

### 5.3 Caratterizzazione di una lega di alluminio per applicazioni aerospaziali

Si riportano in questa sezione i risultati relativi ai test sperimentali effettuati in compressione ed in trazione a differenti strain rate su una lega di alluminio utilizzata per applicazioni aerospaziali.

I test in regime quasi statico sono stati effettuati su macchina servo idraulica Zwick Z250 utilizzando per i test in compressione una cella di carico da 20 KN ed ottica telecentrica per la registrazione delle immagini digitali registrate. I test in trazione sono stati eseguiti utilizzando la medesima cella di carico ma senza l'ausilio dell'analisi delle immagini essendo in trazione l'effetto di deformazione delle superfici di carico assente. Si sono determinate quindi le deformazioni utilizzando un estensometro laser misurando gli spostamenti relativi tra due superfici riflettenti poste lungo la gauge length di provini a "osso di cane".

La totalità dei test è stata eseguita ad uno strain rate pari a  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . I test in compressione sono stati eseguiti utilizzando provini cilindrici di diametro e lunghezza pari a 2.5 mm. Non essendo la lega di alluminio dotata di una resistenza tale da causare indentazione si sono utilizzate superfici di compressione composte di acciaio inossidabile anziché di carburo di tungsteno come fatto per i test su materiali ad elevatissima resistenza. I test in trazione sono stati eseguiti utilizzando provini cilindrici ad "osso di cane" caratterizzati da gauge length di lunghezza pari a 8 mm e diametro della sezione pari a 3 mm.

I test eseguiti in regime quasi statico eseguiti si presentano un'ottima ripetibilità. I valori del modulo di elasticità e delle tensioni di snervamento in tensione e compressione risultano rispettivamente pari a:

$$\sigma_{sn\_tension} = 380 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sn\_compression} = 400 \text{ MPa}$$

$$E = 70400 \text{ MPa}$$

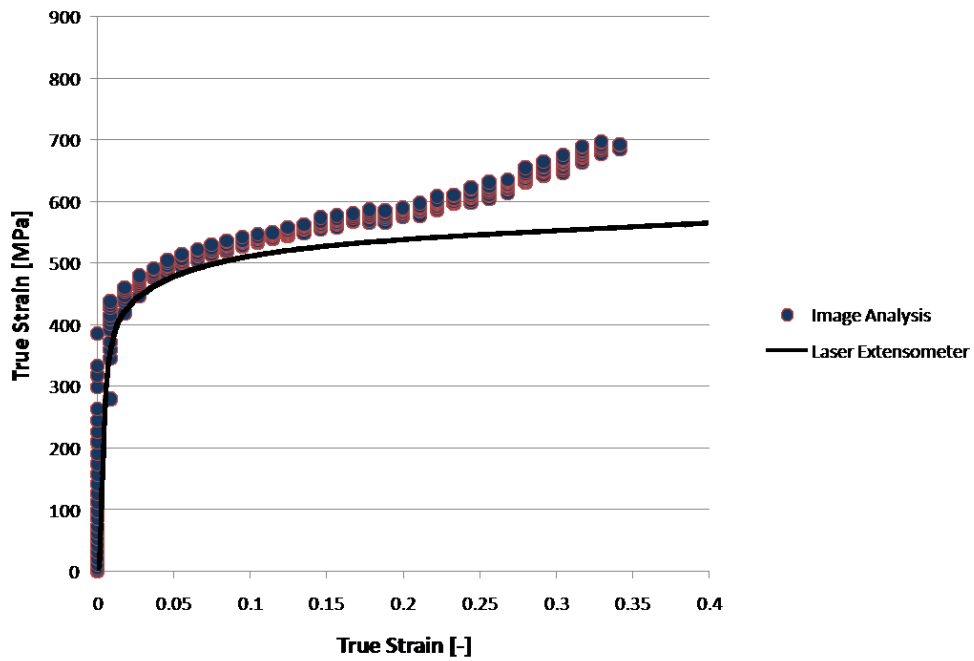


Figura M.17: caratteristiche tensione-deformazione in regime quasi statico per la lega di alluminio caratterizzata. Direzione di carico: compressione

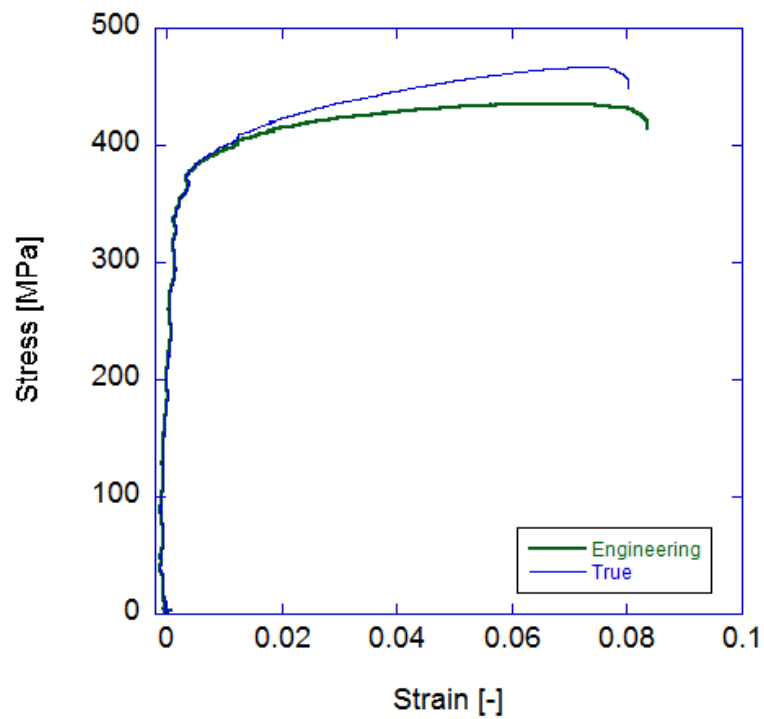


Figura M.18 caratteristiche tensione-deformazione in regime quasi statico per la lega di alluminio caratterizzata. Direzione di carico: tensione

La figura M.17 evidenzia, ancora una volta, la differenza tra la caratteristica del materiale con deformazioni determinate tramite estensimetro laser e la stessa curva determinata attraverso analisi delle immagini. Nel caso in esame, essendo le forze scambiate tra provino e piatti di compressione tali da non causare deformazioni elastiche sensibili fino allo snervamento, le due curve risultano praticamente sovrapponibili per buona parte della zona elastica mentre le differenze divengono via via più marcate al crescere della tensione a partire da valori maggiori di 500 MPa .

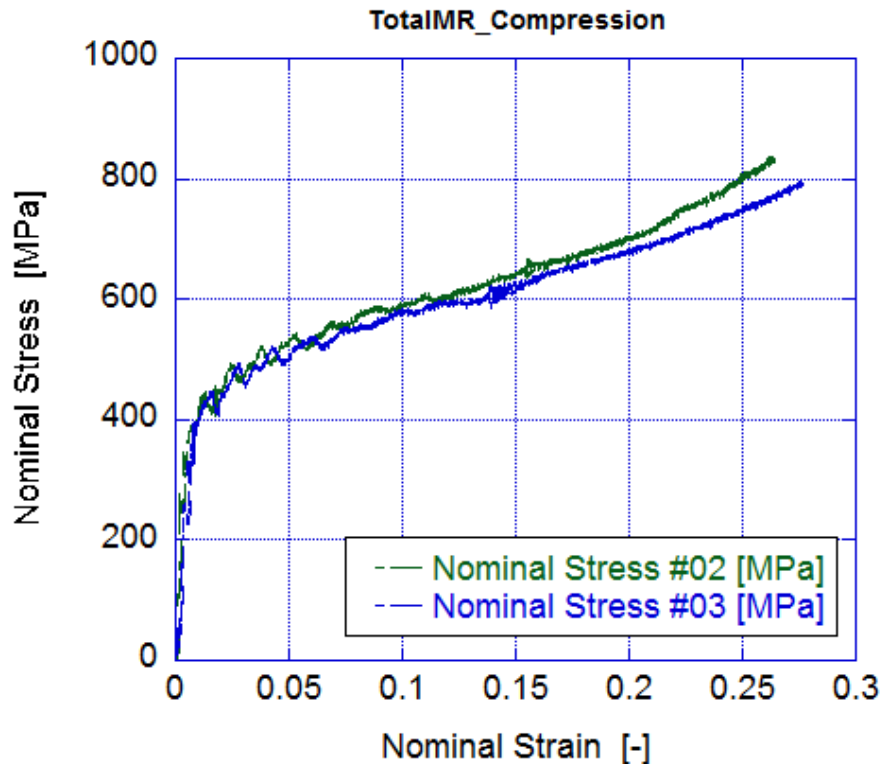
Per i test eseguiti a media velocità di deformazione si è utilizzato il consueto equipaggiamento descritto nei paragrafi precedenti. Si riportano di seguito i fattori di amplificazione e calibrazione relativi alla cella di carico utilizzata ed i parametri tempo e spostamento impostati alla centralina di controllo della macchina idraulica ad elevata velocità di spostamento per i test in trazione ed in compressione:

- fattore di amplificazione: 1000
- fattore di calibrazione:  $1,67 * 10^{-7}$  V/N
- spostamento compressione: 1 mm
- tempo di spostamento compressione: 30 ms
- spostamento trazione: 4 mm
- tempo di spostamento trazione: 50 ms

Per cui le gli strain rate impostati secondo le due direzioni di carico valgono, secondo la:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta l}{l} \frac{1}{t} \quad (\text{H.2bis})$$

(In cui  $\Delta l$  rappresenta lo spostamento imposto,  $l$  rappresenta l'estensione della gauge length e  $t$  il tempo in cui avvengono gli spostamenti) rispettivamente  $13.3 \text{ s}^{-1}$  per i test in compressione e  $10 \text{ s}^{-1}$  per i test in trazione (essendo  $l$  per i provini in trazione pari a 8 mm). Si sono utilizzati per i test a media velocità di deformazione provini analoghi a quelli utilizzati in regime quasi statico.

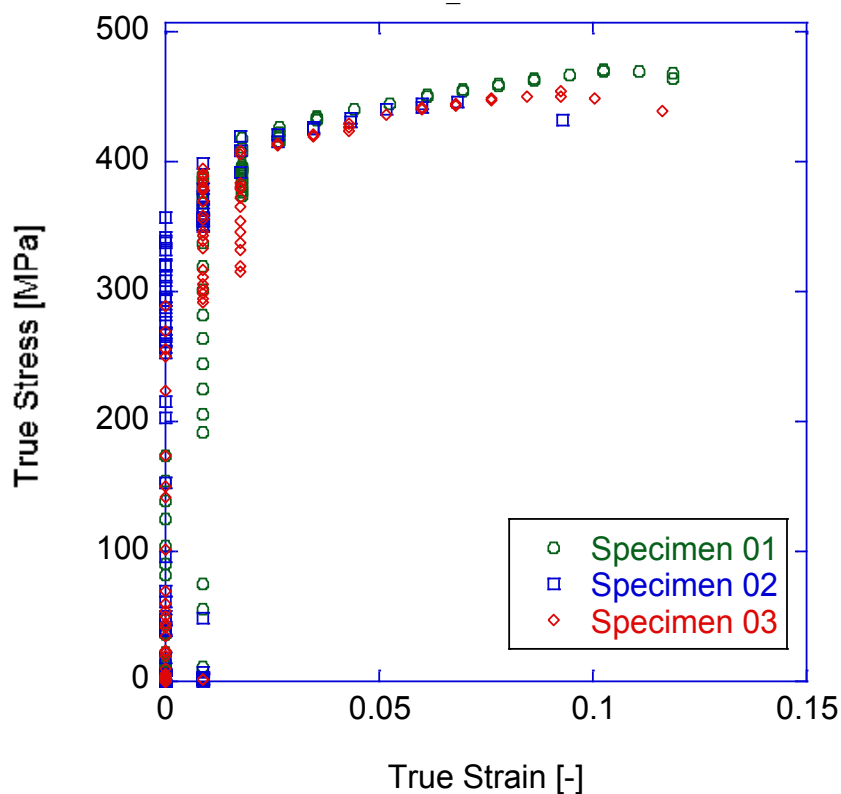


**Figura M.19 – caratteristiche tensione-deformazione a media velocità di deformazione per la lega di alluminio caratterizzata. Direzione di carico: compressione**

Come è possibile notare nelle figure M.19 ed M.20 le caratteristiche meccaniche in tensione e compressione determinate a media velocità di compressione presentano l'andamento tipicamente non regolare connesso ai problemi vibrazionali peculiari di tale regime di velocità di deformazione. Tuttavia si osserva come, sia in trazione che in compressione, la resistenza del materiale in termini di tensione di snervamento non risulta differente da quella determinata in condizioni quasi statiche.

Come è noto infatti, materiali che presentano struttura cubica a facce centrate come l'alluminio e le sue leghe presentano un comportamento quasi indipendente dallo strain rate sino alla tensione di snervamento per poi manifestare una eventuale dipendenza dalla velocità di deformazione nell'andamento della caratteristica

tensione deformazione per tensioni superiori allo snervamento. Tale dipendenza non risulta presente per il materiale considerato.



**Figura M.20 – caratteristiche tensione-deformazione a media velocità di deformazione per la lega di alluminio caratterizzata. direzione di carico: tensione**

I test ad elevato strain rate sono stati eseguiti su Hopkinson Bar utilizzando due barre di input ed output di diverso materiale entrambe sia in trazione che in compressione. Le barre utilizzate per i test in compressione sono dotate, all'interfaccia con il provino di inserti in carburo di tungsteno atti a limitare l'eventuale indentazione delle barre durante i test.

In particolare le barre di input e di output utilizzate in trazione e compressione presentano le seguenti caratteristiche:

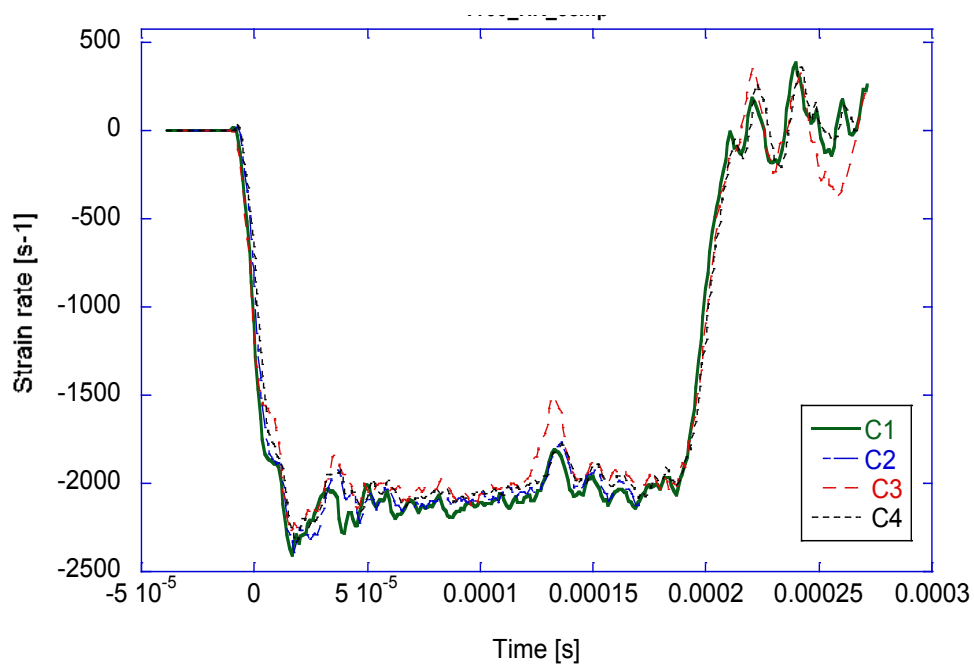
- 1) Split Hopkinson Pressure Bar

*Barra di input:*

- Materiale: titanio
- Diametro = 16 mm
- Densità =  $\rho_{inp} = 4430 \text{ kg/mm}^3$
- Velocità di propagazione delle onde di tensione (velocità del suono) =  $c_{inp} = 5070 \text{ m/s}$

*Barra di Output*

- Materiale: Bronzo fosforoso
- Diametro: 16 mm
- Densità =  $\rho_{out} = 8929,9 \text{ kg/mm}^3$
- Velocità di propagazione delle onde di tensione =  $c_{out} = 3628 \text{ m/s}$
- 



**Figura M.21: strain rate determinate durante i test eseguiti su Split Hopkinson Pressure Bar**

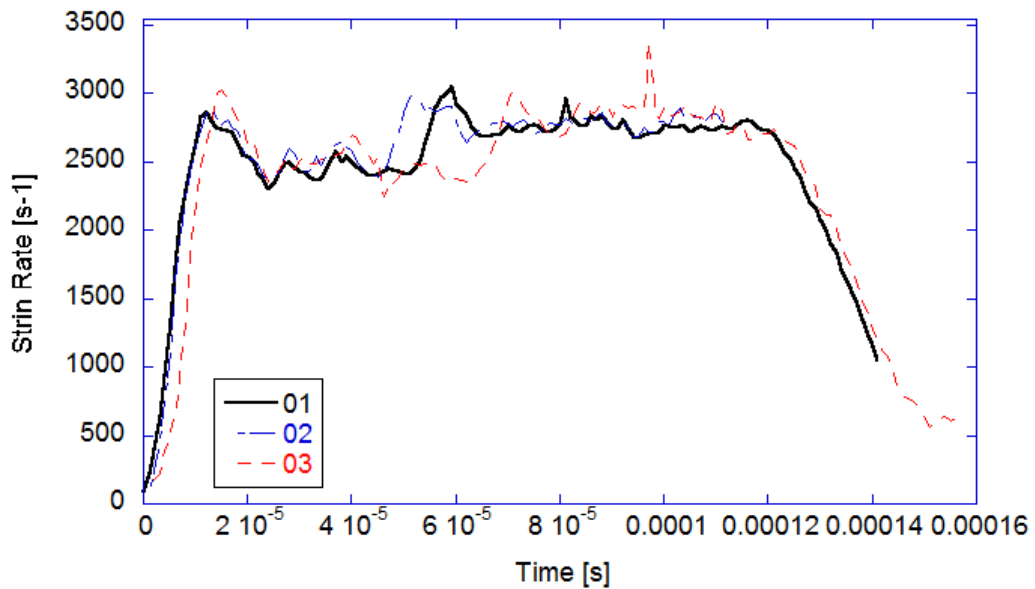
## 2) Split Hopkinson Tension Bar

*Barra di input:*

- Materiale: titanio
- Diametro = 10 mm
- Densità =  $\rho_{inp} = 4429,7 \text{ kg/mm}^3$
- Velocità di propagazione delle onde di tensione (velocità del suono) =  $c_{inp} = 5082,48 \text{ m/s}$

*Barra di Output*

- Materiale: Bronzo fosforoso
- Diametro: 10 mm
- Densità =  $\rho_{out} = 8920,9 \text{ kg/mm}^3$
- Velocità di propagazione delle onde di tensione =  $c_{out} = 3628 \text{ m/s}$



**Figura M.22: strain rate determinate durante i test eseguiti su Split Hopkinson Tension Bar**

Sia i test in trazione che quelli in compressione sono stati eseguiti impiegando barre di input dotate di due sezioni strumentate ciascuna, allo scopo di permettere il disaccoppiamento delle onde incidente e riflessa parzialmente sovrapposte e la determinazione di forze e spostamenti sul provino secondo le (C.19) e (C.20).

Si riportano di seguito, i fattori di amplificazione e di calibrazione delle tre sezioni strumentate sper entrambe le SHPB a SHTB utilizzate così come le distanze dal provino delle stesse:

#### 1) Split Hopkinson Pressure Bar

*Barra di input :*

- Distanza sezione strumentata #1 rispetto al provino = 0,46297 m
- Fattore di calibrazione sezione strumentata #1 =  $-2.75203 \cdot 10^{-6}$  V/N
- Fattore di amplificazione sezione strumentata #1 = 20
- Distanza sezione strumentata #2 rispetto al provino = 0,1188 m
- Fattore di calibrazione sezione strumentata #2 =  $-2.75724 \cdot 10^{-6}$  V/N
- Fattore di amplificazione sezione strumentata #2 = 20

*Barra di output :*

- Distanza sezione strumentata #3 rispetto al provino = 0,12047 m
- Fattore di calibrazione sezione strumentata #3 =  $-2.73145 \cdot 10^{-6}$  V/N
- Fattore di amplificazione sezione strumentata #3 = 50

#### 2) Split Hopkinson Tension Bar

*Barra di input :*

- Distanza sezione strumentata #1 rispetto al provino = 0,6208 m
- Fattore di calibrazione sezione strumentata #1 =  $7.338 \cdot 10^{-6}$  V/N
- Fattore di amplificazione sezione strumentata #1 = 20
- Distanza sezione strumentata #2 rispetto al provino = 0,1016 m
- Fattore di calibrazione sezione strumentata #2 =  $7.3622$  V/N
- Fattore di amplificazione sezione strumentata #2 = 20



*Barra di output :*

- Distanza sezione strumentata #3 rispetto al provino = 0,09852 m
- Fattore di calibrazione sezione strumentata #3 =  $7.002 \cdot 10^{-6}$  V/N
- Fattore di amplificazione sezione strumentata #3 = 50

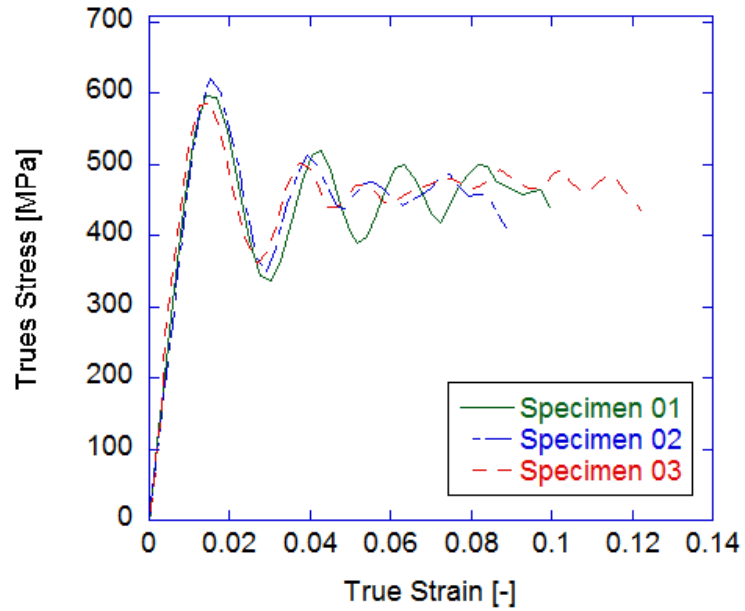
L'amplificatore utilizzato per la totalità dei test eseguiti è il condizionatore di segnali ad elevata frequenza di acquisizione FYLDE H375TA. Per i test eseguiti su SHTP si sono utilizzati provini cilindrici con geometria a "osso di cane" aventi gauge length pari a 8 mm e diametro della sezione retta in corrispondenza di quest'ultima pari a 3 mm. Si rimanda all'appendice (APP\_04) per una descrizione completa dei provini impiegati. I test su SHPB sono stati eseguiti su provini cilindrici di lunghezza e diametro pari a 2.5 mm.

Le figure M.21 ed M.22 illustrano la velocità di deformazione ottenuta durante i test eseguiti rispettivamente su barra di Hopkinson in compressione ed in trazione. Come è possibile osservare le velocità di deformazione oscillano attorno ai  $2000 \text{ s}^{-1}$  nel caso dei test effettuati in compressione ed attorno ai  $2700 \text{ s}^{-1}$  nel caso dei test effettuati in trazione. La buona costanza dei valori di strain rate ottenuti denota il raggiungimento delle condizioni di equilibrio dinamico lungo il provino.

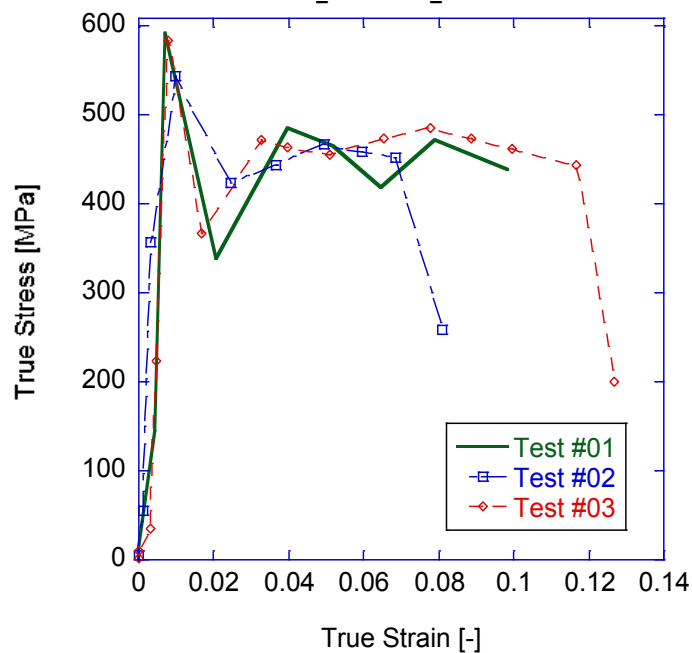
Come è possibile notare comparando le figure M.24 ed M.25 e le figure M.27 ed M.28 si ha una buona congruenza tra le caratteristiche meccaniche determinate mediante elaborazione dei segnali elettrici provenienti da strain gauges e tra le caratteristiche meccaniche determinata attraverso l'analisi delle immagini catturate mediante telecamera ad elevato frame rate. Tale congruenza denota una effettiva concentrazione delle deformazioni lungo la gauge length. Le deformazioni in corrispondenza della frattura per i test di trazione risultano comprese tra il 9 % ed il 13 % con una tensione di picco oscillante attorno i 450 MPa. La tensione massima in compressione oscilla attorno i 55° MPa.

Infine, come è possibile osservare nelle figure M.25 ed M.29 in cui si sono sovrapposte le curve ottenute in regime quasi statico e ad elevata velocità di deformazione per i test in compressione ed in trazione non è presente alcuna

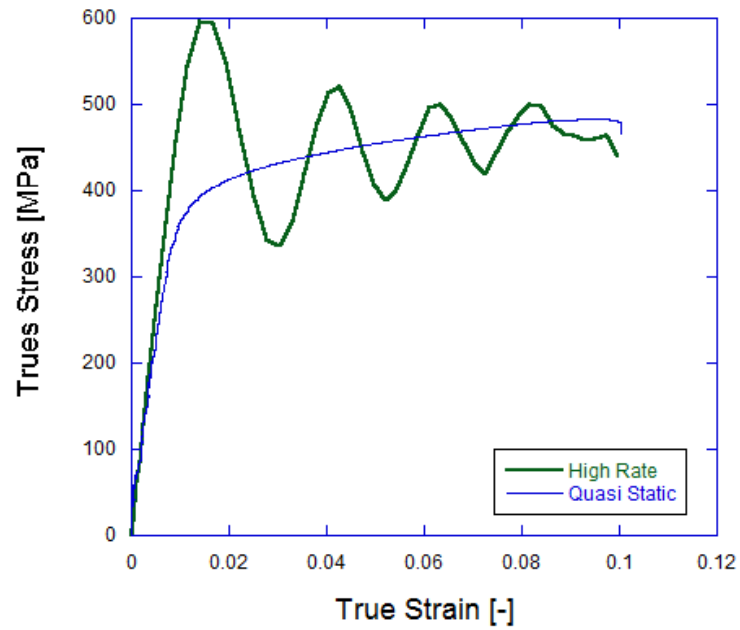
dipendenza della resistenza della lega di alluminio oggetto di interesse dalla velocità di deformazione.



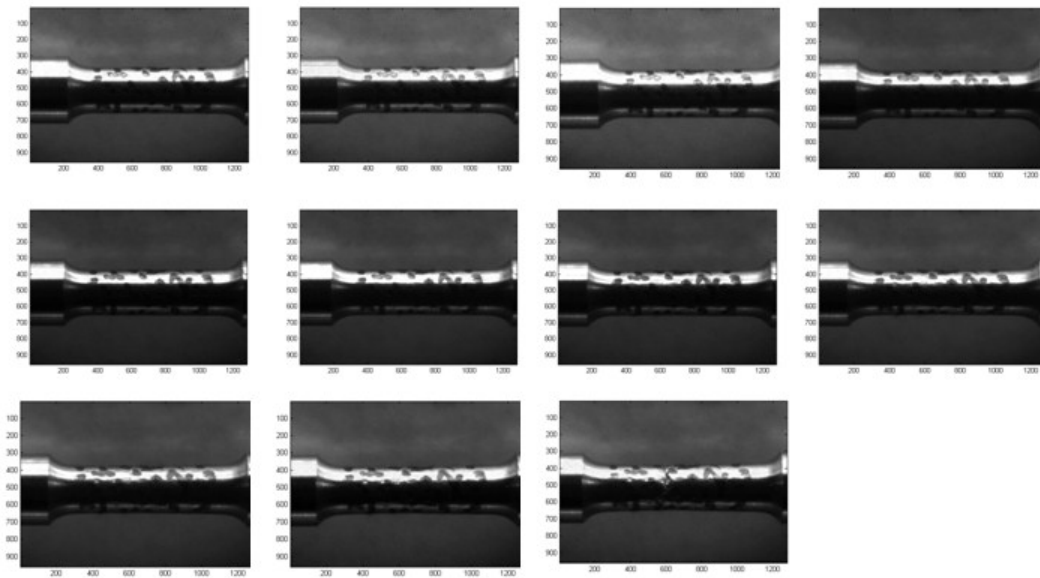
**Figura M.23:** curva caratteristica della di alluminio oggetto di interesse determinata attraverso i segnali provenienti da estensimetri (direzione di carico: tensione)



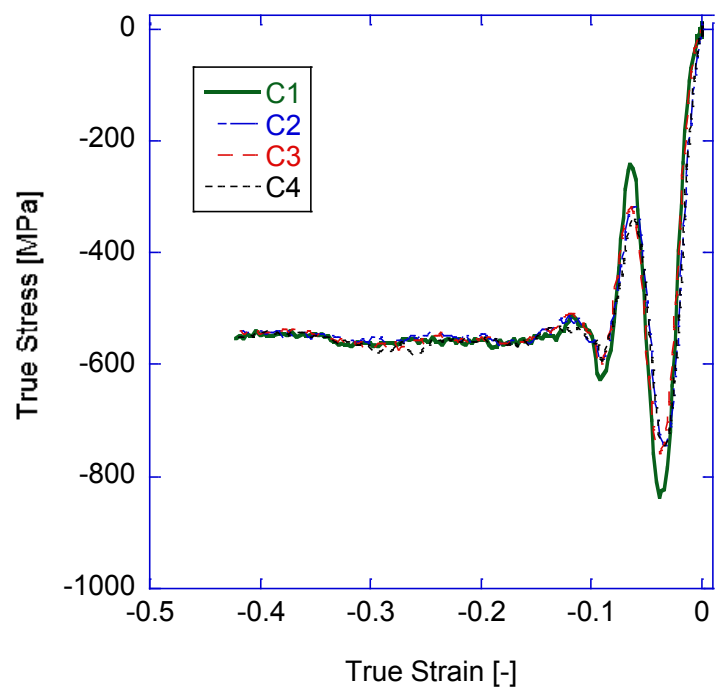
**Figura M.24:** curva caratteristica della lega di alluminio oggetto di interesse determinata attraverso analisi delle immagini (direzione di carico: tensione)



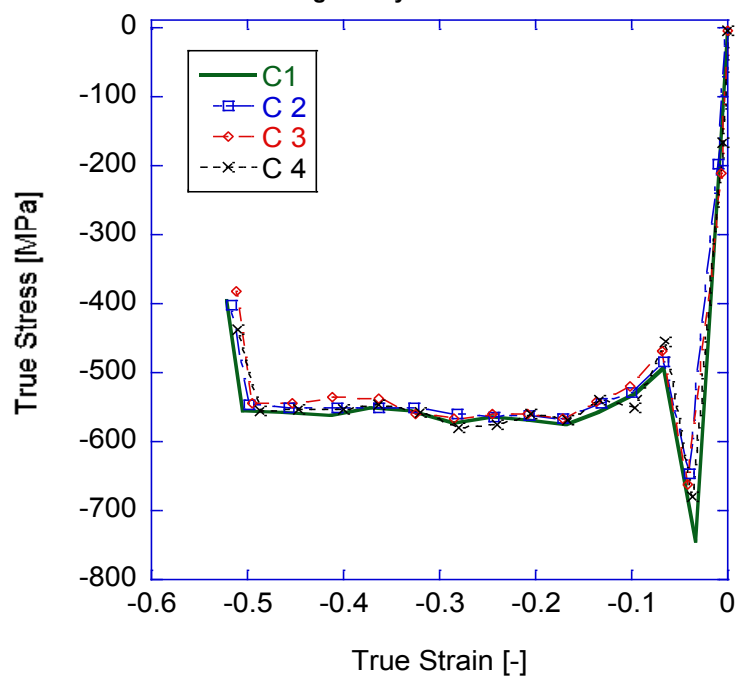
**Figura M.25: influenza della velocità di deformazione sulle meccaniche della di alluminio  
oggetto di caratterizzazione (direzione di carico: tensione)**



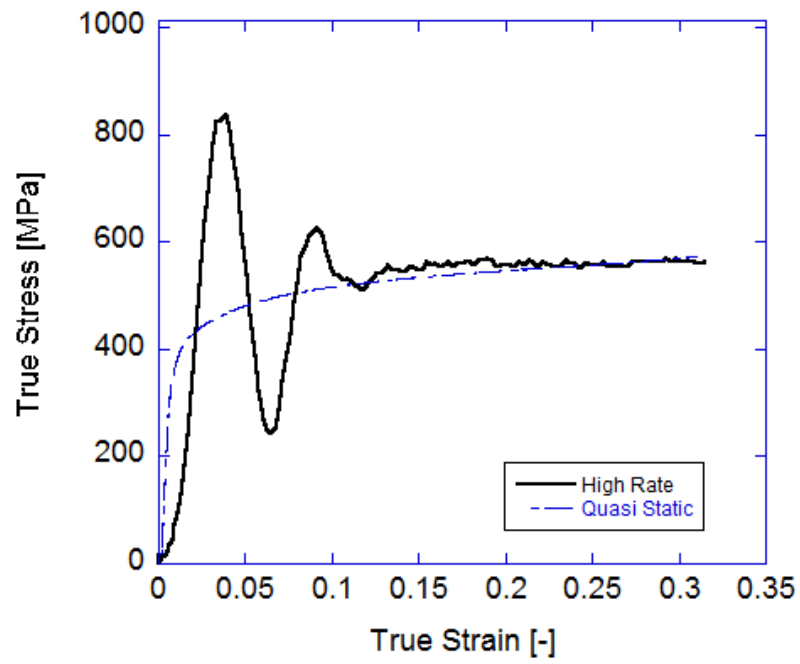
**Figura M.26: sequenza fotografica registrata tramite telecamera ad elevato frame rate durante  
test eseguito su SHTB su lega di alluminio**



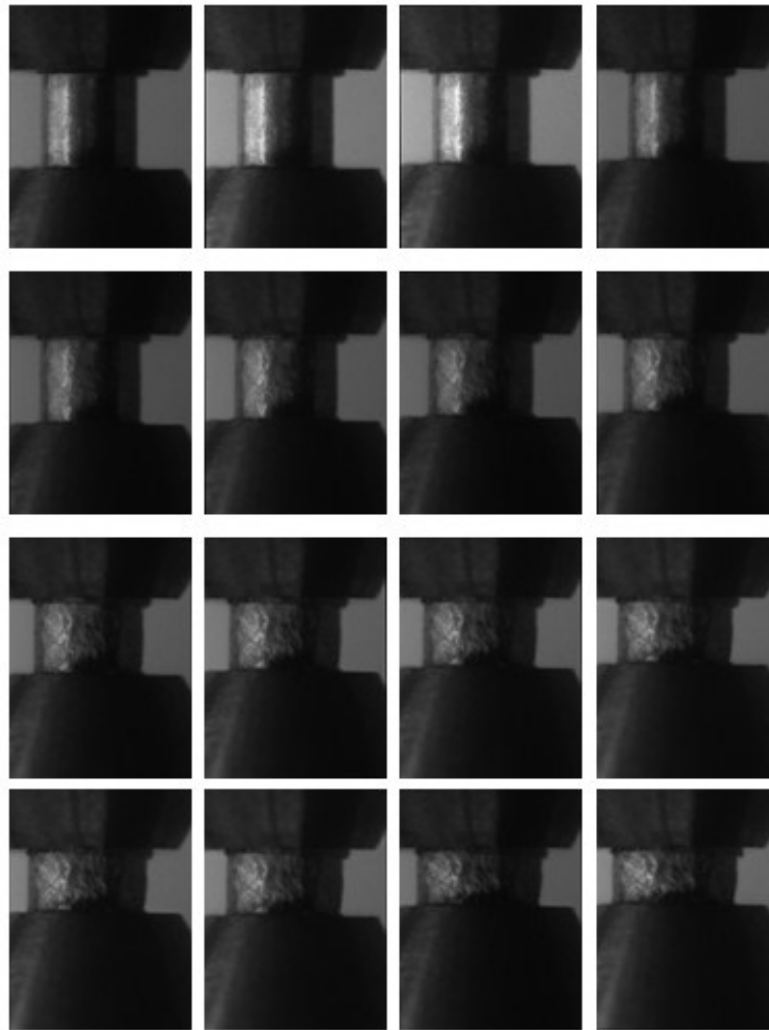
**Figura M.27:** curva caratteristica della di alluminio oggetto di interesse determinata attraverso i segnali provenienti da estensimetri (direzione di carico: compressione)



**Figura M.28:** curva caratteristica della lega di alluminio oggetto di interesse determinata attraverso analisi delle immagini (direzione di carico: compressione)



**Figura M.29: influenza della velocità di deformazione sulle meccaniche della lega cromo – molibdeno - vanadio oggetto di caratterizzazione (direzione di carico:compressione)**



**Figura M.30: sequenza fotografica registrata tramite telecamera ad elevato frame rate durante test eseguito su SHPB su lega di alluminio**