

SESSIONE D
MECCANICA DEI MATERIALI

**CARATTERIZZAZIONE DI SCHIUME DI ALLUMINIO
PER LA REALIZZAZIONE DI DISSIPATORI DI ENERGIA**

G. B. Broggiato^a, F. Campana^a, L. Cortese^a, L. Peroni^b

^a *Dipartimento di Meccanica e Aeronautica,
Università di Roma “La Sapienza”, via Eudossiana, 18 – 00184 Roma*

^b *Dipartimento di Meccanica,
Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi, 24 – 10129 Torino*

In questo lavoro si prosegue l'investigazione sull'efficacia dell'uso delle schiume di alluminio per la realizzazione di assorbitori d'urto. Sono stati analizzati i risultati di prove dinamiche di schiacciamento assiale su provini prismatici a sezione quadrata di 45×45 mm e altezza 100 mm, ottenuti combinando blocchi di schiuma con massa volumica di 600 e 900 kg/m³ e tubi di contenimento esterno in estruso di alluminio di spessore di 2 e 3 mm.

Le prove sono state eseguite mediante una macchina di tipo *drop dart* caratterizzata da un'altezza massima di caduta pari a 11 m e massa impattante variabile da un minimo di 40 kg ad un massimo di oltre 100 kg.

Mediante la strumentazione di misura che equipaggia la macchina è possibile ricavare la velocità di impatto effettiva e la curva forza/spostamento. Da questi diagrammi sono stati ricavati degli indicatori globali dell'efficienza dei provini quali l'energia assorbita in corrispondenza di un prefissato schiacciamento, la forza di compenso ed il coefficiente di picco. Tali valori sono stati analizzati al variare della massa volumica della schiuma e dello spessore del tubo di contenimento e confrontati con gli analoghi dati ottenuti in una campagna di prove quasi-statiche eseguite in precedenza sulle stesse tipologie di campioni.

1. INTRODUZIONE

L'interesse che si registra verso l'impiego di schiume di alluminio come dissipatori d'urto è in costante crescita in virtù dell'elevata energia per unità di massa che riescono ad assorbire, e del notevole progresso delle tecniche di produzione in atto in questi ultimi anni [1-7]. Malgrado ciò, in letteratura non si trovano molti studi sulle capacità di dissipazione di energia di questi materiali così ampi da fornire dati definitivi e generali sul loro comportamento [8].

Per questo motivo, prima di procedere ad un loro impiego nell'ambito della progettazione di elementi assorbitori, sono state definite tre modalità sperimentali di indagine volte ad una caratterizzazione del comportamento di questa classe di materiali. Le prime due studiano il comportamento sotto una sollecitazione di compressione assiale in caso di schiacciamento statico e dinamico, mentre la terza, in fase di allestimento, prevede delle prove con sollecitazione di tipo flessionale.

I risultati delle prove statiche sono già stati discussi in un precedente lavoro [9] con cui è stata confermata l'elevata capacità di assorbimento di questo tipo di materiale, dovuta ad una graduale e diffusa compattazione delle bolle. Questa progressione graduale del cedimento della struttura della schiuma riduce i picchi di carico presenti nello schiacciamento del solo elemento tubolare di contenimento, rendendo più uniformi le decelerazioni subite durante l'applicazione del carico, fattore questo che risulta di estrema importanza nell'ambito di processi di assorbimento d'urto. Per contro il limite maggiore, emerso nella prima campagna di prove, consiste nella presenza di uno

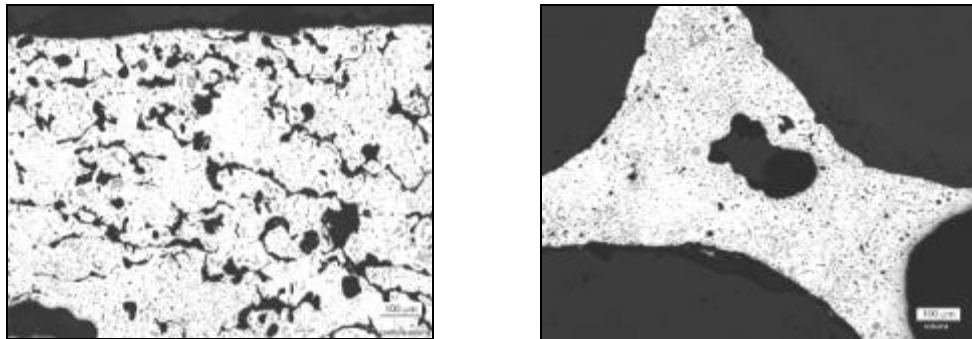


Figura 1 – Dettaglio della struttura della parete esterna (a sinistra) e dell'interno della schiuma (a destra), dettaglio 100 μm .

sfaldamento con caratteristiche fragili delle pareti esterne dei provini. Dall'ispezione di campioni sezionati trasversalmente è stato possibile notare la presenza di una parete di rivestimento esterno, dello spessore di qualche millimetro, dovuta al processo di fabbricazione. Questo è realizzato attraverso il processo tecnologico di schiumazione in stampi chiusi a partire da polveri compatte. Dall'analisi di immagini microscopiche relative sia al centro della schiuma che alle pareti del provino (figura 1) è chiaramente visibile una diversa struttura del materiale, imputabile al mancato completamento della schiumazione lungo il perimetro esterno.

Malgrado ciò, la scelta di questa tecnologia di fabbricazione, nonché la tipologia di materiale, sono state motivate dalla possibilità di ricorrere a mezzi di produzione in prospettiva vantaggiosi per applicazioni su larga scala. In particolare, la tecnologia delle polveri compatte, creando elementi in stampo, offre la possibilità di realizzare sia forme di varia complessità sia

processi di schiumazione *in situ* che eliminano problemi di taglio e di lavorazione meccanica eventualmente necessari per l'assemblaggio dei componenti.

In questo lavoro, l'indagine sul comportamento delle schiume metalliche prosegue presentando i risultati relativi a prove di impatto assiale realizzate con una macchina a caduta resa disponibile dalla seconda Facoltà di Ingegneria del Politecnico di Torino.

2. DESCRIZIONE DELLE PROVE

2.1 Tipologie di provino

La schiuma utilizzata è realizzata da una miscela di polvere di alluminio della lega AA7075 [Al-Zn_(5.1:6.1%) - Mg_(2.1:2.9%) - Cu_(1.2:2.0%)], con l'aggiunta di un'adeguata quantità di agente schiumante (idruro di titanio TiH₂). Il processo tecnologico che porta alla realizzazione di tali materiali è il metodo di formazione da polveri compatte [2].

I provini esaminati si distinguono in tre gruppi, per un totale di 32 prove: (1) provini in semplice schiuma con massa volumica nominale di 600 e 900 kg/m³, (2) provini composti da tubi estrusi di spessore 2 e 3 mm riempiti con schiuma di 600 e 900 kg/m³, (3) tubi estrusi in alluminio di spessore 2 e 3 mm. I risultati delle prove saranno quindi discussi in base alla massa volumica del materiale, alla presenza o meno del tubo di contenimento e al variare del suo spessore.

La presenza della parete esterna, descritta nel paragrafo introduttivo, ha posto il problema della stima della densità effettiva della schiuma. Utilizzando quattro campioni equamente distribuiti tra le due densità nominali, tale pellicola è stata rimossa ottenendo una sezione nominale di 39×39 mm. I valori di massa volumica stimati in questo caso sono pari a 420 ± 85 kg/m³ per la densità minore e 720 ± 34 kg/m³ per la maggiore.

Nell'esecuzione di prove meccaniche su materiali porosi quali le schiume è importante tener conto della non omogeneità macroscopica del materiale. Usualmente per poter generalizzare i risultati si consiglia che il provino abbia dimensioni non inferiori ad almeno 10-20 volte il diametro medio delle cavità. Analizzando sia delle sezioni trasversali eseguite su alcuni campioni sia i provini privati della parete esterna, le dimensioni (45×45×100 mm) soddisfano sempre tali requisiti nel caso di massa volumica superiore, mentre non è possibile escludere la presenza di vuoti anomali con estensione anche tripla rispetto alle condizioni medie nel caso di massa volumica pari a 600 kg/m³.

2.2 Condizioni di prova

La macchina a caduta (figura 2) per prove di impatto utilizzata nell'esecuzione dei test ha un'altezza di caduta massima di circa 11 m e diverse masse impattanti da un minimo di 40 kg ad un massimo di circa 100 kg. Il provino viene posizionato alla base della struttura a traliccio che sostiene i binari di guida della testa impattante, su di una piastra di acciaio solidale con il basamento della macchina; sulla testa viene montata una seconda piastra di acciaio dotata di tre celle di carico piezoelettriche (220 kN di carico massimo per ciascuna cella, 30 kHz di banda passante) disposte a 120° e interposte tra la piastra e la traversa mobile. Al sistema impattante è fissato un pettine che, tramite l'encoder optoelettronico posizionato alla base della struttura, fornisce una lettura della velocità della traversa durante lo schiacciamento del provino e determina, attraverso un trigger, l'inizio dell'acquisizione dei dati.

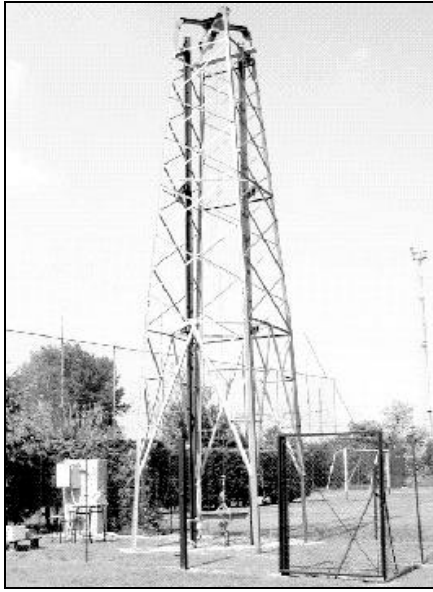


Figura 2 – Macchina a caduta installata presso la seconda Facoltà di Ingegneria del Politecnico di Torino (Vercelli). A destra, particolare della testa impattante.

Il campionamento e la registrazione del segnale dell'encoder e di quelli provenienti dalle tre celle viene effettuata con l'impiego di un sistema di acquisizione DIFA (204 kHz di frequenza massima acquisibile con campionamento simultaneo).

Per la corretta messa a punto della prova occorre:

1. garantire il massimo parallelismo del complesso traversa con il basamento per ridurre gli attriti;
2. stimare le condizioni di prova (massa impattante m ed altezza di sgancio h) in funzione di ciascuna tipologia di provini in esame.

La scelta delle condizioni di impatto è stata quindi definita maggiorando in maniera opportuna i valori di energia misurati nel caso statico per ogni classe di campioni. L'entità della maggiorazione è stata fissata intorno al 40% in base alle seguenti considerazioni: (1) si prevede che l'entità della velocità di impatto, compresa tra i 7 ed i 14 m/s, non sia tale da produrre marcati aumenti delle capacità di assorbimento poiché corrisponde a velocità di deformazione iniziali non elevate ($\leq 100 \text{ s}^{-1}$); (2) malgrado gli attriti si vuol realizzare uno schiacciamento del campione di almeno 70 mm, impedendo però schiacciamenti superiori tali da imprimere carichi troppo elevati sulle celle; (3) le velocità per ciascuna tipologia di provino devono essere paragonabili.

In tabella 1 si riepilogano le condizioni di prova (in termini di velocità di impatto teorica e massa impattante) così ricavate in funzione delle tipologie di provino. Per i campioni S_{XXX} (in sola schiuma) due prove ciascuno sono state realizzate ad altezze inferiori per saggiare preliminarmente le condizioni scelte, valutare la fragilità indotta dalla pellicola esterna e realizzare sezioni trasversali a schiacciamenti crescenti al fine di valutare le modalità di deformazione. Le velocità di impatto corrispondenti a questi casi sono state riportate tra parentesi.

TIPOLOGIA	CODICE	NUMERO DI PROVE	VELOCITÀ (m/s)	MASSA (kg)
Schiuma (600 kg/m ³)	S600	5	10.9 (7.7/9.5)	56
Schiuma (900 kg/m ³)	S900	5	10.3 (6.9/8.7)	104
Tubo (2 mm)+Schiuma (600 kg/m ³)	TS2600	4	14.1	56
Tubo (3 mm)+Schiuma (600 kg/m ³)	TS3600	4	12.0	104
Tubo (2 mm)+Schiuma (900 kg/m ³)	TS2900	4	11.2	104
Tubo (3 mm)+Schiuma (900 kg/m ³)	TS3900	4	13.9	104
Tubo (2 mm)	T02	3	7.8	56
Tubo (3 mm)	T03	3	10.9	56

Tabella 1 – Codifica delle prove e condizioni di impatto.

3. RISULTATI

Dalla strumentazione della macchina si ricavano gli andamenti della risposta delle tre celle di carico e dell'encoder nel tempo. Partendo da questi dati è possibile ottenere le curve della forza e dell'energia in funzione dello spostamento, $F(s)$ ed $E(s)$. Da questi grafici si ricavano poi delle grandezze globali utili alla descrizione dell'efficienza di assorbimento dei provini quali: l'energia assorbita nell'intervallo di spostamento tra 0 e 60 mm, corrispondente al punto oltre al quale inizia la compattazione finale del provino; l'energia specifica per unità di massa del campione; la forza media di compenso F_m ed il coefficiente di picco P definiti rispettivamente come:

$$F_m = \frac{\int_0^{60} F(s) \times ds}{s_{60} - s_0} \quad \Pi = F_m / F_{picco} \quad (1)$$

Globalmente le prove hanno mostrato una ripetitività soddisfacente manifestando sulle varie grandezze scarti quadratici medi entro il 5%, nel caso dei provini composti da tubo e schiuma da 600 kg/m³, intorno al 10% per i composti realizzati con la schiuma più densa e tra il 13 ed il 15% nel caso delle sole schiume. Tali valori, del tutto confrontabili con quelli relativi alla campagna di prove statiche, testimoniano l'intrinseca irregolarità della struttura della schiuma in parte aggravata da uno scarso controllo delle tolleranze di produzione, poiché, dalla verifica della velocità di impatto effettiva, la dispersione delle condizioni di prova presenta uno scarto dalla media molto più basso.

3.1 Campioni in sola schiuma (Sxxx)

I provini in schiuma sono stati schiacciati in un intervallo di velocità che va dai 6.8 m/s ai 10.9 m/s, le prove con ripetizione sono state realizzate nel caso della schiuma a bassa densità, ad una velocità di 10.9 m/s, mentre quelle ad alta densità sono state schiacciate a 10.3 m/s.

Nell'ambito delle velocità in esame non si riscontra una apprezzabile differenza di comportamento. Nelle figure 3 e 4 sono riportati i grafici forza/spostamento delle due tipologie di provino.

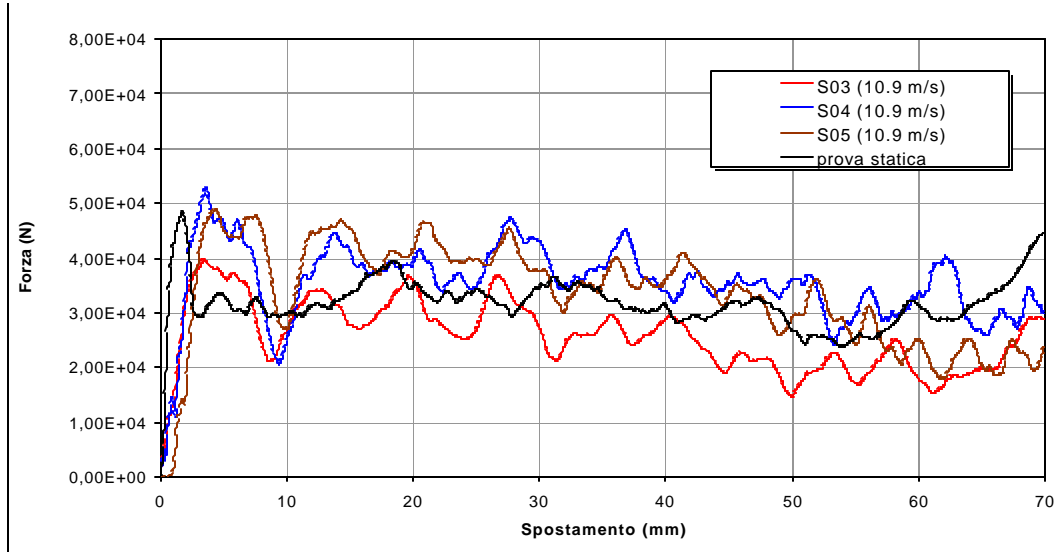


Figura 3 – Curve forza -spostamento provini in schiuma (600 kg/m^3).

Superata la fase di innesco le curve risultano piuttosto disperse ed oscillanti rispetto al valore medio della forza, questo andamento è imputabile alla frattura delle pareti esterne che, durante lo schiacciamento, si staccano in frammenti di varie dimensioni partecipando scarsamente e in maniera incostante al meccanismo di dissipazione della energia, e lasciando al termine del processo il cuore di schiuma compatto (figura 5). In tabella 2 si riportano i dati globali desunti dai grafici delle figure 3 e 4.

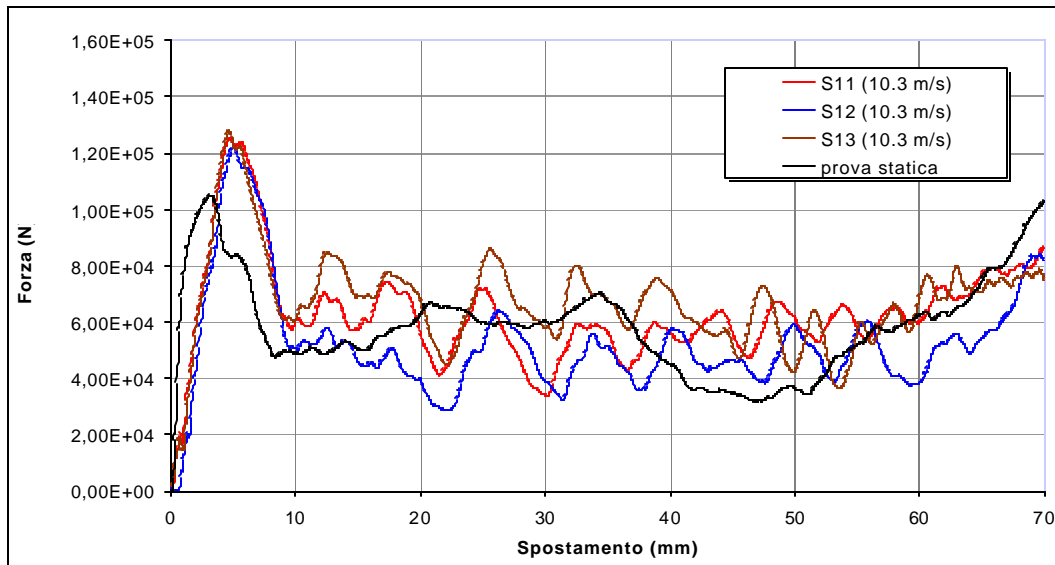


Figura 4 – Curve forza -spostamento provini in schiuma (900 kg/m^3).

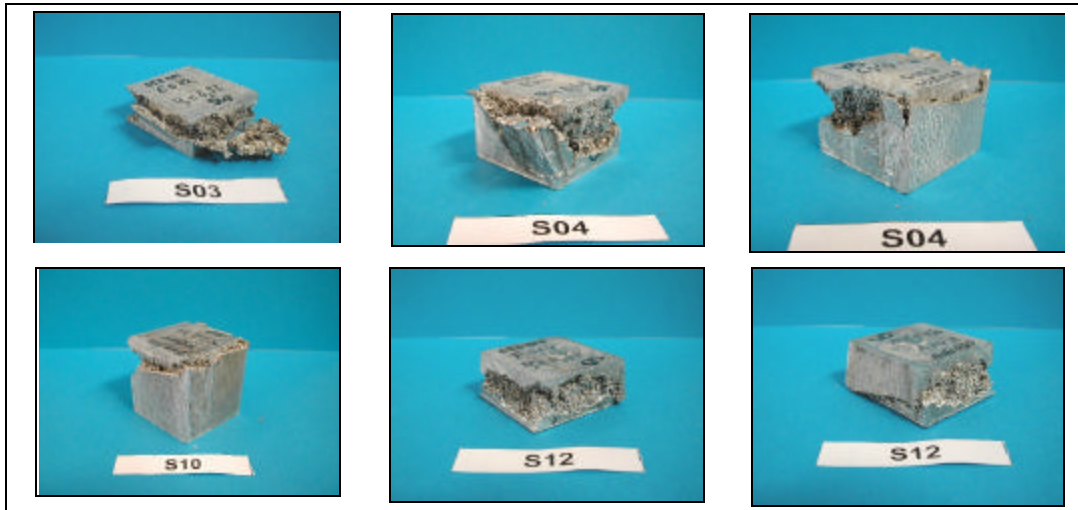


Figura 5 – Campioni in schiuma di alluminio dopo lo schiacciamento.

	$E_{ass} (J)$	$F_m (N)$	P
S600	1 927 ($\pm 15\%$)	32 114 ($\pm 15\%$)	0.68 ($\pm 5\%$)
S900	3 593 ($\pm 13\%$)	59 880 ($\pm 13\%$)	0.48 ($\pm 11\%$)

Tabella 2 – Dati sull'efficienza globale dei provini in sola schiuma (S_{xxx}).

3.2 Campioni composti (tubo + schiuma $TSyxxx$)

Dalle prove sui campioni composti emerge nettamente l'elevato contributo della schiuma rispetto all'efficienza del singolo tubo, così come testimoniato dai dati globali riportati nella seguente tabella 3. La presenza della schiuma, indipendentemente dalla sua massa volumica, aumenta il coefficiente di picco ed incrementa considerevolmente l'energia assorbita.

Mediando i dati, a prescindere dagli spessori, è possibile quantificare l'efficacia delle schiume nell'ampliare le capacità di assorbimento dei tubi. Infatti confrontando l'energia assorbita in media dai tubi con i contributi dei provini composti al variare della massa volumica, si registra per la schiuma a più alta densità un'efficacia doppia rispetto a quella da 600 kg/m^3 (rispettivamente 5953 N e 3555 N contro i 1187 N relativi all'assorbimento medio dei tubi cavi).

	$E_{ass} (J)$	$F_m (N)$	P
T02	701 ($\pm 1.9\%$)	11 684 ($\pm 1.9\%$)	0.45 ($\pm 0.6\%$)
TS2600	2 992 ($\pm 4\%$)	49 865 ($\pm 4\%$)	0.87 ($\pm 4\%$)
TS2900	5 643 ($\pm 10.6\%$)	94 058 ($\pm 10.6\%$)	0.71 ($\pm 11.8\%$)
T03	1673 ($\pm 8\%$)	27 886 ($\pm 7.4\%$)	0.62 ($\pm 8.1\%$)
TS3600	4 118 ($\pm 5\%$)	68 628 ($\pm 5\%$)	0.79 ($\pm 3\%$)
TS3900	6 263 ($\pm 10\%$)	104 381 ($\pm 10\%$)	0.71 ($\pm 14\%$)

Tabella 3 – Dati sull'efficienza globale dei provini composti (TSy_{xxx}).

A titolo di esempio nel grafico di figura 6 si riportano le curve carico-spostamento delle due tipologie di tubo insieme a quelle relative a tubi compositi con schiuma da 600 kg/m³.

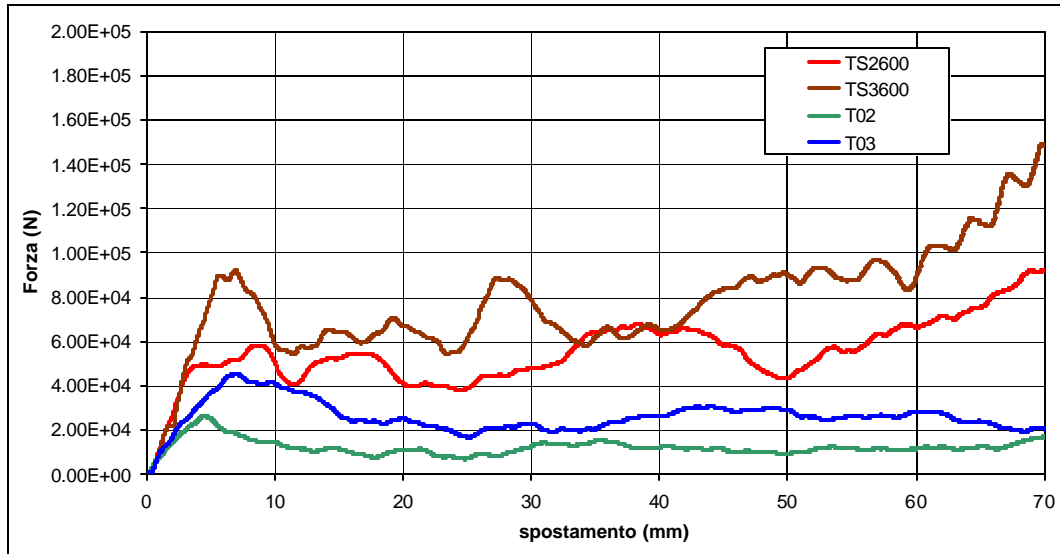


Figura 6 – Confronto curve forza/spostamento TS2600, TS3600 e T03, T02.

Nell'andamento dei campioni compositi (ad esempio TS3600) sono visibili delle oscillazioni sinusoidali che si smorzano lungo lo schiacciamento; queste oscillazioni sono state imputate all'eccitazione delle frequenze di risonanza delle celle di carico in conseguenza dell'urto iniziale, fenomeno sempre più accentuato man mano che aumenta la reazione offerta all'impatto dai provini in esame (cioè quanto più sono rigidi). In termini di energia assorbita e di forza media di compenso, il fenomeno descritto non ha alcuna influenza poiché tale disturbo è a media nulla; al contrario ne può risentire la stima della forza di picco e, di conseguenza, il coefficiente di picco. A conferma di tale interpretazione i coefficienti di picco più bassi si riscontrano in corrispondenza dei provini con massa volumica 900 Kg/m³.

3.4 Confronto con le prove statiche

Le velocità di impatto realizzate nelle prove permettono di realizzare nella prima fase di schiacciamento velocità di deformazione non superiori a 100 s⁻¹, in linea con un campo di applicazione relativo ad urti a velocità medio/bassa (< 50 km/h). Da dati in letteratura ottenuti tramite test eseguiti con barra di Hopkinson su schiume di alluminio, derivate anch'esse dalla serie 7000 ma caratterizzate da densità maggiore e da un diverso processo di fabbricazione [7], si evince un sensibile aumento delle loro capacità di assorbimento per velocità di deformazione almeno dieci volte più grandi.

Nel nostro caso specifico, da un diretto confronto con i dati statici raccolti sulle stesse tipologie di provini, emerge una minore efficacia come documentato nella tabella 4. I valori percentuali dello scarto nei confronti del caso statico per l'energia assorbita e la forza media sono contenuti entro 8%, valore del tutto paragonabile con la dispersione dei risultati di entrambe le campagne di prova. Il coefficiente di picco, invece, limitando l'esame ai gruppi di prova che non hanno presentato problemi di risonanza delle celle di carico, presenta

diminuzioni del 15%, a testimonianza di un aumento della forza iniziale necessaria ad innescare il collasso dei provini, evento prevedibile nel passaggio da prove statiche a dinamiche.

	E_{ass} (differenza %)	P (differenza %)	F_m (differenza %)
T02	3,4	-20,9	3,4
T03	-2,8	-12,0	-2,8
S600	-5,6	-11,5	-5,6
S900	-4,8	-16,1	-4,9
TS-2-600	-8,1	-16,1	-8,1
TS-2-900	-2,7	-30,1 (RIS. CELLE)	-2,8
TS-3-600	-2,7	-27,4 (RIS. CELLE)	-2,7
TS-3-900	-6,9	-28,8 (RIS. CELLE)	-6,9

Tabella 4 – Confronto dati efficienza globale tra prove statiche e dinamiche.

In definitiva si può affermare che nel campo di velocità esaminate i provini in schiuma di alluminio, con e senza tubo di contenimento rivelano prestazioni paragonabili a quelle realizzate in condizioni quasi statiche.

4. CONCLUSIONI

In questa memoria si presentano i risultati relativi ad una campagna di prove di compressione dinamica su campioni in schiuma di alluminio, con e senza tubo esterno di contenimento, già in precedenza studiati in campo statico. Le velocità di impatto raggiunte sono dell'ordine dei 10 m/s. La densità della schiuma gioca un ruolo fondamentale sull'entità dell'energia assorbita a parità di schiacciamento (1927 J contro 3593 J passando da 600 kg/m³ a 900 kg/m³). Tuttavia, a prescindere dalla massa volumica, l'effetto della schiuma all'interno di tubi di alluminio di spessore variabile (da 2 a 3 mm) aumenta le prestazioni di questi ultimi con modalità superiori a quanto si otterrebbe con una sovrapposizione dei due contributi.

Dal confronto di questi risultati con i risultati ottenuti in campo statico si può concludere che la velocità di applicazione del carico, nell'intervallo di velocità in esame, non influenza in maniera sensibile le prestazioni della schiuma, che, comunque, si conferma un ottimo materiale per la realizzazione di assorbitori di energia (energia specifica media assorbita dell'ordine dei 20 KJ/Kg).

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. Banhart, J. Baumeister, *Deformation Characteristics of Metal Foams*, Journal of Materials Science 33, 1431-1440, (1998).
- [2] F. Baumgartner, I. Duarte, J. Banhart, *Industrialization of Powder Compact Foaming Process*, Advanced Engineering Materials 2, 168-174, (2000).
- [3] A.G. Hanssen, M. Langseth, O.S. Hopperstad, *Crash behaviour of foam-based components: validation of numerical simulations*, International Conference on Cellular Metals and metal foaming technology, Bremen, June 18-20, 2001.
- [4] A. Fuganti, L. Lorenzi, A. Gronlund, M. Langseth, *Aluminum Foam for Automotive Applications; Advanced Engineering Materials 2*; 200-204, (2000).
- [5] Y. Sugimara, J. Meyer, M.Y. He, H. Bart-Smith, J. Grenstedt A.G. Evans: *On the Mechanical Performance of Closed Cell Al Alloy Foams*; Acta Materialia 45, 5245-5259, (1997).
- [6] P.H. Thornton, C.L. Magee, *The Deformation of Aluminium Foams*, Metallurgical Transactions A 6A; 1253-1263, (1975).
- [7] T. Mukai, H. Kanahashi, T. Miyoshi, M. Mabuchi, T.G. Nieh, K. Higashi: *Experimental Study of Energy Absorption in a Closed-Celled Aluminium Foam Under Dynamic Loading*, Scripta Materialia 40, 921-927 (1999).
- [8] Cellular Metals and metal foaming technology, Ed. J. Banhart, M.F. Ashby, N.A. Fleck, Verlag Publishing 2001 ISBN 3-935538-11-1.
- [9] B. Broggiato, F. Campana, G. Santucci, *Analisi sperimentale del comportamento di schiume in alluminio*, XXX Congresso AIAS, Alghero 2001