

## Metodo innovativo per calcolare le curve di laminazione nelle operazioni di laminazione attraverso la simulazione numerica

A. Sartori, P. Lasne, M. Gabrielli

*Il “segreto” di un efficiente processo di produzione di un anello laminato sta nella capacità di laminare il pezzo mantenendo centrato l’anello e di far crescere il diametro in maniera controllata, evitando ovalità e difetti di forma. Nel processo reale questo lavoro è svolto direttamente dal controllo numerico che agisce sull’avanzamento del mandrino, sulla rotazione dei coni e sul posizionamento dei rulli di centratura. Il tutto è svolto in modo da seguire le curve di laminazione impostate dall’operatore sul supervisore della macchina. La macchina nel seguire e rispettare le curve impostate monitora il processo e la forma dell’anello attraverso alcuni sistemi di misurazione laser e sensori di carico. Tali dati vengono usati anche per correggere la cinematica degli utensili in funzione dei dati acquisiti in tempo reale. Negli ultimi anni sono stati utilizzati numerosi metodi per simulare questo processo, sempre con il limite che le curve di laminazione debbano essere inserite manualmente dall’utilizzatore del software di calcolo e non possano cambiare durante la simulazione. Questo articolo è un riassunto del lavoro fatto da Muraro Spa assieme a Transvalor S.A., l’autore del software FEM Forge® ed Enginsoft Spa, distributore per l’Italia del software Forge® e centro di competenza nella simulazione del processo di produzione. Lo scopo di questo lavoro era sviluppare un software in grado di leggere in tempo reale, durante il calcolo, la posizione di alcuni sensori virtuali presenti nella simulazione (laser virtuale di misura) e trasmettere informazioni come la posizione degli assi, le forze esercitate dalla macchina al pezzo e altri parametri del processo ad una routine (black-box) esterna. Quest’ultima è in grado di calcolare le correzioni della cinematica di tutti gli assi della macchina, riscrivere queste correzioni direttamente in Forge® e proseguire il calcolo della simulazione numerica. Questo metodo permette, durante la simulazione, di correggere ad ogni step di calcolo la cinematica degli assi impostati nella simulazione, come realmente succede nelle macchine reali di laminazione degli anelli. La logica della black-box di pilotaggio della simulazione è la stessa usata nella macchina reale per pilotare gli assi. La differenza sta nel fatto che nella macchina reale tale software di pilotaggio risiede nel CNC della macchina. Questo approccio garantisce che i risultati ottenuti nella simulazione siano molto più vicini a quelli reali. Il prossimo passo del lavoro sarà estendere l’applicazione di questa interfaccia ad altri modelli di macchine speciali, ma anche a differenti tipi di presse normalmente usate per deformare materiali metallici o non metallici.*

**Parole chiave:** Numerical simulation - Plastic deformation - Rolling - Forging

### INTRODUZIONE

La deformazione dei materiali metallici attraverso il processo di laminazione può essere a freddo in caso di piccole dimensioni o a caldo nel caso di anelli con diametri o altezze di alcuni metri. Il processo permette di raggiungere

prodotti assial simmetrici di alta qualità. Viene applicata una leggera deformazione molto localizzata sulla superficie del pezzo, in maniera progressiva durante lo svolgimento del ciclo. L’azione rotante del piatto laminatore assieme al complesso controllo di tutti gli altri assi rende possibile l’ottenimento della forma desiderata, partendo da uno sbizzato assial simmetrico ottenuto opportunamente attraverso operazioni di ricalcatura, punzonatura e tranciatura alla pressa. L’obiettivo di ogni laminatore è ottenere il pezzo finale senza difetti, come ad esempio i “fish-tail” o le mancanze di materiale sul profilo del pezzo. Tali difetti sono da evitare ed inoltre è importante realizzare il componente laminato utilizzando tolleranze di lavorazione

**Angelo Sartori**  
Muraro Spa, Italy

**Patrice Lasne**  
Transvalor S.A., France

**Marcello Gabrielli**  
Enginsoft Spa, Italy

e sovrametalli il più stretti possibile, in modo da ridurre al minimo le successive lavorazioni meccaniche che sono solitamente molto costose. Per ottenere il massimo risultato dal ciclo di laminazione è necessario agire anche sul ciclo di preparazione dello sbizzato, ottimizzandone la geometria di partenza. Le curve di laminazione permettono alla macchina di laminare lo sbizzato prodotto e ottenere l'anello finale voluto. Tali curve sono parte fondamentale del ciclo.

## COME FUNZIONA IL LAMINATOIO RADIALE ASSIALE

La cinematica delle macchine di laminazione non è semplice: è necessario garantire un bilanciamento delle azioni di deformazione ottenute dal calibro radiale (mandrino e piatto laminatore) e dal calibro assiale (i due coni). Contemporaneamente è importante tenere centrato l'anello applicando le opportune correzioni sui rulli centrotori, rotazione dei coni, ecc.

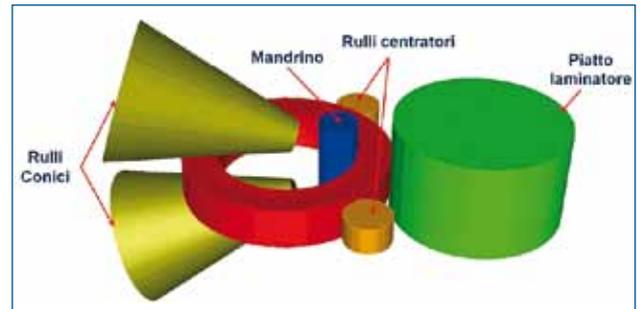
Le macchine sono dotate di un sistema software di controllo, mediante il quale l'operatore imposta le curve di laminazione che la macchina cerca di seguire durante la deformazione dell'anello.

Vengono attuati continui aggiustamenti sulla cinematica degli utensili, basandosi su informazioni ricevute da una serie di sensori in grado di rilevare, in tempo reale, le dimensioni e la forma del particolare in lavorazione. Possiamo considerare il sistema di controllo della macchina come una "black-box" nella quale ogni produttore inserisce tutto il proprio know-how, offrendo all'utilizzatore finale un'interfaccia utente più o meno sofisticata, in grado di consentire l'utilizzo efficiente della propria macchina. Sebbene la forma dei profili ottenibili sia molto varia, l'assunzione comune è quella di far riferimento ad una sezione equivalente rettangolare o quadrata, sulla quale vengono impostati i percorsi di deformazione radiale ed assiale. La macchina agisce ma soprattutto reagisce a quanto accade nel pezzo in deformazione, applicando una serie di correzioni in retroazione, in modo da poter completare il ciclo produttivo secondo i parametri impostati e previsti.

Non usando un approccio di progettazione del ciclo basato sulle simulazioni numeriche, per ottimizzare il risultato finale è necessario realizzare nella pratica una serie di pezzi campione e tarare le curve di laminazione per tentativi successivi. Tale metodologia di ottimizzazione del ciclo prevede l'uso di materiali, macchine e risorse. La complessità del processo e delle variabili in gioco non permette di pre-calcolare tutto manualmente, specialmente se si parla di anelli aventi profili sagomati.

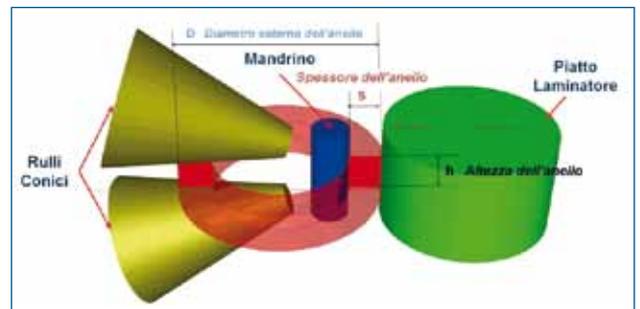
## METODO TRADIZIONALE FEM

Nel corso degli anni sono stati tentati diversi approcci per simulare il processo di laminazione circolare. Si è partiti con approcci semplicistici sulla sezione o spezzone 3D, per arrivare ad approcci full 3D in grado di considerare



**Fig. 1 - Processo di laminazione**

*Fig. 1- Ring-rolling process*



**Fig. 2 - Dimensioni dell'anello durante il processo di laminazione**

*Fig. 2 - Ring dimensions during ring-rolling process*

l'azione di tutti gli utensili. Il miglioramento dell'efficienza dei solutori di calcolo, della qualità delle mesh, del calcolo dei contatti e della potenza delle workstation o cluster hanno consentito risultati sempre di maggior qualità nel calcolo FEM vero e proprio. Parimenti nei diversi software sono stati implementati vari sistemi per guidare la cinematica degli utensili, in modo da riprodurre in virtuale le opzioni presenti nella macchina reale, in primis le curve di laminazione. Si è ottenuto quindi un pacchetto software in grado di prevedere cosa accade, impostando un set di parametri di processo che determinano una certa azione di tutti i componenti della macchina sul materiale in deformazione. Il limite dell'approccio è legato al fatto che, sebbene le cinematiche possano essere legate alle misurazioni effettuate sul diametro e sulle altezze del pezzo in deformazione, le correzioni da adottare devono comunque essere pre-definite nel software prima di iniziare la simulazione. Il risultato ottenibile con tale approccio è però molto semplificato rispetto alla logica reale di funzionamento di una macchina di laminazione. Il processo della laminazione circolare è un processo dinamico e molto sensibile alle variazioni che si effettuano durante il ciclo. La macchina reale esegue delle modifiche alla cinematica degli assi in modo automatico e in funzione di ciò che rileva dai propri sensori. Il software di simulazione numerica deve essere in grado di replicare fedelmente tale logica per poter simulare il processo reale, altrimenti i risultati calcolati potrebbero discostarsi dalla realtà.

## PARTICOLARI ASPETTI DEL PROCESSO REALE DIFFICILI DA ESSERE CONSIDERATI NEL FEM

Se parliamo a titolo di esempio di anelli la cui altezza è superiore rispetto allo spessore, la maggior deformazione applicata al materiale si ha in corrispondenza della sezione tra piatto laminatore e mandrino. I coni agiscono per deformare in senso assiale l'altezza del pezzo mentre i centratori operano per tenere centrato o scentrato (secondo quanto programmato) l'anello durante il ciclo. Il materiale che entra nel calibro radiale ha una sezione necessariamente più grande di quella di uscita e questo determina un primo effetto di ovalizzazione dell'anello. Molto spesso le logiche dei software FEM considerano il centro di massa come riferimento per la centratura dell'anello. Questo riferimento in pratica non corrisponde al centro di rotazione dell'anello e non viene nemmeno usato nelle macchine reali e relative logiche di comando per pilotare il movimento dei centratori. La macchina reale e la simulazione effettuano dunque la centratura in modo diverso e ciò comporta che le forze di centratura calcolate risultino alterate rispetto alla realtà. Nelle macchine più sofisticate le logiche di controllo dei centratori possono prevedere due tipi di funzionamento: a controllo di forza o di posizione. La scelta tra i due metodi varia in funzione della situazione di contatto rilevata istante per istante. Queste considerazioni sono molto importanti nel caso si stia laminando anelli a sezione sagomata internamente e/o esternamente. Gli anelli sagomati spesso sono laminati volutamente fuori-centro e lo scopo di tale procedura è di facilitare la sagomatura del profilo voluto. Il software del laminatoio permette, infatti, di programmare il disassamento dell'anello in funzione del proprio diametro. L'entità del disassamento e la direzione permette al materiale di entrare più in contatto con il profilo del piatto laminatore o del profilo esterno del mandrino. Solo la gestione integrata dei centratori e dei coni assiali permette di realizzare quanto descritto.

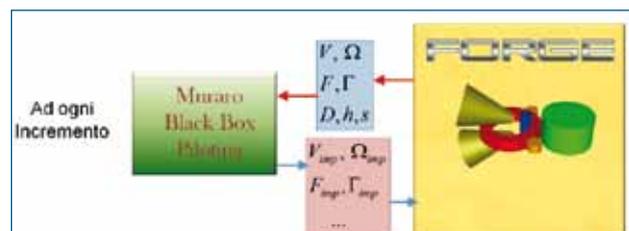
## APPROCCIO INNOVATIVO

Muraro SpA è un costruttore di presse ed impianti completi con sede a Zermeghedo (VI) ed ha scelto il software FEM Transvalor Forge®, installandolo su un cluster di calcolo con elevato numero di core. Le prime attività effettuate con il software FEM hanno evidenziato i limiti sopra descritti ed hanno spinto all'esplorazione di un nuovo approccio alla modellazione del processo. Si è considerato lo strumento FEM una reale macchina, la cui logica di comando è stata sviluppata esternamente. Questa logica, denominata "black-box", è la stessa programmata ed usata sulla macchina reale. Si è intrapresa quindi una collaborazione con la casa produttrice del software, Transvalor S.A, che ha consentito di aprire il software alla comunicazione bidirezionale con la "black-box" e di permettere al FEM di essere comandato da quest'ultima. Il programma sviluppato da Muraro, in fase di continua evoluzione, ha un'interfaccia utente che riproduce esattamente le operazioni che l'operatore deve effettuare a bordo macchina. Consente

l'impostazione delle curve di laminazione e gli altri parametri del processo. Anche nella simulazione è prevista la possibilità di cambiare "al volo" i parametri di laminazione durante il calcolo, così come avviene nella macchina con i comandi di "override". Il modello FEM da impostare nel programma Forge® è invece standard e richiede solo l'introduzione delle geometrie degli utensili, in formato stl o step. La definizione della cinematica, invece, prevede unicamente l'impostazione degli assi di rotazione corretti di tutti gli utensili. Non è richiesto l'intervento dell'operatore nella definizione delle leggi di moto e\o velocità, tutto viene programmato automaticamente dalla "black-box". Completata la fase preparatoria si comincia la simulazione e da questo momento il software di simulazione Forge® ed il programma sviluppato da Muraro iniziano ad interagire. Vengono scambiate informazioni sulla posizione degli utensili, sulle caratteristiche dell'anello come ad esempio l'ovalità, le dimensioni esterne, il disassamento dell'anello, le forze su mandrino, i parametri dei coni e dei rulli di centraggio. L'aspetto innovativo dell'approccio è il modo nel quale lo strumento esterno agisce, adottando le stesse logiche di calcolo e gli stessi strumenti di correzione che il software a bordo macchina utilizza per modificare la posizione e le azioni degli utensili sull'anello in deformazione, reagendo così a quanto sta succedendo durante la deformazione.

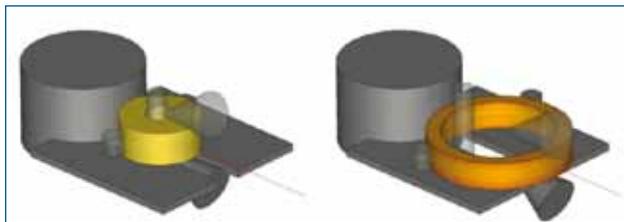
## RISULTATI OTTENUTI E POSSIBILI SVILUPPI FUTURI

Lo schema di quanto spiegato si può riassumere con il diagramma di Fig. 3, dove si vede come il solver di Transvalor Forge® riesca a colloquiare direttamente con la "black-box" esterna sviluppata da Muraro. Vengono fornite a Forge®, step by step, tutte le informazioni cinematiche per il passo di calcolo successivo fino alla fine della simulazione che viene anch'essa decisa dagli algoritmi inclusi nel software della "black-box". I dati cinematici o di forza/coppia da applicare ai vari utensili che compongono la simulazione sono totalmente forniti dalla "black-box", sovrascrivendo gli iniziali dati impostati nel Pre di Forge®. Non è richiesto all'utente di scrivere alcun dato nel Pre. È necessario solo importare le corrette geometrie che s'intende simulare. L'approccio sviluppato è stato testato nel concreto valutando diverse tipologie di anelli da produrre mediante le macchine di laminazione circolare progettate da Muraro. Dal punto di vista di utilizzo del software di simulazione Forge®, si è notata una drastica riduzione dei tempi di re-



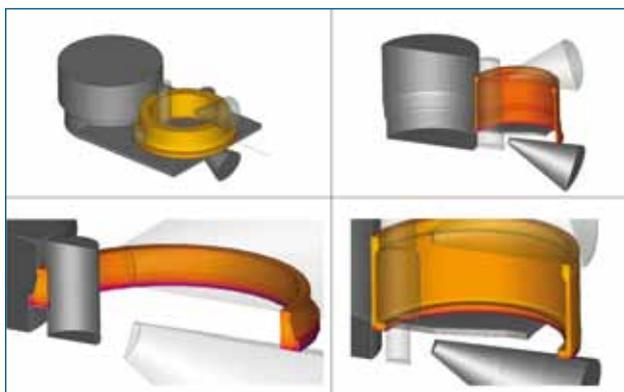
**Fig. 3 - Principio generale del pilotaggio esterno**

*Fig. 3 - General principle of the external piloting*



**Fig. 4 - Processo di laminazione di anelli a sezione rettangolare**

*Fig. 4 - Square section ring-rolling process*



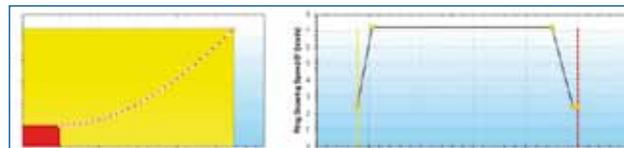
**Fig. 6 - Sezioni sagomate: esempi di laminazione anelli**

*Fig. 6 - Shaped sections: Ring-rolling examples*

alizzazione delle analisi e si è notata una maggior correlazione con la realtà. Il risultato ottenuto dalla simulazione ha quindi consentito di valutare la correttezza delle curve di laminazione impostate così come di tutti i parametri del processo e di giungere rapidamente a quelli ottimali. Lo studio del processo così concepito ha permesso di ridurre sensibilmente l'entità dei sovrametalli.

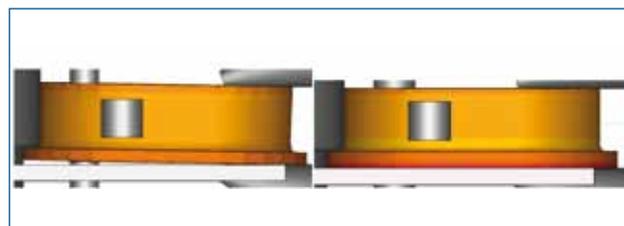
Come si può notare dalle immagini di figura 4, la misura del diametro esterno dell'anello avviene per mezzo di uno speciale oggetto da inserire nella simulazione che ha lo stesso comportamento dei reali laser di misura usati nelle macchine reali. Dall'interfaccia della "black-box" è possibile decidere che risoluzione abbia lo strumento di misura, come ad esempio del millimetro, del decimo, del centesimo di millimetro, ecc. Le macchine vere hanno delle unità di calcolo che possono essere più o meno rapide ad eseguire i calcoli. Possiamo parlare di PLC o sistemi CNC. Il tempo di scansione ed elaborazione di questi sistemi può essere più o meno lento, a seconda del costo e della complessità della macchina. Si può parlare di millesimi di secondo (0.001 s) o magari di decimi di secondo (0.1 s). Anche questa variabile è possibile impostarla nella "black-box" in modo che la simulazione e le leggi di moto e relativa retroazione vengano calcolate come nella macchina reale.

Questo parametro influenza notevolmente il risultato della simulazione. Nel caso di macchine molto lente o nel caso di macchine con limiti particolari, si può agire nella



**Fig. 5 - Esempio di curve di laminazione**

*Fig. 5 - Example of piloting function*



**Fig. 7 - Esempio di correzione del fenomeno di Ring-Climbing**

*Fig. 7 - Example of correction of the Ring-Climbing phenomenon*

"black-box" in modo da tener conto, ad esempio, dei limiti di accelerazione/velocità dei vari assi e relativa risposta. E' possibile modificare la precisione con cui i calcoli e i segnali sono trattati, valori che poi vengono scambiati con gli assi della macchina. Anche le curve di laminazione vengono disegnate in completa autonomia dal sistema FEM. È possibile modificare (spostare nel grafico) singolarmente i punti auto calcolati così come il numero degli stessi (aggiungo e tolgo punti a piacere). La generazione di queste curve permette di laminare l'anello nelle migliori condizioni possibili, evitando i tipici difetti dei laminati (fish tails). Il sistema ha un solutore molto sofisticato che permette di lavorare sia con le geometrie cilindriche classiche, sia con quelle sagomate. Nella figura 6 viene riportato un piccolo set di esempi per cui il sistema è stato testato.

Il sistema riesce a gestire in automatico anche l'auto correzione del fenomeno del "Ring-Climbing" (Fig. 7). Succede in particolari situazioni che l'anello durante la laminazione tenda a salire verticalmente all'interno del calibro radiale. Questo provoca l'instabilità del processo e causa l'inclinazione delle pareti dell'anello. Si arriva alla fine del processo con un prodotto dalle pareti coniche e non cilindriche.

È intenzione di Muraro continuare a sviluppare lo strumento, implementando una maggiore flessibilità per riuscire ad utilizzarlo anche su altre configurazioni di impianti, diverse dai laminatoi circolari. Alcuni test sono già stati effettuati applicando questo approccio a processi di forgiatura open-die mediante presse idrauliche, ottenendo una migliore distribuzione della deformazione sulla sezione, un migliore fattore di riduzione a cuore e una migliore chiusura delle porosità. Si intende inoltre testare il sistema anche in processi di laminazione di prodotti lunghi e piani, dove le logiche di controllo degli impianti sono simili a quanto già implementato per la laminazione circolare.

## RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato possibile solo grazie alla proficua collaborazione che si è creata tra lo sviluppatore di questo strumento l'Ing. Angelo Sartori di Muraro, la casa produttrice del software Transvalor nella persona dell'Ing. Patrice Lasne ed Enginsoft, distributore per l'Italia del software Forge® e centro di competenza per la simulazione dei processi industriali, nella persona dell'Ing. Marcello Gabrielli.

## RIFERIMENTI

- 1] K. Traore, R. Forestier, K. Mocellin, P. Montmitonnet, M. Souchet, Three dimensional finite element simulation of ring rolling, 7th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes (NUMIFORM 2001), Toyohashi : Japon (2001) .
- 2] Y.S. Lee, M.W. Lee, S.S. Park, I. Leeb and Y.H. Moon, Process Design by FEM Simulation for Shape Ring Rolling of Large-Sized Ring, NUMIFORM 2010: Proceedings of the 10th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes Dedicated to Professor O. C. Zienkiewicz (1921-2009)
- 3] Maha Hachani, Lionel Fourment, A 3D contact smoothing method based on quasi-C1 interpolation and normal voting -Application to 3D Forging and Rolling area, NUMIFORM 2010: Proceedings of the 10th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes Dedicated to Professor O. C. Zienkiewicz (1921-2009)

## Innovative approach to calculate lamination curves in ring rolling operations through simulation

**Keywords:** Numerical simulation - Plastic deformation - Rolling - Forging

The “secret” of an efficient Ring rolling production process is the ability of the ring rolling machine to maintain centered the ring, and drive the growth in height and diameter, avoiding non-round shapes and defects. In the real process, this work is done directly from the numerical control acting on the mandrel, cones and on the centering rolls (position and force), starting from a definition of the lamination curves, defined in the software by the operator. The machine tries to respect this program, monitoring the shape of the ring, by some laser measuring system and load sensors, correcting the kinematic of the tools. In the last years several approaches have been used to simulate this process, always with the limit that the lamination curves must be inserted manually from the user and cannot change during the simulation. This paper is a summary of the work made by Muraro Spa, together with Transvalor S.A., the developer of FEM software Forge® and Enginsoft Spa, competence center on production process simulation. The aim of this work was to develop an interface able to read, in real-time during the calculation, the position of some virtual sensors (virtual laser measuring), pass informations like position, but also loads and others, to an external routine, able to calculate corrections of the kinematic of all the tools and write back these corrections in Forge. During the simulation, this approach allows to correct step-by-step the lamination curve. The logic in the simulation external black-box and in the program driving the piloting of the press is the same, so this guarantees that the results obtained with this new approach in the simulation are close to the real one. Next step of the work will be to extend the application of this interface to other models of special machines, but also to different kind of presses normally used to deform metallic (and non-metallic) materials.