

<p>SESSIONE D MECCANICA DEI MATERIALI</p>
---

**STUDIO DELLE CONDIZIONI OTTIMALI DI IDROFORMATURA  
DI TUBI**

S. Papalini <sup>a</sup>, F. Campana <sup>b</sup>, D.Amodio <sup>a</sup>

*a Dipartimento di Meccanica, Università di Ancona ,60131 Via Brezze Bianche*

*b Dipartimento di Meccanica e Aeronautica, Università di Roma “La Sapienza”, 00184 Via Eudossiana, 18*

Il lavoro ha lo scopo di studiare le condizioni di formabilità ottimali nel caso di tubi soggetti ad espansione libera. La letteratura dimostra, infatti, che le curve FLD (forming limit diagram), generalmente impiegate per la progettazione di processo nello stampaggio di lamiera, non sono perfettamente applicabili all'idroformatura di tubi.

Nel lavoro sono analizzate le modalità di comparsa di difetti in relazione ai parametri di processo ed alla geometria iniziale del tubo. La condizione di formatura libera è particolarmente critica in quanto il tubo è privo di vincoli nella parte centrale ed esistono contemporaneamente effetti stabilizzanti ed instabilizzanti dovuti alla mutua interazione tra carico assiale e pressione.

---

## 1. INTRODUZIONE

L'idroformatura di tubi è un processo sempre più diffuso nel campo automobilistico e aeronautico per realizzare strutture di forma tubolare (parti di carrozzeria, condotti di scarico). Con tale tecnologia è possibile formare in un solo pezzo parti di forma complessa, limitando il numero delle giunzioni saldate e riducendo gli spessori rispetto ai pezzi prodotti con tecnologie tradizionali.

L'approccio totalmente analitico al problema è complesso e non risultano in letteratura modelli che, pur con ampie semplificazioni, siano sufficientemente realistici [1 - 2]. Si trovano, invece, numerosi modelli numerici che affrontano, però, lo studio di particolari componenti realizzati per idroformatura ([1], [3 - 4]). Il presente lavoro si prefigge di studiare in modo sistematico, con analisi agli elementi finiti, un processo di formatura libera, essendo così definita la fase precedente al raggiungimento delle pareti dello stampo da parte del pezzo in lavorazione. L'obiettivo è di formare un background di conoscenze per l'ottimizzazione del processo.

I modelli FEM sviluppati nel corso del lavoro sono stati tarati sperimentalmente attrezzando una macchina di prova appositamente concepita. La messa a punto dell'attrezzatura di prova e le modalità di esecuzione del processo sulla macchina sono stati studiati ricorrendo anche alla modellistica numerica.

## 2. TIPOLOGIE DI DIFETTI

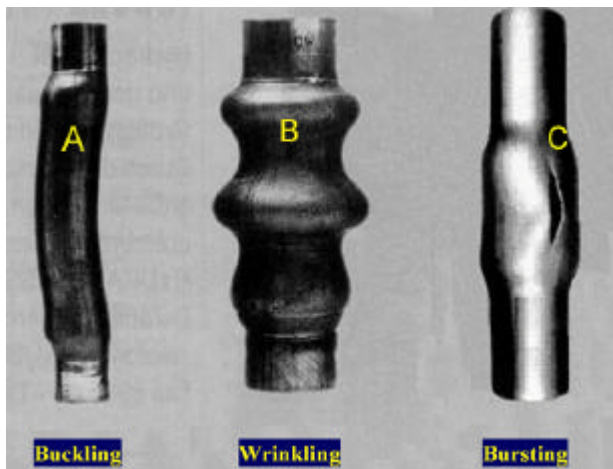


Fig. 1 Tipologie di difetti riscontrati

I difetti riscontrabili nelle prove di questo tipo si raccolgono sotto le seguenti categorie (vedi fig.1):

- Buckling: (fig. 1A) è un fenomeno di instabilità globale del tubo che si verifica principalmente all'inizio del processo a causa di un'eccessiva forza assiale applicata alle teste del tubo. Nel caso in questione la snellezza del tubo è tale da non dar adito a questo fenomeno.
- Wrinkling: (fig. 1B) è un fenomeno di instabilità locale che si può verificare in un qualsiasi momento del processo a causa di un'eccessiva forza assiale di compressione applicata agli estremi del tubo. Questo tipo di difetto, al contrario del buckling, può essere reversibile:
- Bursting: (fig. 1C) è un fenomeno di rottura dovuto ad un eccessivo assottigliamento della parete. Il fenomeno è preceduto dal "necking" di alcune zone della parete.

## 3. LA MACCHINA DI PROVA

La macchina di prova, il cui schema è rappresentato in fig. 2, è costituita da una pressa strumentata per la chiusura dello stampo e da un impianto idraulico per la messa in pressione del tubo e l'applicazione del carico assiale tramite due attuatori idraulici. Il sistema permette di idroformare tubi di varie dimensioni e spessori, con diverse lunghezze libere di prova. La

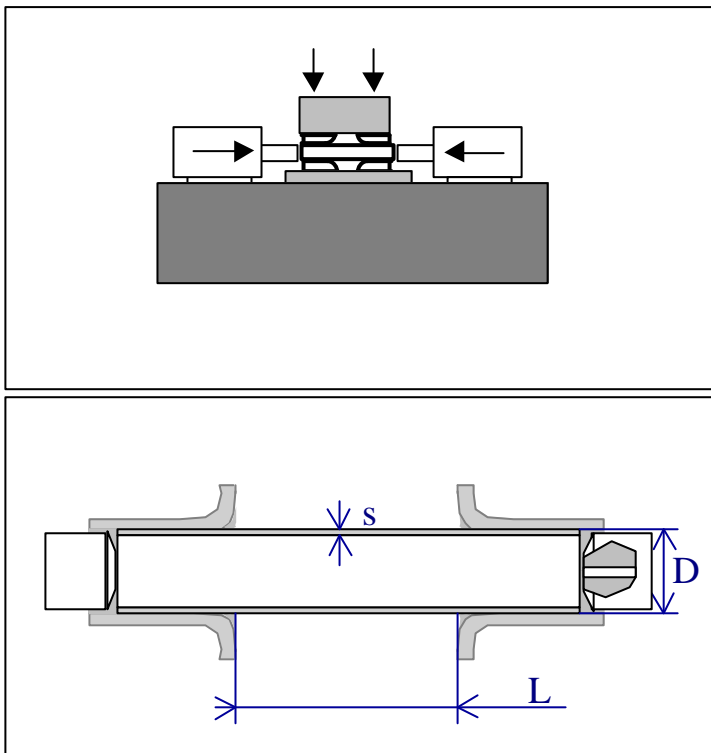


Fig. 2 Schema della macchina di prova

formatura è ottenuta mediante introduzione di acqua in pressione attraverso il foro praticato sullo stelo di uno degli attuatori laterali. Questi ultimi sono degli steli di cilindri oleodinamici aventi due funzioni fondamentali: assicurare la tenuta all'estremità del tubo, assicurare uno stato di compressione assiale nel tubo per fornire materiale alla zona centrale interessata da una espansione circonferenziale. La strumentazione permette di misurare:

- la posizione dei punzoni
- la forza di spinta lorda dal lato testa dei cilindri oleodinamici di spinta
- la pressione idrostatica all'interno del tubo

Il controllo, automatico e/o manuale, permette di agire sui seguenti parametri:

- pressione del liquido di formatura (acqua)
- pressione dell'olio nei cilindri (spinta sugli attuatori).

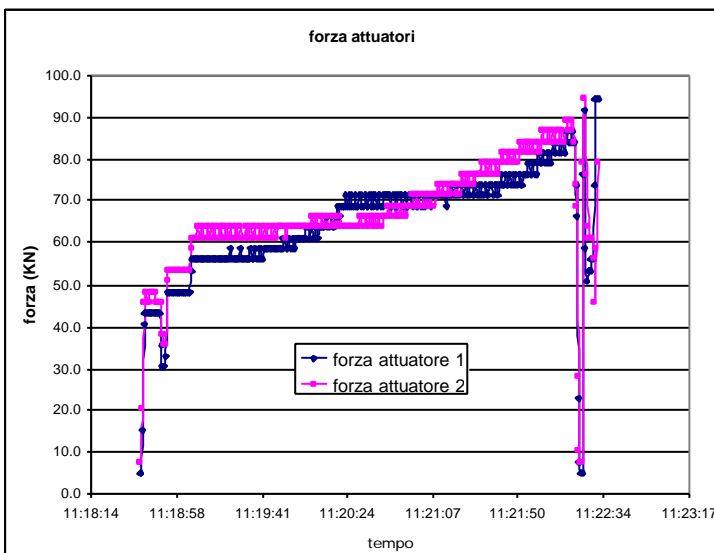


Fig. 3 Curve di forza nel tempo degli attuatori, valori sperimentali

### 3.1 Controllo di forza e di spostamento

Il sistema può essere controllato in forza o in spostamento. Nel caso di controllo di forza risulta particolarmente difficile applicare, come si osserva dalla figura 3, il carico con perfetta simmetria a causa di minime differenze di interazione del tubo con lo stampo. Queste curve sono servite, nelle prove di taratura, come input per il modello, ma non è stato tenuto in conto l'effetto delle

lievi dissimmetrie di carico. Queste provocano anche squilibri nello spostamento delle due estremità del tubo. A questo riguardo è stato giudicato più opportuno eseguire prove

sperimentali e simulazioni numeriche in controllo di spostamento, in quanto tale metodo fornisce risultati più ripetibili ed è numericamente più stabile.

#### 4. IL MODELLO FEM

Nello sviluppo del modello ad elementi finiti, rappresentato nella figura 4, sono state sfruttate le

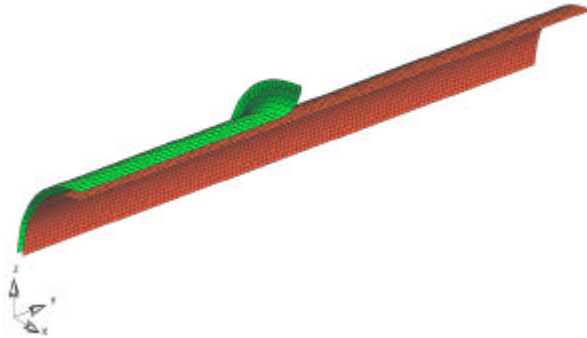


Fig. 4 Il modello FEM

simmetrie possibili. Il tubo e lo stampo sono stati modellati con elementi guscio di 1 mm di lato per il primo, e 1,5 mm per il secondo. Il modello è non lineare per effetto del contatto con attrito tra tubo e matrice, per effetto dei grandi spostamenti e deformazioni finite e per il comportamento plastico del materiale, AISI 309 non ricotto. Il codice di calcolo utilizzato, LS-Dyna 3D, ha una formulazione esplicita.

##### 4.1 La taratura del modello

La taratura del modello è stata effettuata sulla base di dati ricavati da prove sperimentali, eseguite sia in controllo di forza sia di spostamento. Le curve del controllo dei parametri del processo, ricavate sperimentalmente, sono state elaborate, calcolando la media dei valori dei due attuatori ed effettuando uno smoothing delle curve. Le curve così ottenute sono state imposte come storia di carico al modello FEM. Le forze di attrito fra tubo e matrice sono fortemente influenzate dal tipo di lubrificante utilizzato: nel caso in esame è stata usata una sostanza grassa simile ad olio di vaselina. Il coefficiente più opportuno è stato tarato in base ai risultati sperimentali. Il miglior accordo è stato trovato con il coefficiente di attrito 0.18. Gli elementi di confronto fra dati sperimentali e risultati numerici sono i seguenti:

- diametro finale in mezzeria
- lunghezza finale
- pressione finale

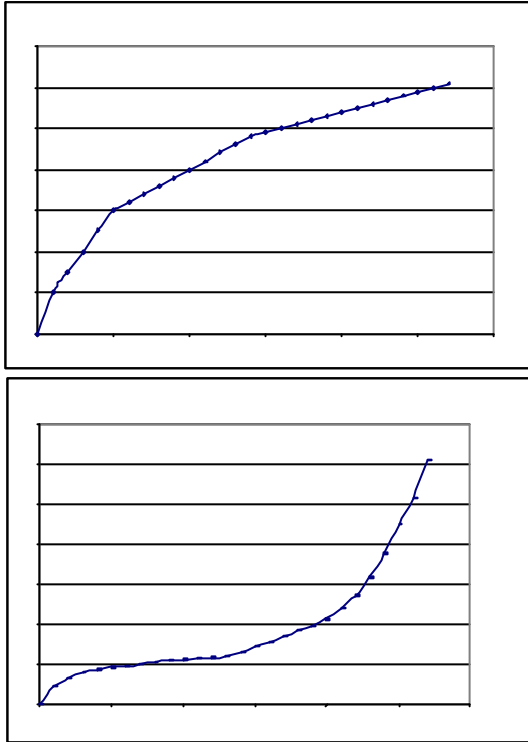
Generalmente i tubi provati in questa fase della campagna sperimentale sono stati portati fino a rottura, quindi è stata utilizzata come confronto anche la corrispondente previsione della simulazione. I tubi utilizzati nella simulazione e nelle prove hanno le seguenti caratteristiche:

Spessore	1,5 mm
Lunghezza tubo	240 mm
Lunghezza afferraggi	57 mm
Lunghezza libera di prova	126 mm
Materiale	AISI 309 non ricotto

La corrispondenza è stata ottenuta per diverse prove sperimentali: di una di queste cui riportiamo i valori qui di seguito.

Valore sperimentale	Valore calcolato
Lunghezza finale = 228.7 mm	Lunghezza finale= 227.8 mm
Diametro esterno tubo = 43.58 mm	Diametro esterno tubo = 42.46 mm
Pressione di scoppio $\cong$ 530 bar	Pressione con $\sigma_{eq} > \sigma_{rottura} = 52.9$ MPa

## 5. DETERMINAZIONE DEL GRAFICO DI FORMABILITÀ



L'analisi è stata condotta con una campagna di prove numeriche che si basano sulle due tipologie di curve pressione - tempo riportate in figura 5. Da queste, che sono definite nel piano pressione - tempo, sono state ricavate due famiglie di curve, definite nel piano pressione - spostamento, che coprono tutto il campo di interesse del processo, in termini di pressione, tempo e spostamento. Ciò è stato ottenuto accoppiando ogni curva pressione - tempo con delle curve lineari spostamento - tempo di varia inclinazione.

Questo processo ha generato una serie di curve definite nel piano pressione - spostamento, rappresentate nelle figure 6 e 7, e di cui è stato studiato l'esito in termini di comparsa dei difetti, identificati come wrinkling, bursting e rottura per wrinkling.

Fig. 5 (5.1 e 5.2) le due tipologie di salita della pressione nel tempo

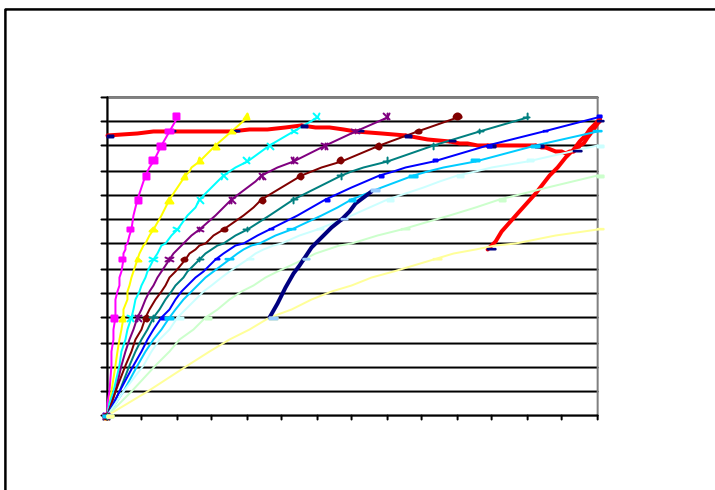


Fig. 6 Curve di tipo 1

## 6. RISULTATI

I risultati sono presentati sul piano pressione - spostamento, sul quale sono messe in evidenza le aree nelle quali si verificano i difetti precedentemente classificati. Le aree sono delimitate da curve che individuano l'insorgenza del difetto durante il processo. Si tratta di una rappresentazione sintetica che involupa tutti i risultati ottenuti, fornendo una indicazione delle zone critiche del processo che ha carattere

generale ed è indipendente dalle simulazioni eseguite, purché queste siano tali da descrivere i campi con sufficiente dettaglio.

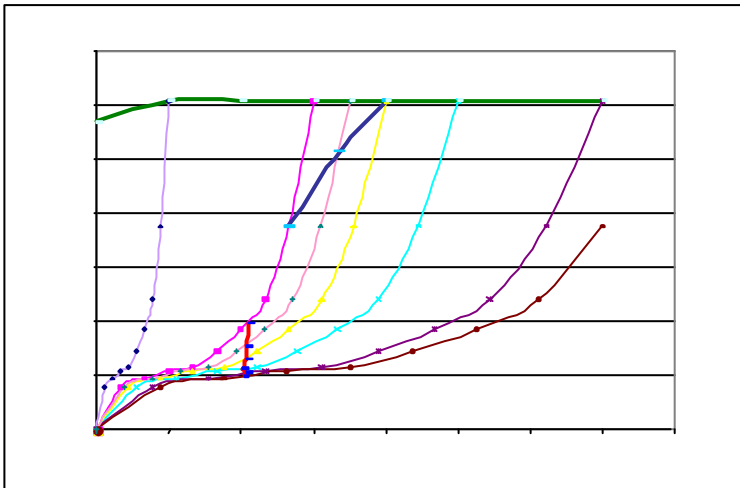


Fig.7 Curve di tipo 2

Le linee di confine dei campi di esistenza dei difetti sono individuate da particolari valori che assumono alcuni parametri di controllo durante la simulazione del processo. In particolare, la formazione di grinze (wrinkling) è rivelata da un parametro cinematico connesso al profilo di spostamento della superficie del tubo. Le grinze costituiscono un difetto che, nello sviluppo successivo del processo, può essere

reversibile o meno. Il parametro cinematico è definito dalla differenza tra lo spostamento radiale della superficie del tubo e lo spostamento del centro. Quando tale differenza raggiunge un valore critico, che si è dimostrato essere dell'ordine di 1/10 dello spessore, si può affermare che ci sia insorgenza del difetto. Tipicamente le zone dove si ha comparsa di wrinkling sono prossime al raccordo con le guide longitudinali.

Nel grafico di fig. 8 il campo del wrinkling reversibile è rappresentato in azzurro mentre in celeste è rappresentato il campo di irreversibilità del difetto.

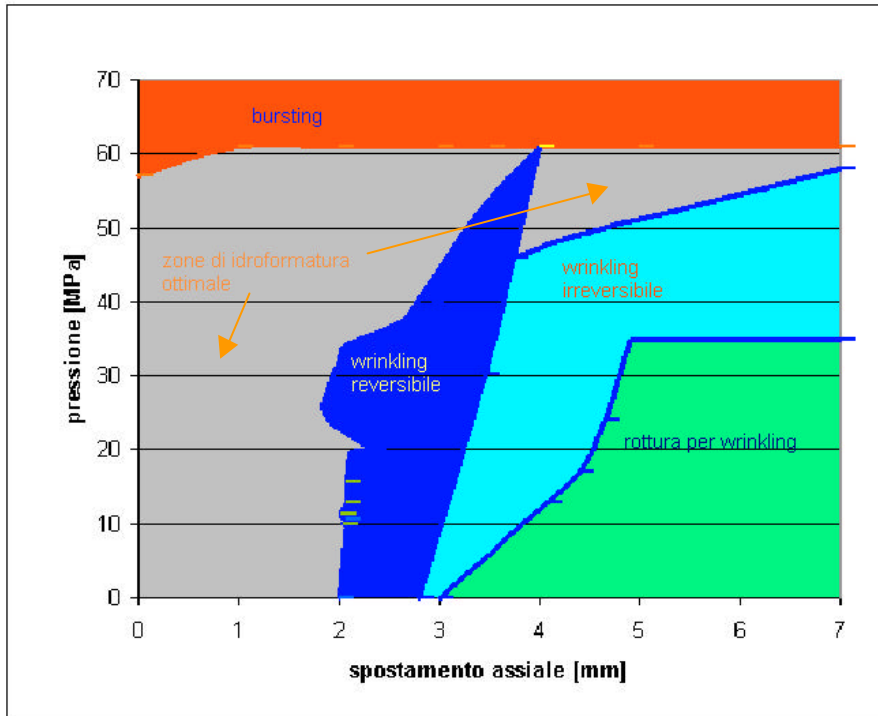


Fig. 8 zone tipiche per la formatura

La rottura per eccessivo assottigliamento locale (bursting) è identificata dal rapporto tra il valore della tensione equivalente raggiunta e quella sperimentale di rottura del materiale. La zona del piano nella quale tale tipo di difetto si verifica è quella rappresentata in rosso. La rottura per

wrinkling, infine, si ottiene per formazione di grinze al cui apice la tensione raggiunge valori superiori a quello di rottura. Questo tipo di difetto è messo in evidenza dalla zona verde del piano.

Le zone di criticità sono una funzione di stato. In altri termini, un qualunque punto nel piano pressione spostamento è critico o meno secondo l'area nella quale si trova, indipendentemente dal percorso seguito.

Il grafico di figura 8 può quindi essere utilizzato per individuare i processi di formatura che non generano difetti, o quanto meno che generano difetti reversibili.

### 6.1 Variazione delle zone caratteristiche in funzione di R/s

L'estensione e la forma delle aree critiche nel diagramma di formabilità dipendono dalla geometria del tubo, rapporto diametro -spessore e diametro-lunghezza e dalle caratteristiche del materiale. Il diagramma di formabilità di fig. 8 è stato ottenuto nel caso:  $\varnothing$  36 x 1,5 mm AISI 309 non ricotto. Il diagramma è stato ottenuto anche in altre condizioni geometriche:  $\varnothing$  32 e  $\varnothing$  40, mantenendo costanti la lunghezza e lo spessore del tubo, la geometria della matrice ed il materiale.

Le prove sul  $\varnothing$  32 x 1,5 mm e sul  $\varnothing$  40 x 1,5 mm, inoltre, sono state fatte utilizzando le curve pressione – spostamento di fig. 5.

Aumentando il rapporto R/s diminuisce il limite di bursting, cioè a parità di spostamento diminuisce il valore di pressione che porta il tubo a esplosione. E' importante fare notare che il  $\varnothing$  32 x 1,5 mm con le curve pressione – spostamento utilizzate, presenta una bassa deformazione radiale perché la pressione non è sufficientemente alta, quindi il limite di bursting

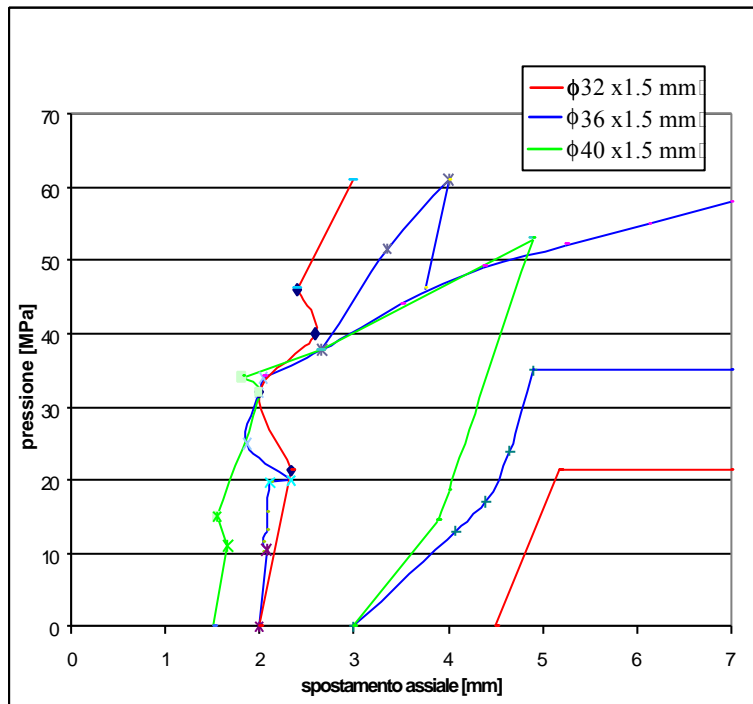


Fig. 9 Confronto tra i limiti di wrinkling e i limiti di rottura per wrinkling, relativamente ai tre tubi considerati.

wrinkling, una volta che si è formato, permane, al contrario di quanto accade per gli altri due tubi, in cui si vede che per alcuni valori di pressione e di spostamento, il wrinkling scompare a fine prova.

Si vede inoltre, sempre dal grafico di fig. 9, che aumentando il rapporto R/s aumenta anche la zona in cui si ha rottura per wrinkling, cioè a parità di pressione la rottura per wrinkling avviene

aumenta.

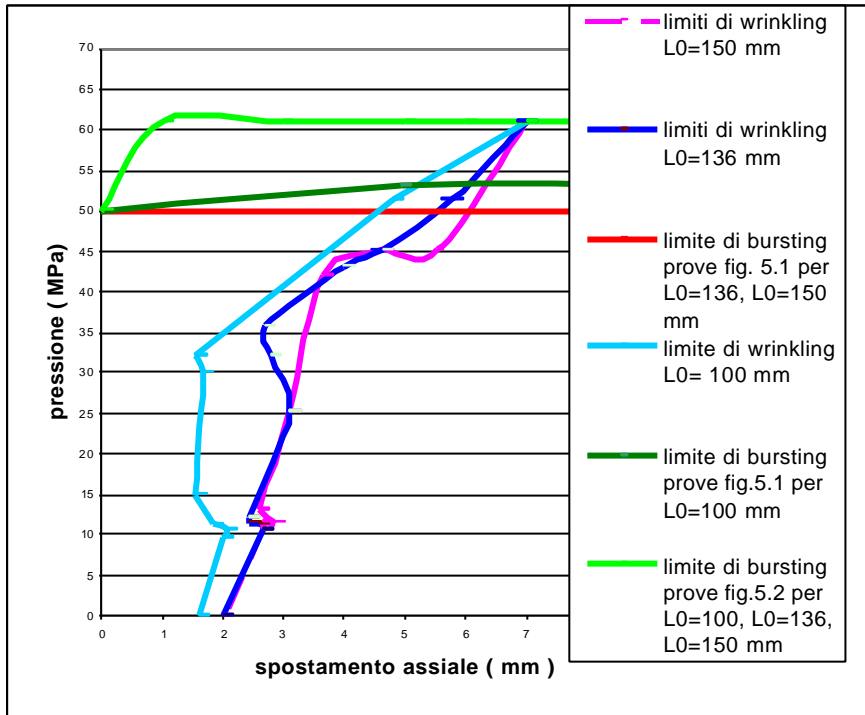
Per quanto riguarda i limiti di wrinkling, sovrapponendo i tre grafici (fig. 9), si vede che, aumentando R/s, questo si manifesta per valori minori dello spostamento.

Inoltre si vede che il  $\varnothing$  36 mm e il  $\varnothing$  40 mm, presentano delle zone in cui il wrinkling scompare, mentre il  $\varnothing$  32 mm non ha questa particolarità.

Questo è dovuto al fatto che i valori di pressione a cui sono state condotte le prove, non riescono a deformare radialmente il  $\varnothing$  32 mm in maniera consistente, per cui il

per valori minori dello spostamento assiale. Si può quindi concludere dicendo che aumentando il rapporto R/s:

- diminuisce il limite di bursting;
- il limite di wrinkling si sposta verso sinistra, cioè a parità di pressione questo si manifesta



per valori minori dello spostamento;

- il limite di rottura per wrinkling si sposta verso sinistra, cioè a parità di pressione la rottura per wrinkling avviene per valori minori dello spostamento assiale.

Fig. 10 confronto tra il comportamento del  $\phi$  36 x 1,5 mm AISI 309 ricotto, con  $L_0 = 100$  mm,  $L_0 = 136$  mm e  $L_0 = 150$  mm.

## 6.2 Variazione delle zone caratteristiche in funzione della lunghezza libera di prova

Sono state svolte delle simulazioni sempre sul  $\phi$  36 x 1,5 mm AISI 309 ricotto, aumentando in questo caso la lunghezza libera di prova da 136 mm a 150 mm.

Quello che si desidera rilevare è la variazione dei limiti di bursting e di wrinkling al variare della lunghezza libera di prova, tenendo però costanti il materiale, lo spessore, il diametro e la lunghezza del tubo. Per maggiore completezza sono state fatte delle simulazioni sullo stesso tubo con una lunghezza libera di 100 mm.

Sono stati determinati i grafici di formabilità del  $\phi$  36 x 1,5 mm AISI 309 ricotto con  $L_0 = 150$  mm e con  $L_0 = 100$  mm, e sono stati sovrapposti al grafico del  $\phi$  36 x 1,5 mm AISI 309 ricotto con  $L_0 = 136$  mm (fig. 10). Ovviamente anche in questo caso per poter determinare i nuovi grafici di formabilità sono state utilizzate le curve pressione – spostamento di fig. 5.1 e 5.2.

Dal grafico di fig. 10 si vede che:

- per le prove fatte seguendo le curve pressione – spostamento indicate in fig. 5.2, il limite di bursting rimane inalterato al variare della lunghezza libera  $L_0$ .
- Per le prove fatte seguendo le curve pressione – spostamento indicate in fig. 5.1, si ha che per  $L_0 = 136$  mm e  $L_0 = 150$  mm il limite di bursting rimane inalterato, per  $L_0 = 100$  mm invece aumenta leggermente. È interessante fare notare che il bulge test ha permesso di

ottenere gli stessi valori di pressione al comparire del bursting per tutte e tre le lunghezze libere, mentre, imponendo oltre alla pressione anche lo spostamento, il tubo con  $L_0 = 100$  mm raggiunge il bursting per valori maggiori di pressione: questo mette in evidenza l'effetto di irrigidimento dato dai vincoli.

- I limiti di wrinkling si spostano verso destra all'aumentare della lunghezza libera: a parità di pressione, aumentando la lunghezza libera, il wrinkling si presenta per uno spostamento assiale maggiore. Il maggiore spostamento radiale della mezzeria del tubo non permette il riscontro del fenomeno se non dopo una corsa maggiore.

## 7. CONCLUSIONI

Il lavoro presentato è partito dall'esigenza di definire delle curve di formabilità applicabili all'idroformatura di tubi analoghe a quelle impiegate generalmente per lo stampaggio di lamiere sottili. Attraverso una campagna di simulazioni numeriche, condotta con un modello FEM tarato in base a risultati sperimentali, e dall'elaborazione dei risultati ottenuti è stato possibile definire nel piano pressione-spostamento le aree critiche del processo di idroformatura libera di un tubo, in funzione della geometria e delle caratteristiche del materiale. Il risultato ottenuto rappresenta, a giudizio degli autori, un primo passo verso la definizione delle curve di formabilità per l'idroformatura dei tubi.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] "Hydroforming of tubes, extrusions and sheet metals", Papers of International Conference on Hydroforming, edito da Klaus Siegert, Volume 1 1999, Volume 2 2001.
- [2] T. Altan, M. Koc, Y. Aue-u-lan, K. Tibari, "Formability and design issues in tube hydroforming", International Conference on Hydroforming, 1999 Fellbach – Stuttgart.
- [3] T. Sokolowski, K. Gerke, M. Ahmetoglu, T. Altan, "Evaluation of tube formability and material characteristics: hydraulic bulge testing of tubes", Journal of Materials Processing Technology 98 (2000) 34 – 40.
- [4] L.P. Lei, B.S. Kang, S.J. Kang, "Prediction of the forming limit in hydroforming processes using the finite element method and a ductile fracture criterion", Journal of Materials Processing Technology 113 (2001) 673 – 679.