

1. Introduzione

1.1 Contesto e Motivazioni

In molte applicazioni dell'ingegneria meccanica e strutturale i carichi agenti sono dinamici o impulsivi e agiscono a differenti temperature. In particolare le sollecitazioni dovute a impatto causano spesso deformazioni plastiche, che nella maggior parte dei casi avvengono ad elevate velocità di deformazione.

Di conseguenza una progettazione attenta ed in sicurezza richiede la conoscenza del comportamento meccanico dei materiali impiegati alle ad elevata velocità di deformazione e tutti i componenti devono essere progettati in maniera tale da essere funzionanti su un'ampia gamma di strain rate e temperature.

Tra gli altri, alcuni dei settori principali dell'ingegneria che spingono i confini della conoscenza del comportamento meccanico dei materiali ad elevata velocità di deformazione sono:

- Ingegneria aerospaziale. I principali interessi di ricerca includono tra l'altro lo studio degli effetti causati da impatto con oggetti esterni, quali ingestione di volatili all'interno di motori aeronautici, contenimento di pale di turbina soggette a rottura all'interno degli stessi, impatto di meteoriti su satelliti
- Settore automobilistico. I principali interessi includono l'analisi di fenomeni di impatto ed il miglioramento della sicurezza di passeggeri e conducente
- Tecnologia meccanica ed ingegneria della produzione. Durante la lavorazione di metalli i materiali sono soggetti ad elevate deformazioni in diverse condizioni di temperatura e velocità di deformazione. Si considerino a titolo di esempio i processi di fresatura, tornitura, forgiatura ad elevata velocità, shot peening etc.
- Difesa ed ingegneria in ambito militare. Le principali aree di ricerca comprendono: interazioni tra proiettile ed armature di protezione o tra esplosivi e strutture, inclusa l'interazione fluido-struttura tra sottomarini ed acqua circostante durante detonazioni in profondità.

- Ingegneria civile. Le principali aree di ricerca comprendono il comportamento di strutture soggette a carichi dinamici quali terremoti e maremoti.
- Ingegneria industriale. Tra le svariate applicazioni si ricordano, tra l'altro la determinazione della resistenza all'impatto di materiali impiegati nella costruzione di piattaforme offshore e a valutazione della resistenza di oleodotti e serbatoi in pressione.

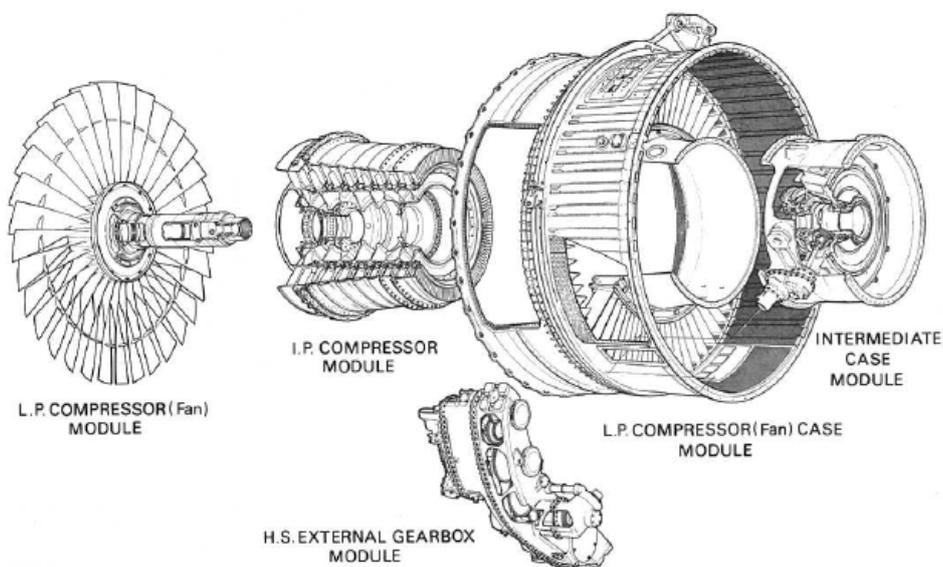


Figure I. 1 – Esploso di un turbo jet Rolls Royce

1.2 Caratterizzazione di materiali a diverse velocità di deformazione

Le caratteristiche fisiche dei materiali ed il loro comportamento meccanico sono influenzati, talvolta in maniera sostanziale, dalla velocità a cui il materiale viene deformato durante l'applicazione dei carichi. Sfortunatamente non è possibile caratterizzare completamente il comportamento meccanico di un materiale utilizzando una sola macchina di prova per tutti i regimi di velocità di deformazione. Ciò è dovuto al fatto che ogni tipologia di macchina di prova opera ad un ben definito e limitato regime di velocità. Le seguenti tabelle (tabella I. 1 e tabella I.2) ed il diagramma di figura I.2 riepilogano i regimi di funzionamento di diverse macchine

di prova in funzione dell'intervallo di velocità di deformazione che può essere ottenuto.

Si ricorda, a scopo di chiarezza, come i test a velocità di deformazione pari o al di sotto dei 10^{-3} s^{-1} sono definiti “*quasi statici*”, i test condotti a velocità di deformazione al di sotto dei 10^{-6} s^{-1} sono definiti “*creep test*” e sono eseguiti, tipicamente, applicando carichi statici a temperature relativamente alte, i test condotti a strain rate al di sopra dei 10^2 s^{-1} sono classificati come test di tipo “*high strain rate*” (elevata velocità di deformazione)”, i test condotti a strain rate superiori a 10^4 s^{-1} sono definiti “*very high strain rate*” ed, infine, test a velocità di deformazione pari o al di sopra di 10^6 s^{-1} sono definiti quali test di tipo “*ultra-high strain rate*”.

Applicable strain rate, s^{-1}	Testing technique
Compression tests	
<0.1	Conventional load frames
0.1–100	Special servohydraulic frames
0.1–500	Cam plastometer and drop test
200– 10^4	Hopkinson (Kolsky) bar in compression
10^3 – 10^5	Taylor impact test
Tension tests	
<0.1	Conventional load frames
0.1–100	Special servohydraulic frames
100– 10^3	Hopkinson (Kolsky) bar in tension
10^4	Expanding ring
$>10^5$	Flyer plate
Shear and multiaxial tests	
<0.1	Conventional shear tests
0.1–100	Special servohydraulic frames
10– 10^3	Torsional impact
100– 10^4	Hopkinson (Kolsky) bar in torsion
10^3 – 10^4	Double-notch shear and punch
10^4 – 10^7	Pressure-shear plate impact

Tabella I. 1 – metodi sperimentali per test su materiali a differenti strain rate

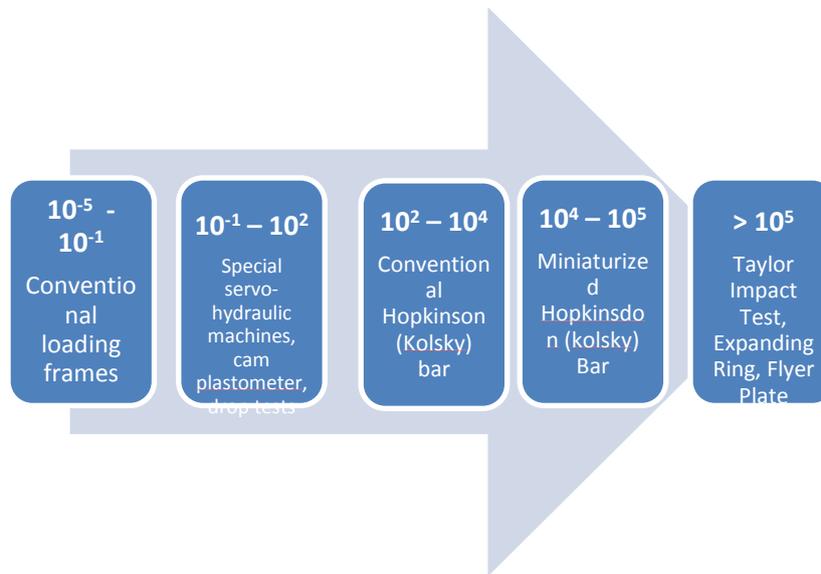


Figura I. 2 – intervallo di funzionamento di diverse apparecchiature di prova

Fattori dinamici e termodinamici. Fattori dinamici, quali gli effetti di inerzia, l'effetto di propagazione delle onde ed eventuali effetti dovuti ad onde d'urto devono essere tenuti in considerazione una volta che gli strain rate crescono andando dal regime quasi statico agli "ultra high strain rate", passando per le medie ed elevate velocità di deformazione. Gli effetti dinamici divengono via via più importanti al crescere dello strain rate, iniziando a divenire importanti alle medie velocità di deformazione, alle quali la misura delle forze risulta influenzata dall'effetto di propagazione delle onde di tensione. Al crescere dello strain rate fino alle elevate velocità di deformazione l'equilibrio delle forze all'interno del provino (una delle assunzioni basilari che permette la scrittura delle equazioni "classiche" per la barra di Hopkinson) diviene un fattore critico. Se lo strain rate cresce ulteriormente fino alle elevatissime velocità di deformazione anche la propagazione di eventuali onde d'urto diviene importante. La tabella I.2 riassume l'importanza degli effetti dinamici alle differenti velocità di deformazione.

Strain rate regime	Experimental techniques	Wave propagation
Low rate: $\dot{\epsilon} < 0.1 \text{ s}^{-1}$	Standard mechanical testing procedures	Not significant
Medium rate: $0.1 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 200 \text{ s}^{-1}$	Servo-hydraulic frames, cam plastometer, drop test	Influences load measurement
High rate: $200 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 10^5 \text{ s}^{-1}$	Hopkinson pressure bar Rod impact (Taylor) test	Affects uniform stress approximation Analysis required for interpretation of results
Very high rate: $\dot{\epsilon} > 10^5 \text{ s}^{-1}$	Flyer plate impact	Critical

Tabella I.2 – importance of dynamical effects at different strain rates

1.2.1 Problematiche correlate ai test eseguiti a media velocità di deformazione su macchine idrauliche convenzionali

I test monoassiali in trazione ed in compressione fino a strain rate uguali a 100 – 200 s⁻¹ possono essere condotti utilizzando macchine idrauliche o pneumatiche convenzionali. Tuttavia alcune limitazioni e problemi devono essere tenuti in considerazione:

- Maggiore è il carico da applicare durante il test minore è, solitamente, la velocità di test che la macchina è capace di eseguire
- Macchine di prova capaci di elevati spostamenti potrebbero raggiungere la velocità massima durante il test solo dopo che una significativa quantità di spostamento sia già stata eseguita e quindi, in dipendenza dalle dimensioni del provino, dopo che una porzione significativa della deformazione del provino può essere ottenuta prima del raggiungimento dello strain rate nominale del test
- Se la cella di carico possiede una certa frequenza propria questa può essere utilizzata solo per esperimenti di durata superiore a dieci volte il periodo corrispondente alla frequenza propria di interesse
- Qualora la distanza tra cella di carico e provino non sia trascurabile è possibile che si abbia sfasamento temporale tra la misura delle forze e la misura delle deformazioni. Al fine di evitare ciò occorre verificare che il tempo necessario per la trasmissione di un'onda di tensione dal provino alla

cella di carico sia trascurabile se comparato alla durata del test. In caso contrario I dati relativi al carico devono essere corretti del ritardo temporale.

1.2.2 Effetti della propagazione delle onde di tensione ad elevati Strain Rate

Ad elevati strain rate l'uniformita' della deformazione all'interno del provino diviene un fattore rilevante. Durante un test ad elevato strain rate l'inerzia si oppone alla uniformita' di deformazione all'interno del provino e l'onda di tensione che attraversa quest'ultimo viene trasmessa e riflessa piu' volte all'interno di quest'ultimo.

Utilizzando una legge empirica di prima approssimazione si puo' assumere, che il tempo necessario affinché vi sia equilibrio dinamico all'interno del provino sia uguale al tempo che occorre ad un onda di tensione per transitare tre volte all'interno dello stesso. Nel campo delle deformazioni elastiche tale tempo puo' essere calcolato come:

$$t_{\text{equil}} = 3 \cdot \frac{L_{\text{spec}}}{C_{\text{el}}} \quad (\text{I.1})$$

Dove, nel caso di deformazioni longitudinali

$$C_{\text{el}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{I.2})$$

In cui

C_{el} = velocita' del suono

E = modulo elastico del materiale in considerazione

ρ = densita' del materiale in considerazione

L_{spec} = dimensione assiale del campione di materiale da testare

Nel caso piu' generale in cui si abbiano deformazioni sia nel campo elastico che nel campo plastico le equazioni (I.1) ed (I.2) divengono rispettivamente:

$$t_{\text{equil}} = 3 \cdot \frac{L_{\text{spec}}}{C} \quad (\text{I.3})$$

$$C = \sqrt{\frac{d\sigma/d\varepsilon}{\rho}} \quad (\text{I.4})$$

Le equazioni (I.1-4) limitano gli strain rate per cui possono ritenersi validi I risultati sperimentali ottenuti. Supponendo infatti un tempo di equilibrio, calcolato secondo la (I.1) pari a $6\mu\text{s}$ ed ipotizzando di effettuare una prova sperimentale ad uno strain rate pari a 10^3 s^{-1} il limite inferiore di strain per cui I dati sperimentali possono ritenersi validi e' pari allo 0,6 %. Ipotizzando invece uno strain rate pari a 10^4 s^{-1} la curva stress strain ottenuta non puo' ritenersi, a rigore, valida, fino a valori di deformazione nominale pari al 6 % poiche' non e' possibile assumere che il provino si stia deformando uniformemente.

Per molti materiali la pendenza della curva sforzo deformazione in corrispondenza della porzione iniziale della regione plastica e' di un ordine di grandezza inferiore rispetto al modulo elastico con conseguente drastica riduzione della velocita' del suono all'interno del materiale. L'evidenza sperimentale mostra tuttavia che la stima della velocita' del suono secondo la (I.4) risulta troppo conservativa. Infatti, onde di tensione generate da impatti a livelli di stress molto maggiori della tensione di snervamento appaiono viaggiare, almeno inizialmente, ad una velocita' molto piu' vicina alla velocita' di propagazione elastica delle onde, piuttosto che a quella plastica.

Le considerazioni appena effettuate mostrano come l'effetto della propagazione delle onde di tensione assuma una importanza rilevante per test ad elevato strain rate ed uno dei vantaggi di effettuare test ad elevato strain rate in compressione anziché in trazione. Infatti un provino per test in compressione puo' essere prodotto in dimensioni relativamente molto ridotte al fine di minimizzare l'effetto di propagazione delle onde di tensione.

1.2 Sensibilità allo strain rate e test ad elevate velocità di deformazione

E' ormai comunemente accettato e sperimentalmente provato come la velocità di deformazione influenzi, spesso in maniera sostanziale il comportamento meccanico e le proprietà fisiche del materiale.

I test ad elevata velocità di deformazione sono solitamente condotti su un considerevole numero di materiali di interesse sia ingegneristico che scientifico a supporto dello sviluppo di modelli costitutivi di questi materiali. Analizzando l'effetto dello strain rate da un punto di vista macroscopico, focalizzando l'attenzione sugli aspetti fenomenologici meccanici lo strain rate influenza:

- I parametri di resistenza del materiale
- Le caratteristiche elastiche
- La duttilità

I materiali metallici e le leghe con struttura cubica a corpo centrato, quali, ad esempio, acciaio, tungsteno, e molibdeno e i metalli e le leghe caratterizzati da una struttura a reticolo esagonale compatto, come, titanio, berillio e zinco, sono caratterizzati da un hardening dopo lo snervamento sostanzialmente invariante al variare dello strain rate, per cui le curve stress – strain ottenute a varie velocità di deformazione si presentano quasi parallele. Normalmente l'effetto principale dello strain rate si manifesta con un incremento della resistenza del materiale, cioè si ha un effetto positivo dovuto allo strain rate. Per alcuni materiali questo effetto risulta poco sensibile o trascurabile, ad esempio per alcune leghe di rame ed alluminio.

Altri materiali, quali ad esempio i materiali che presentano struttura cubica a facce centrate come rame, alluminio, nickel e argento presentano, al contrario un comportamento quasi indipendente dallo strain rate sino alla tensione di snervamento per poi manifestare una forte dipendenza dalla velocità di deformazione nell'andamento della caratteristica tensione deformazione per tensioni superiori allo snervamento.

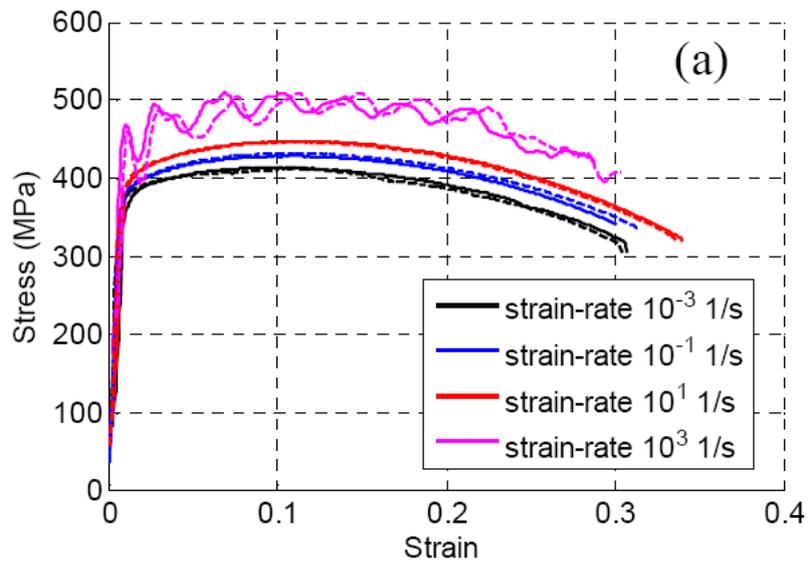


Figura I.3 - Caratteristica stress strain per prove di trazione su *Glidcop* (composto rame – allumina) a diversi strain rate per test a differenti velocità di deformazione (M.Peroni et al, 2009)

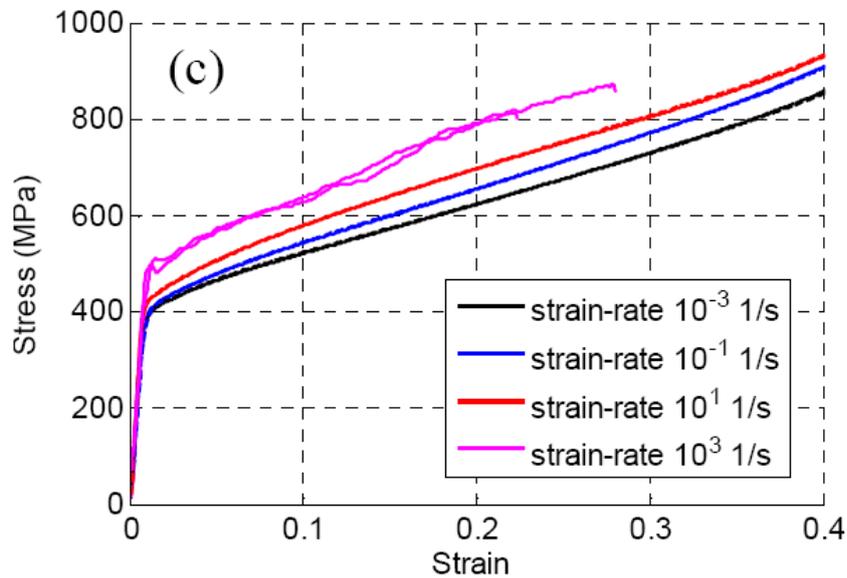


Figura I.4 - Caratteristica stress strain per prove di compressione su *Glidcop* (composto rame allumina) a diversi strain rate per test a differenti velocità di deformazione (M.Peroni et al, 2009)

Seppure il fenomeno non si presenta di importanza rilevante per la maggior parte di metalli e leghe metalliche il modulo di Young può presentare un incremento notevole per altri tipi di materiale, quali ad esempio alcuni polimeri (MAE et al. 2008).

L'effetto della velocità di deformazione sulla duttilità dei materiali si manifesta provocando una riduzione di quest'ultima al crescere dello strain rate. La deformazione ultima di rottura per test ad elevato strain rate si presenta infatti spesso inferiore e per test dinamici piuttosto che per test quasi statici.

In generale l'effetto della velocità di deformazione risulta evidente per la maggior parte dei materiali di interesse ingegneristico. In alcuni casi l'effetto dello strain rate risulta palese. Alcuni materiali polimerici ad esempio presentano un comportamento decisamente duttile a strain rate quasi statici per divenire perfettamente elastici ad elevati strain rate.

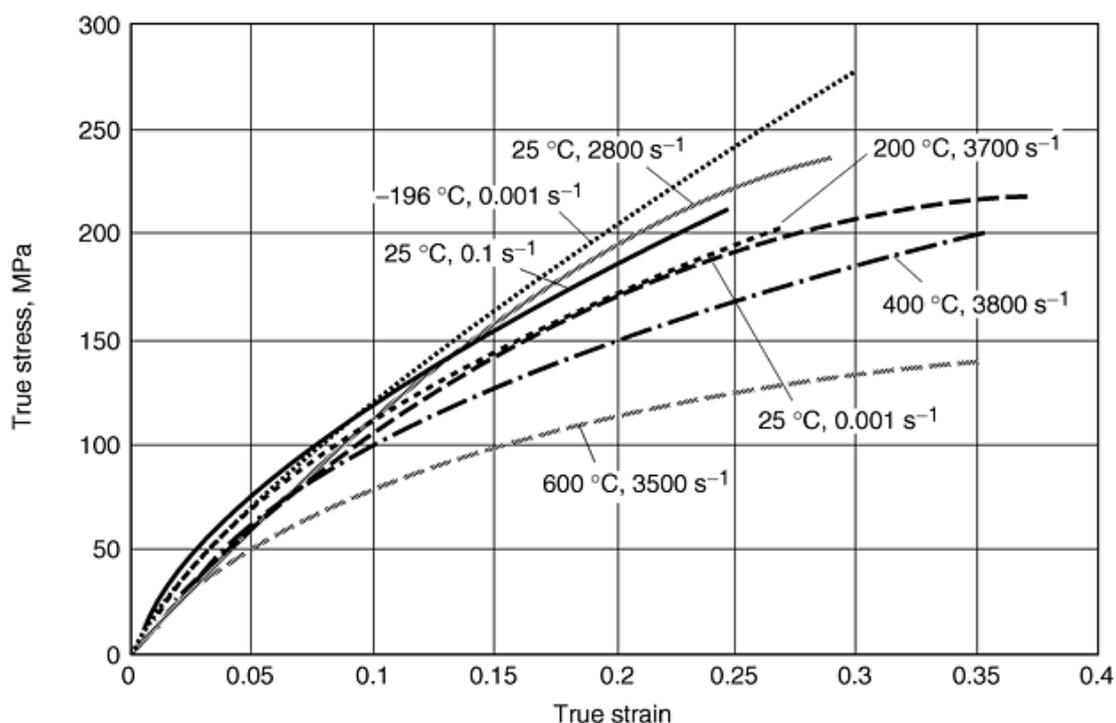


Figura I.5 - Curve caratteristiche per l'argento ad elevata purezza in funzione di strain rate e temperature (ASM Handbook – Material testing and evaluation)

I test ad elevato strain rate avvengono in un tempo così breve che, il lavoro di deformazione, per la maggior parte dissipato in energia termica, non ha il tempo di

essere disperso dal provino all'atmosfera circostante, per cui le condizioni dei test possono essere considerate adiabatiche.

Come è noto il lavoro di deformazione può essere scritto come:

$$W = \int_{L_o}^{L_f} P dl \quad (I.5)$$

In cui W rappresenta il lavoro di deformazione, P rappresenta il carico applicato, L_f ed L_o le lunghezze iniziali e finali del provino durante il test.

Come è noto, equazione (I.5) può essere riscritta come:

$$W = A_o L_o \int_0^{\varepsilon_f} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (I.6)$$

in cui A_o è la sezione originale del provino, $\sigma(\varepsilon)$ la tensione ingegneristica nel provino, ε la deformazione ingegneristica nello stesso. Assumendo che tale lavoro si sviluppi adiabaticamente si può scrivere:

$$W = \rho A_o L_o C_p \Delta T \quad (I.7)$$

per cui l'incremento adiabatico di temperatura ΔT vale:

$$\Delta T = \frac{1}{\rho C_p} \int_0^{\varepsilon_f} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (I.8)$$

Dove C_p e ρ sono rispettivamente il calore specifico a pressione costante del materiale e la sua densità. Per test ad elevata velocità di deformazione l'incremento di temperatura può essere determinato, data la rapidità dell'evento, tramite la (I.8) in maniera abbastanza accurata. Per strain rate meno elevati, ad esempio a media velocità di deformazione, lo scambio termico risulta più complesso e può presentarsi un gradiente termico all'interno del provino che ne compromette l'uniformità delle deformazioni.