

5.2 Caratterizzazione di un acciaio legato al cromo molibdeno vanadio per applicazioni aeronautiche

Si riportano, in questa sezione i risultati relativi ai test sperimentali effettuati in compressione su un acciaio legato al Cromo Molibdeno Vanadio caratterizzato da elevate caratteristiche di resistenza.

Come visto nel paragrafo precedente in cui si sono riportati i risultati in regime quasi statico effettuati su inconel e su una lega di titanio, anche in questo caso risulta necessario, per una corretta individuazione delle caratteristiche di resistenza ed elastiche del materiale il ricorso alla tecnica di correlazione digitale delle immagini anche in regime quasi statico.

La figura M.10 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.

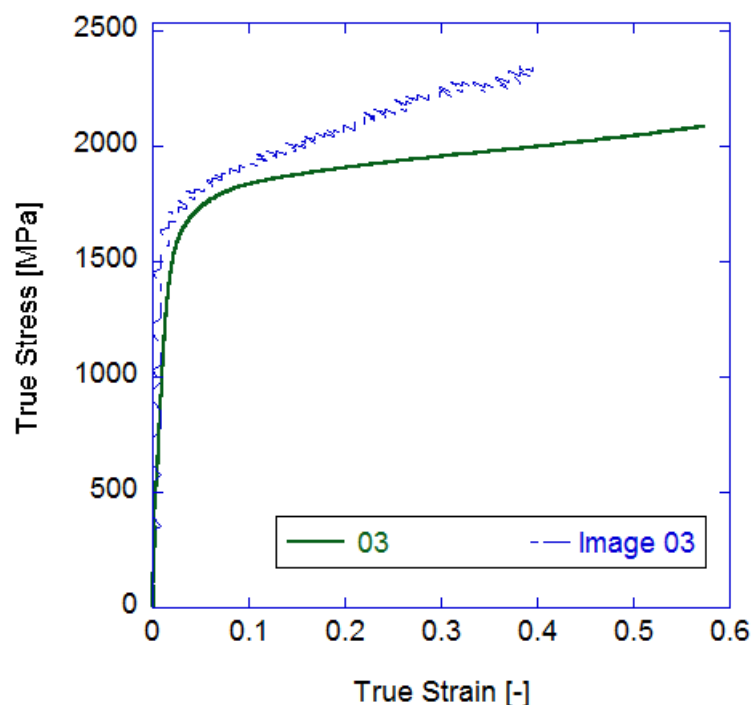


Figura M.10: caratteristiche stress strain ottenute attraverso estensimetro laser ed attraverso ottica telecentrica per l' acciaio legato al cromo molibdeno vanadio oggetto di interesse

I test in regime quasi statico sono stati effettuati su macchina servo idraulica Zwick Z250 utilizzando una cella di carico da 20 KN ed ottica telecentrica per la registrazione delle immagini digitali. La totalità dei test è stata eseguita ad uno strain rate pari a 10^{-3} s^{-1} su provini cilindrici lunghezza e diametro pari a 2.5 mm utilizzando superfici di compressione composta di carburo di tungsteno (modulo elastico pari a 420 GPa).

I test eseguiti in regime quasi statico eseguiti si presentano perfettamente ripetibili. I valori della tensione di snervamento e del modulo elastico risultano:

$$\sigma_{sn} = 1650 \text{ MPa}$$

$$E = 295000 \text{ MPa}$$

Per i test effettuati a media velocità di deformazione si è utilizzato un equipaggiamento composto da:

- Macchina servo idraulica ad elevata velocità con capacità di carico fino a circa 20 KN
- Faretti di illuminazione
- Talecamera ad elevato frame rate Vision Reserch Phantom caratterizzata da un frame rate massimo pari a 10670 fps
- Centralina di controllo della macchina idraulica utilizzata
- Cella di carico ad elevata sensibilità connessa alla macchina idraulica
- Amplificatore ad elevata frequenza di acquisizione
- Oscilloscopio

La cella di carico utilizzata è caratterizzata dai seguenti fattori di calibrazione ed amplificazione:

- fattore di amplificazione: 1000
- fattore di calibrazione: $1,67 * 10^{-7} \text{ V/N}$

Si sono utilizzati provini analoghi a quelli utilizzati in regime quasi statico, ovvero cilindrici di lunghezza e diametro pari a 2.5 mm.

I parametri dinamici tempo e spostamento imposti alla centralina di controllo della macchina idraulica valgono rispettivamente:

- spostamento compressione: 1 mm
- tempo di spostamento compressione: 40 ms

Per cui lo strain rate impostato vale, secondo la (H.2bis)

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

(In cui Δl rappresenta lo spostamento imposto, l rappresenta l'estensione della gauge length e t il tempo in cui avvengono gli spostamenti) $10,42 \text{ s}^{-1}$.

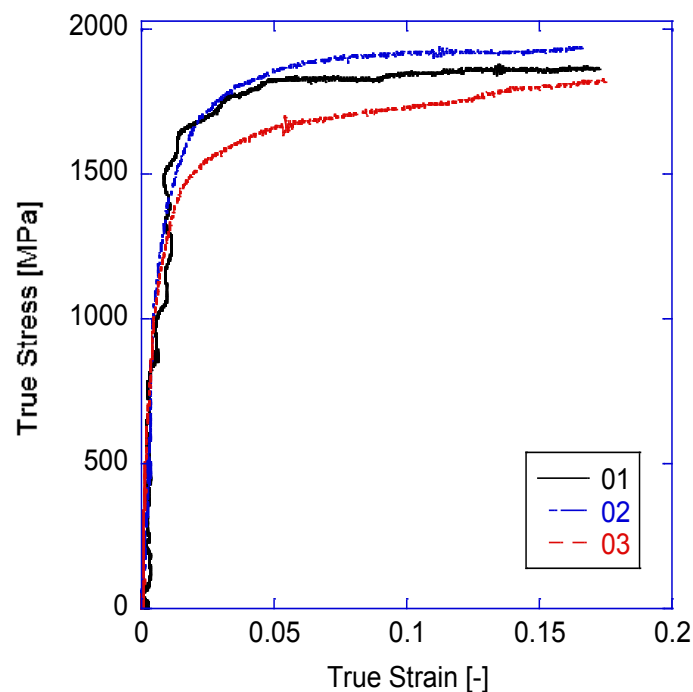


Figura M.11 : caratteristiche stress strain a media velocità deformazione di un acciaio legato al cromo molibdeno vanadio per applicazioni aerospaziali

Come è possibile osservare in figura M.11 le curve tensione-deformazione ottenute sono caratterizzate da un andamento non perfettamente regolare, dovuto alle vibrazioni cui la macchina di prova idraulica è soggetta durante il funzionamento. Tuttavia esaminando i dati riportati si può osservare come la resistenza del materiale risulta invariata alle medie velocità di deformazione, essendo il carico unitario di snervamento pari a circa 1650 MPa e la deformazione corrispondente a quest'ultimo pari a circa 0,005.

I test ad elevata velocità di deformazione sono stati eseguiti su Split Hopkinson Pressure Bar utilizzando due barre di diverso materiale entrambe dotate, all'interfaccia con il provino di superfici di pressione in carburo di tungsteno allo scopo di minimizzare l'indentazione che si verifica durante test eseguiti su materiali particolarmente tenaci quali la lega oggetto di interesse o materiali ceramici.

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

Barra di input:

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

Barra di Output

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

Entrambe le barre di input e di output sono dotate di sezioni strumentate composte di quattro estensimetri ciascuna, in cui questi sono in posizione longitudinale, equidistanti tra loro in senso periferico 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.

La barra di input è dotata di due sezioni strumentate così costituite. Ciò risulta necessario in quanto l'impattore utilizzato (impattore in titanio di lunghezza pari a 350 mm) genera in corrispondenza della barra di input un'onda di pressione di lunghezza maggiore a quella della barra stessa, causando la sovrapposizione parziale delle onde incidente e riflessa. L'utilizzo di due sezioni estensimetriche permette il disaccoppiamento delle onde incidente e riflessa (onde “*alpha*” e “*beta*”) e la determinazione delle forze e degli spostamenti imposti al provino secondo le (C.19) e (C.20) che qui si riportano per completezza:

$$\begin{aligned}\Delta u(t) &= u(x_{MAX}^{INP}, t) - u(x_{MIN}^{OUT}, t) = \\ &= \int_0^T v(x_{MAX}^{INP}, t) dt - \int_0^T v(x_{MIN}^{OUT}, t) dt = \\ &= \int_0^T \frac{\beta(x_{MAX}^{INP}, t) - \alpha(x_{MAX}^{INP}, t)}{\rho_{inp} c_{inp}} dt - \int_0^T \frac{\beta(x_{MIN}^{OUT}, t) - \alpha(x_{MIN}^{OUT}, t)}{\rho_{out} c_{out}} dt\end{aligned}\tag{C.19}$$

$$\begin{aligned}F(t) &= \frac{1}{2} [F(x_{MAX}^{INP}, t) + F(x_{MIN}^{OUT}, t)] = \\ &= \frac{1}{2} \{A_{INP} [\alpha(x_{MAX}^{INP}, t) + \beta(x_{MAX}^{INP}, t)] + A_{OUT} [\alpha(x_{MIN}^{OUT}, t) + \beta(x_{MIN}^{OUT}, t)]\}\end{aligned}\tag{C.20}$$

In cui x_{MAX}^{INP} ed x_{MIN}^{OUT} denotano rispettivamente le coordinate in senso longitudinale dell'interfaccia barra di input – provino e dell'interfaccia barra di output – provino. A_{INP} ed A_{OUT} rappresentano le sezioni rette delle barre di input e di output. $F(x_{MAX}^{INP}, t)$ ed $F(x_{MIN}^{OUT}, t)$ rappresentano le forze agenti sui due lati del provino a contatto con le barre.

Si riportano di seguito, i fattori di amplificazione e di calibrazione delle tre sezioni strumentate così come le distanze dal provino delle stesse:

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

L'amplificatore utilizzato per la totalità dei test eseguiti è il condizionatore di segnali ad elevata frequenza di acquisizione FYLDE H375TA. Per la totalità dei test eseguiti si sono utilizzati provini di forma cilindrica aventi lunghezza e diametro pari a 2,5 mm.

Si riportano di seguito i diagrammi delle caratteristiche tensione – deformazione unitaria ottenuti mediante i test citati ed il diagramma temporale degli strain rate ottenuti durante gli stessi. Come è possibile osservare in figura M.12 la velocità di deformazione determinata dalle ampiezze delle onde riflessa e trasmessa secondo la:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{L} \left[C_{INP} \left(\frac{A_{OUT} E_{OUT}}{A_{INP} E_{INP}} \varepsilon_T(t) - 2\varepsilon_r(t) \right) - C_{OUT} \varepsilon_T(t) \right] \quad (C.13 \text{ bis})$$

oscilla attorno ai 3000 s^{-1} per la totalità dei test eseguiti

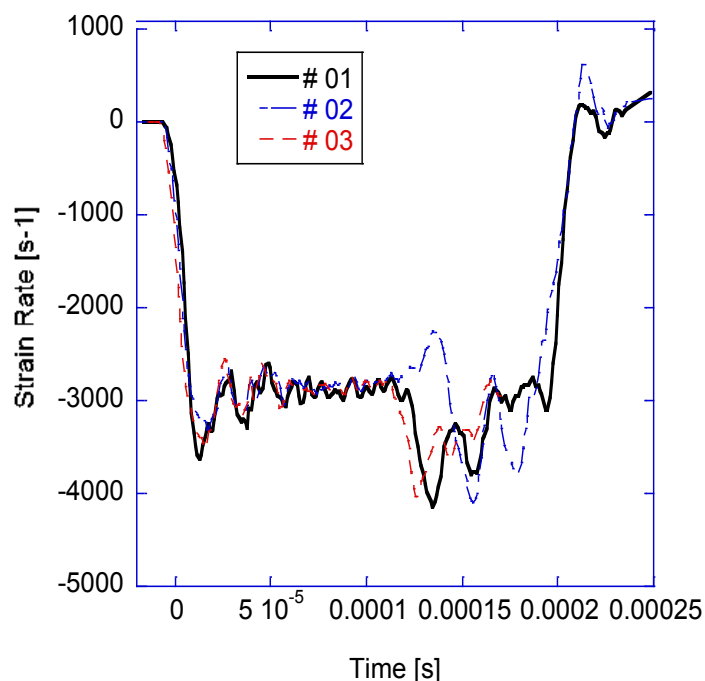


Figura M.12: strain rate ottenuti durante i test eseguiti su SHPB sull'acciaio legato al Cromo Molibdeno Vanadio oggetto di interesse

Come è possibile notare comparando le figure M.13 ed M.14 le caratteristiche tensione – deformazione unitaria ottenute mediante elaborazione dei segnali elettrici provenienti dagli strain gauges e mediante deformazioni determinate dall'analisi delle immagini registrate dalla telecamera ad elevato frame rate SIM 16 risultano congruenti. Si osserva un picco di tensione pari a circa 2500 MPa corrispondente ad una deformazione pari a circa il 5% ed una fase di deformazione plastica oscillante attorno a valori di stress pari a 2000 MPa.

Infine, come è possibile osservare in figura M.15, in cui sono sovrapposte le curve caratteristiche del materiale in regime quasi statico ed ad elevato strain rate, non si ha dipendenza delle caratteristiche di resistenza del materiale dalla velocità di deformazione imposta. E' possibile dunque affermare che le caratteristiche della lega cromo-molibdeno-vanadio oggetto di studio non risultano influenzate da quest'ultima.

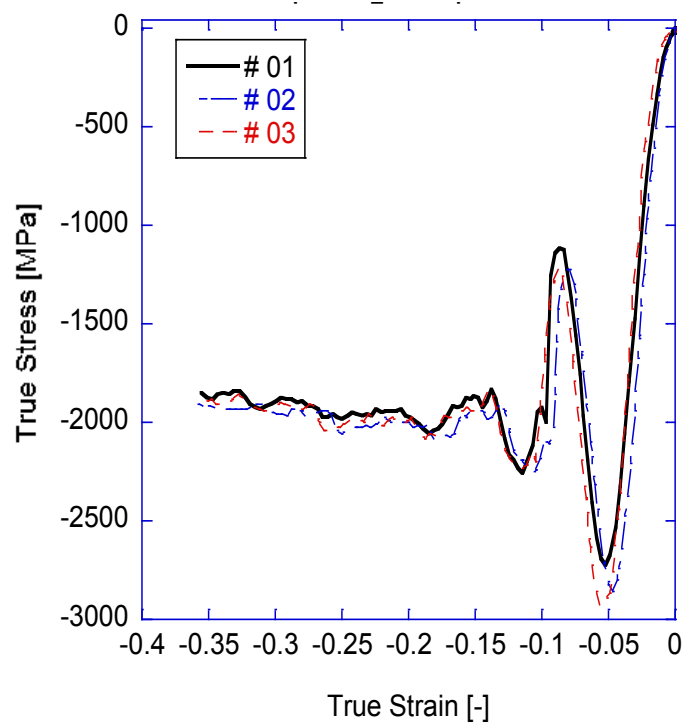


Figura M.13: curva caratteristica dell'acciaio legato al cromo molibdeno vanadio oggetto di interesse determinata attraverso i segnali provenienti da estensimetri

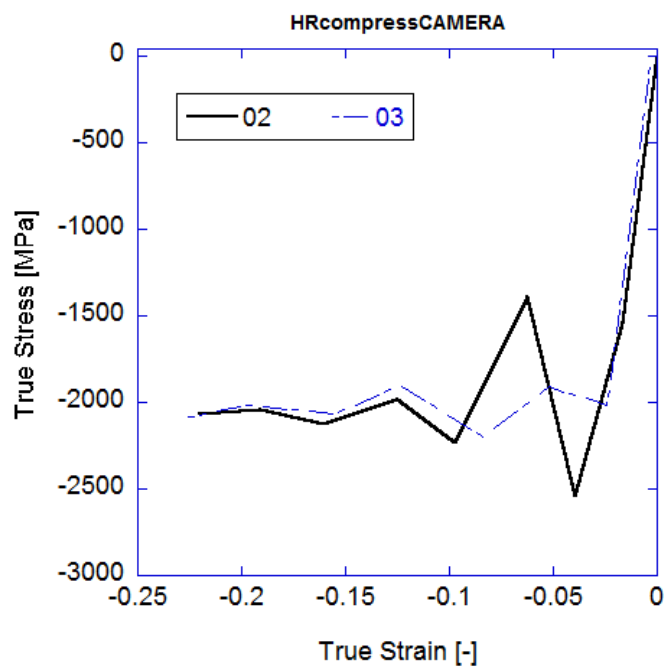


Figura M.14: curva caratteristica dell'acciaio legato al cromo molibdeno vanadio oggetto di interesse determinata attraverso analisi delle immagini

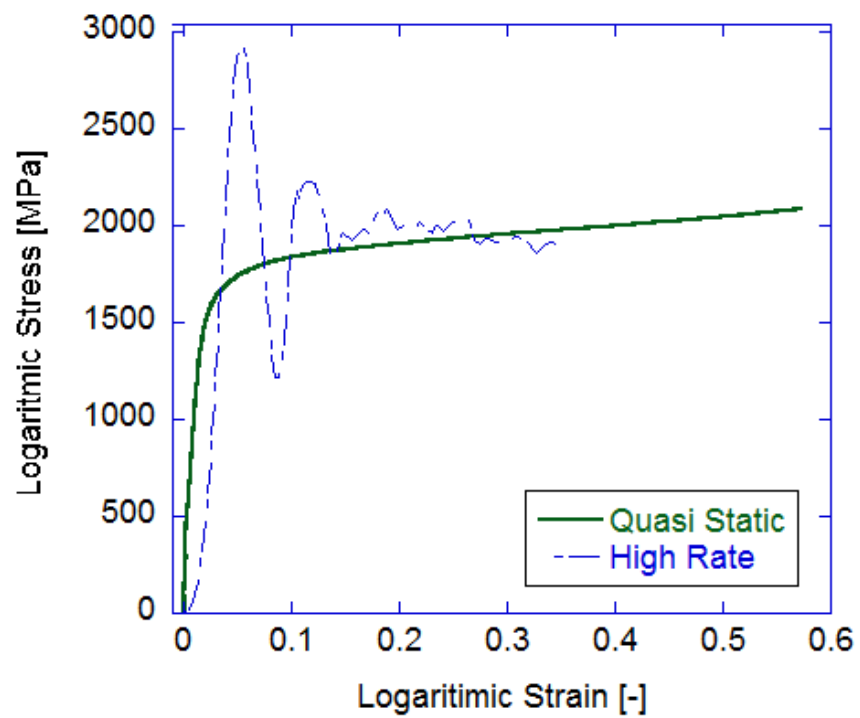


Figura M.15: influenza della velocità di deformazione sulle caratteristiche meccaniche dell'acciaio legato al cromo – molibdeno - vanadio oggetto di caratterizzazione.

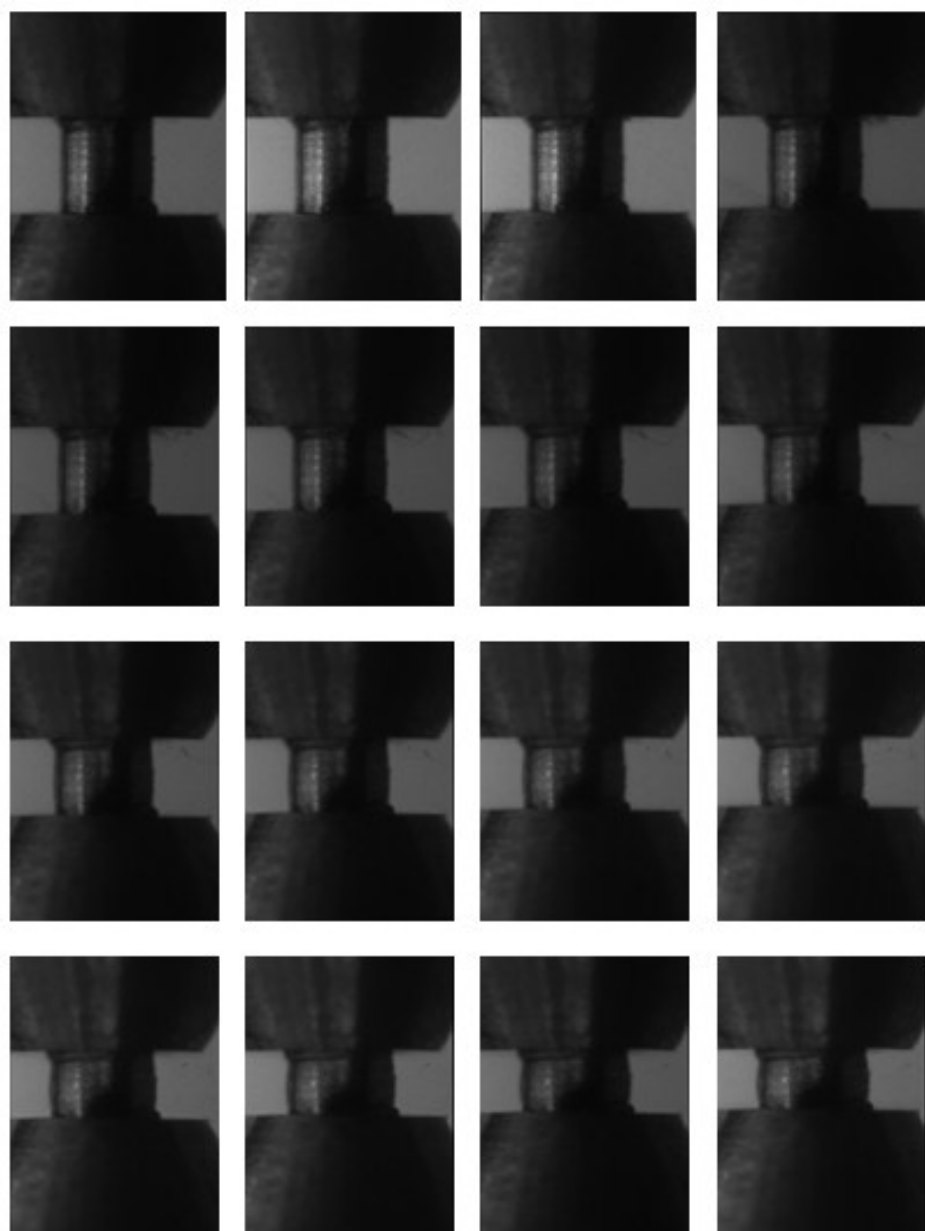


Figura M.16: sequenza fotografica registrata tramite telecamera ad elevato frame rate durante test eseguito su SHPB su acciaio legato al cromo – molibdeno – vanadio.