

## 5.4 Caratterizzazione in regime quasi statico e ad elevata velocità di deformazione di un acciaio per applicazione Oil and Gas

Si riportano in questa sezione i risultati relativi ai test sperimentali effettuati in trazione ad elevata velocità di deformazione ed in regime quasi statico su un acciaio duttile per applicazioni in ambito Oil and Gas.

I test ad elevato strain rate sono stati eseguiti, a parità di condizioni, su due differenti geometrie di provino caratterizzati da differenti gauge length. Si è fatto ciò allo scopo di ottenere, a parità di condizioni, ovvero a pari velocità dell'impattore, differenti velocità di deformazione. Infatti secondo le (C.8) e (C.13) lo strain rate è inversamente proporzionale alla gauge length per cui, utilizzando provini caratterizzati da gauge length minore si ottengono velocità di deformazione più elevate.

Nello specifico si sono utilizzati (vedi appendice: APP\_04 ed APP\_05) due tipologie di provini cilindrici ad “osso di cane” caratterizzati da estremità filettate metriche M6 e da gauge length rispettivamente pari a 3 mm ed 8 mm con diametro della sezione retta pari a 3 mm per entrambe le tipologie di provino.

Le figure M.30 ed M.31 mostrano gli andamenti temporali delle velocità di deformazione ottenute per le due tipologie di provino utilizzate. Come è possibile osservare si sono ottenute, per le due tipologie di provino, strain rate oscillanti attorno i valori di  $3000 \text{ s}^{-1}$  (gauge length = 8 mm) e  $8000 \text{ s}^{-1}$  (gauge length = 3 mm). Si riportano di seguito le caratteristiche delle barre di input e di output utilizzate nonché i dati relativi alle sezioni estensimetriche poste sulle stesse:

*Barra di input:*

- Materiale: titanio
- Diametro = 10 mm
- Densità =  $\rho_{\text{inp}} = 4429,7 \text{ kg/mm}^3$
- Velocità di propagazione delle onde di tensione (velocità del suono) =  $c_{\text{inp}} = 5082,48 \text{ m/s}$
- Distanza sezione strumentata #1 rispetto al provino = 0,6208 m
- Fattore di calibrazione sezione strumentata #1 =  $7.338 \cdot 10^{-6} \text{ V/N}$

- 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

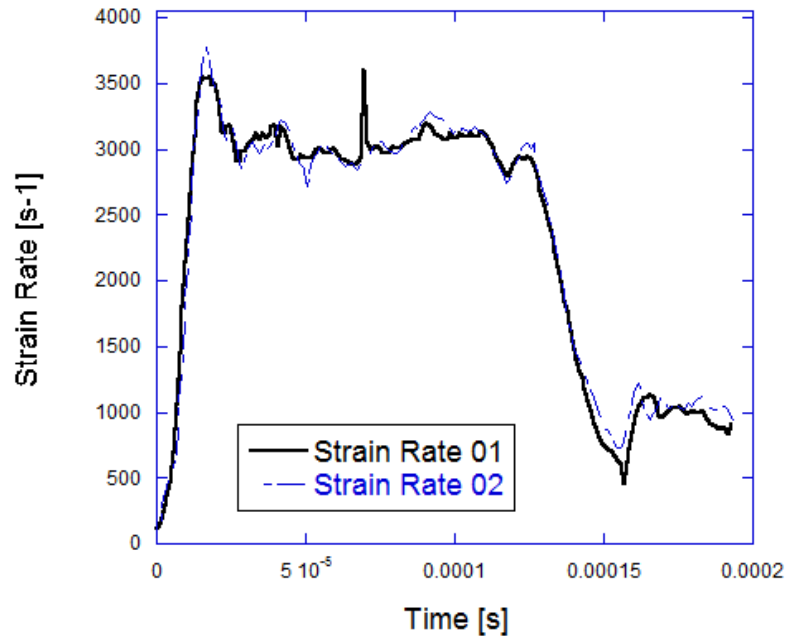
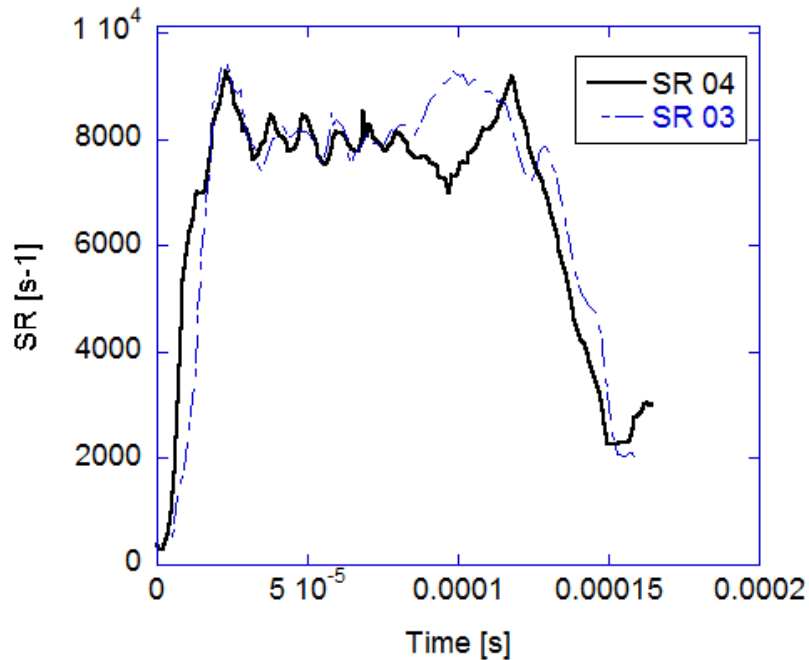


Figura M.31 : andamento dello strain rate su provini in acciaio (gauge length = 8 mm)

### *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 =  $c_{out} = 3628 \text{ m/s}$
- Distanza sezione strumentata #3 rispetto al provino = 0,09852 m
- Fattore di calibrazione sezione strumentata #3 =  $7.002 \cdot 10^{-6} \text{ V/N}$
- Fattore di amplificazione sezione strumentata #3 = 50



**Figura M.32 : andamento dello strain rate su provini in acciaio (gauge length = 3 mm)**

Le figure M33 ed M34 illustrano le caratteristiche stress-strain ottenute mediante elaborazione dei segnali elettrici provenienti dagli estensimetri mentre le figure M.35 ed M.36 illustrano le stesse caratteristiche con deformazioni unitarie determinate tramite analisi delle immagini acquisite dalla telecamera ad elevata velocità di deformazione. Le tensioni di picco rilevate durante sono pari a circa 1000 MPa (true stress logaritmico) per i test eseguiti ad uno strain rate pari a  $3000 \text{ s}^{-1}$  mentre risultano comprese tra i 1100 ed i 1200 MPa (true stress logaritmico) per i test eseguiti ad uno strain rate pari a  $8000 \text{ s}^{-1}$ . Inoltre, come si nota, le deformazioni in corrispondenza della rottura determinata attraverso elaborazione dei segnali provenienti dagli estensimetri risultano assai maggiori nel caso di test eseguiti su provini dotati di lunghezza utile minore. Ciò è dovuto al fatto che, un volta avvenuto il necking, si hanno deformazioni di elevata entità in una zona ristretta del provino che vengono computate, nel caso di curve ingegneristiche e logaritmiche, all'intera gauge length con conseguenti visibili differenze nei valori di deformazione unitaria determinati in prossimità della rottura.

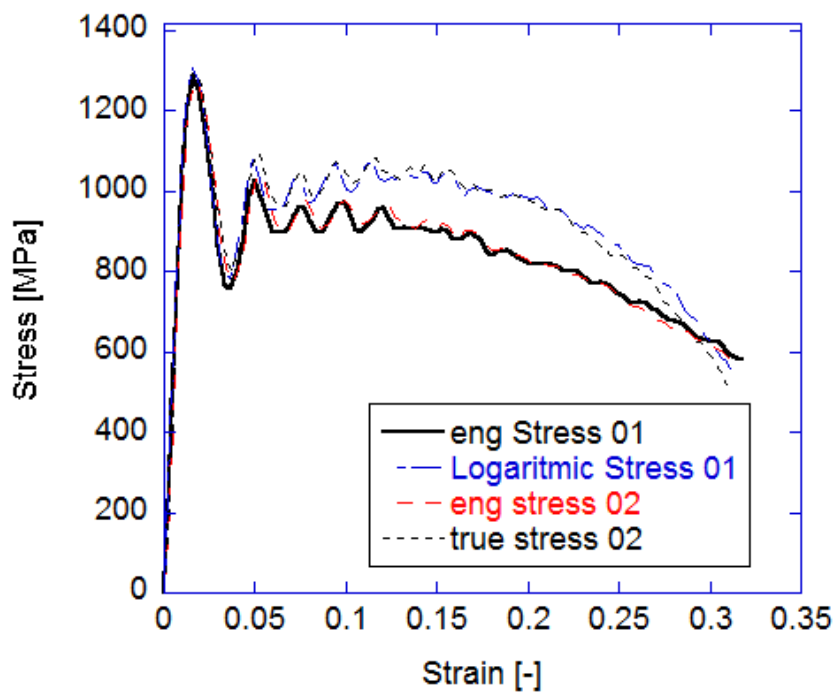


Figura M.33 : caratteristica stress- strain su provini in acciaio (gauge length = 8 mm)

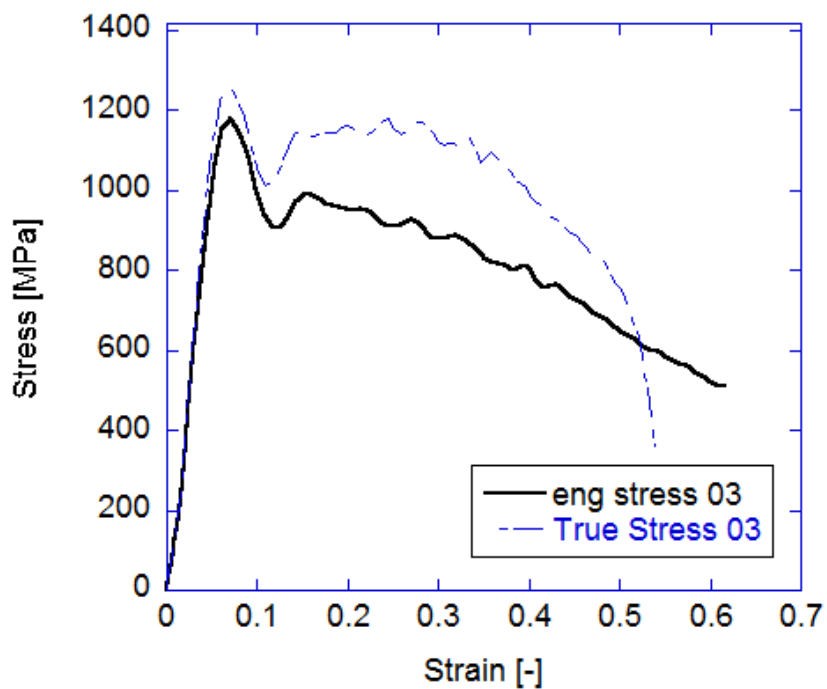


Figura M.34 : caratteristica stress- strain su provini in acciaio (gauge length = 3 mm)

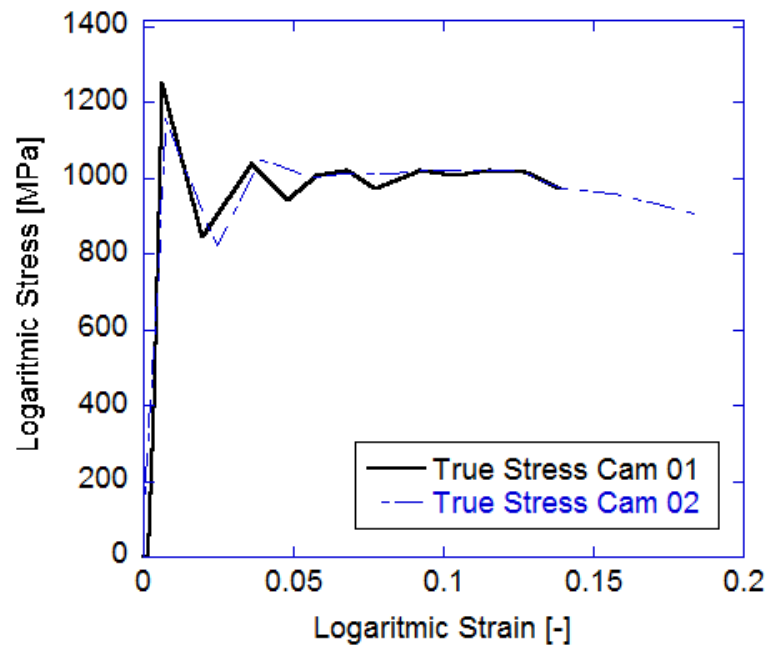


Figura M.35 : caratteristica stress- strain su provini in acciaio determinata attraverso analisi delle immagini (gauge length = 8 mm)

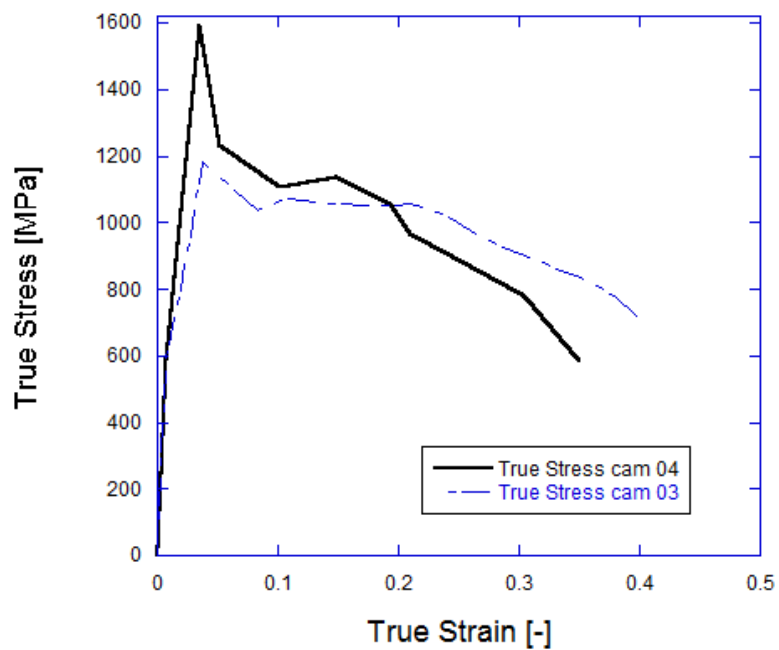


Figura M.36 : caratteristica stress- strain su provini in acciaio determinata attraverso analisi delle immagini (gauge length = 3 mm)

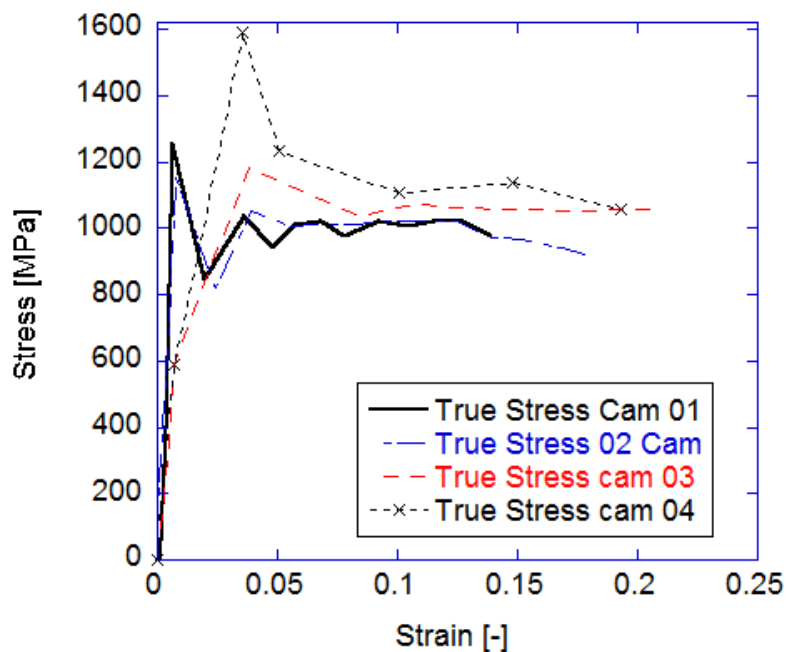


Figura M.37 : caratteristica stress- strain su provini in acciaio per diversi strain rate determinata attraverso analisi delle immagini (gauge length = 3 mm)

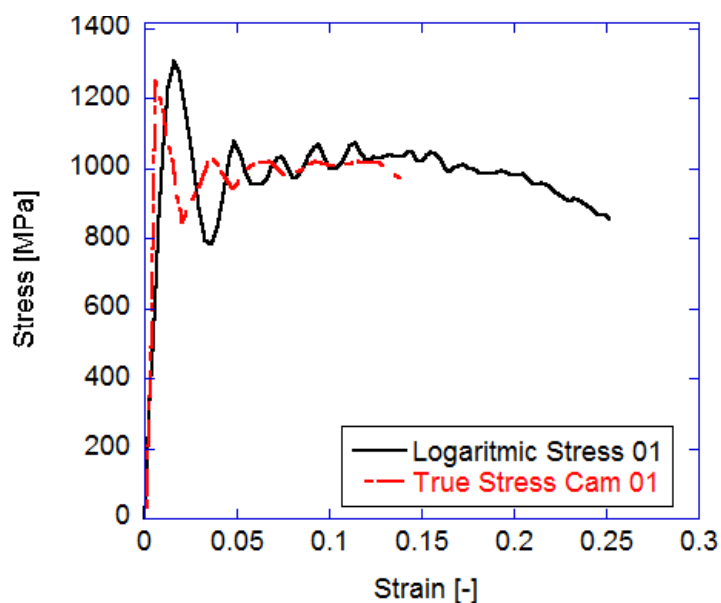
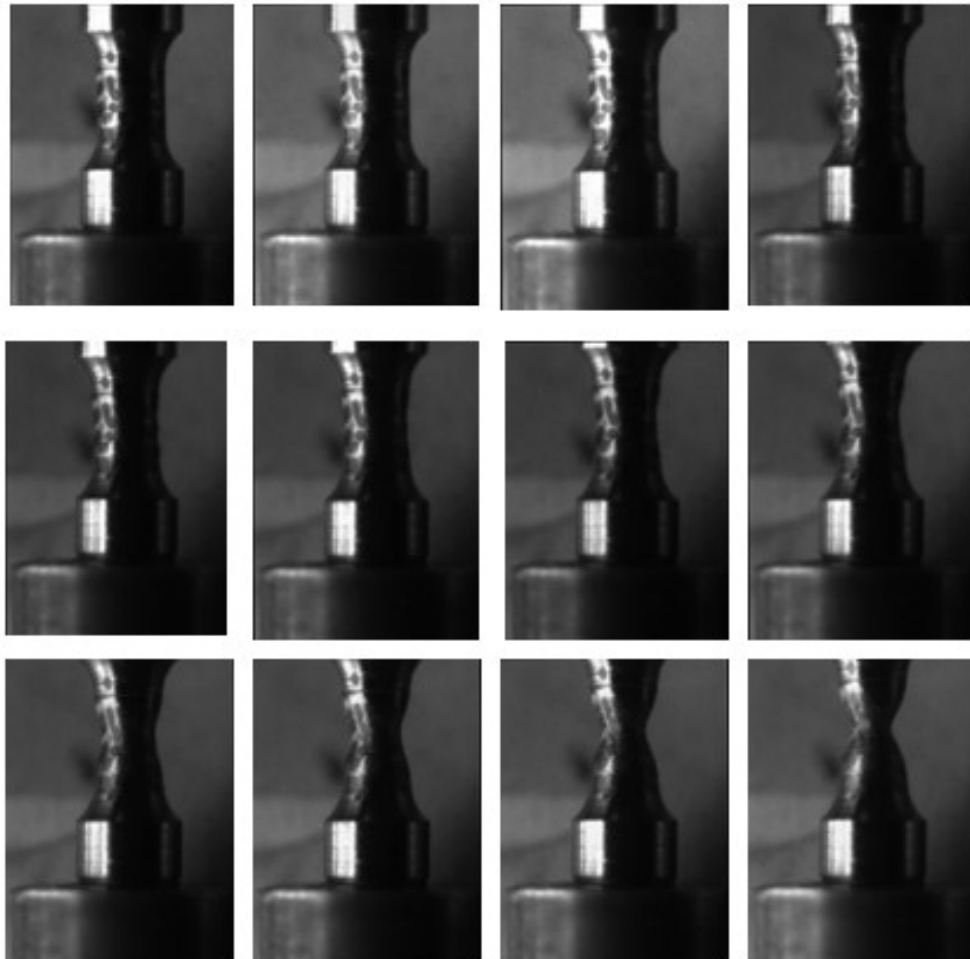


Figura M.38 : caratteristica stress- strain su provini in acciaio per diversi strain rate determinata attraverso analisi delle immagini (gauge length = 3 mm)

In figura M.37 si sono sovrapposte le curve caratteristiche determinate mediante telecamera ad elevato frame rate relative ai quattro test eseguiti su Hopkinson bar per

le due differenti velocità di deformazione (test 01 e test 02 ad uno strain rate pari a  $3000 \text{ s}^{-1}$ , test 03 e test 04 ad uno strain rate pari a  $8000 \text{ s}^{-1}$ ). I risultati dei primi due test eseguiti risultano perfettamente sovrapponibili mentre i test eseguiti su provini di minor lunghezza mostrano la dipendenza delle caratteristiche di resistenza dell'acciaio oggetto di interesse all'aumentare della velocità di deformazione.

Infine, la sovrapposizione delle curve caratteristica determinata attraverso analisi delle immagini e di quella determinata attraverso elaborazione dei segnali da estensimetri (figura M.38) mostra la congruenza tra i risultati ottenuti con i due metodi.



**Figura M.39: sequenza fotografica registrata tramite telecamera ad elevato frame rate durante test eseguito su SHTB su acciaio duttile per applicazioni industriali di tipo Oil and Gas**

La uniformità delle deformazioni unitarie e la monoassialità/uniformità delle tensioni all'interno della gauge length cessa di essere verificata subito dopo il sopraggiungere del necking. Al di sopra di tale livello di deformazione le equazioni che forniscono tensioni e deformazioni ingegneristiche ed in forma logaritmica approssimata non sono più rappresentative della tensione equivalente di Mises e della deformazione plastica equivalente. Infatti, una volta avvenuto il necking le deformazioni si localizzano nell'intorno della sezione retta di diametro minimo e non possono essere più correlate alla gauge length.

L'utilizzo di una telecamera ad elevatissimo frame rate permette di conoscere il diametro della minima sezione retta durante il test, per cui è possibile ottenere una caratteristica meccanica rappresentativa anche della fase di strizione attraverso le:

$$\varepsilon_{true\_real} = 2 \ln \frac{r_0}{r} \quad (M.1)$$

$$\sigma_{true\_real} = \frac{F}{\pi r^2} \quad (M.2)$$

In cui 'r<sub>0</sub>' ed 'r' sono rispettivamente il raggio iniziale del provino ed il raggio corrente della sezione retta minima del provino stesso, mentre 'F' è il carico agente su quest'ultimo.

Le figure M.40 ed M.41 illustrano la differenza tra le caratteristiche meccaniche, ingegneristica, logaritmica approssimata e true effettiva rispettivamente per uno dei provini caratterizzati da gauge length pari a 8 mm e per uno dei provini a gauge length pari a 3 mm. Come è possibile osservare la caratteristica true effettiva ottenuta dalla misure dei diametri risulta avere, come è ovvio, andamento sempre crescente, a differenza delle caratteristiche ingegneristica e logaritmica approssimata che presentano un andamento decrescente una volta raggiunta la fase di necking.



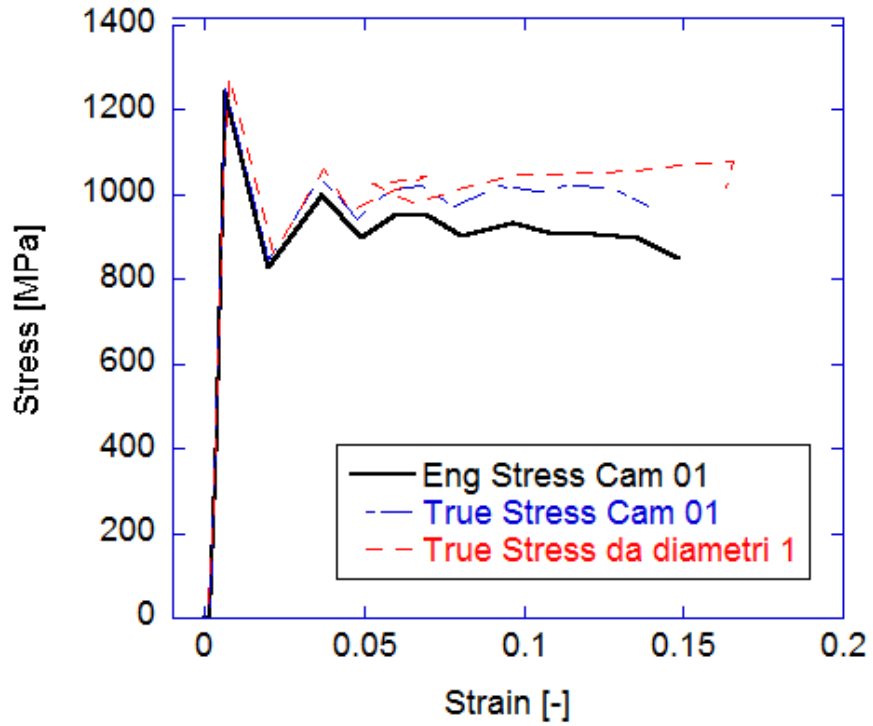


Figura M.40: caratteristiche Ingegneristica, Logaritmica e true da diametri determinate attraverso analisi delle immagini (Gaughe length = 8 mm)

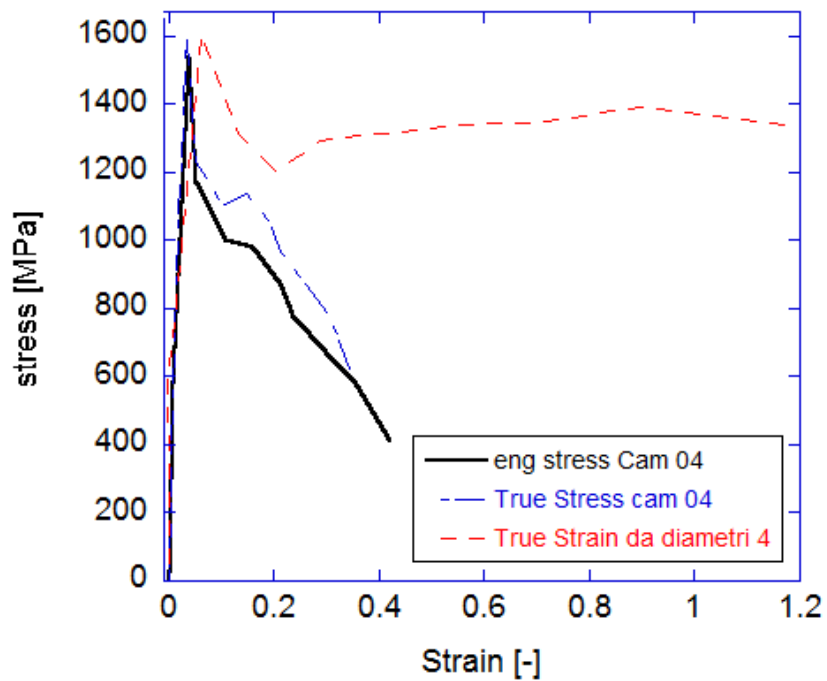
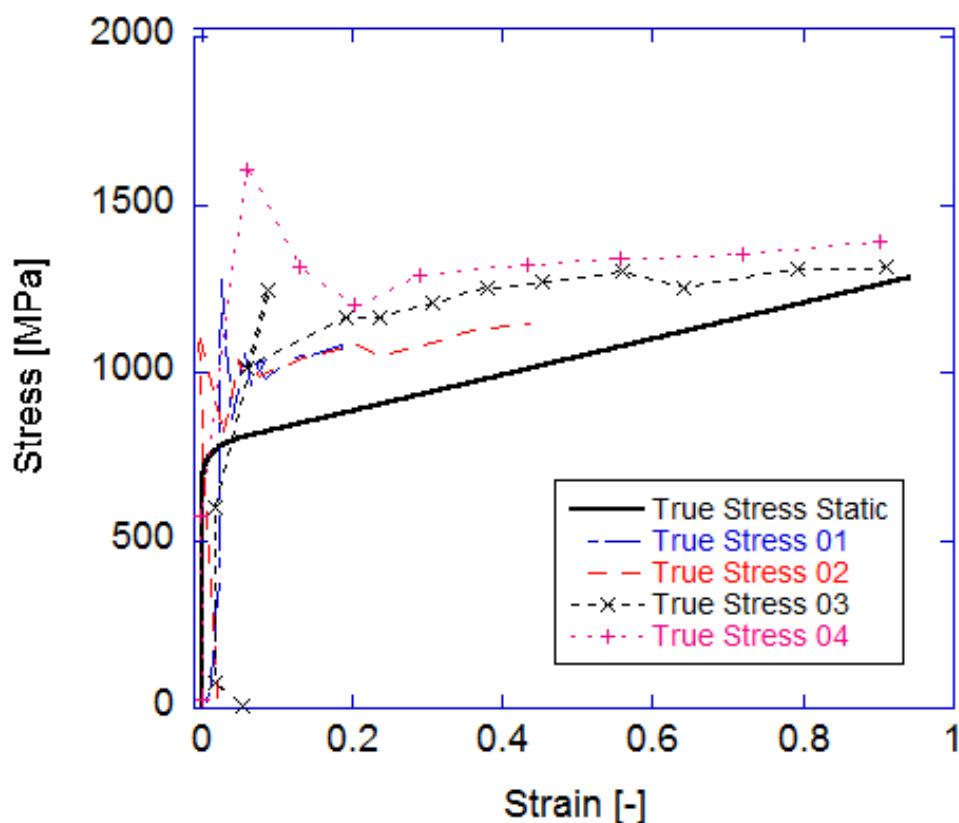


Figura M.41: caratteristiche Ingegneristica, Logaritmica e true da diametri determinate attraverso analisi delle immagini (Gaughe length = 3 mm)

In accordo a quanto detto riguardo alla caratterizzazione di un materiale duttile, e quindi soggetto a necking pronunciato prima della rottura, si è ritenuto opportuno osservare la dipendenza del comportamento del materiale dalla velocità di deformazione paragonando la curva true ottenuta dalla misura dei diametri durante una prova statica con la curva true ottenuta dalla misura dei diametri stessi durante un test ad elevata velocità di deformazione su SHTB.

Come è possibile osservare in figura M.42 la differenza in termini di resistenza risulta pronunciata in corrispondenza dello snervamento e nella fase iniziale delle deformazioni plastiche, con un incremento di resistenza prossimo al 50 % ad elevate velocità di deformazione, che va progressivamente riducendosi in prossimità della deformazione di rottura.



**Figura M.42: dipendenza del comportamento dell'acciaio oggetto di interesse per differenti velocità di deformazione. Curve tensione – deformazione effettive ottenute dalla misura dei diametri.**

Infine, riferendosi agli intervalli di tempo compresi tra un frame ed il successivo ed alle deformazioni vere ottenute dalle misura del diametro corrente in corrispondenza della sezione di necking è possibile ottenere l'andamento dello strain rate effettivo. Tale andamento presenta, per effetto della strizione precedente alla rottura, valori massimi decisamente maggiori di quelli nominali.

La figura M. 43 riporta l'andamento dello strain rate così determinato, per uno dei test su SHTB effettuato su provino caratterizzato da gauge length pari a 3 mm. Come è possibile osservare, lo strain rate massimo così determinato è pari a circa  $30000 \text{ s}^{-1}$ , decisamente maggiore se paragonato ai circa  $8000 \text{ s}^{-1}$  ottenuti facendo riferimento alle deformazioni nominali.

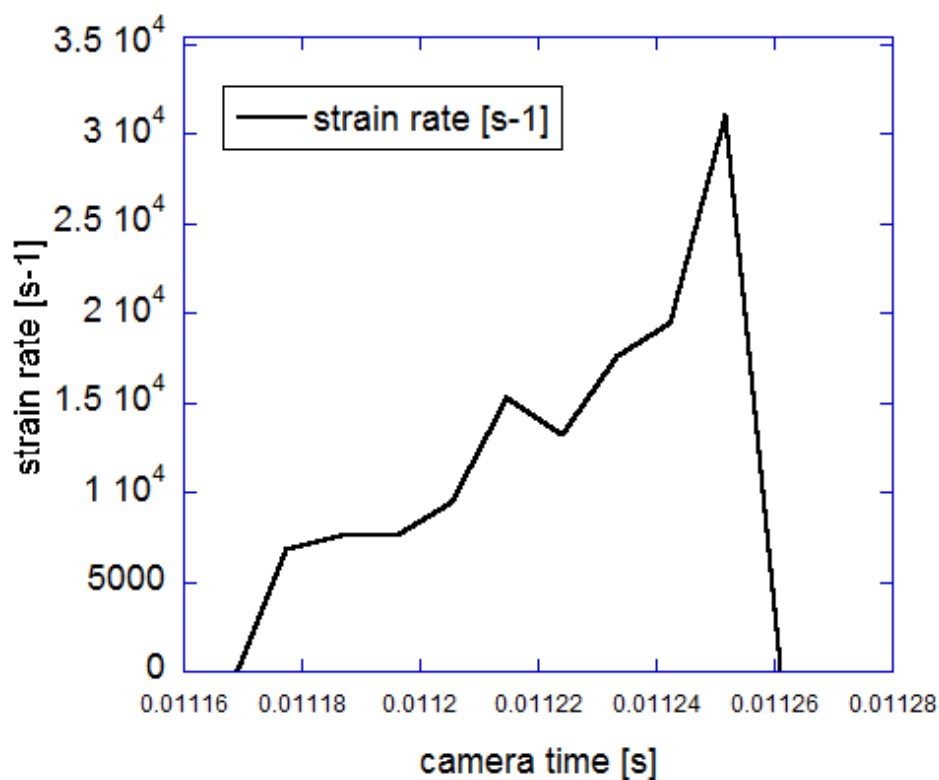


Figura M.42: andamento dello strain rate determinato attraverso misure successive del diametro del provino durante il test