

4.7 Caratterizzazione meccanica della schiuma poliuretana ad elevate velocità di deformazione

4.7.1 Configurazione sperimentale

La caratterizzazione del materiale ad elevata velocità di deformazione è stata effettuata, come di consueto per intervalli di velocità di deformazione variabili dalle centinaia alle migliaia di strain nell'unità di secondo, utilizzando l'apparato di Hopkinson. Data la non elevata resistenza, sia in trazione che in compressione del materiale da caratterizzare si è scelto di utilizzare barre di Hopkinson in magnesio di tipo AZM. caratterizzato da una densità pari a 1740 kg/m³, un modulo elastico ed un modulo di Poisson nominali pari a, rispettivamente, 44000 MPa e 0.35. La scelta di tale materiale permette di ottenere una elevata sensibilità in termini di tensione per unità di deformazione evitando di dover fare fronte alle non linearità caratteristiche dell'impiego di barre costituite da materiale polimerico.

L'apparato sperimentale che si è utilizzato per l'esecuzione dei test ad elevata velocità di deformazione è composto dai seguenti elementi:

- Barre di Hopkinson di input ed output
- Gas gun per l'accelerazione della barra di impatto
- Amplificatore ad elevata frequenza di acquisizione
- Fotocamera ad elevato frame rate
- Oscilloscopio
- Laptop dedicato al controllo della fotocamera ad elevato frame rate
- Flash ad accensione controllata elettronicamente attraverso software dedicato

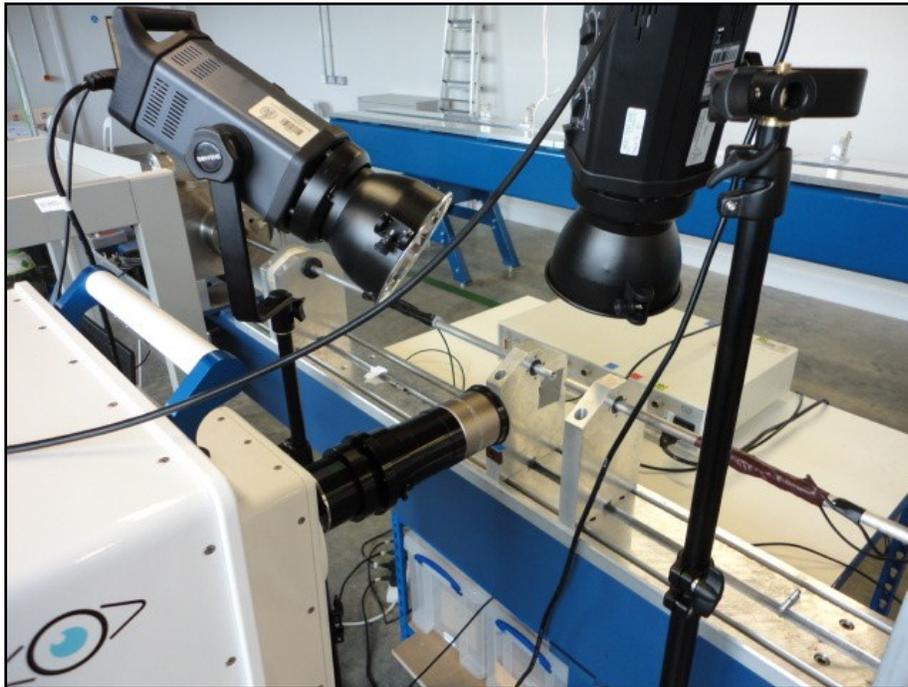


Figura H.29: Split Hopkinson Tension Bar – Setup sperimentale

I segnali elettrici generati dalle stazioni di strain gauge vengono inviati, tramite appositi cavi, all'amplificatore dal quale, dopo essere stati opportunamente amplificati vengono inviati all'oscilloscopio. La necessità di utilizzare un amplificatore ad elevata frequenza di acquisizione deriva dall'esigenza di dover registrare, senza distorsioni, l'insorgere delle onde di tensione sulle barra di input e output mantenendo inalterato, almeno dal punto di vista ingegneristico il contenuto in frequenza di queste ultime.

I segnali inviati all'oscilloscopio, vengono registrati da quest'ultimo per la successiva analisi ed utilizzati (di consueto il segnale proveniente dalla gauge section posizionata sulla barra di input) come trigger per la fotocamera ad elevato frame rate. L'utilizzo di una fotocamera ad elevato frame rate risulta necessario qualora si voglia analizzare il comportamento del materiale qualora esso sia soggetto a deformazioni localizzate, come la strizione durante i test in trazione o la densificazione locale che si verifica durante i test in compressione per alcune tipologie di schiume. In tali casi infatti i segnali rilevati

dagli strain gauges non sono rappresentativi di una deformazione equamente distribuita lungo la gauge length del provino, bensì di una deformazione non uniforme estesa a tutta la lunghezza del provino. I segnali rilevati dagli estensimetri non sono quindi rappresentativi del comportamento meccanico in nessun punto del materiale. Per una caratterizzazione effettiva durante la fase di deformazione localizzata occorre dunque valutare, visivamente, l'estensione e l'entità delle deformazioni attraverso indagine fotografica.

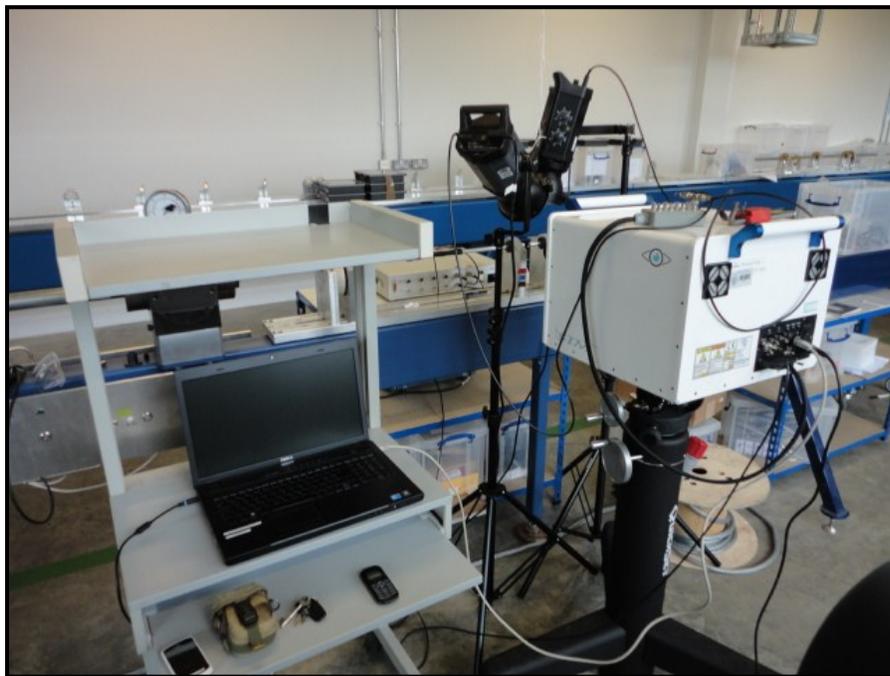


Figura H.30: Split Hopkinson Tension Bar –Setup sperimentale e connessioni

Poiché un test condotto ad elevata velocità di deformazione eseguito mediante Hopkinson Bar presenta una durata temporale, generalmente compresa tra le decine e le centinaia di microsecondi, risulta di importanza fondamentale individuare in maniera accurata gli istanti in cui le immagini catturate dalla fotocamera ad elevato frame rate sono registrate. Per far ciò si è connessa la fotocamera ad elevata velocità di deformazione, mediante cavo coassiale, all'oscilloscopio. In tal modo la durata temporale

dell'esposizione viene convertita in un segnale di tensione di tipo impulsivo. Gli istanti in cui la fotocamera ad elevato frame rate effettua gli scatti sono così convertiti in picchi di tensione ben definiti che risultano, quindi, di facile individuazione temporale. In tal modo la sincronizzazione temporale delle deformazioni misurate attraverso le immagini con le tensioni rilevate dalla stazione estensimetrica posta sulla barra di output risulta di semplice realizzazione.

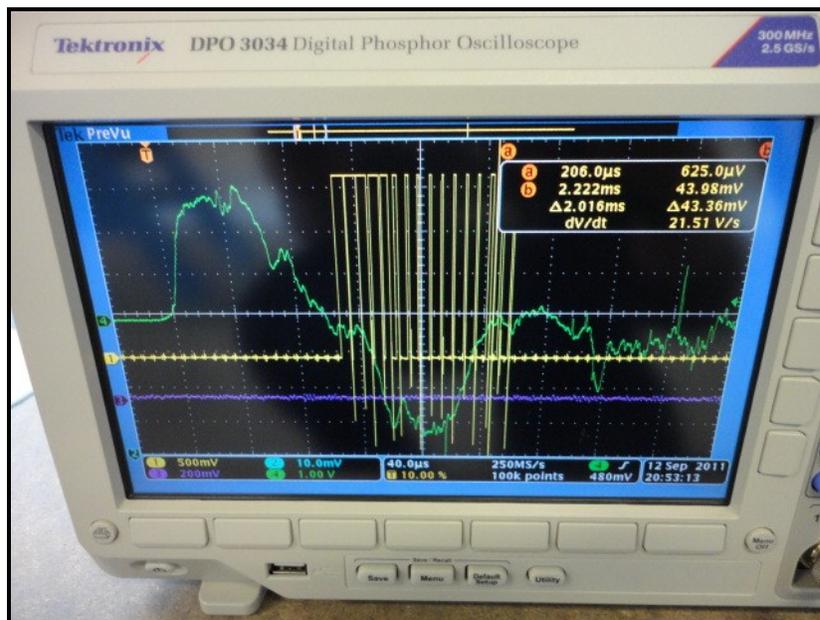


Figura H.31: individuazione degli istanti di acquisizione delle immagini

La fotocamera ad elevato frame rate che si è utilizzato è il modello Specialized Imaging SIM 16. Tale telecamera, dotata di 16 canali ottici separati costituisce un valido strumento di indagine visiva per scienziati ed ingegneri di varie discipline con applicazioni principali che comprendono:

- Balistica
- Ricerca relativa alla combustione

- Dinamica della rottura
- Elasticità, propagazione della frattura e resistenza agli urti
- Ricerca e sperimentazione medica
- Studio di impatti
- Analisi di spray e particelle
- Nanotecnologie e micro meccanismi
- Test sperimentali in ambito automotive
- Detonazione



Figura H.32: connessioni fotocamera ad elevato frame rate

Il controllo della fotocamera avviene attraverso laptop dedicato connesso a quest'ultima mediante apposito cavo ethernet. Le regolazioni relative alla telecamera ad alta velocità sono eseguite completamente utilizzando il software dedicato *SIM Control*. La telecamera ad elevato frame utilizzata rate è capace di impressionare diverse immagini in uno spazio temporale ridotto, in particolare 16 immagini con uno strain rate massimo pari a $2 \cdot 10^6$ frame al secondo. E' importante che le immagini siano registrate durante la

deformazione del provino altrimenti la maggioranza degli scatti risulterà inutile allo scopo di analizzare le deformazioni durante il test.

Il software *SIM Control* permette di ottimizzare la tempistica degli scatti effettuati la tempistica degli scatti eseguiti, facendo sì che le immagini catturate siano in maggioranza relative alla fase di deformazione del provino. Esso infatti permette di regolare:

- La “*event window*”, ovvero l’estensione della finestra temporale in cui la totalità immagini vengono impressionate.
- Il “*delay*”, ovvero l’intervallo di tempo che intercorre dall’istante in cui il segnale rilevato dal primo strain gauge attiva il trigger al istante in cui la fotocamera effettua il primo scatto. Infatti, affinché la prima immagine registrata sia relativa ai primi istanti di deformazione occorre che quest’ultima sia relativa al tempo in cui l’onda di tensione che attraversa la barra di input raggiunge l’intervallo provino-barra di input. Tale tempo è pari a:

$$t_1 = t_{trig} + \frac{l_1}{c_{bar}} \quad (H.1)$$

In cui:

‘ t_{trig} ’ = tempo in cui l’onda di tensione raggiunge la stazione estensimetrica attivando il trigger

‘ l_1 ’ = distanza tra la stazione estensimetrica addetta il trigger e l’interfaccia barra – provino.

‘ c_{bar} ’ = velocità longitudinale del suono della input bar

$$‘delay’ = \frac{l_1}{c_{bar}}$$

- I tempi di esposizione per la totalità dei sedici canali ottici, ovvero il tempo durante il quale l'otturatore della macchina fotografica rimane aperto per permettere alla luce di raggiungere i sensori.
- L'intervallo temporale tra uno scatto ed il successivo. Quest'ultimo è correlato l'estensione della finestra temporale in cui la totalità immagini vengono impressionate essendo, nel caso di scatti equamente distanziati nel tempo, pari alla *'event window'* diviso il numero dei canali ottici utilizzati.
- Il tempo di *'preflash'* ovvero il tempo di cui va anticipata l'accensione dei flash rispetto all'istante t_1 . Il tempo necessario alla completa illuminazione dei flash è infatti nell'intorno dei 60 μs e l'illuminazione fornita dai flash decade nell'intorno dei 100 μs . la regolazione del tempo di preflash insieme ai tempi di scatto relativi ai singoli canali permette di far sì che la finestra temporale degli scatti sia dotata della migliore illuminazione possibile compatibilmente con la deformazione del materiale di interesse.

I tempi di esposizione ed i *'delay'* per i singoli canali ottici possono essere regolati singolarmente permettendo una completa ottimizzazione degli scatti effettuati in relazione al tempo di illuminazione dei flash ad accensione controllata ed in relazione alla velocità di traslazione delle barre di input e output durante i test. Un tempo di esposizione relativamente elevato infatti, pur consentendo di ottenere una migliore luminosità delle immagini conduce, come è chiaro, all'ottenimento di immagini sfocate nella fase del test in cui si ha una rapida traslazione delle barre; d'altro canto, specie nella fase iniziale di illuminazione dei flash occorre che si abbia una illuminazione adeguata allo scopo di ottenere immagini utilizzabili nella fase di analisi delle deformazioni. Un ottimo compromesso tra tempi di esposizione, *'delays'* e l'amplificazione in luminosità per ognuno dei singoli canali ottici permette di ottenere un set di immagini adeguate al successivo utilizzo per l'analisi delle deformazioni tramite la tecnica di correlazione digitale delle immagini.

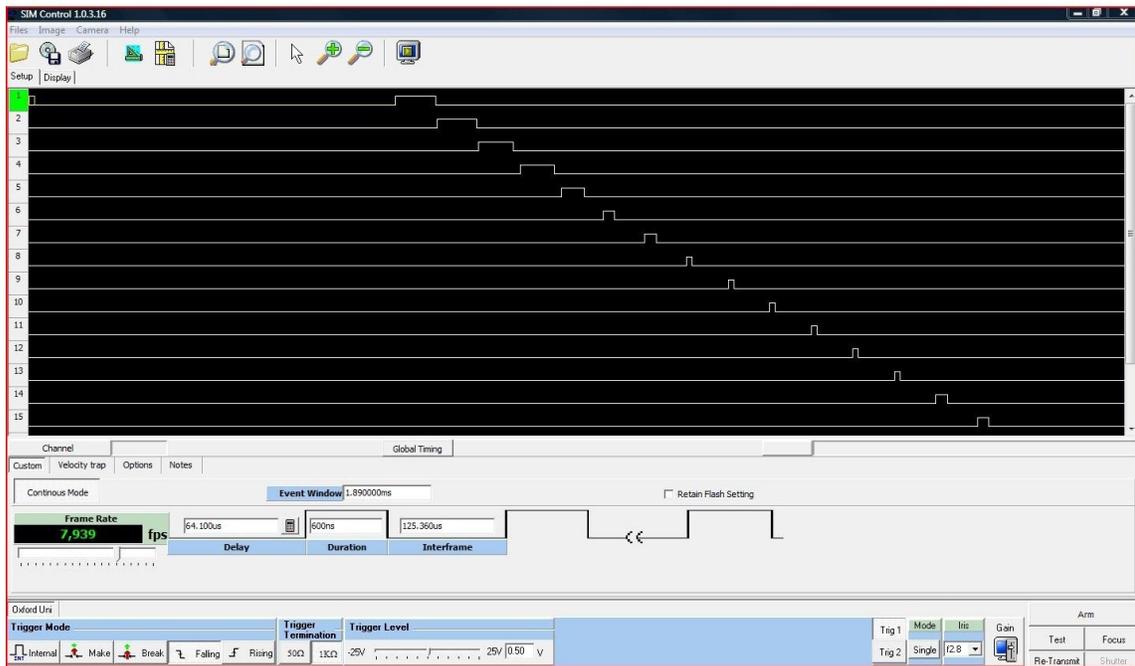


Figura H.33: regolazione complessiva di 'delay' e tempi di esposizione

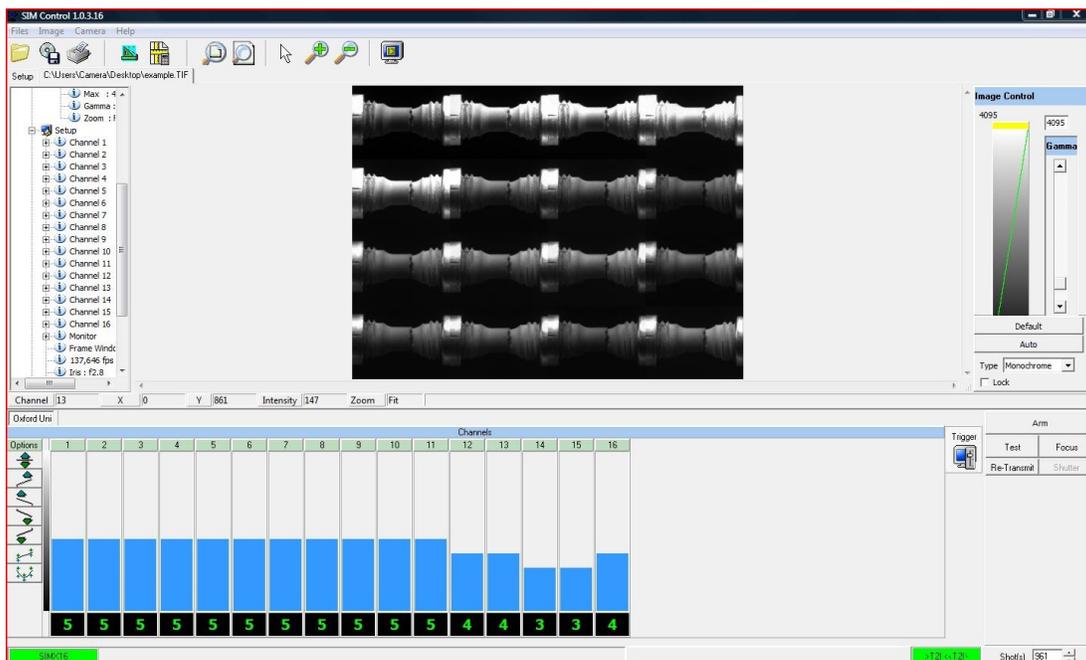


Figura H.34: regolazione del guadagno di luminosita' sui singoli canali ottici

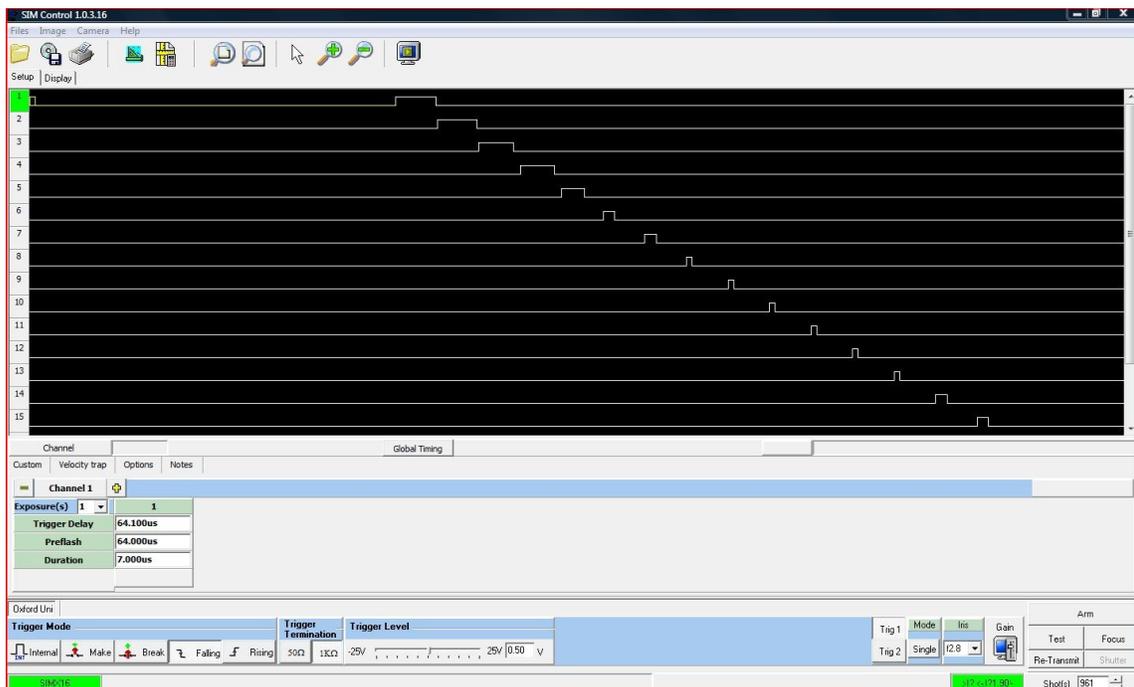


Figura H.35: regolazione di delay, tempo di esposizione e ‘preflash’ per il primo dei fotogrammi registrati

4.7.2 Test effettuati ed analisi dei risultati sperimentali

Le prove sperimentali su SHPB concludono la caratterizzazione del comportamento in compressione della schiuma sintattica a matrice poliuretanica oggetto di interesse. Per ognuno dei test effettuati si sono utilizzate barre di input e di output di diametro pari a ½” (12.7 mm) entrambe in magnesio AZM, dotato di densità pari a 1740 kg/m³, un modulo elastico pari a 44000 Mpa, e quindi una velocità longitudinale di propagazione delle onde di tensione pari a 5098,33 m/s. La barra di input presenta una lunghezza pari a un metro con stazione estensimetrica posta esattamente a metà della sua lunghezza mentre le barre di output e la “striker bar” sono dotate di lunghezza pari a 0.5 m. In tal

modo l'andamento temporale dello stato tensionale sulla barra di input presenterà onde di tensione incidente e riflessa non sovrapposte tra loro ma perfettamente adiacenti.

Come detto in precedenza, la scelta del magnesio come materiale permette di ottenere fattori di calibrazione elevati, necessari per la caratterizzazione di materiali dotati di cedevolezza elevata quali sono le schiume a matrice polimerica. In tal modo si è fatto sì che la risposta in tensione ottenuta dalle stazioni estensimetriche fornisca segnali adeguati senza la necessità di dover utilizzare barre costituite da materiale polimerico che, inevitabilmente, introdurrebbero nell'elaborazione dei dati le nonlinearità insite in tale tipo di materiali.

La totalità dei test effettuati è stata eseguita utilizzando un condizionatore di segnali ad elevata frequenza di acquisizione FYLDE H375TA impostando rispettivamente per le stazioni di misura poste sulle barre di input e di output fattori di amplificazione pari a 200 e 1000. La calibrazione, effettuata su entrambe le barre per ambedue i fattori di amplificazione utilizzati fornisce, valori pari a:

- Input bar (fattore di amplificazione 200)
 $V/N = 0.000190591 [V/N]$
 $V/Strain = 1129.517033 [V]$
- Input bar (fattore di amplificazione 1000)
 $V/N = 0.000952955 [V/N]$
 $V/Strain = 5647.585164 [V]$
- Output Bar (fattore di amplificazione 200)
 $V/N=0.000191397$
 $V/Strain = 1134.295675$
- Output Bar (fattore di amplificazione 10000)
 $V/N=0.000956986$
 $V/Strain = 5671.478374$

In maniera analoga a quanto fatto nel caso dei test in compressione in regime quasi statico, allo scopo di verificare che la dimensione dei provini utilizzati non abbia alcuna influenza sulle caratteristiche meccaniche determinate, si sono effettuati i test su provini cilindrici di tre differenti dimensioni, riportate in tabella H.1.

Specimen #	diameter	length	strain rate	plateau stress
[-]	[mm]	[mm]	[s ⁻¹]	[MPa]
1	9	4	1400	48
2	9	4	2500	47
3	9	4	2400	38
4	9	4	3400	34
5	9	4	3300	44
6	9	4	3100	46
7	9	4	2900	40
8	9	4	2400	37
9	9	4	2000	38
10	9	4	2000	38
11	9	4	1800	50
12	9	4	1800	49
13	9	4	1600	47
14	6	5	1350	40
15	6	5	1300	40
16	6	5	1350	26
17	4	6	1100	38
18	4	6	1050	34
19	4	6	1050	26
20	6	5	1100	42

Tabella H.1: test in compressione ad elevata velocità di deformazione - tensione di plateau in funzione dello strain rate per differenti geometrie del provino

Come e' possibile notare dai risultati riportati in tabella H.1 la dimensione dei provini utilizzati non presenta alcuna influenza sui risultati ottenuti in termini di tensione di cedimento plastico. La dispersione dei risultati ottenuti e' infatti, per la particolare tipologia di materiale da caratterizzare, insita al regime di strain rate dei test effettuati e risulta, come e' chiaro dai dati riportati, indipendente dalle dimensioni dei campioni cilindrici utilizzati.

Considerata la dispersione dei risultati elaborati si e' reputato significativo, effettuare un'analisi di tipo statistico per la tensione di plateau della schiuma sintattica oggetto di interesse, facendo ricorso alla distribuzione di Weibull. Tale distribuzione, come le distribuzioni di tipo esponenziale viene ampiamente utilizzata in ambito ingegneristico in particolare per quanto concerne l'affidabilita' ed i test sperimentali. Nello specifico si e' utilizzata una funzione di sopravvivenza di Weibull a due parametri, nella forma:

$$S(\sigma) = e^{\left(-\frac{\sigma}{m_1}\right)^{m_2}} \quad (\text{H.2})$$

In cui σ e' la tensione di cedimento plastico ed m_1 ed m_2 , entrambi definiti positivi sono i parametri della distribuzione; in particolare m_1 e' detto parametro di scala della distribuzione mentre m_2 e' il parametro di forma e caratterizzano rispettivamente il valore atteso della distribuzione e la dispersione della stessi. Nello specifico maggiore e' il valore di m_2 minore e' la dispersione dei dati sperimentali rilevati.

Nel caso oggetto di studio la distribuzione di sopravvivenza $S(\sigma)$ rappresenta la probabilita' che tensione di cedimento plastico superi il valore σ . Al crescere di σ dal valore nullo a valori teoricamente infiniti la funzione di sopravvivenza presenta le seguenti proprieta':

- E' una funzione monotona di tipo decrescente (come e' chiaro infatti al crescere del valore di σ la probabilita' che la tensione di cedimento plastico di uno dei provini testati superi un determinato valore e' decrescente)

- Per $\sigma = 0$, $S(\sigma)$ presenta valore unitario. In altre parole la probabilita' che uno dei provini testati abbia una tensione di cedimento plastico maggiore di zero e' del 100%
- Per $\sigma = \infty$, $S(\sigma)$ presenta valore nullo. Al crescere della funzione di cedimento plastico la probabilita' che uno dei provini testati presenti un valore di tensione di plateau maggiore decresce progressivamente.

Il fitting dei dati rilevati attraverso la funzione suddetta si presenta soddisfacente con un valore del coefficiente di fitting R pari a circa 0.99.

Il parametro di scala m_1 risulta pari a 42 Mpa mentre il parametro di forma m_2 risulta uguale a circa 6.34 denotando una dispersione accettabile dei dati rilevati considerando il fatto che il materiale oggetto di interesse e' caratterizzato da microsferiche cave di misura differente e da una possibile porosita' addizionale dovuta al fatto che reagisce all'umidita' durante l'indurimento generando anidride carbonica.

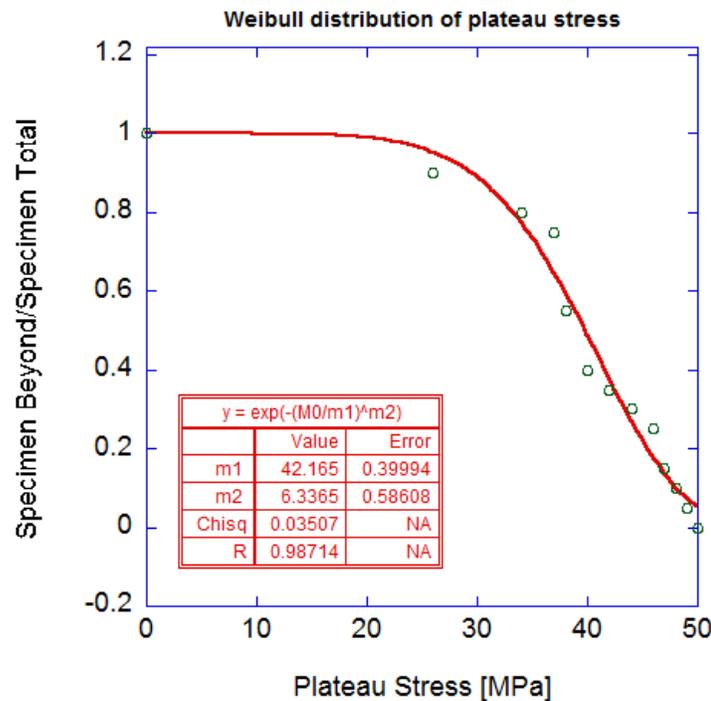


Figura H.36: test di compressione HR - distribuzione di Weibull dello stress di plateau

Come e' possibile notare dai diagrammi seguenti, che descrivono rispettivamente la variazione dello stress di plateau al variare dello strain rate (Figura H.31) e le curve caratteristiche stress-strain del materiale parametrizzate da quest'ultimo, la dipendenza delle caratteristiche del materiale dalla velocita' di deformazione risulta notevole. Si ha infatti un incremento della tensione di collasso plastico pari a circa il 400 % passando dal regime quasi statico alle elevate velocita' di deformazione.

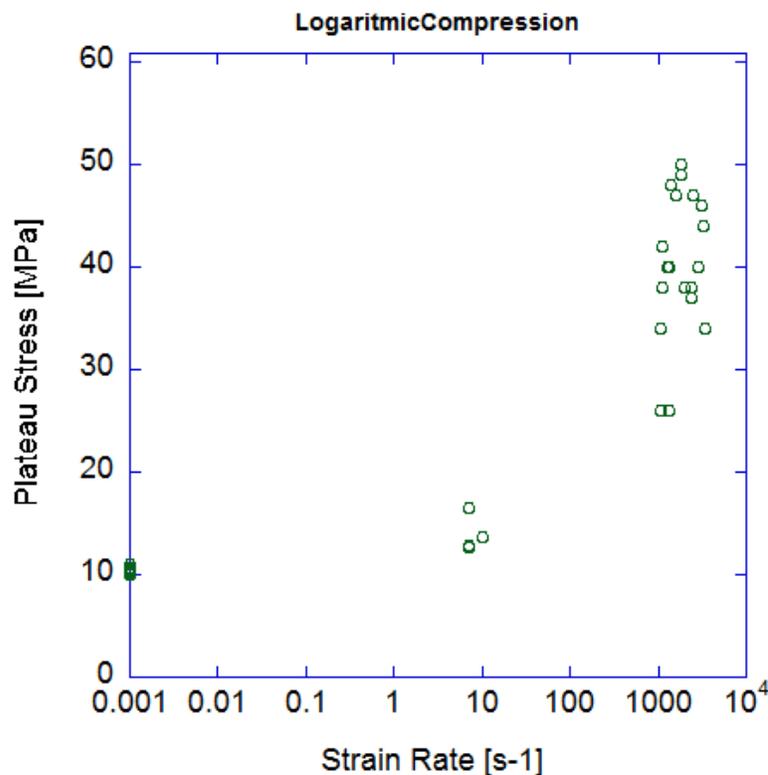


Figura H.37: influenza dello strain rate sulla tensione di plateau

Analogamente, come e' possibile osservare in figura H.38, la rigidezza del materiale durante la fase elastica di deformazione presenta un decisivo incremento all'aumentare della velocita' di deformazione. L'effetto dello strain rate quindi, per la schiuma sintattica oggetto di studio influenza sia le proprieta' elastiche che di resistenza del materiale. Come detto nei precedenti capitoli infatti, sebbene l'effetto non si presenta rilevante per la maggior parte dei metalli e delle leghe metalliche il modulo elastico puo'

presentare un incremento notevole per altri tipi di materiale quali i polimeri e quindi le schiume da questi ultimi derivate.

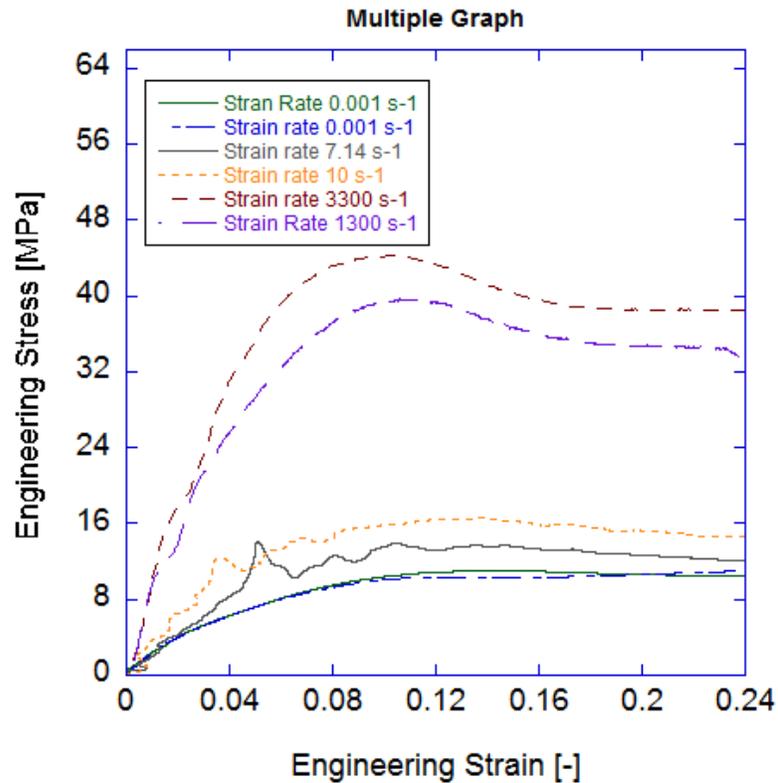


Figura H.38: curve caratteristiche della schiuma sintattica di interesse a differenti regimi di velocità di deformazione

Si riportano di seguito, a titolo di esempio, le caratteristiche tensione - deformazione di alcuni dei provini testati, caratterizzati da diverse dimensioni e/o differenti strain rate. Come e' possibile notare osservando le figure H.47 – H.50 dopo alcune oscillazioni tipiche dei test su Hopkinson Bar si ha la completa eguaglianza delle forze agenti in corrispondenza dell'interfaccia barra di input – provino e barra di output – provino. Si puo' assumere quindi l'ottenimento dell'equilibrio dinamico durante i test effettuati, per cui l'ipotesi di uniformita' delle tensioni lungo il provino risulta verificata a conferma della validita' della caratterizzazione sperimentale effettuata.

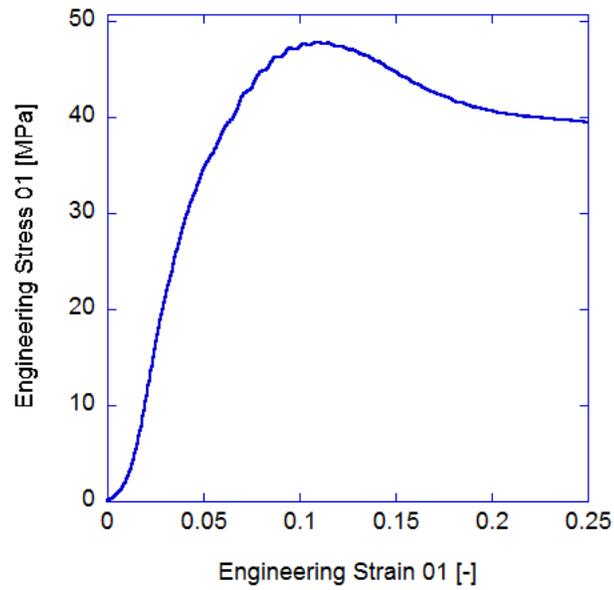


Figura H.39: Test 1 – caratteristica ingegneristica della schiuma sintattica caratterizzata

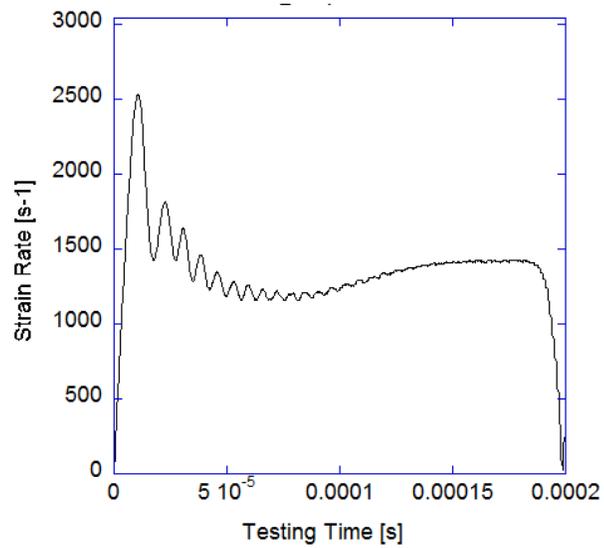


Figura H.40: Test 1 – strain rate ottenuto durante il test

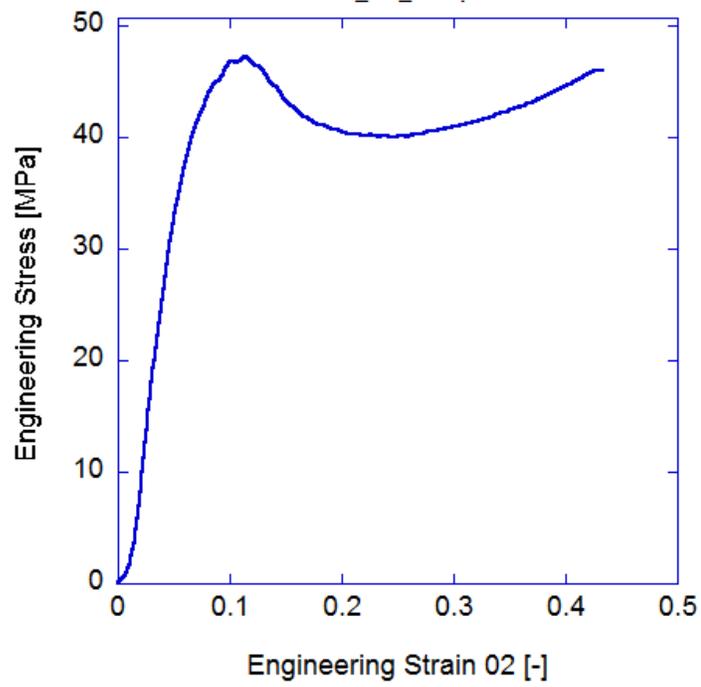


Figura H.41 : Test 2 – caratteristica ingegneristica della schiuma sintattica caratterizzata

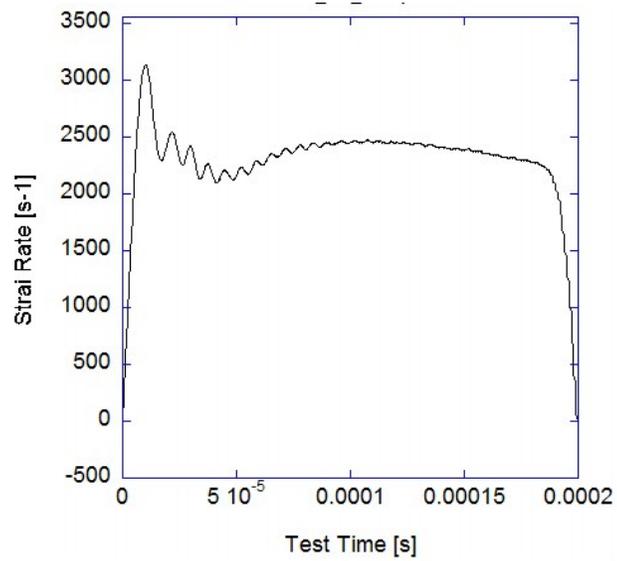


Figura H.42: Test 2 – strain rate ottenuto durante il test

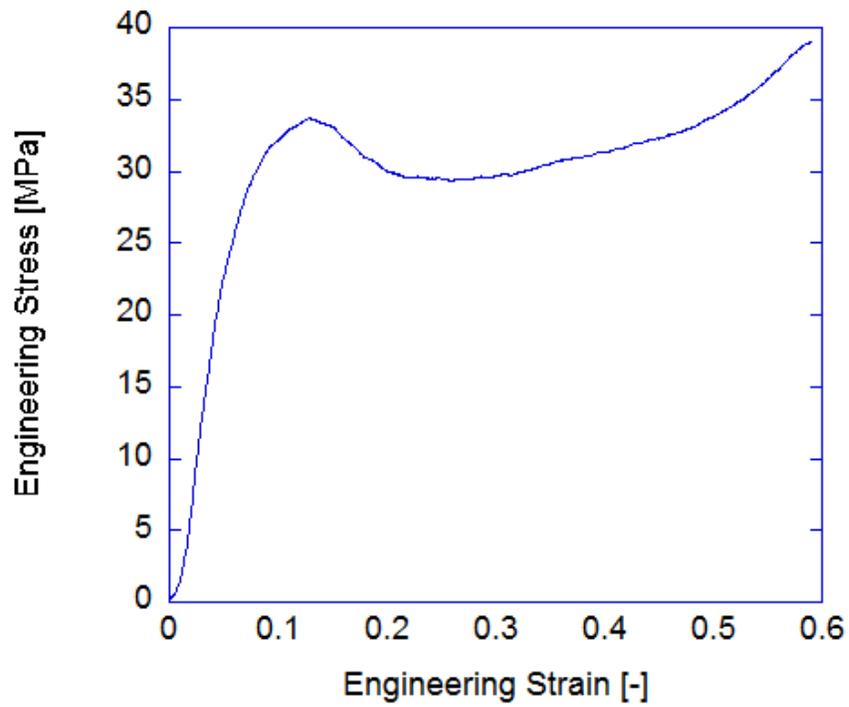


Figura H.43: Test 4 – caratteristica ingegneristica della schiuma sintattica caratterizzata

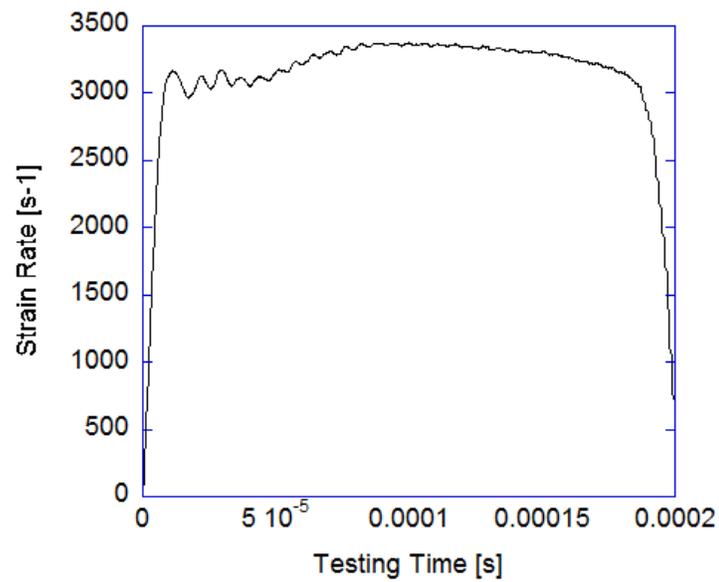


Figura H.44: Test 4 – strain rate ottenuto durante il test

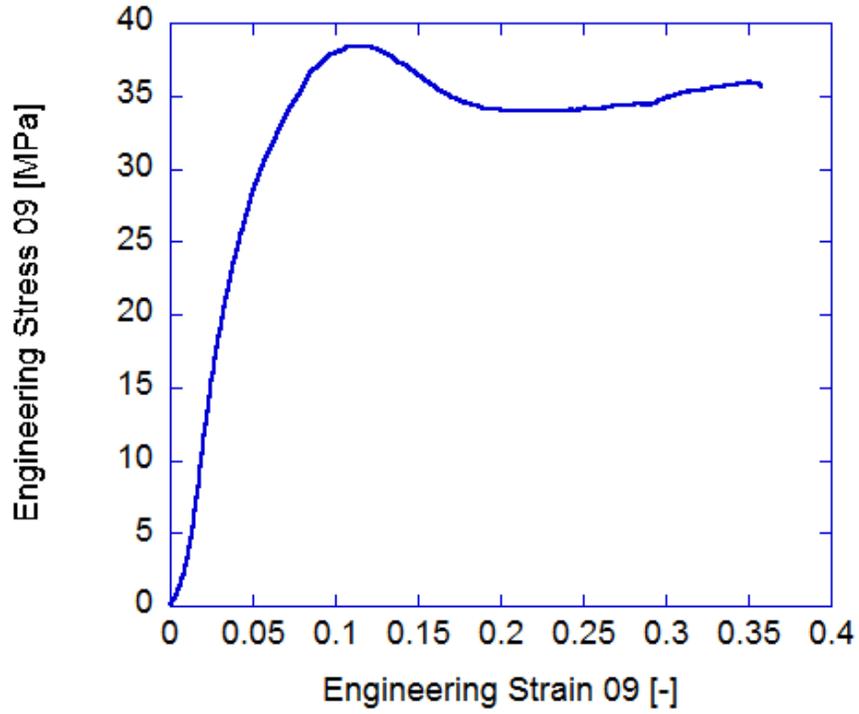


Figura H.45: Test 9 – caratteristica ingegneristica della schiuma sintattica caratterizzata

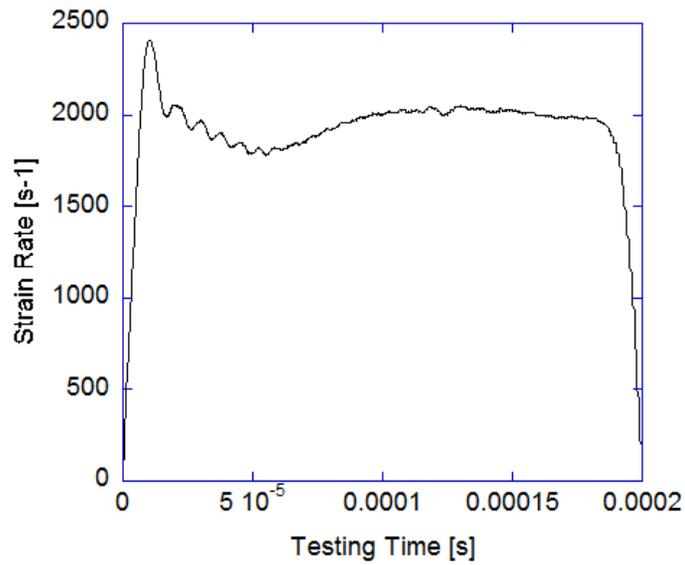


Figura H.46: Test 9 – strain rate ottenuto durante il test

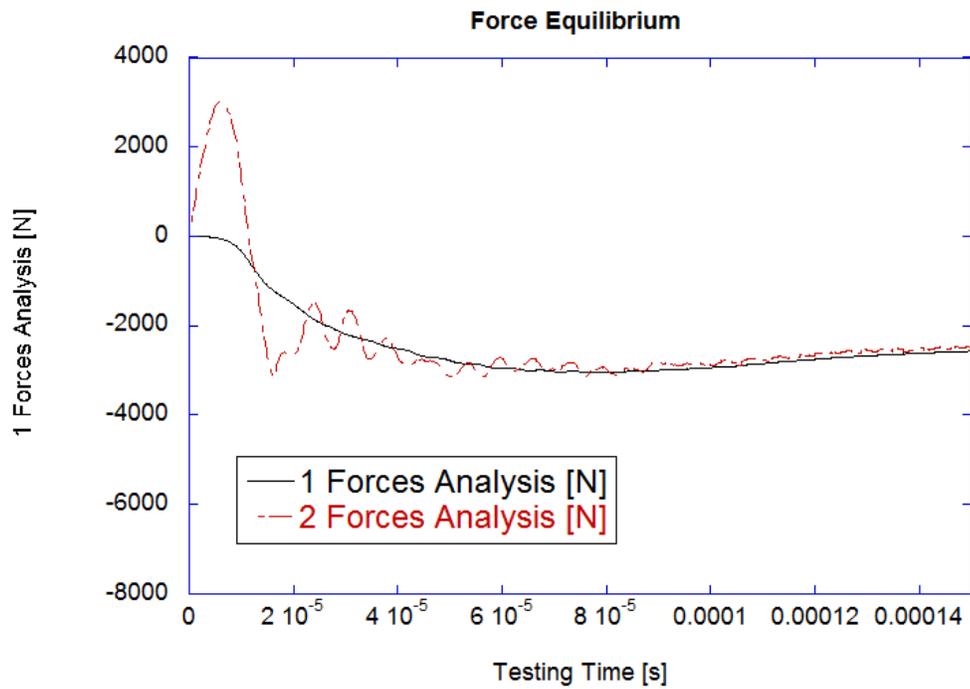


Figura H.47: Test 1 – Analisi dell’equilibrio dinamico durante il test

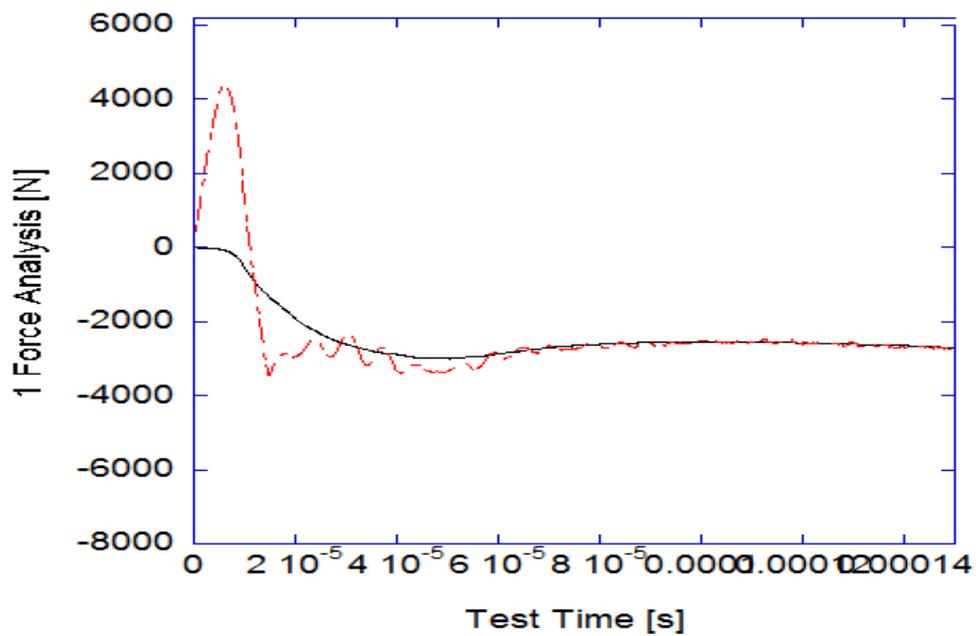


Figura H.48 : Test 2 – Analisi dell’equilibrio dinamico durante il test

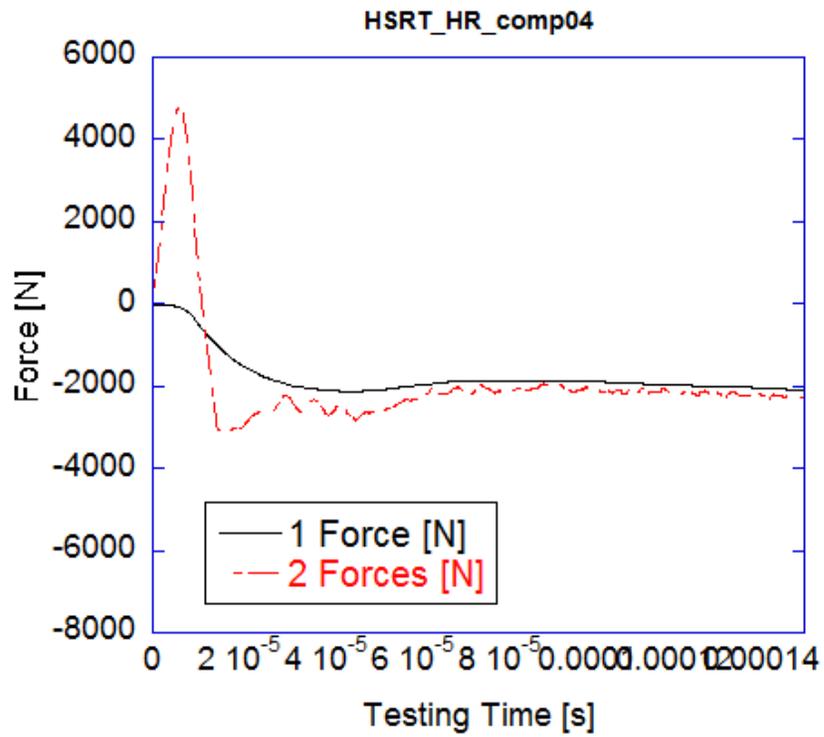


Figura H.49: Test 4 – Analisi dell'equilibrio dinamico durante il test

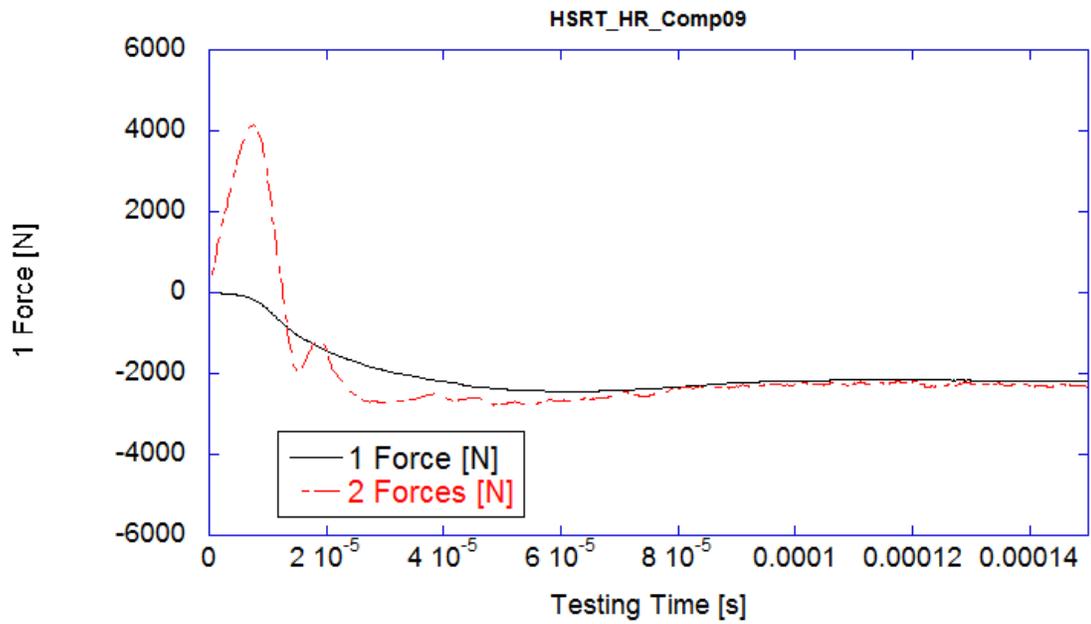


Figura H.50: Test 9 – Analisi dell'equilibrio dinamico durante il test

La caratterizzazione meccanica ad elevato strain rate della schiuma sintattica oggetto di interesse è stata effettuata utilizzando barre di input e di output di differente materiale.. Nello specifico si sono utilizzate una barra di input ed una barra di output rispettivamente in alluminio e magnesio AZM avente caratteristiche fisico/meccaniche identiche alla barra utilizzata per i test su Split Hopkinson Pressure Bar descritte nei paragrafi precedenti. Tale soluzione si è resa necessaria allo scopo di massimizzare la risposta in tensione rilevata dalla barra di output garantendo allo stesso tempo l'affidabilità del setup utilizzato. Le barre di input e di output di un apparato di tipo Split Hopkinson Tension Bar necessitano infatti, come è chiaro, della lavorazione di filettature interne per l'applicazione di provini la cui presenza fa sì che la sezione resistente delle barre sia notevolmente ridotta in corrispondenza delle connessioni delle due barre con il provino; sebbene tale riduzione nel caso in esame non costituisce alcun problema per quanto concerne la barra di output, essendo quest'ultima sottoposta a forze di bassa entità considerata la non elevata resistenza del materiale da caratterizzare, si è ritenuta necessaria una valutazione attenta delle tensioni cui è sottoposta la barra di input. Le tensioni cui è sottoposta la barra di input sono infatti prevalentemente connesse alla velocità di deformazione cui si vuole sottoporre il materiale e non alla resistenza di quest'ultimo. Tale valutazione ha portato a scegliere, come materiale costituente la barra di input, l'alluminio, essendo questo dotato di modulo di Young comunque ridotto ma di una resistenza certamente superiore a quella del magnesio.

La procedura di calcolo utilizzata allo scopo di verificare la resistenza, la sensibilità delle barre, il tempo necessario all'ottenimento dell'equilibrio lungo il provino e lo strain rate minimo da utilizzare durante i test può essere così schematizzata:

- Stima della tensione nominale di rottura attesa
- Ipotesi sulle dimensioni caratteristiche del provino da utilizzare e stima delle forze agenti su provino e barre
- Ipotesi sui materiali componenti le barre e sulle rispettive sezioni resistenti
- Valutazione della sensibilità della barra di output per le diverse configurazioni estensimetriche

- Determinazione delle caratteristiche fisiche e geometriche dell'impattore da utilizzare e della lunghezza temporale dell'onda di tensione da esso generata

$$t_{wave} = \frac{2l_{impattore}}{c_{impattore}} \quad (\text{A.25 bis})$$

- Stima della deformazione ultima cui è sottoposto il materiale e determinazione dello strain rate minimo cui occorre sottoporre il materiale per causarne la rottura quando quest'ultimo è sottoposto ad un'onda di tensione di estensione temporale pari a quella generata dall'impattore.
- Determinazione dell'ampiezza delle deformazioni causate dalle onde di tensione incidente e riflessa sulla barra di input
- Valutazione della sensibilità della barra di input per le diverse configurazioni estensimetriche
- Determinazione delle tensioni sulla barra di input e dell'incremento di queste ultime in corrispondenza del foro filettato di connessione con il provino
- Determinazione dell'impedenza meccanica della barra di connessione tra la gas gun e la barra di input ("*loading bar*") secondo la:

$$z = \rho c A \quad (\text{A.36 bis})$$

- Determinazione, in accordo alle caratteristiche fisiche e dimensionali ipotizzate, dell'impedenza meccanica della barra di input secondo la (A.36 bis)
- Determinazione delle tensioni cui è sottoposta la "*loading bar*" per effetto dell'urto con l'impattore

$$\sigma_{loading} = \left(\frac{z_{loading} + z_{input}}{2z_{input}} \right) \left(\frac{A_{input}}{A_{loading}} \right) \sigma_{input} \quad (\text{A.41 bis})$$

In cui $z_{loading}$ and z_{input} sono le impedenze meccaniche della “loading bar” e della barra di input rispettivamente ed A_{input} ed $A_{loading}$ sono le rispettive sezioni resistenti

- Determinazione della velocità da imporre all’impattore al fine di ottenere lo strain rate desiderato

$$V_{impattore} = \frac{2\sigma_{loading\ bar}}{\rho_{impattore}c_{impattore}} \quad (A.24\ bis)$$

- Stima del tempo di ottenimento dell’equilibrio dinamico lungo il provino e dei valori di deformazione a partire dai quali la caratteristica stress-strain determinata può ritenersi valida dal punto di vista sperimentale

$$t_{equilibrium} = \frac{\pi l_{specimen}}{\sqrt{\frac{e_{specimen}}{\rho_{specimen}}}} \quad (H.3)$$

$$\varepsilon_{equilibrium} = SR * t_{equilibrium} \quad (H.4)$$

In cui il simbolo ‘SR’ denota la velocità di deformazione cui è sottoposto il materiale

- Eventuale modifica delle caratteristiche geometriche e fisiche ipotizzate per le barre di input e di output e della geometria del provino da utilizzare sulla base dei valori determinati di tensione sulla barra di input, sensibilità della barra di output e tempo di ottenimento dell’equilibrio dinamico lungo il provino ed ulteriore verifica secondo la procedura di calcolo descritta

Si riportano di seguito le dimensioni e le caratteristiche meccaniche dell'impattore e delle barre di input e di output determinate secondo la procedura descritta, si rimanda all'appendice (APP_03 ed APP_06) per una rappresentazione geometrica dettagliata:

input bar (aluminium 7075-T6)

D [mm]	12,7
thickness [mm]	6,35
d [mm]	0
E [MPa]	71700
ν	0,33
Cross section area [mm ²]	126,6768698
density [kg/mm ³]	2,81E-06
Thread diameter [mm]	10
length [mm]	650

Tabella H.3: caratteristiche geometriche e fisiche della barra di output utilizzata (D = diametro esterno, E = modulo di Young, ν = coefficiente di Poisson, d = diametro interno)

output bar (magnesium AZM)

D [mm]	12,7
thickness [mm]	6,35
d [mm]	0
E [MPa]	44000
ν	0,35
Cross section area [mm ²]	126,6768698
density [kg/mm ³]	1,74E-06
length [mm]	1,00E+03

Tabella H.3: caratteristiche geometriche e fisiche della barra di output utilizzata (D = diametro esterno, E = modulo di Young, ν = coefficiente di Poisson, d = diametro interno)

Impactor	
length [mm]	250
wave length [s]	9,86E-05
rho (titanium) [kg/mm ³]	4,43E-06
E (Titanium) [MPa]	114000
c [mm/s]	5,07E+06

Tabella H.4: caratteristiche geometriche e fisiche dell'impattore utilizzato (E = modulo di Young, c = velocità longitudinale di propagazione delle onde)

Per quanto concerne la geometria del provino si è utilizzato un provino filettato a “osso di cane” caratterizzato da una gauge length pari a 4 mm e da una sezione retta in corrispondenza di quest'ultima di diametro nominale pari a 6 mm con raccordi con le estremità filettate di raggio pari a 3,5 mm (appendice: APP_02). La geometria scelta costituisce un buon compromesso tra la necessità di minimizzare la dimensione longitudinale del provino e permettere quindi il raggiungimento dell'equilibrio longitudinale in un tempo quanto più possibile ridotto ed il mantenimento di una zona centrale del provino ben definita.

Poiché l'impattore utilizzato è caratterizzato da una lunghezza minore di metà della lunghezza della barra di input non si presenta alcuna sovrapposizione tra le onde incidenti e riflessa sulla barra di input. Ciò ha fatto sì, non essendovi la necessità di utilizzare alcun algoritmo di separazione per le onde di tensione “alpha” e “beta”, che si potesse utilizzare una barra di input provvista di una sola stazione estensimetrica. Entrambe le postazioni di misura sulle due barre sono dotate di quattro estensimetri disposti in posizione longitudinale, equidistanti tra loro in direzione periferica e collegati secondo uno schema di collegamento a mezzo ponte opportunamente modificato in maniera tale che estensimetri collocati in posizione diametralmente opposta siano connessi in serie tra loro ed appartengano allo stesso ramo del ponte. Le coppie di estensimetri così formate sono collocate su rami opposti del ponte di Wheathstone. Tale

collegamento, pur non consentendo la compensazione delle deformazioni dovute alla temperatura (compensazioni non necessarie essendo la totalità dei testi effettuati a temperatura ambiente) consente la compensazione delle deformazioni dovuta ad una eventuale flessione delle barre.

Le sensibilità delle barre, e quindi i rispettivi fattori di calibrazione, possono essere determinate secondo l'equazione fondamentale dell'estensimetria elettrica per cui si ha:

$$V_{out} = \frac{V_{inp}}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) G = \frac{V_{inp}}{4} GF (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) G \quad (H.5)$$

In cui:

- V_{imp} = tensione di alimentazione
- V_{out} = tensione in uscita
- R_1, R_2, R_3, R_4 = resistenze in assenza di deformazione in corrispondenza dei singoli rami del ponte (240 Ω)
- $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$ = variazioni di resistenza in assenza di deformazione in corrispondenza dei singoli rami del ponte
- GF = gauge factor relativo alla tipologia di estensimetro utilizzato
- G = fattore di amplificazione utilizzato

Che, per il collegamento a mezzo ponte diviene:

$$V_{out} = \frac{V_{inp}}{4} GF (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) G \quad (H.6)$$

Per entrambe le barre si sono utilizzati estensimetri di dimensioni ridotte, nello specifico estensimetri FLK-1-23 prodotti dalla Tokyo Sokky Kenkyujo caratterizzati da un gauge factor pari a 2.17, da una resistenza pari a 12 Ω , da una lunghezza pari a 1 mm, da una larghezza pari a 0.7 mm e da lunghezza e larghezza del rivestimento rispettivamente pari

a 4.6 ed 1.4 mm. Si riportano di seguito i fattori di calibrazione e di amplificazione utilizzati:

- Input bar (fattore di amplificazione $G = 1000$)
 $V/N = 0.000124312 \text{ V/N}$
 $V/\text{Strain} = 1085 \text{ V}$
 $V_{\text{inp}} = 1 \text{ V}$
- Output Bar (fattore di amplificazione $G = 1000$)
 $V/N = 0.001098475 \text{ V/N}$
 $V/\text{Strain} = 6510 \text{ V}$
 $V_{\text{inp}} = 6 \text{ V}$

I valori così ottenuti sono stati successivamente verificati tramite la consueta procedura di calibrazione utilizzando la macchina elettro idraulica Zwick/Roell Z250 riscontrando valori analoghi, dal punto di vista ingeneristico, a quelli forniti dalla (H.6).

Le distanze tra la sezione provvista di estensimetri sulla barra di input ed il provino e tra l'interfaccia provino – barra di output e sezione provvista di estensimetri su quest'ultima valgono rispettivamente 322 mm 205 mm.

La necessità di utilizzare strain gauges di piccole dimensioni per test sperimentali su Split Hopkinson Bar è dettata dal fatto che la tensione in output di uno strain gauge tende a produrre in uscita una media integrata delle deformazioni unitarie imposte lungo la sua gauge length. Minore è il gradiente di deformazione unitaria lungo l'estensimetro, più vicina sarà la risposta fornita in output a alla deformazione unitaria effettivamente presente sulla barra. Nel caso speciale in cui la lunghezza dell'onda di tensione imposta sia uguale alla gauge length dell'estensimetro, il segnale prodotto dall'estensimetro risulta nullo mentre l'effettivo andamento delle deformazioni unitarie lungo la porzione di materiale oggetto di interesse non è affatto nullo. Ciò avviene ogni qual volta l'estensimetro presenta una lunghezza pari a un multiplo intero della lunghezza dell'onda di tensione imposta. Al diminuire della lunghezza d'onda imposta diminuisce

la capacità di risolvere i picchi di deformazione unitaria a cause dell'effetto di media prodotto dall'estensimetro lungo la sua lunghezza di misura. Il picco di deformazione unitaria viene, di conseguenza, sottostimato. Il diagramma in figura H.51 Illustra efficacemente la problematica esposta.

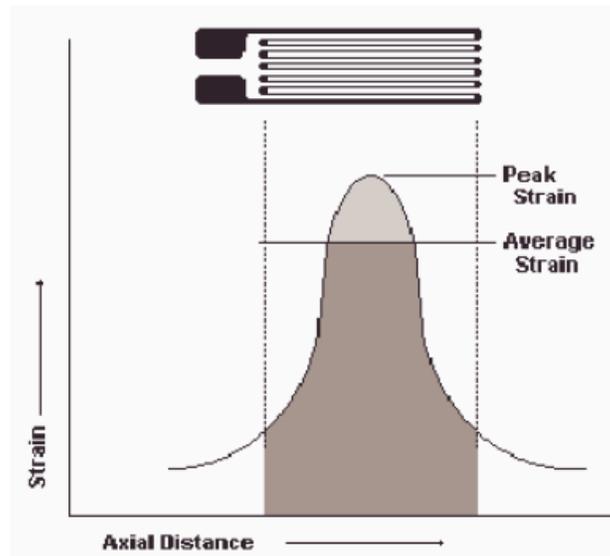


Figura H.51: effetto di media dell'estensimetro sul picco di deformazione unitaria effettivo

Si noti come più ripido è il gradiente, e quindi minore è la lunghezza d'onda, minore è il picco di deformazione unitaria che può essere risolto. Per onde armoniche che si propagano attraverso uno strain gauge il picco di deformazione unitaria rilevato si presenta sempre allorquando il picco di deformazione è centrato rispetto alla gauge length.

Durante un test ad elevata velocità di deformazione le barre sono soggette a rapide accelerazioni ed a carichi impulsivi di elevata entità. Ciò può portare a diverse problematiche connesse al setup degli estensimetri comprendenti:

- Distacco degli estensimetri durante gli esperimenti

- Rottura dei terminali degli strain gauges (mediamente ogni 3-10 test)
- Rottura dei cavi (normalmente ogni 10-20 test)
- Rottura delle saldature

Per evitare ciò, in accordo all'esperienza maturata presso l'Impact Engineering Lab dell'Università di Oxford si è utilizzata la seguente soluzione (illustrata in figura H.52) allo scopo di limitare le rotture tra un test ed i seguenti e, quindi, di migliorare l'efficienza di esecuzione dei test stessi:

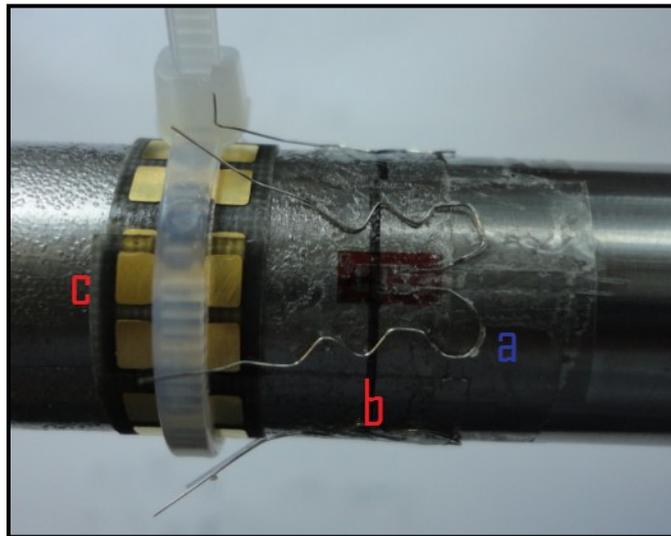


Figura H.52 – connessione di estensimetri e basette di saldatura alle barre

- a) I terminali degli estensimetri vengono piegati in maniera tale che per effetto dell'onda di tensione applicata la parte di questi ultimi che volge al rivestimento sia soggetta prevalentemente a compressione anziché a trazione

- b) La parte centrale dei terminali viene piegata in maniera alternata così da permettere ai terminali stessi di estendersi prima di risultare tesi per effetto dell'onda di tensione applicata
- c) Le basette di saldatura cui sono saldati i terminali degli strain gauges sono connesse alle barre attraverso nastro biadesivo. Tale soluzione permette alle basette una limitata traslazione in senso longitudinale qualora i terminali degli estensimetri risultino tesi limitando lo strappo degli stessi durante i test

I risultati ottenuti dai test sulla schiuma poliuretanica oggetto di studio, effettuati su Split Hopkinson Tension Bar in termini di tensione di picco e velocità di deformazione sono riassunti in tabella H.5:

Specimen #	diameter	length	strain rate	peak stress
[-]	[mm]	[mm]	[s ⁻¹]	[MPa]
2	6	4	6000	47
3	6	4	6000	63
5	6	4	5000	41
15	6	4	5500	53
17	6	4	5000	62
18	6	4	5000	56
16	6	4	5000	48
14	6	4	5000	58
13	6	4	5000	51
11	6	4	5000	44
7	6	4	5500	44
8	6	4	5500	50

Tabella H.5: : test in tensione ad elevata velocità di deformazione - tensione di picco in funzione dello strain rate

Come e' possibile notare dai risultati riportati le seppur lievi differenze in termini di velocità di deformazione non implicano alcuna differenza sostanziale sui risultati ottenuti in termini di tensione di picco. La dispersione dei risultati ottenuti e' inoltre, per

la particolare tipologia di materiale da caratterizzare, insita al regime di strain rate dei test effettuati.

In maniera analoga a quanto fatto per i test effettuati su SHPB, considerata la dispersione dei risultati ottenuti, si e' reputato rilevante effettuare un'analisi di tipo statistico della tensione di picco della schiuma sintattica oggetto di interesse facendo ricorso ancora una volta alla distribuzione statistica di Weibull.

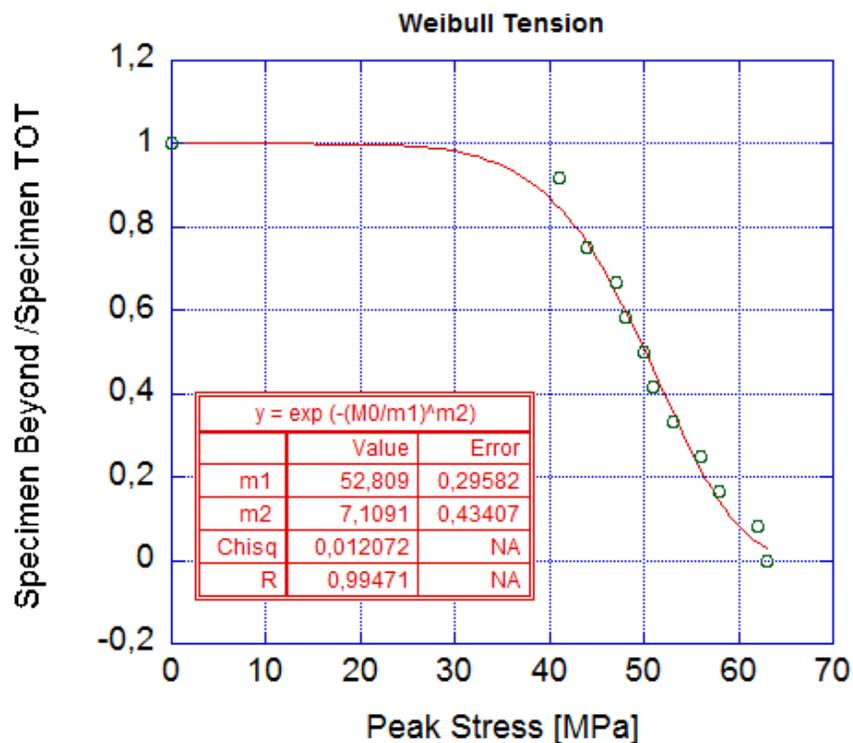


Figura H.53: test di tensione HR - distribuzione di Weibull della tensione di picco.

Il fitting dei dati rilevati attraverso la funzione di sopravvivenza di Weibull a due parametri risulta apprezzabile essendo il valore del coefficiente di fitting R pari superiore a 0,99.

Il parametro di scala m_1 risulta pari a 52 Mpa mentre il parametro di forma m_2 risulta uguale a circa 7,11 denotando una dispersione accettabile dei dati rilevati considerato il fatto che la schiuma oggetto di caratterizzazione è contraddistinta da una non completa omogeneità intrinseca alle modalità di produzione ed al differente diametro delle microsfere cave in vetro disperse all'interno della matrice polimerica.

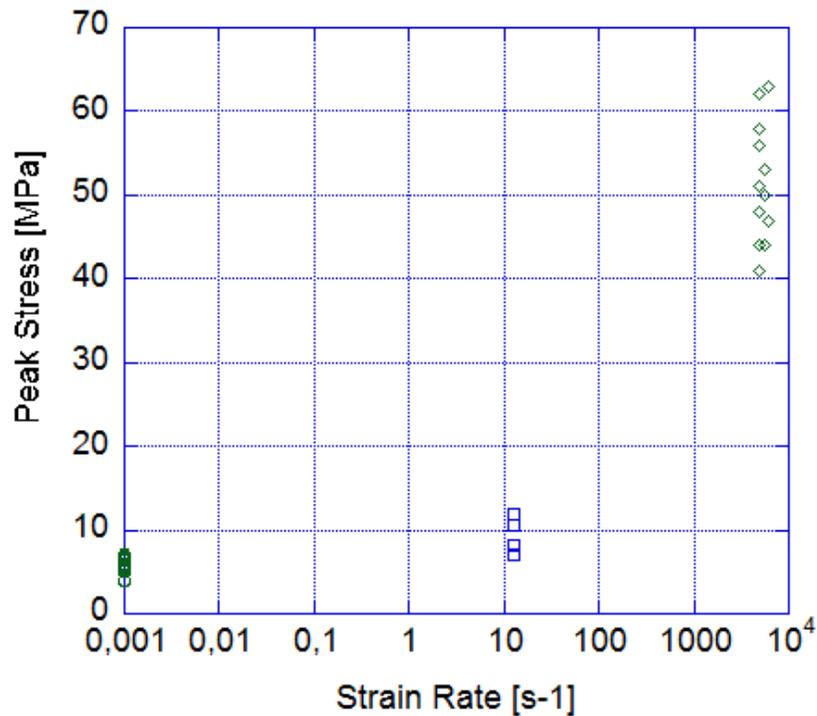


Figura H.54: influenza dello strain rate sulla tensione di picco

Le figure H.54 ed H.55 descrivono rispettivamente la variazione dello stress di picco al variare della velocità di deformazione e le curve caratteristiche engineering stress-engineering strain del materiale parametrizzate da quest'ultima. Come è possibile notare la resistenza del materiale risulta fortemente influenzata dallo strain rate con un incremento della tensione nominale di picco passando da uno strain rate di $1 \cdot 10^{-3}$ s-1 ad strain rate compresi tra 5000 e 6000 s-1 pari a circa il 500%. L'incremento di

resistenza del materiale risulta superiore a quello riscontrato nel caso di test su Hopkinson Bar effettuati in compressione; ciò è probabilmente dovuto sia all'incremento di strain rate a cui i test su Split Hopkinson Tension Bar sono stati effettuati, sia all'effetto maggiormente pronunciato che le microsfere cave in vetro disperse nel poliuretano potrebbero avere sullo strain rate locale all'interno della matrice.

Il brusco incremento della resistenza della schiuma in trazione si ha, come è possibile osservare in figura H.54 per strain rate approssimativamente compresi tra 10^3 e $2 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$

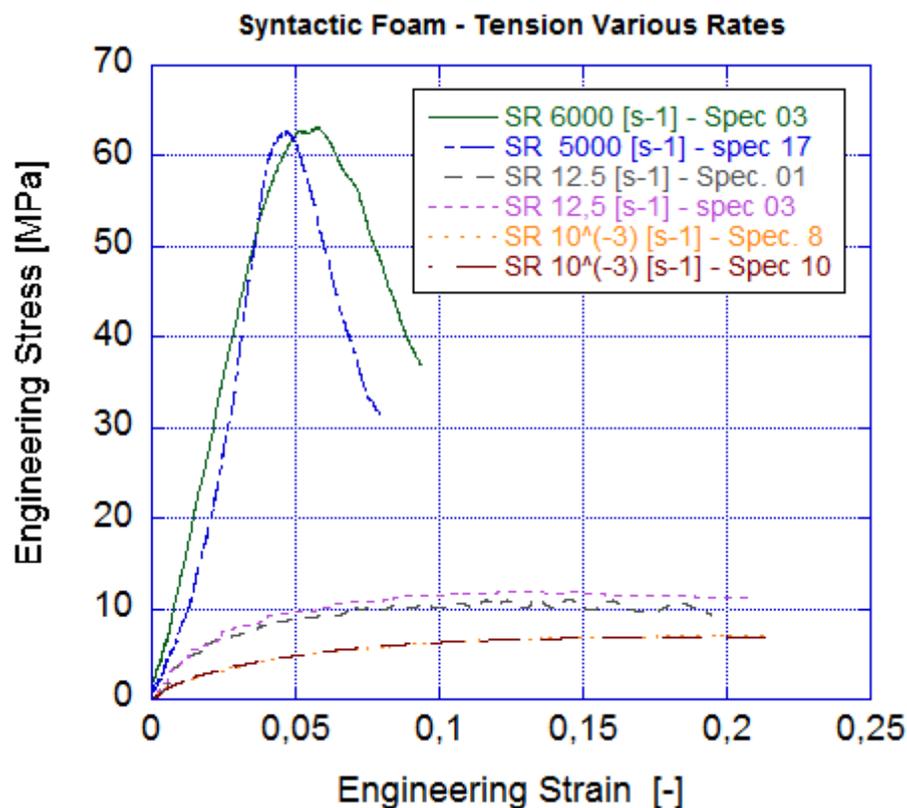


Figura H.55: caratteristica stress nominale – deformazione unitaria nominale della schiuma sintattica a matrice poliuretanicca caratterizzata per differenti regimi di velocità di deformazione

Inoltre, come e' possibile osservare in figura H.55, la rigidezza del materiale durante la fase elastica di deformazione presenta un decisivo incremento all'aumentare della velocità di deformazione. Di contro, la deformazione di rottura subisce una notevole diminuzione passando dal regime quasi statico di velocità di deformazione al regime dinamico caratterizzato da elevate velocità di deformazione unitaria.

L'effetto dello strain rate quindi, per la schiuma sintattica oggetto di studio influenza sia le proprietà elastiche che di resistenza del materiale. Come detto in precedenza L'effetto della velocità di deformazione sulla duttilità dei materiali si manifesta provocando una riduzione di quest'ultima al crescere dello strain rate. La deformazione ultima di rottura per test ad elevato strain rate si presenta infatti inferiore e per test dinamici piuttosto che per test quasi statici.

Si riportano, a titolo di esempio, le caratteristiche tensione - deformazione di due dei provini testati in tensione tramite Hopkinson Bar.

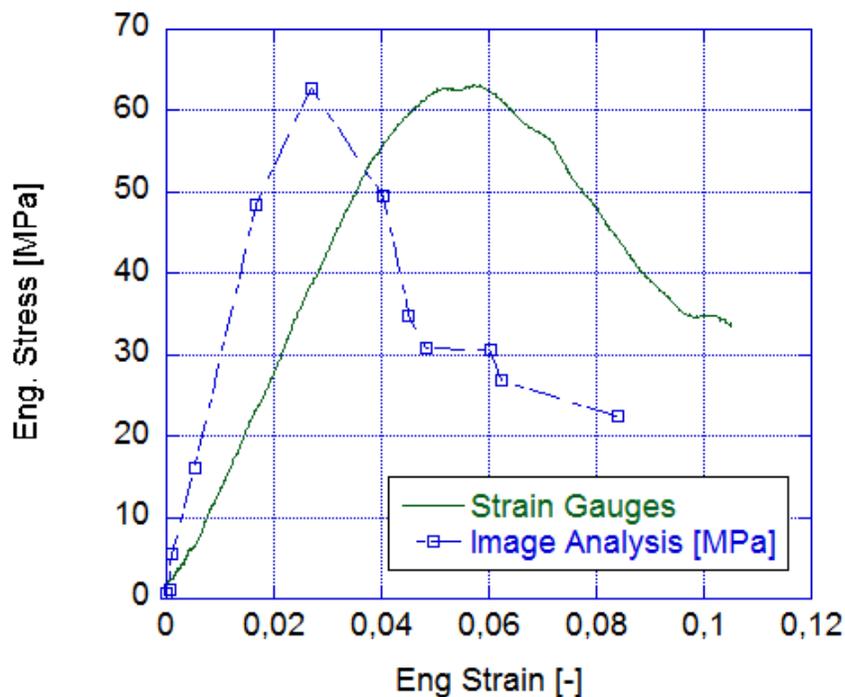


Figura H.56: Schiuma sintattica, caratteristica sforzo deformazione determinata su SHTB (Test 03)

Come e' possibile notare osservando la figura H 56 e le caratteristiche carico unitario deformazione ottenute tramite analisi delle immagini mostrano una deformazione minore se paragonate alle deformazioni ottenute semplicemente mediante elaborazione dei segnali provenienti dagli strain gauges. Ciò è dovuto al fatto che, come è possibile notare dai filmati ad elevato frame rate realizzati, la deformazione non ha effettivamente luogo soltanto lungo la gauge length del provino bensì lungo tutta l'estensione del provino stesso e quindi le deformazioni complessive ottenute attraverso l'analisi dei segnali elettrici provenienti dalle stazioni estensimetriche non sono da computare esclusivamente al tratto a sezione ridotta del provino. Ciò conferma come, nel caso di test in tensione ad elevato strain rate effettuati su schiume sintattiche, l'aver effettuato l'analisi delle immagini sia di fondamentale importanza e come le deformazioni effettive siano da considerare quelle ottenute mediante tale tecnica.



Figura H.57 – Schiuma sintattica: andamento dello strain rate determinato mediante SHTB

Per quanto concerne l'equilibrio delle forze attraverso il provino, il paragone tra le forze agenti in corrispondenza dell'interfaccia barra di input – provino e barra di output – provino determinate attraverso i segnali elettrici provenienti dagli estensimetri mostra il non completo raggiungimento dell'equilibrio, bensì l'oscillazione della forza agente in corrispondenza dell'interfaccia con la barra di input attorno alla forza determinata in corrispondenza della barra di output. Tuttavia, osservando le immagini registrate attraverso la telecamera ad elevato frame rate può notarsi come, per differenti provini testati, l'incipiente rottura si verifica in corrispondenza di più di una sezione lungo l'estensione del provino. E' possibile quindi ritenere che vi sia equilibrio dinamico durante i test effettuati e che l'ipotesi di omogeneità delle forze agenti lungo il provino risulta verificata a conferma della validità della caratterizzazione effettuata.

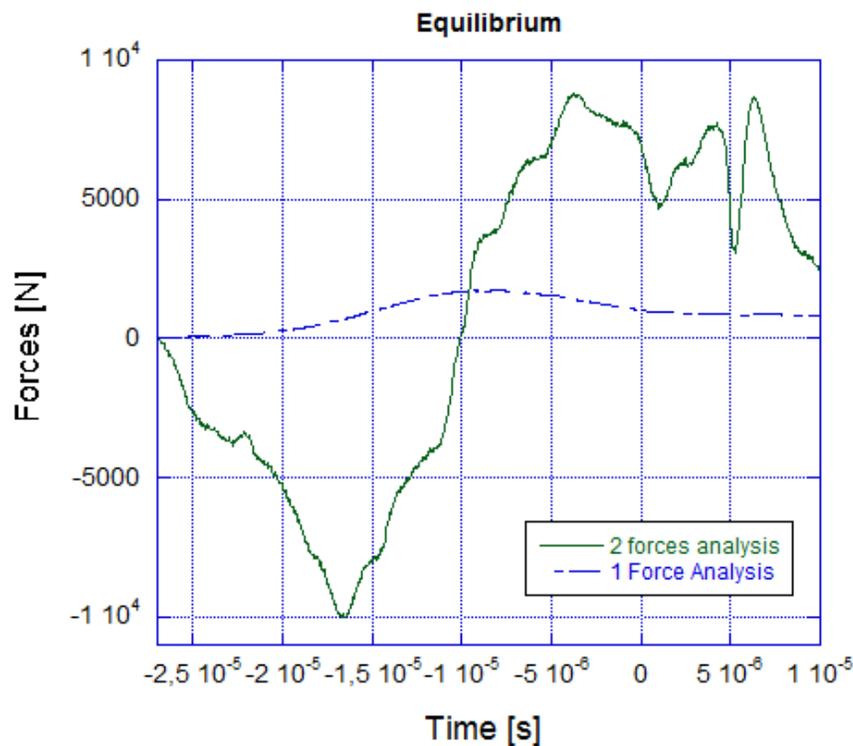


Figura H.58 Schiuma sintattica: – equilibrio delle forze durante un test su SHTB

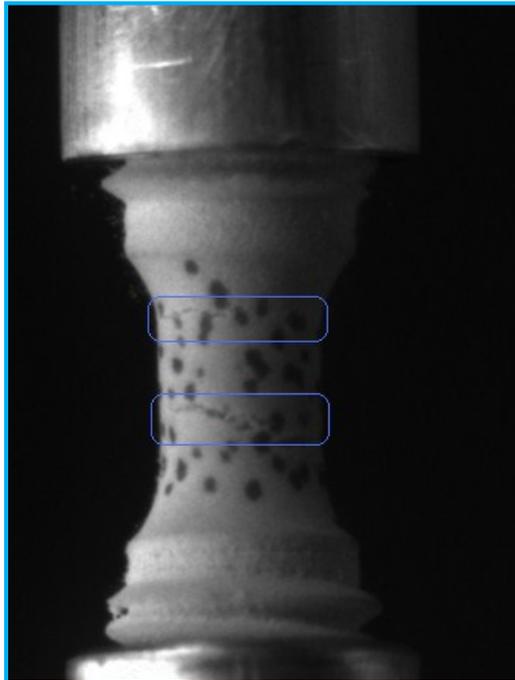


Figura H.59 Schiuma sintattica: – frattura multipla durante un test su SHTB

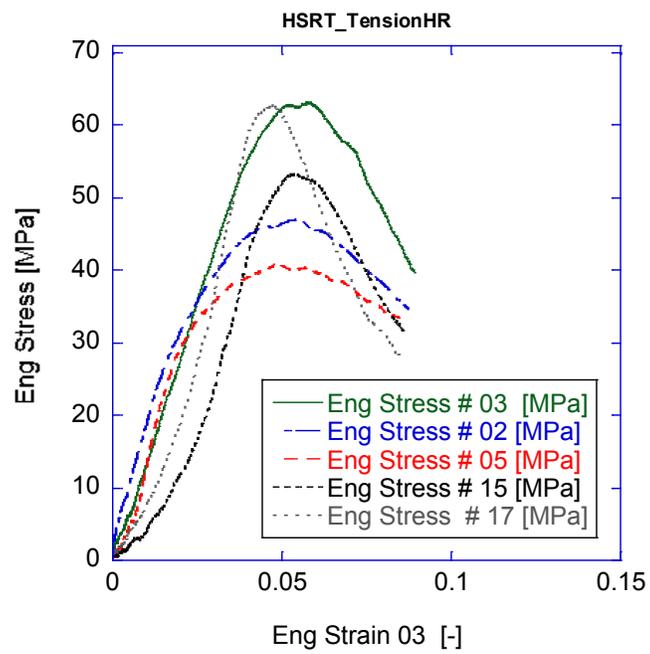


Figura H.60 Schiuma sintattica poliuretanic -

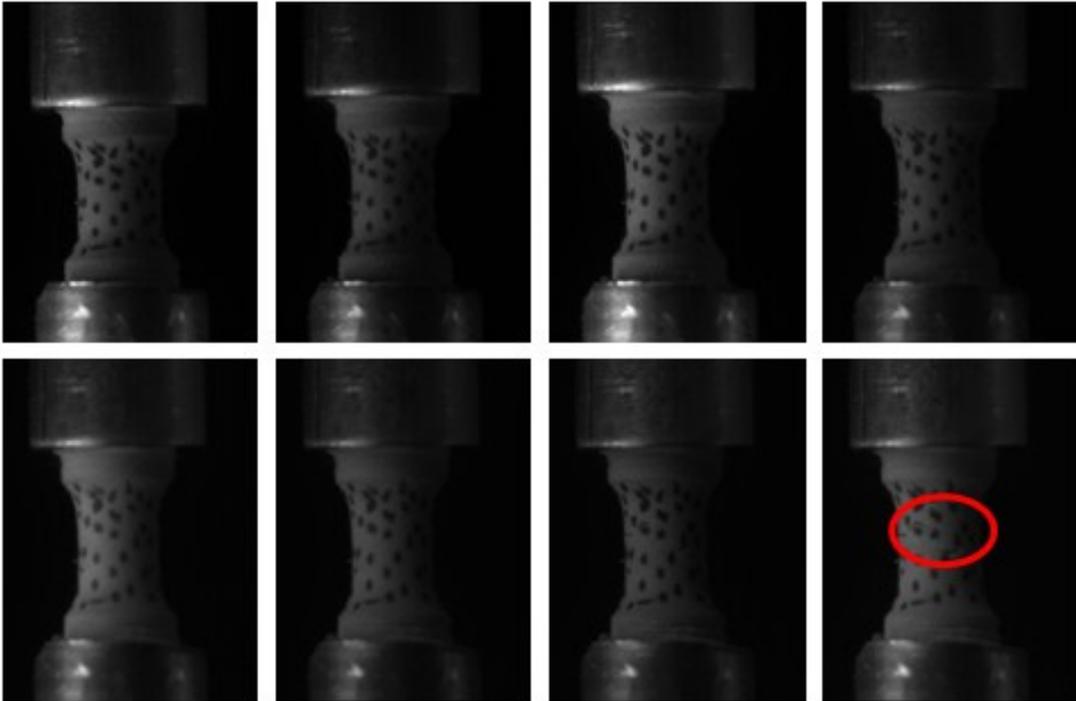


Figura H.61 Schiuma sintattica: – Sequenza fotografica di un test ad elevato strain rate (test 15) eseguito su SHTB, fotogrammi 1,4,8,10,12,14,15 e 16(dall’alto in basso e da sinistra a destra)