STUDIO ED ANALISI DEL PROCESSO TECNOLOGICO DI COLD ROLL FORMING IN AMBIENTE FE

F. Capece[1a], M. Durante[1b], A. Formisano[1c], A. Caraviello[1d]

[1] *Department of Chemical, Materials and Production Engineering, University of Naples "Federico II", Naples*
[a] *capece@unina.it*, [b]*mdurante@unina.it*, [c]*aformisa@unina.it*, [d]*antonio.caraviello@unina.it*

Sommario
La profilatura a freddo (cold roll forming) è una lavorazione per deformazione plastica che consente di realizzare profilati, di una definita sezione e lunghezza, dalla deformazione plastica di una lamiera. Questa è indotta ad attraversare diverse stazioni di rulli deformatori, disposti sullo stesso asse di avanzamento. I banchi di rulli, assemblati in maniera folle nella singola stazione, inducono la deformazione plastica nella lamiera e quindi portano alla configurazione desiderata. Al fine di controllare i parametri geometrici della lamiera deformata durante la profilatura, è stata simulata in ambiente FE la fase finale del processo messo a punto dalla Imi Sud S.r.l. mediante il codice di calcolo non lineare LS-Dyna 971, che ha permesso di analizzare le grandezze di interesse nei differenti step di avanzamento. I risultati ottenuti numericamente sono stati confrontati con quelli sperimentali mediante la misurazione di 5 campioni ottenuti direttamente dal processo tecnologico.

Parole chiave: metal forming; cold roll forming; non-linear finite element analysis

1. Introduzione

Le lavorazioni per deformazione plastica [1] sono particolari processi tecnologici in cui si imprime al materiale metallico la forma voluta sfruttandone le proprietà plastiche, cioè la capacità di deformarsi in modo permanente, sia a caldo che a freddo, quando sottoposto ad una definita condizione dei carico. La deformazione plastica a caldo richiede l'impiego di forze minori rispetto a quella a freddo e si possono avere deformazioni anche notevoli senza rischi di rotture o fessurazioni; viceversa, la deformazione a freddo richiede l'impiego di forze elevate anche per piccole deformazioni, ma in compenso si ottengono prodotti con maggiore precisione dimensionale. I materiali sottoponibili a queste lavorazioni devono avere particolari proprietà tecnologiche quali malleabilità, duttilità e piegabilità. Tali caratteristiche consentono alla struttura di sopportare il carico agente evitando sia fenomeni di rotture che la nascita di difetti nel materiale, i quali non ne permetterebbero il successivo utilizzo. Tali lavorazioni avvengono a volume costante [2], quindi dal materiale di partenza avente una certa forma e dimensione, si ottengono componenti con forme e dimensioni differenti, ma caratterizzate dallo stesso volume del materiale di partenza (al netto del materiale perduto per le ossidazioni che subisce lo stesso, soprattutto alle alte temperature, in piccola percentuale).
La profilatura a freddo (cold roll forming) [3-5] è un processo di realizzazione in continuo di profilati ottenuti dalla deformazione di un nastro di lamiera, il quale passa attraverso varie stazioni di rulli deformatori che gradualmente portano alla configurazione desiderata. La profilatrice è solamente uno dei componenti della linea di profilatura che è costituita da diverse parti collegate tra esse. Un tipico layout produttivo, rappresentato in Figura 1, è caratterizzato dalle seguenti stazioni:

- Aspo
- Gruppo giunzione nastro
- Raddrizzatrice

- Alimentatore
- Pressa meccanica o idraulica
- Introduttore lamiera
- Profilatrice
- Testa di calibratura Taglio (da fermo o alla volata)
- Scarico Impilaggio/imballaggio
- Impianto elettrico e idraulico per l'automazione e gestione della linea (sistema piuttosto complesso)

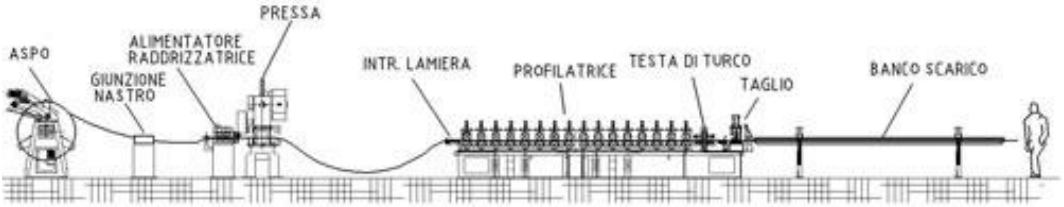

Figura 1: Schema del processo di cold roll forming

Un'ulteriore tipologia, abbastanza frequente, è quella che prevede l'inserimento di un sistema di saldatura per consentire la fabbricazione di profilati di sagoma chiusa. La saldatura può essere ottenuta in vari modi: il più frequente è con l'utilizzo dell'HF che consente di ottenere velocità di produzione elevate, alternativamente si può utilizzare il laser (soluzione più costosa, più flessibile, con produttività più bassa rispetto all'HF). I vari componenti delle linee variano inoltre a seconda delle caratteristiche del materiale da profilare. Fondamentale invece, ai fini della definizione delle caratteristiche della profilatrice, è la sagoma del profilo: semplice con poche pieghe, complesso pur se di forma aperta; chiuso aggraffato, chiuso clinciato, chiuso saldato (saldato ad HF oppure con sistema Laser/TIG).
Le profilatrici si dividono poi in varie categorie:

in funzione delle caratteristiche della trasmissione principale
- con ingranaggi ad innesto diretto
- con ingranaggi rinviati
- con alberi cardanici

in funzione della flessibilità in produzione
- con interasse (tra albero superiore e inferiore) fisso oppure variabile
- con spalle mobili o fisse
- con sistema a cassette per cambio rapido dei rulli
- con controllo idraulico dell'albero superiore
- con alberi porta rulli fissi o mobili
- con o senza sistema di controllo/regolazione dell'albero porta rulli superiore

in funzione delle caratteristiche del prodotto
- con alberi a sbalzo
- con punta e contropunta
- con numero di teste variabile approssimativamente tra 6 e 36
- con alberi porta rulli di diametro variabile tra 35 e 120mm
- con o senza gruppi intermedi

Vi sono una serie di attrezzature specifiche, indispensabili per ottenere un determinato profilato. La linea di profilatura in quanto tale non produce alcun prodotto se non opportunamente attrezzata di serie di rulli ed eventuali stampi di punzonatura (qualora il profilo debba essere punzonato o forato).
La prima operazione, la più importante, consiste in una appropriata progettazione dei rulli, considerando la geometria che si desidera realizzare. I rulli sono poi realizzati tramite lavorazione a controllo numerico utilizzando materiali ad elevata durezza a seconda del tipo di materia prima da profilare. Segue poi il collaudo che richiede accurate operazioni di messa a punto per giungere alla

sagoma di profilo ed alle tolleranze desiderate. Successivamente, viene collaudata l'automazione della linea per l'ottimizzazione della produttività, la corrispondenza ai parametri stabiliti e la valutazione delle funzioni nel rispetto delle regole di sicurezza.
Nello studio effettuato si è analizzata, mediante simulazione agli elementi finiti, una fase specifica di un processo di roll forming condotto presso l'azienda Imi Sud S.r.l. di Casoria (Na): la deformazione plastica subita nell'ultimo step di avanzamento del processo, ossia prima che il prodotto realizzato venga tagliato e riposto sul banco di carico. In tale fase il semilavorato, avente una sezione circolare, viene forzato ad attraversare 4 banchi di rulli, variando la condizione geometrica della sezione da circolare a quadrata. Mediante tale fase del processo l'azienda ha la possibilità di commercializzare barre a sezione quadrata, aventi differenti dimensioni e spessori.

2. Modello FE del processo di cold roll forming di un tubo in acciaio in ambiente LS-Dyna

Al fine di valutare i parametri geometrici di un semilavorato durante la fase di profilatura, è risultato necessario riprodurre, in ambiente FE [6-11], la fase finale del processo tecnologico utilizzato dalla Imi Sud S.r.l.. In tale processo, una barra di acciaio a sezione circolare, avente un diametro esterno di 38 mm ed uno spessore di 2.7 mm, passa in 4 banchi di rulli che inducono una deformazione plastica nel semilavorato. Il prodotto finale consta di una barra a sezione quadrata avente le seguenti dimensioni: 30 mm x 30 mm x 3 mm.
Il materiale, oggetto del processo di cold roll forming, è un tipico acciaio fornito in laminati: S235JR+AR il quale, dalla EN 10025-2 del 2004 (condizioni tecniche di fornitura per acciai da costruzione non legati), corrisponde alla classe di equivalenza del materiale Fe360B. In Tabella 1 si riportano le principali caratteristiche meccaniche del materiale utilizzato.

Tabella 1: Caratteristiche meccaniche del Fe360B

Proprietà Fe360B	**Valore**	**Unità**
Tensione di snervamento	265	MPa
Modulo elastico	210	GPa
Carico di rottura	390	MPa
Elongazione a rottura	38	%
Modulo di Poisson	0.3	-
Densità	7850	(kg/m^3)

Al fine di simulare il processo, è risultato fondamentale riprodurre la geometria dei rulli presenti nello stabilimento produttivo dell'Azienda. I rulli sono assemblati con un gioco radiale di 1 mm nel singolo banco e risultano folli rispetto all'avanzamento del semilavorato. In Figura 2 si riportano due dei quattro differenti banchi utilizzati nel processo di roll forming.

Figura 2: Banchi di rulli utilizzati dalla Imi Sud Laminazione S.r.l.

Partendo dai disegni costruttivi dei singoli rulli presenti nel processo, gentilmente forniti dal costruttore, è stato costruito il modello 3D, riportato in Figura 3, dei 4 banchi mediante il software CAD parametrico-variazionale CATIAV5R21.

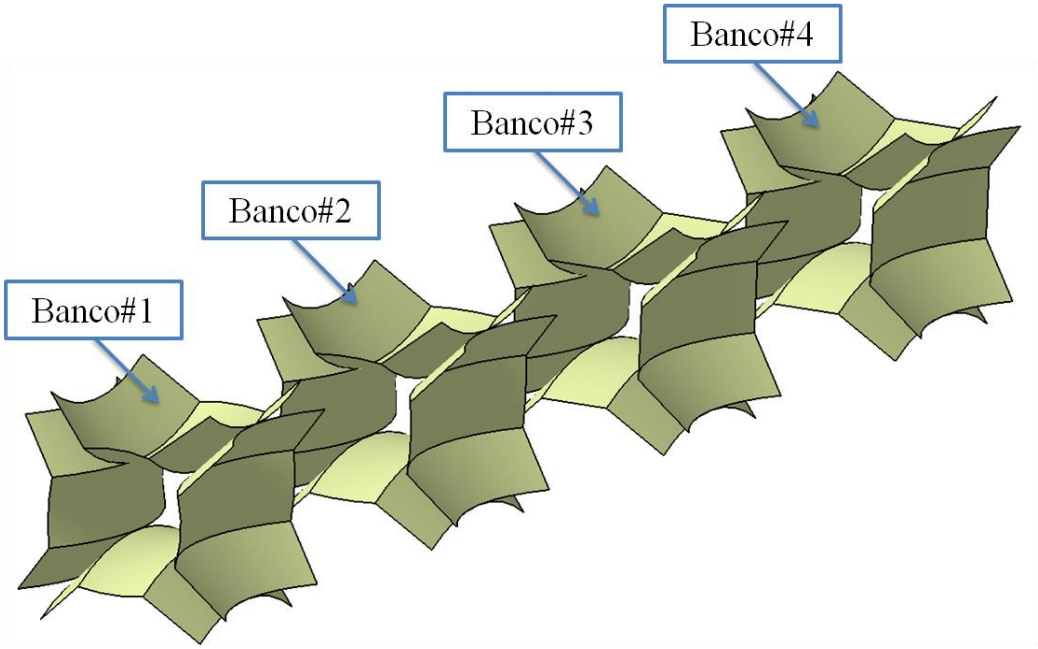

Figura 3: Banchi di rulli in ambiente CAD

È bene evidenziare che le geometrie dei rulli relative al terzo e quarto passaggio risultano uguali tra loro. Il motivo è riscontrabile nell'esigenza di garantire la calibratura nella fase terminale del processo. Poiché il processo tecnologico, simulato mediante il software Ls-Dyna 971, prevede il contatto tra il semilavorato e la superficie esterna dei singoli rulli, sono state modellate le sole superfici in questione. Inoltre, al fine di rendere verosimile il processo, i rulli sono stati opportunamente dotati di 1mm di offset radiale al fine di simulare la presenza del gioco. Importate le superfici CAD, in formato IGES, nel software LS-Prepost 3.0, utilizzato per la fase di preprocessamento, è stato costruito il modello FE del processo (Figura 4).

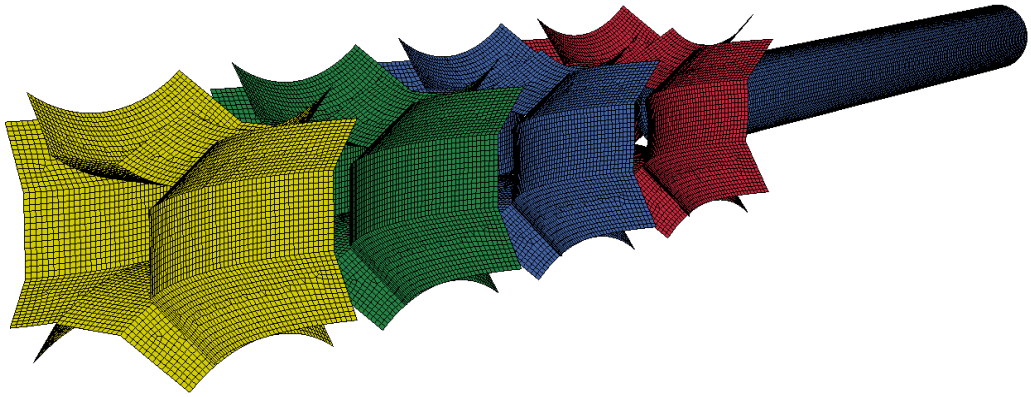

Figura 4: Modello FE del processo di cold roll forming

Al fine di simulare il comportamento del semilavorato nei diversi stadi di avanzamento, lo stesso è stato modellato con elementi SOLID (brick ad 8 nodi) con un materiale avente comportamento plastico: MAT24_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY; viceversa, le superfici dei rulli sono state modellate con elementi SHELL (quad a 4 nodi), caratterizzate da un MAT_RIGID. Ai nodi disposti all'estremità posteriore del semilavorato è stata assegnata una legge di spostamento lineare, che garantisce uno spostamento di 1000 mm in 10 secondi.

Al fine di simulare lo scorrimento relativo tra il semilavorato ed i rulli è stato definito il contatto CONTACT_CONSTRAINT_NODES_TO_SURFACE utilizzando i nodi della superficie esterna del semilavorato (slave) e le superfici identificative dei rulli (master), limitando il coefficiente di attrito statico e dinamico ad un valore ridotto (FD=FS=0.05) al fine di tenere in considerazione che i rulli ruotano folli. L'analisi numerica è stata effettuata mediante il codice di calcolo non lineare LS-Dyna 971.

3. Analisi dei risultati

In Figura 5 si riporta l'analisi FEM relativa ai 5 fasi di avanzamento di un concio di semilavorato nel processo tecnologico. Come si evince, il semilavorato in acciaio subisce una deformazione plastica grazie alla presenza delle stazioni di rulli, che comporta una variazione geometrica della sezione trasversale. Dall'analisi FEM ne discende che il profilato parte da una sezione trasversale avente una configurazione circolare per poi giungere, nella fase finale del processo, ad un profilato a sezione quadrata.

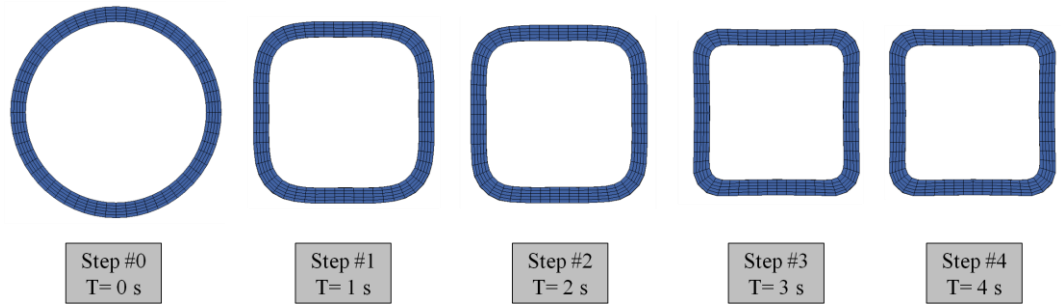

Figura 5: Simulazione FEM dei 5 step di avanzamento del semilavorato nel processo tecnologico

In Figura 6 si riporta la distribuzione di pressione spaziale (espressa in MPa) che grava sul semilavorato nell'istante temporale pari a 4.3 secondi. La scelta di tale istante temporale garantisce il passaggio del semilavorato in tutti i 4 banchi di rulli.
Dall'andamento si evince che nel primo tratto, dove il semilavorato cambia sia forma che dimensione della sezione, la distribuzione di pressione è più marcata, avendo una forma tipicamente a parabola. Tale andamento è inoltre giustificato proprio dalla configurazione geometrica dei rulli.
Nei passaggi due e tre la distribuzione di pressione diventa simile mentre nel quarto è praticamente nulla, avendo quest'ultimo una geometria dei rulli uguali alla precedente.

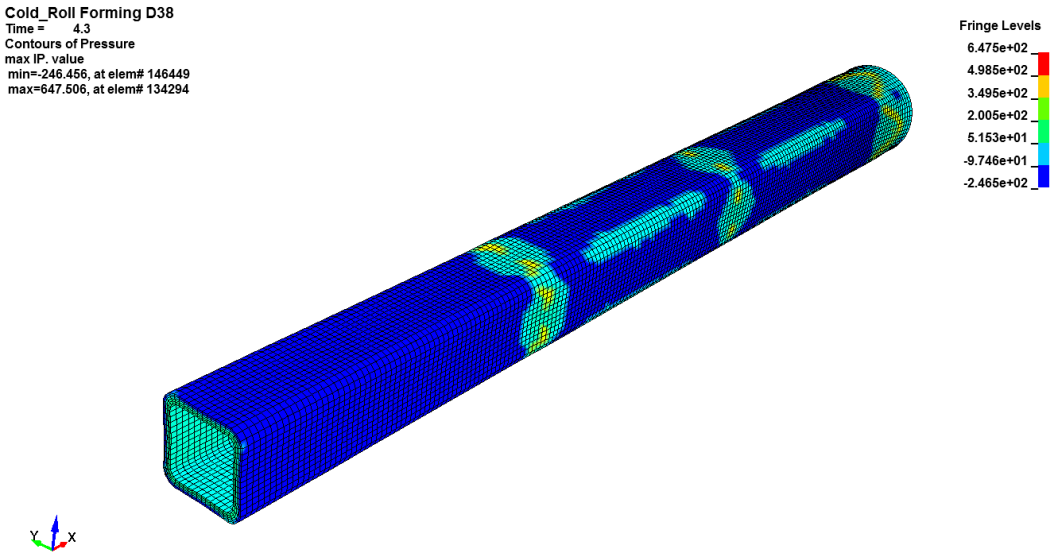

Figura 6: Distribuzione di pressione sul semilavorato al tempo 4.3s

Si riporta, in Figura 7, la distribuzione spaziale della sollecitazione equivalente di Von Mises (espressa in MPa), riscontrata nello stesso istante temporale. Dall'analisi è possibile esaminare le zone della semilavorato interessate al processo di formatura. Come si nota, vi sono diversi punti in cui il semilavorato ha una sollecitazione equivalente di Von Mises superiore alla sollecitazione di snervamento (265 MPa), indi ha subito una deformazione plastica.

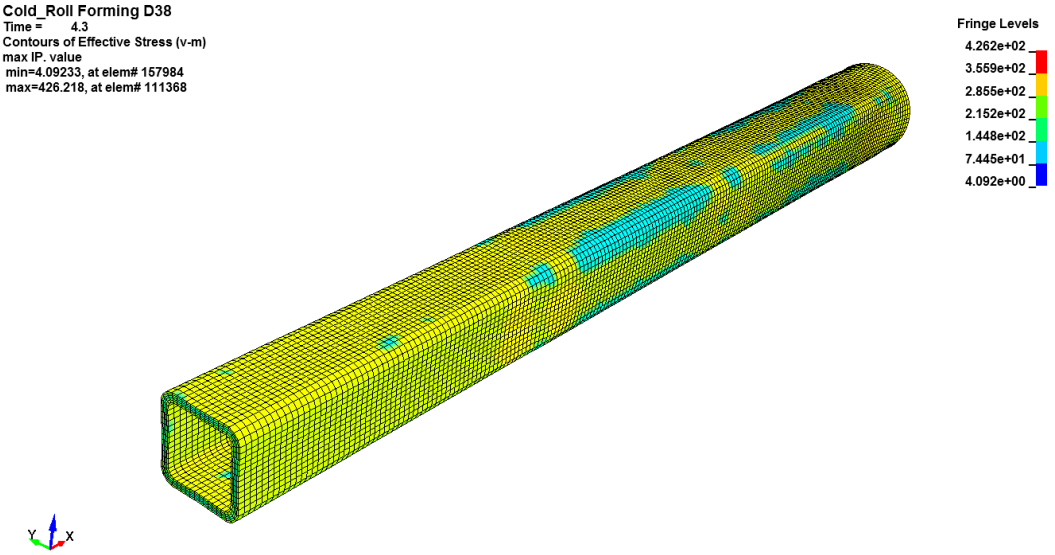

Figura 7: Distribuzione della sollecitazione di Von Mises sul semilavorato al tempo 4.3s

Si analizza di seguito come varia la dimensione esterna caratteristica della semilavorato, diametro nella fase iniziale e lato nella fase finale, durante il processo. Come si nota dall'indagine FEM (Figura 8), la simulazione parte da una barra di diametro iniziale pari a 38 mm per poi giungere ad una barra a sezione quadrata avente lato di 29.4 mm.

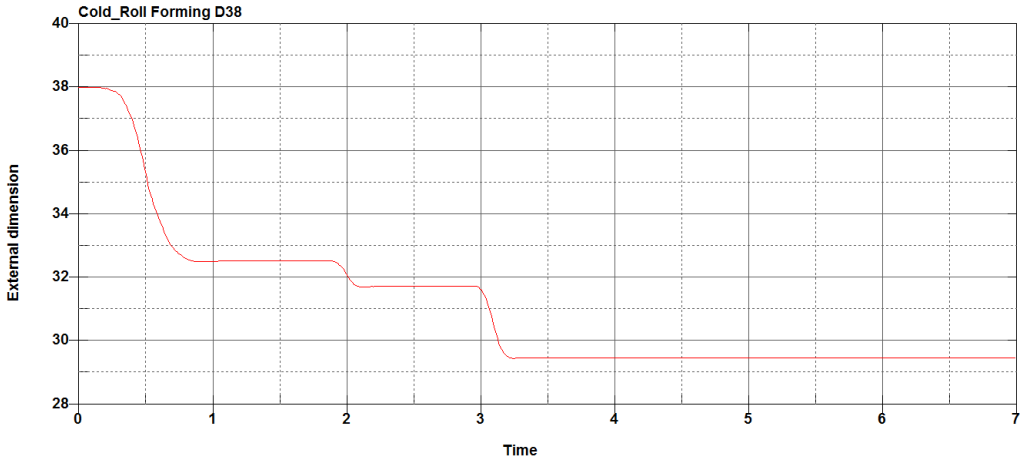

Figura 8: Andamento della dimensione esterna caratteristica nel processo

Allo stesso modo, in Figura 9, è possibile effettuare un'indagine sullo spessore; la barra parte da uno spessore di 2.70 mm per giungere a 2.79 mm.

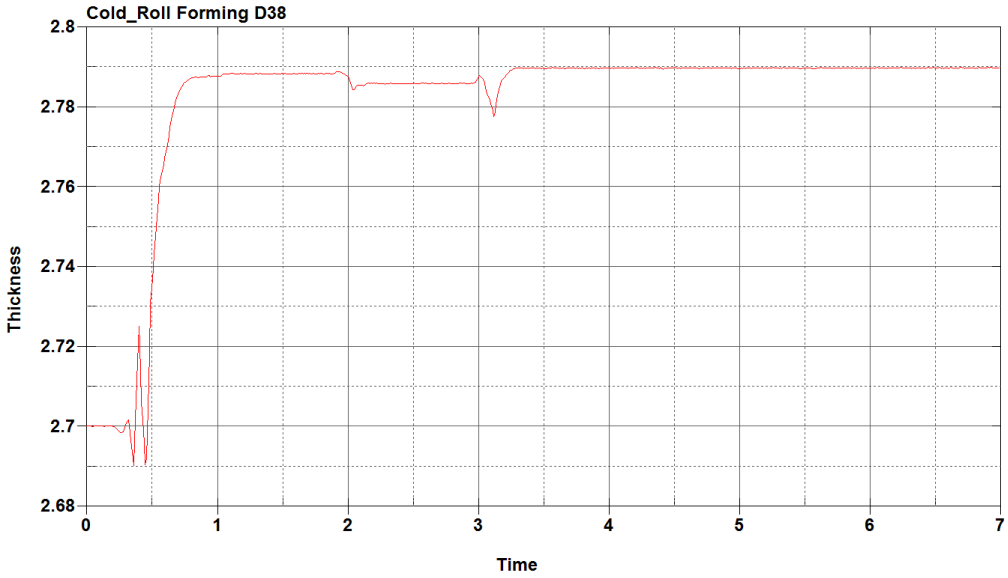

Figura 9: Andamento dello spessore nel processo

Al fine di validare il modello FE, è stata condotta una comparazione dei valori numerici con quelli ottenuti da misurazioni sperimentali. Il riferimento utilizzato consta di 5 provini derivanti dai diversi step del processo tecnologico. I campioni sono stati ottenuti tagliando il semilavorato in profilatura in 5 sezioni differenti e lucidando la superficie esterna degli stessi. Ciò consente di misurare le grandezze geometriche di interesse di ogni step di avanzamento. In Figura 10 si riportano le immagini dei provini, gentilmente concessoci da IMI Sud S.r.l.

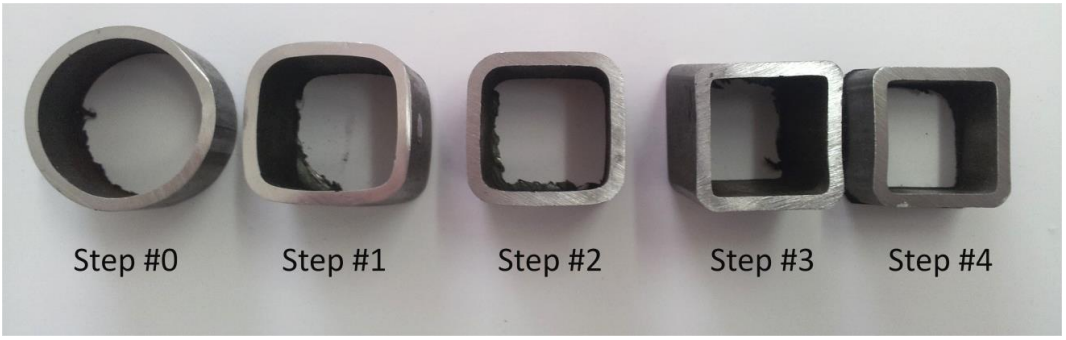

Figura 10: Provini forniti da IMI Sud S.r.l.

Dalla misurazione sperimentale, svolta presso il DICMAPI, sono state ricavate le dimensioni caratteristiche dei provini, analizzando sia la dimensione esterna che lo spessore per ogni step di avanzamento nel processo. La Tabella 2 riporta la misura dei valori geometrici ottenuti sia sperimentalmente che numericamente. Nella stessa tabella vi è inoltre presente lo scostamento percentuale tra gli stessi.

Tabella 2: Caratteristiche geometriche, sperimentali e numeriche, dei 4 step di processo

Step	Valori sperimentali [mm]		Valori numerici [mm]		Scostamento (%)	
	Dimensione esterna	Spessore	Dimensione esterna	Spessore	Dimensione esterna	Spessore
Step #0	38	2.7	38	2.7	0	0
Step #1	33.5	2.8	32.5	2.787	2.98	0.46
Step #2	32	2.8	31.7	2.785	0.93	0.53
Step #3	30	2.8	29.4	2.789	2	0.39
Step #4	30	2.85	29.4	2.79	2	2.1

Dal confronto dei risultati si denota una correlazione molto spinta dei dati numerici rispetto a quelli ottenuti sperimentalmente. I valori di scostamento percentuale, sia della dimensione esterna che dello spessore, per ogni step di avanzamento, non eccedono il 3% di errore. Il lieve scostamento geometrico del semilavorato nel primo step di avanzamento (2.98%), rispetto a quello ottenuto nel processo di produzione, potrebbe essere dovuto sia al modello numerico che simula il comportamento del materiale (MAT24_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY) che al gioco presente tra i rulli. Tale parametro, non valutabile sperimentalmente in modo diretto, influisce anche sui parametri energetici della lavorazione. Dall'analisi effettuata si evince la validità del modello FEM per simulare il processo di cold roll forming.

4. Conclusioni

Al fine di valutare i parametri geometrici di un semilavorato nel processo tecnologico di cold roll forming, è stata effettuata una simulazione FEM dello stesso processo. La simulazione è stata condotta utilizzando il codice di calcolo non lineare LS-Dyna 971, che ha permesso di analizzare le grandezze geometriche di interesse nei differenti step di avanzamento del semilavorato. I risultati ottenuti numericamente sono stati confrontati con quelli sperimentali mediante la misurazione di 5 campioni ottenuti direttamente dal processo tecnologico. Dalla misura dello scostamento percentuale si evince la validità del modello FEM. Nell'applicazione di interesse lo scostamento massimo è del 3%; ciò denota un'ottima affidabilità dei risultati numerici.
Come sviluppo del lavoro di ricerca verrà effettuata un'analisi numerica per indagare sia i ritiri elastici che subisce il semilavorato che le forze scambiate variando lo spessore iniziale (2 mm, 2.5 mm, 3 mm, 3.5 mm). Lo studio consentirà di identificare una relazione analitica che leghi tali grandezze.

Bibliografia

[1] C. Bieber, C. Bjelkengren, J. Ryu, A. Varga, "Plastic deformation in materials processing", 2006.
[2] T. Hirouchi, T. Takaki, Y. Tomita, "Deformation simulation under constant volume condition using phase field crystal method", 2008, XXII ICTAM, Adelaide, Australia.
[3] P.Eng. Dako Kolev, "Roll Forming General Overview", Kolev Industries, UK, 2004.
[4] Wagoner, R.H., & Chenot, J.L., "Metal Forming Analysis", Cambridge University Press, Cambridge, UK, (2001), pp. 208-209.
[5] S. Kalpakjian, "Manufacturing Engineering and Technology", 3rd edition, Addison-Wesley Publishing Company, New York, 1995, pp. 357-359.
[6] N. Kim, S. Oh, "Analysis Tool for Roll Forming of Sheet Metal Strips by the Finite Element Method", 1999, Annals of the CIRP 3rd edition, pp. 235-238.
[7] F-C Jan, O. Onipede Jr., "Simulation of Cold Roll Forminf of Steel Panels".
[8] M.A. Sheikh, R.R. Palavilayil, "An assessment of finite element software for application to the roll-forming process", 2006, Journal of Materials Processing Technology 180 (2006) 221–232.
[9] W.J.T. Daniel, P.A. Meehan, "Implicit finite element study of non-steady effects in cold roll forming", 2007, 5th Australasian Congress on Applied Mechanics.
[10] A.R. Muñiz, "Non-linear finite element method simulation and modeling of the cold and hot rolling processes", 2007, Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, pp. 88-137.
[11] A. Tajyar, K. Abrinia, "FEM Simulation of Reshaping of Thick Tubes in different passes", 2009, International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol. 1, No. 5.