

SVILUPPO DI UNA MACCHINA PER PROVE DI TRAZIONE VELOCE

M. Anghileri, L.-M. L. Castelletti, A. Milanese, G. Moretti

I materiali metallici sottoposti a carichi di natura dinamica vanno soggetti ad un fenomeno noto anche come incrudimento dinamico.

L'incrudimento dinamico ha un'enorme rilevanza nell'ambito della sicurezza passiva. Procedure di prova che permettano di valutare l'influenza della velocità di deformazione sulle proprietà meccaniche di un materiale sono fondamentali per una corretta progettazione di strutture sicure ad impatto.

In questo articolo viene presentata una procedura per prove di trazione veloce che prevede l'utilizzo di una slitta verticale e di una macchina ad inversione.

In fase di sviluppo, per verificarne il funzionamento, sono state condotte prove usando provini ottenuti da piastre di due diversi materiali: un acciaio dolce d'uso comune e una lega leggera di alluminio tipica delle costruzioni aeronautiche. I dati ottenuti per i due materiali sono ripetibili e confrontati coi dati presenti in bibliografia hanno mostrato che la procedura di prova sviluppata è in grado di fornire dati accurati.

PAROLE CHIAVE: caratterizzazione materiali, prove meccaniche, acciaio, alluminio e leghe, velocità di deformazione

INTRODUZIONE

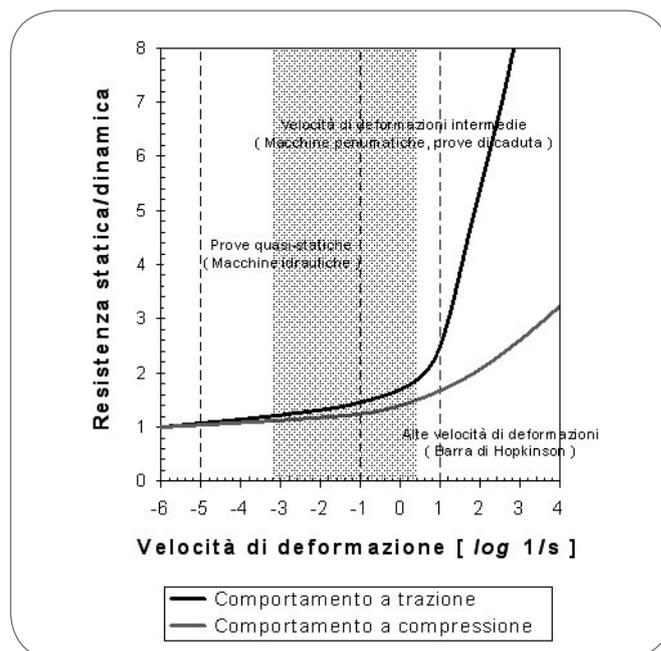
In eventi caratterizzati da carichi di natura dinamica come per esempio l'urto fra autoveicoli o l'impatto al suolo di velivoli in emergenza, i materiali si deformano con elevate velocità di deformazione.

I materiali metallici, in particolare, soggetti ad elevate velocità di deformazione risentono di un fenomeno noto anche come incrudimento dinamico. All'aumentare della velocità di deformazione, sforzo di snervamento e resistenza del materiale tendono ad aumentare in modo anche rilevante (Fig. 1). Per questa ragione, l'incrudimento dinamico è un fenomeno che ha un'enorme rilevanza per la sicurezza dei trasporti in campo aeronautico, automobilistico e ferroviario.

Includere l'effetto della velocità di deformazione è fondamentale per la corretta modellazione del comportamento ad impatto delle strutture. Leggi costitutive in grado di rappresentare l'influenza della velocità di deformazione sono fondamentali per l'accuratezza di un modello numerico in grado di aiutare nella progettazione, sviluppo e ottimizzazione di strutture sicure ad impatto.

Per caratterizzare il comportamento dinamico dei materiali sono state sviluppate leggi costitutive e modelli numerici appropriati e, accanto a questi, procedure sperimentali specifiche per ottenere le costanti relative a questi modelli.

L'identificazione delle costanti che caratterizzano il comportamento dei vari materiali richiede di disporre di dati sperimentali ottenuti attraverso prove adatte allo scopo. Maggiore è la complessità della legge costitutiva e maggiore dovrà esse-



▲
Fig. 1

Influenza della velocità di deformazione.
Influence of the strain rate.

Marco Anghileri, Luigi-Maria L. Castelletti *
Andrea Milanese, Giovanni Moretti

Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale
Via La Masa 34, 20156 Milano, Italia

* Indirizzo e-mail per la corrispondenza: luigi.castelletti@polimi.it

re il numero delle prove da condurre. In questo senso è facile comprendere l'importanza di disporre di attrezzature che permettano di valutare l'influenza della velocità di deformazione sulle caratteristiche meccaniche dei materiali.

Le prove a trazione che vengono in genere condotte per la caratterizzazione dei materiali sono prove quasi-statiche, nelle quali un provino è sottoposto ad uno spostamento costante a velocità molto basse – tali da ritenere la componente dinamica nulla. I risultati così ottenuti sono utili per il calcolo strutturale statico, ma non per fenomeni nei quali risulta fondamentale l'analisi della dipendenza dalla velocità di deformazione.

Nel corso degli anni sono state sviluppate diverse procedure di prova per la caratterizzazione del comportamento dinamico dei materiali. In questo articolo, in particolare, viene descritta una procedura per condurre prove di trazione veloce che prevede l'utilizzo di una slitta verticale e di una macchina ad inversione. Un'attrezzatura di prova semplice e robusta che permette di determinare direttamente la curva sforzo/deformazione del materiale per velocità di deformazioni tipiche di fenomeni di impatto.

Inizialmente, è stata messa a punto la macchina di prova ed è stato calibrato il sistema di acquisizione quindi sono state confrontate fra loro due diverse procedure di prova ed è stata scelta quella che garantiva una velocità di deformazione costante durante la prova.

Successivamente sono state condotte prove con provini ottenuti da piastre di due diversi materiali: un acciaio dolce d'uso comune noto come Fe360 e una lega leggera di alluminio Al 2024 tipica delle costruzioni aeronautiche.

I due materiali sono stati scelti oltre che per l'uso, per il diverso comportamento che esibiscono quando sottoposti a carichi dinamici. Inoltre, per questi materiali è abbastanza facile trovare dati in bibliografia ed è quindi abbastanza facile reperire dati sperimentali per valutare l'attendibilità dei risultati ottenuti nelle prove.

Infine, come applicazione pratica, i dati raccolti sono stati usati per determinare i coefficienti che caratterizzano due delle leggi costitutive più diffuse nell'ambito della progettazione di strutture sicure ad impatto: il modello di Cowper-Symond e la legge costitutiva di Johnson-Cook.

EFFETTI DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

L'applicazione di carichi dinamici causa nei materiali deformazioni caratterizzate da elevate velocità di deformazione che ne influenzano in modo rilevante il comportamento.

Per prevedere in modo corretto la risposta di una struttura è necessario tener conto dell'influenza della velocità di deformazione sulle proprietà meccaniche dei materiali.

Con particolare riferimento ai materiali metallici, all'aumentare della velocità di deformazione si osserva un aumento del valore dello sforzo di snervamento e di rottura, un prolungamento della fase elastica e un certo ritardo dello sviluppo di cricche all'interno del materiale. Resta pressoché uguale il modulo elastico e quindi la rigidità della struttura. Per quanto riguarda l'allungamento a rottura sono stati osservati comportamenti diversi a seconda del materiale – anche se, in generale, è possibile osservare una riduzione del campo plastico.

Per caratterizzare la dipendenza delle proprietà meccaniche dei materiali dalla velocità di deformazione sono state sviluppate procedure sperimentali specifiche e opportune leggi costituti-

ve. La scelta della legge costitutiva, in particolare, influenza in modo significativo l'accuratezza dei risultati ottenuti.

PROCEDURE DI PROVA SPERIMENTALI

Nel corso degli anni sono state sviluppate diverse procedure di prova per caratterizzare la dipendenza delle proprietà meccaniche dei materiali dalla velocità di deformazione [4, 21].

Realizzare una prova che permetta di determinare la dipendenza delle proprietà meccaniche di un materiale dalla velocità di deformazione è un problema di non facile soluzione.

La dinamica dell'evento è complicata da fattori che richiedono una piena comprensione dei fenomeni che lo caratterizzano in modo da separare chiaramente la risposta del materiale da quella della struttura.

Una caratteristica di queste prove è che possono essere usate per valutare il fenomeno all'interno di un certo intervallo di velocità di deformazione o per raccogliere precise informazioni sulla risposta dinamica del materiale. In questo senso, un solo tipo di prova non è sufficiente per caratterizzare completamente il comportamento di un materiale (Fig. 1).

Le velocità di deformazione che caratterizzano fenomeni di interesse in campo ingegneristico spaziano su sedici ordini di grandezza: le macchine di prova convenzionali (idrauliche o pneumatiche) coprono un intervallo di velocità fra 0 e 10 s^{-1} .

Macchine per prove di caduta permettono di condurre prove con velocità di deformazione fra 10 e 1000 s^{-1} . Macchine più sofisticate che permettono di raggiungere velocità di deformazioni maggiori come la barra di Hopkinson sono in genere prerogativa di centri di ricerca o di università – anche se di recente si registra una sempre maggiore diffusione di queste macchine anche fra aziende private.

Prove con macchine idrauliche

Le prove quasi-statiche¹ sono condotte con macchine servo-idrauliche o pneumatiche di diverso tipo che permettono di determinare la curva sforzo/deformazione del materiale.

Esistono macchine servo-idrauliche sviluppate per condurre prove di trazione veloce (*fastens*) in grado di superare la soglia dei 10^2 s^{-1} . Macchine di questo tipo, però, sono poche e particolarmente costose.

Prove di caduta

Il metodo di prova più semplice e diffuso per caratterizzare il comportamento dinamico di una struttura consiste in prove di caduta condotte con slitte verticali – note anche come macchine o torri di caduta.

Le prove di caduta sono molto diffuse in ambito accademico ed industriale sia per ricerca che per controllo qualità².

Utilizzare i dati raccolti in questo tipo di prova per caratterizzare il comportamento dinamico di un materiale risulta però abbastanza difficile a causa dell'accoppiamento fra la propagazione delle onde di sforzo indotte dalla prova e quelle indotte dalla vibrazione della macchina di prova.

Prove di caduta con dardi o punzoni vengono condotte per caratterizzare la risposta di strutture in termini di energia assorbita e meccanismi di cedimento.

La prova di Taylor

La prova di Taylor è una procedura di prova sviluppata durante gli anni Trenta per valutare la resistenza dinamica a

¹ Velocità di deformazione basse minori di 10 s^{-1} .

² Alcune prove di questo tipo si trovano codificate anche negli ASTM Standards.

compressione di materiali duttili [26] e in seguito usata per la misura diretta della dipendenza dalla velocità di deformazione delle proprietà meccaniche dei materiali.

La prova consiste nell'impatto di una barra cilindrica di metallo contro una piastra rigida. Le deformazioni permanenti causate dall'impatto portano ad una forma finale della barra che dipende dalla velocità d'impatto e dalle caratteristiche del materiale. Tramite opportune ipotesi è possibile risalire in modo analitico ad una formula che permette di valutare l'influenza della velocità di deformazione [26, 13].

La prova di Taylor rappresenta un modo economico per ottenere alte velocità di deformazione ed è, di fatto, molto diffusa (anche) per la semplicità che ne caratterizza l'esecuzione. Per condurre una prova di Taylor sono necessarie solo l'attrezzatura per il lancio della barra e gli strumenti che permettano di misurarne la deformazione con una certa accuratezza.

Per contro, l'ampio intervallo di deformazioni (elastiche e plastiche), velocità di deformazione e temperature che il materiale subisce durante la prova rendono difficile valutare il dato sperimentale. Per questa ragione la prova di Taylor è oggi poco usata per gli scopi originali, mentre trova una grande diffusione come metodo per valutare la validità di leggi costitutive sviluppate per una vasta gamma di materiali e per validare modelli numerici.

In quest'ottica sempre più spesso vengono usate anche telecamere ad alta velocità per registrare l'evoluzione temporale della deformazione della barra e tecniche per misurare la variazione di durezza all'interno della sezione deformata per ottenere parametri di riferimento per la correlazione numerico-sperimentale.

La barra di Hopkinson

Il funzionamento della barra di Hopkinson^{III} si basa sullo studio della propagazione delle onde elastiche.

L'attrezzatura di prova consiste di una o due travi snelle, a seconda della versione della prova, che permettono di sollecitare a compressione un provino di piccole dimensioni. Dallo studio della propagazione delle onde nella barra si risale al comportamento del materiale [17].

La barra di Hopkinson ha cominciato ad essere usata in modo diffuso a partire dagli anni Settanta ed è oggi la procedura di prova più diffusa per la caratterizzazione delle dipendenze delle proprietà meccaniche dei materiali dalla velocità di deformazione nell'intervallo di velocità compreso fra 10^3 e 10^4 s⁻¹ [4].

La barra di Hopkinson nelle sue diverse varianti (compressione, trazione, torsione/taglio e flessione) permette di ottenere informazioni sulla dipendenza delle caratteristiche meccaniche del materiale dalla velocità di deformazione in termini di sforzo di snervamento e sforzo a rottura e in termini di tenacità del materiale.

Esiste un numero considerevole di varianti della procedura classica. Barre di Hopkinson sono state sviluppate per adattare la procedura di prova alle alte temperature e alla caratterizzazione di materiali ceramici, polimeri, schiume, materiali a comportamento elasto-fragile e materiali le cui proprietà meccaniche peggiorano all'aumentare della velocità di deformazione. Esistono poi barre di Hopkinson per prove a trazione e a torsione e versioni in scala ridotta dell'attrezzatura sono state realizzate per aumentare l'intervallo delle velocità di deformazione.

^{III} Per barra di Hopkinson qui si intende la *split Hopkinson pressure bar* ovvero la barra di Hopkinson divisa o doppia. Quella che in alcuni testi viene indicata anche come barra di Kolsky.

Elevatissime velocità di deformazione

Prove condotte usando esplosivi e/o prove balistiche permettono di raggiungere velocità di deformazione comprese fra 10^6 - 10^8 s⁻¹. Questo tipo di prove sviluppate per applicazioni di interesse militare vengono oggi usate anche in ambito civile per la progettazione di scudi per satelliti o per tecniche di saldatura e formatura basate sull'uso di esplosivo.

Una prova molto diffusa è la prova di sparo del "piattello" (*flyer plate*) in cui un disco viene sparato su un provino del materiale da caratterizzare. Applicazioni tipiche di questa procedura di prova includono la misura della resistenza alla frammentazione (*spall*) e lo studio dei cambiamenti di fase dovuti alle elevate pressioni nel materiale.

Un altro tipo di prove molto diffuse sono le prove di balistica inversa.

Le prove di balistica consistono nello sparare un proiettile contro un bersaglio; le prove di balistica inversa consistono nel lanciare il bersaglio contro il provino.

Le prove di balistica richiedono la misura simultanea di un gran numero di variabili dato che i problemi di balistica sono per loro natura tridimensionali e gli effetti di deformazioni plastiche rilevanti e fratture si mischiano. In questo senso avere un proiettile fisso permette di usare tecniche per il rilevamento delle grandezze di interesse che altrimenti sarebbe impossibile usare.

Tecniche ottiche

A margine delle tecniche fin qui descritte vale notare l'importanza crescente che vanno assumendo le tecniche ottiche.

Le misure basate su estensimetri sono caratterizzate da grande accuratezza e buona risoluzione temporale, ma hanno il problema di dare informazioni puntiformi e di alterare localmente il campo di sforzo. Al contrario, le tecniche ottiche permettono di avere informazioni su tutto il campo di deformazione e senza interferire con il fenomeno.

Esistono molte tecniche di rilevazione ottica sia per gli spostamenti che per le deformazioni e gli sforzi. Fra queste: le tecniche foto-elastiche, le frange di Moiré, la tecnica delle macchie laser (*laser speckle*), le tecniche interferometriche, la termografia.

LEGGI COSTITUTIVE

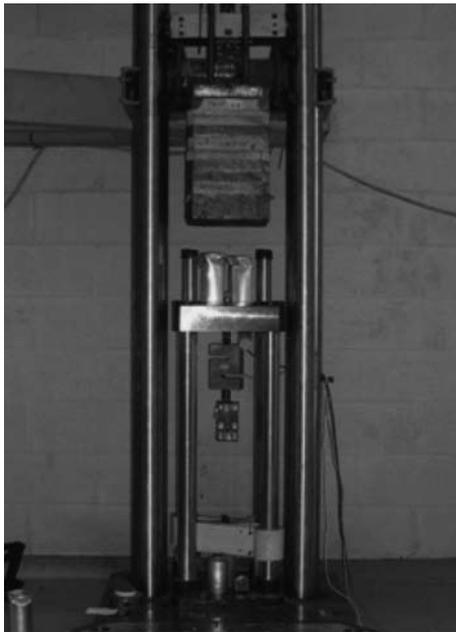
Nel campo della sicurezza passiva sempre più spesso il progetto, lo sviluppo e l'ottimizzazione di strutture viene supportato da codici espliciti agli elementi finiti che implementano leggi costitutive in grado di tener conto degli effetti della velocità di deformazione.

Nel corso degli anni, sono state elaborate ed implementate diverse leggi costitutive per descrivere la dipendenza delle proprietà meccaniche di un materiale dalla velocità di deformazione.

La scelta della legge costitutiva e dei parametri che la caratterizzano è fondamentale perché influenza in modo significativo l'accuratezza dei risultati ottenuti.

Il modo più semplice di implementare la dipendenza delle proprietà meccaniche di un materiale dalla velocità di deformazione consiste nell'interpolare le curve sforzo/deformazione ottenute sperimentalmente a diverse velocità di deformazione.

A seconda delle velocità di deformazione caratteristiche del fenomeno analizzato, però, la dipendenza dalla velocità di de-



▲
Fig. 2

Attrezzatura di prova.

Test facility.

formazione può avere un andamento fortemente non lineare che varia rapidamente con l'aumentare della velocità di deformazione (Fig. 1) e, quindi, potrebbe essere necessario condurre un numero considerevole prove. In questo senso, l'impiego di questo approccio trova applicazione in un numero limitato di casi in cui il comportamento del materiale non è ancora ben definito.

I due modi più diffusi di modellare la dipendenza dalla velocità di deformazione nello studio di urti in campo automobilistico [2, 16] o di impatti al suolo di velivoli in emergenza sono il modello di Cowper-Symonds [1] e la legge costitutiva di Johnson-Cook [11] – descritti in dettaglio nel seguito.

Un'altra legge costitutiva che trova ampia applicazione è la legge di Zerilli-Armstrong [28] caratterizzata da un modello di plasticità in cui la dipendenza dalla velocità di deformazione e dalla temperatura è basata sulla Meccanica delle Dislocazioni. La legge di Zerilli-Armstrong ha solide basi teoriche e fisiche e questo la rende preferibile ad altre leggi costitutive semi-empiriche. La maggiore complessità di questa legge costitutiva, d'altro canto, rende difficile la determinazione delle costanti che la caratterizzano e anche per questo risulta abbastanza difficile reperire dati in bibliografia. Inoltre, è stato osservato che a basse velocità di deformazione la legge di Zerilli-Armstrong fornisce risultati paragonabili a quelli ottenuti con il modello di Cowper-Symonds e la legge costitutiva di Johnson-Cook^{IV}[12].

Anche la legge costitutiva MTS [20] è basata sulla Meccanica della Dislocazione ed utilizza il concetto di sforzo limite meccanico (*Mechanical Threshold Stress*) per dare una rappresentazione accurata del processo di deformazione plastica di materiali duttili in eventi caratterizzati da grosse deformazioni, elevate pressioni ed elevate velocità di deformazione.

Esistono leggi costitutive specifiche per materiali ceramici e

per cementi come la legge costitutiva di Johnson, Holmquist e Cook [10] e leggi costitutive sviluppate per materiali che subiscono alte o altissime velocità di deformazione^V come la legge costitutiva di Steinberg [22].

Anche la legge costitutiva di Gurson basata su un modello di dilatazione plastica caratterizzato in termini di crescita di imperfezioni (void growth) permette di definire la dipendenza dalla velocità di deformazione.

Alcuni materiali risentono in modo negativo della velocità di deformazione. La legge costitutiva di Ramaswamy-Stouffer [23] permette di modellare la dipendenza dalla velocità di materiali che esibiscono una dipendenza negativa dalla velocità di deformazione.

Poco impiegate per lo studio di urti ed impatti sono le leggi costitutive che utilizzano una funzione inversa seno iperbolico per modellare l'effetto della temperatura e della dipendenza dalla velocità di deformazione.

La maggior parte delle leggi costitutive descritte danno la possibilità di limitare l'incremento delle caratteristiche meccaniche dei materiali dovute alla velocità di deformazione per evitare comportamenti non reali.

A margine di questa breve descrizione delle leggi costitutive usate per tener conto della dipendenza delle proprietà meccaniche dei materiali dalla velocità di deformazione vale notare come la maggior parte dei modelli numerici per la determinazione dello stato di sforzo nel materiale esprimono la resistenza del materiale in termini di flusso di sforzo equivalente di von Mises – anche se è noto che questa approssimazione può risultare inadeguata per grandi deformazioni.

Il modello di Cowper-Symonds

Il modo più diffuso di modellare la dipendenza delle proprietà meccaniche di un materiale dalla velocità di deformazione è il modello di Cowper-Symonds [1].

Il modello di Cowper-Symonds è un modello semi-empirico che consiste nello scalare lo sforzo usando parametri ottenuti interpolando i dati sperimentali:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{n}}$$

dove:

σ è lo sforzo di snervamento dinamico;

σ_0 è lo sforzo di snervamento statico;

$\dot{\epsilon}$ è la velocità di deformazione; e

D e n sono parametri caratteristici del materiale.

Introdotta per essere applicata al solo sforzo di snervamento, l'uso è stato poi esteso anche al campo plastico. In questo senso, anche se poco diffuso, il modello di Jones [15] permette una migliore caratterizzazione del comportamento del materiale in campo plastico.

Il modello di Jones è una variante del modello di Cowper-Symonds in cui vengono introdotti coefficienti che permettono di estendere l'influenza della velocità di deformazione al campo plastico interpolando l'incremento misurato in termini di sforzo di snervamento e sforzo di rottura.

Il modello di Cowper-Symonds può essere applicato a diverse leggi costitutive come per esempio le leggi costitutive caratterizzate da un comportamento lineare elastico con incrudimento cinematico, isotropo o misto cinematico/isotropo.

In particolare, una legge costitutiva molto usata per simulazioni di impatto consiste in una curva sforzo/deformazione

^{IV} Discrepanze emergono in prove statiche e prove di torsione in presenza di grosse deformazioni.

^V Velocità di deformazione sopra i 10^5 s^{-1} .

caratterizzata da un tratto elastico lineare e campo plastico definito da curve lineari a tratti.

Il modello di Cowper-Symonds può essere applicato anche a leggi che modellano il campo plastico attraverso una funzione potenza – anche se più spesso a questo tipo di legge costitutiva viene associato una funzione potenza anche per modellare la dipendenza dalla velocità di deformazione.

La legge di Johnson-Cook

Quella di Johnson-Cook [11] è una legge costitutiva semi-empirica semplice e molto diffusa che permette di riassumere in un'unica formula l'influenza della velocità di deformazione e della temperatura (sotto l'ipotesi di adiabaticità dell'evento) sulle proprietà meccaniche di un materiale:

$$\sigma = [A + B(\epsilon_p)^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_i}{T_f - T_i} \right)^m \right]$$

dove:

A è il limite elastico del materiale;

B e n sono parametri che caratterizzano il campo plastico e l'incrudimento del materiale;

ϵ_p è la deformazione plastica;

C è un parametro che caratterizza la dipendenza dalla velocità di deformazione;

$\dot{\epsilon}_p$ è la velocità di deformazione plastica;

$\dot{\epsilon}_0$ è una velocità di deformazione di riferimento;

T è la temperatura del materiale;

T_i è la temperatura ambiente a cui sono state svolte le prove di caratterizzazione;

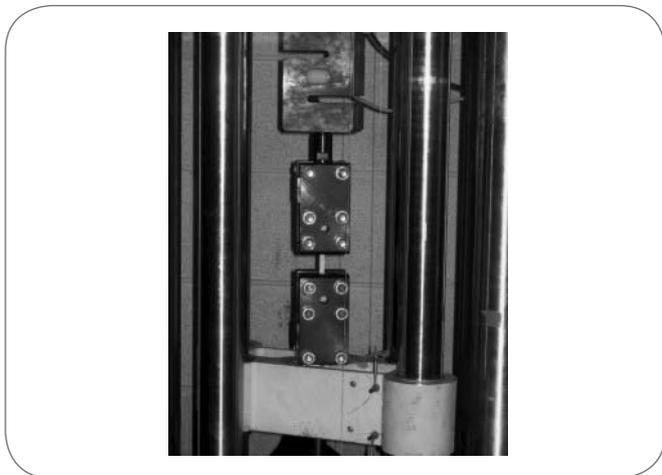
T_f è la temperatura di fusione del materiale; e

m è un parametro caratteristico del materiale.

La legge costitutiva di Johnson-Cook è particolarmente adatta per problemi dove la velocità di deformazione varia in un piccolo intervallo di valori e i cambiamenti di temperatura dovuti alla dissipazione plastica (effetto Joule) determinano un indebolimento del materiale.

La legge costitutiva di Johnson-Cook è una legge di tipo moltiplicativo: la curva sforzo-deformazione ottenuta in prove statiche viene amplificata per effetto della velocità di deformazione con il rischio di risultati non accurati.

Nel corso degli anni sono state proposte diverse varianti della



▲
Fig. 3

Dettaglio della macchina ad inversione.

Detail of the inversion machine.

legge di Johnson-Cook. In particolare, recentemente, sono state implementate versioni che permettono di definire parametri di danno che risultano utili nell'analisi di urti e impatti.

MACCHINA DI PROVA

Prove per valutare la dipendenza delle proprietà meccaniche di un materiale dalla velocità di deformazione sono fondamentali per la progettazione di strutture sicure ad impatto.

Presso il Laboratorio per la Sicurezza dei Trasporti (LaST) del Politecnico di Milano, per la caratterizzazione del comportamento dinamico di materiali metallici e compositi vengono condotte prove di caduta utilizzando una slitta verticale che permette di usare masse fino a 350 kg, altezze di caduta dell'ordine dei 7 m e velocità di impatto fino a 10 m/s.

Le prove di caduta che vengono condotte sono di diverso tipo^{VI}.

- Prove in cui un tubo del materiale da caratterizzare viene schiacciato per valutarne le caratteristiche in termini di assorbimento dell'energia di impatto.

- Prove di flessione veloce in cui viene usata una lama metallica montata sulla slitta verticale.

- Prove con punzone e tubo cilindrico in pressione condotte per caratterizzare il comportamento ad impatto di materiali compositi sottoposti ad uno stato di sforzo multiassiale.

In genere, queste prove vengono condotte per validare modelli numerici piuttosto che per determinare i coefficienti delle leggi costitutive.

Un'altra applicazione di questo tipo di prove consiste nella caratterizzazione del comportamento di materiali metallici e compositi in termini di energia assorbita attraverso un approccio inverso basato su metodi di ottimizzazione (algoritmi genetici) e superfici di risposta.

Accanto a queste metodologie di prova oramai consolidate, è in fase di sviluppo una nuova metodologia per acquisire in modo diretto la curva sforzo/deformazione dei materiali in un intervallo di velocità di deformazione tipiche di fenomeni di interesse per lo studio di urti e impatti.

Metodologia di prova

La metodologia di prova prevede l'utilizzo della torre di caduta assieme ad una macchina ad inversione (Fig. 2) che permette di sfruttare l'energia della massa in caduta per applicare un carico impulsivo di trazione ad un provino del materiale da caratterizzare (Fig. 2).

In genere, prove di trazione veloce sono condotte usando specifiche macchine pneumatiche che però sono piuttosto costose. In questo senso, l'idea era di realizzare un sistema robusto, affidabile, facile da usare e a basso costo.

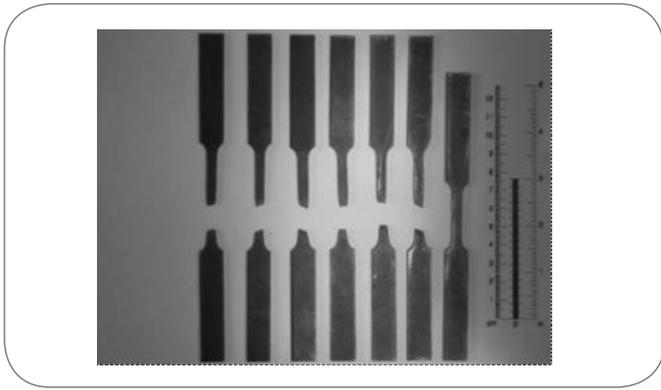
La macchina ad inversione consiste di due traverse: una superiore, fissa, ed una inferiore, mobile, in grado di scorrere su quattro steli cilindrici. Ad ognuna delle due traverse è collegato uno degli afferraggi del provino.

Il carico impulsivo viene trasmesso dalla massa battente per mezzo di steli passanti attraverso la traversa fissa e solidali con quella mobile.

Sulla sommità degli steli sono presenti dei tamponi per evitare di danneggiare gli steli stessi e per smorzare le vibrazioni causate dall'impatto.

Percorsa una lunghezza calcolata in modo da permettere il cedimento del provino entrambe, massa battente e traversa

^{VI} Prove di caduta sono state condotte con energie di impatto fino a 20 kJ.



▲
Fig. 4

Provini Fe360 prima e dopo la prova.

Fe360 specimens before and after the test.

inferiore, vengono bloccate attraverso tubi sacrificali in lega leggera di alluminio.

Velocità di deformazione

La velocità di deformazione ottenibile con questa procedura di prova dipende dalla velocità d'impatto della massa battente. La velocità di impatto della massa battente può essere calcolata in prima approssimazione a partire dal principio di conservazione dell'energia:

$$V_M = \sqrt{2gh}$$

dove:

V_M è la velocità di impatto della massa battente;
 g è l'accelerazione di gravità^{VII}; e
 h è l'altezza di caduta.

La velocità di deformazione sotto opportune ipotesi semplificate può essere calcolata come:

$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{L}$$

dove:

$\dot{\epsilon}$ è la velocità di deformazione del materiale;
 V è la velocità della traversa; e
 L è lunghezza del tratto utile del provino.

Per la conservazione della quantità di moto (urto anelastico):

$$M_B V_B = (M_B + M_T) V$$

dove:

M_B è la massa battente;
 V_B è la velocità iniziale della massa battente;
 M_T è la massa della traversa; e
 V è la velocità dopo l'urto.

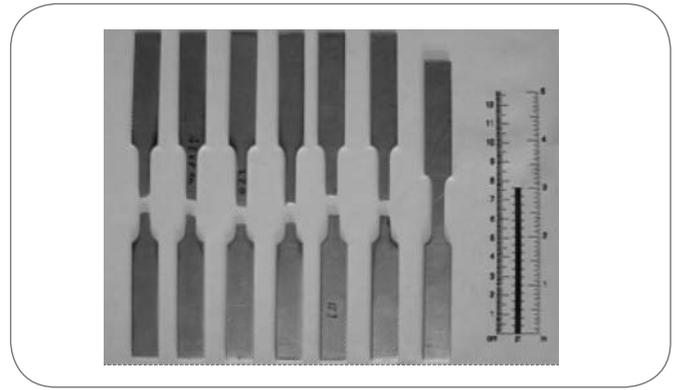
Nota la velocità iniziale della massa battente e note le dimensioni del provino è quindi immediato valutare la velocità della traversa^{VIII} e quindi la velocità di deformazione del materiale.

Modalità di prova

Nel corso delle prove condotte per valutare l'affidabilità della macchina di prova, sono state adottate due modalità di prova. Inizialmente, le prove venivano condotte fissando il provino fra gli afferraggi e montando questi ultimi nella macchina di prova. La traversa mobile veniva fatta scivolare fino ad ingaggiare il sistema di afferraggio del provino.

^{VII} All'accelerazione di gravità viene poi applicato un fattore correttivo per tenere in conto della presenza degli attriti.

^{VIII} Nel corso delle prove per una stima più accurata della velocità della traversa sono state utilizzate anche le accelerazioni misurate durante la prova e i filmati ad alta velocità.



▲
Fig. 5

Provini Al2024 prima e dopo la prova.

Al2024 specimens before and after the test.

Una modalità di prova che presentava inconvenienti di un certo rilievo. Il provino, dovendo sopportare il peso della traversa e dell'afferraggio, veniva quindi a trovarsi in uno stato di sforzo non trascurabile ancor prima che la prova cominciasse. Inoltre, la traversa mobile trovando l'opposizione del provino non raggiungeva una velocità costante se non nelle fasi finali della prova.

Per superare queste difficoltà è stata in seguito adottata una diversa modalità di prova.

La traversa invece di esser fatta scivolare fino ad ingaggiare il sistema di afferraggio veniva lasciata sospesa appena sopra il sistema di afferraggio. In questo modo è stato possibile evitare che il provino si trovasse in uno stato di pre-sforzo prima della prova ed ottenere una velocità della traversa pressoché costante durante tutta la prova.

Specifiche per i provini

Non esistendo normative specifiche per le prove dinamiche del tipo considerato, per il disegno dei provini è stato fatto riferimento alle normative per prove statiche UNI EN 10002-1 2004 e ASTM-E 8M-04. In particolare, sono state considerate le normative relative a provini piatti di piccole dimensioni da ricavare direttamente da lamiere del materiale da caratterizzare. Le dimensioni effettive dei provini poi sono state decise anche con riferimento alle dimensioni del sistema di prova e alle velocità di deformazione che si desiderava ottenere. I provini sono stati disegnati in modo che il tratto utile permettesse il raggiungimento di elevate velocità di deformazione in relazione all'altezza massima di caduta della massa battente (quest'ultima limitata dalle dimensioni fisiche della slitta verticale) e in modo che raggiungessero la rottura prima del fincorsa della traversa mobile.

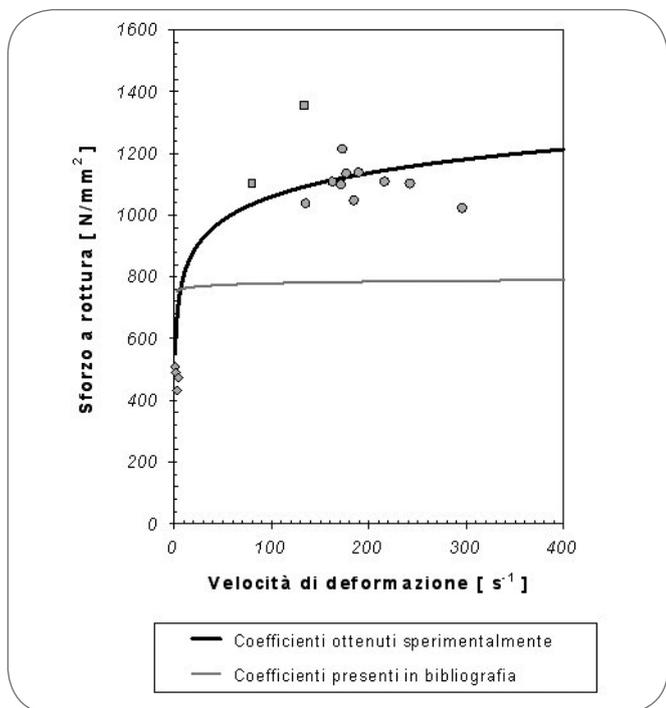
Dati acquisiti e sistema di acquisizione

La strumentazione utilizzata nelle prove è composta da una cella di carico per la misura diretta della forza agente sul provino e da un encoder per la misura dello spostamento della traversa mobile. Inoltre, sulla traversa mobile è montato anche un accelerometro per la misura dell'accelerazione.

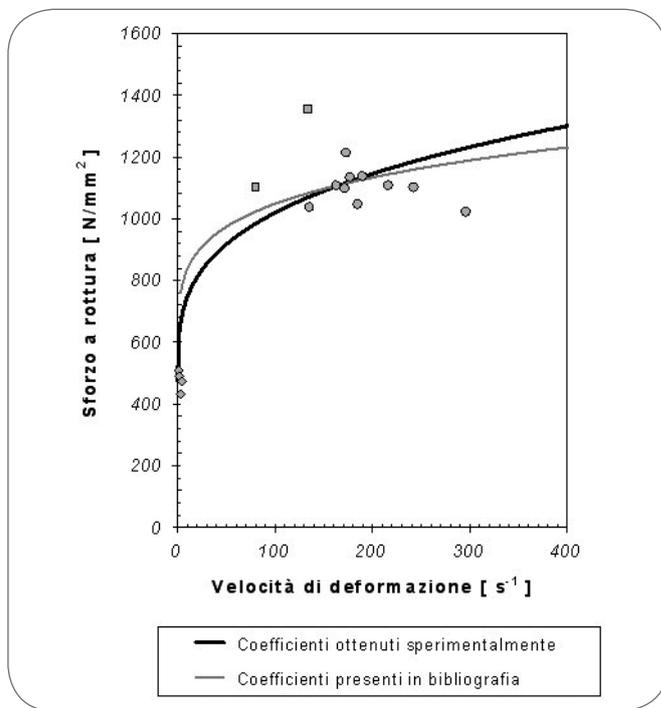
Per l'acquisizione dati viene utilizzata una scheda della National Instrument che permette di acquisire contemporaneamente quattro canali analogici e due canali digitali.

Per l'acquisizione è stato implementato un apposito programma in LabView, mentre per il filtraggio e l'elaborazione sono state sviluppate specifiche funzioni MatLab. I segnali sono stati acquisiti con un'elevata frequenza di

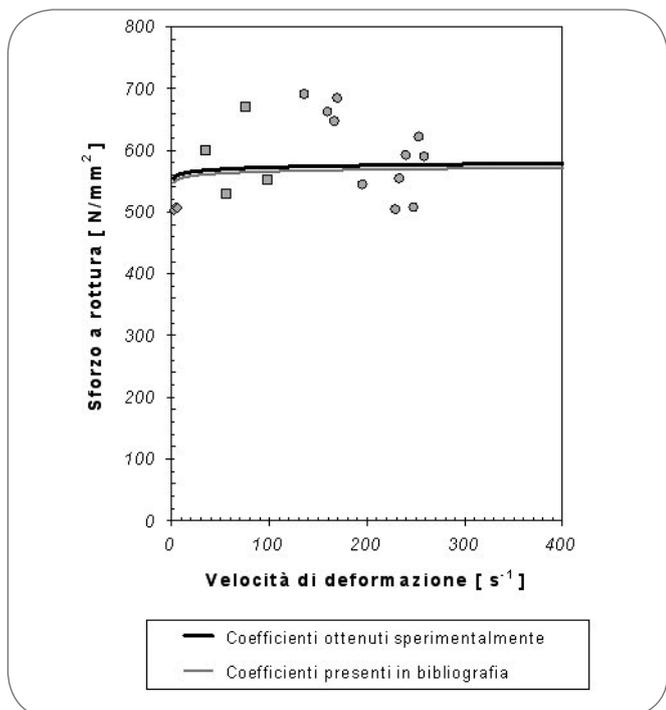
campionamento: 50000 Hz. I segnali acquisiti, vengono prima depurati dai disturbi introdotti dalla dinamica della cella di carico e poi filtrati usando un filtro CFC600.



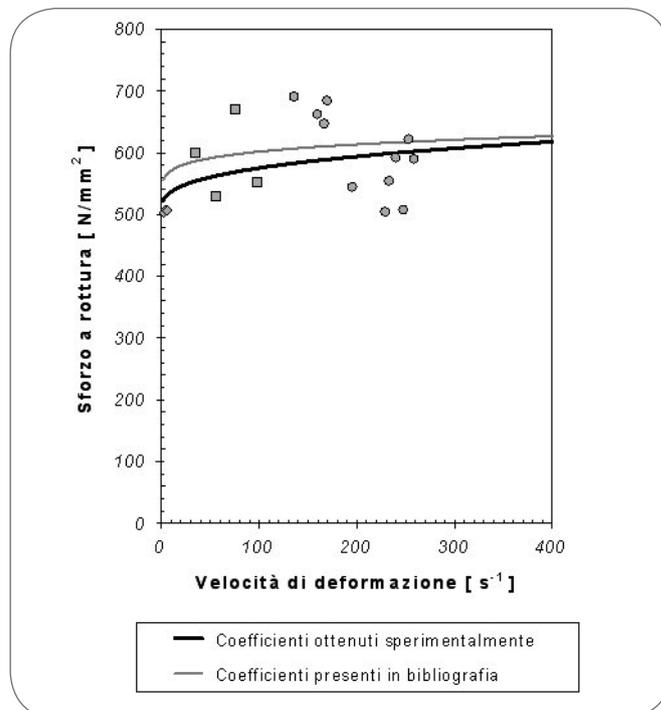
▲
Fig. 7 **Legge costitutiva di Johnson-Cook, Fe360.**
Johnson-Cook constitutive law, Fe360.



▲
Fig. 6 **Modello di Cowper-Symonds, Fe360.**
Cowper-Symonds model, Fe360.



▲
Fig. 8 **Modello di Cowper-Symonds, Al2024.**
Cowper-Symonds model, Al2024.



▲
Fig. 9 **Legge costitutiva di Johnson-Cook, Al2024.**
Johnson-Cook constitutive law, Al2024.

Materiale	D	q
Fe360	64,5	3,3
	(40,0)	(5,0)
Al2024	32060	2,9
	(2,1 10 ⁶)	(4,0)

Fra parentesi valori tipici dei coefficienti reperibili in bibliografia [24, 25].

▲
Tab. 1

Coefficienti di Cowper-Symonds.

Cowper-Symonds coefficients.

Materiale	A	B	n	C
Fe360	236	589	0,45	0,1
	(220)	(620)	(0,12)	(0,010)
Al2024	324	974	0,74	0,2
	(325)	(440)	(0,34)	(0,015)

Fra parentesi valori tipici dei coefficienti reperibili in bibliografia [11, 19].

▲
Tab. 2

Coefficienti di Johnson-Cook.

Johnson-Cook coefficients.

APPLICAZIONI

Come applicazione della metodologia di prova sviluppata sono state condotte delle prove per determinare le costanti del modello di Cowper-Symonds e della legge costitutiva di Johnson-Cook caratteristiche di due materiali d'uso comune.

In particolare, sono stati scelti due materiali, un acciaio dolce, Fe360, e una lega leggera di alluminio, Al2024, di cui erano già noti i parametri che ne caratterizzano la dipendenza dalla velocità di deformazione in modo da poter confrontare i risultati sperimentali con quelli attesi e verificare l'attendibilità della procedura di prova.

Descrizione delle prove

Le prove sono state condotte adottando la modalità di prova descritta in precedenza.

La massa battente, 275 kg, è stata scelta in modo che la velocità di caduta durante la prova non venisse influenzata significativamente dall'inerzia della traversa e dalla resistenza del provino. Per ottenere velocità di deformazione crescenti pur rimanendo nell'intervallo d'interesse evidenziato (Fig. 1), sono state considerate diverse altezze di caduta a partire da 1,0 m di altezza.

Le altezze di caduta sono state decise anche in relazione alle proprietà meccaniche del materiale da caratterizzare.

Dati raccolti nel corso delle prove

Prove sono state condotte con provini in acciaio (Fig. 4) e in lega leggera di alluminio (Fig. 5).

I dati raccolti in termini di sforzo massimo sono mostrati in Fig. 6 e Fig. 7, in Fig. 8 e Fig. 9 – rispettivamente.

In particolare, nelle figure sono riportati i risultati delle prove condotte con entrambe le modalità di prova descritte in precedenza – anche se nel seguito sono stati utilizzati solo i dati raccolti nelle prove condotte con la seconda.

Caratterizzazione dei materiali

Utilizzando i dati raccolti nel corso delle prove, sono stati calcolati i coefficienti che caratterizzano il comportamento dei due materiali considerati.

Scartati i dati considerati non validi, i coefficienti sono stati ottenuti con una semplice regressione lineare a partire dai dati sperimentali raccolti nelle prove statiche e nelle prove a trazione veloce.

I coefficienti ottenuti per il modello di Cowper-Symonds e per la legge di Johnson-Cook (trascurando gli effetti legati alla temperatura) sono riportati assieme ai coefficienti presenti in bibliografia in Tab. 1 e Tab. 2.

In Fig. 6 e in Fig. 7 sono mostrate le curve che esprimono la dipendenza dalla velocità di deformazione delle proprietà meccaniche dell'acciaio.

Le curve ottenute usando i dati raccolti nelle prove condotte sono messe a confronto con quelle ottenute usando i coefficienti presenti in bibliografia [24, 11].

Per quanto riguarda il modello di Cowper-Symonds, nell'intervallo di velocità di deformazione considerato le curve concordano. Trascurando le prove condotte con velocità di deformazione superiore ai 150 s⁻¹, la correlazione è buona.

Per quanto riguarda la legge costitutiva di Johnson-Cook, invece, i coefficienti ottenuti e quelli presenti in bibliografia si discostano in modo rilevante – anche se a questo riguardo va rilevata la grande variabilità dei coefficienti presenti in bibliografia e il fatto che i coefficienti risentono in modo significativo dal campo di velocità di deformazione considerato.

In Fig. 8 e in Fig. 9 sono mostrate le curve che esprimono la dipendenza dalla velocità di deformazione delle proprietà della lega leggera di alluminio.

Le curve ottenute usando i dati raccolti nelle prove condotte sono messe a confronto con quelle ottenute usando i coefficienti presenti in bibliografia [25, 19].

La correlazione è buona anche se è stata osservata una dispersione dei dati maggiore rispetto a quella delle prove condotte con i provini in acciaio.

Le prove condotte con i provini in lega leggera di alluminio, in particolare, hanno mostrato una spiccata sensibilità alla finitura del provino e ai disturbi dovuti alla dinamica della macchina di prova.

Per quanto riguarda la sensibilità alla finitura superficiale, va rilevato che i provini usati nelle prove sono stati ricavati da piastre che avevano subito un processo di rivestimento (*clad*) per evitare la corrosione materiale.

La correlazione ottenuta è comunque buona soprattutto per elevate velocità di deformazione dove è stato osservato che la dinamica della macchina di prova e la dipendenza dalla finitura superficiali del materiale è meno rilevante.

Discussione

Alla luce dei dati raccolti nel corso delle prove sono emerse alcune considerazioni.

Nel complesso, i dati sono coerenti – a dimostrazione della ripetibilità delle prove.

Nel dettaglio, è stata osservata una marcata dipendenza dello sforzo a rottura dalla qualità dei provini usati – dipendenza dovuta anche alle modeste dimensioni dei provini stessi.

Pur essendo i provini usati di buona qualità, la sensibilità ai difetti di lavorazione ha portato a sottostimare (in modo anche rilevante in alcune prove) lo sforzo a rottura del materiale e questo a causa di cedimenti prematuri dovuti a difetti di lavorazione anche di modesta entità.

I coefficienti ricavati per il modello di Cowper-Symonds sono

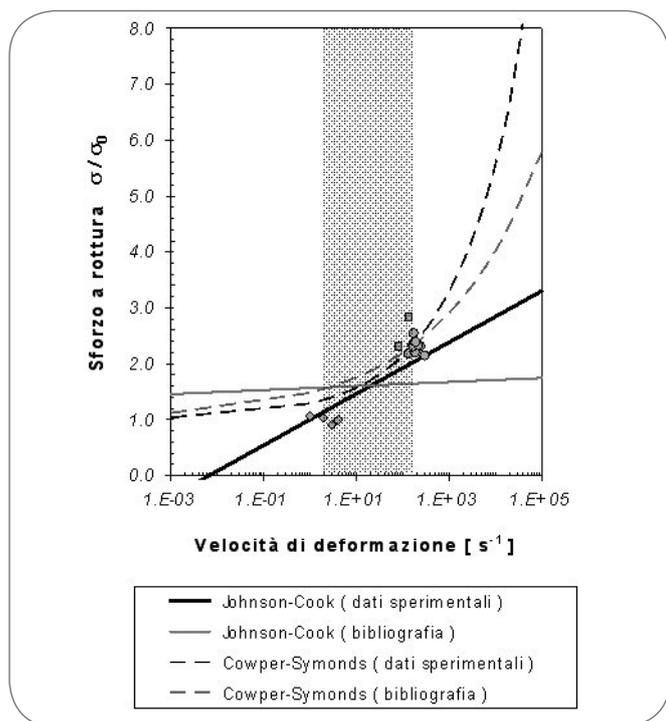


Fig. 10

Influenza della velocità di deformazione, Fe360.
Influence of the strain rate, Fe360.

simili a quelli presenti in bibliografia mentre per quanto riguarda la legge costitutiva di Johnson-Cook è stato possibile ottenere coefficienti simili a quelli presenti in bibliografia solo per la lega leggera di alluminio.

Gli acciai d'altro canto presentano una certa variabilità nella dipendenza dalla velocità di deformazione delle proprietà meccaniche dovuta a diversi fattori quali il tenore di carbonio o le lavorazioni meccaniche subite. Per questa ragione per uno stesso tipo di acciaio è possibile trovare diversi valori dei coefficienti che ne caratterizzano il comportamento dinamico. In questo senso e con riferimento alla buona correlazione ottenuta con i dati relativi al modello di Cowper-Symond è possibile ipotizzare che i coefficienti trovati in bibliografia si riferissero ad un acciaio che avesse subito trattamenti termici o lavorazioni particolari o che fossero stati ricavati per un diverso intervallo di velocità di deformazione.

Le prove^{IX} con velocità di deformazione comprese tra i 100 e 150 s⁻¹ hanno fornito valori dello sforzo a rottura maggiori di quelli previsti usando il modello di Cowper-Symonds o la legge costitutiva di Johnson-Cook.

Analizzando i dati raccolti è stato osservato che la causa di questa mancanza di corrispondenza era un disturbo nel segnale acquisito che è risultato più evidente in prove con velocità di deformazione compresa fra 100 e 150 s⁻¹.

In questo senso uno degli sviluppi futuri di questa procedura di prova sarà lo studio di un metodo per l'eliminazione di questo disturbo.

In Fig. 10, con riferimento alle prove condotte usando i provini in Fe360, sono messi a confronto il modello di Cowper-Symonds e la legge costitutiva di Johnson-Cook.

La prima cosa che si nota è che usare i coefficienti fuori dall'in-

tervallo in cui sono stati ottenuti può portare ad errori macroscopici nella valutazione del comportamento dinamico del materiale.

In questo senso, trova dimostrazione quanto detto in precedenza circa la necessità di condurre prove di diverso tipo (o a diverse velocità di deformazione) per caratterizzare completamente il comportamento del materiale.

I coefficienti del modello di Cowper-Symonds benché ottenuti per un intervallo limitato di valori approssimano abbastanza bene il comportamento del materiale anche ad elevate velocità di deformazione.

I coefficienti di Johnson-Cook, al contrario, portano ad errori grossolani nella valutazione del comportamento del materiale fuori dall'intervallo in cui sono stati ottenuti.

La curva che caratterizza il comportamento dinamico di un materiale metallico presenta un gomito caratteristico [28] che separa due tratti pressoché rettilinei (Fig. 1).

La legge di Johnson-Cook esprime la dipendenza dalla velocità di deformazione attraverso un legame di tipo logaritmico. Diagrammando i dati sperimentali in scala logaritmica, la legge di Johnson-Cook è rappresentata da una retta i cui coefficienti vengono fissati in modo da interpolare i dati raccolti in prove condotte a diverse velocità di deformazione. In questo senso, la legge di Johnson-Cook è in grado di caratterizzare la dipendenza dalla velocità di deformazione solo in uno dei due tratti della curva caratteristica del materiale – tipicamente quello relativo alle alte velocità di deformazione.

Per superare questa limitazione sono state proposte delle varianti della legge di Johnson-Cook [16] fra cui una in particolare che prevede di usare il modello di Cowper-Symonds per modellare la dipendenza dalla velocità di deformazione.

CONCLUSIONI

I materiali metallici che si deformano con alte velocità di deformazione vanno soggetti ad incrudimento dinamico: migliorano le proprietà meccaniche in termini di sforzo di snervamento e sforzo di rottura e, in generale, si riduce il campo plastico.

In questo articolo viene presentata una procedura per condurre prove di trazione veloce robusta ed affidabile che prevede l'utilizzo di una slitta verticale e di una macchina ad inversione. Diversamente da altre procedure di prova che prevedono l'uso di una slitta verticale, quella qui introdotta permette di ottenere direttamente e con una certa accuratezza la curva sforzo/deformazione per il materiale nell'intervallo di velocità di deformazione tipiche di fenomeni di sicurezza passiva di interesse aeronautico e automobilistico e utili per la progettazione di strutture sicure.

Per lo sviluppo e messa a punto della procedura sono state condotte prove usando provini ottenuti da piastre di due diversi materiali: un acciaio dolce d'uso comune e una lega leggera di alluminio tipica delle costruzioni aeronautiche.

I dati raccolti hanno dimostrato la ripetibilità e l'accuratezza delle prove. In accordo con i dati presenti in bibliografia e ottenuti con altre attrezzature di prova più sofisticate e costose.

Come applicazione i dati raccolti sono stati usati per determinare i coefficienti che caratterizzano due delle leggi costitutive più diffuse nell'ambito della progettazione di strutture sicure ad impatto. I valori ottenuti sono simili a quelli presenti in bibliografia a conferma della validità della procedura di prova seppur limitatamente all'intervallo di velocità di deformazione considerato e con le incertezze associate a prove sperimentali di questo tipo.

^{IX} Una prova condotta con il provino in acciaio (altezza 1,5 m) e tre condotte con provini in lega leggera di alluminio (altezza di caduta 1,0 m).

BIBLIOGRAFIA

- 1] G R Cowper, P S Symonds "Strain Hardening and Strain Rate Effect in the Impact Loading Of Cantilever Beams", Brown University, Applied Mathematics Report, p 28, 1958.
- 2] M Dietenberger, M Buyuk, C-D Kan, "Development of high strain-rate dependent vehicle model", LS-Dyna Anwenderforum, Bamberg, Germania, 2005.
- 3] A Dhanoker and T Ozel, "An experimental and modeling study on meso/micro end milling process", Department of Industrial and Systems Engineering, Rutgers University, New Jersey, 2006.
- 4] J E Field, S M Walley, W G Proud, H T Goldrein, C R Siviour, "Review of experimental technique for high rate deformation and shock studies", International Journal of Impact engineering, 30-7, pp. 725-775, 2004.
- 5] G T Gray, "High Strain-Rate Testing of Materials: The Split Hopkinson Bar", Methods in Materials Research, John Wiley Press, 1997.
- 6] R K Goldberg, D C Stouffer, "High Strain Rate Deformation Modeling of a Polymer Matrix Composite. Part I-Matrix Constitutive Equations", NASA/TM-1998-206969, 1998.
- 7] R K Goldberg, D C Stouffer, "Strain Rate Dependent Modeling of Polymer Matrix Composite", NASA/TM 1999- 209433, 1999.
- 8] T J Holmquist, G R Johnson, "Determination of constants and comparison of results for various constitutive models", Journal of Physic IV France 1 Colloq. C3 (DYMAT 91), pp. 853-860, 1991.
- 9] T J Holmquist, G R Johnson, "Determination Of Constitutive Model Constants From Cylinder Impact Tests", Naval Surface Warfare Center, Research And Technology Department, NSWC TR 88-250, 1988.
- 10] T J Holmquist, G R Johnson, W H Cook, "A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures", Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics, 1993.
- 11] G R Johnson, W H Cook, "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures", 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands, pp. 541-547, 1983.
- 12] G R Johnson, W H Cook, "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strain, Strain Rates, Temperatures and Pressure", Engineering Fracture Mechanics, 21, No 1, pp. 31-48, 1985.
- 13] G R Johnson, T J Holmquist, "Evaluation of cylinder-impact test data for constitutive model constants", Journal of Applied Physics, 64, pp. 3901-3910, 1988.
- 14] G R Johnson, T J Holmquist, "Test Data and Computational Strength and Fracture Model Constants for 23 Materials Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Temperatures" Los Alamos National Laboratory, LA-11463-MS, 1989.
- 15] N Jones, "Some comments on the modelling of material properties for dynamic structural plasticity", International Conference on the Mechanical Properties of Materials at High Rates of Strain, edited by J. Harding, Institute of Physics Conference Series No. 102, pp. 435-445, 1989.
- 16] W J Kang, S S Cho, H Huh, D T Chung, "Modified Johnson-Cook model for vehicle body crashworthiness simulations", International Journal of Vehicle Design, Vol. 21 N 4/5, pp.424-435, 1999.
- 17] H Kolsky, "An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading" Royal Society of London, B62, pp. 676-700, 1949.
- 18] U S Lindholm, "Techniques in Metals Research," Techniques in Metals Research vol. 5, part 1, edited by R F Bunshah, New York, Interscience, pp. 228-240, 1971.
- 19] T Mabrouki, F Girardin, M Asad, J-F Rigal, "Numerical and experimental study of dry cutting for an aeronautic aluminium alloy", 11th Conference on Material Forming, ESAFORM 2008, Lyone, France, 2008.
- 20] P J Mauldin, R F Davidson, Hnninger R J, "Implementation and assessment of the Mechanical-Treshold-Stress model using the EPIC2 and PINON computer codes", LA-11895-MS, Los Alamos National Laboratory, 1990.
- 21] R L Sierakowski, "Strain rate behavior of metals and composites", Atti del XIII Convegno del Gruppo Italiano Frattura, IGF. Cassino, 1997.
- 22] D J Steinberg, S.G Cochran, M W Guinan, "A Constitutive Model for metals applicable at High Strain Rates", Journal of Applied Physics, 51, pp. 1498-1504, 1980.
- 23] D C Stouffer, L T Dame, "Inelastic deformation of metals. models, mechanical properties and metallurgy". John Wiley and Sons, New York, 1996.
- 24] G Sala. "A Numerical and experimental approach to optimize sheet stamping technologies: Part I -- mild steel press-forming", Material and Design, 22, 4, pp 285-298, 2001.
- 25] G Sala. "A Numerical and experimental approach to optimize sheet stamping technologies: Part II -- aluminium alloys rubber-forming", Material and Design, 22, 4, pp 299-315, 2001.
- 26] G I Taylor, "The use of flat ended projectiles for determining yield stress. I: Theoretical considerations" Proceeding Royal Society of London, A194, pp. 289-299, 1948.
- 27] E Trana, T Zecheru, M Bugaru, T Chereches, "Johnson-Cook constitutive model for OL37 Steel", 6th WSEAS International Conference of System Science and Simulation in Engineering, Venezia, Italia, 2007.
- 28] F J Zerilli, R W Armstrong, "Dislocation-Mechanics-Based Constitutive Model for FCC and BCC Metals Over a Wide Range of Strain-rates and temperatures", Journal of Applied Physics 61-5, pp. 1816-1825, 1987.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A FACILITY FOR FAST TENSILE TESTS

Keywords: strain rate hardening, test procedures

Metallic materials under dynamic loads are subject to a phenomenon known as strain rate hardening.

The strain rate hardening has a great relevance for the passive safety of the structures. Test procedures to evaluate the influence of the strain rate

on the mechanical properties of a material are fundamental for the design of crashworthy structures.

In this paper a test procedure for fast tensile tests which utilizes a drop tower and an inverted machine is introduced.

During the development phase, to verify the efficacy of the procedure, tests were carried out using specimens obtained from plates of two different materials: a mild steel and an aluminum alloy. The data collected for the two materials are repeatable and compared with the ones found in bibliography showed the reliability of the test procedure developed.