due elementi $a, b \in A$, una e una sola delle seguenti relazioni è verificata: aPb , bPa , aIb , aJb allora $\{P, I, J\}$ costituiscono una *struttura di preferenza* in A .

Le relazioni di preferenza P , di indifferenza I e di incomparabilità J , stanno alla base dei principali modelli di preferenza.

A queste relazioni a volta se ne aggiunge un'altra [5, 6]:

- ✓ preferenza debole per una delle due azioni: aQb se l'azione a è debolmente preferita all'azione b .

La preferenza debole caratterizza una situazione in cui si ha un'esitazione tra la preferenza (in senso stretto) e l'indifferenza.

Le relazione Q solitamente verifica la suddetta proprietà:

$aQb \Rightarrow b \neg Qa$: Q è *asimmetrica*.

Le relazioni {P, I, J, Q} costituiscono una *struttura di preferenza* in A se:

- sono esaustive, cioè per ogni coppia di azioni (a,b) vale almeno una delle quattro relazioni fondamentali;
- sono mutuamente esclusive, cioè per ogni coppia di azioni (a,b) vale al più una delle relazioni fondamentali.

Le principali strutture di preferenza su cui si basano le analisi multicriteriali sono:

- ✓ preordine completo, se soddisfa le seguenti proprietà:

$[aPb \text{ e } bPc] \Rightarrow aPc$, cioè P è transitiva;

$[aIb \text{ e } bIc] \Rightarrow aIc$, cioè I è transitiva.

La *relazione binaria* S associata è completa e transitiva $\forall a,b,c \in A$.

- ✓ semiordine, se soddisfa le seguenti proprietà:

$[aPb, bIc \text{ e } cPd] \Rightarrow aPd$;

$[aPb, bPc \text{ e } aId] \Rightarrow dPc$.

La *relazione binaria* S associata è completa, di Ferrers e semitransitiva $\forall a,b,c \in A$.

- ✓ ordine di intervalli, se soddisfa le seguenti proprietà:

$a \neg Jb$, cioè non ci sono situazioni di incomparabilità

$[aPb, bIc \text{ e } cPd] \Rightarrow aPd$;

La *relazione binaria* S associata è completa e di Ferrers $\forall a,b,c \in A$.

- ✓ preordine parziale, se soddisfa le seguenti proprietà:

$[aPb \text{ e } bPc] \Rightarrow aPc$, cioè P è transitiva;

$[aIb \text{ e } bIc] \Rightarrow aIc$, cioè I è transitiva;

$[aPb \text{ e } bIc] \Rightarrow aPc$;

$[aIb \text{ e } bPc] \Rightarrow aPc$.

La *relazione binaria* S associata è riflessiva e transitiva $\forall a,b,c \in A$.

Nel caso di preordine completo, semiordine e ordine di intervalli, le alternative sono fra loro confrontabili, nel caso di preordine parziale esistono delle alternative che non sono confrontabili (incomparabili).

4.6 TECNICHE DI ANALISI MULTICRITERIALE

La struttura delle preferenze fornisce una modellizzazione *disaggregata* delle preferenze, in quanto consente il confronto tra due azioni solo mediante l'insieme delle valutazioni per ogni singolo criterio. Il passo successivo nel processo decisionale consiste nel definire un modello di aggregazione delle preferenze (modellizzazione *aggregata*) al fine di ottenere una struttura delle preferenze globali. Le *preferenze globali* sono "quelle che mettono in gioco la totalità delle conseguenze da prendere in considerazione al fine dell'aiuto alla decisione" [1].

I principali modelli di aggregazione delle preferenze con riferimento alle analisi multicriteriali sono:

- il modello dell'utilità multicriteriale [7];
- il modello della relazione di surclassamento [8];
- il modello interattivo;
- il modello basato sulle regole decisionali [9,10,11].

4.6.1 Modello dell'utilità multicriteriale

In questo tipo di approccio i diversi punti di vista vengono aggregati in un'unica funzione che deve essere ottimizzata. Tale funzione, che dovrebbe sintetizzare tutte le informazioni espresse da una famiglia coerente di criteri, viene detta *funzione di utilità U* o *funzione di aggregazione* ed è definita in A (insieme delle azioni potenziali) ed ha valori in R:

$$U(a) = V(g_1(a), g_2(a), \dots, g_m(a))$$

in cui V è una funzione di m variabili crescenti in tutti i suoi argomenti.

Il compito dell'analista è quello di esplicitare la funzione stessa, cercando di stimarne i parametri, partendo dalle preferenze espresse dal decisore.

La funzione di aggregazione può assumere diverse formulazioni; quella maggiormente utilizzata è quella del *modello additivo* in cui la valutazione complessiva di una data azione è vista come la somma delle utilità di ogni criterio considerato.

Questo tipo di aggregazione, anche se può apparire di semplice implementazione, in realtà si scontra con diversi problemi pratici come la definizione dei pesi da attribuire ai criteri o l'impossibilità di analizzare situazioni di incomparabilità tra le alternative.

4.6.2 I metodi di surclassamento

I metodi considerati in questo approccio effettuano dei confronti diretti per coppie di azioni. L'idea di base è quella di accettare risultati meno precisi evitando, però, di introdurre ipotesi matematiche troppo restrittive e di rivolgere al decisore domande eccessivamente complicate. Questo approccio è basato principalmente sulla relazione di surclassamento.

Per *relazione di surclassamento* si intende una relazione binaria, S , definita nell'insieme delle azioni potenziali, A , mediante la quale è possibile dire che " a surclassa b " se, considerando ciò che è noto circa le preferenze del decisore e data la qualità delle valutazioni delle azioni e la natura del problema, ci sono argomentazioni sufficienti per affermare che a è almeno buona quanto b e non ci sono motivazioni valide per rifiutare tale affermazione [1]. La relazione di surclassamento è riflessiva, non necessariamente transitiva e completa, in quanto è ammessa l'ipotesi di incomparabilità tra le alternative.

I metodi relativi a questo tipo di approccio si basano, generalmente, sulla combinazione di due fasi:

1. la costruzione di una o più relazioni di surclassamento;
2. la definizione di una 'raccomandazione' per la risoluzione del problema decisionale sulla base del modello di preferenza individuato.

Anche questo approccio operativo, comunque, fa riferimento ancora ad ipotesi forti e alla definizione del peso da assegnare ai criteri; questo implica che, prima di fornire le raccomandazioni utili alla decisione, è necessario verificare la coerenza dei risultati e la validità delle ipotesi.

Alcuni dei principali metodi basati sulla relazione di surclassamento sono Electre I [12], Electre II [13], Electre III [14].

4.6.3 I metodi interattivi

Nell'approccio interattivo, l'aggregazione delle preferenze viene effettuata mediante gli input forniti dal decisore nei momenti di dialogo che si alternano alle fasi puramente computazionali.

I diversi metodi proposti nell'ambito dell'approccio interattivo si basano sull'alternarsi delle seguenti fasi [15]:

1. *ricerca di un algoritmo di compromesso*: attraverso l'ausilio di un determinato algoritmo ed in funzione delle informazioni disponibili sulla struttura di preferenza del decisore, l'analista cerca un'alternativa da presentare al decisore;

2. *reinizializzazione*: l'alternativa trovata durante la prima fase viene presentata al decisore per valutarne la reazione;

3. *reazione del decisore*: se l'alternativa viene ritenuta soddisfacente dal decisore, la procedura si arresta, altrimenti, si ricercano ulteriori nuove informazioni che possano guidare la scelta di una nuova soluzione da analizzare.

Ogni metodo multicriteriale prevede delle fasi di dialogo con il decisore soprattutto in fase iniziale quando viene stabilito l'insieme delle azioni potenziali e dei criteri, però può definirsi metodo interattivo se il dialogo costituisce uno dei principali strumenti di indagine. Quindi il decisore diventa parte attiva del processo, fornendo un contributo diretto alla ricerca di una soluzione durante tutto il processo decisionale.

I diversi metodi annoverabili nell'approccio interattivo possono essere distinti in due grandi categorie a seconda che siano "orientati verso la ricerca di un'alternativa soddisfacente" oppure "orientati a facilitare l'apprendimento del decisore". In entrambi i casi, è opportuno sottolineare che l'obiettivo sottostante è, comunque, quello di facilitare ed arricchire la comprensione che il decisore ha del proprio problema.

4.6.4 I modelli basati sulle regole decisionali

Attraverso tale approccio la modellizzazione delle preferenze avviene in termini di regole decisionali del tipo "se...allora..." mediante le informazioni preferenziali espresse in termini di esempi di decisione che vengono fornite dal decisore. L'accettazione delle regole, da parte del decisore, giustifica quindi il loro uso ai fini del supporto alla decisione. Tali modelli permettono l'utilizzo di informazioni qualitative e quantitative senza richiedere la valutazione di parametri tecnici e quindi di pesi da assegnare o di taratura del modello.

La base matematica dell'approccio delle regole decisionali è l'approccio dei rough set basato sulla dominanza (Teoria del Dominance Based Rough Set). Nei prossimi paragrafi scenderemo più nel dettaglio relativo all'approccio dei rough set e alla teoria del dominance based rough set.

4.7 L'APPROCCIO DEI ROUGH SETS ALL'ANALISI DELLE DECISIONI

La Teoria dei Rough Set, introdotta da Palaw (1982 [16], 1991 [17]), ha dimostrato di essere un ottimo strumento matematico per l'analisi di oggetti caratterizzati da descrizioni "vaghe". L'aggettivo vago si riferisce alla qualità delle informazioni e significa incoerenza o ambiguità che deriva dalla "granulazione" delle informazioni. La filosofia dell'insieme "rough" si basa sul presupposto che ad ogni oggetto dell'universo vi è associata una certa quantità di informazioni (dati, conoscenza) espressa per mezzo di alcuni attributi utilizzati per la descrizione degli oggetti stessi. Gli oggetti che presentano la medesima descrizione vengono definiti "indiscernibili", cioè simili rispetto alle informazioni disponibili. La relazione di indiscernibilità così generata, costituisce la base matematica della Teoria dei Rough Sets; essa induce una ripartizione degli oggetti dell'universo in blocchi di oggetti indiscernibili denominati "insiemi elementari" che può essere utilizzata per costruire la conoscenza di un mondo reale o astratto.

4.7.1 Tabella delle informazioni e relazione di indiscernibilità

Il postulato su cui si fonda tale teoria, afferma che ad ogni oggetto dell'universo U considerato, è associato un certo quantitativo di informazioni espresse attraverso una serie di attributi $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$. La tabella d'informazione può quindi essere rappresentata da

$S = (U, Q)$, contenente l'universo U degli oggetti considerati, l'insieme finito Q degli attributi. Se si definisce V_q il dominio di un attributo, ed f una funzione detta *funzione di informazione*, definita in $U \times Q \rightarrow V$, tale che definito un $q \in Q$ e $x \in U$ sia $f(x, q) \in V_q$, tale che restituisca il valore del attributo relativo a quell'oggetto, allora per un qualunque sottoinsieme $P \subseteq Q$ si può definire una relazione binaria I_P come segue:

$$I_P = \{(x, y) \in U \times U : f(x, q) = f(y, q), \forall q \in P\}$$

Questa relazione detta di *indiscernibilità*, è una legge di equivalenza che assume come equivalenti gli oggetti indiscernibili, ossia caratterizzati dalle medesime informazioni relativamente agli attributi di P . Da ciò consegue una partizione di U in classi di equivalenza dette insiemi elementari. Gli oggetti x e y sono detti pertanto indiscernibili secondo P (o Q). Se si distinguono due tipologie di attributi, gli attributi condizionali C e gli attributi decisionali D , allora la tabella d'informazione S diventa una tabella di decisione (*decision table*).

4.7.2 Approssimazione inferiore e superiore

A partire dalla tabella delle informazioni S , da un sottoinsieme X non vuoto di U , e da un sottoinsieme P non vuoto di Q è possibile definire:

- ✓ approssimazione inferiore

$$\underline{P}(X) = \{x \in U : I_p(x) \subseteq X\}$$

- ✓ approssimazione superiore

$$\overline{P}(X) = \bigcup_{x \in X} I_p(x)$$

L'approssimazione inferiore $\underline{P}(X)$ si compone dell'unione di tutti gli insiemi elementari inclusi in X (elementi che certamente appartengono a X). Quindi gli elementi di $\underline{P}(X)$ sono tutti e soli quegli oggetti $x \in U$ che appartengono alle classi di equivalenza generate dalla relazione di indiscernibilità I_p contenute in X .

L'approssimazione superiore, invece, comprende tutti gli insiemi elementari che hanno un'intersezione non vuota con X (elementi che potrebbero appartenere ad X). Pertanto, gli elementi di $\overline{P}(X)$ sono tutti e soli quegli oggetti $x \in U$ che appartengono alle classi di equivalenza, generate dalla relazione di indiscernibilità I_p contenenti almeno un oggetto x appartenente ad X . In altre parole, $\overline{P}(X)$ è l'unione più grande degli insiemi elementari contenuti in X , mentre $\underline{P}(X)$ è l'unione più piccola degli insiemi elementari contenuti in X .

4.7.3 Frontiera

Si può definire poi la frontiera di X in S , ricavata dalla differenza fra l'approssimazione superiore e quella inferiore, che costituisce la regione dell'incertezza per i rough sets. I suoi elementi non possono essere classificati con certezza come appartenenti o meno a X , usando l'informazione disponibile. La *frontiera* è indicata con $BnP(X)$ e definita come:

$$Bn_p(X) = \overline{P}(X) - \underline{P}(X)$$

L'informazione sugli oggetti della frontiera è dunque inconsistente o ambigua. Chiaramente, negli insiemi ordinari la frontiera è vuota. Se l'insieme *frontiera* di X è vuoto, $BnP(X) = \emptyset$, allora l'insieme X è un insieme esatto (*crisp*), tanto da poter essere espresso come unione di un certo numero di insiemi elementari; altrimenti, l'insieme X è un insieme approssimato (*rough*) e potrebbe essere caratterizzato dall'uso delle approssimazioni

superiori e inferiori $\overline{P}(X)$ e $\underline{P}(X)$. La famiglia di tutti gli insiemi $X \subseteq U$ aventi le medesime approssimazioni, inferiore e superiore, è chiamata *rough set*.

4.7.4 Qualità dell'approssimazione

Si definisce *qualità dell'approssimazione (quality of sorting)* di X mediante gli attributi di P il rapporto

$$\gamma_p(X) = \frac{\sum_{i=1}^n |P(Y_i)|}{|U|}$$

La qualità dell'approssimazione $\gamma_p(X)$ rappresenta la frequenza relativa degli oggetti correttamente classificati mediante gli attributi P .

4.7.5 Ridotti e Core

Un aspetto molto importante nelle applicazioni pratiche è quello della dipendenza dagli attributi e dagli attributi superflui. Intuitivamente, un insieme di attributi $P \subseteq Q$ è totalmente dipendente da un insieme di attributi $T \subseteq Q$ se tutti i valori degli attributi contenuti in T sono univocamente determinati dai valori degli attributi presenti in P , e questo si ha solo se $I_P \subseteq I_T$. In altre parole, la divisione generata dagli attributi di P è fine tanto quella generata dagli attributi di T , in modo tale che è sufficiente usare gli attributi di P per costruire la partizione U/I_T . Un altro argomento di grande importanza pratica è rappresentato dagli "attributi superflui" contenuti in una tabella delle informazioni. Questi possono essere eliminati, infatti, senza modificare o deteriorare l'informazione contenuta nel prospetto originale. Considerando $P \subseteq Q$ e $p \in P$, si può dire che l'attributo p è superfluo in P se $I_P = I_{P - \{p\}}$, altrimenti, l'attributo p è indispensabile in P . L'insieme P è indipendente o ortogonale se tutti i suoi elementi (attributi) sono indispensabili. Il sottoinsieme P' di P è una riduzione (*reduct*) di P , indicato con $Red(P)$, se P' è indipendente ed $I_{P'} = I_P$.

L'insieme di tutti gli attributi indispensabili di P è il nucleo (*core*) di P :

$$Core_x(P) = \bigcap Red_x(P)$$

e contiene tutti quegli attributi che non possono essere, in alcun modo, sostituiti senza perdita di informazione. Il calcolo di tutti gli insiemi ridotti di attributi risulta lungo e complesso e spesso non è necessario. Può essere sufficiente fermarsi agli insiemi ridotti con

maggiore qualità della classificazione. Questa caratteristica della teoria dei Rough-set è fondamentale perché permette di ottenere risultati con molti meno attributi di quelli che possono essere specificati, pur mantenendo lo stesso livello di rappresentazione del problema.

4.7.6 Regole decisionali

Se in una tavola delle informazioni gli attributi di Q vengono distinti in attributi condizionali (insieme C) e attributi decisionali (insieme D), $C \cup D = Q$ e $C \cap D = \emptyset$, detta tavola è chiamata tavola delle decisioni. Gli attributi decisionali inducono delle partizioni di U dedotte dalla relazione di indiscernibilità I_D , in maniera assolutamente indipendente dagli attributi condizionali di C . Nelle applicazioni operative, si tende a ridurre gli attributi condizionali preservando la dipendenza tra attributi condizionali e decisionali. In altri termini, si vuole usare il minor numero possibile di attributi condizionali senza deteriorare la qualità dell'approssimazione della classificazione indotta dagli attributi decisionali.

Poiché si tende a evidenziare la dipendenza funzionale tra gli attributi condizionali e quelli decisionali, una tavola delle decisioni può anche essere espressa come un insieme di regole decisionali. Queste sono delle proposizioni logiche (implicazioni) del tipo “se..., allora...”, ove l'antecedente riguarda valori assunti da uno o più attributi condizionali (descrizioni di insiemi C - elementari) ed il conseguente partizioni generate dagli attributi decisionali (descrizioni di insiemi D - elementari). Se queste ultime contengono le partizioni corrispondenti agli attributi condizionali considerati, la regola decisionale si dice esatta o certa; altrimenti si parla di regole decisionali approssimate o incerte.

La sintassi della regola è la seguente:

se $f(x, q_1)$ è uguale a r_{q_1} e $f(x, q_2)$ è uguale a r_{q_2} e ... $f(x, q_p)$ è uguale a r_{q_p} , allora x appartiene a Y_{j_1} o a Y_{j_2} o ... a Y_{j_k}

In cui:

$\{q_1, q_2, \dots, q_p\} \subseteq C$;

$(r_{q_1}, r_{q_2}, \dots, r_{q_p}) \in V_{q_1} \times V_{q_2} \times \dots \times V_{q_p}$;

$Y_{j_1}, Y_{j_2}, \dots, Y_{j_k}$ sono le classi decisionali di una determinata classificazione.

Nel caso in cui $k=1$ la regola decisionale è esatta, in caso contrario si dice approssimata o incerta.

4.8 TEORIA DEL DOMINANCE BASED ROUGH SET

L'approccio tradizionale dei rough set non permette però di estrarre tutte le conoscenze essenziali contenute nella tabella decisionale nel caso di problemi di classificazione.

Nonostante ciò, in molti problemi reali, è importante considerare la *proprietà ordinale* dei criteri presi in considerazione. Osserviamo che l'approccio di massima basato sull'uso delle relazioni di indiscernibilità non è in grado di catturare uno specifico tipo di incoerenza che può verificarsi quando nella tabella ci sono due oggetti A e B in cui A è migliore di B rispetto a tutti i criteri, ma A viene assegnata ad una classe peggiore rispetto a B; questo perché nei rough sets gli oggetti A e B sono semplicemente discernibili. Sulla base di queste considerazioni, Greco et al. (1998) [18][19] e Greco et al. 1999([20][21]) hanno proposto un nuovo approccio di massima ai problemi di classificazione multicriteriale, che verrà descritto più in particolare nei paragrafi successivi.

I problemi di classificazione multicriteriali possono essere caratterizzati da criteri (il cui dominio è ordinato secondo una scala di preferenza) e da attributi (il cui dominio non è ordinato secondo una scala di preferenza), in questo caso, l'approssimazione si basa sull'uso di una relazione binaria di dominanza (rispetto ai criteri considerati) e di indiscernibilità (rispetto ad attributi considerati), come proposto da Greco et al. (1998) [22].

Una più generale relazione binaria che aggrega la dominanza, l'indiscernibilità e la similarità è stata considerata da Greco et al. (1999) [23].

4.8.1 Tabella delle informazioni e relazione di dominanza

Formalmente una *tabella delle informazioni o dei dati* è una quadrupla $S=(U, Q, V, f)$ in cui U è un insieme finito di oggetti (universo) $Q=\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ è un insieme finito di attributi, V_q è il dominio degli attributi q e pertanto $V=\bigcup_{q \in Q} V_q$, e $f:U \times Q \rightarrow V$ è una funzione totale definita in $U \times Q$ che ha valori in V tale che per ogni $q \in Q$ e $x \in U$ si avrà $f(x,q) \in V_q$. Tale funzione viene detta "*funzione di informazione*". In parole semplici $f(x,q)$ restituisce il valore dell'attributo $q \in Q$ relativo all'oggetto $x \in U$.

L'insieme Q è solitamente diviso in un insieme C di attributi condizionali e in un insieme D di attributi decisionali; il dominio degli attributi non deve necessariamente essere ordinato. Tuttavia nei problemi di classificazione multicriteriale il dominio degli attributi condizionali è ordinato secondo una scala di preferenze, in questo caso gli attributi prendono il nome di "criteri".

4.8.2 Classi decisionali

L'insieme degli attributi decisionali D induce una partizione di U in un numero finito di classi $Cl = \{Cl_t, t \in T\}$, $T = \{1, \dots, n\}$. Ogni $x \in U$ appartiene ad una e una sola classe di $Cl_t \in Cl$. Le classi di Cl sono ordinate secondo un ordine di preferenza concorde con l'indice delle classi ossia che per tutti gli $r, s \in T$ tali che $r > s$, allora gli oggetti di Cl_r saranno preferiti agli oggetti di Cl_s .

4.8.3 Approssimazioni basate sulla dominanza

4.8.3.1 Unioni ascendenti e discendenti

Nella classificazione multicriteriale, a causa del fatto che l'insieme delle classi Cl sono ordinate secondo un ordine di preferenza, gli insiemi da approssimare non sono le classi, ma le unioni ascendenti e discendenti delle classi, così definite:

$$\checkmark \text{ unioni ascendenti: } Cl_t^{\geq} = \bigcup_{s \geq t} Cl_s$$

$$\checkmark \text{ unioni discendenti: } Cl_t^{\leq} = \bigcup_{s \leq t} Cl_s$$

L'unione ascendente Cl_t^{\geq} è l'insieme degli oggetti appartenenti alla classe Cl_t o a quelle maggiormente preferite, mentre l'unione discendente Cl_t^{\leq} è l'insieme delle classi appartenenti alla classe Cl_t o ad una classe meno preferita.

Si noti che per $t=2, \dots, n$ si ha che:

$$Cl_t^{\geq} = U - Cl_{t-1}^{\leq}, \quad Cl_{t-1}^{\leq} = U - Cl_t^{\geq}$$

Notiamo che solitamente i problemi di classificazione, nei metodi di "estrazione della conoscenza" da un insieme di dati (knowledge discovery methods), con riferimento ad

una classe Cl_t divide l'universo U nella classe Cl_t (insieme positivo di esempi) e nel suo complemento $U - Cl_t$ (insieme di esempi negativi) con $t=1, \dots, n$.

Tuttavia tali suddivisioni non tengono in considerazione l'ordine di preferenza tra le classi. Quindi nella classificazione multicriteriale viene utilizzata un altro tipo di suddivisione che divide l'universo U nelle unioni ascendenti Cl_t^{\geq} e discendenti delle classi Cl_{t-1}^{\leq} .

A seguito di questa suddivisione ogni oggetto dell'unione ascendente Cl_t^{\geq} è preferibile ad ogni oggetto dell'unione discendente Cl_{t-1}^{\leq} . Nel processo di "estrazione della conoscenza" rispetto all'unione ascendente Cl_t^{\geq} saranno considerati positivi tutti gli oggetti appartenenti a Cl_t^{\geq} e negativi tutti gli oggetti appartenenti a Cl_{t-1}^{\leq} . Analogamente quando si estrae la conoscenza rispetto unioni discendenti Cl_{t-1}^{\leq} saranno considerati positivi tutti gli oggetti appartenenti a Cl_{t-1}^{\leq} e negativi tutti gli oggetti appartenenti a Cl_t^{\geq} .

4.8.3.2 Granuli di conoscenza

Nell'approccio di "estrazione della conoscenza", la dominanza principale viene così applicata.

Si definisce \geq_q una *relazione di preferenza debole* su U (chiamata spesso outranking) che rappresenta una preferenza su un insieme di oggetti in relazione al criterio q ; $x \geq_q y$ significa che "x è almeno tanto buono quanto y rispetto al criterio q". Diciamo che x domina y rispetto a $P \subseteq C$, indicato con $x D_P y$, se $x \geq_q y$ per ogni $q \in P$. Assumendo, senza perdere di generalità, che i domini di tutti i criteri sono ordinati in modo che la preferenza aumenta con il valore allora dire che $x D_P y$ è equivalente a dire che $f(x, q) \geq f(y, q)$ per ogni $q \in P$.

Allora, considerato $P \subseteq C$, si definiscono per ogni $x \in U$ i "granuli di conoscenza" usati per le approssimazioni nel DRSA che sono:

- ✓ l'insieme degli oggetti che dominano x , chiamati *P-Dominanti (P-dominating set)*,

$$D_P^+(x) = \{y \in U : y D_P x\};$$

- ✓ l'insieme degli oggetti dominati da x , chiamati *P-Dominati* (*P-dominated set*),

$$D_p^-(x) = \{y \in U : xD_p y\}.$$

Dato un insieme di criteri $P \subseteq C$, l'inserimento di un oggetto $x \in U$ nell'unione ascendente delle classi Cl_t^z , $t=2, \dots, n$, crea una *inconsistenza* rispetto al principio di dominanza se vale una delle seguenti condizioni:

- x appartiene alla classe Cl_t o ad una migliore ma è dominato da un oggetto y appartenente ad una classe peggiore di Cl_t ,
- x appartiene ad una classe peggiore di Cl_t ma domina un oggetto y appartenente alla classe Cl_t o ad una migliore.

4.8.3.3 Approssimazioni superiori e inferiori

Se, dato un insieme di criteri $P \subseteq C$, l'inclusione di $x \in U$ a Cl_t^z , $t=2, \dots, n$, crea una inconsistenza rispetto al principio di dominanza, noi diciamo che x appartiene a Cl_t^z con qualche ambiguità. Analogamente se $x \in U$ appartiene a Cl_t^z , senza alcuna ambiguità rispetto a $P \subseteq C$. Ciò significa che tutti gli oggetti che dominano x appartengono a Cl_t^z .

Diciamo che $y \in U$ può appartenere alla classe Cl_t^z eventualmente con qualche ambiguità se esiste un oggetto $x \in Cl_t^z$ tale che y domina x rispetto all'insieme $P \subseteq C$, ovvero $y \in D_p^+(x)$.

Dunque rispetto a $P \subseteq C$, l'insieme di tutti gli oggetti appartenenti alla classe Cl_t^z senza alcuna ambiguità costituisce l'*approssimazione inferiore* di P in Cl_t^z (*P-lower approximation of Cl_t^z* , denotata con $\underline{P}(Cl_t^z)$), mentre l'insieme di tutti gli oggetti che potrebbero appartenere alla classe Cl_t^z , eventualmente con qualche ambiguità, costituisce l'*approssimazione superiore* di P in Cl_t^z (*P-upper approximation of Cl_t^z*), denotata con $\overline{P}(Cl_t^z)$:

- ✓ $\underline{P}(Cl_t^z) = \{x \in U : D_p^+(x) \subseteq Cl_t^z\}$,
- ✓ $\overline{P}(Cl_t^z) = \{x \in U : D_p^-(x) \cap Cl_t^z \neq \emptyset\}$, per $t=1, \dots, n$.

Analogamente è possibile definire l'approssimazione inferiore e l'approssimazione superiore in CI_t^s come segue:

- ✓ $\underline{P}(CI_t^s) = \{x \in U : D_p^-(x) \subseteq CI_t^s\}$,
- ✓ $\overline{P}(CI_t^s) = \{x \in U : D_p^+(x) \cap CI_t^s \neq \emptyset\}$, per $t=1, \dots, n$.

4.8.3.4 Frontiera

Tutti gli oggetti appartenenti a CI_t^z e CI_t^s con qualche ambiguità costituiscono la frontiera (*P-boundary*) di CI_t^z e di CI_t^s denotata rispettivamente da $Bn_p(CI_t^z)$ e da $Bn_p(CI_t^s)$, e sono così rappresentate:

- ✓ $Bn_p(CI_t^z) = \overline{P}(CI_t^z) - \underline{P}(CI_t^z)$,
- ✓ $Bn_p(CI_t^s) = \overline{P}(CI_t^s) - \underline{P}(CI_t^s)$, per $t=1, \dots, n$.

Più semplicemente la frontiera $Bn_p(CI_t^z)$ è composta da tutti gli oggetti ambigui rispetto al set di criteri P e dall'unione superiore delle classi CI_t^z .

Analogamente, la frontiera $Bn_p(CI_t^s)$ è composta da tutti gli oggetti ambigui rispetto al set di criteri P e dall'unione inferiore delle classi CI_t^s .

A causa della complementarità dell'approssimazione di tipo rough seguono le seguenti proprietà:

- ✓ $Bn_p(CI_t^z) = Bn_p(CI_{t-1}^s)$ per $t=2, \dots, n$ e
- ✓ $Bn_p(CI_t^s) = Bn_p(CI_{t+1}^z)$ per $t=1, 2, \dots, n$.

Dal punto di vista dell'individuazione della conoscenza, l'approssimazione inferiore dell'unione delle classi rappresenta una *conoscenza certa* fornita dai criteri di $P \subseteq C$, mentre l'approssimazione inferiore delle classi rappresenta una *conoscenza possibile* mentre la frontiera contiene la *conoscenza dubbia* [20].

4.8.4 Qualità dell'approssimazione, insiemi ridotti e core

4.8.4.1 Qualità dell'approssimazione

È possibile definire per ogni $t \in T$ la *qualità dell'approssimazione* (*quality of sorting*) della classificazione Cl , in funzione dell'insieme di criteri $P \subseteq C$ come:

$$\gamma_p(Cl) = \frac{\text{card}\left(U - \left(\bigcup_{t \in T} Bn_p(Cl_t^s)\right)\right)}{\text{card}U} = \frac{\text{card}\left(U - \left(\bigcup_{t \in T} Bn_p(Cl_t^s)\right)\right)}{\text{card}U}$$

La qualità dell'approssimazione $\gamma_p(Cl)$ è il rapporto fra gli oggetti correttamente rappresentati tramite gli attributi di P e il numero di oggetti dell'universo, cioè la percentuale di oggetti per cui non c'è ambiguità.

Bisogna osservare che aumentando l'insieme dei criteri considerati, la qualità dell'approssimazione non può crescere ma in generale può decrescere. Infatti, prendendo in considerazione dei nuovi criteri, oggetti che prima erano ambigui possono diventare non ambigui.

4.8.4.2 Ridotti

Ogni sottoinsieme minimo di criteri $P \subseteq C$ tale che $\gamma_p(Cl) = \gamma_c(Cl)$ è definito *ridotto* di Cl (*reduct*) ed è denotato come RED_{Cl} . Un ridotto di P è un sottoinsieme minimo di criteri di C tale che oggetti ambigui possono diventare non ambigui se si considerano altri criteri; ciò significa che se P è un ridotto, gli oggetti ambigui rispetto a P lo saranno anche rispetto a C , e se qualche criterio non viene considerato allora almeno un oggetto diverrà ambiguo. Una tabella delle informazioni può avere più di un ridotto.

4.8.4.3 Core

L'intersezione di tutti i ridotti è definito *CORE* ed è denotato come $CORE_{Cl}$:

$$Core_{Cl}(P) = \bigcap Red_{Cl}(P)$$

Il *core* contiene tutti i criteri che non possono essere rimossi senza deteriorare la qualità dell'approssimazione. Questo significa che nell'insieme dei criteri condizionali ci sono:

- criteri *indispensabili*, che sono i criteri inclusi nel CORE;

- criteri *interscambiabili*, che sono i criteri inclusi in alcuni ridotti ma non nel core; tali criteri possono essere sostituiti senza influire sulla qualità dell'approssimazione;

- criteri *superflui*, che sono i criteri che non sono inclusi in nessun ridotto e pertanto non sono indispensabili; tali criteri non influenzano la qualità dell'approssimazione.

L'individuazione del core fornisce, indirettamente, al decisore importanti informazioni riguardo all'importanza che lui stesso ha attribuito ai criteri nel classificare gli esempi.

4.8.5 Estrazione delle regole decisionali

Il risultato finale dell'analisi effettuata con il DRSA è un insieme di regole decisionali, espresse in termini di proposizioni del tipo “*se..., allora...*” chiamate *regole di decisione*.

Le regole di decisione generate dall'approccio dei rough set non derivano direttamente dalla *tabella delle informazioni* ma dalle approssimazioni inferiore e superiore delle unioni ascendenti e discendenti delle classi decisionali.

Per una data unione ascendente Cl_t^{\geq} o discendente Cl_s^{\leq} , le regole estratte nell'ipotesi che gli oggetti appartenenti a $\underline{P}(Cl_t^{\geq})$ o a $\overline{P}(Cl_s^{\leq})$ siano *positivi* e tutti gli altri *negativi*, suggeriscono, rispettivamente, una formulazione delle stesse del tipo “...*allora x appartiene alla classe Cl_t o ad una classe migliore*” o “...*allora x appartiene alla classe Cl_s o ad una classe peggiore*”. Le regole estratte invece nell'ipotesi che gli oggetti appartenenti all'intersezione delle approssimazioni superiori dell'unione delle classi $\underline{P}(Cl_s^{\leq}) \cap \underline{P}(Cl_t^{\geq})$ siano tutti positivi e i rimanenti negativi, suggeriscono invece che l'oggetto potrebbe appartenere ad una delle classi comprese fra Cl_t e Cl_s ($s < t$).

Più formalmente, assumendo per ogni $q \in C$, $V_q \subseteq R$ (con V_q quantitativo) e per ogni $x, y \in U$ tale che $f(x, y) \geq f(y, q)$ implica $x \succeq_q y$ (con V_q ordinato per preferenza), si possono considerare i seguenti cinque tipi di regole decisionali:

- 1) *Regole decisionali certe D_{\geq}* : forniscono indicazioni relative a limiti superiori dei criteri per oggetti che appartengono all'unione ascendente delle classi Cl_t^{\geq} senza alcuna ambiguità e assumono la forma generale:

$$\text{se } f(x, q_1) \succeq_{r_{q_1}} \text{ e } f(x, q_2) \succeq_{r_{q_2}} \text{ e } \dots \text{ e } f(x, q_p) \succeq_{r_{q_p}} \text{ allora } x \in Cl_t^{\geq}$$

con $P = \{q_1, q_2, \dots, q_p\} \subseteq C$, \mathbf{e} ; $r_{q_1}, r_{q_2}, \dots, r_{q_p} \in V_{q_1} \times V_{q_2} \times \dots \times V_{q_p}$ \mathbf{e} $t \in T$;

- 2) *Regole decisionali certe* D_{\leq} : forniscono indicazioni relative a limiti inferiori dei criteri per oggetti che appartengono all'unione discendente delle classi Cl_i^{\leq} senza alcuna ambiguità e assumono la forma generale:

se $f(x, q_1) \leq r_{q_1}$ e $f(x, q_2) \leq r_{q_2}$ e ... $f(x, q_p) \leq r_{q_p}$ allora $x \in Cl_i^{\leq}$

con $P = \{q_1, q_2, \dots, q_p\} \subseteq C$, $r_{q_1}, r_{q_2}, \dots, r_{q_p} \in V_{q_1} \times V_{q_2} \times \dots \times V_{q_p}$ \mathbf{e} $t \in T$;

- 3) *Regole decisionali possibili* D_{\geq} : forniscono indicazioni relative a limiti superiori dei criteri per oggetti che appartengono all'unione ascendente delle classi Cl_i^{\geq} con o senza ambiguità e assumono la forma generale:

se $f(x, q_1) \geq r_{q_1}$ e $f(x, q_2) \geq r_{q_2}$ e ... $f(x, q_p) \geq r_{q_p}$ allora x potrebbe appartenere a Cl_i^{\geq}

con $P = \{q_1, q_2, \dots, q_p\} \subseteq C$, \mathbf{e} ; $r_{q_1}, r_{q_2}, \dots, r_{q_p} \in V_{q_1} \times V_{q_2} \times \dots \times V_{q_p}$ \mathbf{e} $t \in T$;

- 4) *Regole decisionali possibili* D_{\leq} : forniscono indicazioni relative a limiti inferiori dei criteri per oggetti che appartengono all'unione discendente delle classi Cl_i^{\leq} con o senza ambiguità e assumono la forma generale:

se $f(x, q_1) \leq r_{q_1}$ e $f(x, q_2) \leq r_{q_2}$ e ... $f(x, q_p) \leq r_{q_p}$ allora x potrebbe appartenere a Cl_i^{\leq}

con $P = \{q_1, q_2, \dots, q_p\} \subseteq C$, $r_{q_1}, r_{q_2}, \dots, r_{q_p} \in V_{q_1} \times V_{q_2} \times \dots \times V_{q_p}$ \mathbf{e} $t \in T$;

- 5) *Regole decisionali approssimate* D_{\geq} : forniscono indicazioni relative simultaneamente a limiti superiori e inferiori dei criteri per oggetti che appartengono all'unione di classi intermedie $Cl_s \cup Cl_{s+1} \cup \dots \cup Cl_{t-1} \cup Cl_t$ senza possibilità di distinguere quale, e assumono la forma generale:

se $f(x, q_1) \geq r_{q_1}$ e $f(x, q_2) \geq r_{q_2}$ e ... $f(x, q_k) \geq r_{q_k}$ e $f(x, q_{k+1}) \geq r_{q_{k+1}}$
e ... $f(x, q_p) \geq r_{q_p}$ allora $x \in Cl_s \cup Cl_{s+1} \cup \dots \cup Cl_{t-1} \cup Cl_t$

con $O' = \{q_1, q_2, \dots, q_k\} \subseteq C$, $O'' = \{q_{k+1}, q_{k+2}, \dots, q_p\} \subseteq C$, $P = O' \cup O''$, e O' e O'' non necessariamente disgiunti, $r_{q_1}, r_{q_2}, \dots, r_{q_p} \in V_{q_1} \times V_{q_2} \times \dots \times V_{q_p}$ \mathbf{e} $s, t \in T, s < t$.

È possibile che $\{q_1, q_2, \dots, q_k\} \cap \{q_{k+1}, \dots, q_p\} \neq \emptyset$ nella parte condizionale di una regola decisionale D_{\geq} e che si possa avere $f(x, q) \geq r_q$ e $f(x, q) \geq r'_q$ con $r_q \leq r'_q$ per $q \in C$.

Inoltre se $r_q = r'_q$, le due condizioni divengono $f(x, q) = r_q$ e si avrebbe una situazione di indifferenza.

4.8.5.1 Supporto della regola

Un oggetto $x \in U$ “supporta” la regola decisionale r se la sua descrizione verifica sia la parte condizionale della regola che quella decisionale. Se una regola è supportata solo da oggetti che appartengono all'approssimazione inferiore della corrispondente classe decisionale allora la regola si dice *certa* o *deterministica*. Se una regola è supportata solo da oggetti che appartengono all'approssimazione superiore della corrispondente classe decisionale allora la regola si dice *possibile* o *probabilistica*. Le regole approssimate sono supportate, a loro volta, solo da oggetti della frontiera della corrispondente classe decisionale. Definiamo pertanto “supporto” il numero di oggetti che verificano sia la parte condizionale che la parte decisionale della regola. Tale parametro è il più importante perché identifica gli oggetti che effettivamente spiegano la decisione che deriva dall'applicare tale regola.

E' possibile definire anche i valori di:

- *strength*: il numero di oggetti della tabella decisionale che verificano la parte condizionale delle regola;
- *relative strength*: è il numero di oggetti della tabella decisionale che verificano la parte condizionale della regola rispetto al numero di oggetti presenti nell'universo. Tale parametro è molto importante in quanto identifica la ragionevolezza della regola all'interno dell'approssimazioni delle classi decisionali.

4.8.5.2 Algoritmi di induzione delle regole

La generazione delle regole decisionali da una tabella delle decisioni è una procedura complessa e pertanto sono state proposte diversi metodi per l'estrazione di tali regole.

Gli algoritmi di induzione delle regole decisionali dalla tabella dei dati esistenti utilizzano una delle seguenti strategie [24]:

- generazione di un *insieme minimo* di regole che comprendono tutti gli oggetti della tabella di decisione, cioè ogni $x \in U$ supporta almeno una regola e non esiste un sottoinsieme di questo insieme di regole che è completo;
- generazione di un *insieme esaustivo* di regole costituito da tutte le possibili regole per una tabella di decisione;
- generazione di un insieme di regole decisionali “strong”, definito insieme di regole *soddisfacente*, che comprendono molti oggetti, ma non necessariamente tutti gli oggetti della tabella decisionale.

4.8.5.3 Principali vantaggi del Dominance Based Rough Set

L'analisi del dominance based rough set che è basata sulla relazione di dominanza migliora, in genere, i risultati dei problemi di classificazione rispetto all'approccio classico basato sull'uso della relazione di indiscernibilità.

I principali vantaggi possono sintetizzarsi come segue:

- 1) Si ottiene spesso un minor numero di ridotti ed un nucleo più grande. Queste due caratteristiche sono generalmente riconosciute come delle proprietà desiderabili di una buona approssimazione [17][25].
- 2) La qualità dell'approssimazione ottenuta usando le relazioni di dominanza può essere inferiore a quella ottenuta approssimando con relazioni d'indiscernibilità. Questo apparente inconveniente mostra, in verità, un altro notevole vantaggio dell'approccio considerato. Infatti, l'approccio del Dominance Based Rough Set mette spesso in luce delle inconsistenze nei risultati della classificazione, che non possono essere colte dall'approssimazione tramite indiscernibilità perché quest'ultima non considera la preferenza nel dominio degli attributi.
- 3) Le regole ottenute attraverso il Dominance Based Rough Set forniscono in generale una rappresentazione più sintetica della conoscenza contenuta nella tavola delle informazioni, sono pertanto in numero minore e utilizzano un minor numero di attributi e descrittori rispetto all'algoritmo di classificazione basato sulla classica analisi dei rough sets. Inoltre, l'applicazione di tali regole a nuovi oggetti da classificare fornisce in generale risultati migliori; talvolta, infatti, utilizzando l'algoritmo originario non si è in grado di classificare qualche nuovo oggetto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] B. Roy (1990) "Decision-Aid and decision making" *European Journal of Operation Research*, 45, 324-331.
- [2] J.-M. Condorcet, Marquis de (1785) "Essai sur l'application de l'analyse à la probabilité des décisions rendues à la pluralité des voix", *Imprimerie Royale*, Parigi.
- [3] R. D. Luce,(1956) "Semiorders and a Theory of Utility Discrimination", *Econometrica* 24, 178-191.
- [4] D. Bouyssou, P. Vincke (2009) "Binary relations and preference modelling", pp. 49-84, in: *Decision-making Process Concepts and Methods*, 912 pages, Wiley, 2009, Denis Bouyssou, Didier Dubois, Marc Pirlot & Henri Prade (Eds).
- [5] Ph.Vincke (1980), "Vrais, quasi, pseudo et précritères dans un ensemble fini: propriétés et algorithms", *Cahiers du Lamsade*, 27, Université Paris-Dauphine.
- [6] Ph.Vincke (1988), "(P,Q,I)-preference structures", in J. Kacprzyk e M. Roubens (eds), *Nonconventional preference relations in decision making*, Springer-Verlag, 301, 72-81.
- [7] R. L. Keeney, H. Raiffa (1976), "Decision with Multiple Objectives - Preferences and value Tradeoffs", Wiley, New York.
- [8] J. Fodor, M. Roubens (1996), "Parameterized Preference Structures and Some Geometrical Interpretation", Institut de Mathématique Université de Liège, 96.008
- [9] S. Greco, B. Matarazzo, R. Slowinski (1999), "The use of rough sets and fuzzy sets in MCDM", *Advances in Multiple Criteria Decision Making*, T.Gal, T.Stewart, T.Hanne (eds.), Kluwer Academic Publishers, Boston, pp. 14.1-14.59.
- [10] S. Greco, B. Matarazzo, R. Slowinski (2001), "Rough sets methodology for multi-criteria decision analysis", *European Journal of Operational Research*, vol. 129, pp. 1-47.
- [11] S. Greco S., Matarazzo B., Slowinski R. (2005), "Decision rule approach", *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys* J.Figueira, S.Greco and M.Ehrgott (eds.), Springer-Verlag, New York, pp. 507-562.
- [12] B. Roy (1968), "Classement et choix en presence de points de vue multiples (la method ELECTRE)" *Riro*, 8, 57-75.
- [13] B. Roy (1973), "La méthode ELECTRE II, une application au média planning", in M.Ross (ed.) *OR '72*, North-Holland, 291-302.

- [14] B. Roy (1978), "ELECTRE III: algorithme de classement basé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples", *Cahiers du CERO*, 20(1), 3-24.
- [15] E. Jacquet-Lagrèze, J. Siskos (1983) "Méthodes de décision multicritère" Ed. Hommes et Techniques.
- [16] Z. Palaw (1982), "Rough set", *International Journal of Information & Computer Science* 11.
- [17] Z. Palaw (1991), "Rough set . Theoretical aspects of reasoning about data", Kluwer, Dordrecht.
- [18] S. Greco, B. Matarazzo, R. Slowinski, (1998), "A new rough set approach to evaluation of bankruptcy risk". In: Zopounidis, C. (Ed.), *Operational Tools in the Management of Financial Risks*. Kluwer, Dordrecht, pp. 121±136.
- [19] S. Greco, B. Matarazzo, R. Slowinski, (1998), "A new rough set approach to multicriteria and multiattribute classification". In: Polkowski, L., Skowron, A. (Eds.), *Rough sets and Current Trends in Computing*, RSTCTC'98, Springer, pp. 60±67.
- [20] S. Greco, B. Matarazzo, R. Slowinski, (1999), "Multicriteria classification by dominance-based rough set approach", Chapter C5.1.9. In: Kloesgen, W., Zytkow, J. (Eds.), *Handbook of Data Mining and Knowledge Discovery*, Oxford University Press, New York.
- [21] S. Greco, B. Matarazzo, R. Slowinski, (1999), "Dominance-based rough set approach to rating analysis". *Fuzzy Economic Review*.
- [22] S. Greco, B. Matarazzo, R. Slowinski, (1998), "A new rough set approach to multicriteria and multiattribute classification". In: Polkowski, L., Skowron, A. (Eds.), *Rough sets and Current Trends in Computing*, RSTCTC'98, Springer, pp. 60±67.
- [23] S. Greco, B. Matarazzo, R. Slowinski (1999), "On joint use of indiscernibility, similarity and dominance in rough approximation of decision classes". In: Despotis, D.K., Zopounidis, C. (Eds.), *Proceedings of the Fifth International Conference of the Decision Sciences Institute*. Athens, pp. 1380±1382.
- [24] J. Stefanowski (1998), "On rough set based approaches to induction of decision rules." In: Skowron, A. Polkowski L. (eds): *Rough Sets in Data Mining and Knowledge Discovery*, Physica-Verlag, Heidelberg 1998, 500-529.

[25] R. Slowinski, J. Stefanowski (1992), "RoughDAS and RoughClass software implementations of the rough set approach", in R. Slowinski (ed.), Intelligent decision support, Handbook of application and advances of the rough set theory, Kluwer, Dordrecht, pp. 445-456.

CAPITOLO 5

SVILUPPO DI UN SISTEMA DI SUPPORTO ALLE DECISIONI PER LA GESTIONE DELLA MANUTENZIONE DEI PONTI

5.1 INTRODUZIONE

Nel capitolo uno sono state esaminate le principali problematiche connesse alla manutenzione dei ponti in Italia, problematiche queste di non facile soluzione. Ogni qualvolta si vuole predisporre un sistema di gestione bisogna considerare che i ponti presenti su una rete sono, in generale, una collezione di oggetti distinti, spesso diversi fra loro, ciascuno con le proprie caratteristiche. Tali caratteristiche non si riferiscono alla sola geometria del ponte o al solo stato di conservazione ma devono tener conto anche delle caratteristiche della rete, in termini di traffico, importanza della strada, presenza di percorsi alternativi, e da aspetti legati alla orografia e alla geologia del sito.

Questa diversità pone dei problemi oggettivi relativi alla gestione: difficoltà nel disporre un protocollo comune relativo alle ispezioni; difficoltà nella formulare delle leggi che permettano di stabilire un indicatore relativo alla valutazione delle condizioni. Ne consegue che il processo di scelta della strategia manutentiva dovrà tener conto di diversi parametri.

Le strategie di manutenzione per essere efficaci dovranno prevedere:

- la definizione di protocolli di ispezione supportati da schede di rilievo orientate alla definizione del processo decisionale;
- l'applicazione di un modello di analisi in grado di processare i dati sensibili;
- l'elaborazione di un processo decisionale in modo tale da ottenere le migliori strategie di intervento a costi minimi.

Nel seguito del capitolo viene proposto un nuovo sistema di supporto alle decisioni, basato sulla teoria del dominance based rough set (DRSA). Tale sistema a partire dalla dall'acquisizione dei dati mediante ispezioni visive, e attraverso la definizione dei parametri che guidano il processo decisionale, permette di individuare una scala di priorità delle attività manutentive dei ponti esaminati. La fase di acquisizione dei dati avviene

tramite l'utilizzo di schede di rilievo appositamente messe a punto nell'ambito del presente lavoro.

A seguito di tale classificazione, vengono stimati i costi relativi agli interventi manutentivi sui ponti maggiormente deteriorati e successivamente viene applicata una procedura di ottimizzazione interattiva multi-obiettivo che sfrutta la teoria del dominance based rough set (IMO-DRSA).

5.2 IL SISTEMA DI SUPPORTO DECISIONALE PROPOSTO

Come già descritto in precedenza, i processi di gestione si possono basare su due possibili approcci, tra loro alternativi oppure applicati in logica successione:

- *Project Level Bridge Management*, che si occupa della gestione della manutenzione di ogni singolo ponte, considerato come isolato dalla rete stradale a cui appartiene. In questo caso il processo decisionale si baserà principalmente sugli aspetti funzionali e di sicurezza del ponte;

- *Network Level Bridge Management*, in cui viene considerata la funzione dell'opera all'interno della rete stradale. In questo caso il processo decisionale si basa anche su considerazioni politiche e socio-economiche. Nel caso in cui l'ente gestore abbia a disposizione un budget che non consente di poter effettuare tutti gli interventi manutentivi necessari, è necessario mettere a punto un piano di interventi che massimizzi i vantaggi, in termini di aumento della vita utile della rete o in termini di qualità del servizio.

Il sistema di gestione proposto si basa sulla:

- individuazione delle principali tipologie di ponti nelle reti viarie italiane e approfondimento delle cause di degrado e vulnerabilità;
- definizione di schede di primo livello orientate alla definizione del processo decisionale e relative istruzioni di compilazione;
- calibrazione dei dati contenuti nelle schede in relazione all'analisi multicriteriale proposta;
- individuazione dei criteri e dei casi esemplari necessari per istruire il processo decisionale in accordo all'analisi multicriteriale utilizzata;
- individuazione delle regole che guidano il processo decisionale e delle corrispondenti azioni proposte;

- stima dei costi associati agli interventi relativi ai ponti più degradati;
- applicazione dell'algoritmo di ottimizzazione al fine di massimizzare l'efficacia degli interventi sia da un punto di vista economico che infrastrutturale.

La procedura proposta è stata applicata a un set di casi di studio al fine di testarne l'applicabilità. I risultati sono esposti nel capitolo successivo.

Il sistema di supporto si basa sulle seguenti fasi principali:

- ✓ FASE 1: Esame preliminare della struttura al fine di acquisire le informazioni necessarie al censimento dei ponti sulla rete e acquisizione dei dati relativi allo stato di conservazione delle opere;
- ✓ FASE 2: Classificazione dei ponti presenti sulla rete gestita al fine di individuare il grado di urgenza delle attività manutentive anche sulla base di una scala di priorità;
- ✓ FASE 3: Definizione della migliore strategia di intervento per l'ottimizzazione degli interventi.

La fase 1 è la fase attraverso cui acquisiamo le informazioni necessarie per la risoluzione del problema decisionale che viene caratterizzato poi nelle fasi 2 e 3.

In figura 1 è riportato uno schema del sistema di supporto alle decisioni proposto.



Figura 1 Schema del sistema di supporto proposto

5.3 ACQUISIZIONE DEI DATI: PROPOSTA DI UNA NUOVA SCHEDE PER IL RILIEVO DEL DEGRADO

Molto spesso gli enti gestori non possiedono una banca dati relativa alle opere che hanno in gestione. Quindi nella prima fase bisognerebbe costituire una banca dati che contenga tutte le informazioni riguardanti le opere gestite: ubicazione dei ponti, tipologia dei ponti, dati di traffico, dati geomorfologici, stato di degrado, interventi manutentivi eseguiti, ecc.

Tali dati, almeno in una fase iniziale, dovrebbero essere acquisiti tramite:

- progetti cartacei;
- file;
- rilievi su campo.

In una fase successiva si dovrà prevedere un sistema di sorveglianza periodico sulle strutture al fine di valutarne lo stato di degrado.

L'acquisizione dei dati relativi allo stato di degrado in taluni casi può presupporre due livelli:

- I livello: è costituito dalle ispezioni visive che sono orientate al rilievo dei difetti maggiormente evidenti sulla struttura.

- II livello: è costituito dalle indagini strumentali (prove di laboratorio, prove in situ,..) che sono orientate alla valutazione dell'effettivo stato di degrado. Questo secondo livello in genere riguarda i ponti che sono stati segnalati a seguito delle ispezioni visive perché presentano un cattivo stato di conservazione.

Le ispezioni visive costituiscono una delle fasi più importanti del sistema di gestione, queste, solitamente, vengono condotte attraverso la compilazione su campo di schede opportunamente predisposte che permettono di identificare e classificare le diverse tipologie di degrado e gli elementi interessati dal degrado. Le schede presenti nella letteratura tecnica sono spesso caratterizzate da un notevole dettaglio di informazioni e non sempre l'operatore addetto al rilievo è formato e specializzato per la compilazione delle stesse. Inoltre, in molti casi le informazioni acquisite sono semplicemente orientate alla definizione di un database piuttosto che alla definizione di un processo decisionale. Durante l'ispezione è importante individuare le tipologie di degrado presenti sui diversi elementi

strutturali e la relativa estensione, senza che vengano determinate le cause o la pericolosità del difetto.

Quindi le schede per il rilievo su campo devono essere:

- ❖ Semplici
- ❖ Facilmente comprensibili all'operatore
- ❖ Fornire l'oggettività della descrizione

pertanto le informazioni contenute devono essere:

- ❖ Poche
- ❖ Chiare
- ❖ Essenziali
- ❖ Orientate al processo decisionale

Nella presente tesi sono state definite delle nuove schede di I livello per il rilievo del degrado che, a differenza di quelle presenti in letteratura, sono suddivise in base alle diverse tipologie di ponti (ponti ad arco in muratura (fig. 2), ponti ad arco a via inferiore (fig. 3), ponti a travata in calcestruzzo armato o in c.a.p. (fig.4)). In ogni scheda le informazioni presenti sono specializzate per la tipologia di ponte specificata; quindi al loro interno presenteranno informazioni distinte sugli elementi strutturali e non strutturali che caratterizzano quella specifica tipologia. Per ogni componente strutturale è stata redatta una lista dei difetti maggiormente riscontrabili in base al tipo di materiale di cui sono costituiti.

SCHEDA DI 1° LIVELLO PER IL RILEVAMENTO DEL DEGRADO PER I PONTI AD ARCO IN MURATURA

Sezione 1	IDENTIFICAZIONE PONTE Nome ponte: _____ Provincia: _____ Comune: _____ Operatore: _____ Data del rilievo: _____	
	LOCALIZZAZIONE Coordinate piane UTM: est _____m nord _____m Altitudine: _____m	TIPOLOGIA STRADA Strada: statale <input type="checkbox"/> regionale <input type="checkbox"/> provinciale <input type="checkbox"/> comunale <input type="checkbox"/> Numero strada: _____ Classificazione: autostrada <input type="checkbox"/> extraurb. principale <input type="checkbox"/> extraurb. secondaria <input type="checkbox"/> Progressiva: dal km _____ al km _____
Sezione 2	DATI GEOMORFOLOGICI Morfologia del sito: pianeggiante <input type="checkbox"/> ondulato <input type="checkbox"/> Posizione del ponte rispetto al pendio: ortogonale <input type="checkbox"/> parallelo <input type="checkbox"/> Falde: assenti <input type="checkbox"/> presenti <input type="checkbox"/> non determinabili <input type="checkbox"/> Fenomeni franosi: assenti <input type="checkbox"/> presenti <input type="checkbox"/> non determinabili <input type="checkbox"/>	
	TERRENO FONDAZIONE Tipologia: ammassi rocciosi <input type="checkbox"/> terreno granulare <input type="checkbox"/> terreno limoso o argilloso <input type="checkbox"/>	

Figura 2 Sezione 1 e 2 della scheda di I livello per il rilievo del degrado per i ponti ad arco in muratura

SCHEDA DI 1° LIVELLO PER IL RILEVAMENTO DEL DEGRADO PER I PONTI AD ARCO A VIA INFERIORE IN CALCESTRUZZO

Sezione 1	IDENTIFICAZIONE PONTE Nome ponte: _____ Provincia: _____ Comune: _____ Operatore: _____ Data del rilievo: _____	
	LOCALIZZAZIONE Coordinate piane UTM: est: _____m nord: _____m Altitudine: _____m	TIPOLOGIA STRADA Strada: statale <input type="checkbox"/> regionale <input type="checkbox"/> provinciale <input type="checkbox"/> comunale <input type="checkbox"/> Numero strada: _____ Classificazione: autostrada <input type="checkbox"/> extraurb. principale <input type="checkbox"/> extraurb. secondaria <input type="checkbox"/> Progressiva: dal km _____ al km _____
Sezione 2	DATI GEOMORFOLOGICI Morfologia del sito: pianeggiante <input type="checkbox"/> ondulato <input type="checkbox"/> Posizione del ponte rispetto al pendio: ortogonale <input type="checkbox"/> parallelo <input type="checkbox"/> Falde: assenti <input type="checkbox"/> presenti <input type="checkbox"/> non determinabili <input type="checkbox"/> Fenomeni franosi: assenti <input type="checkbox"/> presenti <input type="checkbox"/> non determinabili <input type="checkbox"/>	
	TERRENO FONDAZIONE Tipologia: ammassi rocciosi <input type="checkbox"/> terreno granulare <input type="checkbox"/> terreno limoso o argilloso <input type="checkbox"/>	

Figura 3 Sezione 1 e 2 della scheda di I livello per il rilievo del degrado per i ponti ad arco a via inferiore in calcestruzzo

SCHEDA DI 1° LIVELLO PER IL RILEVAMENTO DEL DEGRADO PER I PONTI A TRAVATA IN CALCESTRUZZO ARMATO O IN C. A. P.

Sezione 1	IDENTIFICAZIONE PONTE Nome ponte: _____ Provincia: _____ Comune: _____ Operatore: _____ Data del rilievo: _____	
	LOCALIZZAZIONE Coordinate piane UTM: est _____m nord _____m Altitudine: _____m	
Sezione 2	DATI GEOMORFOLOGICI Morfologia del sito: pianeggiante <input type="checkbox"/> ondulato <input type="checkbox"/> Posizione del ponte rispetto al pendio: ortogonale <input type="checkbox"/> parallelo <input type="checkbox"/> Falde: assenti <input type="checkbox"/> presenti <input type="checkbox"/> non determinabili <input type="checkbox"/> Fenomeni franosi: assenti <input type="checkbox"/> presenti <input type="checkbox"/> non determinabili <input type="checkbox"/>	
	TERRENO FONDAZIONE Tipologia: ammassi rocciosi <input type="checkbox"/> terreno granulare <input type="checkbox"/> terreno limoso o argilloso <input type="checkbox"/>	

Figura 4 Sezione 1 e 2 della scheda di I livello per il rilievo del degrado per i ponti a travata in calcestruzzo armato

Le informazioni così organizzate permettono all'operatore una più facile comprensione delle schede e conseguentemente una più facile compilazione delle stesse; tutto ciò al fine di ottenere una descrizione quanto più oggettiva possibile.

Ogni scheda contiene sei sezioni:

- Sezione 1: dati identificativi dell'opera, localizzazione, tipologia di strada;
- Sezione 2: dati geomorfologici, terreno di fondazione;
- Sezione 3: dati relativi agli impalcati, agli archi, alle pile, alle spalle;
- Sezione 4: rappresentazione semplificata del ponte, accessibilità, foto;
- Sezione 5: rilievo del danno agli elementi strutturali;
- Sezione 6: rilievo del danno ad elementi non strutturali.

e le istruzioni relative alla compilazione

Nel seguito viene fornita una descrizione dettagliata delle diverse sezioni che compongono ciascuna delle schede. A titolo esemplificativo vengono riportate le immagini relative alla scheda dei ponti ad arco in muratura, mentre per tutte le altre schede e le relative istruzioni di compilazione si rimanda al documento allegato.

Le sezioni delle schede sono così organizzate:

- ✓ Sezione 1: contiene i dati relativi all'inquadramento dell'opera nel territorio: comune e provincia di appartenenza e coordinate geografiche. Inoltre la sezione contiene i dati relativi alla rete viaria a cui appartiene il ponte rilevato. Tale sezione fornisce i dati necessari a determinare la pericolosità sismica l'importanza dell'opera da un punto di vista infrastrutturale (fig.5).
- ✓ Sezione 2: contiene i dati relativi alla tipologia e morfologia del terreno, presenza di falde acquifere, presenza di fenomeno franosi in atto. Tali dati sono essenziali per determinare il rischio idro-geologico che caratterizza il sito di costruzione (fig.5).
- ✓ Sezione 3: contiene una descrizione geometrica dell'opera, suddivisa nei componenti principali. Naturalmente questa sezione sarà differente per ciascuna tipologia (ad esempio per i ponti ad arco contiene le sottosezioni di impalcati, archi, pile, spalle) (fig.6).

- ✓ Sezione 4: contiene i dati relativi all'accessibilità dell'opera, i riferimenti della documentazione fotografica disponibile e una parte dedicata alle rappresentazioni schematiche eseguite dall'operatore durante la visita (fig.7).
- ✓ Le sezioni 5 e 6 (figg. 8 -11) sono dedicate al rilievo del degrado; per ciascun componente strutturale (sezione 5) e non strutturale (sezione 6), sono riportate le tipologie di degrado più frequenti relative al materiale che caratterizza l'elemento. L'operatore dovrà esprimersi sulla presenza o meno di ciascuna tipologia di difetto indicandone la relativa estensione, in termini di percentuale di superficie interessata. Sono state previste tre classi di estensione: bassa (<10%), media (tra 10% e 60%), e alta (>60%).

SCHEDA DI 1° LIVELLO PER IL RILEVAMENTO DEL DEGRADO PER I PONTI AD ARCO IN MURATURA

Sezione 1	IDENTIFICAZIONE PONTE Nome ponte: _____ Provincia: _____ Comune: _____ Operatore: _____ Data del rilievo: _____	
	LOCALIZZAZIONE Coordinate piane UTM: est _____m nord _____m Altitudine: _____m	
Sezione 2	DATI GEOMORFOLOGICI Morfologia del sito: pianeggiante <input type="checkbox"/> ondulato <input type="checkbox"/> Posizione del ponte rispetto al pendio: ortogonale <input type="checkbox"/> parallelo <input type="checkbox"/> Falde: assenti <input type="checkbox"/> presenti <input type="checkbox"/> non determinabili <input type="checkbox"/> Fenomeni franosi: assenti <input type="checkbox"/> presenti <input type="checkbox"/> non determinabili <input type="checkbox"/>	
	TERRENO FONDAZIONE Tipologia: ammassi rocciosi <input type="checkbox"/> terreno granulare <input type="checkbox"/> terreno limoso o argilloso <input type="checkbox"/>	

Figura 5 Sezione 1 e 2 “Scheda di I livello per il rilievo del degrado per i ponti ad arco in muratura”

Sezione 4	RAPPRESENTAZIONE SEMPLIFICATA DEL PONTE (SCHIZZO)
	ACCESSIBILITA'
	totalmente accessibile <input type="checkbox"/> parzialmente accessibile <input type="checkbox"/> inaccessibile <input type="checkbox"/>
	FOTO
	Numero di foto <input type="text" value=""/> <input type="text" value=""/> <input type="text" value=""/>
	Nome file allegati _____

Figura 7 Sezione 4 “Scheda di I livello per il rilievo del degrado per i ponti ad arco in muratura”

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
Sezione 5.1	ARCO	Estensione			NOTE
		<10%	10% - 60%	> 60%	
calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo				
	Calcestruzzo ammalorato				
	Distacco copriferro				
	Armature ossidate				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				
	muratura	Muratura ammalorata			
Efflorescenze					
Distacco dell'arco					
Fessure orizzontali					
Fessure verticali					
Fessure trasversali					
Polverizzazione giunti malta					
Vegetazione intrusiva					

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
Sezione 5.2	TIMPANO	Estensione			NOTE
		<10%	10% - 60%	> 60%	
calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo				
	Calcestruzzo ammalorato				
	Distacco copriferro				
	Armature ossidate				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				
	muratura	Muratura ammalorata			
Efflorescenze					
Distacco dell'arco					
Fessure orizzontali					
Fessure verticali					
Fessure trasversali					
Polverizzazione giunti malta					
Vegetazione intrusiva					

Figura 8 Sezione 5 “Scheda di I livello per il rilievo del degrado per i ponti ad arco in muratura”

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI						
Sezione 5.3	SPALLA	Estensione			NOTE	
		<10%	10% - 60%	> 60%		
calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo					
	Calcestruzzo ammalorato					
	Distacco copriferro					
	Armature ossidate					
	Fessure orizzontali					
	Fessure verticali					
	Fessure diagonali					
	Danni da urto					
	Vegetazione intrusiva					
	Scalzamento					
	Fuori piombo					
	muratura	Muratura ammalorata				
		Efflorescenze				
		Distacco dell'arco				
Fessure orizzontali						
Fessure verticali						
Fessure trasversali						
Polverizzazione giunti malta						
Vegetazione intrusiva						
Scalzamento						
Fuori piombo						

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI						
Sezione 5.3	SPALLA	Estensione			NOTE	
		<10%	10% - 60%	> 60%		
calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo					
	Calcestruzzo ammalorato					
	Distacco copriferro					
	Armature ossidate					
	Fessure orizzontali					
	Fessure verticali					
	Fessure diagonali					
	Danni da urto					
	Vegetazione intrusiva					
	Scalzamento					
	Fuori piombo					
	muratura	Muratura ammalorata				
		Efflorescenze				
		Distacco dell'arco				
Fessure orizzontali						
Fessure verticali						
Fessure trasversali						
Polverizzazione giunti malta						
Vegetazione intrusiva						
Scalzamento						
Fuori piombo						

Figura 9 Segue Sezione 5 “Scheda di I livello per il rilievo del degrado per i ponti ad arco in muratura

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
PILA	Estensione			NOTE	
	<10%	10% - 60%	> 60%		
calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo				
	Calcestruzzo ammalorato				
	Distacco copriferro				
	Armature ossidate				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				
	Scalzamento				
	Fuori piombo				
	muratura	Muratura ammalorata			
		Efflorescenze			
Distacco dell'arco					
Fessure orizzontali					
Fessure verticali					
Fessure trasversali					
Polverizzazione giunti malta					
Vegetazione intrusiva					
Scalzamento					
Fuori piombo					

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
PILA	Estensione			NOTE	
	<10%	10% - 60%	> 60%		
calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo				
	Calcestruzzo ammalorato				
	Distacco copriferro				
	Armature ossidate				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				
	Scalzamento				
	Fuori piombo				
	muratura	Muratura ammalorata			
		Efflorescenze			
Distacco dell'arco					
Fessure orizzontali					
Fessure verticali					
Fessure trasversali					
Polverizzazione giunti malta					
Vegetazione intrusiva					
Scalzamento					
Fuori piombo					

Figura 10 Segue Sezione 5 “Scheda di I livello per il rilievo del degrado per i ponti ad arco in muratura

Sezione 6	DANNI AD ELEMENTI NON STRUTTURALI	Estensione			NOTE
		<10%	10% - 60%	> 60%	
	Pavimentazione danneggiata				
	Giunti degradati				
	Parapetti danneggiati o assenti				
	Guardrail danneggiati o assenti				
	Cordoli degradati				
	Scarichi ostruiti o danneggiati				
	Pali illuminazione danneggiati				

Figura 11 Sezione 6 “Scheda di I livello per il rilievo del degrado per i ponti ad arco in muratura”

Le schede sono state dotate di relative istruzioni (figg. 12-16) che ne facilitano la compilazione, anche da parte di personale non esperto.

NOTE ESPLICATIVE SULLA COMPILAZIONE DELLA SCHEDA

<p>Sezione 1 – Nella prima sezione devono essere riportate le informazioni relative all'identificazione del ponte, alla sua localizzazione e alla caratterizzazione della strada all'interno della rete viaria.</p>
<p>➤ Identificazione ponte</p>
<p>Nome ponte: si deve specificare il nome dell'opera Provincia: si deve specificare la provincia di appartenenza dell'opera. Comune: si deve specificare il comune di appartenenza dell'opera.</p>
<p>➤ Localizzazione</p>
<p>Coordinate piane UTM (WGS84): si devono specificare le coordinate est e nord utilizzando come sistema piano la <i>proiezione universale trasversa di Mercatore</i> (UTM) con riferimento al WGS84. Altitudine: si deve specificare la distanza verticale dell'opera rispetto al livello del mare.</p>
<p>➤ Tipologia strada</p>
<p>Strada: bisogna indicare il carattere amministrativo della strada, specificando fra: <i>statale:</i> è un'arteria di importanza nazionale gestita dall'amministrazione dello stato; <i>regionale:</i> è una strada di discreta importanza la cui proprietà è inclusa nel demanio delle regioni; <i>provinciale:</i> è una strada di secondaria importanza di proprietà del demanio provinciale e in gestione alla stessa; <i>comunale:</i> è una strada che congiunge il capoluogo del comune con le proprie frazioni di proprietà del demanio comunale e in gestione alla stessa. Numero strada: bisogna indicare la nomenclatura della strada (ad es. SS 113). Classificazione: bisogna indicare le caratteristiche tecniche, costruttive e funzionali, specificando fra: <i>autostrada:</i> strada extraurbana o urbana a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico invalicabile, ciascuna con almeno due corsie di marcia, eventuale banchina pavimentata a sinistra e corsia di emergenza o banchina pavimentata a destra, priva di intersezioni a raso e di accessi privati, dotata di recinzione e di sistemi di assistenza all'utente lungo l'intero tracciato, riservata alla circolazione di talune categorie di veicoli a motore e contraddistinta da appositi segnali di inizio e fine; <i>extraurbana principale:</i> strada a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico invalicabile, ciascuna con almeno due corsie di marcia e banchina pavimentata a destra, priva di intersezioni a raso, con accessi alle proprietà laterali coordinati, contraddistinta dagli appositi segnali di inizio e fine, riservata alla circolazione di talune categorie di veicoli a motore; per eventuali altre categorie di utenti devono essere previsti opportuni spazi; <i>extraurbana secondaria:</i> strada ad unica carreggiata con almeno una corsia per senso di marcia e banchine. Progressiva: si deve specificare la progressiva chilometrica di inizio e fine opera, calcolata in riferimento alla posizione dell'opera lungo la rete viaria.</p>
<p>Sezione 2 – In questa sezione sono presenti i dati relativi alla caratterizzazione del sito riguardanti le condizioni del terreno nel quale è stata realizzata l'opera.</p>
<p>➤ Dati geomorfologici</p>
<p>Morfologia del sito: bisogna indicare l'andamento del sito sul quale insiste l'opera. In particolare bisognerà specificare se al di sotto delle pile il sito è: <i>pianeggiante:</i> se il sito è privo di dislivelli o presenta dei leggeri rilievi e/o depressioni; <i>ondulato:</i> se il sito presenta notevoli rilievi e/o depressioni. Posizione del ponte rispetto al pendio: bisogna scegliere fra: <i>ortogonale:</i> se il ponte si sviluppa ortogonalmente al pendio; <i>parallelo:</i> se il ponte si sviluppa parallelamente al pendio. Falde: bisogna indicare se sono presenti delle falde acquifere, specificando tra: <i>assenti:</i> se si è certi che non ci sono falde presenti in prossimità dell'opera d'arte; <i>presenti:</i> se si è certi della presenza di falde in prossimità dell'opera d'arte; <i>non determinabili:</i> se non si dispone di informazioni relative alle falde acquifere. Fenomeni franosi: bisogna indicare se sono presenti fenomeni di movimento o caduta di materiale roccioso o sciolto a causa dell'instabilità del suolo o del sottosuolo che interessano i pendii che si trovano in prossimità dell'opera, specificando fra: <i>assenti:</i> se si è certi che non si sono verificati fenomeni di instabilità; <i>presenti:</i> se si è certi della presenza di fenomeni di instabilità; <i>non determinabili:</i> se non si dispone di informazioni relativi a tali fenomeni.</p>
<p>➤ Terreno fondazione</p>
<p>Tipologia: bisognerà indicare la classificazione del terreno scegliendo fra: <i>ammassi rocciosi:</i> nel caso di presenza di rocce; <i>terreno granulare:</i> nel caso di ghiaia e sabbia limosa o argillosa, con permeabilità media; <i>terreno limoso o argilloso:</i> nel caso di limi e argille, con permeabilità scarsa o nulla.</p>

Figura 12 Note esplicative “Scheda di I livello per il rilievo del degrado per i ponti ad arco in muratura”

Sezione 3 – In questa sezione vengono riportate le informazioni relative a tutte le componenti strutturali del ponte.	
> Descrizione	
<p>Tipo: si deve specificare il tipo di opera a seconda dell'ostacolo che viene superato distinguendo fra: <i>cavalavia:</i> quando consente l'attraversamento di un'altra via di comunicazione; <i>ponte:</i> quando consente l'attraversamento di un corso d'acqua; <i>viadotto:</i> quando consente l'attraversamento di una vallata. Nel caso in cui l'opera non è compresa fra quelle presenti bisognerà compilare il campo "altro" specificando il tipo. Anno di costruzione: si deve specificare l'anno di ultimazione dei lavori, specificando inoltre se è la data indicata è <i>certa</i> o <i>presunta</i>. Lunghezza: si deve specificare l'estensione dell'opera conteggiata fra i giunti di spalla. Larghezza: si deve specificare l'estensione dell'opera in direzione trasversale compresa degli eventuali sbalzi, da rilevare in mezzzeria perpendicolarmente all'asse longitudinale dell'impalcato. Numero di campate: si deve specificare il numero totale delle campate che compongono l'opera. Andamento: si deve specificare quale è lo sviluppo dell'opera specificando fra: <i>rettilineo:</i> se l'andamento è prevalentemente dritto; <i>curvilineo:</i> se l'andamento è prevalentemente in curva.</p>	
> Archi	
<p>Tipologia: la tipologia viene distinta in funzione del rapporto freccia/luce in: <i>arco a tutto sesto:</i> è un arco semicircolare in cui il rapporto freccia/luce varia tra 0,4 e 0,5; <i>arco ribassato:</i> è un arco circolare o policentrico o semiellittico in cui il rapporto freccia/luce varia tra 0,11 e 0,4; <i>arco acuto:</i> è un arco in cui gli archi di circonferenza non sono raccordati ed il rapporto freccia/luce è superiore a 0,5. Materiale: si deve specificare il tipo di materiale con cui sono stati realizzati i tiranti, nel caso in cui non è compreso fra quelli presenti bisognerà compilare il campo "altro" specificando il tipo. Freccia: è la massima distanza verticale fra la sommità dell'intradosso e la linea di imposta dell'arco. Luce: è la distanza orizzontale tra i due sostegni (spalle o pile) misurata sulla linea di imposta dell'arco.</p>	
> Spalle	
<p>Tipologia: bisogna specificare fra: <i>a gravità:</i> generalmente costruiti in muratura di mattoni, di pietra cementata o a secco, oppure in semplice calcestruzzo; sono così denominati perché le condizioni di resistenza e stabilità dipendono principalmente dal peso proprio. <i>a sbalzo:</i> generalmente costruiti in calcestruzzo armato; sono così denominati perché, essendo formati da pareti in calcestruzzo armato incastrate ad una suola di base, queste si comportano come travi a mensola verticali caricate dalla spinta delle terre, ossia come vere e proprie travi a sbalzo. Nel caso in cui non è compreso fra quelli presenti bisognerà compilare il campo "altro" specificando il tipo. Materiale: si deve specificare il tipo di materiale con cui è stato realizzato l'impalcato, nel caso in cui non è compreso fra quelli presenti bisognerà compilare il campo "altro" specificando il tipo. Altezza massima spalle: bisogna indicare l'altezza massima delle spalle. Numero apparecchi d'appoggio: bisogna indicare il numero totale di apparecchi d'appoggio distribuiti in direzione trasversale presenti nelle spalle.</p>	
> Pile	
<p>Tipologia: bisogna specificare fra: <i>singola:</i> nel caso in cui la pila è costituita da un unico elemento (pilastro o setto); <i>telaiolo:</i> nel caso in cui la pila è costituita da uno o più pilastri allineati secondo l'asse maggiore della pila e collegati tra loro in sommità dal pulvino ed eventualmente a quote intermedie da traversi. Materiale: si deve specificare il tipo di materiale con cui è stato realizzato l'impalcato, nel caso in cui non è compreso fra quelli presenti bisognerà compilare il campo "altro" specificando il tipo. Numero pile: si deve specificare il numero delle pile presenti nel ponte. Altezza massima pila: bisogna indicare l'altezza della pila più alta. Numero apparecchi d'appoggio: bisogna indicare il numero totale di apparecchi d'appoggio distribuiti in direzione trasversale presenti nelle pile.</p>	
Sezione 4 – In questa sezione vengono riportate le informazioni relative a tutte le componenti strutturali del ponte.	
> Rappresentazione semplificata del ponte	
<p>In questa pagina bisognerà schematizzare in maniera semplificata l'opera d'arte, individuandone le parti fondamentali che la compongono (pile, spalle, impalcato,...) e le eventuali peculiarità.</p>	
> Accessibilità	
<p>In questa finestra bisognerà indicare l'accessibilità e quindi l'ispezionabilità del ponte distinguendo fra: <i>totalmente accessibile:</i> se il ponte è ispezionabile in tutte le sue parti, <i>parzialmente accessibile:</i> se il ponte è ispezionabile solo in parte, <i>inaccessibile:</i> se il ponte non è ispezionabile.</p>	
> Foto	
<p>Numero di foto: bisognerà indicare il numero di foto del ponte che sono state realizzate. Si specifica inoltre che il loro numero non deve essere inferiore a sei. Nome file allegati: bisognerà specificare il nome del file che contiene le foto.</p>	

Figura 13 Segue Note esplicative “Scheda di I livello per il rilievo del degrado per i ponti ad arco in muratura”

Particolarmente significativa è la parte delle schede di istruzione che riguarda il rilievo del degrado (figg.14-16). Queste contengono una descrizione e foto per ciascuna tipologia di degrado. In questo modo l'operatore deve semplicemente confrontare la situazione reale con quanto trova riportato nella scheda esplicativa.








Sezione 5 – In questa sezione bisognerà indicare i danni presenti negli elementi strutturali del ponte, specificandone in particolare la tipologia, l'estensione e la gravità in base al tipo di materiale.			
CALCESTRUZZO			
	Dilavamento calcestruzzo: E' un difetto che si manifesta attraverso aree di colorazione diversa dal materiale integro causate dalla percolazione e penetrazione delle acque meteoriche		Calcestruzzo ammalorato: E' riferita a quelle parti di calcestruzzo che si presentano danneggiate rispetto alle condizioni originarie.
	Distacco del copri ferro: E' un difetto che si manifesta inizialmente con lesioni parallele agli spigoli o in corrispondenza dei ferri d'armatura. Successivamente si determina il distacco parziale o totale del copri ferro con messa a nudo dell'armatura.		Armatura ossidata: L'ossidazione dell'armatura avviene a seguito del contatto del ferro con l'aria nel caso di calcestruzzi porosi o mal confezionati in ambienti aggressivi
	Fessure orizzontali: E' riferito a lesioni sul calcestruzzo il cui andamento è prevalentemente orizzontale.		Fessure verticali: E' riferito a lesioni sul calcestruzzo il cui andamento è prevalentemente verticale.
	Fessure diagonali: E' riferito a lesioni sul calcestruzzo il cui andamento è prevalentemente obliquo.		Vegetazione intrusiva: E' riferita alla presenza di piante, muschi e licheni sulle parti del manufatto.
	Scalzamento: Abbassamento del fondo dell'alveo che, in periodo di magra, evidenzia la copertura in certe parti fin sotto la base delle fondazioni dirette e le palificate delle fondazioni indirette.		Fuori piombo: Riguarda gli elementi strutturali in elevazione quali pile e spalle, qualunque sia il materiale costituente. Si presenta come la mancanza di verticalità, generalmente per tutta l'altezza.
Altro			

Figura 14 Segue Note esplicative “Scheda di I livello per il rilievo del degrado per i ponti ad arco in muratura”





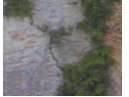



MURATURA			
	<p>Muratura ammalorata: E' riferita a quelle parti di muratura che si presentano danneggiate rispetto alle condizioni originarie.</p>		<p>Efflorescenze: Formazione di sostanze, generalmente di colore biancastro e di aspetto cristallino o pulverulento o filamentoso, sulla superficie del manufatto.</p>
	<p>Distacco dell'arco: Il distacco consiste nel distacco tra i muri andatori e l'arco</p>		<p>Fessure orizzontali: E' riferito a lesioni sulla muratura il cui andamento è prevalentemente orizzontale. Generalmente si manifestano lungo i corsi di malta.</p>
	<p>Fessure verticali: E' riferito a lesioni sulla muratura il cui andamento è prevalentemente verticale. Possono interessare i soli giunti di malta tra i mattoni o i blocchi di pietra oppure andamento continuo che taglia gli elementi della muratura.</p>		<p>Fessure diagonali: E' riferito a lesioni sul calcestruzzo il cui andamento è prevalentemente obliquo. Possono seguire a zig zag i letti di malta oppure avere un andamento continuo che taglia gli elementi della muratura.</p>
	<p>Polverizzazione: Decoesione che si manifesta con la caduta spontanea del materiale sotto forma di polvere o granuli. Può portare alla completa distruzione e polverizzazione dei corsi di malta o dei materiali lapidei costituenti la muratura stessa.</p>		<p>Vegetazione intrusiva: E' riferita alla presenza di piante, muschi e licheni sulle parti del manufatto.</p>
	<p>Scalzamento: Abbassamento del fondo dell'alveo che, in periodo di magra, evidenzia la scopertura in certe parti fin sotto la base delle fondazioni dirette e le palificate delle fondazioni indirette.</p>		<p>Fuori piombo: Riguarda gli elementi strutturali in elevazione quali pile e spalle, qualunque sia il materiale costituente. Si presenta come la mancanza di verticalità, generalmente per tutta l'altezza.</p>
Altro			

Figura 15 Segue Note esplicative “Scheda di I livello per il rilievo del degrado per i ponti ad arco in muratura”

Sezione 6 – In questa sezione bisognerà indicare i danni presenti negli elementi non strutturali del ponte, specificandone in particolare la gravità.	
	<p>Pavimentazione danneggiata: Si tratta di tutte quelle fessurazioni nella pavimentazione, presenti soprattutto in corrispondenza degli elementi di continuità (giunti sottopavimentazione), riconducibili spesso a normale ritiro del materiale costituente la pavimentazione.</p>
	<p>Giunti ammalorati Si tratta di avvallamenti o lesioni riscontrabili in corrispondenza dei giunti</p>
	<p>Parapetti danneggiati o assenti: Si riferisce a parapetti che hanno perso l'integrità strutturale e quindi la loro funzione di sicurezza o sono in condizioni di precario ancoraggio, o ancora, a parapetti assenti o che presentano delle discontinuità.</p>
	<p>Guardrail danneggiati o assenti: Riferito alle situazioni in cui i guardrail risultano compromessi nella loro integrità, in seguito all'urto di automezzi, o risultano mancanti lungo i bordi dei ponti.</p>
	<p>Cordoli degradati: I cordoli sono quegli elementi lungo i bordi dell'impalcato dove vengono installati i parapetti o i guard-rail e lungo i quali solitamente vengono posizionati i sistemi di scarico dell'acqua. Il degrado si presenta con deterioramento del copriferro fino al distacco degli elementi lapidei; il fenomeno è particolarmente frequente in prossimità dei giunti.</p>
	<p>Scarichi ostruiti o danneggiati: Riferito alle situazioni in cui il libero defluire delle acque meteoriche risulta impedito dall'ostruzione della parte terminale degli scarichi o ancora alle situazioni in cui gli scarichi dei sistemi di canalizzazione delle acque meteoriche risultano danneggiati impedendo così lo smaltimento regolare delle acque stesse.</p>
	<p>Pali illuminazione danneggiati: Riferito alle situazioni in cui il danno o il degrado ai pali d'illuminazione non permette o sconsiglia il loro recupero.</p>
Altro	

Figura 16 Segue Note esplicative “Scheda di I livello per il rilievo del degrado per i ponti ad arco in muratura”

La compilazione delle suddette schede potrebbe costituire uno strumento utile per la realizzazione di un “Catalogo delle opere d’arte stradali” che permetta di avere un quadro dei manufatti presenti sul territorio ponendo in evidenza le criticità e consentendo di definire le tipologie di interventi che è possibile effettuare.

La funzione dell'ispezione non è quella di determinare la causa o la pericolosità del difetto ma rappresenta una fase di osservazione e di rilievo attento dello stato di conservazione dell'opera. Solo in una fase successiva attraverso le schede compilate e le foto realizzate durante le ispezioni si passerà alla fase interpretativa effettuata da personale esperto e qualificato.

Sulla base delle tipologie di degrado evidenziate durante le ispezioni visive, possono essere successivamente predisposti dei controlli strumentali con lo scopo di approfondire le cause e la gravità del degrado.

5.4 APPLICAZIONE DEL DRSA DOMINANCE BASED ROUGH SET APPROACH PER DEFINIRE L'URGENZA DELLE ATTIVITA' MANUTENTIVE

Una delle fasi del sistema di gestione è quella che permette di classificare i ponti attribuendo un ordine di preferenza alle opere che necessitano di interventi sul quale è possibile basare in prima approssimazione la programmazione della manutenzione delle opere. Tale classificazione, nei modelli presenti in letteratura, viene eseguita attraverso degli indici, dipendenti linearmente da diversi parametri a ciascuno dei quali viene attribuito un peso differente. La calibrazione delle formule avviene sulla base dell'esperienza o attraverso i dati riportati in letteratura.

Il presente lavoro si propone di applicare un approccio di tipo decisionale e con possibilità di apprendimento in sostituzione delle relazioni empiriche con le quali venivano determinati gli indici. La metodologia proposta consente di confrontare e gestire, in maniera semplice e trasparente, i diversi parametri scelti per descrivere il processo manutentivo.

L'obiettivo è stato raggiunto mediante lo sviluppo di un sistema di supporto alle decisioni basato su un'analisi di tipo multicriteriale. In quest'ambito, è stata messa a punto negli ultimi anni una nuova metodologia che si è rivelata estremamente interessante sia dal punto di vista metodologico che dal punto di vista operativo che è basata su regole decisionali ottenute a partire dalla teoria dei rough-set.

Tale metodologia prende il nome di Dominance Based Rough Set Approach (DRSA) e attraverso tale tecnica è possibile costruire un modello logico di comportamento

dall'osservazione delle "azioni" mediante un processo di apprendimento di tipo induttivo [1].

Tale metodo presenta tre vantaggi fondamentali:

- ✓ Capacità di gestire un numero elevato di parametri;
- ✓ Raccogliere le informazioni necessarie a calibrare il modello attraverso una serie di "casi esemplari" che vengono definiti dal decisore stesso (che potrebbe avere difficoltà nell'assegnare dei pesi a ciascun criterio);
- ✓ Generare un modello decisionale espresso in termini di regole del tipo "se..., allora..." facilmente comprensibili al decisore perché riflettono le sue scelte.

Questi vantaggi sono molto importanti perché permettono al decisore di avere una visione trasparente del processo decisionale generato evitando l'effetto "black box" tipico di metodologie alternative (reti neurali, algoritmi genetici, ...).

Il processo decisionale si sviluppa a partire dai seguenti step (fig.17):

- 1) Definizione dei criteri che guidano il processo decisionale;
- 2) Presentazione al decisore di una serie di "casi esemplari" a cui assegnare la relativa decisione;
- 3) Estrazione delle regole decisionali in termini "if...then..." attraverso un procedimento di tipo induttivo;
- 4) Implementazione delle regole all'interno di un programma di calcolo al fine di restituire il grado di urgenza delle attività manutentive per i nuovi casi proposti;
- 5) Possibilità per il decisore di esaminare le regole che hanno supportato tale decisione andando ad individuare, di volta in volta, i casi esemplari che hanno generato tali regole;
- 6) Modifica dei "casi esemplari" nel caso in cui il decisore abbia la necessità di introdurre nuovi vincoli associati a diversi criteri di scelta o nel caso in cui voglia modificare i criteri definiti nello step 1;
- 7) Ritorno allo step 3.

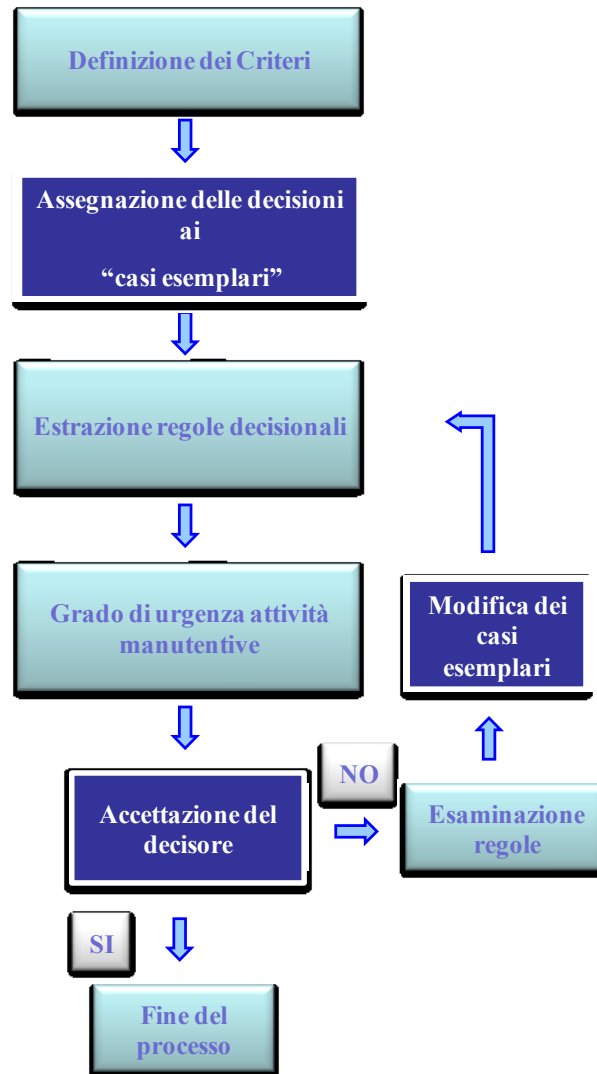


Figura 17 Schema del processo decisionale

5.4.1 Definizione dei criteri che guidano il processo decisionale

La filosofia dei rough set si basa sull'assunzione che ad ogni oggetto dell'universo, nel nostro caso i ponti, è possibile associare una certa quantità di informazioni espresse attraverso un insieme di attributi, che assumono il ruolo di descrivere l'oggetto. E' stato definito un insieme di attributi con riferimento: alle caratteristiche della struttura, alle

caratteristiche del territorio, al degrado della struttura, alle caratteristiche del traffico e alle caratteristiche della rete.

Sono stati definiti sedici attributi (i valori assunti dagli attributi sono riportati all'interno delle parentesi):

- A₁ = Anno di costruzione (1 = basso, 2 = medio, and 3 = alto);
- A₂ = Materiale (1 = basso, 2 = medio, 3 = alto and 4 = molto alto);
- A₃ = Ambiente (1 = basso, 2 = medio and 3 = alto);
- A₄ = Terreno di fondazione (1 = basso, 2 = medio and 3 = alto);
- A₅ = Tipologia di danno (1 = basso, 2 = medio and 3 = alto);
- A₆ = Superficie danneggiata (1 = basso, 2 = medio and 3 = alto);
- A₇ = Elementi danneggiati (1 = basso, 2 = medio and 3 = alto);
- A₈ = Zona sismica (1 = basso, 2 = medio and 3 = alto);
- A₉ = Dispositivi antisismici (1 = si, 2 = no);
- A₁₀ = Schema statico (1 = basso, 2 = medio and 3 = alto);
- A₁₁ = Dissesto idrogeologico (1 = basso, 2 = medio and 3 = alto);
- A₁₂ = Traffico medio giornaliero (1 = basso, 2 = medio and 3 = alto);
- A₁₃ = Traffico pesante (1 = basso, 2 = medio and 3 = alto);
- A₁₄ = Viabilità strategica(1 = no, 2 = si);
- A₁₅ = Percorsi alternativi (1 = si, 2 = no);
- A₁₆ = Decisione (1 = basso, 2 = medio, 3 = alto e 4 = molto alto).

Il valore assunto da ogni criterio decresce da valori migliori a valori peggiori.

L'attributo "Età del ponte " si riferisce alla data, approssimativa, del progetto. Più recente è la progettazione dell'opera, maggiori sono le possibilità che essa sia stata progettata secondo norme antisismiche più evolute. Sono previsti tre giudizi: basso, medio o alto; l'età del ponte è bassa se il ponte è stato realizzato intorno agli anni novanta, è media se il ponte è stato realizzato tra gli anni settanta e novanta, è alta se il ponte è stato realizzato prima degli anni settanta.

L'attributo "Materiali" si riferisce ai materiali utilizzati per la costruzione dell'opera. Migliori sono le prestazioni che il materiale è in grado di offrire in termini di caratteristiche meccaniche, fisiche e di resistenza al variare del tempo e delle condizioni climatiche e minore sarà la sua vulnerabilità. Il suo valore è classificato come basso se il ponte è

realizzato in muratura, moderato se il ponte è realizzato in acciaio, alto se il ponte è realizzato in calcestruzzo e molto alto se il ponte è realizzato in calcestruzzo precompresso.

L'attributo "Ambiente" si riferisce all'esposizione della struttura alle azioni dell'ambiente. Il suo valore è basso nel caso di ponti costruiti in ambienti non aggressivi, moderato nel caso di ponti costruiti in ambienti moderatamente aggressivi (per esempio nel caso di ponti esposti alla salsedine marina), alto nel caso di ponti costruiti in ambienti altamente aggressivi (per esempio nel caso di ponti parzialmente sommersi o esposti all'azione dei sali disgelanti o costruiti vicino a centri industriali).

L'attributo "Terreno di fondazione" si riferisce alle caratteristiche fisiche e meccaniche del terreno di fondazione che influenzano la stabilità e la resistenza del ponte. Il suo valore è basso nel caso in cui il terreno di fondazione è costituito da ammassi rocciosi; medio nel caso in cui il terreno di fondazione è costituito da terreni sciolti di tipo granulare (incoerenti); basso nel caso in cui il terreno di fondazione è costituito da terreni sciolti di tipo limoso o argilloso (coerenti)

L'attributo "Tipologia di danno" si riferisce al tipo di degrado presente nella struttura. Il suo valore è basso nel caso in cui o non ci sono danni o questi sono solo superficiali; medio nel caso in cui sono presenti fenomeni di danneggiamento quali fessure, corrosione, difetti appoggi, ecc; alto nel caso in cui sono presenti danni importanti quali deformazioni, rotture, cedimenti, instabilità, riduzione delle armature di precompressione, franco idraulico minimo non rispettato,.

L'attributo "Superficie interessata dal danno" si riferisce all'estensione del danno. Il suo valore è basso nel caso in cui o nessuna superficie è interessata dal danno o la superficie interessata dal danno è lieve (cioè inferiore al 10% dell'area del componente interessato dal danno); medio nel caso in cui la superficie interessata dal danno è estesa (cioè compresa tra il 10% e il 60% dell'area del componente interessato dal danno); alto nel caso in cui la superficie interessata dal danno è molto estesa (superiore al 60% dell'area del componente interessato dal danno).

L'attributo "Elementi interessati dal danno" si riferisce all'importanza che l'elemento interessato dal danno riveste all'interno della struttura. Il suo valore è basso se nessun elemento è danneggiato; medio se il danno riguarda elementi non strutturali o elementi

strutturali secondari; alto se il danno riguarda elementi strutturali principali (pile, spalle, impalcato).

L'attributo "Zona sismica" viene valutato con riferimento al valore di picco dell'accelerazione al suolo che ci fornisce un'idea della pericolosità sismica del luogo in cui si trova il ponte. Il suo valore è basso se il valore di picco dell'accelerazione al suolo è minore di 0.15g; medio se il valore di picco dell'accelerazione al suolo è compreso tra 0.15g e 0.25g; alto se il valore di picco dell'accelerazione al suolo è maggiore di 0.25g.

L'attributo "Dispositivi antisismici" si riferisce alla presenza di elementi come i dissipatori o gli isolatori che permettono di isolare sismicamente la struttura. Il suo valore è sì se sono presenti dispositivi antisismici; no se non sono presenti dispositivi antisismici.

L'attributo "Schema statico" si riferisce alla configurazione degli elementi strutturali per resistere alle azioni che agiscono su di essa. Il suo valore è basso se lo schema statico del ponte è ad arco; medio se lo schema statico del ponte è a travata continua; alto se lo schema statico è a travi semplicemente appoggiate.

L'attributo "Dissesto idrogeologico" si riferisce ai processi morfologici, causati dall'acqua che scorre nel suolo e nel sottosuolo, e che comportano uno squilibrio nel territorio che va dalle degradazioni superficiali sino ai movimenti di massa (frane). Il suo valore è basso se non vi è nessun rischio idrogeologico, medio se il rischio idrogeologico è medio, alto se il rischio idrogeologico è elevato o molto elevato.

L'attributo "Traffico medio giornaliero" si riferisce al livello di traffico sul tratto di strada in cui insiste il ponte.

Il suo valore è basso se il traffico medio giornaliero è minore di 6.000 veicoli al giorno; medio se il traffico medio giornaliero è compreso tra 6.000 e i 20.000 veicoli al giorno; alto se il traffico medio giornaliero supera i 20.000 veicoli al giorno.

L'attributo "Traffico pesantissimo" si riferisce alla percentuale dei veicoli pesanti. Il suo valore è basso se la percentuale di traffico pesante è minore del 10%; medio se la percentuale di traffico pesante è compresa tra il 10% e il 20%; alto se la percentuale di traffico pesante è maggiore del 20%.

L'attributo "Viabilità strategica" si riferisce ai ponti situati lungo un percorso che riveste un'importanza fondamentale per l'assetto viario del territorio ai fini della gestione delle emergenze e per le quali dovrebbe essere garantita la funzionalità necessaria allo

svolgimento del servizio. Il suo valore è no se la viabilità non è strategica, si se la viabilità è considerata strategica.

L'attributo "Presenza di percorsi alternativi" si riferisce alla presenza o meno di una viabilità attigua a quella in cui si trova il ponte, che sia percorribile nel caso di chiusura e deviazione del traffico e che non comporti lunghi tempi di percorrenza. Il suo valore è si se sono presenti percorsi alternativi; no se non sono presenti percorsi alternativi.

L'attributo "Decisione" si riferisce al grado di urgenza delle attività manutentive che dovranno essere intraprese. Il valore basso indica di mantenere invariato il programma delle ispezioni; medio indica di anticipare l'ispezione; alto indica la programmazione di un intervento urgente; molto alto indica la chiusura del ponte o la limitazione del traffico ai fini della sicurezza per gli utenti della strada.

I parametri sopra definiti sono stati ritenuti adeguati a caratterizzare qualunque tipologia di ponte; tuttavia il metodo si presta a essere implementato, senza alcuna complicazione concettuale. Altri parametri possono essere previsti a seconda delle esigenze o delle politiche attuate dell'ente gestore.

5.4.2 Tabella delle informazioni e relazione di dominanza

Una volta definiti i criteri che guideranno il processo decisionale, tale approccio richiede l'immissione di una serie di esempi che rappresentano le informazioni preferenziali espresse dai decisori. Si tratta di un insieme di oggetti, appartenenti all'insieme, per il quale sia nota la decisione relativa a ciascun elemento.

Da un punto di vista operativo vengono proposti al decisore una serie di casi definiti "esemplari" e il compito del decisore sarà quello di assegnare la relativa decisione in termini di grado di urgenza delle attività manutentive. Tali esempi di decisione costituiranno l'input per l'implementazione dell'analisi multicriteriale; l'output ci restituisce invece il modello delle preferenze del decisore espresso in termini di regole decisionali.

Per ragioni algoritmiche, le informazioni relative agli oggetti vengono riportate all'interno di una "tabella dei dati", ogni riga rappresenta un oggetto distinto, mentre nelle colonne sono riportati, in modo ordinato, i valori (quantitativi o qualitativi) degli attributi che caratterizzano ciascun oggetto.

Nella presente trattazione il sistema di supporto decisionale è stato implementato a partire da un insieme di 100 ponti, giudicati sufficientemente rappresentativi della casistica riscontrabile sulle reti stradali italiane (tab. 1). Tuttavia una grande potenzialità del metodo proposto è quella di consentire all'ente gestore di modificare o integrare la tabella delle informazioni in funzione dell'esperienza acquisita, a seguito di informazioni reperite dalla letteratura tecnica o a seguito di studi analitici condotti sui ponti gestiti. A tal proposito si parla di processo di apprendimento della procedura.

Formalmente una *tabella delle informazioni o dei dati* è una 4-drupla $S=(U, Q, V, f)$ in cui U è un insieme finito di oggetti (universo) $Q=\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ è un insieme finito di attributi, V_q è il dominio degli attributi q e pertanto $V = \bigcup_{q \in Q} V_q$, e $f: U \times Q \rightarrow V$ è una funzione totale definita in $U \times Q$ che ha valori in V tale che per ogni $q \in Q$ e $x \in U$ si avrà $f(x, q) \in V_q$. Tale funzione viene detta "*funzione di informazione*". In parole semplici $f(x, q)$ restituisce il valore dell'attributo $q \in Q$ relativo all'oggetto $x \in U$.

L'insieme Q è solitamente diviso in un insieme C di attributi condizionali e in un insieme D di attributi decisionali; il dominio degli attributi non deve necessariamente essere ordinato. Tuttavia nei problemi di classificazione multicriteriale il dominio degli attributi condizionali è ordinato secondo una scala di preferenze, in questo caso gli attributi prendono il nome di "criteri".

A titolo esemplificativo, con riferimento al criterio "materiale", il valore 3 (ponte in cemento armato) è migliore del valore 4 (ponte in c.a.p.) perché i ponti in c.a.p. sono più vulnerabili nei confronti di alcune tipologie di degrado come le fessurazioni e la corrosione delle armature.

Tabella 1 Tabella dei dati (casi 1-25)

PONTI	CRITERI															DECISIONE
	Anno di costruzione	Materiale	Ambiente	Terreno di fondazione	Tipologia di danno	Superficie danneggiata	Elementi danneggiati	Zona sismica	Dispositivi antisismici	Schema statico	Dissesto idrogeologico	T.G.M.	Traffico pesante	Viabilità strategica	Percorsi alternativi	
1	3	1	1	1	1	1	1	1	2	1	3	1	3	1	1	2
2	3	1	2	2	1	1	1	2	2	1	2	2	3	2	1	1
3	3	1	3	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	2	1
4	3	1	3	2	2	1	2	1	2	1	1	3	2	2	1	1
5	3	1	2	1	2	2	3	1	2	1	2	1	3	1	2	2
6	3	1	1	1	2	2	2	2	2	1	3	2	1	2	1	3
7	3	1	2	2	2	2	2	2	2	1	3	1	2	2	2	3
8	3	1	3	1	2	2	2	1	2	1	1	2	1	1	1	1
9	2	1	2	3	3	3	3	3	1	1	3	2	1	2	1	3
10	3	1	3	1	2	2	3	2	2	1	3	1	3	2	1	3
11	2	1	3	1	1	1	1	1	2	1	1	3	2	2	1	1
12	2	1	1	2	2	3	3	3	2	1	2	3	2	1	2	3
13	3	1	2	3	2	2	2	2	2	1	3	2	3	2	1	3
14	2	1	3	3	2	3	3	3	2	1	3	3	3	2	2	3
15	2	1	3	1	2	2	3	2	2	1	3	3	3	1	2	3
16	2	1	1	2	2	3	2	3	2	1	3	2	3	1	1	3
17	1	1	1	1	3	1	2	1	1	1	1	3	2	2	2	1
18	1	1	3	2	2	3	3	2	1	1	2	1	3	2	1	1
19	2	1	3	3	2	3	2	3	2	1	3	3	3	2	2	3
20	1	1	2	3	3	2	3	2	1	1	2	2	1	2	2	3
21	3	1	1	3	3	3	3	3	2	1	3	3	3	1	1	4
22	3	1	3	2	3	3	3	2	2	1	2	3	3	2	1	4
23	2	1	1	1	3	1	1	2	2	1	3	1	2	1	1	3
24	3	2	1	1	1	1	1	1	2	2	3	1	3	1	1	2
25	3	2	2	2	1	1	1	1	2	3	2	2	3	2	1	2

Segue Tabella 1 Tabella dei dati (casi 26-50)

PONTI	CRITERI															DECISIONE
	Anno di costruzione	Materiale	Ambiente	Terreno di fondazione	Tipologia di danno	Superficie danneggiata	Elementi danneggiati	Zona sismica	Dispositivi antisismici	Schema statico	Dissesto idrogeologico	T.G.M.	Traffico pesante	Viabilità strategica	Percorsi alternativi	
26	3	2	3	2	2	1	2	3	2	1	1	3	2	2	1	2
27	3	2	3	2	2	1	2	2	2	1	1	3	2	2	1	1
28	3	2	2	1	2	2	3	1	2	1	2	1	3	1	2	2
29	3	2	1	1	2	2	2	3	2	1	3	2	1	2	1	3
30	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	3	1	2	2	2	3
31	3	2	3	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1	1	1	2
32	2	2	2	2	3	3	3	3	1	2	1	2	1	2	1	3
33	3	2	3	1	2	3	3	2	2	1	3	1	3	2	1	3
34	2	2	3	1	1	1	1	1	2	2	1	3	2	2	1	1
35	2	2	1	1	2	3	3	3	2	1	2	3	2	1	2	3
36	2	2	3	2	2	2	2	1	2	3	1	1	1	1	2	1
37	2	2	1	2	2	1	2	3	2	3	1	2	1	1	2	2
38	2	2	3	1	2	2	3	2	2	2	3	3	3	1	2	3
39	2	2	1	2	2	3	2	3	2	2	3	2	3	1	1	3
40	1	2	1	1	3	1	2	1	1	2	1	3	2	2	2	1
41	1	2	3	3	2	3	3	3	1	1	2	1	3	2	1	3
42	1	2	3	1	2	3	2	2	2	2	3	3	3	2	2	3
43	3	2	1	2	2	1	2	2	2	1	1	3	2	2	1	1
44	2	2	3	2	3	3	3	2	2	2	3	1	3	1	1	4
45	3	3	1	1	1	1	1	1	2	2	3	1	3	1	1	2
46	3	3	2	2	1	1	1	2	2	3	2	2	3	2	1	1
47	3	3	3	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	2	1
48	3	3	3	2	2	1	2	2	2	1	1	3	2	2	1	1
49	3	3	2	1	2	2	3	1	2	1	2	1	3	1	2	2
50	3	3	1	1	2	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	3

Segue Tabella 1 Tabella dei dati (casi 51-75)

PONTI	CRITERI															DECISIONE
	Anno di costruzione	Materiale	Ambiente	Terreno di fondazione	Tipologia di danno	Superficie danneggiata	Elementi danneggiati	Zona sismica	Dispositivi antisismici	Schema statico	Dissesto idrogeologico	T.G.M.	Traffico pesante	Viabilità strategica	Percorsi alternativi	
51	2	3	2	2	2	2	2	2	2	1	3	1	2	2	2	3
52	3	3	3	2	2	2	2	1	2	1	1	2	1	1	1	2
53	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	1	2	1	2	1	3
54	2	3	3	1	2	3	3	2	1	1	3	1	3	2	1	3
55	2	3	3	1	1	1	1	1	2	2	1	3	2	2	1	1
56	2	3	1	3	2	3	3	3	2	1	2	3	2	1	2	3
57	2	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2
58	2	3	1	2	2	1	2	3	2	3	1	2	1	1	2	2
59	2	3	3	1	2	2	3	2	2	1	3	3	3	1	2	3
60	2	3	1	2	2	3	2	3	2	2	3	2	3	1	1	3
61	1	3	1	1	3	1	2	2	1	2	1	3	2	2	2	2
62	1	3	3	1	2	3	3	3	1	3	2	1	3	2	1	3
63	2	3	3	3	2	3	2	3	2	2	3	3	3	2	2	3
64	3	3	1	2	2	1	2	2	2	1	1	3	2	2	1	1
65	3	3	2	2	3	3	3	3	2	3	2	3	2	2	2	4
66	3	3	2	2	3	3	3	3	2	3	3	3	2	2	2	4
67	3	3	3	2	3	3	3	3	2	3	3	3	2	1	2	4
68	3	3	1	3	2	1	2	2	2	3	1	1	1	1	1	1
69	2	3	1	2	2	1	2	2	2	3	3	1	1	1	2	1
70	1	3	1	1	2	2	3	2	2	3	3	1	2	1	1	2
71	3	3	1	3	2	1	2	3	2	3	1	1	1	1	2	2
72	2	3	1	1	2	1	3	3	2	3	1	1	2	1	2	2
73	2	3	1	3	2	1	2	2	2	3	1	1	2	2	1	1
74	2	3	1	1	2	2	2	2	2	3	3	1	2	2	1	2
75	2	3	1	3	2	1	3	3	2	3	1	1	2	1	2	2

Segue Tabella 1 Tabella dei dati (casi 76-100)

PONTI	CRITERI															DECISIONE
	Anno di costruzione	Materiale	Ambiente	Terreno di fondazione	Tipologia di danno	Superficie danneggiata	Elementi danneggiati	Zona sismica	Dispositivi antisismici	Schema statico	Dissesto idrogeologico	T.G.M.	Traffico pesante	Viabilità strategica	Percorsi alternativi	
76	2	3	1	2	2	1	2	2	2	3	3	1	2	1	1	1
77	3	4	1	1	1	1	1	1	2	2	3	1	3	1	1	2
78	3	4	2	2	1	2	1	2	2	3	2	2	3	2	1	2
79	3	4	3	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	2	1
80	3	4	3	2	2	1	2	2	2	1	1	3	2	2	1	2
81	3	4	2	2	2	2	3	3	2	1	2	1	3	1	2	3
82	3	4	2	3	2	2	2	3	2	1	3	2	1	2	1	3
83	2	4	2	2	2	2	2	2	2	1	3	1	2	2	2	3
84	3	4	3	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1	1	1	2
85	3	4	2	1	3	3	3	3	2	1	1	2	1	2	1	3
86	3	4	3	1	2	2	3	2	2	3	3	1	3	2	1	3
87	2	4	3	1	1	1	1	1	2	2	1	3	2	2	1	2
88	2	4	2	3	2	3	3	1	2	1	2	3	2	1	2	2
89	2	4	3	2	2	2	2	1	2	3	1	1	1	1	2	1
90	2	4	1	2	2	1	2	2	2	3	1	2	1	1	2	2
91	2	4	3	1	2	2	3	2	2	3	3	3	3	1	2	3
92	2	4	1	2	2	2	2	3	2	2	3	2	3	1	1	3
93	1	4	1	1	3	1	2	2	1	2	1	3	2	2	2	3
94	3	4	3	2	2	2	3	3	1	1	2	1	3	2	1	3
95	3	4	3	3	2	3	2	3	2	2	3	3	3	2	2	3
96	3	4	2	2	2	1	2	2	2	1	1	3	2	2	1	2
97	3	4	2	2	3	3	3	3	2	2	3	3	1	1	1	4
98	2	4	1	1	3	2	3	3	2	3	1	2	2	2	2	4
99	2	4	2	3	3	3	3	2	2	2	2	1	2	1	2	4
100	1	4	2	1	3	1	3	3	1	2	2	2	2	2	1	3

5.4.2.1 Classi decisionali

L'insieme degli attributi decisionali D (nel nostro caso un 'singoletto' perché la decisione è unica e stabilisce il grado di urgenza delle attività manutentive) induce una partizione di U in un numero finito di classi $Cl = \{Cl_t, t \in T\}$, $T = \{1, \dots, n\}$. Ogni $x \in U$ appartiene ad una e una sola classe di $Cl_t \in Cl$. Le classi di Cl sono ordinate secondo un ordine di preferenza secondo l'indice delle classi ossia che per tutti gli $r, s \in T$ tali che $r > s$, allora gli oggetti di Cl_r saranno preferiti agli oggetti di Cl_s .

Nel nostro caso di studio l'attributo decisionale D che si riferisce al "grado di urgenza delle attività manutentive", scompone l'universo U costituito dai 100 ponti in quattro classi (fig.18):

- Cl_1 : ponti che mantengono l'ispezione nei tempi programmati;
- Cl_2 : ponti che richiedono un'anticipazione delle ispezioni;
- Cl_3 : ponti che richiedono un intervento urgente;
- Cl_4 : ponti che necessitano di una limitazione del traffico o la chiusura.

Cl_1	ponti che mantengono l'ispezione nei tempi programmati
Cl_2	ponti che necessitano un'anticipazione delle attività ispettive
Cl_3	ponti che necessitano un intervento urgente
Cl_4	ponti che sono a rischio di collasso e che pertanto richiedono una chiusura immediata o la deviazione del traffico

Figura 18 Classi decisionali

5.4.3 Approssimazioni basate sulla dominanza

5.4.3.1 Unioni ascendenti e discendenti

Nella classificazione multicriteriale, a causa del fatto che l'insieme delle classi Cl sono ordinate secondo un ordine preferenza, gli insiemi da approssimare non sono le classi, ma le unioni ascendenti e discendenti delle classi, così definite:

✓ unioni ascendenti: $Cl_t^{\geq} = \bigcup_{s \geq t} Cl_s$

✓ unioni discendenti: $Cl_t^{\leq} = \bigcup_{s \leq t} Cl_s$

L'unione ascendente Cl_i^{\geq} è l'insieme degli oggetti appartenenti alla classe Cl_i o a quelle maggiormente preferite, mentre l'unione discendente Cl_i^{\leq} è l'insieme delle classi appartenenti alla classe Cl_i o ad una classe meno preferita.

Si noti che per $t=2, \dots, n$ si ha che:

$$Cl_t^{\geq} = U - Cl_{t-1}^{\leq}, \quad Cl_{t-1}^{\leq} = U - Cl_t^{\geq}$$

Nel nostro caso di studio le *unioni ascendenti* delle classi sono così formate (fig.19):

- ✓ L'unione ascendente Cl_1^{\geq} è formata dai ponti che necessitano “almeno” di una ispezione visiva mantenuta nei tempi programmati;
- ✓ L'unione ascendente Cl_2^{\geq} è formata dai ponti che necessitano “almeno” di un'ispezione visiva anticipata;
- ✓ L'unione ascendente Cl_3^{\geq} è formata dai ponti che necessitano “almeno” la programmazione di un intervento urgente;
- ✓ L'unione ascendente Cl_4^{\geq} è formata dai ponti che necessitano “almeno” l'immediata chiusura del ponte o una riduzione del traffico.

Cl_1^{\geq}	$Cl_4 \cup Cl_3 \cup Cl_2 \cup Cl_1$
Cl_2^{\geq}	$Cl_4 \cup Cl_3 \cup Cl_2$
Cl_3^{\geq}	$Cl_4 \cup Cl_3$
Cl_4^{\geq}	Cl_4

Figura 19 Unioni ascendenti

Le *unioni discendenti* delle classi sono, invece, così formate (fig.20):

- ✓ L'unione discendente Cl_1^{\leq} è formata dai ponti che necessitano “al massimo” di una ispezione visiva mantenuta nei tempi programmati;
- ✓ L'unione discendente Cl_2^{\leq} è formata dai ponti che necessitano “al massimo” di un'ispezione visiva anticipata;

- ✓ L'unione discendente CI_3^{\leq} è formata dai ponti che necessitano “al massimo” la programmazione di un intervento urgente;
- ✓ L'unione discendente CI_4^{\leq} è formata dai ponti che necessitano “al massimo” l'immediata chiusura del ponte o una riduzione del traffico.

CI_1^{\leq}	CI_1
CI_2^{\leq}	$CI_1 \cup CI_2$
CI_3^{\leq}	$CI_1 \cup CI_2 \cup CI_3$
CI_4^{\leq}	$CI_1 \cup CI_2 \cup CI_3 \cup CI_4$

Figura 20 Unioni discendenti

Nella presente applicazione l'unione ascendente CI_7^{\geq} e l'unione discendente CI_4^{\leq} contengono tutti i 100 ponti considerati; infatti per tutti i ponti, il grado di urgenza delle attività manutentive è pari “almeno” all'ispezione visiva mantenuta nei tempi programmati e “al massimo” è pari all'immediata chiusura del ponte o alla riduzione del traffico.

Notiamo che solitamente i problemi di classificazione, nei metodi di “estrazione della conoscenza” da un insieme di dati (knowledge discovery methods), con riferimento ad una classe CI_t divide l'universo U nella classe CI_t (insieme positivo di esempi) e nel suo complemento $U - CI_t$ (insieme di esempi negativi) con $t=1, \dots, n$.

Tuttavia tali suddivisioni non tengono in considerazione l'ordine di preferenza tra le classi. Quindi nella classificazione multicriteriale viene utilizzata un altro tipo di suddivisione che divide l'universo U nelle unioni ascendenti CI_t^{\geq} e discendenti delle classi CI_{t-1}^{\leq} .

A seguito di questa suddivisione ogni oggetto dell'unione ascendente CI_t^{\geq} è preferibile ad ogni oggetto dell'unione discendente CI_{t-1}^{\leq} . Nel processo di “estrazione della conoscenza” rispetto all'unione ascendente CI_t^{\geq} saranno considerati positivi tutti gli oggetti appartenenti a CI_t^{\geq} e negativi tutti gli oggetti appartenenti a CI_{t-1}^{\leq} . Analogamente quando si

estrae la conoscenza rispetto unioni discendenti CI_{t-1}^{\leq} saranno considerati positivi tutti gli oggetti appartenenti a CI_{t-1}^{\leq} e negativi tutti gli oggetti appartenenti a CI_t^{\geq} .

5.4.3.2 Granuli di conoscenza

Nell'approccio di "estrazione della conoscenza", la dominanza principale viene così applicata.

Si definisce \geq_q una *relazione di preferenza debole* su U (chiamata spesso outranking) che rappresenta una preferenza su un insieme di oggetti in relazione al criterio q ; $x \geq_q y$ significa che "x è almeno tanto buono quanto y rispetto al criterio q". Diciamo che x domina y rispetto a $P \subseteq C$, indicato con $x D_P y$, se $x \geq_q y$ per ogni $q \in P$. Assumendo, senza perdere di generalità, che i domini di tutti i criteri sono ordinati in modo che la preferenza aumenta con il valore allora dire che $x D_P y$ è equivalente a dire che $f(x, q) \geq f(y, q)$ per ogni $q \in P$.

Allora, considerato $P \subseteq C$, si definiscono per ogni $x \in U$ i "granuli di conoscenza" usati per le approssimazioni nel DRSA che sono:

- ✓ l'insieme degli oggetti che dominano x , chiamati *P-Dominanti (P-dominating set)*,

$$D_p^+(x) = \{y \in U : y D_p x\};$$

- ✓ l'insieme degli oggetti dominati da x , chiamati *P-Dominati (P-dominated set)*,

$$D_p^-(x) = \{y \in U : x D_p y\}.$$

Nel nostro caso di studio, $D_p^+(x)$ è composto da tutti i ponti che hanno un grado di urgenza delle attività manutentive "almeno" pari ad x , mentre $D_p^-(x)$ è composto da tutti i ponti che hanno un grado di urgenza delle attività manutentive "al massimo" pari ad x .

Per esempio, se si consideriamo i criteri "tipologia di danno" e "zona sismica" entrambi valutati su tre livelli di scala (alta, moderata e bassa), e il ponte x viene valutato come moderato rispetto al "tipo di danno", così come rispetto alla "zona sismica", allora:

- ✓ $D_p^+(x)$ è composto da tutti i ponti che hanno una valutazione bassa o moderata rispetto al "tipo di danno" e alla "zona sismica",

- ✓ $D_p^-(x)$ è composto da tutti i ponti che hanno una valutazione moderata o alta rispetto al "tipo di danno" e alla "zona sismica".

Dato un insieme di criteri $P \subseteq C$, l'inserimento di un oggetto $x \in U$ nell'unione ascendente delle classi Cl_t^z , $t=2, \dots, n$, crea una *inconsistenza* rispetto al principio di dominanza se vale una delle seguenti condizioni:

- x appartiene alla classe Cl_t o ad una migliore ma è dominato da un oggetto y appartenente ad una classe peggiore di Cl_t ,
- x appartiene ad una classe peggiore di Cl_t ma domina un oggetto y appartenente alla classe Cl_t o ad una migliore.

5.4.3.3 *Approssimazioni superiori e inferiori*

Se, dato un insieme di criteri $P \subseteq C$, l'inclusione di $x \in U$ a Cl_t^z , $t=2, \dots, n$, crea una inconsistenza rispetto al principio di dominanza, noi diciamo che x appartiene a Cl_t^z con qualche ambiguità. Analogamente se $x \in U$ appartiene a Cl_t^z , senza alcuna ambiguità rispetto a $P \subseteq C$. Ciò significa che tutti gli oggetti che dominano x appartengono a Cl_t^z .

Diciamo che $y \in U$ può appartenere alla classe Cl_t^z eventualmente con qualche ambiguità se esiste un oggetto $x \in Cl_t^z$ tale che y domina x rispetto all'insieme $P \subseteq C$, ovvero $y \in D_p^+(x)$.

Per esempio, se "il ponte y domina il ponte x " con il ponte x che appartiene all'unione ascendente della classe Cl_3^z in cui viene suggerito un grado di urgenza delle attività manutentive non minore di "programmazione di un intervento urgente" allora anche y dovrebbe appartenere all'unione ascendente della classe Cl_3^z eventualmente con qualche ambiguità. In parole più semplici, se il ponte y non è peggiore del ponte x in tutti i criteri considerati (cioè y domina x), allora il grado di urgenza della manutenzione del ponte y dovrebbe essere non inferiore al grado di urgenza del ponte x , con l'eventuale presenza di ambiguità causate dal fatto che in realtà il ponte y o qualche altro ponte che domina il

ponte x potrebbe avere un grado di urgenza della manutenzione inferiore per motivi specifici (per esempio a causa di criteri che non sono stati considerati nel caso generale).

Si noti che, dire che $y \in U$ potrebbe appartenere a Cl_t^z non necessariamente significa che vi appartenga. Infatti, nell'esempio precedente, y potrebbe appartenere a Cl_3^z , ma se il suo grado di urgenza della manutenzione è pari a 2 (anticipazione delle ispezioni), y appartiene alla classe Cl_2^z . Questo è dovuto al fatto che c'è un'ambiguità tra x e y rispetto all'insieme di criteri P .

Dunque rispetto a $P \subseteq C$, l'insieme di tutti gli oggetti appartenenti alla classe Cl_t^z senza alcuna ambiguità costituisce l'*approssimazione inferiore* di P in Cl_t^z (*P-lower approximation of Cl_t^z*), denotata con $\underline{P}(Cl_t^z)$, mentre l'insieme di tutti gli oggetti che potrebbero appartenere alla classe Cl_t^z , eventualmente con qualche ambiguità, costituisce l'*approssimazione superiore* di P in Cl_t^z (*P-upper approximation of Cl_t^z*), denotata con $\overline{P}(Cl_t^z)$:

- ✓ $\underline{P}(Cl_t^z) = \{x \in U : D_p^+(x) \subseteq Cl_t^z\}$,
- ✓ $\overline{P}(Cl_t^z) = \{x \in U : D_p^-(x) \cap Cl_t^z \neq \emptyset\}$, for $t=1, \dots, n$.

Analogamente è possibile definire l'approssimazione inferiore e l'approssimazione superiore in Cl_t^s come segue:

- ✓ $\underline{P}(Cl_t^s) = \{x \in U : D_p^-(x) \subseteq Cl_t^s\}$,
- ✓ $\overline{P}(Cl_t^s) = \{x \in U : D_p^+(x) \cap Cl_t^s \neq \emptyset\}$, for $t=1, \dots, n$.

5.4.3.4 Frontiera

Tutti gli oggetti appartenenti a Cl_t^z e Cl_t^s con qualche ambiguità costituiscono la frontiera (*P-boundary*) di Cl_t^z e di Cl_t^s denotata rispettivamente da $Bn_p(Cl_t^z)$ e da $Bn_p(Cl_t^s)$, e sono così rappresentate:

- ✓ $Bn_p(Cl_t^z) = \overline{P}(Cl_t^z) - \underline{P}(Cl_t^z)$,
- ✓ $Bn_p(Cl_t^s) = \overline{P}(Cl_t^s) - \underline{P}(Cl_t^s)$, for $t=1, \dots, n$.

Più semplicemente la frontiera $Bn_p(CI_t^z)$ è composta da tutti gli oggetti ambigui rispetto al set di criteri P e dall'unione superiore delle classi CI_t^z .

Analogamente, la frontiera $Bn_p(CI_t^s)$ è composta da tutti gli oggetti ambigui rispetto al set di criteri P e dall'unione inferiore delle classi CI_t^s .

A causa della complementarità dell'approssimazione di tipo rough seguono le seguenti proprietà:

- ✓ $Bn_p(CI_t^z) = Bn_p(CI_{t-1}^s)$ per $t = 2, \dots, n$ e
- ✓ $Bn_p(CI_t^s) = Bn_p(CI_{t+1}^z)$ per $t = 1, 2, \dots, n$.

Dal punto di vista dell'individuazione della conoscenza, l'approssimazione inferiore dell'unione delle classi rappresenta una *conoscenza certa* fornita dai criteri di $P \subseteq C$, mentre l'approssimazione inferiore delle classi rappresenta una *conoscenza possibile* mentre la frontiera contiene la *conoscenza dubbia*.

5.4.4 Qualità dell'approssimazione, insiemi ridotti e core

5.4.4.1 Qualità dell'approssimazione

E' possibile definire per ogni $t \in T$ la *qualità dell'approssimazione (quality of sorting)* della classificazione CI , in funzione dell'insieme di criteri $P \subseteq C$ come:

$$\gamma_p(CI) = \frac{\text{card}\left(U - \left(\bigcup_{t \in T} Bn_p(CI_t^z)\right)\right)}{\text{card}U} = \frac{\text{card}\left(U - \left(\bigcup_{t \in T} Bn_p(CI_t^s)\right)\right)}{\text{card}U}$$

La qualità dell'approssimazione $\gamma_p(CI)$ è il rapporto fra gli oggetti correttamente rappresentati tramite gli attributi di P e il numero di oggetti dell'universo, cioè la percentuale di oggetti per cui non c'è ambiguità.

Bisogna osservare che aumentando l'insieme dei criteri considerati, la qualità dell'approssimazione non può crescere ma in generale può decrescere. Infatti, prendendo in considerazione dei nuovi criteri, oggetti che prima erano ambigui possono diventare non ambigui.

Nel nostro caso di studio, per esempio, la qualità dell'approssimazione è pari a 0,98; ciò significa che la tabella delle informazioni contiene "oggetti ambigui". Dalla tabella 2 è facile osservare che il ponte 25 ha le stesse caratteristiche del ponte 46 su tutti i criteri

eccetto per il criterio A_2 . in cui il ponte 25 risulta migliore del ponte 46 ma il grado di urgenza delle attività manutentive è più alto. Ciò significa che la scelta del decisore non può essere spiegata con i soli criteri considerati.

Tabella 2 Oggetti ambigui

PONTI	CRITERI															DECISIONE
	Anno di costruzione	Materiale	Ambiente	Terreno di fondazione	Tipologia di danno	Superficie danneggiata	Elementi danneggiati	Zona sismica	Dispositivi antisismici	Schema statico	Dissesto idrogeologico	T.G.M.	Traffico pesante	Viabilità strategica	Percorsi alternativi	
25	3	2	2	2	1	1	1	1	2	3	2	2	3	2	1	2
46	3	3	2	2	1	1	1	2	2	3	2	2	3	2	1	1

5.4.4.2 Ridotti

Ogni sottoinsieme minimo di criteri $P \subseteq C$ tale che $\gamma_p(CI) = \gamma_c(CI)$ è definito *ridotto* di CI (*reduct*) ed è denotato come RED_α . Un ridotto di P è un sottoinsieme minimo di criteri di C tale che oggetti ambigui possono diventare non ambigui se si considerano altri criteri; ciò significa che se P è un ridotto, gli oggetti ambigui rispetto a P lo saranno anche rispetto a C , e se qualche criterio non viene considerato allora almeno un oggetto diverrà ambiguo. Una tabella delle informazioni può avere più di un ridotto.

5.4.4.3 Core

L'intersezione di tutti i ridotti è definito *CORE* ed è denotato come $CORE_\alpha$:

$$Core_\alpha(P) = \bigcap Red_\alpha(P)$$

Il *core* contiene tutti i criteri che non possono essere rimossi senza deteriorare la qualità dell'approssimazione. Questo significa che nell'insieme dei criteri condizionali ci sono:

- criteri *indispensabili*, che sono i criteri inclusi nel CORE;

5.4.5 Estrazione delle regole decisionali

Il risultato finale dell'analisi effettuata con il DRSA è un insieme di regole decisionali, espresse in termini di proposizioni del tipo “*se..., allora...*” chiamate *regole di decisione*.

Le regole di decisione generate dall'approccio dei rough set non derivano direttamente dalla *tabella delle informazioni* ma dalle approssimazioni inferiore e superiore delle unioni ascendenti e discendenti delle classi decisionali.

Le regole decisionali che verranno estratte nel nostro caso possono essere di due tipi:

- 6) *Regole decisionali certe* D_{\geq} : forniscono indicazioni relative a limiti superiori dei criteri per oggetti che appartengono all'unione ascendente delle classi CI_t^{\geq} senza alcuna ambiguità e assumono la forma generale:

$$\text{se } f(x, q_1) \geq r_{q_1} \text{ e } f(x, q_2) \geq r_{q_2} \text{ e } \dots \text{ e } f(x, q_p) \geq r_{q_p} \text{ allora } x \in CI_t^{\geq}$$

$$\text{con } P = \{q_1, q_2, \dots, q_p\} \subseteq C, \mathbf{e}; r_{q_1}, r_{q_2}, \dots, r_{q_p} \in V_{q_1} \times V_{q_2} \times \dots \times V_{q_p} \mathbf{e } t \in T;$$

per esempio:

se “anno di costruzione” ≤ 2 e “traffico pesante” ≤ 2 e “viabilità strategica” ≤ 1 allora il grado di urgenza della manutenzione raccomandato è “almeno” 2 (anticipazione delle ispezioni), allora il ponte x appartiene a CI_2^{\geq} .

- 7) *Regole decisionali certe* D_{\leq} : forniscono indicazioni relative a limiti inferiori dei criteri per oggetti che appartengono all'unione discendente delle classi CI_t^{\leq} senza alcuna ambiguità e assumono la forma generale:

$$\text{se } f(x, q_1) \leq r_{q_1} \text{ e } f(x, q_2) \leq r_{q_2} \text{ e } \dots \text{ e } f(x, q_p) \leq r_{q_p} \text{ allora } x \in CI_t^{\leq}$$

$$\text{con } P = \{q_1, q_2, \dots, q_p\} \subseteq C, r_{q_1}, r_{q_2}, \dots, r_{q_p} \in V_{q_1} \times V_{q_2} \times \dots \times V_{q_p} \mathbf{e } t \in T;$$

per esempio:

se “superficie danneggiata” ≥ 2 e “zona sismica” ≥ 2 e “T.G.M.” ≥ 3 allora il grado di urgenza della manutenzione raccomandato è “al massimo” 2 (anticipazione delle ispezioni), allora il ponte x appartiene a CI_2^{\leq} .

5.4.5.1 Supporto della regola

Un oggetto $x \in U$ “*supporta*” la regola decisionale r se la sua descrizione verifica sia la parte condizionale della regola che quella decisionale.

Se una regola è supportata solo da oggetti che appartengono all'approssimazione inferiore della corrispondente classe decisionale allora la regola si dice *certa* o *deterministica*. Se una regola è supportata solo da oggetti che appartengono all'approssimazione superiore della corrispondente classe decisionale allora la regola si dice *possibile* o *probabilistica*. Le regole approssimate sono supportate, a loro volta, solo da oggetti della frontiera della corrispondente classe decisionale.

5.4.5.2 Algoritmi di induzione delle regole

La generazione delle regole decisionali da una tabella delle decisioni è una procedura complessa e pertanto sono state proposte diversi metodi per l'estrazione di tali regole.

Gli algoritmi di induzione delle regole decisionali dalla tabella dei dati esistenti utilizzano una delle seguenti strategie:

- generazione di un *insieme minimo* di regole
- generazione di un *insieme esaustivo* di regole
- generazione di un insieme di regole *soddisfacente*

Nel nostro caso di studio, per l'estrazione delle regole dalla tabella decisionale abbiamo utilizzato il software **4eMka2** che è scritto utilizzando un linguaggio C++ ed è compilato utilizzando *Borland C++ Builder 3 in ambiente Microsoft Windows 98* operating system

Il software permette di risolvere problemi multicriteriali di classificazione utilizzando la teoria del Dominance Based Rough Set, ed è disponibile gratuitamente su internet[2]. Tale software permette di generare un insieme di regole soddisfacente.

Inserendo come dati di input i dati contenuti nella tabella 1, il software restituisce come output 1183 regole decisionali, di queste:

- ✓ 187 regole raccomandano un grado di urgenza della manutenzione ≤ 1 (ispezione mantenuta nei tempi programmati)
- ✓ 188 regole raccomandano un grado di urgenza della manutenzione ≤ 2 (ispezione anticipata),
- ✓ 96 regole raccomandano un grado di urgenza della manutenzione ≤ 3 (intervento urgente),
- ✓ 214 regole raccomandano un grado di urgenza della manutenzione ≥ 4 (limitazione del traffico o chiusura del ponte);

- ✓ 323 regole raccomandano un grado di urgenza della manutenzione ≥ 3 (intervento urgente);
- ✓ 175 regole raccomandano un grado di urgenza della manutenzione ≥ 2 (ispezione anticipata).

Per ogni regola è possibile conoscere quali e quanti oggetti della tabella decisionale supportano la regola (tab. 4).

Tabella 4 Esempio di regole decisionali estratte nel caso di studio

REGOLA	IF...	THEN...	SUPPORTO	CASI SUPPORTATI
1	(Ambiente ≥ 3) & (Traffico_pesante ≥ 3)	Grado di urgenza della manutenzione ≥ 4	3	{22, 44, 67}
...				
215	(Anno_di_costruzione ≥ 3) & (Materiale ≥ 4) & (Terreno_fondazione ≥ 3)	Grado di urgenza della manutenzione ≥ 3	2	{82, 95}
...				
540	(Anno_di_costruzione ≥ 2) & (Tipologia di danno ≥ 3)	Grado di urgenza della manutenzione ≥ 2	14	{9, 21, 22, 23, 32, 44, 53, 65, 67, 85, 97, 98, 99}
...				
634	(T.G.M. ≤ 2) & (Traffico_pesante ≤ 2) & (Percorsi alternativi ≤ 2)	Grado di urgenza della manutenzione ≤ 3	19	{6, 8, 9, 23, 29, 31, 32, 50, 52, 53, 68, 70, 73, 74, 76, 82, 84, 85, 100}
...				
694	(Anno_di_costruzione ≤ 2) & (Schema statico ≤ 1) & (Dissesto idrogeologico ≤ 1)	Grado di urgenza della manutenzione ≤ 2	2	{11, 17}
...				
1030	(Tipologia di danno ≤ 2) & (Elementi danneggiati ≤ 2) & (T.G.M. ≤ 1) & (Traffico pesante ≤ 2) & (Viabilità strategica ≤ 1) & (Percorsi alternativi ≤ 1)	Grado di urgenza della manutenzione ≤ 1	2	{68, 76}

5.4.6 Definizione del grado di urgenza delle attività manutentive

Applicando un algoritmo iterativo è possibile stabilire il grado di urgenza delle attività manutentive, ossia il valore del criterio decisionale, di un nuovo caso di cui siano stati assegnati i valori dei criteri condizionali.

L'algoritmo ricerca la decisione che, associata al nuovo caso, soddisfa il maggior numero di regole tra quelle generate dal DRSA. Nel primo step la procedura considera

l'intero set di regole estratte e verifica la convergenza della soluzione rispetto a un particolare valore della decisione. Se la convergenza non viene raggiunta, vengono eseguiti ulteriori passi riducendo l'insieme delle decisioni, in accordo con il loro supporto: prendendo man mano in considerazione regole decisionali con un supporto più ampio (quindi escludendo di volta in volta le regole supportate da pochi esempi della tabella decisionale). L'algoritmo prosegue fino a quando il set delle regole considerato consente la convergenza verso un unico valore della decisione.

La procedura appena descritta è stata implementata in un codice di calcolo sviluppato in matlab, dotato di interfaccia grafica (fig.21) che permette l'introduzione dei valori dei criteri e restituisce la decisione. Tramite il comando "Regole supportate" il software restituisce tutte le regole che vengono soddisfatte dalla decisione restituita.



Figura 21 Interfaccia grafica

5.5 PROCESSO DI OTTIMIZZAZIONE PER L'ALLOCAZIONE DELLE RISORSE PER GLI INTERVENTI MANUTENTIVI SUI PONTI

La gestione di una rete di ponti di notevole estensione, caratterizzata da un'età media di 50- 60 anni è un processo delicato e impegnativo se si tiene conto che molto spesso tali opere sono state realizzate senza tener conto della durabilità e senza un'adeguata

programmazione degli interventi. L'allocazione delle risorse relative alla manutenzione dei ponti è un processo decisionale a più livelli, ognuno dei quali coinvolge una pluralità di soggetti, organizzati gerarchicamente che affrontano il problema da diversi punti di vista ognuno con le proprie esigenze.

In un moderno approccio alla gestione della manutenzione bisogna andare ad effettuare un'adeguata programmazione degli interventi che consenta di evitare o quantomeno di ridurre le interruzioni e/o la chiusura del traffico che causano notevoli disagi sia in termini di traffico ma anche in termini economici.

5.5.1 Definizione delle tipologie di intervento e stima dei costi

All'interno dell'insieme dei ponti che hanno un grado di urgenza superiore o uguale a 3 (intervento urgente o chiusura del ponte) è necessario stabilire quale può essere la strategia manutentiva che permetta di minimizzare il budget e che contemporaneamente tenga conto di altri fattori, come il disagio al traffico causato dai lavori di manutenzione, l'aumento di vita utile del ponte, ecc. Prima di fare ciò è necessario:

- 1- stabilire le tipologie di intervento idonee a eliminare, o ridurre, il degrado rilevato, ripristinando così le funzionalità del ponte;
- 2- effettuare una stima dei costi di ciascun intervento;

Già da una analisi attenta delle schede di rilievo dei danni sulla struttura da parte di personale tecnico-qualificato permette di individuare una ipotesi di intervento per ciascun ponte. E' possibile pensare di associare ad ogni tipologia di degrado un "intervento tipo" come mostrato nelle figure seguenti (figg.22 e 23).

Degrado	Intervento
Armature ossidate e distacco del copriferro:	Idrodemolizione del calcestruzzo, sostituzione delle armature, applicazione di malta cementizia anticorrosiva delle armature a vista, ricostruzione del copriferro con malte o betoncino fibrorinforzato a ritiro compensato
Fessurazioni cls	Idropulizia del calcestruzzo, saturazioni delle fessure con malta antiritiro e ricostruzione del copriferro con malte a betoncino fibrorinforzato a ritiro compensato
Fessurazioni muratura	Riempimento delle fessure mediante malta antiritiro, cuciture armate perpendicolari alle fessure
Polverizzazione giunti di malta	Idropulitura e ristilatura dei giunti
Ammaloramento giunti	Rimozione o demolizione dei giunti esistenti e fornitura e posa in opera dei giunti
Muratura ammalorata	Pulitura meccanica della muratura, lavaggio della muratura con acqua a pressione, ristilatura di giunti, eventuali interventi di scuci-cuci nelle zone di muratura maggiormente colpite, applicazione di biocidi.
Riduzione armature di precompressione:	Aggiunta di armatura lenta, precompressione esterna, rinforzo con FRP

Figura 22 Interventi di riparazione

Rinforzo	Intervento
Rinforzo a flessione delle travi	Placcaggio con FRP
Rinforzo a compressione delle pile	Incamicatura in acciaio o fasciature co FRP
Rinforzo delle spalle	Tiranti sul paramento o sostituzione del riempimento
Modifica schema statico	Trasformazione dell'impalcato da isostatico a continuo attraverso l'utilizzo di catene cinematiche
Dispositivi antisismici mancanti	Sollevamento dell'impalcato, ricostruzione e regolarizzazione delle superfici con malte o betoncini reoplastici, aggiunta dei dispositivi antisismici

Figura 23 Interventi di miglioramento o adeguamento

5.5.2 Procedura di ottimizzazione per l'allocazione delle risorse

Una volta che sono stati definiti gli interventi manutentivi sui ponti e per ognuno di essi sono stati stimati i costi, l'ente gestore dovrà opportunamente valutare le possibili strategie di intervento per pervenire alla migliore soluzione di "compromesso". Sappiamo, infatti, che l'ente gestore, in genere, non può eseguire tutte le attività manutentive richieste a causa della limitata disponibilità di risorse economiche. Diverse procedure sono state

proposte in letteratura per eseguire l'ottimizzazione. Le più recenti utilizzano le tecniche di intelligenza "artificiale" come reti neurali e algoritmi genetici.

Tuttavia tali metodologie presentano il grosso svantaggio che una volta ottenuta la soluzione non è possibile risalire al processo che l'ha generata (effetto black box).

Nel presente lavoro utilizzeremo pertanto una procedura di ottimizzazione multi-obiettivo interattiva in cui le preferenze del decisore vengono espresse in termini di regole decisionali indotte attraverso il Dominance Based Rough Set Approach come proposto in [3]; tale metodologia prende il nome di IMO-DRSA

Una procedura interattiva si compone di due fasi alternate: fase computazionale e fasi di dialogo. Nella fase computazionale vengono calcolate un insieme di soluzioni possibili che vengono presentate poi al decisore. Se, nella fase di dialogo, il decisore trova una buona soluzione di compromesso allora la procedura si ferma. In caso contrario, la valutazione critica delle soluzioni proposte viene usata per costruire il modello di preferenza del decisore. Questo modello viene utilizzato per calcolare un nuovo sottoinsieme di soluzioni possibili nella successiva fase computazionale, con l'intenzione di soddisfare al meglio le preferenze del decisore. In altre procedure, il modello di preferenza che appare tra la fase di dialogo è quello di calcolo è implicito. Tuttavia è utile quando può essere esplicitamente indicato al decisore per la sua approvazione. Per questo, il modello di preferenza dovrebbe essere facilmente comprensibile, e il trattamento delle informazioni relative alla preferenza che porta al modello dovrebbe essere intelligibile per il decisore. Le regole derivanti dalla teoria del DRSA soddisfano entrambe queste esigenze. Vediamo di seguito quali sono gli step dell'ottimizzazione proposta.

Partiamo dal presupposto che la procedura interattiva sta esplorando l'insieme delle possibili soluzioni di un problema di ottimizzazione multi-obiettivo.

La procedura è composta dai seguenti passaggi, dove X è un insieme di soluzioni e $f_i: X \rightarrow \mathbb{R}$ $i=1, \dots, m$, sono le funzioni obiettivo considerate che devono essere ottimizzate (fig.24):

- 1) Generare un insieme rappresentativo di soluzioni possibili che siano Pareto-ottimali;
- 2) Presentare l'insieme delle soluzioni al decisore;

- 3) Se il decisore è soddisfatto da una delle soluzioni proposte e la soluzione è Pareto efficiente allora questa sarà la soluzione ottimale e la procedura si ferma, altrimenti si passa alla fase successiva;
- 4) Chiedere al decisore di individuare un sottoinsieme di soluzioni “buone” fra quelle proposte;
- 5) Applicare il DRSA al campione di soluzioni che sono state suddivise in “buone” e “altre” al fine di indurre una serie di regole decisionali con la seguente sintassi:
se $f_{i_1}(x) \leq \alpha_{i_1}$ e ... e $f_{i_p}(x) \leq \alpha_{i_p}$ allora la soluzione è “buona”, $\{i_1, \dots, i_p\} \subseteq \{1, \dots, n\}$;
- 6) Presentare alcune delle regole ottenute al decisore;
- 7) Chiedere al decisore di selezionare la regola decisionale più adeguata ad esprimere le sue preferenze fra quelle che gli sono state presentate;
- 8) Aggiungere i vincoli $f_{i_1}(x) \leq \alpha_{i_1}$ e ... e $f_{i_p}(x) \leq \alpha_{i_p}$ provenienti dalla regola selezionata dal decisore di cui al punto 7 all'insieme di vincoli del problema di ottimizzazione per focalizzare la regione delle soluzioni più interessanti dal punto di vista delle preferenze del decisore.
- 9) Ritorno allo step 1.

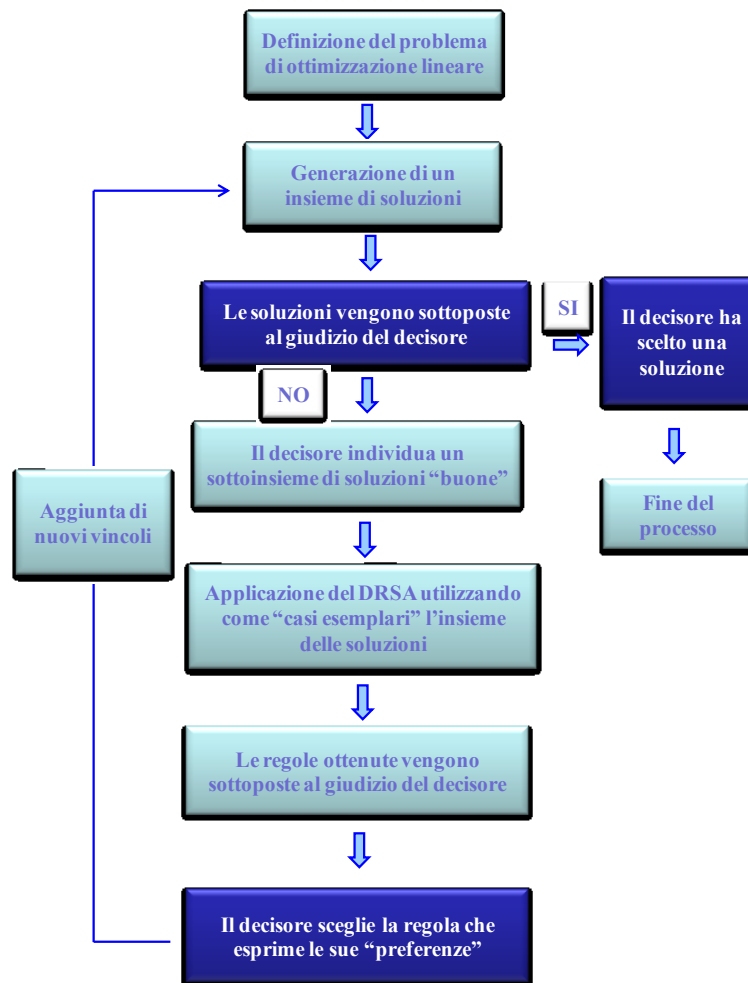


Figura 24 Schema dell'applicazione dell'IMO-DRSA

Nella fase di calcolo dello step 1 è possibile utilizzare un qualsiasi metodo di ottimizzazione multiobiettivo che trovi un insieme di soluzioni Pareto-ottimali (una soluzione rappresenta un ottimo di Pareto se non esiste nessuna altra soluzione che sia migliore rispetto a tutti gli obiettivi) o una sua approssimazione. Le soluzioni generate allo step 1 dovranno costituire un campione rappresentativo di tutte le soluzioni del problema. Tuttavia le soluzioni presentate al decisore, nello step 2, dovranno essere un loro sottoinsieme per evitare che il decisore fornisca informazioni non attendibili.

Nello step 3 il decisore può scegliere una soluzione, tra quelle presentate, come pienamente soddisfacente; in questo caso il processo ha termine, altri si passa alla fase successiva.

Nello step 4 il decisore suddivide le soluzioni proposte nelle classi di “buono” e “altri”, osservando che “buono” sono le soluzioni relativamente buone rispetto al resto del campione di soluzioni proposte al decisore. Nel caso in cui il decisore non riesce ad effettuare tale classificazione si può chiedere al decisore di specificare alcuni requisiti minimi del tipo $f_{i1}(x) \leq \alpha_{i1}$ e... e $f_{ip}(x) \leq \alpha_{ip}$ che possono essere utilizzati come vincoli del problema di ottimizzazione.

Nello step 5 viene applicata il DRSA considerando come casi esemplari le soluzioni dello step 4, le regole così estratte hanno la sintassi corrispondente alla minimizzazione della funzione obiettivo. Nel caso di massimizzazione di una delle funzione obiettivo f_i , la condizione relativa a questo obiettivo nella regola decisionale avrà la seguente sintassi: $f_{i1}(x) \geq \alpha_{i1}$.

Nello step 6 un sottoinsieme delle regole estratte viene presentato al decisore che ne sceglie una come rappresentativa delle sue preferenze (step 7), ciò equivale a fissare alcuni limiti superiori alle funzioni obiettivo da minimizzare f_i .

Nello step 8 i vincoli derivanti dalla regola scelta nello step precedente vengono aggiunti al problema di ottimizzazione.

La limitazione sull'insieme di soluzioni possibili non deve essere considerata come irreversibile poiché il decisore può ritrattare sull'insieme delle soluzioni considerate in una delle iterazione precedenti e continuare da questo punto. Questo è nello spirito del procedimento di apprendimento orientato all'ottimizzazione multiobiettivo interattiva, cioè d'accordo con l'idea che la procedura interattiva permette al decisore di imparare circa le sue preferenze e circa il “modello” delle soluzioni possibili.

Si osservi infine che l'insieme delle soluzioni Pareto-ottimali ridotto dai vincoli $f_{i1}(x) \leq \alpha_{i1}$ e... e $f_{ip}(x) \leq \alpha_{ip}$ è certamente non vuoto se i vincoli provengono da un'unica regola decisionale, altrimenti nel caso in cui i vincoli provengono da più regole, l'insieme delle soluzioni potrebbe essere vuoto. In quest'ultimo caso il decisore dovrà rivedere la scelta delle regole.

5.5.2.1 Definizione del problema di ottimizzazione

Gli interventi di manutenzione eseguiti sui ponti comportano un incremento della vita utile degli stessi ma al contempo comportano all'ente gestore dei costi, e causano dei disagi al traffico, spesso non indifferenti, soprattutto se i percorsi alternativi sono lunghi o non adeguati ad accogliere il traffico che vi si riversa.

Pertanto nella definizione del problema di ottimizzazione che permetta la scelta, da parte dell'ente gestore, dei ponti sui quali intervenire prima, nell'ambito del presente studio si propongono i seguenti parametri:

- C = costi degli interventi manutentivi;
- V_u = incremento di vita utile;
- I = importanza della strada;
- D = durata dei lavori;
- S = impatto dei lavori sulla viabilità;
- P = presenza o meno di percorsi alternativi.

Per ciascuno dei parametri si prevedono i seguenti domini:

- Il parametro " C " si riferisce al costo stimato per l'esecuzione dei lavori e il suo valore è proprio pari al valore del costo;
- Il parametro " V_u " si riferisce all'incremento di vita utile del ponte a seguito dei lavori. Il valore che può assumere è pari a:
 - B se l'incremento di vita utile è basso, cioè se l'intervento comporta un incremento di vita utile pari a 20 anni;
 - M se l'incremento di vita utile è medio, cioè se l'intervento comporta un incremento di vita utile pari a 30 anni;
 - A se l'intervento di vita utile è alto, cioè se comporta un incremento di vita utile pari a 50 anni (come nel caso di interventi di demolizione o parziale demolizione e ricostruzione);
- Il parametro " P " si riferisce all'importanza della strada in relazione alla rete e il valore che può assumere è assegnato in analogia a quanto previsto dal *D.M 05/11/2001 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade"*:
 - B se l'importanza della strada è bassa, cioè se il ponte oggetto dell'intervento si trova su una rete locale;

- M se l'importanza della strada è media, cioè se il ponte oggetto dell'intervento si trova su una rete principale e o secondaria;
- A se l'importanza della strada è alta, cioè se il ponte oggetto dell'intervento si trova su una rete primaria;
- Il parametro “D” si riferisce alla durata dei lavori e il valore che può assumere è pari a:
 - B se la durata dei lavori è bassa, cioè se la durata dell'intervento è inferiore ad un mese;
 - M se la durata dei lavori è media, cioè se la durata dei lavori è compresa tra un mese e 6 mesi;
 - A se la durata dei lavori è alta, cioè se la durata dei lavori è superiori a 6 mesi;
- Il parametro “S” si riferisce all'impatto dei lavori sulla viabilità e il valore che può assumere è pari a:
 - B se l'impatto dei lavori è basso, cioè se non è prevista nessuna interruzione del traffico o se è prevista la chiusura di una corsia su una strada a più corsie per senso di marcia;
 - M se l'impatto dei lavori è medio, cioè se è prevista la chiusura parziale della carreggiata e bisogna procedere a senso unico alternato;
 - A se l'impatto dei lavori è alto, cioè se è prevista la deviazione del traffico;
- Il parametro “P” si riferisce all'adeguatezza o meno di eventuali percorsi alternativi e il valore che può assumere è pari a:
 - B se esistono percorsi alternativi lunghi su strade non adeguate;
 - M se esistono percorsi alternativi brevi su strade non adeguate o percorsi alternativi lunghi su strade adeguate;
 - A se esistono percorsi alternativi brevi su strada adeguate.

Nello step 1 della procedura IMO-DRSA bisogna generare un insieme di soluzioni pareto-ottimali. Il metodo utilizzato nell'ambito della presente tesi è quello della programmazione lineare di tipo 0-1, nella quale le variabili sono costrette ad assumere

valori binari. Nella fattispecie le variabili si riferiscono agli interventi manutentivi definiti per ciascun ponte, e vengono definite nel seguente modo:

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{se l'intervento viene eseguito} \\ 0 & \text{se l'intervento non viene eseguito} \end{cases}$$

➤ Funzioni da minimizzare:

- Costo totale:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i x_i$$

Dove con C_i si indica il costo dell'intervento i -esimo.

➤ Funzioni da massimizzare:

- Il numero di ponti il cui intervento manutentivo incrementa la vita utile di “almeno” 30 anni:

$$f_1 = \sum_{i:V_i \geq 30} x_i$$

- Il numero di ponti il cui intervento manutentivo incrementa la vita utile di “almeno” 50 anni:

$$f_2 = \sum_{i:V_i \geq 50} x_i$$

- Il numero di ponti in cui l'importanza della strada è “almeno” alta:

$$f_3 = \sum_{i:I_i \geq A} x_i$$

- Il numero di ponti in cui l'importanza della strada è “almeno” media:

$$f_4 = \sum_{i:I_i \geq M} x_i$$

- Il numero di ponti in cui l'importanza della strada è “al massimo” media:

$$f_5 = \sum_{i:I_i \leq M} x_i$$

- Il numero di ponti in cui l'importanza della strada è “al massimo” bassa:

$$f_6 = \sum_{i:I \leq B} x_i$$

- Il numero di ponti in cui la durata dei lavori è “al massimo” media:

$$f_7 = \sum_{i:D \leq M} x_i$$

- Il numero di ponti in cui la durata dei lavori è “al massimo” bassa:

$$f_8 = \sum_{i:D \leq B} x_i$$

- Il numero di ponti in cui l’impatto dei lavori sulla viabilità è “al massimo” media:

$$f_9 = \sum_{i:S \leq M} x_i$$

- Il numero di ponti in cui l’impatto dei lavori sulla viabilità è “al massimo” bassa:

$$f_{10} = \sum_{i:S \leq B} x_i$$

- Il numero di ponti in cui il percorso alternativo è “almeno” alto:

$$f_{11} = \sum_{i:P \geq A} x_i$$

- Il numero di ponti in cui il percorso alternativo è “almeno” media:

$$f_{12} = \sum_{i:P \geq M} x_i$$

- Il numero di ponti in cui il percorso alternativo è “al massimo” media:

$$f_{13} = \sum_{i:P \leq M} x_i$$

- Il numero di ponti in cui il percorso alternativo è “al massimo” bassa:

$$f_{14} = \sum_{i:P \leq B} x_i$$

Tra tutti i parametri scelti, il parametro I (importanza della strada) e il parametro P (presenza di percorsi alternativi), sono stati considerati sia come parametri da massimizzare sia come parametri da minimizzare. Questo perché per tali parametri da una parte l'intervento è reso necessario, dall'altra la realizzazione dell'intervento amplifica i disagi provocati al traffico. Ad esempio l'assenza di percorsi alternativi, rende auspicabile l'intervento perché unica via di collegamento, ma al contempo rende problematica la deviazione del traffico nel caso in cui i lavori richiedano l'interruzione del traffico.

➤ **Vincoli :**

Nei problemi di ottimizzazione i vincoli sono rappresentati da funzioni delle variabili del problema $[x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$, dove con n si indica il numero di variabili, che nella fattispecie indica il numero di ponti che necessitano di interventi. Se con m viene indicato il numero di vincoli, si ha:

$$\begin{cases} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_1 \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_2 \\ \dots \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_m \end{cases}$$

Nella programmazione lineare i vincoli sono funzioni lineari delle variabili, il sistema precedente diviene pertanto:

$$\begin{cases} g_1 = \alpha_{11}x_1 + \alpha_{12}x_2 + \dots + \alpha_{1n}x_n \leq b_1 \\ g_2 = \alpha_{21}x_1 + \alpha_{22}x_2 + \dots + \alpha_{2n}x_n \leq b_2 \\ \dots \\ g_m = \alpha_{m1}x_1 + \alpha_{m2}x_2 + \dots + \alpha_{mn}x_n \leq b_m \end{cases}$$

Nel particolare problema esaminato i vincoli hanno il compito di tradurre in linguaggio matematico le esigenze dell'ente gestore. Ad esempio indicando con "b" il budget disponibile, il costo C deve mantenersi inferiore a b , pertanto il vincolo può essere espresso secondo la formula seguente :

$$C = \sum_{i=1, N} C_i \cdot x_i \leq b$$

Analogamente, se si intende intervenire su un numero massimo "a" di ponti appartenenti a una rete importante, il vincolo diviene:

$$\sum_{i: I \geq A} x_i \geq a$$

In generale tutte le funzioni, da massimizzare o da minimizzare, possono essere viste come vincoli.

5.6 VANTAGGI DEL SISTEMA PROPOSTO

I principali sistemi utilizzati per individuare il grado di urgenza delle attività manutentive sono basati sull'utilizzo di indici sintetici che descrivono le condizioni dei ponti combinando i diversi parametri utilizzati (degrado della struttura, importanza del ponte,...) con il relativo peso. Tuttavia tali modelli, se pur di facile applicazione, presentano delle limitazioni legate alla valutazione dei pesi che vengono attribuiti senza applicare una procedura sistematica e ben precisata, di conseguenza i risultati ottenuti risultano poco chiari e comprensibili all'ente gestore.

Il sistema di supporto decisionale proposto, invece, è un utile strumento per la definizione di piani ottimali di manutenzione e permette all'ente gestore di comprendere i risultati ottenuti durante il processo e di poterli modificare in funzione delle sue preferenze.

La metodologia proposta, inoltre, permette di:

- ✓ Trattare dati caratterizzati da vaghezza o imprecisione;
- ✓ Utilizzare dati qualitativi;
- ✓ Evidenziare le eventuali relazioni causa-effetto fra i dati disponibili, sottolineando l'importanza ed il ruolo strategico di alcune informazioni e l'irrelevanza di altre;
- ✓ Costruire un modello di preferenze in termini di regole decisionali del tipo "if...then..";
- ✓ Individuare le regole che supportano ogni decisione;
- ✓ Facilitare la comprensione al decision-maker, in quanto le regole estratte riflettono le sue scelte.

Tale strumento presenta importanti vantaggi dal punto di vista della flessibilità e della trasparenza rispetto alle altre metodologie perché viene costruito sulle preferenze del decisore; pertanto può essere aggiornato periodicamente nella scelta dei parametri considerati in conseguenza della pratica e dell'esperienza acquisita o delle diverse politiche di gestione. Il sistema proposto permette all'ente gestore di poter motivare le sue scelte nei confronti degli enti finanziatori.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Greco, S., Matarazzo, B., & Slowinski, R. (2002) “Rough approximation by dominance relations”. *International Journal of Intelligent Systems* , 17 (2), 153-171.
- [2] <http://idss.cs.put.poznan.pl/site/4emka.html>
- [3] Greco, S., Matarazzo, B., Slowinski, R., (2008). Dominance-based Rough Set Approach to Interactive Multiobjective Optimization. *In: Branke, J., Deb, K., Miettinen, K., Slowinski, R. (eds.), Multiobjective Optimization: Interactive and Evolutionary Approaches*, LNCS 5252, State-of-the-Art Surveys, Springer, Berlin, pp. 121-155.

CAPITOLO 6

CASI DI STUDIO

6.1 INTRODUZIONE

Nel presente capitolo vengono presentati i risultati relativi all'applicazione del sistema di supporto decisionale proposto su alcuni ponti oggetti di studio situati lungo la rete stradale siciliana.

In particolare sono stati individuati tre casi di studio che comprendono le tipologie di ponti maggiormente presenti sul territorio italiano:

- 1° Caso: studio dei ponti presenti sulla strada statale 385 di collegamento tra Catania e Caltagirone;
- 2° Caso: studio del ponte sul fiume Cassabile lungo la strada statale 115 di collegamento fra Trapani e Siracusa;
- 3° Caso: studio del ponte sul fiume D'Agro' e del ponte sul fiume Fiumedinisi lungo la SS114 di collegamento fra Messina e Catania.

I casi studio esaminati hanno permesso di effettuare una prima verifica di attendibilità dei risultati ottenuti con la metodologia di gestione proposta. Naturalmente questa deve intendersi come una prima fase di test, ulteriori confronti dovranno essere condotti applicando il sistema su larga scala, eventualmente simultaneamente con altre procedure consolidate. Va tuttavia sottolineato che la caratteristica fondamentale del metodo proposto è quella di "adattarsi" alle esigenze del decisore grazie a una forma di apprendimento induttivo. Eventuali incongruenze tra il modello teorico e la rete gestita, presenti nella fase di inizializzazione del metodo, saranno corrette automaticamente man mano che l'ente gestore impone le proprie preferenze. Questo rappresenta un indubbio vantaggio rispetto agli altri metodi esistenti in letteratura.

6.2 FASI DELLO STUDIO

L'applicazione del sistema di supporto decisionale proposto ai casi di studio individuati è avvenuta in quattro fasi principali:

- ✓ Prima fase: Acquisizione dei dati;

Nella prima fase dello studio è stato necessario acquisire le informazioni necessarie all'implementazione del sistema decisionale proposto con riferimento ai:

- dati che caratterizzano le caratteristiche del territorio, del traffico e della rete;
- dati che caratterizzano la struttura e lo stato di degrado;

Questi ultimi sono stati rilevati a seguito delle ispezioni visive condotte sui ponti oggetto di studio ed eseguite sul campo attraverso la compilazione delle schede realizzate nell'ambito della presente tesi.

- ✓ Seconda fase: Determinazione del grado di urgenza delle attività manutentive;

Nella seconda fase dello studio è stato ricavato il grado di urgenza delle attività manutentive per ciascun ponte a partire dalle regole estratte attraverso l'applicazione della teoria del Dominance Based Rough Set.

- ✓ Terza fase: Stima dei costi

Nella terza fase dello studio, a partire dallo stato di degrado evidenziato a seguito delle ispezioni, è stato individuato il tipo di intervento più appropriato e sono stati stimati i costi.

- ✓ Quarta fase: Ottimizzazione degli interventi

Nella terza fase è stata eseguita la procedura di ottimizzazione degli interventi ipotizzando degli scenari di preferenza da parte del decisore.

6.3 1° CASO DI STUDIO: PONTI SULLA STRADA STATALE 385

Il primo caso di studio ha riguardato l'applicazione della metodologia precedentemente esposta (cap. 5) ai ponti presenti sulla strada statale 385 della rete stradale italiana, di proprietà dell'ente ANAS.

La strada statale 385, costituiva la via di collegamento principale tra Catania e Caltagirone prima della realizzazione della strada statale 417; è lunga 55,150 km e ricade nei comuni di Siracusa, Palagonia, Mineo e Caltagirone. La strada statale 385 si innesta con la strada statale 194 presso il bivio Jazzotto e con la strada statale 124 al bivio San Bartolomeo ed è classificata come strada extraurbana secondaria. Sulla strada statale sono presenti 14 ponti (fig.1).

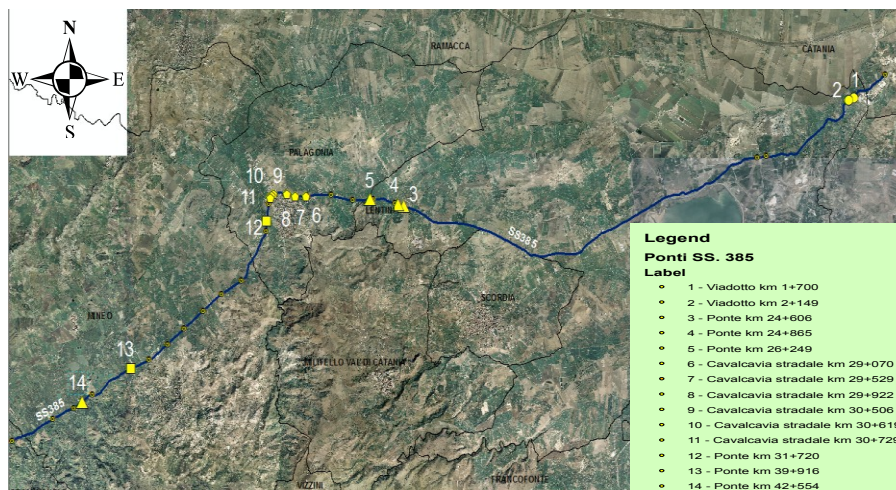


Figura 1 Strada Statale 385

Tale arteria rappresenta un'arteria secondaria e, attualmente, non risulta interessata da elevati volumi di traffico a causa della presenza di collegamenti alternativi. I ponti riscontrati sono principalmente in calcestruzzo armato precompresso con schema a travata, altri in muratura con schema ad arco. Le principali caratteristiche sono riassunte nella tabella 1.

Tabella 1 Caratteristiche dei ponti sulla SS385

SS 385	Strada Statale 385			
	Palagonia (Catania - Palagonia) 55 km			
Progressiva	Tipologia	Lunghezza (m)	Materiale	Schema statico
1+700	viadotto	70,00 c.a.p.		travate semplicemente appoggiate
2+149	viadotto	106,00 c.a.p.		travate semplicemente appoggiate
24+606	ponte	12,00 muratura mista+cls		ponte collaborante arco-telaio
24+865	ponte	23,00 muratura mista+c.a.		ponte collaborante arco-telaio
26+249	ponte	10,00 muratura mista+c.a.		ponte collaborante arco-telaio
29+070	cavalcavia	14,00 c.a.p.		travate semplicemente appoggiate
29+529	cavalcavia	14,00 c.a.p.		travate semplicemente appoggiate
29+922	cavalcavia	14,00 c.a.p.		travate semplicemente appoggiate
30+506	cavalcavia	26,00 c.a.p.		travate semplicemente appoggiate
30+619	cavalcavia	14,00 c.a.p.		travate semplicemente appoggiate
30+729	cavalcavia	26,00 c.a.p.		travate semplicemente appoggiate
31+720	ponte	29,00 c.a.p.		travate semplicemente appoggiate
39+916	ponte	35,00 c.a.		travate semplicemente appoggiate
42+554	ponte	12,00 muratura a blocchi		ponte ad arco

6.3.1 Acquisizione dei dati

Sono stati eseguiti dei sopralluoghi mirati alla compilazione delle schede di primo livello, proposte nei capitoli precedenti. Tali schede consentono di reperire tutti i dati necessari a definire i valori di alcuni dei criteri che stanno alla base dell'applicazione della successiva analisi multicriteriale. In particolare le ispezioni hanno permesso di determinare le tipologie di danno presenti, la superficie danneggiata, gli elementi danneggiati e la presenza o meno dei dispositivi antisismici.

Per quanto riguarda i dati relativi all'anno di costruzione, al TGM (traffico medio giornaliero), e alla percentuale di traffico pesante, sono stati desunti dal database dell'ANAS. Le caratteristiche del terreno di fondazione e i valori relativi all'instabilità idrogeologica sono stati desunti dal Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico predisposto da Regione Sicilia [1]. Il valore di picco dell'accelerazione al suolo è stata ricavata utilizzando la classificazione sismica prevista dalle *Norme tecniche per le costruzioni (D.M.2008)*[2]. Infine è stato utilizzato un software GIS per la localizzazione dei ponti all'interno della rete e per la valutazione di eventuali percorsi alternativi.

Viene riportata successivamente la descrizione dei ponti oggetto di studio e, a titolo esemplificativo, per due di loro viene riportata la relativa scheda compilata durante i rilievi su campo; per tutti gli altri si fornisce una descrizione sintetica delle caratteristiche e del degrado rilevato.

6.3.1.1 Descrizione del ponte al km 1+700 e relativa compilazione della scheda di I livello

Il viadotto alla progressiva km.ca 1+700 è sito nel comune di Lentini in provincia di Siracusa. Il viadotto è realizzato in calcestruzzo armato precompresso (fig.2), possiede uno sviluppo complessivo di 70 m ed una larghezza di 10,10 m. Il ponte è composto da due campate con un andamento rettilineo. Le spalle del viadotto sono del tipo a gravità e sono realizzate in calcestruzzo armato. La pila centrale, realizzata anch'essa in calcestruzzo armato, è del tipo a fusto unico. La pila è sormontata dal pulvino, realizzato anch'esso in calcestruzzo armato. I due impalcati hanno una struttura a graticcio di travi in calcestruzzo armato precompresso e soletta sovrastante gettata in opera; ognuno di essi possiede tre travi longitudinali prefabbricate, staticamente appoggiate, intervallate da tre traversi

intermedi e da due traversi disposti in testata, realizzati in calcestruzzo armato gettato in opera. Non sono presenti apparecchi di appoggio, mentre sono presenti apparecchi di giunto (giunto tampone) realizzati con profili metallici a “T”, inseriti sotto la pavimentazione e muniti di ala superiore interna sagomata. La strada è composta da 2 corsie, una per senso di marcia; la larghezza della carreggiata è pari a 7 metri, la larghezza di ciascuna corsia è pari a 3 m, mentre quella delle banchine è pari a 0,50 m. La pavimentazione è realizzata in conglomerato bituminoso. Ai margini della carreggiata, non sono presenti marciapiedi, mentre sono poste in opera barriere di sicurezza di tipo metallico a doppia onda con corrimano superiore.



Figura 2 Ponte al km 1+700

Di seguito si riportano le immagini relative alle schede compilate durante il sopralluogo (fig. 3).



Università degli Studi di Catania
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

**SCHEDA DI 1° LIVELLO PER IL RILEVAMENTO DEL DEGRADO PER I PONTI A
TRAVATA IN CALCESTRUZZO ARMATO O IN C. A. P.**

Sezione 1	IDENTIFICAZIONE PONTE Nome ponte: <u>SS385 km 1+700</u> Provincia: <u>SIRACUSA</u> Comune: <u>LENTINI</u> Operatore: _____ Data del rilievo: _____	
	LOCALIZZAZIONE Coordinate piane UTM: est <u>150134158</u> m nord <u>312208163</u> m Altitudine: <u>147,00</u> m	TIPOLOGIA STRADA Strada: statale <input checked="" type="checkbox"/> regionale <input type="checkbox"/> provinciale <input type="checkbox"/> comunale <input type="checkbox"/> Numero strada: <u>S/S 385</u> Classificazione: autostrada <input type="checkbox"/> extraurb. principale <input type="checkbox"/> extraurb. secondaria <input checked="" type="checkbox"/> Progressiva: dal km <u>1140</u> al km <u>1170</u>
Sezione 2	DATI GEOMORFOLOGICI Morfologia del sito: pianeggiante <input type="checkbox"/> ondulato <input checked="" type="checkbox"/> Posizione del ponte rispetto al pendio: ortogonale <input checked="" type="checkbox"/> parallelo <input type="checkbox"/> Falde: assenti <input type="checkbox"/> presenti <input type="checkbox"/> non determinabili <input checked="" type="checkbox"/> Fenomeni franosi: assenti <input type="checkbox"/> presenti <input checked="" type="checkbox"/> non determinabili <input type="checkbox"/>	
	TERRENO FONDAZIONE Tipologia: ammassi rocciosi <input checked="" type="checkbox"/> terreno granulare <input type="checkbox"/> terreno limoso o argilloso <input type="checkbox"/>	

Figura 3 Schede compilate per il rilievo ponte al km 1+700



Università degli Studi di Catania
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

RAPPRESENTAZIONE SEMPLIFICATA DEL PONTE (SCHIZZO)

CALTAGIRONE ← Sx Dx → CATANIA

PARTE NON ACCESSIBILE

Sezione 4

ACCESSIBILITA'

totalmente accessibile parzialmente accessibile inaccessibile

FOTO

Numero di foto 1217

Nome file allegati 385,1+700

Segue Figura 3 Schede compilate per il rilievo ponte al km 1+700



Università degli Studi di Catania
 Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

IMPALCATO		DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI			NOTE
		Estensione			
		<10%	10% - 60%	> 60%	
Sezione 5.1 calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo	>			
	Calcestruzzo ammalorato	>			
	Distacco copriferro				
	Armature lenta ossidata				
	Armature di precompressione ossidata				
	Riduzione armatura di precompressione				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				

Segue Figura 3 Schede compilate per il rilievo ponte al km 1+700



Università degli Studi di Catania
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

		DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI			NOTE	
		Estensione				
Sezione 5.2	SPALLA $\mathcal{D} \times$	<10%	10% - 60%	> 60%		
	calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo				
Calcestruzzo ammalorato						
Distacco copriferro						
Armature ossidate						
Fessure orizzontali						
Fessure verticali						
Fessure diagonali						
Danni da urto						
Vegetazione intrusiva		X				
Scalzamento						
Fuori piombo						
Apparecchi d'appoggio degradati						
muratura		Muratura ammalorata				
		Efflorescenze				
	Distacco dell'arco					
	Fessure orizzontali					
	Fessure verticali					
	Fessure trasversali					
	Polverizzazione giunti malta					
	Vegetazione intrusiva					
	Scalzamento					
	Fuori piombo					
Apparecchi d'appoggio degradati						

		DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI			NOTE	
		Estensione				
Sezione 5.2	SPALLA	<10%	10% - 60%	> 60%		
	calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo				
Calcestruzzo ammalorato						
Distacco copriferro						
Armature ossidate						
Fessure orizzontali						
Fessure verticali						
Fessure diagonali						
Danni da urto						
Vegetazione intrusiva						
Scalzamento						
Fuori piombo						
Apparecchi d'appoggio degradati						
muratura		Muratura ammalorata				
		Efflorescenze				
	Distacco dell'arco					
	Fessure orizzontali					
	Fessure verticali					
	Fessure trasversali					
	Polverizzazione giunti malta					
	Vegetazione intrusiva					
	Scalzamento					
	Fuori piombo					
Apparecchi d'appoggio degradati						

Segue Figura 3 Schede compilate per il rilievo ponte al km 1+700




Università degli Studi di Catania
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
PILA	Estensione			NOTE	
	<10%	10% - 60%	> 60%		
calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo				
	Calcestruzzo ammalorato				
	Distacco copriferro				
	Armature ossidate				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				
	Scalzamento				
	Fuori piombo				
	Apparecchi d'appoggio degradati				
	muratura	Muratura ammalorata			
		Efflorescenze			
Distacco dell'arco					
Fessure orizzontali					
Fessure verticali					
Fessure trasversali					
Polverizzazione giunti malta					
Vegetazione intrusiva					
Scalzamento					
Fuori piombo					
Apparecchi d'appoggio degradati					

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
PILA	Estensione			NOTE	
	<10%	10% - 60%	> 60%		
calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo				
	Calcestruzzo ammalorato				
	Distacco copriferro				
	Armature ossidate				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				
	Scalzamento				
	Fuori piombo				
	Apparecchi d'appoggio degradati				
	muratura	Muratura ammalorata			
		Efflorescenze			
Distacco dell'arco					
Fessure orizzontali					
Fessure verticali					
Fessure trasversali					
Polverizzazione giunti malta					
Vegetazione intrusiva					
Scalzamento					
Fuori piombo					
Apparecchi d'appoggio degradati					

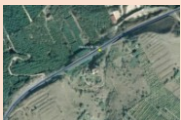



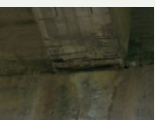

Segue Figura 3 Schede compilate per il rilievo ponte al km 1+700


 Università degli Studi di Catania
 Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Sezione 6	DANNI AD ELEMENTI NON STRUTTURALI	Estensione			NOTE
		<10%	10% - 60%	> 60%	
	Pavimentazione danneggiata				
	Giunti degradati			X	
	Parapetti danneggiati o assenti				
	Guardrail danneggiati o assenti				
	Cordoli degradati				
	Scarichi ostruiti o danneggiati				
	Pali illuminazione danneggiati				

Segue **Figura 3** Schede compilate per il rilievo ponte al km 1+700

Il viadotto presenta fenomeni di corrosione delle barre di armatura ed espulsione del copriferro (sia nell'intradosso dell'impalcato che nei collegamenti trave-spalla). Si osserva inoltre il deterioramento dei giunti e la presenza di vegetazione intrusiva (fig.4).

SS 385 Km 1+700		Viadotto a travata in calcestruzzo	
Inquadramento territoriale		Foto	
			
DEGRADO			
Vegetazione intrusiva		Ammorbamento giunti	
Distacco copriferro e corrosione armature (trave-spalla)		Distacco Copriferro e corrosione armature (impalcato)	

CRITERI CONDIZIONALI	VALORI
Anno di costruzione	2
Materiale	4
Ambiente	1
Terreno fondazione	1
Tipologia di danno	2
Superficie danneggiata	1
Elementi danneggiati	3
Zona sismica	3
Dispositivi antisismici	2
Schema statico	3
Dissesto idrogeologico	1
TGM	1
Traffico pesantissimo	2
Viabilità strategica	1
Percorsi alternativi	1

Figura 4 Deterioramento e criteri condizionali del ponte al km1+700

6.3.1.2 Descrizione del ponte al km 2+149

Il viadotto alla progressiva km.ca 2+149 è sito nel comune di Lentini in provincia di Siracusa. Il viadotto possiede uno sviluppo complessivo di 106 m ed una larghezza di 10,10 m; è composto da tre campate ed ha un andamento rettilineo (fig.5).

Le spalle del viadotto sono del tipo a gravità e sono realizzate in calcestruzzo armato. Le due pile, realizzate anch'esse in calcestruzzo armato, sono del tipo a fusto unico, hanno sezione rettangolare ed un'altezza massima di 16,40 m. Sopra le pile troviamo il pulvino, realizzato in calcestruzzo armato, che possiede un'altezza di 2,10 m. I tre impalcati hanno una struttura a graticcio di travi in calcestruzzo armato precompresso e soletta sovrastante gettata in opera; ognuno di essi possiede tre travi longitudinali prefabbricate, staticamente appoggiate, intervallate da tre traversi intermedi e da due traversi disposti in testata, realizzati in calcestruzzo armato gettato in opera. Non sono presenti apparecchi di appoggio, mentre sono presenti apparecchi di giunto (giunto tampone) realizzati con profili metallici a "T", inseriti sotto la pavimentazione e muniti di ala superiore interna sagomata.



Figura 5 Ponte al km 2+149

La strada è composta da 2 corsie, una per senso di marcia; la larghezza della carreggiata è pari a 7,50 metri, la larghezza di ciascuna corsia è pari a 3 m, mentre quella delle banchine è pari a 0,75 m.

In figura 6 sono riportate alcune immagini da cui si evince lo stato dei fenomeni di corrosione delle barre di armatura ed espulsione del copriferro nell'impalcato e il deterioramento dei giunti (fig. 6).





SS 385 Km 2+149		Viadotto a travata in calcestruzzo		CRITERI CONDIZIONALI	VALORI
Inquadramento territoriale		Foto		Anno di costruzione	2
				Materiale	4
				Ambiente	1
				Terreno fondazione	1
				Tipologia di danno	2
				Superficie danneggiata	1
				Elementi danneggiati	3
				Zona sismica	3
				Dispositivi antisismici	2
				Schema statico	3
				Dissesto idrogeologico	1
				TGM	1
				Traffico pesantissimo	2
				Viabilità strategica	1
				Percorsi alternativi	1
DEGRADO					
Distacco coprifermo e corrosione armature (impalcato)		Ammaloramento giunti			
					

Figura 6 Deterioramento e criteri condizionali del ponte al km 2+149

6.3.1.3 Descrizione del ponte al km 24+606

Il ponte alla progressiva km.ca 24+606 è sito nel comune di Lentini in provincia di Siracusa. Il ponte possiede uno sviluppo complessivo di 12,00 m ed una larghezza di 10,30 m; è composto da una campata ad arco fortemente ribassato in muratura a blocchi di tufo ed ha un andamento rettilineo (fig.7).

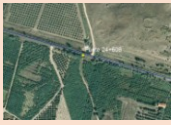

Le spalle del ponte, del tipo a gravità e realizzate in muratura, sono state allargate mediante l'utilizzo di muri in c.a. di sezione rettangolare, posti lateralmente alla struttura, con sovrastante soletta gettata in opera. L'impalcato, molto probabilmente in origine realizzato con le metodologie classiche dei ponti ad arco, è stato nel tempo oggetto di interventi di ristrutturazione, volti ad assicurarne la stabilità ed a consentire l'allargamento della sede viaria, dando origine alla struttura sopra descritta. La strada è composta da 2 corsie, una per senso di marcia; la larghezza della carreggiata è pari a 7,50 metri, la larghezza di ciascuna corsia è pari a 3 m, mentre quella delle banchine è pari a 0,75 m.



Figura 7 Ponte al km 24+606

Il ponte presenta uno stato di degrado avanzato in corrispondenza dell'intradosso dell'impalcato, in corrispondenza degli ampliamenti realizzati in c.a., dovuti alla corrosione delle armature ed al conseguente distacco del calcestruzzo; delle fessurazioni longitudinali lungo l'intradosso dell'arco su entrambi i lati dovuti probabilmente all'ampliamento eseguito e quindi alla modifica dei carichi permanenti, ed infine presenta porzioni di muratura ammalorata (fig.8).

Questo ponte rappresenta un caso particolare in quanto gli ampliamenti successivamente realizzati ne hanno modificato in parte lo schema statico. Di ciò si è tenuto conto nella compilazione della scheda nello spazio dedicato alle NOTE. Lo stato di ammaloramento dell'allargamento in c.a. è stato segnalato nell'apposita sezione della scheda.

SS 385 Km 24+606		Ponte ad arco in muratura+cls		CRITERI CONDIZIONALI	VALORI
Inquadramento territoriale		Foto		Anno di costruzione	3
				Materiale	1
				Ambiente	1
				Terreno fondazione	1
				Tipologia di danno	2
				Superficie danneggiata	3
				Elementi danneggiati	3
				Zona sismica	2
				Dispositivi antisismici	2
				Schema statico	1
				Instabilità idrogeologica	1
				TGM	1
				Traffico pesantissimo	2
				Viabilità strategica	1
				Presenza di percorsi alternativi	1





DEGRADO			
Muratura ammalorata		Fessurazione intradosso arco	
Distacco coprifermo e corrosione armature (impalcato)		Guardrail divolto	

Figura 8 Deterioramento e criteri condizionali del ponte al km 24+606

6.3.1.4 Descrizione del ponte al km 24+865 e relativa compilazione della scheda di I livello

Il ponte alla progressiva km.ca 24+865 è sito nel comune di Lentini in provincia di Siracusa. Il ponte 24+865 è realizzato in muratura e possiede uno sviluppo complessivo di 23,20 m ed una larghezza di 10,30 m; è composto da due campate ad arco in muratura a blocchi di tufo (fig. 9).

La prima campata è del tipo a tutto sesto e presenta una lunghezza di 6 m, la seconda è ad arco ribassato ed ha uno sviluppo di 9 m. La struttura è ad andamento rettilineo. Le spalle del ponte, del tipo a gravità e realizzate in muratura, sono state allargate mediante l'utilizzo di muri in c.a. di sezione rettangolare, posti lateralmente alla struttura, con sovrastante soletta gettata in opera. La pila anch'essa in muratura, analogamente alle due spalle, è stata allargata mediante l'utilizzo di muri in cls di sezione rettangolare. L'impalcato, molto probabilmente in origine realizzato con le metodologie classiche dei ponti ad arco, è stato nel tempo oggetto di interventi di ristrutturazione, volti ad assicurarne


la stabilità ed a consentire l'allargamento della sede viaria, dando origine alla struttura mista sopra descritta, che presenta delle similitudini con quella descritta al paragrafo precedente.



Figura 9 Ponte al km 24+685

La strada è composta da 2 corsie, una per senso di marcia; la larghezza della carreggiata è pari a 7,50 metri, la larghezza di ciascuna corsia è pari a 3 m, mentre quella delle banchine è pari a 0,75 m. La pavimentazione è realizzata in conglomerato bituminoso. Ai margini della carreggiata, provvista di opere per l'evacuazione delle acque piovane, non sono presenti marciapiedi, mentre sono poste in opera barriere di sicurezza di tipo metallico a doppia onda con corrimano superiore infisso lungo i bordi dell'impalcato.

Di seguito si riportano le immagini relative alle schede compilate durante il sopralluogo (fig.10).



Università degli Studi di Catania
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

SCHEDA DI 1° LIVELLO PER IL RILEVAMENTO DEL DEGRADO PER I PONTI AD ARCO IN MURATURA

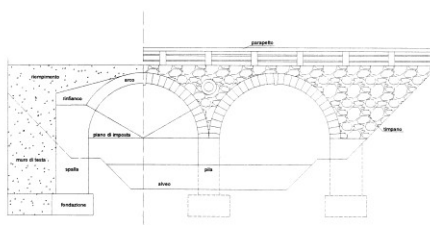
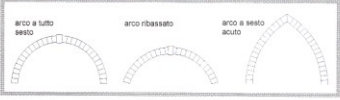
Sezione 1	IDENTIFICAZIONE PONTE Nome ponte: <u>SS385 km 24+865</u> Provincia: <u>SIRACUSA</u> Comune: <u>LENTINI</u> Operatore: _____ Data del rilievo: _____	
	LOCALIZZAZIONE Coordinate piane UTM: est <u>114148100199</u> nord <u>131720101313</u> Altitudine: <u>11416.1010</u> m	TIPOLOGIA STRADA Strada: statale <input checked="" type="checkbox"/> regionale <input type="checkbox"/> provinciale <input type="checkbox"/> comunale <input type="checkbox"/> Numero strada: <u>SS 385</u> Classificazione: autostrada <input type="checkbox"/> extraurb. principale <input type="checkbox"/> extraurb. secondaria <input checked="" type="checkbox"/> Progressiva: dal km <u>1241865</u> al km <u>1241898</u>
Sezione 2	DATI GEOMORFOLOGICI Morfologia del sito: pianeggiante <input checked="" type="checkbox"/> ondulato <input type="checkbox"/> Posizione del ponte rispetto al pendio: ortogonale <input checked="" type="checkbox"/> parallelo <input type="checkbox"/> Falde: assenti <input type="checkbox"/> presenti <input type="checkbox"/> non determinabili <input checked="" type="checkbox"/> Fenomeni franosi: assenti <input type="checkbox"/> presenti <input type="checkbox"/> non determinabili <input checked="" type="checkbox"/>	
	TERRENO FONDAZIONE Tipologia: ammassi rocciosi <input checked="" type="checkbox"/> terreno granulare <input type="checkbox"/> terreno limoso o argilloso <input type="checkbox"/>	

Figura 10 Schede compilate per il rilievo ponte al km 24+865



Università degli Studi di Catania
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Sezione 3	DESCRIZIONE Tipo: cavalcavia <input type="checkbox"/> ponte <input checked="" type="checkbox"/> viadotto <input type="checkbox"/> Anno di costruzione: _____ (certo <input type="checkbox"/> presunto <input type="checkbox"/> Lunghezza: _____m Larghezza: _____m Numero di campate: _____ Andamento: rettilineo <input checked="" type="checkbox"/> curvilineo <input type="checkbox"/>	ARCHI $\alpha \ll \alpha \ll \alpha$ $\alpha \ll \alpha \ll \alpha$ Tipologia: arco a tutto sesto <input checked="" type="checkbox"/> arco ribassato <input checked="" type="checkbox"/> arco a sesto acuto <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____  Materiale: pietra da taglio <input type="checkbox"/> pietrame in conci <input checked="" type="checkbox"/> mattoni <input type="checkbox"/> calcestruzzo <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____ Freccia: _____m Luce: _____m
	SPALLE Tipologia: a gravità <input checked="" type="checkbox"/> a sbalzo <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____ Materiale: muratura <input checked="" type="checkbox"/> cls <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____ Altezza massima spalle: _____m Numero apparecchi d'appoggio: _____	PILE Tipologia: singola <input checked="" type="checkbox"/> telaio <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____ Materiale: muratura <input checked="" type="checkbox"/> calcestruzzo <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____ Numero pile: _____ Altezza massima pila: _____m Numero apparecchi d'appoggio: _____
	NOTE: IL PONTE HA SOBITO AMPLIAMENTO DI CARREGGIATA CON STRUTTURA A SOLETTONE IN C.A. E AMPLIAMENTO DELLE PILE CON STRUTTURA IN C.A.	

Segue Figura 10 Schede compilate per il rilievo ponte al km 24+865



Università degli Studi di Catania
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
Sezione 5.1	ARCO SX	Estensione			NOTE
		<10%	10% - 60%	> 60%	
calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo			X	} AMPLIAMENTO IN PALCATO
	Calcestruzzo ammalorato			X	
	Distacco copriferro				
	Armature ossidate				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				
	Muratura ammalorata				
muratura	Efflorescenze				
	Distacco dell'arco				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure trasversali				
	Polverizzazione giunti malta				
	Vegetazione intrusiva				

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
Sezione 5.2	TIMPANO	Estensione			NOTE
		<10%	10% - 60%	> 60%	
calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo				
	Calcestruzzo ammalorato				
	Distacco copriferro				
	Armature ossidate				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				
	Muratura ammalorata				
muratura	Efflorescenze				
	Distacco dell'arco				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure trasversali				
	Polverizzazione giunti malta				
	Vegetazione intrusiva				

Segue Figura 10 Schede compilate per il rilievo ponte al km 24+865



Università degli Studi di Catania
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI				
ARCO $\text{D} \times$	Estensione			NOTE
	<10%	10% - 60%	> 60%	
Sezione 5.1 calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo			X
	Calcestruzzo ammalorato			X
	Distacco copriferro			
	Armature ossidate			
	Fessure orizzontali			
	Fessure verticali			X
	Fessure diagonali			
	Danni da urto			
	Vegetazione intrusiva			
	Muratura ammalorata			
Sezione 5.2 muratura	Efflorescenze			
	Distacco dell'arco			
	Fessure orizzontali			
	Fessure verticali			
	Fessure trasversali			
	Polverizzazione giunti malta			
	Vegetazione intrusiva			

} AMPLIAMENTO
IN PALCATO

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI				
TIMPANO	Estensione			NOTE
	<10%	10% - 60%	> 60%	
Sezione 5.1 calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo			
	Calcestruzzo ammalorato			
	Distacco copriferro			
	Armature ossidate			
	Fessure orizzontali			
	Fessure verticali			
	Fessure diagonali			
	Danni da urto			
	Vegetazione intrusiva			
	Muratura ammalorata			
Sezione 5.2 muratura	Efflorescenze			
	Distacco dell'arco			
	Fessure orizzontali			
	Fessure verticali			
	Fessure trasversali			
	Polverizzazione giunti malta			
	Vegetazione intrusiva			

Segue Figura 10 Schede compilate per il rilievo ponte al km 24+865



Università degli Studi di Catania
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

		DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI			NOTE
		Estensione			
SPALLA Sx		<10%	10% - 60%	> 60%	
Sezione 6.3	calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo			
		Calcestruzzo ammalorato			
		Distacco copriferro			
		Armature ossidate			
		Fessure orizzontali			
		Fessure verticali			
		Fessure diagonali			
	muratura	Danni da urto			
		Vegetazione intrusiva			
		Scalzamento			
		Fuori piombo			
		Muratura ammalorata		X	
		Efflorescenze			
		Distacco dell'arco			
muratura	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure trasversali				
	Polverizzazione giunti malta				
	Vegetazione intrusiva		X		
	Scalzamento				
	Fuori piombo				

		DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI			NOTE
		Estensione			
SPALLA Dx		<10%	10% - 60%	> 60%	
Sezione 6.3	calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo			
		Calcestruzzo ammalorato			
		Distacco copriferro			
		Armature ossidate			
		Fessure orizzontali			
		Fessure verticali			
		Fessure diagonali			
	muratura	Danni da urto			
		Vegetazione intrusiva			
		Scalzamento			
		Fuori piombo			
		Muratura ammalorata		X	
		Efflorescenze			
		Distacco dell'arco			
muratura	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure trasversali				
	Polverizzazione giunti malta				
	Vegetazione intrusiva		X		
	Scalzamento				
	Fuori piombo				

Segue Figura 10 Schede compilate per il rilievo ponte al km 24+865



Università degli Studi di Catania
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

		DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI			NOTE
		Estensione			
PILA		<10%	10% - 60%	> 60%	
		Sezione 5.4 calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo		
Calcestruzzo ammalorato					
Distacco copriferro					
Armature ossidate					
Fessure orizzontali					
Fessure verticali					
Fessure diagonali					
Danni da urto					
Vegetazione intrusiva					
Scalzamento					
Fuori piombo					
Muratura ammalorata			X		
Efflorescenze					
Distacco dell'arco					
Sezione 5.4 muratura	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure trasversali				
	Polverizzazione giunti malta				
	Vegetazione intrusiva		X		
	Scalzamento				
Fuori piombo					

		DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI			NOTE
		Estensione			
PILA		<10%	10% - 60%	> 60%	
		Sezione 5.4 calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo		
Calcestruzzo ammalorato					
Distacco copriferro					
Armature ossidate					
Fessure orizzontali					
Fessure verticali					
Fessure diagonali					
Danni da urto					
Vegetazione intrusiva					
Scalzamento					
Fuori piombo					
Muratura ammalorata					
Efflorescenze					
Distacco dell'arco					
Sezione 5.4 muratura	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure trasversali				
	Polverizzazione giunti malta				
	Vegetazione intrusiva				
	Scalzamento				
Fuori piombo					

Segue Figura 10 Schede compilate per il rilievo ponte al km 24+865



Università degli Studi di Catania
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Sezione 6	DANNI AD ELEMENTI NON STRUTTURALI	Estensione			NOTE
		<10%	10% - 60%	> 60%	
	Pavimentazione danneggiata				
	Giunti degradati				
	Parapetti danneggiati o assenti				
	Guardrail danneggiati o assenti		X		
	Cordoli degradati			X	
	Scarichi ostruiti o danneggiati				
	Pali illuminazione danneggiati				

Segue Figura 10 Schede compilate per il rilievo ponte al km 24+865

Il ponte presenta uno stato di degrado avanzato in corrispondenza dell'intradosso dell'impalcato, in corrispondenza degli ampliamenti realizzati in c.a, dovuti alla corrosione delle armature ed al conseguente distacco del calcestruzzo; delle fessurazioni longitudinali lungo l'intradosso dell'arco su entrambi i lati dovuti probabilmente all'ampliamento

eseguito e quindi alla modifica dei carichi permanenti, ed infine presenta porzioni di muratura ammalorata (fig.11).





SS 385 Km 24+865		Ponte ad arco in muratura+cls		CRITERI CONDIZIONALI	VALORI
Inquadramento territoriale		Foto		Anno di costruzione	3
DEGRADO				Materiale	1
				Muratura ammalorata	
Distacco coprifermo e corrosione armature (impalcato)				Terreno fondazione	1
				Tipologia di danno	2
				Superficie danneggiata	3
				Elementi danneggiati	3
				Zona sismica	2
				Dispositivi antisismici	2
				Schema statico	1
				Dissesto idrogeologico	1
				TGM	1
				Traffico pesantissimo	2
				Viabilità strategica	1
				Percorsi alternativi	1

Figura 11 Deterioramento e criteri condizionali del ponte al km 24+865

6.3.1.5 Descrizione del ponte al km 26+249

Il ponte alla progressiva km.ca 26+249 è sito nel comune di Lentini in provincia di Siracusa. Il ponte possiede uno sviluppo complessivo di 10 m ed una larghezza di 10,30 m; è composto da una campata ad arco fortemente ribassato in muratura a blocchi di tufo ed ha un andamento rettilineo (fig.12).

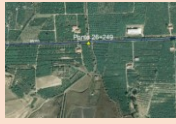

Le spalle del ponte, del tipo a gravità e realizzate in muratura, sono state allargate mediante l'utilizzo di muri in c.a. di sezione rettangolare, posti lateralmente alla struttura, con sovrastante soletta gettata in opera. L'impalcato, molto probabilmente in origine realizzato con le metodologie classiche dei ponti ad arco, è stato nel tempo oggetto di interventi di ristrutturazione, volti ad assicurarne la stabilità ed a consentire l'allargamento della sede viaria, dando origine alla struttura sopra descritta.



Figura 12 Ponte al km 26+249

La strada è composta da 2 corsie, una per senso di marcia; la larghezza della carreggiata è pari a 7,50 m, la larghezza di ciascuna corsia è pari a 3 m, mentre quella delle banchine è pari a 0,75 m.

Il ponte risulta quasi del tutto ostruito pertanto non rispetta il franco idraulico minimo. Presenta inoltre fenomeni di distacco del copriferro e corrosione delle armature lungo gli l'ampliamento dell'impalcato. Ci sono inoltre porzioni di pavimentazione ammalorata e il guardrail divelto (fig. 13).

SS 385 Km 26+249		Ponte ad arco in muratura		CRITERI CONDIZIONALI	VALORI
Inquadramento territoriale		Foto		Anno di costruzione	3
				Materiale	1
				Ambiente	1
				Terreno fondazione	1
				Tipologia di danno	3
				Superficie danneggiata	1
				Elementi danneggiati	1
				Zona sismica	2
				Dispositivi antisismici	2
				Schema statico	1
				Dissesto idrogeologico	3
				TGM	1
				Traffico pesantissimo	2
				Viabilità strategica	1
				Percorsi alternativi	1





DEGRADO			
Franco idraulico minimo non rispettato		Guardra il divetto	
			
		Pavimentazione ammalorata	
			

Figura 13 Deterioramento e criteri condizionali del ponte al km 26+249

6.3.1.6 Descrizione del ponte al km 29+070

Il cavalcavia alla progressiva km.ca 29+070 è sito nel comune di Palagonia in provincia di Catania. Il cavalcavia possiede uno sviluppo complessivo di 14,50 m ed una larghezza di 10,50 m; è composto da una campata sorretta da due spalle, di lunghezza pari a 12,10 m ed ha un andamento rettilineo (fig.14).



Figura 14 Ponte al km 29+070

Le spalle del cavalcavia sono del tipo a gravità, presentano una larghezza pari a 10,60 m e sono realizzate in calcestruzzo armato. L'impalcato è costituito da un graticcio di 10 travi longitudinali in calcestruzzo armato precompresso, due traversi disposti in testata + uno intermedio, realizzati in c.a. gettato in opera e soletta sovrastante gettata in opera; ogni trave è staticamente appoggiata e non sono presenti apparecchi di appoggio, mentre sono presenti apparecchi di giunto (giunto tampone) realizzati con profili metallici a "T", inseriti sotto la pavimentazione e muniti di ala superiore interna sagomata.

La strada è composta da 2 corsie, una per senso di marcia; la larghezza della carreggiata è pari a 7,50 metri, la larghezza di ciascuna corsia è pari a 3 m, mentre quella delle banchine è pari a 0,75 m.

Il cavalcavia presenta fenomeni di dilavamento del calcestruzzo (fig. 15).

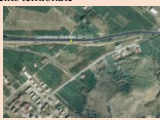


SS 385 Km 29+070		Cavalcavia in calcestruzzo	CRITERI CONDIZIONALI	VALORI
Inquadramento territoriale	Foto		Anno di costruzione	2
			Materiale	4
DEGRADO			Ambiente	1
Dilavamento calcestruzzo			Terreno fondazione	1
			Tipologia di danno	1
			Superficie danneggiata	1
			Elementi danneggiati	1
			Zona sismica	2
			Dispositivi antisismici	2
			Schema statico	3
			Dissesto idrogeologico	1
			TGM	1
			Traffico pesantissimo	2
			Viabilità strategica	1
			Percorsi alternativi	1

Figura 15 Deterioramento e criteri condizionali del ponte al km 29+070

6.3.1.7 Descrizione del ponte al km 29+529

Il cavalcavia alla progressiva km.ca 29+529 è sito nel comune di Palagonia in provincia di Catania. Il cavalcavia possiede uno sviluppo complessivo di 14,20 m ed una larghezza di 10,50 m; è composto da una campata sorretta da due spalle, di lunghezza pari a 11,80 m ed ha un andamento rettilineo (fig.16).



Figura 16 Ponte al km 29+529

Le spalle del cavalcavia sono del tipo a gravità, presentano una larghezza pari a 10,70 m, sono realizzate in calcestruzzo armato ed affiancate da muri di contenimento del rilevato. L'impalcato è costituito da un graticcio di 10 travi longitudinali in calcestruzzo armato precompresso, due traversi disposti in testata + uno intermedio, realizzati in c.a. gettato in opera e soletta sovrastante gettata in opera; ogni trave è staticamente appoggiata e non sono presenti apparecchi di appoggio, mentre sono presenti apparecchi di giunto (giunto tampone) realizzati con profili metallici a "T", inseriti sotto la pavimentazione e muniti di ala superiore interna sagomata.

La strada è composta da 2 corsie, una per senso di marcia; la larghezza della carreggiata è pari a 7,50 metri, la larghezza di ciascuna corsia è pari a 3 m, mentre quella delle banchine è pari a 0,75 m.

Il cavalcavia presenta fenomeni di dilavamento del calcestruzzo e degrado dei cordoli (fig.17).

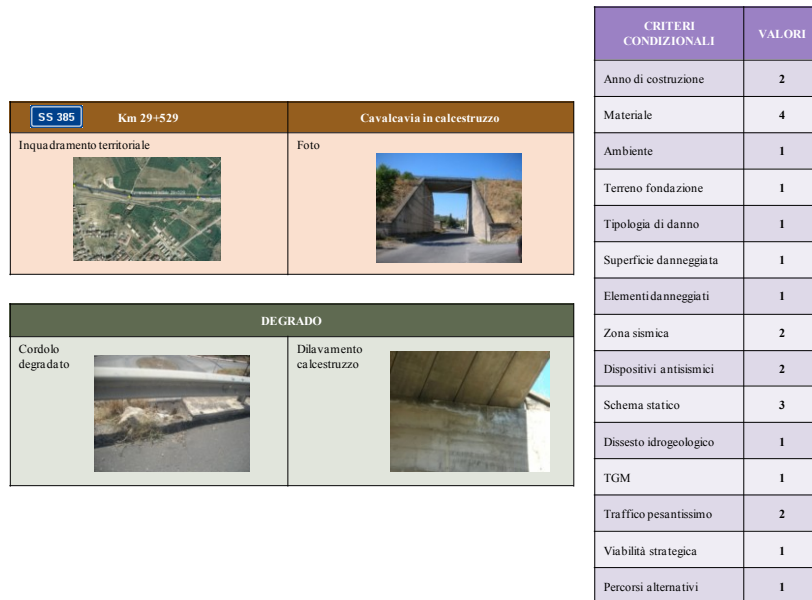


Figura 17 Deterioramento e criteri condizionali del ponte al km 29+529

6.3.1.8 Descrizione del ponte al km 29+922

Il cavalcavia alla progressiva km.ca 29+922 è sito nel comune di Palagonia in provincia di Catania. Il cavalcavia è costituito da un impalcato sorretto da due spalle con uno sviluppo complessivo di 14,40 m ed una larghezza di 10,50 m; la campata ha una lunghezza pari a 12 m e presenta un andamento rettilineo (fig.18).



Figura 18 Ponte al km 29+922

Le spalle del cavalcavia sono del tipo a gravità, hanno una larghezza pari a 11,20 m, sono realizzate in calcestruzzo armato ed affiancate da muri di contenimento per il rilevato. L'impalcato è costituito da un graticcio di 10 travi longitudinali in calcestruzzo armato precompresso, due traversi disposti in testata + uno intermedio, realizzati in c.a. gettato in opera e soletta sovrastante gettata in opera; ogni trave è staticamente appoggiata e non sono presenti apparecchi di appoggio, mentre sono presenti apparecchi di giunto (giunto tampone) realizzati con profili metallici a "T", inseriti sotto la pavimentazione e muniti di ala superiore interna sagomata.

La strada è composta da 2 corsie, una per senso di marcia; la larghezza della carreggiata è pari a 7,50 metri, la larghezza di ciascuna corsia è pari a 3 m, mentre quella delle banchine è pari a 0,75 m.

Il cavalcavia presenta solo fenomeni di degrado dei cordoli (fig 19).




SS 385 Km 29+922		Cavalcavia in calcestruzzo		CRITERI CONDIZIONALI	VALORI
Inquadramento territoriale		Foto		Anno di costruzione	2
<p style="text-align: center;">DEGRADO</p> <p>Degrado cordoli</p> 				Superficie danneggiata	1
				Elementi danneggiati	1
				Zona sismica	2
				Dispositivi antisismici	2
				Schema statico	3
				Dissesto idrogeologico	1
				TGM	1
				Traffico pesantissimo	2
				Viabilità strategica	1
				Percorsi alternativi	1

Figura 19 Deterioramento e criteri condizionali del ponte al km 29+922

6.3.1.9 Descrizione del ponte al km 30+506

Il cavalcavia alla progressiva km.ca 30+506 è sito nel comune di Palagonia in provincia di Catania. Il cavalcavia è costituito da un impalcato sorretto da due spalle con uno sviluppo complessivo di 25,80 m ed una larghezza di 10,50 m; la campata ha una lunghezza pari a 23,40 m e presenta un andamento rettilineo (fig.20).



Figura 20 Ponte al km 30+506

Le spalle del cavalcavia sono del tipo a gravità, hanno una larghezza pari a 10,60 m, sono realizzate in calcestruzzo armato ed affiancate da muri di contenimento per il rilevato. L'impalcato è costituito da un graticcio di 10 travi longitudinali in calcestruzzo armato precompresso, due traversi disposti in testata + uno intermedio, realizzati in c.a. gettato in opera e soletta sovrastante gettata in opera; ogni trave è staticamente appoggiata e non sono presenti apparecchi di appoggio, mentre sono presenti apparecchi di giunto (giunto tampone) realizzati con profili metallici a "T", inseriti sotto la pavimentazione e muniti di ala superiore interna sagomata.

La strada è composta da 2 corsie, una per senso di marcia; la larghezza della carreggiata è pari a 7,50 metri, la larghezza di ciascuna corsia è pari a 3 m, mentre quella delle banchine è pari a 0,75 m.

Il cavalcavia presenta fenomeni di espulsione del copriferro con conseguente ossidazione delle armature superficiali (fig. 21).






SS 385 Km 30+506		Cavalcavia in calcestruzzo		CRITERI CONDIZIONALI	VALORI
Inquadramento territoriale		Foto		Anno di costruzione	2
				Materiale	4
DEGRADO				Ambiente	1
Sfogliamento calcestruzzo e corrosione armature muri contenimento spalla		Cordoli degradati		Terreno fondazione	3
		Dilavamento calcestruzzo		Tipologia di danno	2
				Superficie danneggiata	1
				Elementi danneggiati	2
				Zona sismica	2
				Dispositivi antisismici	2
				Schema statico	3
				Dissesto idrogeologico	1
				TGM	1
				Traffico pesantissimo	2
				Viabilità strategica	1
				Percorsi alternativi	1

Figura 21 Deterioramento e criteri condizionali del ponte al km 30+506

6.3.1.10 Descrizione del ponte al km 30+619

Il cavalcavia alla progressiva km.ca 30+619 è sito nel comune di Palagonia in provincia di Catania. Il cavalcavia è costituito da un impalcato sorretto da due spalle con uno sviluppo complessivo di 14,40 m ed una larghezza di 10,50 m; la campata ha una lunghezza pari a 12 m e presenta un andamento rettilineo (fig.22).





Figura 22 Ponte al km 30+619

Le spalle del cavalcavia sono del tipo a gravità, hanno una larghezza pari a 12,20 m e sono realizzate in calcestruzzo armato. Esse sono affiancate da muri di contenimento per il rilevato (vista da valle) e da muri di accompagnamento disposti parallelamente all'asse stradale (vista da monte), assolventi la medesima funzione di contenimento del rilevato. L'impalcato è costituito da un graticcio di 10 travi longitudinali in calcestruzzo armato precompresso, due traversi disposti in testata + uno intermedio, realizzati in c.a. gettato in opera e soletta sovrastante gettata in opera; ogni trave è staticamente appoggiata e non sono presenti apparecchi di appoggio, mentre sono presenti apparecchi di giunto (giunto tampone) realizzati con profili metallici a "T", inseriti sotto la pavimentazione e muniti di ala superiore interna sagomata.

La strada è composta da 2 corsie, una per senso di marcia; la larghezza della carreggiata è pari a 7,50 metri, la larghezza di ciascuna corsia è pari a 3 m, mentre quella delle banchine è pari a 0,75 m.

Il viadotto presenta fenomeni di sfogliamento del calcestruzzo e corrosione delle armature lungo i muri di contenimento delle spalle e fenomeni di dilavamento (fig.23).

SS 385 Km 30+619		Cavalcavia in calcestruzzo	
Inquadramento territoriale		Foto	
DEGRADO			
Sfogliamento calcestruzzo e corrosione armature muri contenimento spalla		Dilatamento calcestruzzo	

CRITERI CONDIZIONALI	VALORI
Anno di costruzione	2
Materiale	4
Ambiente	1
Terreno fondazione	2
Tipologia di danno	2
Superficie danneggiata	1
Elementi danneggiati	2
Zona sismica	2
Dispositivi antisismici	2
Schema statico	3
Dissesto idrogeologico	1
TGM	1
Traffico pesantissimo	2
Viabilità strategica	1
Percorsi alternativi	1

Figura 23 Deterioramento e criteri condizionali del ponte al km 30+619

6.3.1.11 Descrizione del ponte al km 30+729

Il cavalcavia alla progressiva km.ca 30+729 è sito nel comune di Palagonia in provincia di Catania. Il cavalcavia è costituito da un impalcato sorretto da due spalle con uno sviluppo complessivo di 26,20 m ed una larghezza di 10,50 m; la campata ha una lunghezza pari a 23,80 m e presenta un andamento curvilineo (fig. 24).



Figura 24 Ponte al km 30+729

Le spalle del cavalcavia sono del tipo a gravità, hanno una larghezza pari a 13,75 m e sono realizzate in calcestruzzo armato. Esse sono affiancate da muri di contenimento per il rilevato (vista da valle) e da muri di accompagnamento disposti parallelamente all'asse stradale (vista da monte), assolventi la medesima funzione di contenimento del rilevato. L'impalcato è costituito da un graticcio di 10 travi longitudinali in calcestruzzo armato precompresso, due trasversi disposti in testata + tre intermedi, realizzati in c.a. gettato in opera e soletta sovrastante gettata in opera; ogni trave è staticamente appoggiata e non sono presenti apparecchi di appoggio, mentre sono presenti apparecchi di giunto (giunto tampone) realizzati con profili metallici a "T", inseriti sotto la pavimentazione e muniti di ala superiore interna sagomata.

La strada è composta da 2 corsie, una per senso di marcia; la larghezza della carreggiata è pari a 7,50 metri, la larghezza di ciascuna corsia è pari a 3 m, mentre quella delle banchine è pari a 0,75 m.

Il viadotto presenta fenomeni di sfogliamento del calcestruzzo e corrosione delle armature lungo i muri di contenimento delle spalle e fenomeni di dilavamento. Il guardrail risulta, inoltre, completamente divelto (fig. 25).

SS 385 Km 30+729		Cavalcavia in calcestruzzo		CRITERI CONDIZIONALI	VALORI
Inquadramento territoriale		Foto		Anno di costruzione	2
				Materiale	4
				Ambiente	1
				Terreno fondazione	2
				Tipologia di danno	2
				Superficie danneggiata	1
				Elementi danneggiati	2
				Zona sismica	2
				Dispositivi antisismici	2
				Schema statico	3
				Dissesto idrogeologico	3
				TGM	1
				Traffico pesantissimo	2
				Viabilità strategica	1
				Percorsi alternativi	1



DEGRADO			
Sfogliamento calcestruzzo e corrosione armature muri contenimento spalla		Guardrail divelto	
		Dilavamento calcestruzzo	

Figura 25 Deterioramento e criteri condizionali del ponte al km 30+729

6.3.1.12 Descrizione del ponte al km 31+720

Il ponte alla progressiva km.ca 31+720 è sito nel comune di Palagonia in provincia di Catania. Il cavalcavia è costituito da un impalcato sorretto da due spalle con uno sviluppo complessivo di 29 m ed una larghezza di 10,80 m; la campata ha una lunghezza pari a 26,60 m e presenta un andamento rettilineo (fig.26).



Figura 26 Ponte al km 31+720

Le spalle del ponte sono del tipo a gravità, hanno una larghezza pari a 14 m e sono realizzate in calcestruzzo armato. Esse sono affiancate, da ambo i lati, da muri di accompagnamento disposti parallelamente all'asse stradale, assolventi la funzione di contenimento del rilevato. L'impalcato è costituito da un graticcio di 10 travi longitudinali in calcestruzzo armato precompresso, due traversi disposti in testata + tre intermedi, realizzati in c.a. gettato in opera e soletta sovrastante gettata in opera; ogni trave è staticamente appoggiata e non sono presenti apparecchi di appoggio, mentre sono presenti apparecchi di giunto (giunto tampone) realizzati con profili metallici a "T", inseriti sotto la pavimentazione e muniti di ala superiore interna sagomata.

La strada è composta da 2 corsie, una per senso di marcia; la larghezza della carreggiata è pari a 7,50 metri, la larghezza di ciascuna corsia è pari a 3 m, mentre quella delle banchine è pari a 0,75 m.

Il ponte presenta fenomeni di dilavamento del calcestruzzo, sfogliamento del calcestruzzo e successiva corrosione delle armature lungo i muri di contenimento delle spalle e il degrado dei cordoli (fig. 27).

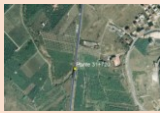




SS 385 Km 31+720 Ponte a travata in calcestruzzo		CRITERI CONDIZIONALI	VALORI
Inquadramento territoriale	Foto	Anno di costruzione	2
		Materiale	4
DEGRADO Sfogliamento calcestruzzo e corrosione armature muri contenimento spalla 		Ambiente	1
		Terreno fondazione	1
Dilavamento calcestruzzo		Tipologia di danno	2
		Superficie danneggiata	2
Cordoli degradati		Elementi danneggiati	2
		Zona sismica	2
		Dispositivi antisismici	2
		Schema statico	3
		Dissesto idrogeologico	3
		TGM	1
		Traffico pesantissimo	2
		Viabilità strategica	1
		Percorsi alternativi	1

Figura 27 Deterioramento e criteri condizionali del ponte al km 31+720

6.3.1.13 Descrizione del ponte al km 39+916






Il ponte alla progressiva km.ca 39+916 è sito nel comune di Mineo in provincia di Catania. Il ponte è costituito da un impalcato sorretto da due spalle con uno sviluppo complessivo di 34,70 m, una larghezza di 10,30 m e presenta un andamento rettilineo (fig. 28).



Figura 28 Ponte al km 39+916

Le spalle del ponte sono del tipo a gravità, hanno una larghezza pari a 10,7 m e sono realizzate in calcestruzzo armato. Esse sono affiancate, da ambo i lati, da muri di accompagnamento disposti parallelamente all'asse stradale, assolvendo la funzione di contenimento del rilevato. L'impalcato è costituito da un graticcio di 5 travi longitudinali in calcestruzzo armato, due trasversali disposti in testata + tre intermedi, realizzati in c.a. gettato in opera e soletta sovrastante gettata in opera; ogni trave è staticamente appoggiata e non sono presenti apparecchi di appoggio, mentre sono presenti apparecchi di giunto (giunto tampone) realizzati con profili metallici a "T", inseriti sotto la pavimentazione e muniti di ala superiore interna sagomata. La strada è composta da 2 corsie, una per senso di marcia; la larghezza della carreggiata è pari a 6 m, la larghezza di ciascuna corsia è pari a 3 m, mentre non sono previste banchine.

Il ponte presenta fenomeni di distacco del copriferro e corrosione delle armature nell'attacco trave spalla, fenomeni di vegetazione intrusiva e fenomeni di ammaloramento del calcestruzzo (fig. 29).

SS 385 Km 39+916		Ponte a travata in calcestruzzo	
Inquadramento territoriale	Foto		
			
DEGRADO			
Distacco copriferro e corrosione armature (trave-spalla)		Vegetazione intrusiva	
	Ammaioramento calcestruzzo		

CRITERI CONDIZIONALI	VALORI
Anno di costruzione	2
Materiale	3
Ambiente	1
Terreno fondazione	3
Tipologia di danno	2
Superficie danneggiata	1
Elementi danneggiati	3
Zona sismica	3
Dispositivi antisismici	2
Schema statico	3
Dissesto idrogeologico	1
TGM	1
Traffico pesantissimo	2
Viabilità strategica	1
Percorsi a hemativi	1

Figura 29 Deterioramento e criteri condizionali del ponte al km 39+916

6.3.1.14 Descrizione del ponte al km 42+554

Il ponte alla progressiva km.ca 42+554 è sito nel comune di Mineo in provincia di Catania. Il ponte possiede uno sviluppo complessivo di 12,50 m ed una larghezza di 8,80 m; è composto da una campata ad arco a tutto sesto avente muri di accompagnamento in muratura a blocchi ed ha un andamento rettilineo (fig.30).



Figura 30 Ponte al km 42+554

Le spalle del ponte, del tipo a gravità e realizzate in muratura, sono state allargate mediante l'utilizzo di muri in c.a. di sezione rettangolare, posti lateralmente alla struttura, con sovrastante soletta gettata in opera. L'impalcato, molto probabilmente in origine realizzato con le metodologie classiche dei ponti ad arco, è stato nel tempo oggetto di interventi di ristrutturazione, volti ad assicurarne la stabilità ed a consentire l'allargamento della sede viaria, dando origine alla struttura sopra descritta.

La strada è composta da 2 corsie, una per senso di marcia; la larghezza della carreggiata è pari a 7 metri, la larghezza di ciascuna corsia è pari a 3 m, mentre quella delle banchine è pari a 0,5 m.

A causa della fitta vegetazione non è stato possibile eseguire il rilievo completo del ponte, in particolare non è stato possibile rilevare lo stato di degrado. Pertanto il ponte non verrà inserito nel caso di studio per la determinazione del piano degli interventi.

6.3.2 Determinazione del grado di urgenza delle attività manutentive

Una volta completata la fase di rilievo sui luoghi e la compilazione e la successiva revisione delle schede si è passati alla fase successiva orientata alla definizione delle azioni manutentive da intraprendere. A tal fine è stato utilizzato il sistema di supporto alle decisioni descritto nel capitolo precedente. Ciò è stato fatto con l'ausilio del software descritto nel paragrafo 5.4.6 che implementa il metodo innovativo. I risultati in termini di grado di urgenza delle attività manutentive e azioni da intraprendere per tutti i ponti presenti lungo la SS385 sono riportati nella tabella 2.

Tabella 2 Grado di urgenza delle attività manutentive per i ponti sulla SS385

PONTI	CRITERI															DECISIONE
	Anno di costruzione	Materiale	Ambiente	Terreno di fondazione	Tipologia di danno	Superficie danneggiata	Elementi danneggiati	Zona sismica	Dispositivi antisismici	Schema statico	Dissesto idrogeologico	T.G.M.	Traffico pesante	Viabilità strategica	Percorsi alternativi	
1+700	2	4	1	1	2	1	3	3	2	3	1	1	2	1	1	2
2+149	2	4	1	1	2	1	3	3	2	3	1	1	2	1	1	2
24+606	3	1	1	1	2	3	3	2	2	1	1	1	2	1	1	3
24+865	3	1	1	1	2	3	3	2	2	1	1	1	2	1	1	3
26+249	3	1	1	1	3	1	1	2	2	1	3	1	2	1	1	3
29+070	2	4	1	1	1	1	1	2	2	3	1	1	2	1	1	2
29+529	2	4	1	1	1	1	1	2	2	3	1	1	2	1	1	2
29+922	2	4	1	1	1	1	1	2	2	3	1	1	2	1	1	2
30+506	2	4	1	3	2	1	2	2	2	3	1	1	2	1	1	2
30+619	2	4	1	2	2	1	2	2	2	3	1	1	2	1	1	2
30+729	2	4	1	2	2	1	2	2	2	3	3	1	2	1	1	2
31+720	2	4	1	1	2	2	2	2	2	3	3	1	2	1	1	2
39+916	2	3	1	3	2	1	3	3	2	3	1	1	2	1	1	2

A titolo esemplificativo si illustrano i dettagli delle operazioni del calcolo del grado di urgenza della manutenzione del ponte al km 1+700. Inserendo i dati di input relativi ai criteri stabiliti in precedenza il SSD suggerisce un grado di urgenza della manutenzione pari a 2 ‘anticipazione delle ispezioni’ (fig.31) e restituisce 6 regole che raccomandano un grado di urgenza della manutenzione ≥ 2 (anticipazione delle ispezioni), 5 regole che raccomandano un grado di urgenza della manutenzione ≤ 2 (mantenimento delle ispezioni)

ed 22 regole che raccomandano un grado di urgenza della manutenzione ≤ 3 (intervento urgente).

The screenshot shows a software window titled "Ispezione Ponti". On the left, there is a vertical list of dropdown menus for various parameters: Anno di costruzione (1990 - 1970), Materiale (Calcestruzzo ...), Ambiente (Non aggressivo), Terreno di fondazione (Ammassi roc...), Tipologia di danno (Fessure, corr...), Superficie danneggiata (< 10%), Elementi danneggiati (Elemento stru...), Zona sismica (ag > 0.25g), Dispositivi antisismici (no), Schema statico (travi appoggi...), Dissesto idrogeologico (Nessun rischio), TGM (< 6.000 veicol...), Traffico pesante (10% - 20%), Viabilità strategica (no), and Percorsi alternativi (si). On the right, there is a graphic of a bridge with three arches. Below the graphic is a green button labeled "Regole supportate". Underneath that, a blue box contains the text "URGENZA DELLE ATTIVITA' MANUTENTIVE" in all caps, and below it, "ANTICIPAZIONE DELLE ISPEZIONI" in red all caps.

Figura 31 Grado di urgenza per il ponte al km 1+700

Le regole decisionali hanno lo scopo di spiegare al decisore le ragioni per le quali gli esperti raccomandano (tramite il DRSA) un grado di urgenza della manutenzione piuttosto che un altro.


Ovviamente non è ragionevole sottoporre al decisore un numero troppo ampio di regole (33 nel caso del ponte 1), per tale ragione verrà mostrata, per ogni classe, la regola maggiormente supportata.

Le regole maggiormente supportate sono:

- se “tipologia di danno” ≤ 2 allora il grado di urgenza delle attività manutentive è ≤ 3 (supporto 80)
- se “tipologia di danno” ≤ 2 e “superficie danneggiata” ≤ 1 allora il grado di urgenza delle attività manutentive è ≤ 2 (supporto 32)
- se “elementi danneggiati” ≥ 3 e “dispositivi antisismici” ≥ 2 allora il grado di urgenza delle attività manutentive è ≥ 2 (supporto 31)

Tali regole forniscono al decisore le motivazioni per le quali è opportuno adottare il grado di urgenza delle attività manutentive consigliato: infatti il valore della tipologia di danno è un valore medio (presenza di armature corrose) e non ci sono dispositivi antisismici ma la superficie danneggiata è piccola. Il decisore pertanto potrà tenere conto del grado di urgenza della manutenzione suggerito dal sistema di supporto decisionale, o nel caso in cui non lo ritenesse adeguato, potrebbe modificare il grado di urgenza e questo potrebbe costituire un nuovo caso da cui il sistema di supporto proposto apprende. Per far ciò bisognerà aggiungere il nuovo caso ai “casi esemplari” ed eventualmente estrarre nuovamente le regole anche per gli altri casi che presentano similitudini.

Analogamente, se volessimo calcolare il grado di urgenza della manutenzione del ponte al km 24+865, il SSD suggerisce un grado di urgenza della manutenzione pari a 3 ‘intervento urgente’ (fig. 32) e restituisce 16 regole che raccomandano un grado di urgenza della manutenzione ≥ 2 (anticipazione delle ispezioni), 8 regole che raccomandano un grado di urgenza della manutenzione ≥ 3 (intervento urgente) e 58 regole che raccomandano un grado di urgenza della manutenzione ≤ 3 (intervento urgente). Il grado di urgenza delle ispezioni restituito dal SSD è quello che soddisfa tutte le regole decisionali ed in questo caso è proprio pari a 3.



The screenshot shows a software window titled "Ispezione Ponti". On the left, there is a list of input parameters with dropdown menus:

- Anno di costruzione: < 1970
- Materiale: Muratura
- Ambiente: Non aggressivo
- Terreno di fondazione: Ammassi roc...
- Tipologia di danno: Fessure, corr...
- Superficie danneggiata: >60%
- Elementi danneggiati: Elemento stru...
- Zona sismica: 0.25g < ag < ...
- Dispositivi antisismici: no
- Schema statico: arco
- Dissesto idrogeologico: Nessun rischio
- TGM: < 6.000 veicol...
- Traffico pesante: 10% - 20%
- Viabilità strategica: no
- Percorsi alternativi: si

On the right side of the interface, there is a graphic of a bridge with three arches. Below it, a green button reads "Regole supportate". A large blue box contains the text "URGENZA DELLE ATTIVITA' MANUTENTIVE" in white, with "INTERVENTO URGENTE" written in red below it.

Figura 32 Grado di urgenza per il ponte al km 1+700

Le regole maggiormente supportate sono:

- se “tipologia di danno” ≤ 2 allora il grado di urgenza delle attività manutentive è ≤ 3 (supporto 80)
- se “anno di costruzione” ≥ 2 e “superficie danneggiata” ≥ 2 e “zona sismica” ≤ 2 allora il grado di urgenza delle attività manutentive è ≥ 2 (supporto 48)
- se “anno di costruzione” ≥ 2 e “superficie danneggiata” ≥ 2 e “elementi danneggiati” e “zona sismica” ≥ 2 allora il grado di urgenza delle attività manutentive è ≥ 3 (supporto 28)

In questo caso le motivazioni per le quali è opportuno adottare il grado di urgenza delle attività manutentive consigliato è che: il ponte è stato costruito prima del 1970, il valore della tipologia di danno è un valore medio (presenza di armature corrose e presenza di fessurazioni), la superficie danneggiata è superiore al 60% , gli elementi danneggiati sono elementi strutturali e il valore della PGA è compreso fra 0.15 e 0.25.

6.3.3 Stima dei costi

Per i ponti al km 24+606, km 24+865, e km 26+249 il sistema di supporto decisionale suggerisce un intervento un urgente.

Dall’analisi delle schede e delle foto realizzate durante le visite ispettive è possibile prevedere la tipologia di intervento più adeguata.

I ponti al km 24+606 e al km 24+854 sono molto simili fra loro, e presentano le stesse tipologie di degrado:

- distacco del copriferro e corrosione delle armature in corrispondenza dell’allargamento dell’impalcato (fig.33);

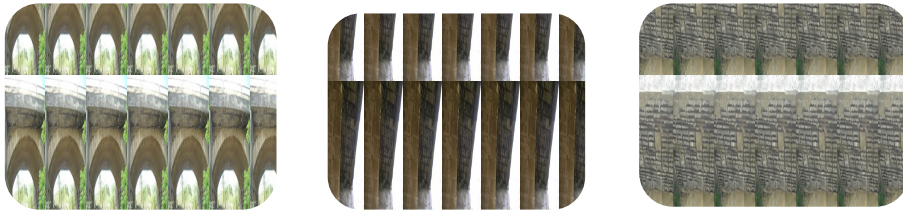


Figura 33 Espulsione copriferro e corrosione armature

- porzioni di muratura ammalorata (fig.34);



Figura 34 Muratura ammalorata

- fessurazioni nell'intradosso dell'arco (fig. 35)

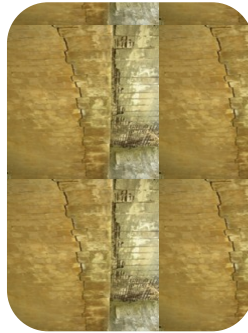


Figura 35 Fessurazioni intradosso arco

L'intervento consigliato pertanto prevede:

- Idrodemolizione del calcestruzzo, sostituzione delle armature più ammalorate e trattamento anticorrosivo delle armature meno ammalorate, applicazione di malta cementizia anticorrosiva delle armature a vista, ricostruzione del copriferro con betoncino fibrorinforzato a ritiro compensato;
- Riempimento delle fessure mediante malta antiritiro e cuciture armate perpendicolari alle fessure;
- Pulitura meccanica della muratura, lavaggio della muratura con acqua a pressione, ristilatura di giunti, eventuali interventi di scuci - cucì nelle zone di muratura maggiormente colpite, applicazione di biocidi.

Il costo stimato dell'intervento è di 100.000 euro per il ponte al km 24+606 e di 120.000 euro per il ponte al km 24+865.

Il ponte al km 26+249 risulta quasi del tutto ostruito pertanto non rispetta il franco idraulico minimo, presenta inoltre fenomeni di distacco del copriferro e corrosione delle armature lungo l'ampliamento dell'impalcato (fig. 36).



Figura 36 Parziale ostruzione del ponte e corrosione delle armature

L'intervento consigliato pertanto prevede:

- Ricostruzione del franco idraulico mediante movimento terra;
- Idrodemolizione del calcestruzzo, sostituzione delle armature, applicazione di malta cementizia anticorrosiva delle armature a vista, ricostruzione del copriferro con betoncino fibrorinforzato a ritiro compensato delle travi;
- Parziale sistemazione idraulica del tratto a ridosso del ponte con inserimento di briglie in gabbioni.

Il costo stimato dell'intervento è di 120.000 euro.

6.4 2° CASO DI STUDIO: PONTE SUL FIUME CASSIBILE

Il secondo caso di studio ha riguardato l'applicazione della metodologia precedentemente esposta (cap. 5) al ponte sul fiume Cassibile che si trova al km 392+450 sulla strada statale 115 (Sud Occidentale Sicula) della rete stradale italiana, di proprietà dell'ente ANAS, al fine di andare a valutare il grado di urgenza della manutenzione.

La strada statale 115 è lunga 409 km, collega Siracusa con Trapani ed è classificata come strada extraurbana secondaria.

6.4.1 Acquisizione dei dati

Analogamente a quanto fatto per il 1° caso di studio, sono stati eseguiti dei sopralluoghi mirati alla compilazione delle schede di primo livello. Per quanto riguarda i dati relativi al TGM, e alla percentuale di traffico pesante, sono stati desunti dal database dell'ANAS. Le

caratteristiche del terreno di fondazione e i valori relativi all'instabilità idrogeologica sono stati desunti dal Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico predisposto da Regione Sicilia [1]. Il valore di picco dell'accelerazione al suolo è stato ricavato utilizzando la classificazione sismica prevista dalle *Norme tecniche per le costruzioni (D.M.2008)*[2]. Infine è stato utilizzato un software GIS per la localizzazione del ponte all'interno della rete e per la valutazione di eventuali percorsi alternativi.

Viene riportata successivamente la descrizione del ponte oggetto di studio, e la relativa scheda compilata su campo.


6.4.1.1 Descrizione del ponte e relativa compilazione della scheda di I livello

L'opera in oggetto, eretta nel 1932 e ancora oggi in pieno esercizio (fig. 37). Lo schema strutturale è del tipo ad impalcato sospeso ad archi con spinta eliminata. I due archi sono resi solidali, oltre che dall'impalcato inferiore, dalla presenza di due collegamenti in sommità e di due travi di testa poste in prossimità degli appoggi, mentre un sistema di tiranti ad interasse di 2.86 m collega gli archi all'impalcato vero e proprio. Quest'ultimo è realizzato da un sistema di traversi, interrotti da un rompitratto centrale d'irrigidimento ed incastrati ai correnti laterali. L'impalcato poggia su due spalle in CA e presenta una luce libera di 31.46 m. L'interasse tra le arcate è di 8,30 m, mentre la freccia massima delle arcate, misurata tra l'asse dell'arcata e l'asse del corrente inferiore, è di 6.01 m. La sovrastruttura dell'impalcato è realizzata con una soletta in CA dello spessore di soli 0.15 m.



Figura 37 Ponte sul fiume Cassibile

Di seguito si riportano le immagini relative alle schede compilate durante il sopralluogo (fig.10).



Università degli Studi di Catania
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

SCHEDA DI 1° LIVELLO PER IL RILEVAMENTO DEL DEGRADO PER I PONTI AD ARCO A VIA INFERIORE IN CALCESTRUZZO

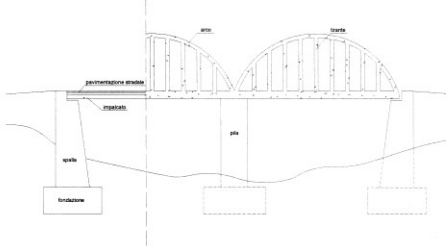

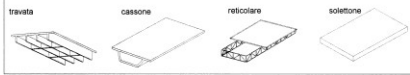

Sezione 1	<p>IDENTIFICAZIONE PONTE</p> <p>Nome ponte: <u>PONTE SUL Fiume CASSIBILE</u></p> <p>Provincia: <u>SIRACUSA</u></p> <p>Comune: _____</p> <p>Operatore: _____</p> <p>Data del rilievo: _____</p>	
Sezione 2	<p>LOCALIZZAZIONE</p> <p>Coordinate piano UTM:</p> <p>est <u>11501116192</u></p> <p>nord <u>1365656156</u></p> <p>Altitudine: _____ m</p>	<p>TIPOLOGIA STRADA</p> <p>Strada: statale <input checked="" type="checkbox"/> regionale <input type="checkbox"/> provinciale <input type="checkbox"/> comunale <input type="checkbox"/></p> <p>Numero strada: <u>SS 115</u></p> <p>Classificazione: autostrada <input type="checkbox"/> extraurb. principale <input type="checkbox"/> extraurb. secondaria <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>Progressiva: dal km <u>13921450</u> al km <u>13921765</u></p>
Sezione 2	<p>DATI GEOMORFOLOGICI</p> <p>Morfologia del sito: pianeggiante <input checked="" type="checkbox"/> ondulato <input type="checkbox"/></p> <p>Posizione del ponte rispetto al pendio: ortogonale <input type="checkbox"/> parallelo <input type="checkbox"/></p> <p>Falde: assenti <input type="checkbox"/> presenti <input type="checkbox"/> non determinabili <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>Fenomeni franosi: assenti <input type="checkbox"/> presenti <input type="checkbox"/> non determinabili <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>TERRENO FONDAZIONE</p> <p>Tipologia: ammassi rocciosi <input type="checkbox"/> terreno granulare <input type="checkbox"/> terreno limoso o argilloso <input checked="" type="checkbox"/></p>	

Figura 38 Schede compilate per il rilievo del ponte sul fiume Cassibile

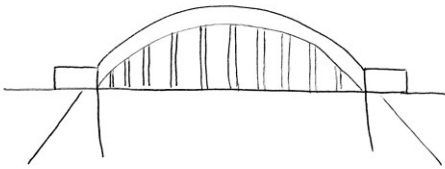

 Università degli Studi di Catania
 Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Sezione 3	DESCRIZIONE Tipo: cavalcavia <input type="checkbox"/> ponte <input checked="" type="checkbox"/> viadotto <input type="checkbox"/> Anno di costruzione: 1932 (certo <input checked="" type="checkbox"/> presunto <input type="checkbox"/> Lunghezza: 131,50 m Larghezza: 11,15 m Numero di campate: 1 Andamento: rettilineo <input checked="" type="checkbox"/> curvilineo <input type="checkbox"/>	IMPALCATO Tipologia: travata <input checked="" type="checkbox"/> cassone <input type="checkbox"/> reticolare <input type="checkbox"/> solettone <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____  Materiale: calcestruzzo <input checked="" type="checkbox"/> altro (specificare) _____ Numero giunti trasversali: 2
	SPALLE Tipologia: a gravità <input checked="" type="checkbox"/> a sbalzo <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____ Materiale: muratura <input type="checkbox"/> calcestruzzo <input checked="" type="checkbox"/> altro (specificare) _____ Altezza massima spalle: _____ m Numero apparecchi d'appoggio: _____	PILE Tipologia: singola <input type="checkbox"/> telaio <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____ Materiale: muratura <input type="checkbox"/> calcestruzzo <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____ Numero pile: _____ Altezza massima pila: _____ m Numero apparecchi d'appoggio: _____
	TIRANTI Materiale: calcestruzzo <input checked="" type="checkbox"/> altro (specificare) _____ Numero di tiranti per arco: 1 Interasse: 28,0 m	ARCO Materiale: calcestruzzo <input checked="" type="checkbox"/> altro (specificare) _____ Tipologia: arco a tutto sesto <input type="checkbox"/> arco ribassato <input checked="" type="checkbox"/> arco a sesto acuto <input type="checkbox"/> Numero archi: 1* Altezza massima arco: 6,00 m
	DISPOSITIVI ANTISISMICI presenti <input type="checkbox"/> assenti <input checked="" type="checkbox"/> Tipologia: isolatori <input type="checkbox"/> dissipatori <input type="checkbox"/> NOTE: * L'ARCO È UNICO HA È SDOPPIATO IN DUE ELEMENTI LATERALI RESI SOLIDALI DA DUE COLLEGAMENTI IN SOMMITÀ	

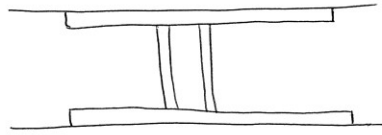
Segue Figura 38 Schede compilate per il rilievo del ponte sul fiume Cassibile

 Università degli Studi di Catania
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

RAPPRESENTAZIONE SEMPLIFICATA DEL PONTE (SCHIZZO)



VISTA DALL'ALTO



ACCESSIBILITA'
totalmente accessibile parzialmente accessibile inaccessibile

FOTO
Numero di foto 34
Nome file allegati 115_332+450

Sezione 4

Segue Figura 38 Schede compilate per il rilievo del ponte sul fiume Cassibile



Università degli Studi di Catania
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
Sezione 5.1 calcestruzzo	IMPALCATO	Estensione			NOTE
		<10%	10% - 60%	> 60%	
	Dilavamento calcestruzzo			X	SI NOTA UNA LEGGERA INFLESSIO NE DELL'IMPALCATO
	Calcestruzzo ammalorato			X	
	Distacco copriferro				
	Armature ossidate				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
Sezione 5.2 calcestruzzo	ARCO	Estensione			NOTE
		<10%	10% - 60%	> 60%	
	Dilavamento calcestruzzo				
	Calcestruzzo ammalorato				
	Distacco copriferro		X		
	Armature ossidate		X		
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
Sezione 5.3 calcestruzzo	TIRANTI	Estensione			NOTE
		<10%	10% - 60%	> 60%	
	Dilavamento calcestruzzo				
	Calcestruzzo ammalorato				
	Distacco copriferro			X	
	Armature ossidate			X	
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				

Segue Figura 38 Schede compilate per il rilievo del ponte sul fiume Cassibile




Università degli Studi di Catania
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
SPALLA	Estensione			NOTE	
	<10%	10% - 60%	> 60%		
calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo				
	Calcestruzzo ammalorato				
	Distacco copriferro				
	Armature ossidate				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				
	Scalzamento				
	Fuori piombo				
	Apparecchi d'appoggio degradati				
	muratura	Muratura ammalorata			
		Efflorescenze			
Distacco dell'arco					
Fessure orizzontali					
Fessure verticali					
Fessure trasversali					
Polverizzazione giunti malta					
Vegetazione intrusiva					
Scalzamento					
Fuori piombo					

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
SPALLA	Estensione			NOTE	
	<10%	10% - 60%	> 60%		
calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo				
	Calcestruzzo ammalorato				
	Distacco copriferro				
	Armature ossidate				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				
	Scalzamento				
	Fuori piombo				
	Apparecchi d'appoggio degradati				
	muratura	Muratura ammalorata			
		Efflorescenze			
Distacco dell'arco					
Fessure orizzontali					
Fessure verticali					
Fessure trasversali					
Polverizzazione giunti malta					
Vegetazione intrusiva					
Scalzamento					
Fuori piombo					

Segue Figura 38 Schede compilate per il rilievo del ponte sul fiume Cassibile


 Università degli Studi di Catania
 Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Sezione 6	DANNI AD ELEMENTI NON STRUTTURALI	Estensione			NOTE
		<10%	10% - 60%	> 60%	
	Pavimentazione danneggiata				
	Giunti degradati				
	Parapetti danneggiati o assenti				
	Guardrail danneggiati o assenti				
	Cordoli degradati				
	Scarichi ostruiti o danneggiati				
	Pali illuminazione danneggiati				

Segue Figura 38 Schede compilate per il rilievo del ponte sul fiume Cassibile

L'opera si trova in cattivo stato di conservazione, l'azione degli agenti atmosferici e delle sollecitazioni dinamiche indotte dal transito dei veicoli hanno provocato vistose fessurazioni e la quasi totale esposizione delle armature. La quasi totalità degli elementi

strutturali si presentano in più punti privi di copriferro con le armature esposte in un avanzato stato di corrosione (fig. 39).


SS 115 Km 39+916 Ponte ad arco a via inferiore		CRITERI CONDIZIONALI	VALORI
Inquadramento territoriale 	Foto 	Anno di costruzione	3
DEGRADO Distacco copriferro e corrosione armature tiranti 		Materiale	3
		Ambiente	3
Deflessione impalcato 		Terreno fondazione	3
		Tipologia di danno	3
Distacco copriferro e corrosione armature impalcato 		Superficie danneggiata	3
		Elementi danneggiati	3
		Zona sismica	3
		Dispositivi antisismici	2
		Schema statico	1
		Dissesto idrogeologico	1
		TGM	2
		Traffico pesantissimo	1
		Viabilità strategica	1
		Percorsi alternativi	1

Figura 39 Deterioramento e criteri condizionali del ponte sul Fiume Cassibile

6.4.2 Determinazione del grado di urgenza delle attività manutentive

Utilizzando il sistema di supporto alle decisioni descritto nel capitolo precedente, il grado di urgenza delle attività manutentive suggerito è pari a 4 (limitazione del traffico o chiusura) e restituisce 2 regole che raccomandano un grado di urgenza della manutenzione ≥ 2 (anticipazione delle ispezioni), e 1 regola che raccomanda un grado di urgenza della manutenzione ≥ 4 (intervento urgente).



Figura 40 Grado di urgenza per il ponte sul fiume Cassibile

Le regole supportate sono:

- se “materiale” ≥ 2 e “superficie danneggiata” ≥ 2 e “zona sismica” ≥ 2 allora il grado di urgenza delle attività manutentive è ≥ 2 (supporto 40)
- se “tipologia di danno” ≥ 3 e “dispositivi antisismici” ≥ 2 allora il grado di urgenza delle attività manutentive è ≥ 2 (supporto 48)
- se “ambiente” ≥ 3 e “tipologia di danno” ≥ 3 allora il grado di urgenza delle attività manutentive è ≥ 4 (supporto 3)

In questo caso le motivazioni per le quali è opportuno adottare il grado di urgenza delle attività manutentive consigliato è che la tipologia di danno è elevata (corrosione) e l’ambiente è altamente aggressivo in quanto il ponte si trova in prossimità del mare.

6.4.3 Stima dei costi

A seguito del degrado evidenziato durante le ispezioni gli interventi consigliati sono:

- Idrodemolizione del calcestruzzo, sostituzione delle armature, applicazione di malta cementizia anticorrosiva delle armature a vista, ricostruzione del coprifermo con betoncino fibrorinforzato a ritiro compensato delle travi;

- Rinforzo a flessione delle travi mediante placcaggio con FRP;
- Incamiciatura con FRP e inserimento di nuove barre nei tiranti.

Il costo stimato dell'intervento è di 300.000 euro.

6.5 3° CASO DI STUDIO: PONTE D'AGRO' E FIUMEDINISI

I ponti D'Agrò e Fiumedinisi, sono ubicati lungo la SS114 a un centinaio di metri dal mare nella costa ionica. Il ponte D'Agrò (fig. 41 e 43) è sito al km 35+100 al confine tra i comuni di S. Teresa Riva e S. Alessio Siculo; mentre il ponte Fiumedinisi (fig. 42 e 43) è sito al km 25+350 al confine tra i comuni di Ali Terme e Nizza.

6.5.1 Acquisizione dei dati

Analogamente a quanto fatto per gli altri casi di studio, sono stati eseguiti dei sopralluoghi mirati alla compilazione delle schede di primo livello. Per quanto riguarda i dati relativi al TGM, e alla percentuale di traffico pesante, sono stati desunti dal database dell'ANAS. Le caratteristiche del terreno di fondazione e i valori relativi all'instabilità idrogeologica sono stati desunti dal Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico predisposto da Regione Sicilia [1]. Il valore di picco dell'accelerazione al suolo è stata ricavata utilizzando la classificazione sismica prevista dalle *Norme tecniche per le costruzioni (D.M.2008)*. Infine è stato utilizzato un software GIS per la localizzazione dei ponti all'interno della rete e per la valutazione di eventuali percorsi alternativi.

Viene riportata successivamente la descrizione dei ponti oggetto di studio.

6.5.1.1 Descrizione dei ponti

Sono stati progettati entrambi dall'Ing. Riccardo Morandi nel 1954. I manufatti constano rispettivamente di 8 e 12 campate, in semplice appoggio a luce variabile, con una luce massima della campata pari a 22,90 m. Ogni campata è realizzata da 5 travi a cassone chiuso in c.a.p. a sezione cava pressoché trapezoidale con altezza di 1,10 m e da 4 traversi in c.a dello spessore di 10 cm. Le spalle e le pile sono realizzate in muratura.



Figura 41 Ponte D'Agrò

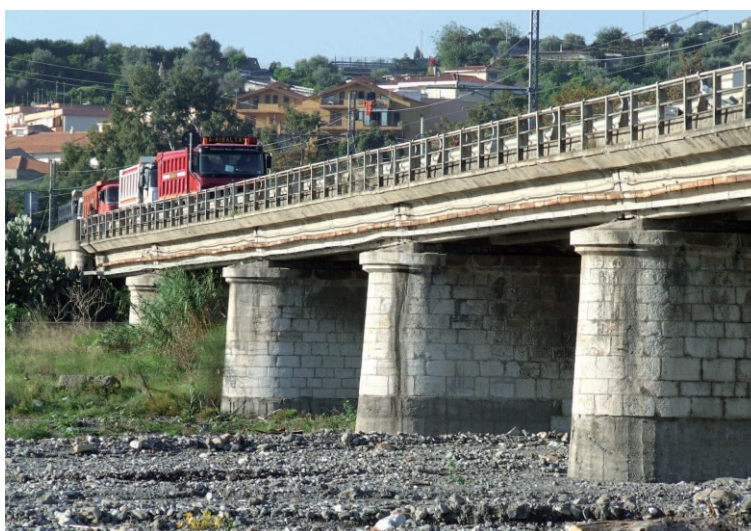


Figura 42 Ponte Fiumedinisi



Figura 43 Inquadramento territoriale Ponte D'Agrò e Ponte Fiumedinisi

Entrambi i ponti presentano le stesse tipologie di degrado che comprendono:

- Distacco del cls, notevole riduzione della sezione resistente ed esposizione dell'armatura di precompressione sia in campata che sull'appoggio.
- Riduzione della sezione resistente dell'armatura di precompressione dovuta alla corrosione ed in alcuni casi alla rottura dei fili che compongono i trefoli (fig. 44).

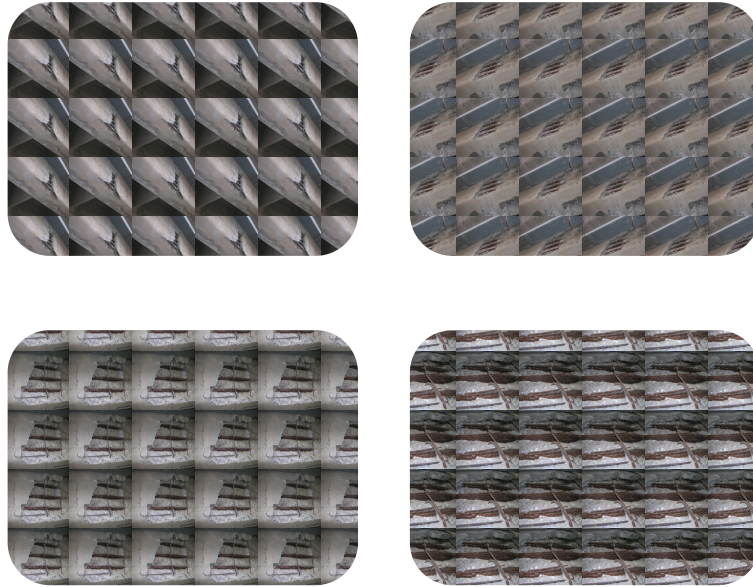


Figura 44 Corrosione armatura di precompressione

- Corrosione dell'armatura lenta in corrispondenza degli appoggi (fig. 45)



Figura 45 Corrosione armatura lenta

- Muratura fessurata e scalzamento delle fondazioni (fig. 46)



Figura 46 Scalzamento fondazioni e muratura fessurata

6.5.2 Determinazione del grado di urgenza delle attività manutentive

Utilizzando il sistema di supporto alle decisioni descritto nel capitolo precedente, il grado di urgenza delle attività manutentive suggerito è pari a 4 (limitazione del traffico o chiusura) e restituisce 49 regole che raccomandano un grado di urgenza della manutenzione ≥ 2 (anticipazione delle ispezioni), 24 regole che raccomandano un grado di urgenza della manutenzione ≥ 3 (intervento urgente) e 1 regola che raccomanda un grado di urgenza della manutenzione ≥ 4 (intervento urgente).

Parametro	Valore
Anno di costruzione	< 1970
Materiale	Calcestruzzo ...
Ambiente	Aggressivo
Terreno di fondazione	Terreni sciolti ...
Tipologia di danno	Deformazioni...
Superficie danneggiata	>60%
Elementi danneggiati	Elemento stru...
Zona sismica	ag > 0.25g
Dispositivi antisismici	no
Schema statico	travi appoggi...
Dissesto idrogeologico	Nessun rischio
TGM	6.000 - 20.00...
Traffico pesante	10% - 20%
Viabilità strategica	no
Percorsi alternativi	no

Regole supportate

URGENZA DELLE ATTIVITA' MANUTENTIVE

LIMITAZIONE DEL TRAFFICO O CHIUSURA

Figura 47 Grado di urgenza per il ponte sul fiume D'Agrò e Fiumedinisi

Le regole maggiormente supportate sono:

- se “superficie danneggiata” ≥ 2 e “zona sismica” ≥ 2 e “dispositivi antisismici” ≥ 2 allora il grado di urgenza delle attività manutentive è ≥ 2 (supporto 46)
- se “anno di costruzione” ≥ 2 e “superficie danneggiata” ≥ 2 e “elementi danneggiati” ≥ 3 e “zona sismica” ≥ 3 allora il grado di urgenza delle attività manutentive è ≥ 3 (supporto 28)
- se “ambiente” ≥ 3 e “tipologia di danno” ≥ 3 allora il grado di urgenza delle attività manutentive è ≥ 4 (supporto 3)

In questo caso le motivazioni per le quali è opportuno adottare il grado di urgenza delle attività manutentive consigliato è che la tipologia di danno è elevata (corrosione) e l’ambiente è altamente aggressivo in quanto i ponti si trova in prossimità del mare.

6.5.3 Stima dei costi

A seguito del degrado evidenziato durante le ispezioni gli interventi consigliati sono:

- Realizzazione di passerelle provvisorie adiacenti alla SS114
- Demolizione dei ponti esistenti
- Ricostruzione integrale dei ponti

Il costo stimato dell’intervento è di 5.000.000 euro per il ponte D’Agrò e 3.500.000 euro per il ponte Fiumedinisi

6.6 FASE DI OTTIMIZZAZIONE

Una volta che è stato stabilito il grado di urgenza della manutenzione e sono stati definiti e stimati i costi dei possibili interventi bisognerà passare alla fase di ottimizzazione. Si presuppone che l’ottimizzazione temporale avvenga in un arco di tempo breve, per esempio ogni 1 o 2 anni a seguito delle ispezioni visive. Abbiamo quindi applicato la procedura esposta nel capitolo precedente.

La procedura è stata applicata ai ponti dei casi di studio che hanno un grado di urgenza della manutenzione superiore o uguale a 3(intervento urgente) (tab.3).

Tabella 3 Tabella degli interventi e dei costi dei ponti casi di studio

Ponte	Caratteristiche ponte	Intervento	C
1	ponte in muratura SS 385 km 24+865	- Pulitura meccanica della muratura, lavaggio della muratura con acqua a pressione, ristilatura di giunti, eventuali interventi di scuci - cucì nelle zone di muratura maggiormente colpite, applicazione di biocidi. -Idrodemolizione del calcestruzzo, sostituzione delle armature, applicazione di malta cementizia anticorrosiva delle armature a vista, ricostruzione del copriferro con malte o betoncino fibrorinforzato a ritiro compensato. - Riempimento delle fessure mediante malta antiritiro, cuciture armate perpendicolari alle fessure.	100.000
2	ponte in cls	- Idrodemolizione del calcestruzzo, sostituzione delle armature, applicazione di malta cementizia anticorrosiva delle armature a vista, ricostruzione del copriferro con malte o betoncino fibrorinforzato a ritiro compensato. -Rinforzo a flessione delle travi mediante placcaggio con FRP. - Incamiciatura con FRP e inserimento di nuove barre.	300.000
3	ponte in c.a.p.	Demolizione e ricostruzione.	5.000.000
4	ponte in c.a.p.	Demolizione e ricostruzione.	3.150.000
5	ponte in muratura SS 385 km 26+249	-Idrodemolizione del calcestruzzo, sostituzione delle armature, applicazione di malta cementizia anticorrosiva delle armature a vista, ricostruzione del copriferro con malte o betoncino fibrorinforzato a ritiro compensato. -Realizzazione di briglie in gabbioni.	90.000
6	ponte in muratura SS 385 km 24+606	- Pulitura meccanica della muratura, lavaggio della muratura con acqua a pressione, ristilatura di giunti, eventuali interventi di scuci - cucì nelle zone di muratura maggiormente colpite, applicazione di biocidi. -Idrodemolizione del calcestruzzo, sostituzione delle armature, applicazione di malta cementizia anticorrosiva delle armature a vista, ricostruzione del copriferro con malte o betoncino fibrorinforzato a ritiro compensato. - Riempimento delle fessure mediante malta antiritiro, cuciture armate perpendicolari alle fessure.	120.000

Ma a questi casi sono stati aggiunti ulteriori casi di studio di cui non si riporta la completa trattazione ma soli i risultati (tab. 4)

Tabella 4 Tabella degli interventi e dei costi

Ponte	Caratteristiche ponte	Intervento	C
7	ponte in muratura	Pulitura meccanica della muratura, lavaggio della muratura con acqua a pressione, ristilatura di giunti, eventuali interventi di scuci - cucì nelle zone di muratura maggiormente colpite, applicazione di biocidi. Riempimento delle fessure mediante malta antiritiro, cuciture armate perpendicolari alle fessure.	80.000
8	ponte in c.a.p.	Sollevamento dell'impalcato, ricostruzione e regolarizzazione delle superfici con malte o betoncini reoplastici, sostituzione degli appoggi. Ripristino del sistema di smaltimento delle acque. Rinforzo a flessione delle travi tramite placcaggio con FRP.	650.000
9	ponte in muratura	Svuotamento del riempimento e ricostruzione dell'impalcato.	300.000
10	viadotto in c.a.p.	Trasformazione dell'impalcato da isostatico a continuo attraverso l'utilizzo di catene Sollevamento dell'impalcato, ricostruzione e regolarizzazione delle superfici con malte o betoncini reoplastici, sostituzione dei dispositivi antisismicimematiche	1.000.000
11	cavalcavia in cls	Sollevamento dell'impalcato, ricostruzione e regolarizzazione delle superfici con malte o betoncini reoplastici, sostituzione degli appoggi. Rimozione o demolizione dei giunte esistenti e fornitura e posa in opera dei giunti	1.200.000
12	ponte in cls	Idrodemolizione del calcestruzzo, sostituzione delle armature, applicazione di malta cementizia anticorrosiva delle armature a vista, ricostruzione del copriferro con malte o betoncino fibrorinforzato a ritiro compensato Ripristino del sistema di smaltimento delle acque o progettazione di un nuovo sistema di canalizzazione delle acque meteoriche Rinforzo a flessione delle travi tramite placcaggio con FRP.	750.000
13	ponte in cls	Rinforzo a compressione delle pile tramite incamiciatura con FRP. Rinforzo delle spalle tramite tiranti sul paramento.	850.000
14	ponte in cls	Idrodemolizione del calcestruzzo, sostituzione delle armature, applicazione di malta cementizia anticorrosiva delle armature a vista, ricostruzione del copriferro con malte o betoncino fibrorinforzato a ritiro compensato. Incamiciatura con utilizzo di FRP e inserimento nuove barre.	900.000
15	ponte in cls	Idrodemolizione del calcestruzzo, sostituzione delle armature, applicazione di malta cementizia anticorrosiva delle armature a vista, ricostruzione del copriferro con malte o betoncino fibrorinforzato a ritiro compensato Ripristino del sistema di smaltimento delle acque o progettazione di un nuovo sistema di canalizzazione delle acque meteoriche	700.000
16	cavalcavia in cls	Inserimento nuove barre e incamiciatura con utilizzo di FRP delle travi	150.000
17	ponte in muratura	Svuotamento degli archi e ricostruzione dell'impalcato	250.000
18	ponte in muratura	Demolizione e ricostruzione.	500.000
19	ponte in muratura	Riempimento delle fessure mediante malta antiritiro, cuciture armate perpendicolari alle fessure	70.000
20	ponte in muratura	Pulitura meccanica della muratura, lavaggio della muratura con acqua a pressione, ristilatura di giunti, eventuali interventi di scuci - cucì nelle zone di muratura maggiormente colpite, applicazione di biocidi.	200.000

Quindi per ogni ponte, una volta noto il tipo di intervento sono stati riportati (tab.5) i valori relativi ai parametri definiti al cap 5: costi (C), incremento della vita utile (Vu), importanza della strada (I), durata dei lavori (D), impatto dei lavori sulla viabilità (S), presenza o meno di percorsi alternativi (P).

Tabella 5 Tabella dei parametri

Ponte	C	V _u	I	D	S	P
1	100.000	20	M	B	B	B
2	300.000	20	M	M	M	L
3	5.000.000	50	M	A	A	B
4	3.150.000	50	M	A	A	B
5	90.000	20	M	B	B	L
6	120.000	50	M	A	A	B
7	80.000	20	M	B	B	B
8	650.000	30	A	A	M	L
9	300.000	30	M	M	A	N
10	1.000.000	30	A	M	A	B
11	1.200.000	20	A	M	A	L
12	750.000	30	B	M	M	L
13	850.000	20	A	M	B	B
14	900.000	30	B	A	A	B
15	700.000	30	A	M	A	N
16	150.000	20	B	M	B	B
17	250.000	30	B	M	A	N
18	500.000	50	A	A	A	L
19	70.000	20	B	B	B	L
20	200.000	20	A	B	B	L

A questo punto viene applicata la procedura di ottimizzazione e vengono generate un insieme di soluzioni Pareto-ottimali attraverso la programmazione lineare di tipo 0-1.

Le variabili si riferiscono agli interventi manutentivi definiti per ciascun ponte, e vengono definite nel seguente modo:

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{se l'intervento viene eseguito} \\ 0 & \text{se l'intervento non viene eseguito} \end{cases}$$

Le funzioni considerate nel processo di ottimizzazione, definite al cap.5 sono:

- ✓ C = costo totale;
- ✓ f_1 = numero di ponti il cui intervento manutentivo incrementa la vita utile di “almeno” 30 anni;
- ✓ f_2 = numero di ponti il cui intervento manutentivo incrementa la vita utile di “almeno” 50 anni;
- ✓ f_3 = numero di ponti in cui l’importanza della strada è “almeno” alta;
- ✓ f_4 = numero di ponti in cui l’importanza della strada è “almeno” media;
- ✓ f_5 = numero di ponti in cui l’importanza della strada è “al massimo” media;
- ✓ f_6 = numero di ponti in cui l’importanza della strada è “al massimo” bassa;
- ✓ f_7 = numero di ponti in cui la durata dei lavori è “al massimo” media;
- ✓ f_8 = numero di ponti in cui la durata dei lavori è “al massimo” bassa;
- ✓ f_9 = numero di ponti in cui l’impatto dei lavori sulla viabilità è “al massimo” media;
- ✓ f_{10} = numero di ponti in cui l’impatto dei lavori sulla viabilità è “al massimo” bassa;
- ✓ f_{11} = numero di ponti in cui il percorso alternativo è “almeno” alto;
- ✓ f_{12} = numero di ponti in cui il percorso alternativo è “almeno” media;
- ✓ f_{13} = numero di ponti in cui il percorso alternativo è “al massimo” media;
- ✓ f_{14} = numero di ponti in cui il percorso alternativo è “al massimo” bassa.

Le soluzioni vengono generate massimizzando o minimizzando una delle funzioni definite sopra e modificando di volta in volta i vincoli scelti.

Per tutte le soluzioni generate è stato considerato il vincolo sul budget:

$$C_{min} \leq C \leq C_{max}$$

$$9.000.000 \text{ euro} \leq C \leq 10.000.000 \text{ euro}$$

Un insieme di queste soluzioni viene sottoposta al decisore (tab. 6).

Tabella 6 Insieme delle soluzioni

Soluzioni	C	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆	f ₇	f ₈	f ₉	f ₁₀	f ₁₁	f ₁₂	f ₁₃	f ₁₄	Vincolo	Obiettivo
S1	9.520.000	5	4	1	4	4	1	1	0	1	0	3	5	2	0	$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$	max f ₂
S2	9.240.000	7	3	7	14	7	0	10	4	7	5	6	12	8	2	$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$ $f_3 \geq 5$	max f ₄
S3	9.590.000	10	3	5	8	7	4	7	1	3	1	4	9	8	3	$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$ $f_3 \geq 5$	max f ₁
S4	9.010.000	7	3	7	11	7	3	10	4	7	6	6	12	8	2	$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$	max f ₃
S5	9.860.000	6	3	5	11	9	3	10	5	10	7	7	14	7	0	$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$ $f_3 \geq 5$	max f ₉
S6	9.310.000	7	2	5	12	11	4	14	5	9	7	7	13	9	3	$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$ $f_3 \geq 5$	max f ₇
S7	9.520.000	10	3	6	10	8	4	9	3	6	4	6	11	8	3	$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$ $f_1 \geq 8$	max f ₃
S8	9.590.000	10	3	5	8	7	4	7	1	3	1	4	9	8	3	$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$ $f_1 \geq 10$ $f_3 \geq 5$	max f ₁₄
S9	9.460.000	7	3	7	14	9	2	12	5	9	7	7	14	9	2	$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$ $f_8 \geq 5$ $f_{10} \geq 7$	max f ₄
S10	9.910.000	6	2	3	10	11	4	11	5	9	7	8	13	6	1	$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$ $f_8 \geq 5$ $f_{10} \geq 7$	max f ₁₁

Per ogni soluzione è possibile conoscere quanti e quali sono i ponti su cui bisogna effettuare l'intervento (tab. 7).

Tabella 7 Tabella degli interventi sui ponti

Soluzioni	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₈	x ₉	x ₁₀	x ₁₁	x ₁₂	x ₁₃	x ₁₄	x ₁₅	x ₁₆	x ₁₇	x ₁₈	x ₁₉	x ₂₀
S1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
S2	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1
S3	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0
S4	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
S5	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1
S6	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1
S7	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1
S8	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0
S9	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1
S10	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1

Fino a quando il decisore non individua la soluzione per lui soddisfacente dovrà indicare quali soluzioni fra quelle proposte sono comunque "buone" (tab. 8).

Supponiamo che il decisore scelga come soluzioni “buone” la soluzione S2, S4, S7 e S9 perché le soluzioni trovate garantiscono la manutenzione per un numero di ponti che si trovano su reti primarie superiore a 6.

Tabella 8 Insieme delle soluzioni

Soluzioni	C	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆	f ₇	f ₈	f ₉	f ₁₀	f ₁₁	f ₁₂	f ₁₃	f ₁₄	Soluzione buone
S1	9.520.000	5	4	1	4	4	1	1	0	1	0	3	5	2	0	
S2	9.240.000	7	3	7	14	7	0	10	4	7	5	6	12	8	2	X
S3	9.590.000	10	3	5	8	7	4	7	1	3	1	4	9	8	3	
S4	9.010.000	7	3	7	11	7	3	10	4	7	6	6	12	8	2	X
S5	9.860.000	6	3	5	11	9	3	10	5	10	7	7	14	7	0	
S6	9.310.000	7	2	5	12	11	4	14	5	9	7	7	13	9	3	
S7	9.520.000	10	3	6	10	8	4	9	3	6	4	6	11	8	3	X
S8	9.590.000	10	3	5	8	7	4	7	1	3	1	4	9	8	3	
S9	9.460.000	7	3	7	14	9	2	12	5	9	7	7	14	9	2	X
S10	9.910.000	6	2	3	10	11	4	11	5	9	7	8	13	6	1	

Viene applicato quindi il DRSA considerando come “casi esemplari” i casi della tabella 8, vengono estratte le regole decisionali e alcune di queste vengono sottoposte al decisore (tra parentesi indichiamo il supporto di ogni regola):

- ✓ *regola 1*) se ‘numero di ponti il cui intervento manutentivo incrementa la vita utile di “almeno” 30 anni’ ≥ 7 e ‘numero di ponti il cui intervento manutentivo incrementa la vita utile di “almeno” 50 anni’ ≥ 3 e ‘numero di ponti in cui il percorso alternativo è “almeno” alto’ ≥ 6 allora la soluzione è “buona”
(S2, S4, S7, S9)
- ✓ *regola 2*) se ‘numero di ponti in cui l’importanza della strada è “almeno” alta’ ≥ 6 allora la soluzione è “buona”
(S2, S4, S7, S9)
- ✓ *regola 3*) se ‘numero di ponti il cui intervento manutentivo incrementa la vita utile di “almeno” 30 anni’ ≥ 10 e ‘numero di ponti in cui la durata dei lavori è “al massimo” media’ ≥ 9 allora la soluzione è “buona”
(S7)

- ✓ *regola 4)* se ‘numero di ponti il cui intervento manutentivo incrementa la vita utile di “almeno” 50 anni’ ≥ 3 e ‘numero di ponti in cui l’importanza della strada è “al massimo” media’ ≥ 8 e ‘numero di ponti in cui il percorso alternativo è “al massimo” media’ ≥ 8 allora la soluzione è “buona”
(S7, S9)
- ✓ *regola 5)* se ‘costo totale’ $\leq 9.460.000$ euro e ‘numero di ponti il cui intervento manutentivo incrementa la vita utile di “almeno” 50 anni’ ≥ 3 allora la soluzione è “buona”
(S2, S4, S9)

Fra queste regole, il decisore sceglie la regola numero 2 come la più adatta ad esprimere le sue preferenze. Questa regola costituirà un vincolo per le prossime soluzioni che verranno generate, che si traduce in:

$$f_3 \geq 6$$

Si passa quindi a generare nuove soluzioni, considerando sempre il vincolo sul budget pari a:

$$9.000.000 \text{ euro} \leq C \leq 10.000.000 \text{ euro}$$

Sono quindi state generate un altro insieme di soluzioni Pareto-efficienti che vengono nuovamente sottoposte al decisore (tab. 9).

Tabella 9 Insieme delle soluzioni I iterazione

Soluzioni	C	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆	f ₇	f ₈	f ₉	f ₁₀	f ₁₁	f ₁₂	f ₁₃	f ₁₄	Vincolo	Obiettivo
S1	9.370.000	10	3	6	9	6	3	7	1	4	2	5	9	7	3	$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$ $f_3 \geq 6$	max f ₁
S2	9.860.000	8	3	7	12	9	4	12	5	9	7	7	14	9	2	$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$ $f_3 \geq 6$ $f_{10} \geq 7$	max f ₁
S3	9.960.000	8	2	6	13	11	4	14	5	10	7	7	14	10	3	$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$ $f_3 \geq 6$ $f_{10} \geq 7$	max f ₇
S4	9.110.000	9	3	6	12	10	4	11	5	8	7	8	13	8	3	$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$ $f_3 \geq 6$ $f_{10} \geq 7$	max f ₁₁
S5	9.260.000	9	3	6	13	11	4	13	5	10	7	7	14	10	3	$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$ $f_3 \geq 6$ $f_{10} \geq 7$ $f_1 \geq 8$	max f ₉

Per ogni soluzione è possibile conoscere quanti e quali sono i ponti su cui bisogna effettuare l'intervento (tab. 10).

Tabella 10 Tabella degli interventi sui ponti

Soluzioni	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₈	x ₉	x ₁₀	x ₁₁	x ₁₂	x ₁₃	x ₁₄	x ₁₅	x ₁₆	x ₁₇	x ₁₈	x ₁₉	x ₂₀
S1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1
S2	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
S3	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1
S4	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
S5	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1

Supponiamo che il decisore non riesca a trovare la soluzione “soddisfacente” e scelga come soluzioni “buone” la soluzione S2, S3, S4 e S5, scartando la soluzione S1 perché in tale soluzione il numero di ponti in cui la durata dei lavori è “al massimo” bassa è pari a 1 e il numero di ponti in cui l'impatto dei lavori sulla viabilità è “al massimo” bassa è pari a 2 mentre le altre soluzioni hanno valori più alti (tab.11).

Tabella 11 Insieme delle soluzioni I iterazione

Soluzioni	C	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆	f ₇	f ₈	f ₉	f ₁₀	f ₁₁	f ₁₂	f ₁₃	f ₁₄	Soluzione buone
S1	9.370.000	10	3	6	9	6	3	7	1	4	2	5	9	7	3	
S2	9.860.000	8	3	7	12	9	4	12	5	9	7	7	14	9	2	X
S3	9.960.000	8	2	6	13	11	4	14	5	10	7	7	14	10	3	X
S4	9.110.000	9	3	6	12	10	4	11	5	8	7	8	13	8	3	X
S5	9.260.000	9	3	6	13	11	4	13	5	10	7	7	14	10	3	X

Viene applicato quindi il DRSA considerando come “casi esemplari” i casi della tabella 11, vengono estratte le regole decisionali e alcune di queste vengono sottoposte al decisore (tra parentesi indichiamo il supporto di ogni regola):

- ✓ regola 1) se ‘numero di ponti in cui la durata dei lavori è “al massimo” media’ \geq 11 allora la soluzione è “buona”
(S2, S3, S4, S5)

- ✓ *regola 2)* se ‘numero di ponti in cui il percorso alternativo è “almeno” media’ ≥ 14 allora la soluzione è “buona”
(S2, S3, S5)
- ✓ *regola 3)* se ‘numero di ponti in cui l’impatto dei lavori sulla viabilità è “ al massimo” bassa’ ≥ 7 allora la soluzione è “buona”
(S2, S3, S4, S5)
- ✓ *regola 4)* se ‘numero di ponti in cui l’importanza della strada è “ al massimo” bassa ≥ 4 allora la soluzione è “buona”
(S2, S3, S4, S5)

Fra queste regole, il decisore sceglie la regola numero 3 come la più adatta ad esprimere le sue preferenze. Questa regola costituirà un vincolo per le prossime soluzioni che verranno generate, che si traduce in:

$$f_{10} \geq 7$$

Si passa quindi a generare nuove soluzioni, considerando sempre il vincolo sul budget pari a:

$$9.000.000 \text{ euro} \leq C \leq 10.000.000 \text{ euro}$$

Sono quindi state generate un altro insieme di soluzioni Pareto-efficienti che vengono nuovamente sottoposte al decisore (tab.12).

Tabella 12 Insieme delle soluzioni II iterazione

Soluzioni	C	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆	f ₇	f ₈	f ₉	f ₁₀	f ₁₁	f ₁₂	f ₁₃	f ₁₄	Vincolo	Obiettivo
S1	9.860.000	10	3	6	12	11	5	12	5	9	7	8	14	9	3	$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$ $f_3 \geq 6$	max f ₁
S2	9.160.000	8	3	6	13	10	3	11	5	9	7	8	14	8	2	$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$ $f_3 \geq 6$ $f_{10} \geq 7$	max f ₂
S3	9.460.000	7	3	7	14	9	2	12	5	9	7	7	14	9	2	$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$ $f_3 \geq 6$ $f_{10} \geq 7$	max f ₄

Per ogni soluzione è possibile conoscere quanti e quali sono i ponti su cui bisogna effettuare l’intervento (tab. 13).

Tabella 13 Tabella degli interventi sui ponti

Soluzioni	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₈	x ₉	x ₁₀	x ₁₁	x ₁₂	x ₁₃	x ₁₄	x ₁₅	x ₁₆	x ₁₇	x ₁₈	x ₁₉	x ₂₀
S1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S2	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1
S3	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1

Supponiamo che il decisore scelga come soluzione “soddisfacente” la soluzione 1 (tab. 14) perché con questa soluzione la manutenzione viene eseguita su 6 ponti che si trovano su strade principali (f_3), su 10 ponti che hanno un incremento della vita utile maggiore di 30 anni (f_1). Inoltre per 12 ponti la durata dei lavori è media o bassa (f_7) e questo comporta minori problemi al traffico.

Tabella 14 Insieme delle soluzioni II iterazione

Soluzioni	C	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆	f ₇	f ₈	f ₉	f ₁₀	f ₁₁	f ₁₂	f ₁₃	f ₁₄
S1	9.860.000	10	3	6	12	11	5	12	5	9	7	8	14	9	3
S2	9.160.000	8	3	6	13	10	3	11	5	9	7	8	14	8	2
S3	9.460.000	7	3	7	14	9	2	12	5	9	7	7	14	9	2

Una volta che il decisore ha effettuato la scelta, il processo iterativo si ferma.

BIBLIOGRAFIA

[1] <http://www.sitr.regione.sicilia.it/pai/>

[2] D. M. del 14.01.2008 “Norme tecniche per le costruzioni “(G.U. n° 29 del 4 febbraio 2008).

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Nella presente tesi è stata affrontata la problematica della manutenzione dei ponti stradali mediante l'applicazione di un sistema di supporto alle decisioni che consenta all'ente gestore di pianificare le attività manutentive, fornendo gli strumenti necessari per lo sviluppo di tutte le fasi del processo, a partire dal rilievo dello stato di degrado dei ponti fino all'individuazione degli interventi più idonei per il ripristino della funzionalità degli stessi e alla definizione della priorità con cui realizzarli, al fine di ottimizzare l'utilizzo del budget disponibile.

Il sistema di supporto proposto è basato su un modello di analisi multicriteriale che utilizza la teoria del Dominance Based Rough Set. Al fine di consentire il reperimento dei dati necessari all'implementazione del modello, è stata predisposta una nuova scheda per il rilievo dello stato di degrado dei ponti. La definizione, poi, dei dati necessari all'implementazione del supporto decisionale considera parametri propri della struttura (schema statico, anno di costruzione, degrado), parametri di tipo ambientale (rischio sismico, rischio idrogeologico, ...), e parametri relativi alla rete (caratteristiche del traffico, della viabilità,...).

Il sistema proposto presenta numerosi vantaggi in termini di trasparenza e applicabilità poiché consente di esprimere i risultati dell'analisi in modo facilmente comprensibile. Permette, inoltre, di trattare dati caratterizzati da vaghezza o imprecisione o dati di tipo qualitativo, di evidenziare le eventuali relazioni causa-effetto fra i dati disponibili sottolineando l'importanza ed il ruolo strategico di alcune informazioni e l'irrilevanza di altre, di costruire un modello di preferenze in termini di regole decisionali del tipo "if...then..".

Tale strumento presenta importanti vantaggi dal punto di vista della flessibilità e della trasparenza rispetto alle altre metodologie perché viene costruito sulle preferenze del decisore; pertanto può essere aggiornato periodicamente nella scelta dei parametri considerati in conseguenza della pratica e dell'esperienza acquisita o delle diverse politiche di gestione.

Il metodo è stato applicato, nell'ambito della presente tesi, a dei casi di studio giudicati rappresentativi delle tipologie costruttive maggiormente presenti sulla viabilità secondaria. I risultati hanno confermato i molteplici vantaggi che il metodo proposto permette di ottenere, rispetto a tutte le altre metodologie attualmente disponibili.

Tale caso di studio deve essere visto come una prima sperimentazione, a cui dovranno seguire confronti più estesi considerando campioni più numerosi di ponti e confrontando i risultati con altre metodologie di supporto alle decisioni. Potrebbe anche essere prevista una pianificazione del budget a lungo termine introducendo i modelli di predizione del tasso di deterioramento. Un ulteriore passo potrà essere quello di implementare il metodo all'interno di un software di facile utilizzo per gli enti gestori.

ALLEGATO 1

Schede di 1° livello per il rilievo del degrado

Sezione 3	<p>DESCRIZIONE</p> <p>Tipo: cavalcavia <input type="checkbox"/> ponte <input type="checkbox"/> viadotto <input type="checkbox"/></p> <p>Anno di costruzione: _____ (certo <input type="checkbox"/> presunto <input type="checkbox"/>)</p> <p>Lunghezza: _____m</p> <p>Larghezza: _____m</p> <p>Numero di campate: _____</p> <p>Andamento: rettilineo <input type="checkbox"/> curvilineo <input type="checkbox"/></p>	<p>IMPALCATO</p> <p>Tipologia: travata <input type="checkbox"/> cassone <input type="checkbox"/> reticolare <input type="checkbox"/> solettone <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> </div> <p>Materiale: calcestruzzo <input type="checkbox"/> c.a.p. <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____</p> <p>Numero giunti trasversali: _____</p>
	<p>SPALLE</p> <p>Tipologia: a gravità <input type="checkbox"/> a sbalzo <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____</p> <p>Materiale: muratura <input type="checkbox"/> calcestruzzo <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____</p> <p>Altezza massima spalle: _____m</p> <p>Numero apparecchi d'appoggio: _____</p>	<p>PILE</p> <p>Tipologia: singola <input type="checkbox"/> telaio <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____</p> <p>Materiale: muratura <input type="checkbox"/> calcestruzzo <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____</p> <p>Numero pile: _____</p> <p>Altezza massima pila: _____m</p> <p>Numero apparecchi d'appoggio: _____</p>
	<p>DISPOSITIVI ANTISISMICI presenti <input type="checkbox"/> assenti <input type="checkbox"/></p> <p>Tipologia: isolatori <input type="checkbox"/> dissipatori <input type="checkbox"/></p> <p>NOTE:</p>	

Sezione 4	RAPPRESENTAZIONE SEMPLIFICATA DEL PONTE (SCHIZZO)
	ACCESSIBILITA'
	totalmente accessibile <input type="checkbox"/> parzialmente accessibile <input type="checkbox"/> inaccessibile <input type="checkbox"/>
	FOTO
	Numero di foto <input type="text"/> <input type="text"/>
	Nome file allegati _____

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI						
Sezione 5.1	calcestruzzo	IMPALCATO	<i>Estensione</i>			NOTE
			<i><10%</i>	<i>10% - 60%</i>	<i>> 60%</i>	
				Dilavamento calcestruzzo		
		Calcestruzzo ammalorato				
		Distacco copriferro				
		Armature lenta ossidata				
		Armatura di precompressione ossidata				
		Riduzione armatura di precompressione				
		Fessure orizzontali				
		Fessure verticali				
		Fessure diagonali				
		Danni da urto				
		Vegetazione intrusiva				

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI						
Sezione 5.2	SPALLA	Estensione			NOTE	
		<10%	10% - 60%	> 60%		
calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo					
	Calcestruzzo ammalorato					
	Distacco copriferro					
	Armature ossidata					
	Fessure orizzontali					
	Fessure verticali					
	Fessure diagonali					
	Danni da urto					
	Vegetazione intrusiva					
	Scalzamento					
	Fuori piombo					
	Apparecchi d'appoggio degradati					
	muratura	Muratura ammalorata				
		Efflorescenze				
Distacco dell'arco						
Fessure orizzontali						
Fessure verticali						
Fessure trasversali						
Polverizzazione giunti malta						
Vegetazione intrusiva						
Scalzamento						
Fuori piombo						
Apparecchi d'appoggio degradati						

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI						
Sezione 5.2	SPALLA	Estensione			NOTE	
		<10%	10% - 60%	> 60%		
calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo					
	Calcestruzzo ammalorato					
	Distacco copriferro					
	Armature ossidata					
	Fessure orizzontali					
	Fessure verticali					
	Fessure diagonali					
	Danni da urto					
	Vegetazione intrusiva					
	Scalzamento					
	Fuori piombo					
	Apparecchi d'appoggio degradati					
	muratura	Muratura ammalorata				
		Efflorescenze				
Distacco dell'arco						
Fessure orizzontali						
Fessure verticali						
Fessure trasversali						

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
PILA	Estensione			NOTE	
	<10%	10% - 60%	> 60%		
Sezione 5.3 calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo				
	Calcestruzzo ammalorato				
	Distacco copriferro				
	Armature ossidate				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				
	Scalzamento				
	Fuori piombo				
	Apparecchi d'appoggio degradati				
	Sezione 5.3 muratura	Muratura ammalorata			
		Efflorescenze			
Distacco dell'arco					
Fessure orizzontali					
Fessure verticali					
Fessure trasversali					
Polverizzazione giunti malta					
Vegetazione intrusiva					
Scalzamento					
Fuori piombo					
Apparecchi d'appoggio degradati					

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
PILA	Estensione			NOTE	
	<10%	10% - 60%	> 60%		
Sezione 5.3 calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo				
	Calcestruzzo ammalorato				
	Distacco copriferro				
	Armature ossidate				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				
	Scalzamento				
	Fuori piombo				
	Apparecchi d'appoggio degradati				
	Sezione 5.3 muratura	Muratura ammalorata			
		Efflorescenze			
Distacco dell'arco					
Fessure orizzontali					
Fessure verticali					

	DANNI AD ELEMENTI NON STRUTTURALI	Estensione			NOTE
		<10%	10% - 60%	> 60%	
Sezione 6	Pavimentazione danneggiata				
	Giunti degradati				
	Parapetti danneggiati o assenti				
	Guardrail danneggiati o assenti				
	Cordoli degradati				
	Scarichi ostruiti o danneggiati				
	Pali illuminazione danneggiati				

NOTE ESPLICATIVE SULLA COMPILAZIONE DELLA SCHEDA

Sezione 1 – Nella prima sezione devono essere riportate le informazioni relative all'identificazione del ponte, alla sua localizzazione e alla caratterizzazione della strada all'interno della rete viaria.

➤ **Identificazione ponte**

Nome ponte: si deve specificare il nome dell'opera

Provincia: si deve specificare la provincia di appartenenza dell'opera.

Comune: si deve specificare il comune di appartenenza dell'opera.

➤ **Localizzazione**

Coordinate piane UTM (WGS84): si devono specificare le coordinate est e nord utilizzando come sistema piano la *proiezione universale trasversa di Mercatore* (UTM) con riferimento al WGS84.

Altitudine: si deve specificare la distanza verticale dell'opera rispetto al livello del mare.

➤ **Tipologia strada**

Strada: bisogna indicare il carattere amministrativo della strada, specificando fra:

statale: è un'arteria di importanza nazionale gestita dall'amministrazione dello stato;

regionale: è una strada di discreta importanza la cui proprietà è inclusa nel demanio delle regioni;

provinciale: è una strada di secondaria importanza di proprietà del demanio provinciale e in gestione alla stessa;

comunale: è una strada che congiunge il capoluogo del comune con le proprie frazioni di proprietà del demanio comunale e in gestione alla stessa.

Numero strada: bisogna indicare la nomenclatura della strada (ad es. SS 113).

Classificazione: bisogna indicare le caratteristiche tecniche, costruttive e funzionali, specificando fra:

autostrada: strada extraurbana o urbana a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico invalicabile, ciascuna con almeno due corsie di marcia, eventuale banchina pavimentata a sinistra e corsia di emergenza o banchina pavimentata a destra, priva di intersezioni a raso e di accessi privati, dotata di recinzione e di sistemi di assistenza all'utente lungo l'intero tracciato, riservata alla circolazione di talune categorie di veicoli a motore e contraddistinta da appositi segnali di inizio e fine;

extraurbana principale: strada a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico invalicabile, ciascuna con almeno due corsie di marcia e banchina pavimentata a destra, con accessi alle proprietà laterali coordinati, contraddistinta dagli appositi segnali di inizio e fine, riservata alla circolazione di talune categorie di veicoli a motore; per eventuali altre categorie di utenti devono essere previsti opportuni spazi;

extraurbana secondaria: strada ad unica carreggiata con almeno una corsia per senso di marcia e banchine.

Progressiva: si deve specificare la progressiva chilometrica di inizio e fine opera, calcolata in riferimento alla posizione dell'opera lungo la rete viaria.

Sezione 2 – In questa sezione sono presenti i dati relativi alla caratterizzazione del sito riguardanti le condizioni del terreno nel quale è stata realizzata l'opera.

➤ **Dati geomorfologici**

Morfologia del sito: bisogna indicare l'andamento del sito sul quale insiste l'opera. In particolare bisognerà specificare se al di sotto delle pile il sito è:

pianeggiante: se il sito è privo di dislivelli o presenta dei leggeri rilievi e/o depressioni;

ondulato: se il sito presenta notevoli rilievi e/o depressioni.

Posizione del ponte rispetto al pendio: bisogna scegliere fra:

ortogonale: se il ponte si sviluppa ortogonalmente al pendio;

parallelo: se il ponte si sviluppa parallelamente al pendio.

Falde: bisogna indicare se sono presenti delle falde acquifere, specificando tra:

assenti: se si è certi che non ci sono falde presenti in prossimità dell'opera d'arte;

presenti: se si è certi della presenza di falde in prossimità dell'opera d'arte;

non determinabili: se non si dispone di informazioni relative alle falde acquifere.

Fenomeni franosi: bisogna indicare se sono presenti fenomeni di movimento o caduta di materiale roccioso o sciolto a causa dell'instabilità del suolo o del sottosuolo che interessano i pendii che si trovano in prossimità dell'opera, specificando fra:

assenti: se si è certi che non si sono verificati fenomeni di instabilità;

presenti: se si è certi della presenza di fenomeni di instabilità;

non determinabili: se non si dispone di informazioni relativi a tali fenomeni.

➤ **Terreno fondazione**

Tipologia: bisognerà indicare la classificazione del terreno scegliendo fra:

ammassi rocciosi: nel caso di presenza di rocce;

terreno granulare: nel caso di ghiaia e sabbia limosa o argillosa, con permeabilità media;

terreno limoso o argilloso: nel caso di limi e argille, con permeabilità scarsa o nulla.

Sezione 3 – In questa sezione vengono riportate le informazioni relative a tutte le componenti strutturali del ponte.

➤ **Descrizione**

Tipo: si deve specificare il tipo di opera a seconda dell'ostacolo che viene superato distinguendo fra:

cavalavia: quando consente l'attraversamento di un'altra via di comunicazione;

ponte: quando consente l'attraversamento di un corso d'acqua;

viadotto: quando consente l'attraversamento di una vallata.

Nel caso in cui l'opera non è compresa fra quelle presenti bisognerà compilare il campo "altro" specificando il tipo.

Anno di costruzione: si deve specificare l'anno di ultimazione dei lavori, specificando inoltre se è la data indicata è certa o presunta.

Lunghezza: si deve specificare l'estensione dell'opera conteggiata fra i giunti di spalla.

Larghezza: si deve specificare l'estensione dell'opera in direzione trasversale compresa degli eventuali sbalzi, da rilevare in mezzzeria perpendicolarmente all'asse longitudinale dell'impalcato.

Numero di campate: si deve specificare il numero totale delle campate che compongono l'opera.

Andamento: si deve specificare quale è lo sviluppo dell'opera specificando fra:

rettilineo: se l'andamento è prevalentemente dritto;

curvilineo: se l'andamento è prevalentemente in curva.

➤ **Archi**

Tipologia: la tipologia viene distinta in funzione del rapporto freccia/luce in:

arco a tutto sesto: è un arco semicircolare in cui il rapporto freccia/luce varia tra 0,4 e 0,5;

arco ribassato: è un arco circolare o policentrico o semiellittico in cui il rapporto freccia/luce varia tra 0,11 e 0,4;

arco acuto: è un arco in cui gli archi di circonferenza non sono raccordati ed il rapporto freccia/luce è superiore a 0,5.

Materiale: si deve specificare il tipo di materiale con cui sono stati realizzati i tiranti, nel caso in cui non è compreso fra quelli presenti bisognerà compilare il campo "altro" specificando il tipo.

Freccia: è la massima distanza verticale fra la sommità dell'intradosso e la linea di imposta dell'arco.

Luce: è la distanza orizzontale tra i due sostegni (spalle o pile) misurata sulla linea di imposta dell'arco.

➤ **Spalle**

Tipologia: bisogna specificare fra:

a gravità: generalmente costruiti in muratura di mattoni, di pietra cementata o a secco, oppure in semplice calcestruzzo; sono così denominati perché le condizioni di resistenza e stabilità dipendono principalmente dal peso proprio.

a sbalzo: generalmente costruiti in calcestruzzo armato; sono così denominati perché, essendo formati da pareti in calcestruzzo armato incastrate ad una suola di base, queste si comportano come travi a mensola verticali caricate dalla spinta delle terre; ossia come vere e proprie travi a sbalzo.

Nel caso in cui non è compreso fra quelli presenti bisognerà compilare il campo "altro" specificando il tipo.

Materiale: si deve specificare il tipo di materiale con cui è stato realizzato l'impalcato, nel caso in cui non è compreso fra quelli presenti bisognerà compilare il campo "altro" specificando il tipo.

Altezza massima spalle: bisogna indicare l'altezza massima delle spalle.

Numero apparecchi d'appoggio: bisogna indicare il numero totale di apparecchi d'appoggio distribuiti in direzione trasversale presenti nelle spalle.

➤ **Pile**

Tipologia: bisogna specificare fra:

singola: nel caso in cui la pila è costituita da un unico elemento (pilastro o setto);

telaio: nel caso in cui la pila è costituita da uno o più pilastri allineati secondo l'asse maggiore della pila e collegati tra loro in sommità dal pulvino ed eventualmente a quote intermedie da traversi.













Materiale: si deve specificare il tipo di materiale con cui è stato realizzato l'impalcato, nel caso in cui non è compreso fra quelli presenti bisognerà compilare il campo "altro" specificando il tipo.









Numero pile: si deve specificare il numero delle pile presenti nel ponte.

Altezza massima pila: bisogna indicare l'altezza della pila più alta.

Numero apparecchi d'appoggio: bisogna indicare il numero totale di apparecchi d'appoggio distribuiti in direzione trasversale presenti nelle pile.

Sezione 4 – In questa sezione vengono riportate le informazioni relative a tutte le componenti strutturali del ponte.
➤ Rappresentazione semplificata del ponte
In questa pagina bisognerà schematizzare in maniera semplificata l'opera d'arte, individuandone le parti fondamentali che la compongono (pile, spalle, impalcato,...) e le eventuali peculiarità.
➤ Accessibilità
In questa finestra bisognerà indicare l'accessibilità e quindi l'ispezionabilità del ponte distinguendo fra: <i>totalmente accessibile</i> : se il ponte è ispezionabile in tutte le sue parti, <i>parzialmente accessibile</i> : se il ponte è ispezionabile solo in parte, <i>inaccessibile</i> : se il ponte non è ispezionabile.
➤ Foto
Numero di foto : bisognerà indicare il numero di foto del ponte che sono state realizzate. Si specifica inoltre che il loro numero non deve essere inferiore a sei. Nome file allegati : bisognerà specificare il nome del file che contiene le foto.

Sezione 5 – In questa sezione bisognerà indicare i danni presenti negli elementi strutturali del ponte, specificandone in particolare la tipologia, l'estensione e la gravità in base al tipo di materiale.			
CALCESTRUZZO			
	Dilavamento calcestruzzo: E' un difetto che si manifesta attraverso aree di colorazione diversa del materiale integro causate dalla percolazione e penetrazione delle acque meteoriche.		Calcestruzzo spopolato: E' riferito a quelle parti di calcestruzzo che si presentano danneggiate rispetto alle condizioni originarie.
	Distacco del copri ferro: E' un difetto che si manifesta inizialmente con lesioni parallele agli spigoli o in corrispondenza dei ferri d'armatura. Successivamente si determina il distacco parziale o totale del copri ferro con messa a nudo dell'armatura.		Armatura ossidata: L'ossidazione dell'armatura avviene a seguito del contatto del ferro con l'aria nel caso di calcestruzzi porosi o mal confezionati in ambienti aggressivi.
	Fessure orizzontali: E' riferito a lesioni sul calcestruzzo il cui andamento è prevalentemente orizzontale.		Fessure verticali: E' riferito a lesioni sul calcestruzzo il cui andamento è prevalentemente verticale.
	Fessure diagonali: E' riferito a lesioni sul calcestruzzo il cui andamento è prevalentemente obliquo.		Vegetazione intrusiva: E' riferito alla presenza di piante, muschi e licheni sulle parti del manufatto.
	Scalzamento: Abbassamento del fondo dell'alveo che, in periodo di magra, evidenzia la scoperta in certe parti fin sotto la base delle fondazioni dirette e le palificate delle fondazioni indirette.		Fuori piombo: Riguarda gli elementi strutturali in elevazione quali pile e spalle, qualunque sia il materiale costituente. Si presenta come la mancanza di verticalità, generalmente per tutta l'altezza.
	Riduzione armatura di precompressione: Si verifica con una diminuzione di sezione dell'armatura di precompressione dovuta alla corrosione o alla rottura dei trefoli.		Apparecchio d'appoggio degradati: sono diversi a seconda del tipo di apparecchio utilizzato ma i più comuni sono: - ossidazione di metalliche, - invecchiamento del neoprene o del teflon - schiacciamento; - scricchiolio.
Altro			

MURATURA			
	<p>Murature spazzolate: E' riferito a quelle parti di muratura che si presentano danneggiate rispetto alle condizioni originarie.</p>		<p>Efflorescenze: Formazione di sostanze, generalmente di colore biancastro e di aspetto cristallino o polverulento o filamentoso, sulla superficie del manufatto.</p>
	<p>Distacco dell'arco: Il distacco consiste nel distacco tra i muri pedreggi e l'arco</p>		<p>Fessure orizzontali: E' riferito a lesioni sulla muratura il cui andamento è prevalentemente orizzontale. Generalmente si manifestano lungo i corsi di malta.</p>
	<p>Fessure verticali: E' riferito a lesioni sulla muratura il cui andamento è prevalentemente verticale. Possono interessare i soli giunti di malta tra i mattoni o i blocchi di pietra oppure andamento continuo che taglia gli elementi della muratura.</p>		<p>Fessure diagonali: E' riferito a lesioni sul calcestruzzo il cui andamento è prevalentemente obliquo. Possono seguire a fig. 72a, i letti di malta oppure avere un andamento continuo che taglia gli elementi della muratura.</p>
	<p>Polverizzazione: Decapazione, che si manifesta con la caduta spontanea del materiale sotto forma di polvere o granuli. Può portare alla completa distruzione e polverizzazione dei corsi di malta o dei materiali lapidei costituenti la muratura stessa.</p>		<p>Vegetazione intrusiva: E' riferito alla presenza di piante, muschi e licheni sulle parti del manufatto.</p>
	<p>Scalzamento: Abbassamento del fondo dell'alveo che, in periodo di magra, evidenzia la scoperta in certe parti fin sotto la base delle fondazioni dirette e le palificate delle fondazioni indirette.</p>		<p>Fuori piombo: Riguarda gli elementi strutturali in elevazione quali pile e spalle, qualunque sia il materiale costituente. Si presenta come la mancanza di verticalità, generalmente per tutta l'altezza.</p>
	<p>Apparecchio d'appoggio degradati: sono diversi a seconda del tipo di apparecchio utilizzato ma i più comuni sono: -ossidazione di metalliche, -invecchiamento del neoprene o del teflon -scricchiolio; -scorimento.</p>		
Altro			

Sezione 8 – In questa sezione bisognerà indicare i danni presenti negli elementi non strutturali del ponte, specificandone in particolare la gravità.	
	<p>Pavimentazione danneggiata: Si tratta di tutte quelle fessurazioni nella pavimentazione, presenti soprattutto in corrispondenza degli elementi di continuità (giunti sottopavimentazione), riconducibili spesso a normale ritiro del materiale costituente la pavimentazione.</p>
	<p>Giunti erosivi: Si tratta di avvallamenti o lesioni riscontrabili in corrispondenza dei giunti.</p>
	<p>Parapetti danneggiati o assenti: Si riferisce a parapetti che hanno perso l'integrità strutturale e quindi la loro funzione di sicurezza o sono in condizioni di precario ancoraggio, o ancora, a parapetti assenti o che presentano delle discontinuità.</p>
	<p>Guardraili danneggiati o assenti: Riferito alle situazioni in cui i guardraili risultano compromessi nella loro integrità, in seguito all'urto di automezzi, o risultano mancanti lungo i bordi dei ponti.</p>
	<p>Cordoli degradati: I cordoli sono quegli elementi lungo i bordi dell'impalcato dove vengono installati i parapetti o i guard-rail e lungo i quali solitamente vengono posizionati i sistemi di scarico dell'acqua. Il degrado si presenta con deterioramento del copripetra fino al distacco degli elementi lapidei; il fenomeno è particolarmente frequente in prossimità dei giunti.</p>
	<p>Scarichi ostruiti o danneggiati: Riferito alle situazioni in cui il libero defluire delle acque meteoriche risulta impedito dall'ostruzione della parte terminale degli scarichi o ancora alle situazioni in cui gli scarichi dei sistemi di canalizzazione delle acque meteoriche risultano danneggiati impedendo così lo smaltimento regolare delle acque stesse.</p>
	<p>Pali illuminazione danneggiati: Riferito alle situazioni in cui il danno o il degrado ai pali d'illuminazione non permette o sconsiglia il loro recupero.</p>
Altro	

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI						
Sezione 5.1	calcestruzzo	IMPALCATO	Estensione			NOTE
			<10%	10% - 60%	> 60%	
			Dilavamento calcestruzzo			
Calcestruzzo ammalorato						
Distacco copriferro						
Armature ossidate						
Fessure orizzontali						
Fessure verticali						
Fessure diagonali						
Danni da urto						
Vegetazione intrusiva						

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI						
Sezione 5.2	calcestruzzo	ARCO	Estensione			NOTE
			<10%	10% - 60%	> 60%	
			Dilavamento calcestruzzo			
Calcestruzzo ammalorato						
Distacco copriferro						
Armature ossidate						
Fessure orizzontali						
Fessure verticali						
Fessure diagonali						
Danni da urto						
Vegetazione intrusiva						

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI						
Sezione 5.3	calcestruzzo	TIRANTI	Estensione			NOTE
			<10%	10% - 60%	> 60%	
			Dilavamento calcestruzzo			
Calcestruzzo ammalorato						
Distacco copriferro						
Armature ossidate						
Fessure orizzontali						
Fessure verticali						
Fessure diagonali						
Danni da urto						
Vegetazione intrusiva						

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
Sezione 5.4	SPALLA	Estensione			NOTE
		<10%	10% - 60%	> 60%	
		calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo		
Calcestruzzo ammalorato					
Distacco copriferro					
Armature ossidate					
Fessure orizzontali					
Fessure verticali					
Fessure diagonali					
Danni da urto					
Vegetazione intrusiva					
Scalzamento					
Fuori piombo					
Apparecchi d'appoggio degradati					
muratura	Muratura ammalorata				
	Efflorescenze				
	Distacco dell'arco				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure trasversali				
	Polverizzazione giunti malta				
	Vegetazione intrusiva				
	Scalzamento				
	Fuori piombo				
	Apparecchi d'appoggio degradati				

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
Sezione 5.4	SPALLA	Estensione			NOTE
		<10%	10% - 60%	> 60%	
		calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo		
Calcestruzzo ammalorato					
Distacco copriferro					
Armature ossidate					
Fessure orizzontali					
Fessure verticali					
Fessure diagonali					
Danni da urto					
Vegetazione intrusiva					
Scalzamento					
Fuori piombo					
Apparecchi d'appoggio degradati					
muratura	Muratura ammalorata				
	Efflorescenze				
	Distacco dell'arco				
	Fessure orizzontali				
	Fessure trasversali				

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
PILA	Estensione			NOTE	
	<10%	10% - 60%	> 60%		
Sezione 5.5 calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo				
	Calcestruzzo ammalorato				
	Distacco copriferro				
	Armature ossidate				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				
	Scalzamento				
	Fuori piombo				
	Apparecchi d'appoggio degradati				
	Sezione 5.5 muratura	Muratura ammalorata			
		Efflorescenze			
Distacco dell'arco					
Fessure orizzontali					
Fessure verticali					
Fessure trasversali					
Polverizzazione giunti malta					
Vegetazione intrusiva					
Scalzamento					
Fuori piombo					
Apparecchi d'appoggio degradati					

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
PILA	Estensione			NOTE	
	<10%	10% - 60%	> 60%		
Sezione 5.5 calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo				
	Calcestruzzo ammalorato				
	Distacco copriferro				
	Armature ossidate				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				
	Scalzamento				
	Fuori piombo				
	Apparecchi d'appoggio degradati				
	Sezione 5.5 muratura	Muratura ammalorata			
		Efflorescenze			
Distacco dell'arco					
Fessure orizzontali					
Fessure verticali					

	DANNI AD ELEMENTI NON STRUTTURALI	Estensione			NOTE
		<10%	10% - 60%	> 60%	
Sezione 6	Pavimentazione danneggiata				
	Giunti degradati				
	Parapetti danneggiati o assenti				
	Guardrail danneggiati o assenti				
	Cordoli degradati				
	Scarichi ostruiti o danneggiati				
	Pali illuminazione danneggiati				

NOTE ESPLICATIVE SULLA COMPILAZIONE DELLA SCHEDA

Sezione 1 – Nella prima sezione devono essere riportate le informazioni relative all'identificazione del ponte, alla sua localizzazione e alla caratterizzazione della strada all'interno della rete viaria.

➤ **Identificazione ponte**

Nome ponte: si deve specificare il nome dell'opera

Provincia: si deve specificare la provincia di appartenenza dell'opera.

Comune: si deve specificare il comune di appartenenza dell'opera.

➤ **Localizzazione**

Coordinate piane UTM (WGS84): si devono specificare le coordinate est e nord utilizzando come sistema piano la *proiezione universale trasversa di Mercatore* (UTM) con riferimento al WGS84.

Altitudine: si deve specificare la distanza verticale dell'opera rispetto al livello del mare.

➤ **Tipologia strada**

Strada: bisogna indicare il carattere amministrativo della strada, specificando fra:

statale: è un'arteria di importanza nazionale gestita dall'amministrazione dello stato;

regionale: è una strada di discreta importanza la cui proprietà è inclusa nel demanio delle regioni;

provinciale: è una strada di secondaria importanza di proprietà del demanio provinciale e in gestione alla stessa;

comunale: è una strada che congiunge il capoluogo del comune con le proprie frazioni di proprietà del demanio comunale e in gestione alla stessa.

Numero strada: bisogna indicare la nomenclatura della strada (ad es. SS 113).

Classificazione: bisogna indicare le caratteristiche tecniche, costruttive e funzionali, specificando fra:

autostrada: strada extraurbana o urbana a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico invalicabile, ciascuna con almeno due corsie di marcia, eventuale banchina pavimentata a sinistra e corsia di emergenza o banchina pavimentata a destra, priva di intersezioni a raso e di accessi privati, dotata di recinzione e di sistemi di assistenza all'utente lungo l'intero tracciato, riservata alla circolazione di talune categorie di veicoli a motore e contraddistinta da appositi segnali di inizio e fine;

extraurbana principale: strada a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico invalicabile, ciascuna con almeno due corsie di marcia e banchina pavimentata a destra, priva di intersezioni a raso, con accessi alle proprietà laterali coordinati, contraddistinta dagli appositi segnali di inizio e fine, riservata alla circolazione di talune categorie di veicoli a motore; per eventuali altre categorie di utenti devono essere previsti opportuni spazi;

extraurbana secondaria: strada ad unica carreggiata con almeno una corsia per senso di marcia e banchine.

Progressiva: si deve specificare la progressiva chilometrica di inizio e fine opera, calcolata in riferimento alla posizione dell'opera lungo la rete viaria.

Sezione 2 – In questa sezione sono presenti i dati relativi alla caratterizzazione del sito riguardanti le condizioni del terreno nel quale è stata realizzata l'opera.

➤ **Dati geomorfologici**

Morfologia del sito: bisogna indicare l'andamento del sito sul quale insiste l'opera. In particolare bisognerà specificare se al di sotto delle pile il sito è:

pianeggiante: se il sito è privo di dislivelli o presenta dei leggeri rilievi e/o depressioni;

ondulato: se il sito presenta notevoli rilievi e/o depressioni.

Posizione del ponte rispetto al pendio: bisogna scegliere fra:

ortogonale: se il ponte si sviluppa ortogonalmente al pendio;

parallelo: se il ponte si sviluppa parallelamente al pendio.

Falde: bisogna indicare se sono presenti delle falde acquifere, specificando tra:

assenti: se si è certi che non ci sono falde presenti in prossimità dell'opera d'arte;

presenti: se si è certi della presenza di falde in prossimità dell'opera d'arte;

non determinabili: se non si dispone di informazioni relative alle falde acquifere.

Fenomeni franosi: bisogna indicare se sono presenti fenomeni di movimento o caduta di materiale roccioso o sciolto a causa dell'instabilità del suolo o del sottosuolo che interessano i pendii che si trovano in prossimità dell'opera, specificando fra:

assenti: se si è certi che non si sono verificati fenomeni di instabilità;

presenti: se si è certi della presenza di fenomeni di instabilità;

non determinabili: se non si dispone di informazioni relativi a tali fenomeni.

➤ **Terreno fondazione**

Tipologia: bisognerà indicare la classificazione del terreno scegliendo fra:

ammassi rocciosi: nel caso di presenza di rocce;

terreno granulare: nel caso di ghiaia e sabbia limosa o argillosa, con permeabilità media;

terreno limoso o argilloso: nel caso di limi e argille, con permeabilità scarsa o nulla.

Sezione 3 – In questa sezione vengono riportate le informazioni relative a tutte le componenti strutturali del ponte.	
➤ Descrizione	
<p>Tipo: si deve specificare il tipo di opera a seconda dell'ostacolo che viene superato distinguendo fra: <i>cavalavia:</i> quando consente l'attraversamento di un'altra via di comunicazione; <i>ponte:</i> quando consente l'attraversamento di un corso d'acqua; <i>viadotto:</i> quando consente l'attraversamento di una vallata.</p> <p>Nel caso in cui l'opera non è compresa fra quelle presenti bisognerà compilare il campo "altro" specificando il tipo.</p> <p>Anno di costruzione: si deve specificare l'anno di ultimazione dei lavori, specificando inoltre se è la data indicata è certa o presunta.</p> <p>Lunghezza: si deve specificare l'estensione dell'opera conteggiata fra i giunti di spalla.</p> <p>Larghezza: si deve specificare l'estensione dell'opera in direzione trasversale compresa degli eventuali sbalzi, da rilevare in mezzzeria perpendicolarmente all'asse longitudinale dell'impalcato.</p> <p>Numero di campate: si deve specificare il numero totale delle campate che compongono l'opera.</p> <p>Andamento: si deve specificare quale è lo sviluppo dell'opera specificando fra: <i>rettilineo:</i> se l'andamento è prevalentemente dritto; <i>curvilineo:</i> se l'andamento è prevalentemente in curva.</p>	
➤ Archi	
<p>Tipologia: la tipologia viene distinta in funzione del rapporto freccia/luce in: <i>arco a tutto sesto:</i> è un arco semicircolare in cui il rapporto freccia/luce varia tra 0,4 e 0,5; <i>arco ribassato:</i> è un arco circolare o policentrico o semiellittico in cui il rapporto freccia/luce varia tra 0,11 e 0,4; <i>arco acuto:</i> è un arco in cui gli archi di circonferenza non sono raccordati ed il rapporto freccia/luce è superiore a 0,5.</p> <p>Materiale: si deve specificare il tipo di materiale con cui sono stati realizzati i tiranti, nel caso in cui non è compreso fra quelli presenti bisognerà compilare il campo "altro" specificando il tipo.</p> <p>Freccia: è la massima distanza verticale fra la sommità dell'intradosso e la linea di imposta dell'arco.</p> <p>Luce: è la distanza orizzontale tra i due sostegni (spalle o pile) misurata sulla linea di imposta dell'arco.</p>	
➤ Spalle	
<p>Tipologia: bisogna specificare fra: <i>a gravità:</i> generalmente costruiti in muratura di mattoni, di pietra cementata o a secco, oppure in semplice calcestruzzo; sono così denominati perché le condizioni di resistenza e stabilità dipendono principalmente dal peso proprio. <i>a sbalzo:</i> generalmente costruiti in calcestruzzo armato; sono così denominati perché, essendo formati da pareti in calcestruzzo armato incastrate ad una suola di base, queste si comportano come travi a mensola verticali caricate dalla spinta delle terre; ossia come vere e proprie travi a sbalzo.</p> <p>Nel caso in cui non è compreso fra quelli presenti bisognerà compilare il campo "altro" specificando il tipo.</p> <p>Materiale: si deve specificare il tipo di materiale con cui è stato realizzato l'impalcato, nel caso in cui non è compreso fra quelli presenti bisognerà compilare il campo "altro" specificando il tipo.</p> <p>Altezza massima spalle: bisogna indicare l'altezza massima delle spalle.</p> <p>Numero apparecchi d'appoggio: bisogna indicare il numero totale di apparecchi d'appoggio distribuiti in direzione trasversale presenti nelle spalle.</p>	
➤ Pile	
<p>Tipologia: bisogna specificare fra: <i>singola:</i> nel caso in cui la pila è costituita da un unico elemento (pilastro o setto); <i>telaio:</i> nel caso in cui la pila è costituita da uno o più pilastri allineati secondo l'asse maggiore della pila e collegati tra loro in sommità dal pulvino ed eventualmente a quote intermedie da traversi.</p> <p>Materiale: si deve specificare il tipo di materiale con cui è stato realizzato l'impalcato, nel caso in cui non è compreso fra quelli presenti bisognerà compilare il campo "altro" specificando il tipo.</p> <p>Numero pile: si deve specificare il numero delle pile presenti nel ponte.</p> <p>Altezza massima pila: bisogna indicare l'altezza della pila più alta.</p> <p>Numero apparecchi d'appoggio: bisogna indicare il numero totale di apparecchi d'appoggio distribuiti in direzione trasversale presenti nelle pile.</p>	

Sezione 4 – In questa sezione vengono riportate le informazioni relative a tutte le componenti strutturali del ponte.

➤ **Rappresentazione semplificata del ponte**

In questa pagina bisognerà schematizzare in maniera semplificata l'opera d'arte, individuandone le parti fondamentali che la compongono (pile, spalle, impalcato,...) e le eventuali peculiarità.

➤ **Accessibilità**

In questa finestra bisognerà indicare l'accessibilità e quindi l'ispezionabilità del ponte distinguendo fra:

totalmente accessibile: se il ponte è ispezionabile in tutte le sue parti,






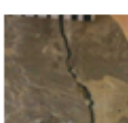






parzialmente accessibile: se il ponte è ispezionabile solo in parte,


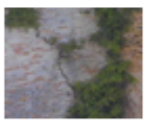




inaccessibile: se il ponte non è ispezionabile.

➤ **Foto**

Numero di foto: bisognerà indicare il numero di foto del ponte che sono state realizzate. Si specifica inoltre che il loro numero non deve essere inferiore a sei.

Nome file allegati: bisognerà specificare il nome del file che contiene le foto.

Sezione 5 – In questa sezione bisognerà indicare i danni presenti negli elementi strutturali del ponte, specificandone in particolare la tipologia, l'estensione e la gravità in base al tipo di materiale.			
CALCESTRUZZO			
	Dilavamento calcestruzzo: E' un difetto che si manifesta attraverso aree di colorazione diversa del materiale integro causate dalla percolazione e penetrazione delle acque meteoriche.		Calcestruzzo spopolato: E' riferito a quelle parti di calcestruzzo che si presentano danneggiate rispetto alle condizioni originarie.
	Distacco del copri ferro: E' un difetto che si manifesta inizialmente con lesioni parallele agli spigoli o in corrispondenza dei ferri d'armatura. Successivamente si determina il distacco parziale o totale del copri ferro con messa a nudo dell'armatura.		Armatura ossidata: L'ossidazione dell'armatura avviene a seguito del contatto del ferro con l'aria nel caso di calcestruzzi porosi o mal confezionati in ambienti aggressivi.
	Fessure orizzontali: E' riferito a lesioni sul calcestruzzo il cui andamento è prevalentemente orizzontale.		Fessure verticali: E' riferito a lesioni sul calcestruzzo il cui andamento è prevalentemente verticale.
	Fessure diagonali: E' riferito a lesioni sul calcestruzzo il cui andamento è prevalentemente obliquo.		Vegetazione intrusiva: E' riferito alla presenza di piante, muschi e licheni sulle parti del manufatto.
	Scalzamento: Abbassamento del fondo dell'alveo che, in periodo di magra, evidenzia la scoperta in certe parti fin sotto la base delle fondazioni dirette e le palificate delle fondazioni indirette.		Fuori piombo: Riguarda gli elementi strutturali in elevazione quali pile e spalle, qualunque sia il materiale costituente. Si presenta come la mancanza di verticalità, generalmente per tutta l'altezza.
	Riduzione armatura di precompressione: Si verifica con una diminuzione di sezione dell'armatura di precompressione dovuta alla corrosione o alla rottura dei trefoli.		Apparecchio d'appoggio degradati: sono diversi a seconda del tipo di apparecchio utilizzato ma i più comuni sono: - ossidazione di metalliche, - invecchiamento del neoprene o del teflon - schiacciamento; - scricchiolio.
Altro			

MURATURA			
	<p>Muratura spazzolata: E' riferita a quelle parti di muratura che si presentano danneggiate rispetto alle condizioni originarie.</p>		<p>Efflorescenze: Formazione di sostanze, generalmente di colore biancastro e di aspetto cristallino o polverulento o filamentoso, sulla superficie del manufatto.</p>
	<p>Distacco dell'arco: Il distacco consiste nel distacco tra i muri pedreggi e l'arco</p>		<p>Fessure orizzontali: E' riferito a lesioni sulla muratura il cui andamento è prevalentemente orizzontale. Generalmente si manifestano lungo i corsi di malta.</p>
	<p>Fessure verticali: E' riferito a lesioni sulla muratura il cui andamento è prevalentemente verticale. Possono interessare i soli giunti di malta tra i mattoni o i blocchi di pietra oppure andamento continuo che taglia gli elementi della muratura.</p>		<p>Fessure diagonali: E' riferito a lesioni sul calcestruzzo il cui andamento è prevalentemente obliquo. Possono seguire a 90°/270° i letti di malta oppure avere un andamento continuo che taglia gli elementi della muratura.</p>
	<p>Polverizzazione: Deliquescenza, che si manifesta con la caduta spontanea del materiale sotto forma di polvere o granuli. Può portare alla completa distruzione e polverizzazione dei corsi di malta o dei materiali lapidei costituenti la muratura stessa.</p>		<p>Vegetazione intrusiva: E' riferito alla presenza di piante, muschi e licheni sulle parti del manufatto.</p>
	<p>Scalzamento: Abbassamento del fondo dell'alveo che, in periodo di magra, evidenzia la scoperta in certe parti fin sotto la base delle fondazioni dirette e le palificate delle fondazioni indirette.</p>		<p>Fuori piombo: Riguarda gli elementi strutturali in elevazione quali pile e spalle, qualunque sia il materiale costituente. Si presenta come la mancanza di verticalità, generalmente per tutta l'altezza.</p>
	<p>Apparecchio d'appoggio degradati: sono diversi a seconda del tipo di apparecchio utilizzato ma i più comuni sono: -ossidazione di metalliche, -invecchiamento del neoprene o del teflon -scricchiolio; -scorimento.</p>		
<p>Altro</p>			

Sezione 8 – In questa sezione bisognerà indicare i danni presenti negli elementi non strutturali del ponte, specificandone in particolare la gravità.	
	Pavimentazione danneggiata: Si tratta di tutte quelle fessurazioni nella pavimentazione, presenti soprattutto in corrispondenza degli elementi di continuità (giunti sottopavimentazione), riconducibili spesso a normale ritiro del materiale costituente la pavimentazione.
	Giunti esposti: Si tratta di avvallamenti o lesioni riscontrabili in corrispondenza dei giunti.
	Parapetti danneggiati o assenti: Si riferisce a parapetti che hanno perso l'integrità strutturale e quindi la loro funzione di sicurezza o sono in condizioni di precario ancoraggio, o ancora, a parapetti assenti o che presentano delle discontinuità.
	Guardraili danneggiati o assenti: Riferito alle situazioni in cui i guardraili risultano compromessi nella loro integrità, in seguito all'urto di automezzi, o risultano mancanti lungo i bordi dei ponti.
	Cordoli degradati: I cordoli sono quegli elementi lungo i bordi dell'impalcato dove vengono installati i parapetti o i guard-rail e lungo i quali solitamente vengono posizionati i sistemi di scarico dell'acqua. Il degrado si presenta con deterioramento del copiletra fino al distacco degli elementi lapidei; il fenomeno è particolarmente frequente in prossimità dei giunti.
	Scarichi ostruiti o danneggiati: Riferito alle situazioni in cui il libero defluire delle acque meteoriche risulta impedito dall'ostruzione della parte terminale degli scarichi o ancora alle situazioni in cui gli scarichi dei sistemi di canalizzazione delle acque meteoriche risultano danneggiati impedendo così lo smaltimento regolare delle acque stesse.
	Pali illuminazione danneggiati: Riferito alle situazioni in cui il danno o il degrado ai pali d'illuminazione non permette o sconsiglia il loro recupero.
Altro	

Sezione 3	<p>DESCRIZIONE</p> <p>Tipo: cavalcavia <input type="checkbox"/> ponte <input type="checkbox"/> viadotto <input type="checkbox"/></p> <p>Anno di costruzione: _ _ _ _ _ (certo <input type="checkbox"/> presunto <input type="checkbox"/>)</p> <p>Lunghezza: _ _ _ _ _ , _ _ _ _ _ m</p> <p>Larghezza: _ _ _ _ _ , _ _ _ _ _ m</p> <p>Numero di campate: _ _ </p> <p>Andamento: rettilineo <input type="checkbox"/> curvilineo <input type="checkbox"/></p>	<p>ARCHI</p> <p>Tipologia: arco a tutto sesto <input type="checkbox"/> arco ribassato <input type="checkbox"/> arco a sesto acuto <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px 0;"> </div> <p>Materiale: pietra da taglio <input type="checkbox"/> pietrame in conci <input type="checkbox"/> mattoni <input type="checkbox"/> calcestruzzo <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____</p> <p>Freccia: _ _ , _ _ m</p> <p>Luce: _ _ , _ _ m</p>
	<p>SPALLE</p> <p>Tipologia: a gravità <input type="checkbox"/> a sbalzo <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____</p> <p>Materiale: muratura <input type="checkbox"/> cls <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____</p> <p>Altezza massima spalle: _ _ , _ _ m</p> <p>Numero apparecchi d'appoggio: _ _ </p>	<p>PILE</p> <p>Tipologia: singola <input type="checkbox"/> telaio <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____</p> <p>Materiale: muratura <input type="checkbox"/> calcestruzzo <input type="checkbox"/> altro (specificare) _____</p> <p>Numero pile: _ _ </p> <p>Altezza massima pila: _ _ , _ _ m</p> <p>Numero apparecchi d'appoggio: _ _ </p>
<p>NOTE:</p>		

Sezione 4	RAPPRESENTAZIONE SEMPLIFICATA DEL PONTE (SCHIZZO)
	ACCESSIBILITA' totalmente accessibile <input type="checkbox"/> parzialmente accessibile <input type="checkbox"/> inaccessibile <input type="checkbox"/>
	FOTO

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
Sezione 5.1	ARCO	Estensione			NOTE
		<10%	10% - 60%	> 60%	
calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo				
	Calcestruzzo ammalorato				
	Distacco copriferro				
	Armature ossidate				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				
	muratura	Muratura ammalorata			
Efflorescenze					
Distacco dell'arco					
Fessure orizzontali					
Fessure verticali					
Fessure trasversali					
Polverizzazione giunti malta					
Vegetazione intrusiva					

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
Sezione 5.2	TIMPANO	Estensione			NOTE
		<10%	10% - 60%	> 60%	
calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo				
	Calcestruzzo ammalorato				
	Distacco copriferro				
	Armature ossidate				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				
	muratura	Muratura ammalorata			
Efflorescenze					
Distacco dell'arco					
Fessure orizzontali					
Fessure verticali					
Fessure trasversali					
Polverizzazione giunti malta					
Vegetazione intrusiva					

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI				
ARCO	Estensione			NOTE
	<10%	10% - 60%	> 60%	
calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo			
	Calcestruzzo ammalorato			
	Distacco copriferro			
	Armature ossidate			
	Fessure orizzontali			
	Fessure verticali			
	Fessure diagonali			
	Danni da urto			
	Vegetazione intrusiva			
	muratura	Muratura ammalorata		
Efflorescenze				
Distacco dell'arco				
Fessure orizzontali				
Fessure verticali				
Fessure trasversali				
Polverizzazione giunti malta				
Vegetazione intrusiva				

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI				
TIMPANO	Estensione			NOTE
	<10%	10% - 60%	> 60%	
calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo			
	Calcestruzzo ammalorato			
	Distacco copriferro			
	Armature ossidate			
	Fessure orizzontali			
	Fessure verticali			
	Fessure diagonali			
	Danni da urto			
	Vegetazione intrusiva			
	muratura	Muratura ammalorata		
Efflorescenze				
Distacco dell'arco				
Fessure orizzontali				
Fessure verticali				
Fessure trasversali				
Polverizzazione giunti malta				
Vegetazione intrusiva				

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI						
Sezione 5.3	SPALLA	Estensione			NOTE	
		<10%	10% - 60%	> 60%		
calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo					
	Calcestruzzo ammalorato					
	Distacco copriferro					
	Armature ossidate					
	Fessure orizzontali					
	Fessure verticali					
	Fessure diagonali					
	Danni da urto					
	Vegetazione intrusiva					
	Scalzamento					
	Fuori piombo					
	muratura	Muratura ammalorata				
		Efflorescenze				
Distacco dell'arco						
Fessure orizzontali						
Fessure verticali						
Fessure trasversali						
Polverizzazione giunti malta						
Vegetazione intrusiva						
Scalzamento						
Fuori piombo						

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI						
Sezione 5.3	SPALLA	Estensione			NOTE	
		<10%	10% - 60%	> 60%		
calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo					
	Calcestruzzo ammalorato					
	Distacco copriferro					
	Armature ossidate					
	Fessure orizzontali					
	Fessure verticali					
	Fessure diagonali					
	Danni da urto					
	Vegetazione intrusiva					
	Scalzamento					
	Fuori piombo					
	muratura	Muratura ammalorata				
		Efflorescenze				
Distacco dell'arco						
Fessure orizzontali						
Fessure verticali						
Fessure trasversali						
Polverizzazione giunti malta						
Vegetazione intrusiva						
Scalzamento						
Fuori piombo						

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
PILA	Estensione			NOTE	
	<10%	10% - 60%	> 60%		
Sezione 5.4 calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo				
	Calcestruzzo ammalorato				
	Distacco copriferro				
	Armature ossidate				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				
	Scalzamento				
	Fuori piombo				
	Sezione 5.4 muratura	Muratura ammalorata			
		Efflorescenze			
Distacco dell'arco					
Fessure orizzontali					
Fessure verticali					
Fessure trasversali					
Polverizzazione giunti malta					
Vegetazione intrusiva					
Scalzamento					
Fuori piombo					

DANNI AD ELEMENTI STRUTTURALI					
PILA	Estensione			NOTE	
	<10%	10% - 60%	> 60%		
Sezione 5.4 calcestruzzo	Dilavamento calcestruzzo				
	Calcestruzzo ammalorato				
	Distacco copriferro				
	Armature ossidate				
	Fessure orizzontali				
	Fessure verticali				
	Fessure diagonali				
	Danni da urto				
	Vegetazione intrusiva				
	Scalzamento				
	Fuori piombo				
	Sezione 5.4 muratura	Muratura ammalorata			
		Efflorescenze			
Distacco dell'arco					
Fessure orizzontali					
Fessure verticali					
Fessure trasversali					
Polverizzazione giunti malta					
Vegetazione intrusiva					
Scalzamento					

	DANNI AD ELEMENTI NON STRUTTURALI	Estensione			NOTE
		<10%	10% - 60%	> 60%	
Sezione 6	Pavimentazione danneggiata				
	Giunti degradati				
	Parapetti danneggiati o assenti				
	Guardrail danneggiati o assenti				
	Cordoli degradati				
	Scarichi ostruiti o danneggiati				
	Pali illuminazione danneggiati				

NOTE ESPLICATIVE SULLA COMPILAZIONE DELLA SCHEDA

Sezione 1 – Nella prima sezione devono essere riportate le informazioni relative all'identificazione del ponte, alla sua localizzazione e alla caratterizzazione della strada all'interno della rete viaria.

➤ **Identificazione ponte**

Nome ponte: si deve specificare il nome dell'opera

Provincia: si deve specificare la provincia di appartenenza dell'opera.

Comune: si deve specificare il comune di appartenenza dell'opera.

➤ **Localizzazione**

Coordinate piane UTM (WGS84): si devono specificare le coordinate est e nord utilizzando come sistema piano la *proiezione universale trasversa di Mercatore* (UTM) con riferimento al WGS84.

Altitudine: si deve specificare la distanza verticale dell'opera rispetto al livello del mare.

➤ **Tipologia strada**

Strada: bisogna indicare il carattere amministrativo della strada, specificando fra:

statale: è un'arteria di importanza nazionale gestita dall'amministrazione dello stato;

regionale: è una strada di discreta importanza la cui proprietà è inclusa nel demanio delle regioni;

provinciale: è una strada di secondaria importanza di proprietà del demanio provinciale e in gestione alla stessa;

comunale: è una strada che congiunge il capoluogo del comune con le proprie frazioni di proprietà del demanio comunale e in gestione alla stessa.

Numero strada: bisogna indicare la nomenclatura della strada (ad es. SS 113).

Classificazione: bisogna indicare le caratteristiche tecniche, costruttive e funzionali, specificando fra:

autostrada: strada extraurbana o urbana a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico invalicabile, ciascuna con almeno due corsie di marcia, eventuale banchina pavimentata a sinistra e corsia di emergenza o banchina pavimentata a destra, priva di intersezioni a raso e di accessi privati, dotata di recinzione e di sistemi di assistenza all'utente lungo l'intero tracciato, riservata alla circolazione di talune categorie di veicoli a motore e contraddistinta da appositi segnali di inizio e fine;

extraurbana principale: strada a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico invalicabile, ciascuna con almeno due corsie di marcia e banchina pavimentata a destra, priva di intersezioni a raso, con accessi alle proprietà laterali coordinati, contraddistinta dagli appositi segnali di inizio e fine, riservata alla circolazione di talune categorie di veicoli a motore; per eventuali altre categorie di utenti devono essere previsti opportuni spazi;

extraurbana secondaria: strada ad unica carreggiata con almeno una corsia per senso di marcia e banchine.

Progressiva: si deve specificare la progressiva chilometrica di inizio e fine opera, calcolata in riferimento alla posizione dell'opera lungo la rete viaria.

Sezione 2 – In questa sezione sono presenti i dati relativi alla caratterizzazione del sito riguardanti le condizioni del terreno nel quale è stata realizzata l'opera.

➤ **Dati geomorfologici**

Morfologia del sito: bisogna indicare l'andamento del sito sul quale insiste l'opera. In particolare bisognerà specificare se al di sotto delle pile il sito è:

pianeggiante: se il sito è privo di dislivelli o presenta dei leggeri rilievi e/o depressioni;

ondulato: se il sito presenta notevoli rilievi e/o depressioni.

Posizione del ponte rispetto al pendio: bisogna scegliere fra:

ortogonale: se il ponte si sviluppa ortogonalmente al pendio;

parallelo: se il ponte si sviluppa parallelamente al pendio.

Falde: bisogna indicare se sono presenti delle falde acquifere, specificando tra:

assenti: se si è certi che non ci sono falde presenti in prossimità dell'opera d'arte;

presenti: se si è certi della presenza di falde in prossimità dell'opera d'arte;

non determinabili: se non si dispone di informazioni relative alle falde acquifere.

Fenomeni franosi: bisogna indicare se sono presenti fenomeni di movimento o caduta di materiale roccioso o sciolto a causa dell'instabilità del suolo o del sottosuolo che interessano i pendii che si trovano in prossimità dell'opera, specificando fra:

assenti: se si è certi che non si sono verificati fenomeni di instabilità;

presenti: se si è certi della presenza di fenomeni di instabilità;

non determinabili: se non si dispone di informazioni relativi a tali fenomeni.

➤ **Terreno fondazione**

Tipologia: bisognerà indicare la classificazione del terreno scegliendo fra:

ammassi rocciosi: nel caso di presenza di rocce;

terreno granulare: nel caso di ghiaia e sabbia limosa o argillosa, con permeabilità media;

terreno limoso o argilloso: nel caso di limi e argille, con permeabilità scarsa o nulla.

Sezione 3 – In questa sezione vengono riportate le informazioni relative a tutte le componenti strutturali del ponte.	
➤ Descrizione	
<p>Tipo: si deve specificare il tipo di opera a seconda dell'ostacolo che viene superato distinguendo fra: <i>cavalavia:</i> quando consente l'attraversamento di un'altra via di comunicazione; <i>ponte:</i> quando consente l'attraversamento di un corso d'acqua; <i>viadotto:</i> quando consente l'attraversamento di una vallata.</p> <p>Nel caso in cui l'opera non è compresa fra quelle presenti bisognerà compilare il campo "altro" specificando il tipo.</p> <p>Anno di costruzione: si deve specificare l'anno di ultimazione dei lavori, specificando inoltre se è la data indicata è <i>certa</i> o <i>presunta</i>.</p> <p>Lunghezza: si deve specificare l'estensione dell'opera conteggiata fra i giunti di spalla.</p> <p>Larghezza: si deve specificare l'estensione dell'opera in direzione trasversale compresa degli eventuali sbalzi, da rilevare in mezzzeria perpendicolarmente all'asse longitudinale dell'impalcato.</p> <p>Numero di campate: si deve specificare il numero totale delle campate che compongono l'opera.</p> <p>Andamento: si deve specificare quale è lo sviluppo dell'opera specificando fra: <i>rettilineo:</i> se l'andamento è prevalentemente dritto; <i>curvilineo:</i> se l'andamento è prevalentemente in curva.</p>	
➤ Archi	
<p>Tipologia: la tipologia viene distinta in funzione del rapporto freccia/luce in: <i>arco a tutto sesto:</i> è un arco semicircolare in cui il rapporto freccia/luce varia tra 0,4 e 0,5; <i>arco ribassato:</i> è un arco circolare o policentrico o semiellittico in cui il rapporto freccia/luce varia tra 0,11 e 0,4; <i>arco acuto:</i> è un arco in cui gli archi di circonferenza non sono raccordati ed il rapporto freccia/luce è superiore a 0,5.</p> <p>Materiale: si deve specificare il tipo di materiale con cui sono stati realizzati i tiranti, nel caso in cui non è compreso fra quelli presenti bisognerà compilare il campo "altro" specificando il tipo.</p> <p>Freccia: è la massima distanza verticale fra la sommità dell'intradosso e la linea di imposta dell'arco.</p> <p>Luce: è la distanza orizzontale tra i due sostegni (spalle o pile) misurata sulla linea di imposta dell'arco.</p>	
➤ Spalle	
<p>Tipologia: bisogna specificare fra: <i>a gravità:</i> generalmente costruiti in muratura di mattoni, di pietra cementata o a secco, oppure in semplice calcestruzzo; sono così denominati perché le condizioni di resistenza e stabilità dipendono principalmente dal peso proprio. <i>a sbalzo:</i> generalmente costruiti in calcestruzzo armato; sono così denominati perché, essendo formati da pareti in calcestruzzo armato incastrate ad una suola di base, queste si comportano come travi a mensola verticali caricate dalla spinta delle terre; ossia come vere e proprie travi a sbalzo.</p> <p>Nel caso in cui non è compreso fra quelli presenti bisognerà compilare il campo "altro" specificando il tipo.</p> <p>Materiale: si deve specificare il tipo di materiale con cui è stato realizzato l'impalcato, nel caso in cui non è compreso fra quelli presenti bisognerà compilare il campo "altro" specificando il tipo.</p> <p>Altezza massima spalle: bisogna indicare l'altezza massima delle spalle.</p> <p>Numero apparecchi d'appoggio: bisogna indicare il numero totale di apparecchi d'appoggio distribuiti in direzione trasversale presenti nelle spalle.</p>	
➤ Pile	
<p>Tipologia: bisogna specificare fra: <i>singola:</i> nel caso in cui la pila è costituita da un unico elemento (pilastro o setto); <i>telaio:</i> nel caso in cui la pila è costituita da uno o più pilastri allineati secondo l'asse maggiore della pila e collegati tra loro in sommità dal pulvino ed eventualmente a quote intermedie da traversi.</p> <p>Materiale: si deve specificare il tipo di materiale con cui è stato realizzato l'impalcato, nel caso in cui non è compreso fra quelli presenti bisognerà compilare il campo "altro" specificando il tipo.</p> <p>Numero pile: si deve specificare il numero delle pile presenti nel ponte.</p> <p>Altezza massima pila: bisogna indicare l'altezza della pila più alta.</p> <p>Numero apparecchi d'appoggio: bisogna indicare il numero totale di apparecchi d'appoggio distribuiti in direzione trasversale presenti nelle pile.</p>	

Sezione 4 – In questa sezione vengono riportate le informazioni relative a tutte le componenti strutturali del ponte.

➤ **Rappresentazione semplificata del ponte**

In questa pagina bisognerà schematizzare in maniera semplificata l'opera d'arte, individuandone le parti fondamentali che la compongono (pile, spalle, impalcato,...) e le eventuali peculiarità.













➤ **Accessibilità**

In questa finestra bisognerà indicare l'accessibilità e quindi l'ispezionabilità del ponte distinguendo fra:
totalmente accessibile: se il ponte è ispezionabile in tutte le sue parti,
parzialmente accessibile: se il ponte è ispezionabile solo in parte,
inaccessibile: se il ponte non è ispezionabile.

➤ **Foto**

Numero di foto: bisognerà indicare il numero di foto del ponte che sono state realizzate. Si specifica inoltre che il loro numero non deve essere inferiore a sei.

Nome file allegati: bisognerà specificare il nome del file che contiene le foto.

Sezione 5 – In questa sezione bisognerà indicare i danni presenti negli elementi strutturali del ponte, specificandone in particolare la tipologia, l'estensione e la gravità in base al tipo di materiale.			
CALCESTRUZZO			
	Dilavamento calcestruzzo: E' un difetto che si manifesta attraverso aree di colorazione diversa del materiale integro causate dalla percolazione e penetrazione delle acque meteoriche.		Calcestruzzo spongioso: E' riferito a quelle parti di calcestruzzo che si presentano danneggiate rispetto alle condizioni originarie.
	Distacco del copriferro: E' un difetto che si manifesta inizialmente con lesioni parallele agli spigoli o in corrispondenza dei ferri d'armatura. Successivamente si determina il distacco parziale o totale del copriferro con messa a nudo dell'armatura.		Armatura ossidata: L'ossidazione dell'armatura avviene a seguito del contatto del ferro con l'aria nel caso di calcestruzzi porosi o mal confezionati in ambienti aggressivi.
	Fessure orizzontali: E' riferito a lesioni sul calcestruzzo il cui andamento è prevalentemente orizzontale.		Fessure verticali: E' riferito a lesioni sul calcestruzzo il cui andamento è prevalentemente verticale.
	Fessure diagonali: E' riferito a lesioni sul calcestruzzo il cui andamento è prevalentemente obliquo.		Vegetazione intrusiva: E' riferito alla presenza di piante, muschi e licheni sulle parti del manufatto.
	Sbalzamento: Abbassamento del fondo dell'alveo che, in periodo di magra, evidenzia la scoperta in certe parti fin sotto la base delle fondazioni dirette e le palificate delle fondazioni indirette.		Fuori piombo: Riguarda gli elementi strutturali in elevazione quali pile e spalle, qualunque sia il materiale costituente. Si presenta come la mancanza di verticalità, generalmente per tutta l'altezza.
	Riduzione armatura di precompressione: Si verifica con una diminuzione di sezione dell'armatura di precompressione dovuta alla corrosione o alla rottura dei trefoli.		Apparecchio d'appoggio degradati: sono diversi a seconda del tipo di apparecchio utilizzato ma i più comuni sono: - ossidazione di metalliche, - invecchiamento del neoprene o del teflon - schiacciamento; - scricchiolio.
Altro			

MURATURA			
	<p>Muratura spazzolata: E' riferita a quelle parti di muratura che si presentano danneggiate rispetto alle condizioni originarie.</p>		<p>Efflorescenze: Formazione di sostanze, generalmente di colore biancastro e di aspetto cristallino o polverulento o filamentoso, sulla superficie del manufatto.</p>
	<p>Distacco dell'arco: Il distacco consiste nel distacco tra i muri pedreggi e l'arco</p>		<p>Fessure orizzontali: E' riferito a lesioni sulla muratura il cui andamento è prevalentemente orizzontale. Generalmente si manifestano lungo i corsi di malta.</p>
	<p>Fessure verticali: E' riferito a lesioni sulla muratura il cui andamento è prevalentemente verticale. Possono interessare i soli giunti di malta tra i mattoni o i blocchi di pietra oppure andamento continuo che taglia gli elementi della muratura.</p>		<p>Fessure diagonali: E' riferito a lesioni sul calcestruzzo il cui andamento è prevalentemente obliquo. Possono seguire a 90°/270° i letti di malta oppure avere un andamento continuo che taglia gli elementi della muratura.</p>
	<p>Polverizzazione: Decapazione, che si manifesta con la caduta spontanea del materiale sotto forma di polvere o granuli. Può portare alla completa distruzione e polverizzazione dei corsi di malta o dei materiali lapidei costituenti la muratura stessa.</p>		<p>Vegetazione intrusiva: E' riferito alla presenza di piante, muschi e licheni sulle parti del manufatto.</p>
	<p>Scalzamento: Abbassamento del fondo dell'alveo che, in periodo di magra, evidenzia la scoperta in certe parti fin sotto la base delle fondazioni dirette e le palificate delle fondazioni indirette.</p>		<p>Fuori piombo: Riguarda gli elementi strutturali in elevazione quali pile e spalle, qualunque sia il materiale costituente. Si presenta come la mancanza di verticalità, generalmente per tutta l'altezza.</p>
	<p>Apparecchio d'appoggio degradati: sono diversi a seconda del tipo di apparecchio utilizzato ma i più comuni sono: -ossidazione di metalliche, -invecchiamento del neoprene o del teflon -scricchiolamento; -scorimento.</p>		
Altro			

Sezione 8 – In questa sezione bisognerà indicare i danni presenti negli elementi non strutturali del ponte, specificandone in particolare la gravità.	
	Pavimentazione danneggiata: Si tratta di tutte quelle fessurazioni nella pavimentazione, presenti soprattutto in corrispondenza degli elementi di continuità (giunti sottopavimentazione), riconducibili spesso a normale ritiro del materiale costituente la pavimentazione.
	Giunti esposti: Si tratta di avvallamenti o lesioni riscontrabili in corrispondenza dei giunti.
	Parapetti danneggiati o assenti: Si riferisce a parapetti che hanno perso l'integrità strutturale e quindi la loro funzione di sicurezza o sono in condizioni di precario ancoraggio, o ancora, a parapetti assenti o che presentano delle discontinuità.
	Guardraili danneggiati o assenti: Riferito alle situazioni in cui i guardraili risultano compromessi nella loro integrità, in seguito all'urto di automezzi, o risultano mancanti lungo i bordi dei ponti.
	Cordoli degradati: I cordoli sono quegli elementi lungo i bordi dell'impalcato dove vengono installati i parapetti o i guard-rail e lungo i quali solitamente vengono posizionati i sistemi di scarico dell'acqua. Il degrado si presenta con deterioramento del copripetra fino al distacco degli elementi lapidei; il fenomeno è particolarmente frequente in prossimità dei giunti.
	Scarichi ostruiti o danneggiati: Riferito alle situazioni in cui il libero defluire delle acque meteoriche risulta impedito dall'ostruzione della parte terminale degli scarichi o ancora alle situazioni in cui gli scarichi dei sistemi di canalizzazione delle acque meteoriche risultano danneggiati impedendo così lo smaltimento regolare delle acque stesse.
	Pali illuminazione danneggiati: Riferito alle situazioni in cui il danno o il degrado ai pali d'illuminazione non permette o sconsiglia il loro recupero.
Altro	