

# STUDIO SPERIMENTALE SULLA EVOLUZIONE DEL PARAMETRO DI TRIASSIALITÀ IN PROVE DI TRAZIONE SU PROVINI CILINDRICI

G. La Rosa, G. Mirone, A. Risitano

*Istituto di Macchine, Facoltà di Ingegneria di Catania*

*Viale Andrea Doria 6 - 95125 Catania*

## Sommario

Si espongono i risultati di una serie di prove nelle quali si è analizzato il modo in cui il grado di triassialità (TF) varia durante l'applicazione di carichi di trazione crescenti su provini cilindrici caratterizzati da differenti intagli, quindi da diversi valori della funzione di triassialità all'avvio del necking. Durante le prove sono state effettuate delle riprese video nelle zone intagliate dei provini, ricostruendo l'andamento del raggio di curvatura del profilo di necking. Si è potuta fare una serie di considerazioni sia sull'andamento del suddetto raggio, che è risultato essere correlabile in una certa misura alla deformazione plastica oltre che al valore iniziale del raggio di intaglio, sia sul grado di triassialità che è legato alla geometria istantanea del provino secondo le relazioni che sono state ricostruite da Bridgman [1] sotto un certo numero di ipotesi semplificative. I risultati ottenuti mettono in luce che, considerare la condizione di trazione in avanzata fase plastica come di "proportional loading", ipotesi utilizzata nella integrazione di molti modelli di evoluzione del danno, è in effetti poco aderente alla realtà anche in casi, come quello analizzato, in cui considerare il tipo di carico disgiuntamente dalle modificazioni geometriche lascerebbe presupporre la costanza del TF. Si è infine la sensibilità di alcune leggi evolutive del danno alla ipotizzata variabilità del parametro di triassialità.

## Abstract

*In this work are presented the results of a set of tensile tests in which has been evaluated the behaviour of the triaxiality ratio during increasing stress and strain on differently notched specimens. The shape of the specimens profiles have been video recorded and analized in order to perform measurements and calculations for the necking profile radius. Some considerations allowed to build a reasonable correlation between the profiles radii and the natural strains for each specimen tested. According to the Bridgman [1] solution for stress fields in the necking region, has been evaluated the triaxiality factor at various strains, showing that, nevertheless the load direction does not vary during tensile tests, the TF does not remain constant as it's assumed in some continuous damage models considered below, because geometrical modifications may affect the stress distribution as well as the load direction ones. Furthermore has been checked the sensitivity of some damage evolution laws with respect to the presumed TF variability.*

## 1. Metodi di prova ed acquisizione dei dati

Sono state eseguite prove di trazione a carico crescente monotonicamente in controllo di spostamento con una macchina di prova Instron 4206, su lotti di provini a sezione circolare con e senza intaglio in acciaio AISI 304 e Fe370. La velocità di spostamento della traversa è stata fatta variare tra 10 e 40 mm/min, corrispondente a velocità di deformazione media (su tutta la lunghezza di misura dei provini) variabile tra 0.003 e 0.01 s<sup>-1</sup>. Mentre in corrispondenza delle velocità di spostamento tra 10 e 20 mm/min. le curve di risposta dei provini sono state pressoché identiche, a 40 mm/min. si è osservata una certa riduzione dell'allungamento a rottura, ad indicare che tale velocità cominciava ad innescare fenomeni di sensibilità allo strain rate. Quindi le prove successive sono state eseguite tutte alla velocità di spostamento della traversa di 20 mm/min.

I dati sulla geometria dei provini testati (tre per ogni serie) sono riportati nella tabella e nella figura sottostanti.

Tabella 1: *geometria dei provini*

Materiale	Serie provini	D min. (mm.)	D max (mm.)	L (mm.)	R <sub>0</sub> (mm.)
AISI 304	A304	9	9	55	∞
FE370	Pcil-5	6	9	55	20
"	Pcil-6	6	9	55	10
"	Pcil-7	9	9	55	∞

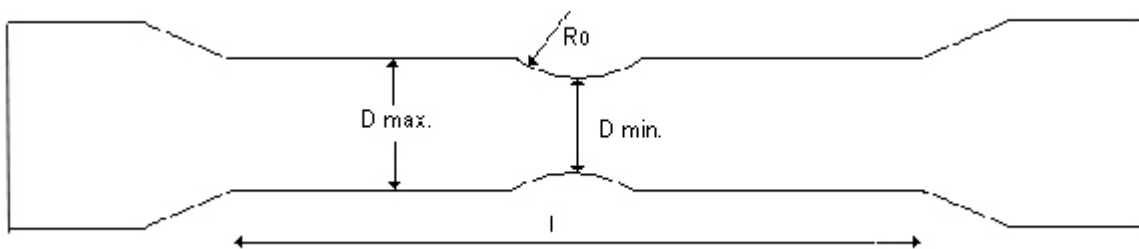


Figura 1: *geometria dei provini cilindrici*

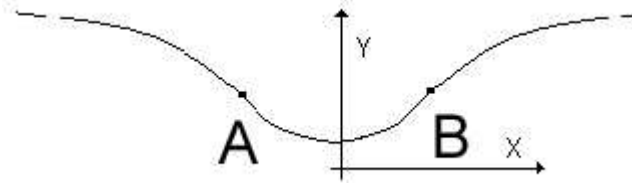


Figura 2: riferimento per il rilievo profili

Durante ogni prova di trazione è stata filmata la zona della lunghezza di misura del provino per ottenere la coppia di valori istantanei carico-diametro minimo. La sincronia tra le informazioni fornite dalla macchina di prova e dalla ripresa video digitalizzata è stata ottenuta (note le velocità di acquisizione di entrambe le apparecchiature) a partire dalla rottura del provino, evidenziabile in maniera abbastanza chiara sia dal crollo istantaneo dei valori numerici del carico, sia dalla separazione fisica delle due metà del provino nelle immagini digitalizzate. Il rateo massimo di acquisizione del digitalizzatore è di 25 immagini/s, mentre per la Instron si è impostato un rateo di registrazione dell'output di 50 coppie di dati carico-spostamento al secondo. Il software per l'analisi di immagini Image Pro Plus è stato utilizzato per le misurazioni fatte sulle immagini estratte dal filmato.

## 2. Risultati sperimentali

L'obiettivo delle prove era quello di valutare l'entità delle modificazioni geometriche nella zona del necking, al fine di acquisire informazioni relative agli andamenti della tensione media in direzione del carico, della tensione di Von Mises di flusso plastico e del grado di triassialità in funzione della deformazione naturale plastica. In tal senso si è proceduto alla determinazione, per ogni prova, del semidiametro istantaneo "a" della sezione ristretta e del raggio di curvatura istantaneo "R" del profilo di necking. La ricostruzione delle curve "true" di tensione assiale media / deformazione naturale, non ha presentato alcuna difficoltà data la univocità dell'unico parametro da valutare con misurazioni sulle immagini, cioè il diametro minimo istantaneo. Per il calcolo dei valori di R, da ognuna delle immagini considerate si è proceduto al rilevamento delle coordinate di una serie di punti su entrambi i profili visibili del necking, riferiti ad un sistema arbitrario di coordinate. La porzione dei profili esaminata è stata sempre compresa tra i due punti di flesso A e B in Fig. 2, facilmente individuabili sul profilo reale. All'interno delle curve così delimitate, si sono rilevate le coordinate di serie di 10 o 15 punti. Da ogni gruppo di punti si è poi ricostruito analiticamente il profilo con curve di ordine dal secondo al quarto, utilizzando in successione sottoinsiemi via via più piccoli dei punti relativi a tutto l'arco compreso tra i due flessi, la cui distanza è stata sempre compresa tra 1 ed 1,25 volte il diametro minimo. Ovviamente, dato che il profilo non è realmente circolare, i valori del raggio di curvatura così ottenuti sono risultati essere crescenti con la lunghezza dell'arco preso in considerazione, salvo a stabilizzarsi quando l'estensione dell'arco stesso si è avvicinata a quella massima definita dai due punti di flesso. Per avere una stima dell'effetto che l'errore intrinseco nella misurazione delle coordinate ha avuto nella valutazione delle curvature del profilo generico, si sono calcolati i valori del raggio di un cerchio passante per tre punti dei quali uno fissato al centro di un profilo circolare di raggio arbitrario fissato, gli altri due, simmetrici rispetto al primo, sono fatti scorrere lungo il profilo in questione, introducendo sulla coordinata radiale y l'errore tipico di tali misurazioni. In Fig. 3 sono riportati, al variare della coordinata x dei suddetti punti, i valori di raggio calcolati a partire da due diversi profili circolari arbitrari ( $R=10$  mm e  $R=5$  mm) e con un errore imposto rispettivamente di 0.05, 0.1, 0.15 mm per le tre curve "a", "b" e "c".

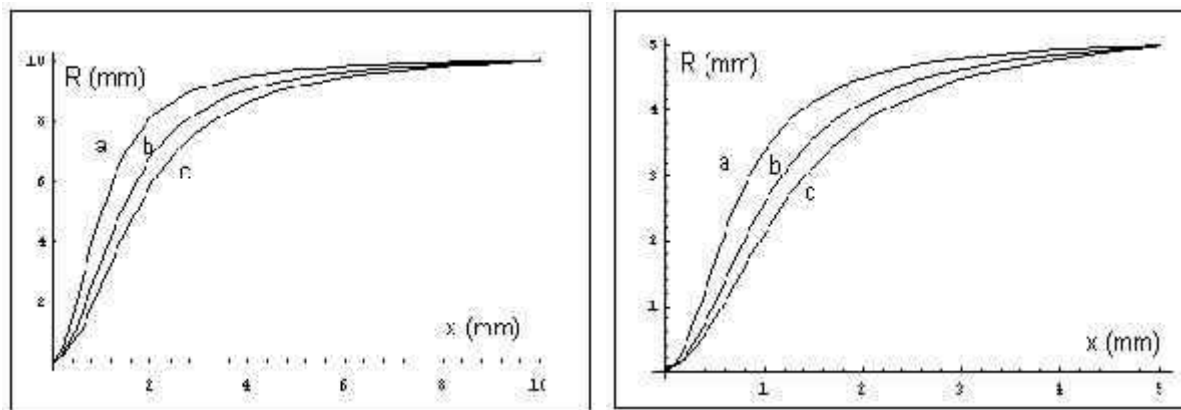


Figura 3: *effetto dell'errore di misura al variare della distanza tra i punti rilevati*

E' evidente che un errore costante nella misurazione della coordinata radiale "Y" dei punti del profilo, introduce un errore nel valore calcolato del raggio che è tanto più grande quanto più i punti siano scelti vicini tra loro, e, visti gli ordini di grandezza delle dimensioni in gioco nelle prove eseguite (pixels di lato pari a 0.02 mm), per evitare di introdurre errori superiori al 10% nella misura del raggio non si sono utilizzati punti distanti dal neck meno di metà del valore di raggio ottenuto (compatibilmente con il vincolo posto dalla posizione dei flessi), procedendo quindi con poche iterazioni all'eliminazione degli eventuali punti da scartare ed al ricalcolo del raggio. Inoltre, l'eventuale errore che permane nei punti ritenuti validi è stato ulteriormente ridotto con la procedura di fitting con la quale si ricostruisce il profilo (metodo dei minimi quadrati su polinomiali di secondo, terzo e quarto ordine). Resta fermo il fatto che in realtà il profilo non è costituito da archi di cerchio ma si ritiene una discreta approssimazione quella di considerare la curvatura costante con una polinomiale del secondo ordine. Si è inoltre constatato che i vantaggi ottenibili scegliendo polinomi di ordine superiore nell'approssimazione, si perdevano per la eccessiva fluttuazione della curva ottenuta in corrispondenza del neck. Calcolati alcuni valori di R in corrispondenza di altrettanti valori della deformazione naturale plastica "p" ( $p=2\text{Log}[A_0/A]$ , dove  $A_0$  è la sezione resistente iniziale ed A quella istantanea), si è costruita la curva R (p) tramite fitting con curve iperboliche del tipo:

$$R(p) = \frac{c}{p - p_r}$$

(Figura 4). I valori della costante "c" vengono determinati con una procedura di fit mentre il valore di  $p_r$  viene individuato per tentativi, in modo da assicurare che i valori di R siano uguali a quelli iniziali, noti, per i valori di deformazione plastica per i quali effettivamente si è iniziata a riscontrare una variazione del profilo. Per i provini senza intaglio  $p_r$  è il valore di deformazione naturale (positivo) per il quale si è cominciato ad evidenziare il necking, invece per i provini intagliati i valori assunti da  $p_r$  sono negativi, ad indicare che già per deformazioni plastiche nulle la curvatura del profilo ha valori diversi da zero. Per i provini esaminati, i parametri delle curve sono riportati in Tabella 2.

Tabella 2: *parametri dell'andamento dei raggi di curvatura*

Serie provini	A304	Pcil5	Pcil6	Pcil7
$p_r$	0.317	-0.15	-0.325	0.23
c	5.6	3.8	3.79	3.82

Per i provini in AISI 304, si è evidenziata, nonostante fossero identici, una certa differenza nei parametri ottenuti (in tabella è riportata la media sui tre campioni) che rispecchia il differente comportamento dovuto alle velocità di deformazione imposte che stanno nel rapporto 1:2:4, differenza di comportamento visibile anche in termini di

deformazione naturale plastica a rottura che è stata rispettivamente del 143, 135 e 127 %. Infatti, nell'ordine crescente di velocità di deformazione, i parametri sono risultati essere pari a 0.3, 0.3 e 0.35 per quanto riguarda  $p_r$ , e 5.98, 5.79 e 5.06 per il parametro  $c$ .

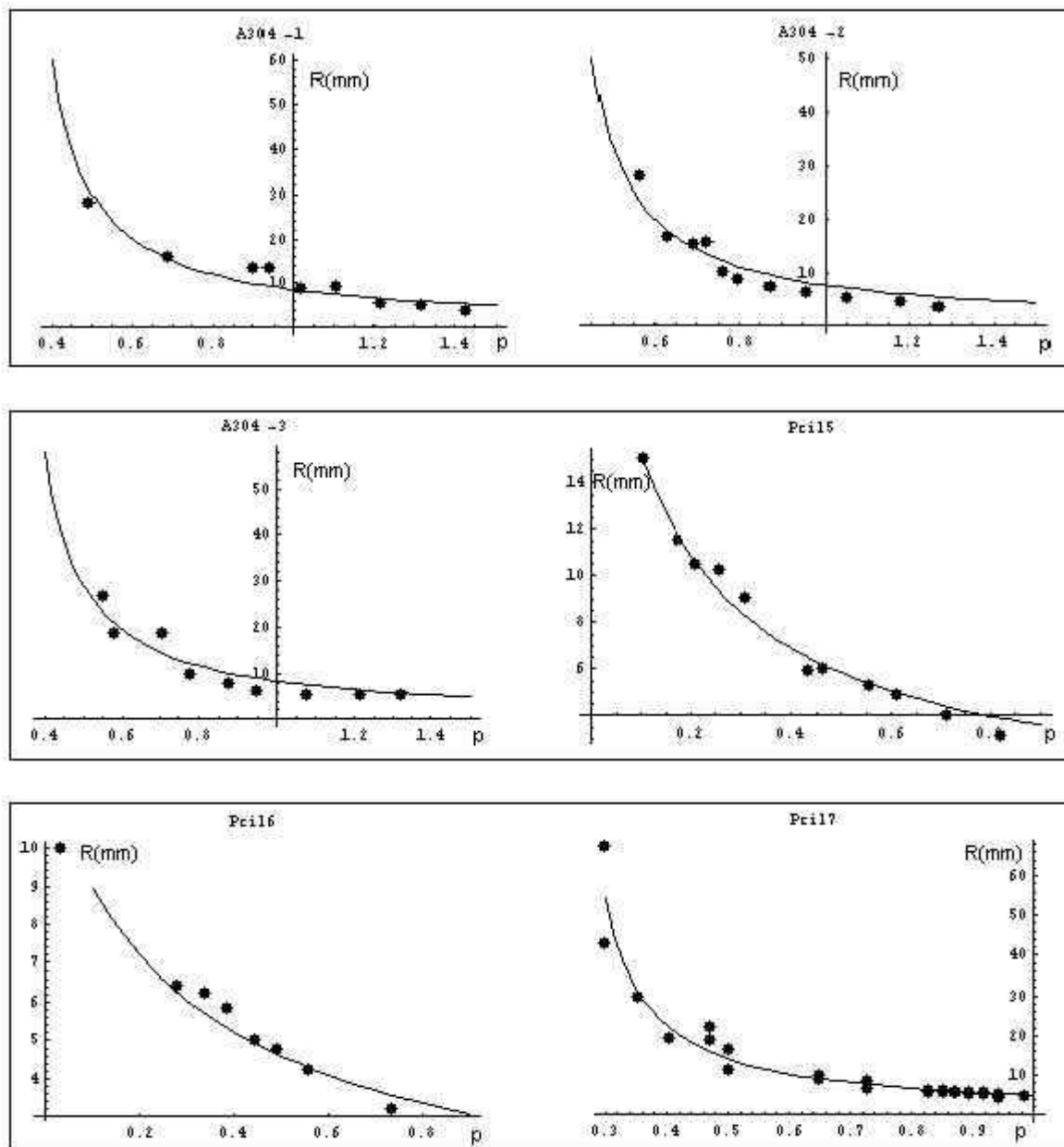


Figura 4: andamento dei raggi di curvatura dei profili di necking

### 3. Grado di triassialità e deformazione naturale plastica

Come è noto, il rapporto di triassialità (TF), definito dal rapporto tra la tensione idrostatica equivalente (ovvero media tra le tre tensioni principali) e la tensione equivalente di Von Mises, è legato (nelle ipotesi fatte da Bridgman) alla geometria istantanea del provino cilindrico dalla relazione

$$TF(r) = \frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} = \frac{1}{3} + \text{Log}\left(\frac{a + 2aR - r^2}{2aR}\right) \quad (1)$$

dove: "a" è il raggio massimo della sezione ristretta, "r" è il raggio che individua il generico punto della stessa sezione ed "R" è il raggio del cerchio osculatore con cui si approssima il profilo di necking. Atteso che la rottura comincia a propagarsi dal centro della sezione minima del provino, il valore di TF significativo agli effetti del collasso del materiale è quello corrispondente a  $r=0$ , ovvero

$$TF(0) = \frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} = \frac{1}{3} + \text{Log}\left(1 + \frac{a}{2R}\right) \quad (2)$$

Anche il rapporto, costante su tutta la sezione, tra tensione media in direzione del carico  $\sigma_{zavg}$  e tensione di flusso plastico  $\sigma_{eq}$  è legato alla geometria del necking, infatti

$$\frac{\sigma_{zavg}}{\sigma_{eq}} = \left(1 + 2 \frac{R}{a}\right) * \text{Log}\left(1 + \frac{a}{2R}\right)$$

E' da evidenziare come il rapporto tra tensione media in direzione del carico e tensione di Von Mises sia molto meno sensibile al variare di  $a/R$  di quanto non lo sia il fattore di triassialità. Dall'andamento del raggio di necking nelle varie prove è stato quindi possibile ricostruire, tramite le suddette espressioni di Bridgman, anche quello del grado di triassialità  $TF(0)$  al centro del neck, variabile in funzione della deformazione naturale plastica. Gli andamenti di tale funzione sono riportati nel grafico di Figura 5.

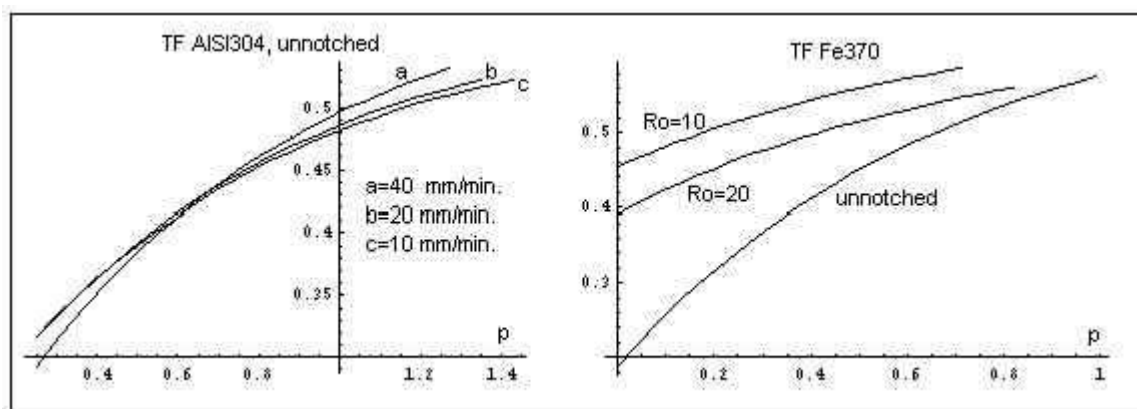


Figura 5: andamento del TF max. nella sezione ristretta

Le curve per il materiale Fe370, provato tutto alla velocità di 20 mm/min., sono riferite alla media sui tre provini di ogni serie che hanno esibito un comportamento pressoché identico. E' evidente che, nelle ipotesi fatte (validità del modello di campo tensionale di Bridgman) la funzione di triassialità  $TF(p)$  è tutt'altro che costante anche se la direzione del carico esterno non viene modificata durante tutta l'evoluzione della prova.

#### 4. Modelli di evoluzione del danno e triassialità variabile

L'esperienza diretta ha dimostrato che provini sia intagliati che non intagliati subiscono variazioni anche consistenti di raggio del profilo di necking quando vengono sottoposti alla classica prova di trazione (controllo di spostamento, velocità di deformazione media costante). Da questa constatazione, considerando il modello di Bridgman come una buona approssimazione in accordo a quanto riportato in [2-4], emerge che non è del tutto accettabile l'ipotesi di costanza del TF al variare della deformazione plastica fatta in alcuni modelli di evoluzione del danno derivati da quello di Lemaitre [5-8]. Occorrerebbe, infatti, tenere conto anche delle variazioni di triassialità dovute alle modificazioni geometriche intrinseche nel processo deformativo, oltre che a quelle eventuali dovute al carico o alle condizioni iniziali della geometria. Nelle ipotesi di Bridgman, la sensibilità del grado di triassialità rispetto al raggio  $R$  del profilo di necking può essere stimata dall'andamento del grafico di Fig. 6, riferito ad un valore di diametro della

sezione di neck, di ca. 6 mm, che è quello caratteristico della rottura dei provini non intagliati in AISI 304.

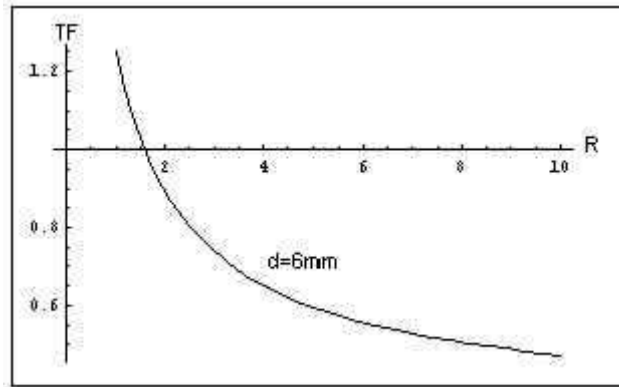


Figura 6: valore del TF al variare del raggio di curvatura,  $d=6\text{mm}$  (rottura AISI 304)

## Atti del convegno

[ [Precedente](#) ] [ [Successiva](#) ]

Versione HTML realizzata da

