

Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni (AIAS)
XXXI Convegno Nazionale – 18-21 Settembre 2002, Parma

<p>SESSIONE D MECCANICA DEI MATERIALI</p>

**CARATTERIZZAZIONE DI SCHIUME STRUTTURALI
MEDIANTE PROVE DI COMPRESSIONE IDROSTATICA**

M. Avalle^a, A.A. Fornara^b

^a *Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi, 24 - 10129 Torino, e-mail: avalle@polito.it*

^b *Il Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Torino, Piazza Sant' Eusebio, 5 - 13100 Vercelli*

Le schiume strutturali trovano un sempre più vasto impiego in svariate applicazioni ingegneristiche. Una tra queste è la dissipazione di energia cinetica in caso di urto. Questa capacità, accompagnata ad una densità particolarmente bassa, rende tali materiali estremamente utili in campo automobilistico e non solo. La caratterizzazione di tali materiali avviene solitamente per mezzo di prove di compressione uniassiale su provini di forma parallelepipedica o cilindrica, secondo quanto previsto da normative specifiche, come per esempio la ASTM D1621-96. Nel presente lavoro è stato analizzato il comportamento del materiale in caso di stato di sollecitazione idrostatico. Nella prima parte del lavoro è descritta l'attrezzatura impiegata per la generazione di tale stato di sollecitazione, nella seconda parte sono esposti i risultati relativi alle prove effettuate su alcune famiglie di schiume polimeriche quali polistirene espanso (EPS), polipropilene espanso (EPP), poliuretano rigido espanso (PUR) e poliammide rinforzata con polifenilene teretere espansa (NORYL-GTX[®]) in diverse densità. Nella terza ed ultima parte è operato un confronto tra i risultati delle prove condotte in regime uniassiale e triassiale in base al quale si conclude che lo stato di sollecitazione idrostatico modifica in maniera significativa la caratteristica meccanica delle schiume ed è quindi necessario tenerne debito conto in fase di caratterizzazione e modellazione.

1. INTRODUZIONE

Le caratteristiche meccaniche di una schiuma sono influenzate da due serie di parametri: la prima legata alla struttura della cella elementare, la seconda alle caratteristiche intrinseche del materiale. Quando si parla di struttura geometrica della cella si fa riferimento alle dimensioni e alla forma, alla loro distribuzione spaziale, all'anisotropia, al tipo di interfaccia tra celle adiacenti alla capacità offerta al fluido costretto al suo interno di defluire. I polimeri a catena lunga (i più impiegati nella realizzazione di schiume strutturali per impieghi automobilistici) si comportano in maniera sostanzialmente diversa dai materiali metallici [1, 2]. Come conseguenza di questo, mentre i materiali metallici mostrano una caratteristica meccanica quasi del tutto indipendente dalla pressione idrostatica altrettanto non si può dire per i materiali polimerici [3]. Per questo ed altri motivi la sola prova uniassiale può non essere sufficiente per la caratterizzazione completa del comportamento di schiume strutturali.

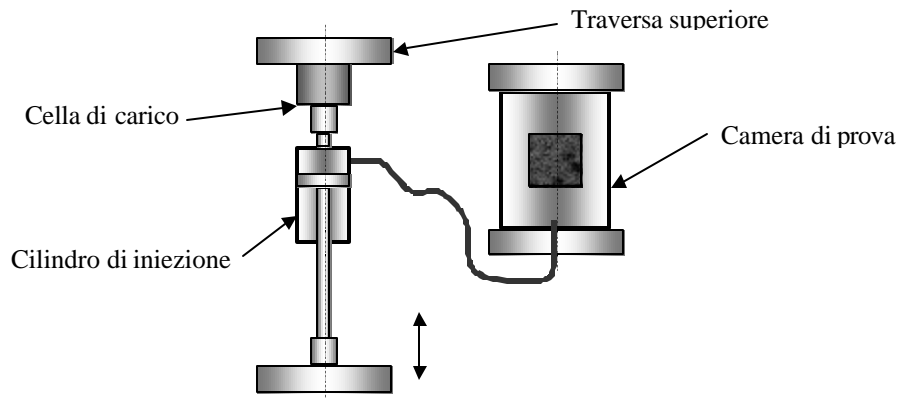


Fig. 1 Schema dell'attrezzatura di prova

2. L'ATTREZZATURA DI PROVA

Il modo più semplice per la generazione di uno stato di tensione idrostatico è quello di sfruttare le caratteristiche statiche di un fluido ad alto modulo di elasticità a compressione cubica, ad esempio l'acqua. Sollecitando il fluido in un punto qualsiasi, lo stato di sollecitazione che si realizza in tutti gli altri punti non solo è indipendente dalla posizione (a meno ovviamente di piccoli scostamenti dovuti alle variazioni di quota), ma risulta anche indipendente dalla giacitura rispetto cui tale vettore di tensione viene espresso. L'incompressibilità del fluido permette una misura diretta della contrazione volumetrica del provino: quest'ultima è infatti pari al volume di liquido inviato nella camera di prova. Poiché i fluidi perfettamente incompressibili non esistono si commette un errore che risulta comunque trascurabile data l'elevata deformabilità dei materiali oggetto della sperimentazione. Il provino viene dunque posto in una camera a tenuta all'interno della quale viene convogliata una portata di liquido. Per fare questo viene utilizzato un cilindro idraulico, il cui stelo viene movimentato da una macchina per prove materiali. Lo schema del sistema è rappresentato in figura 1. Nei paragrafi che seguono verranno descritte nel dettaglio le soluzioni realizzative adottate.

2.1 La camera di pressurizzazione

La camera di pressurizzazione (figura 2) è costituita da una coppia di flange in lega leggera tra le quali è interposto un cilindro in polimetilmetacrilato (PMMA) con spessore di parete pari a 15 mm. Questo materiale è stato scelto per poter osservare il campione durante la prova sebbene comporti di limitare la pressione massima a soli 20 bar, valore ritenuto sufficiente per caratterizzare in modo soddisfacente i materiali di interesse. L'adduzione di fluido avviene attraverso il foro praticato nella flangia inferiore. La tenuta tra flange e tubo viene assicurata da una serie di anelli di tenuta, precaricati da quattro tiranti in acciaio. La chiusura della camera è realizzata per mezzo di un tappo, anch'esso in lega leggera, che svolge anche la funzione di supporto del provino. Nel tappo sono inoltre state realizzate alcune luci di sfiato (figura 3). Una di queste, mettendo in comunicazione l'interno della camera di prova con l'ambiente esterno, è indispensabile nella fase di riempimento della camera di prova per permettere di eliminare l'aria residua presente. Non appena questa è defluita completamente, la luce viene chiusa agendo su un rubinetto. La seconda luce presente mette in comunicazione l'ambiente all'interno del quale è contenuto il provino (che è costituito da un palloncino in gomma) con l'esterno al fine di poter evacuare il gas che fuoriesce dalle cavità della schiuma quando questa viene compressa. Al fine di poter intervenire rapidamente sul sistema nelle fasi di montaggio e smontaggio del provino e di assicurare un adeguato precarico agli organi di tenuta disposti tra flangia superiore e tappo di chiusura, la movimentazione di quest'ultimo viene effettuata attraverso un martinetto idraulico ad azionamento manuale. In figura 4 è mostrato il sistema, allestito presso il Laboratorio di Meccanica Sperimentale della II Facoltà di Ingegneria del Politecnico di Torino.

2.2 Il cilindro di iniezione

Il moto dello stantuffo all'interno del cilindro (figura 5) modifica il volume della camera di iniezione, inviando una portata di liquido nella camera di pressurizzazione descritta al punto precedente. Le estremità del dispositivo presentano una zona filettata per poter essere rese solidali agli afferraggi di una macchina per prove materiali DARTEC HA100. In questo modo, è possibile sfruttarne sia la potenza per la sollecitazione del provino sia i trasduttori per la misura di forze e spostamenti e di conseguenza per una misura indiretta delle pressioni e delle deformazioni volumiche cui è soggetto il provino. Nota la forza è infatti possibile risalire alla pressione cui è soggetta la schiuma dividendo quest'ultima per la sezione dello stantuffo:

$$p = \frac{F}{A} \quad (1)$$

In maniera del tutto analoga, è possibile correlare lo spostamento misurato alla deformazione volumica ingegneristica del provino, una volta noto il volume iniziale:

$$e_v = \frac{s \cdot A}{V_0} \quad (2)$$

Dalla deformazione ingegneristica è infine possibile ricavare la deformazione vera:

$$e_v = \ln \frac{V}{V_0} = \ln(1 + e_v) \quad (3)$$

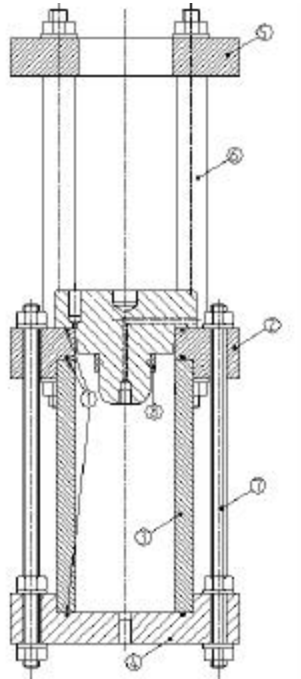


Fig. 2 Camera di pressurizzazione

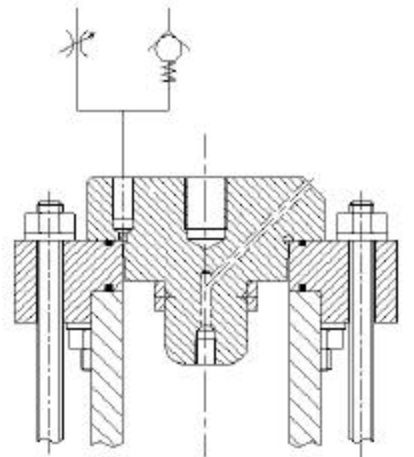


Fig. 3 Particolare del tappo di chiusura

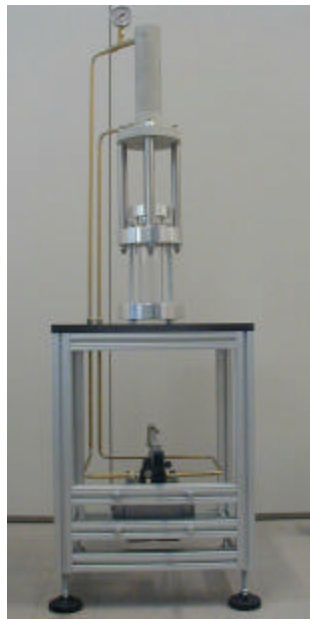


Fig. 4 Complessivo dell'attrezzatura

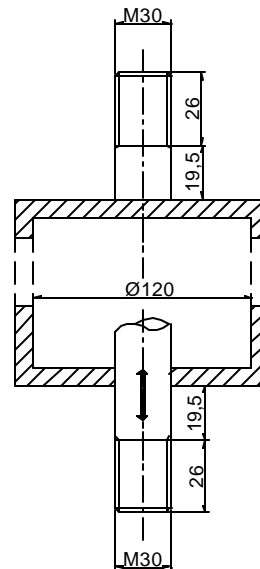


Fig. 5 Il cilindro di iniezione

3. LE PROVE SPERIMENTALI

È stata condotta una campagna di prove in regime di bassa velocità di deformazione su provini dei seguenti materiali:

- polistirene espanso (EPS) con densità nominale di 15 kg/m^3 ;

- polipropilene espanso (EPP) con densità nominali di 45, 70, 106 e 145 kg/m³;
- poliuretano rigido espanso (PUR) con densità nominali di 70 e 100 kg/m³;
- poliammide rinforzata con polifenilene tero espansa (NORYL-GTX[®]) con densità di 50 e 75 kg/m³.

Il materiale in lastre è stato tagliato al fine di ottenere provini di forma cubica di lato pari a 50 mm, conformemente con le prescrizioni delle normative in materia [4]. Per ogni tipo di materiale sono state eseguite almeno 3 ripetizioni. Le prove sono state eseguite imponendo allo stantuffo del cilindro di iniezione una velocità pari a 0,1 mm/s, corrispondenti a circa 0,01 s⁻¹ in termini di velocità di deformazione volumica. Il controllo della macchina di prova è stato impostato per raggiungere, laddove possibile, deformazioni volumetriche del 90%. Sulla macchina è stato inoltre impostato un limite sulla forza pari al -20 kN, al fine di prevenire un innalzamento della pressione all'interno della camera di prova tale da pregiudicarne l'integrità strutturale. Di seguito vengono mostrati i risultati ottenuti per i vari materiali espressi in termini di caratteristica pressione-deformazione volumica vera. Per ragioni di rappresentazione quest'ultima grandezza è riportata cambiata di segno.

3.1 Polistirene espanso (EPS)

Le curve espresse in termini di pressione-deformazione volumica vera riportate in figura 6 mostrano lo stesso andamento qualitativo riscontrabile nelle prove uniassiali [5, 6]: ad un tratto elastico molto poco evidente, segue un tratto in cui la pressione cresce lentamente al crescere della deformazione ed infine un tratto di crescita decisa della pressione cui corrisponde la fase di densificazione del materiale.

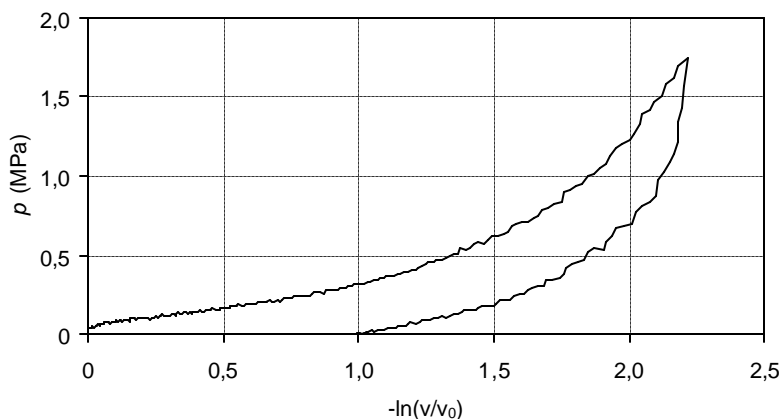


Fig. 6 Polistirene espanso, caratteristica pressione -deformazione volumica

3.2 Polipropilene espanso (EPP)

Le prove condotte su polipropilene (figura 7) mostrano un comportamento molto variabile con la densità. Le schiume a densità più bassa presentano ancora un andamento simile a quello mostrato in figura 6: ad un tratto iniziale con deformazione elastica segue un tratto a lenta crescita della pressione ed infine il tratto di compattamento del materiale. Si nota che il tratto intermedio, caratterizzato da una crescita lenta della pressione, tende a ridurre la sua estensione al crescere della densità del materiale fino ad essere praticamente assente per la schiuma a densità più elevata. Un comportamento simile, è stato riscontrato anche nelle prove uniassiali eseguite sugli stessi materiali.

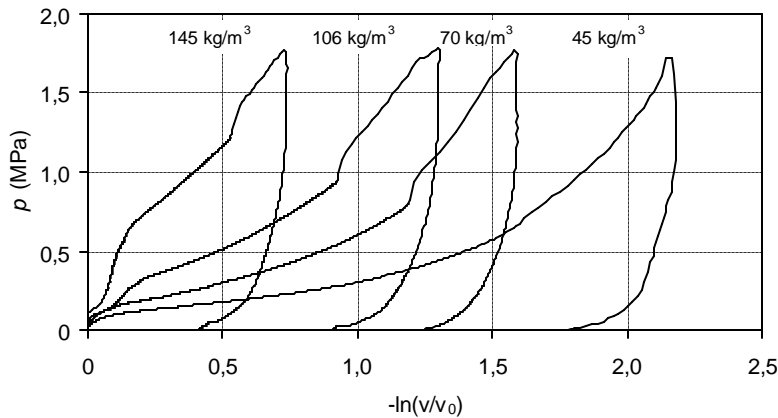


Fig. 7 Polipropilene espanso, caratteristica pressione-deformazione volumica

3.3 Poliuretano rigido espanso (PUR)

Il poliuretano rigido espanso presenta un comportamento sostanzialmente diverso rispetto all'EPP (figura 8). Per prima cosa è possibile notare un tratto elastico molto più evidente. Provini di poliuretano, a parità di valore di deformazione reagiscono con un valore di pressione quasi doppio rispetto ai provini di polipropilene di pari densità. Tale incremento nei valori di pressione è frutto di quanto avviene in campo elastico. Superato il limite elastico infatti, la caratteristica del materiale presenta una pendenza paragonabile a quella riscontrata per il polipropilene. Un comportamento di questo tipo è spiegabile analizzando le micrografie [5]. Il poliuretano espanso presenta una struttura a celle di dimensioni molto più piccole di quelle degli altri materiali esaminati. Questa particolare conformazione, modifica le modalità di collasso delle celle. Il comportamento che ne risulta è in generale più fragile. A tale proposito è utile ricordare che nelle prove uniassiali il materiale compresso manifestava una significativa tendenza allo sfaldamento.

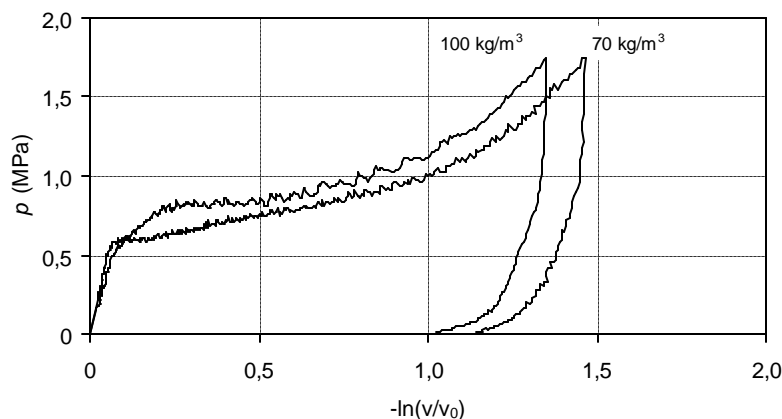


Fig. 8 Poliuretano rigido espanso, caratteristica pressione-deformazione volumica

3.4 Poliammide rinforzata con polifenilenetere (NORYL-GTX®)

I risultati delle prove di compressione idrostatica evidenziano l'assenza del tratto a pressione costante (figura 9). L'incremento di densità (50%) comporta in questo materiale un notevole incremento nella caratteristica pressione-deformazione volumica.

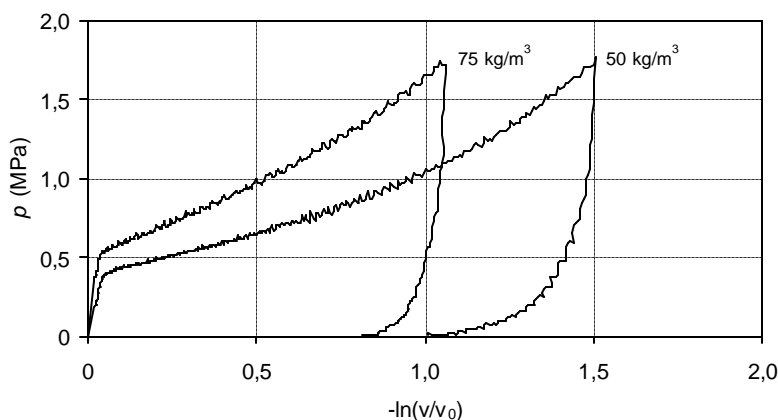


Fig. 9 NORLYL-GTX®, caratteristica pressione-deformazione volumica

4. ANALISI DEI RISULTATI

I materiali esaminati presentano modalità di deformazione diverse. L'EPS (figura 10) tende a deformarsi in maniera uniforme nelle tre direzioni a testimoniare una certa omogeneità delle caratteristiche. Non altrettanto si può dire dell'EPP (figura 11). Le superfici dei provini tendono infatti ad assumere forma concava o convessa a seconda della loro posizione all'interno della lastra di partenza: quelle ricavate nello spessore del provino tendono a collassare verso l'interno. Un comportamento di questo tipo è riscontrabile anche nel PUR (figura 12) e in maniera più marcata nel NORLYL-GTX® (figura 13). La disuniformità del comportamento è imputabile ad una disuniformità del materiale che è inevitabile conseguenza del processo di fabbricazione. Precedenti analisi sperimentali hanno però dimostrato che tale disuniformità delle proprietà meccaniche locali della schiuma non ha un'influenza significativa sul loro comportamento globale.

I risultati ottenuti in campo triassiale possono essere confrontati con quelli delle prove uniassiali [5, 6] in base alle seguenti considerazioni. In virtù della proprietà tipica delle schiume polimeriche di avere un coefficiente di contrazione trasversale praticamente nullo, si può allora assumere che la deformazione uniassiale coincida con la deformazione volumica. Si possono così mettere a confronto le curve risultanti dalle prove uniassiali con quelle delle prove triassiali su di uno stesso grafico (figure 14-17).

Tale confronto permette di dire che in generale la triassialità dello stato di sollecitazione influisce sulle caratteristiche delle schiume polimeriche. Tale influenza è tuttavia variabile da materiale a materiale e da densità a densità. I risultati ottenuti mostrano che alle basse deformazioni la tensione uniassiale è superiore alla pressione idrostatica a parità di deformazione. Il punto in cui si ha l'inversione di tale tendenza si sposta verso valori di deformazione più elevati all'aumentare della densità. Queste considerazioni valgono per l'EPS, l'EPP e il NORLYL-GTX® (figure 14-16). Un discorso a parte merita il PUR, nel quale i comportamenti uniassiale e idrostatico tendono a sovrapporsi (figura 17).

5. CONCLUSIONI

Le schiume strutturali giocano un ruolo importante nel miglioramento della sicurezza passiva dei veicoli in cui sono ormai impiegate largamente. Nella progettazione è necessario conoscerne le proprietà meccaniche e non solo in condizioni di sollecitazione uniassiale. Infatti la risposta delle schiume in condizioni di sollecitazione pluriassiale non è prevedibile solamente con prove meccaniche di tipo uniassiale.

Per questo scopo è stata sviluppata una metodologia di prova per la caratterizzazione di schiume strutturali polimeriche in caso di sollecitazione idrostatica, basata su di una apparecchiatura appositamente messa a punto e realizzata. Sono quindi state svolte prove sperimentali su diversi tipi di materiali impiegati nelle costruzioni veicolistiche, con risultati soddisfacenti e buona ripetibilità.

I risultati delle prove condotte con tale metodologia sui materiali esaminati hanno mostrato che la presenza di uno stato di sollecitazione triassiale ne influenza in maniera significativa le caratteristiche meccaniche. È quindi necessario tenere in conto gli effetti della triassialità nel calcolo di componenti realizzati in questi materiali e conoscerne di conseguenza la relativa caratteristica meccanica.

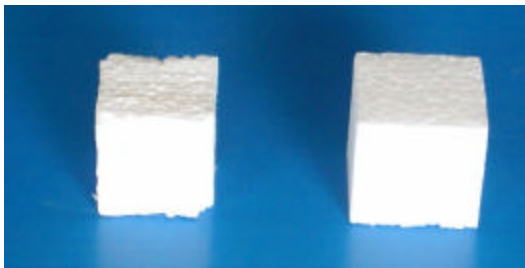


Fig. 10 EPS, confronto tra configurazione deformata e indeformata

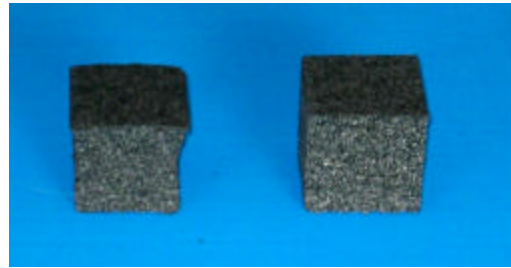


Fig. 11 EPP, confronto tra configurazione deformata e indeformata

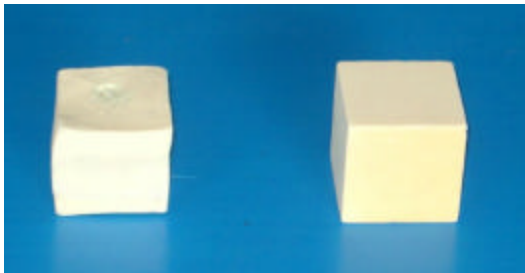


Fig. 12 PUR, confronto tra configurazione deformata e indeformata

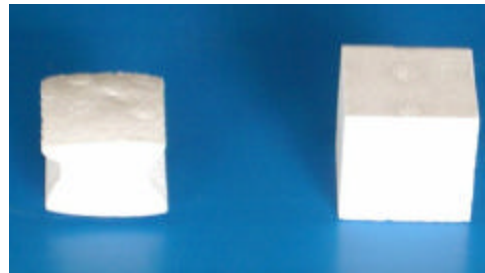


Fig. 13 NORYL-GTX[®], confronto tra configurazione deformata e indeformata

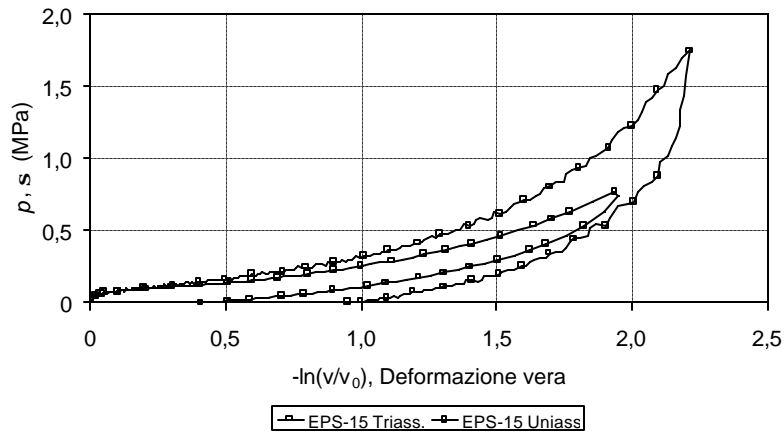


Fig. 14 EPS, confronto tra i risultati ottenuti in campo uniassiale e triassiale

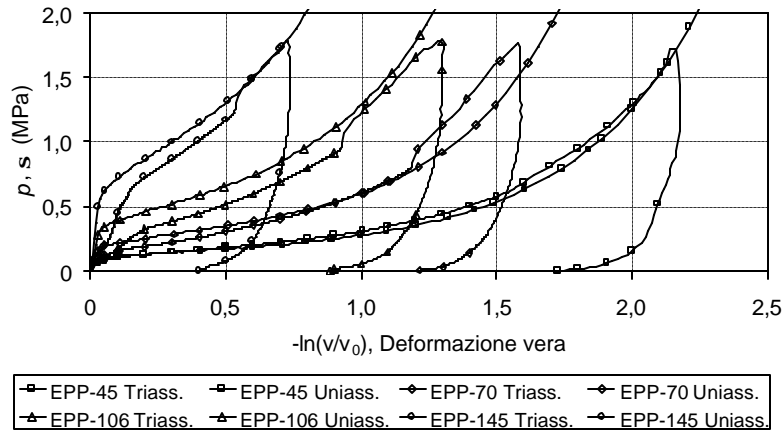


Fig. 15 EPP, confronto tra i risultati ottenuti in campo uniassiale e triassiale

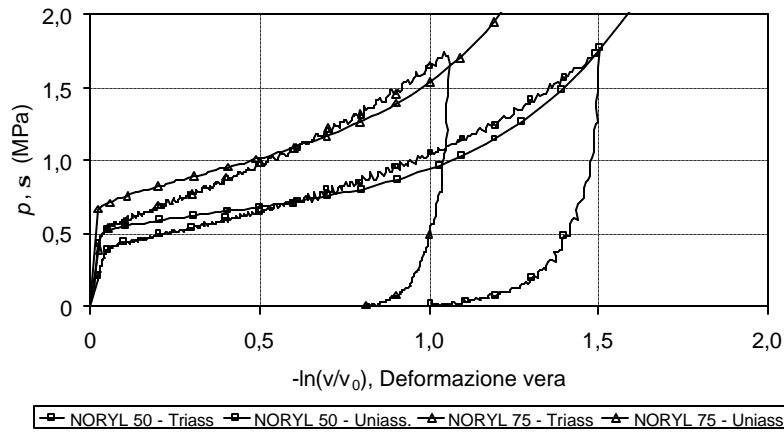


Fig. 16 NORYL-GTX[®], confronto tra i risultati ottenuti nella in campo uniassiale e triassiale

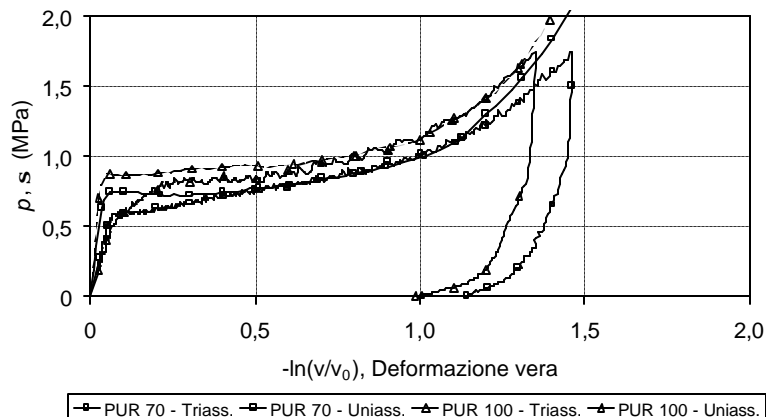


Fig. 17 PUR, confronto tra i risultati ottenuti in campo uniassiale e triassiale

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Prof. G. Belingardi per il costante supporto ed incoraggiamento nello svolgimento del lavoro. Gli autori desiderano altresì ringraziare gli Ingg. A. Zambruno e E. Pallavicini della sede di Alessandria del Politecnico di Torino per la collaborazione alla realizzazione dell'apparecchiatura di prova.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. A. Sauer, K. D. Pae, S. K. Bhateja, "Influence of pressure on Yield and fracture in polymers", *J. Macromol, Sci-Phys.* Vol. B8, 1979, pp. 631-654
- [2] W. A. Spitzig, O. Richmond, "Effects of hydrostatic pressure on the deformation behavior of polyethylene and polycarbonate in tension and compression", *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 19, 1979, pp. 1129-1139
- [3] G.S. Nusholtz, S.Bilkhu, M. Founas, K. Uduma, P. A. De Bois, "Impact response of foam: the effect of the state of stress", SAE paper N. 962418, 1996, pp. 95-121
- [4] ASTM D1621-94, "Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics"
- [5] M. Avalle, G. Belingardi, R. Montanini, E. Mangino, "Comportamento statico e dinamico di schiume strutturali per l'assorbimento di energia", *Atti del XXVIII Convegno Nazionale AIAS*, 1999, pp. 969-978
- [6] M. Avalle, G. Belingardi, R. Montanini, E. Mangino, "Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram", *Int. J. of Impact Eng.*, Vol. 25, 2001, pp. 455-472
- [7] L. J. Gibson, M. F. Ashby, Cellular Solids: structures and properties. Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1997