



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

SEDE DI VICENZA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

TESI DI LAUREA DI PRIMO LIVELLO

**OTTIMIZZAZIONE DEL PROCESSO DI LAMINAZIONE A
CALDO DI UN ANELLO FLANGIATO IN ACCIAIO AL
CARBONIO MEDIANTE ANALISI FEM**

RELATORE: PROF. GUIDO BERTI

CORRELATORE: DR. ING. MANUEL MONTI

LAUREANDO: ANDREA MARCOLONGO

ANNO ACCADEMICO 2010-2011

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, i software ad elementi finiti si stanno affermando sempre più come uno strumento fondamentale per realizzare una progettazione integrata di prodotto e processo. Questi software cercano soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali, riducendo queste ultime ad un sistema di equazioni algebriche. Grazie all'utilizzo di questi programmi si è in grado di riprodurre e simulare l'andamento di moltissimi processi produttivi permettendo di prevedere dei problemi che sarebbero emersi solamente in seguito a dei test svolti realmente. Prevedere parte dei problemi che sarebbero emersi solo in fase produttiva, porta alla riduzione di perdite di tempo, sprechi di materiale, impiego di ore uomo e ore macchina. Grazie a questi vantaggi l'utilizzo di questi programmi permette, ad un'azienda per esempio, di avere un livello di progettazione completamente innovativo e soddisfacente, tempi sempre più esigenti richiesti dal mercato.

Per questi motivi l'azienda *ASFO spa*, da 40 anni produttrice di anelli laminati e profilati mediante il processo di *ring-rolling*, sta valutando l'implementazione di questo software presso la loro azienda.

Per muoversi verso questa nuova frontiera e per verificare l'efficacia di questo strumento ha allacciato una collaborazione con il gruppo di Tecnologia Meccanica di Vicenza della Facoltà di Ingegneria Gestionale.

Lo scopo di questa verifica è avviare un'analisi agli elementi finiti modellando il processo di laminazione selezionato dall'azienda *ASFO spa*.

Lo scopo di questo lavoro è quello di modellare e simulare il processo di produzione del prodotto in questione, ai fini di tarare il software in maniera opportuna per replicare il processo reale. Una volta simulato il processo reale si ha il compito di proporre delle soluzioni di riprogettazione in base ai risultati ottenuti dalla simulazione con i parametri di processo reali, e di verificare l'efficacia delle idee di modifica.

ARTICOLAZIONE DEL LAVORO

Il seguente progetto di tesi è suddiviso in quattro capitoli.

Il primo capitolo fornisce una panoramica generale sul processo di laminazione dell'anello. Viene descritto il processo di formatura dell'anello presso *ASFO spa*, illustrando le varie fasi che portano alla realizzazione della preforma, per poi descrivere in dettaglio la fase di lavorazione mediante la laminazione dell'anello.

Il secondo capitolo descrive nel dettaglio la formatura mediante il processo di laminazione di anelli, Ring Rolling, illustrando i macchinari e le particolari tecnologie utilizzate. La comprensione di questo capitolo è fondamentale per comprendere come viene condotto il processo di *ring-rolling* presso *ASFO spa*.

Il terzo capitolo descrive il modello ottenuto con le simulazioni. Questo capitolo comprende inoltre una descrizione delle tecnologie utilizzate e delle problematiche e difettosità relative a questa lavorazione, riscontrate a simulazione ultimata.

Il quarto capitolo propone alcune proposte di riprogettazione, alcune possibili soluzioni a problematiche riscontrate nella simulazione. Vengono proposti dei risultati di simulazione con le rispettive modifiche di riprogettazione.

INDICE

INTRODUZIONE	3
ARTICOLAZIONE DEL LAVORO	5
INDICE	7
CAPITOLO 1	9
Modellazione del processo industriale	9
1.1 Introduzione	9
1.2 Preparazione della preforma	10
1.3 Laminazione dell'anello	15
1.3.1 Descrizione del processo	15
1.3.2 Modellazione del processo di laminazione	18
CAPITOLO 2	19
La laminazione di anelli	19
2.1 Introduzione	19
2.2 Prodotti e applicazioni	19
2.3 Laminatoi	20
2.3.1 Background storico	20
2.3.2 Laminatoio orizzontale radiale-assiale	22
2.4 Ottimizzazione di prodotto e processo	24
2.4.1 Laminazione corretta di anelli contornati	30
2.4.2 Forze, potenze e velocità di laminazione	33
CAPITOLO 3	35
Messa a punto del modello di laminazione	35
3.1 Messa a punto del modello numerico	35
3.1.1 Geometrie	35
3.1.2 Parametri di processo	37
3.1.3 Parametri del materiale	45
3.1.3 Parametri di simulazione	47
3.2 Risultati simulazione	51
3.2.1 Problemi emersi dalla simulazione	52
3.2.2 Forze emerse dalla simulazione	55
CAPITOLO 4	57
Proposte di riprogettazione	57
4.1 Introduzione	57
4.2 Prima proposta: modifica del profilo della sagoma	57
4.2.1 Modifica del rullo sagomato	57
4.2.2 Parametri di processo	59
4.2.3 Risultati della simulazione	60
4.3 Seconda proposta: modifica del processo di laminazione	61
4.3.1 Modifica della preforma	61
4.3.2 Risultati della simulazione	63
4.3.3 Forze risultanti dalla simulazione	65
4.4 Terza proposta: modifica del processo di realizzo della preforma	67
4.4.1 Modifica del processo di realizzo della preforma	67
4.4.2 Parametri di processo	67
4.4.3 Risultati della simulazione	69
4.4.4 Forze risultanti dalla simulazione	72
CONCLUSIONI	75
BIBLIOGRAFIA	77

CAPITOLO 1

Modellazione del processo industriale

1.1 Introduzione

Lo scopo di questa tesi prevede l'ottimizzazione del processo di formatura a caldo di un giunto flangiato per la trasmissione del moto nelle torri eoliche, realizzato dall'azienda *ASFO spa*, sita a Chiuppano (VI).

Questa azienda produce da oltre 40 anni anelli laminati soprattutto flangiati, per diversi campi di applicazioni mediante il processo di ring rolling ottenendo sempre prodotti con uno standard di qualità molto elevato. L'ottimizzazione di questo processo è stata effettuata mediante delle simulazioni agli elementi finiti effettuate presso il laboratorio di Tecnologia Meccanica della facoltà di Ingegneria Gestionale dell'Università di Padova. Le simulazioni agli elementi finiti sono state effettuate con il software *Simufact.Forming*, attualmente alla release 9.0.1. Il componente preso in esame per la modellazione mediante il software è l'anello flangiato CH-10337 la cui sezione finale è rappresentata in Figura 1.1.

Questo anello viene realizzato in un acciaio al carbonio da bonifica denominato WN 1.7225. Si tratta di un acciaio **42CrMo4**, bonificato dopo la lavorazione ad una durezza HB 320 – 360.

Profilo di sgrossatura : (Giunto per trasmissioni eoliche)

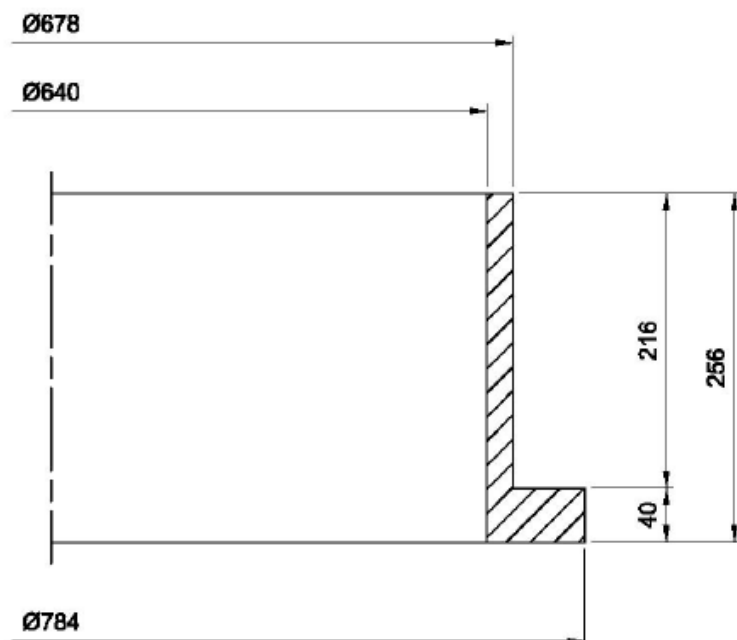


Figura 1.1: Anello flangiato CH-10337 (misure in mm)

Vediamo ora come viene articolato l'intero processo produttivo, illustrando le fasi che portano alla realizzazione della preforma, per poi descrivere in particolare il processo di laminazione dell'anello che, *ASFO spa*, utilizza per la formatura di questo particolare anello flangiato.

1.2 Preparazione della preforma

Il processo condotto da ASFO spa per la realizzazione della preforma parte da billette aventi un diametro di 320mm che vengono tagliate a freddo mediante una sega circolare ad un'altezza di 409mm .

Successivamente la billetta subisce un ciclo di riscaldamento di 14 ore in un forno a metano il cui grafico del ciclo di riscaldamento è riportato in Figura 1.2.

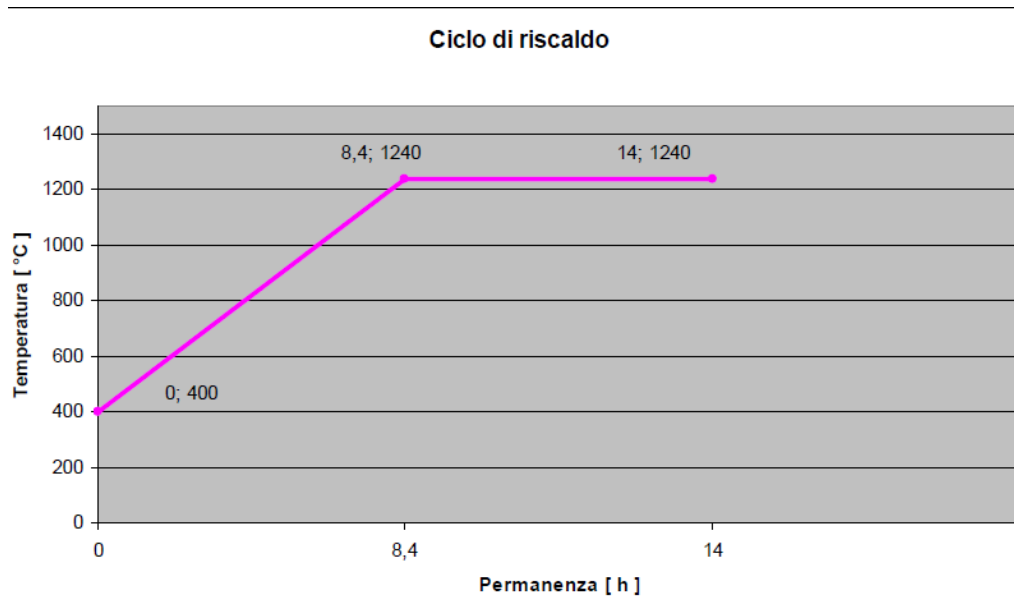


Figura 1.2: Grafico del ciclo di riscaldamento della billetta fino a 1240 °C.

Dopo il ciclo di riscaldamento la billetta è a una temperatura di 1240 °C, ed è pronta per subire il primo processo forgiatura, il processo di upsetting che la porterà all'altezza di 290mm. Questa lavorazione viene compiuta su una pressa idraulica P1800, dalla forza massima di 18000 kN. Una raffigurazione del primo step è riportata in Figura 1.3.

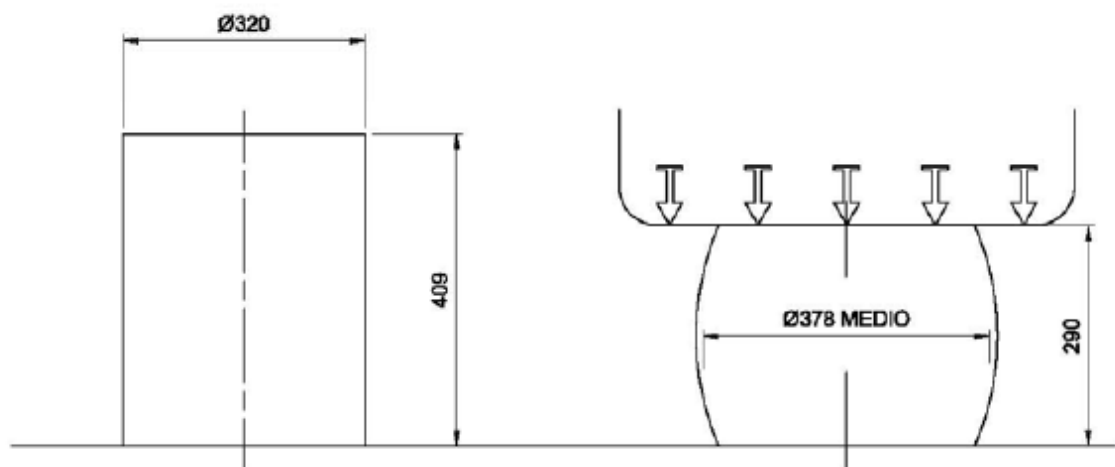


Figura 1.3: Rappresentazione schematica del processo di *upsetting* della billetta.

In questo primo *step* la billetta perde all'incirca 1% del volume perché grazie allo schiaccio

viene tolta la scaglia d'ossido che si è formata al contatto con l'aria.

La billetta così deformata dal primo schiaccio è pronta per essere inserita in uno stampo e subire un secondo schiaccio (Figura 1.4) per dare alla billetta la preforma, prima di subire la vera e propria foratura, che darà origine alla voluta flangia.

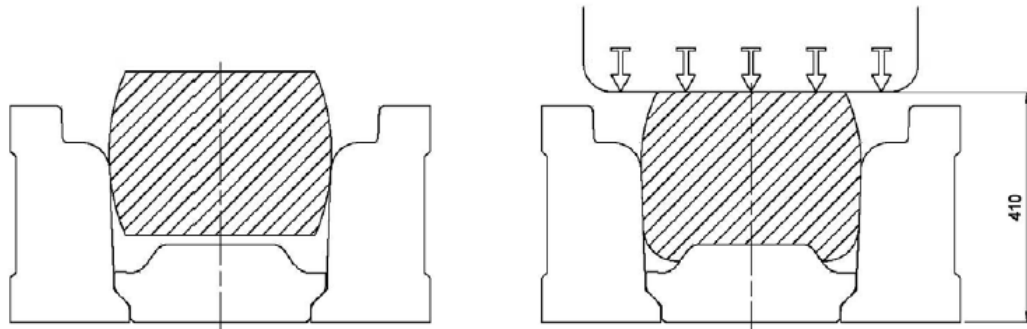


Figura 1.4: Secondo *upsetting* della billetta all'interno dello stampo.

Una volta completato il processo di *upsetting* all'interno dello stampo, il piatto superiore della pressa viene sostituito con una spina tramite un braccio meccanico. La spina, preriscaldata a 400 °C, esercita pressione sul pezzo, fino alla completa chiusura dello stampo, ottenendo così la foratura voluta (Figura 1.5). Il materiale con cui è realizzato questo utensile è 42NiCrV94.

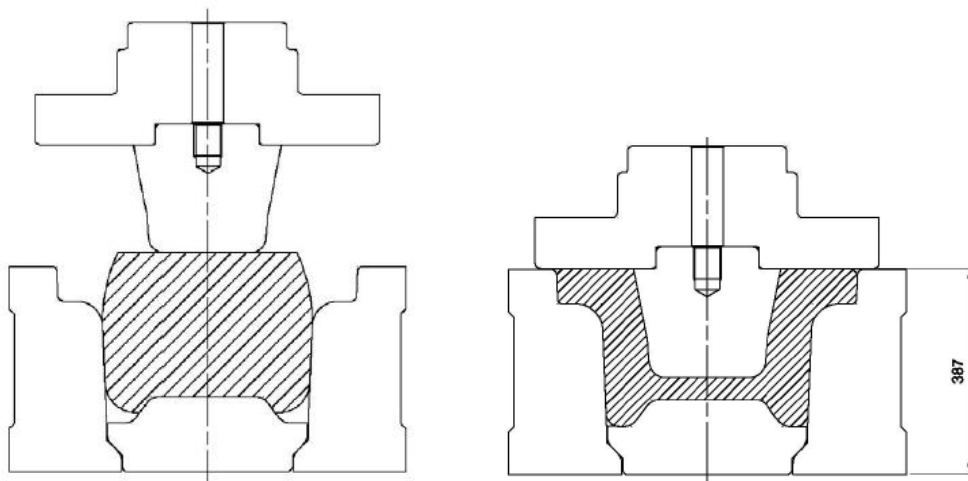


Figura 1.5: Rappresentazione schematica del processo di foratura.

Dopo questa fase di foratura il pezzo deve subire un ultimo *step* prima di essere laminato, la fase di tranciatura.

Prima di effettuare la tranciatura però il pezzo viene capovolto con la flangia verso il basso, così facendo si favorisce la completa eliminazione del fondello e la centratura del pezzo stesso (Figura 1.6).

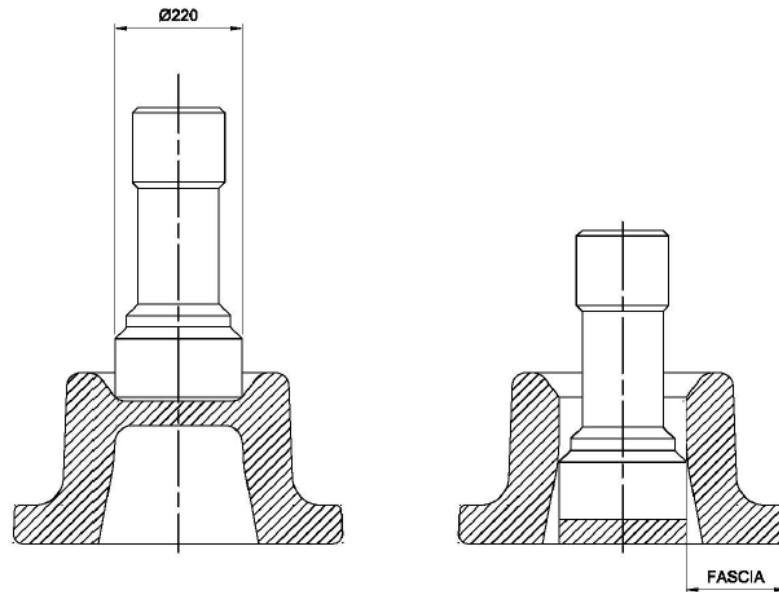


Figura 1.6: Rappresentazione schematica della fase di tranciatura.

Il risultato che si ottiene dalla tranciatura è la preforma dalla quale poi si può partire con la fase di laminazione per ottenere il componente finale.

La modellazione e la simulazione di questi processi di lavorazione è stata resa possibile grazie ai dati di input e ai file CAD forniti dall'azienda. E' stato quindi possibile esportare i file forniti dall'azienda in file tridimensionali in formato STL, importandoli successivamente all'interno di *Simufact.Forming9.0.1*.

Così facendo è stato reso possibile simulare fedelmente i processi di produzione industriale che vengono condotti all'interno dell'azienda.

Dopo la fase di tranciatura in ambiente *Simufact.Forming9.0.1*, la preforma che si ottiene è completa di storia di carico, storia delle deformazioni, profili termici, tensioni residue (Figura 1.7, Figura 1.8, Figura 1.9).

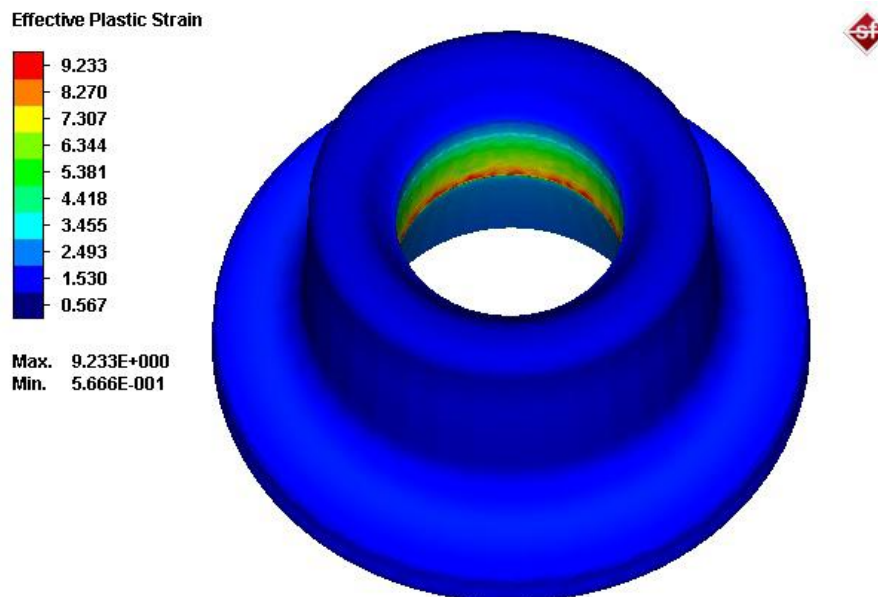
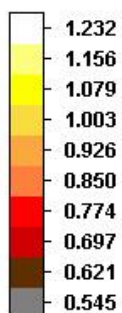


Figura 1.7: Anello preforma: mappa delle deformazioni equivalenti.

Temperature
E+3 C



Max. 1.232E+003
Min. 5.445E+002

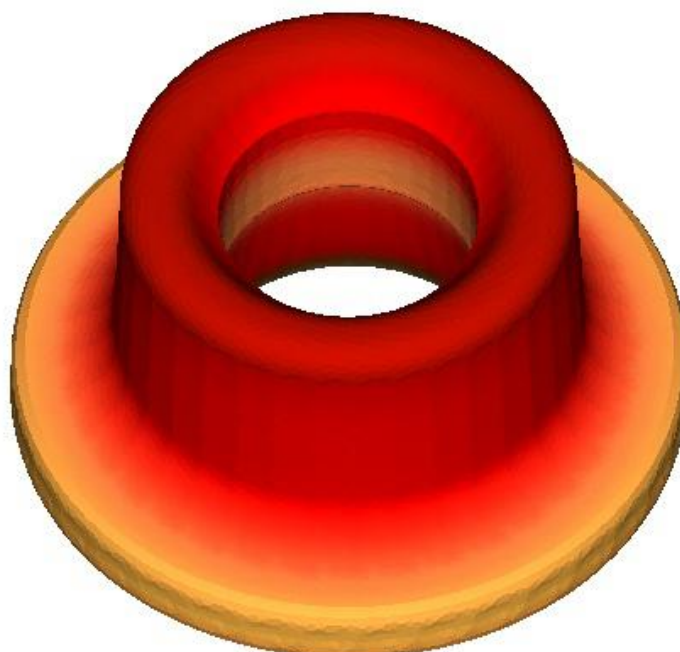
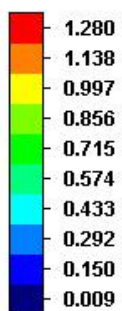


Figura 1.8: Anello preforma: mappa delle temperature.

Effective Stress
E+9 Pa



Max. 1.280E+009
Min. 9.323E+006

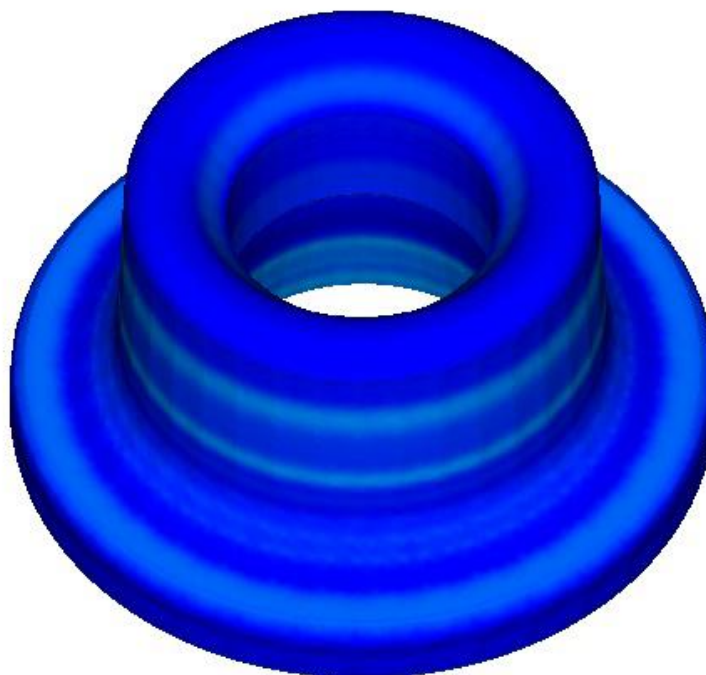


Figura 1.9: Anello preforma: mappa delle tensioni equivalenti.

Durante questi processi di lavorazione avviene una diminuzione della temperatura del pezzo a causa degli scambi termici con l'ambiente e con gli stampi,essendo preriscaldati a circa 400 °C.

A questo punto prima di effettuare la laminazione dell'anello,la preforma viene posta in forno per 60 minuti, per favorire una ripresa di temperatura fino a 1240 °C. Effettuando questo riscaldamento al pezzo,si inizierà la laminazione portando il materiale esattamente alla temperatura iniziale. Questa diminuzione della temperatura è messa in evidenza anche dai dati ottenuti dalle simulazioni dei processi precedenti e, dalla storia di temperatura della preforma dopo la tranciatura(Figura1.8).

In ambiente *Simufact.Forming9.0.1* prima di simulare e modellare il processo di laminazione si è pensato di simulare appunto questo processo di riscaldamento,mediante un processo di Heating che ha permesso di portare la preforma alla temperatura di inizio lavorazione(Figura1.10),e di togliere le tensioni residue presenti sul pezzo.

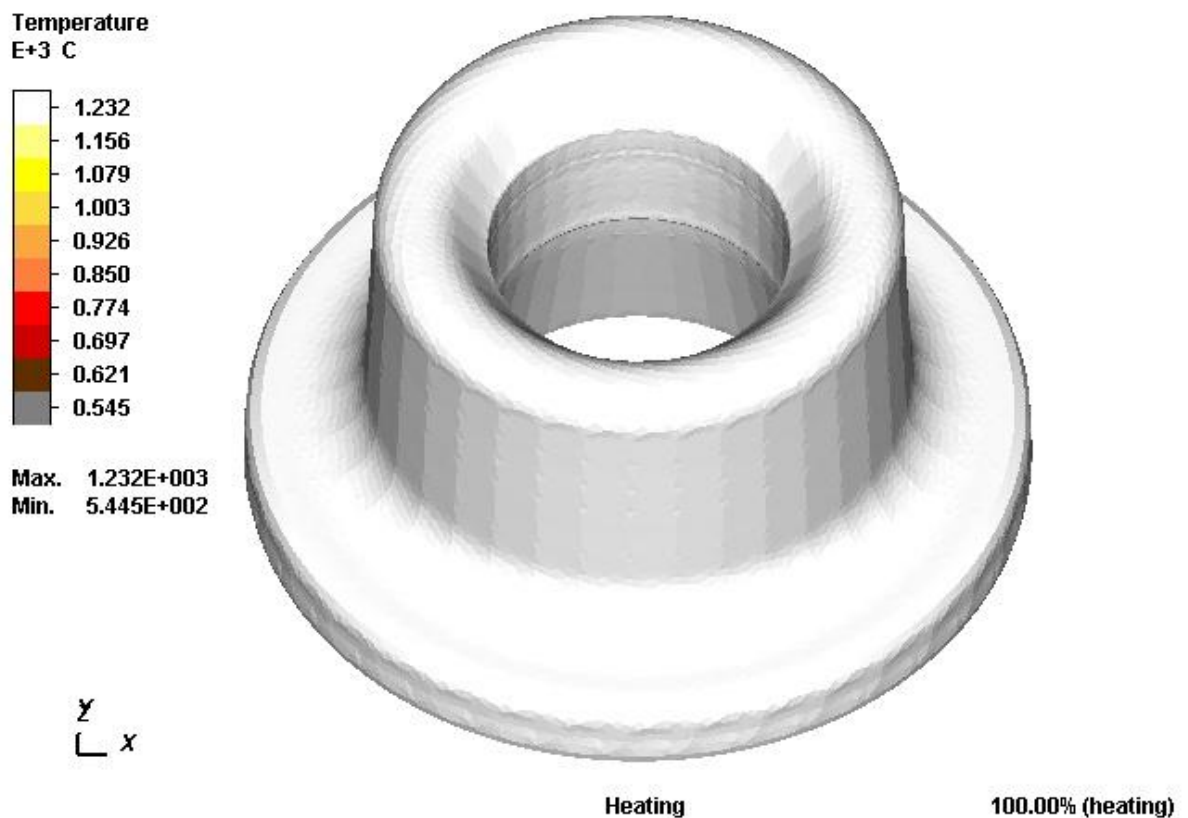


Figura 1.10: Preforma dopo la fase di “Heating”: mappa delle temperature.

1.3 Laminazione dell'anello

1.3.1 Descrizione del processo

Il processo di laminazione dell'anello è un processo che vede un anello pre-formato sottoposto ad un processo di formatura metallica. Presso l'azienda ASFO spa la lavorazione di laminazione viene effettuata utilizzando un laminatoio *Banning RAW 100/80*, avente una forza massima radiale di 1000KN e una forza assiale di 800KN.

L'anello pre-formato, ottenuto tramite processi sopra descritti, viene posizionato sui supporti del laminatoio per poter essere lavorato. Una volta posizionato l'anello sul laminatoio viene posizionato il mandrino all'interno del pezzo, e sull'asta motorizzata porta sagome viene agganciato il rullo principale sagomato. Prima di iniziare la lavorazione devono essere messi in posizione anche i coni assiali che vengono inseriti a contatto con il pezzo, e i rulli di centratura che controllano il diametro esterno, per assicurarsi che l'anello mantenga la propria rotondità e rimanga in corretta posizione in relazione agli assi longitudinali del laminatoio. A questo punto il processo può essere avviato, ponendo in moto la sagoma alla velocità di rotazione di 1 giro al secondo e controllando la forza con cui operano i coni assiali ed il mandrino folle. Qualora vi fosse necessità di rallentare o velocizzare il processo vi è un operatore che monitora costantemente il processo in termini di forze, temperature e misure dei diametri.

In Figura 1.11 e 1.12 sono riportate le principali curve di laminazione utilizzate in questo processo di laminazione.

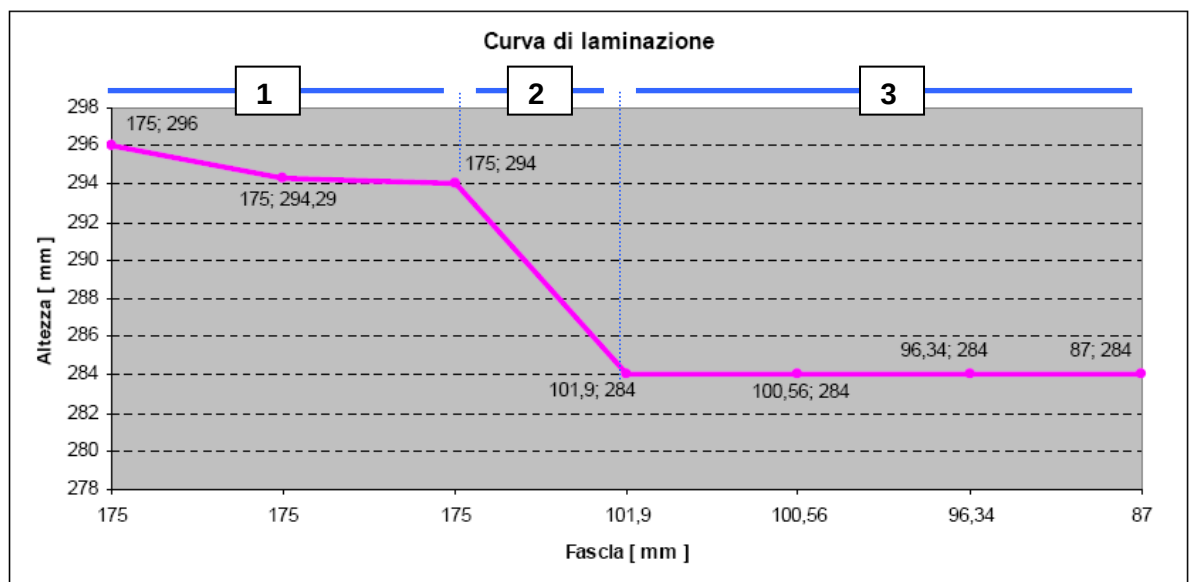


Figura 1.11: Curva di laminazione altezza in funzione della fascia.

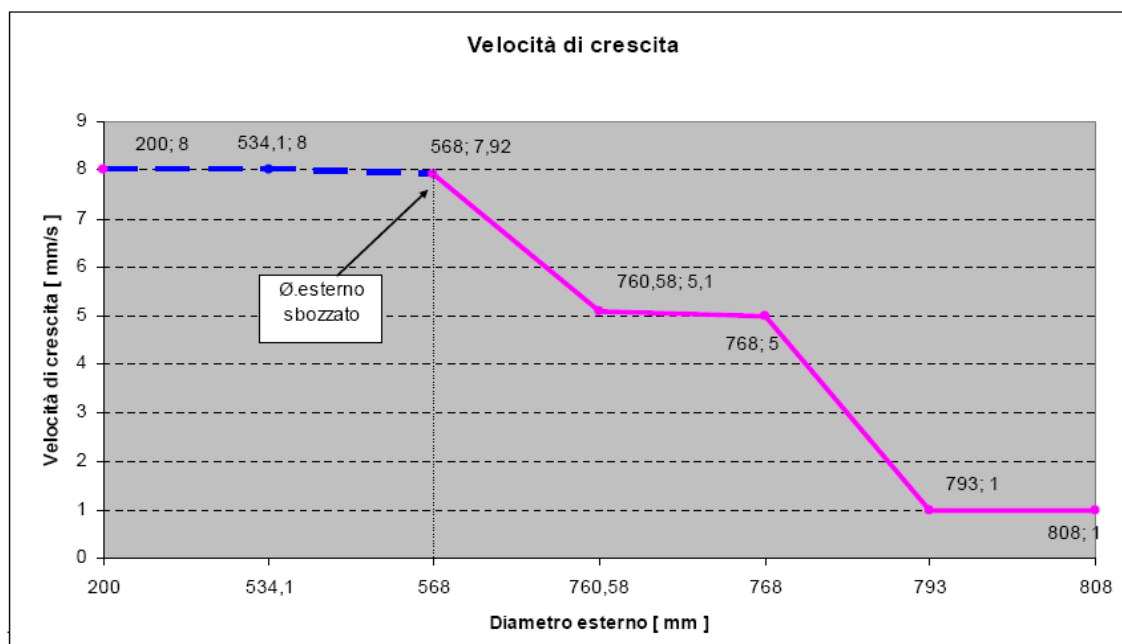


Figura 1.12: Curva di laminazione riportante le velocità di crescita del diametro in funzione del diametro esterno.

L'anello da ottenere a fine lavorazione deve avere le misure come riportate in Tabella 1.1. Le seguenti misure sono state effettuate su un anello alla temperatura di 950 °C.

	Φ esterno	Φ interno	Φ collare	altezza
Anello preforma	568 mm	220 mm	398 mm	297 mm
Anello laminato	808 mm	634 mm	710 mm	284 mm

Tabella 1.1: Misure dell'anello prima e dopo la laminazione (fonte: [1]).

Una rappresentazione schematica del processo di laminazione è riportata in Figura 1.13 , mentre uno disegno quotato del pezzo a laminazione ultimata è visibile in Figura 1.14.

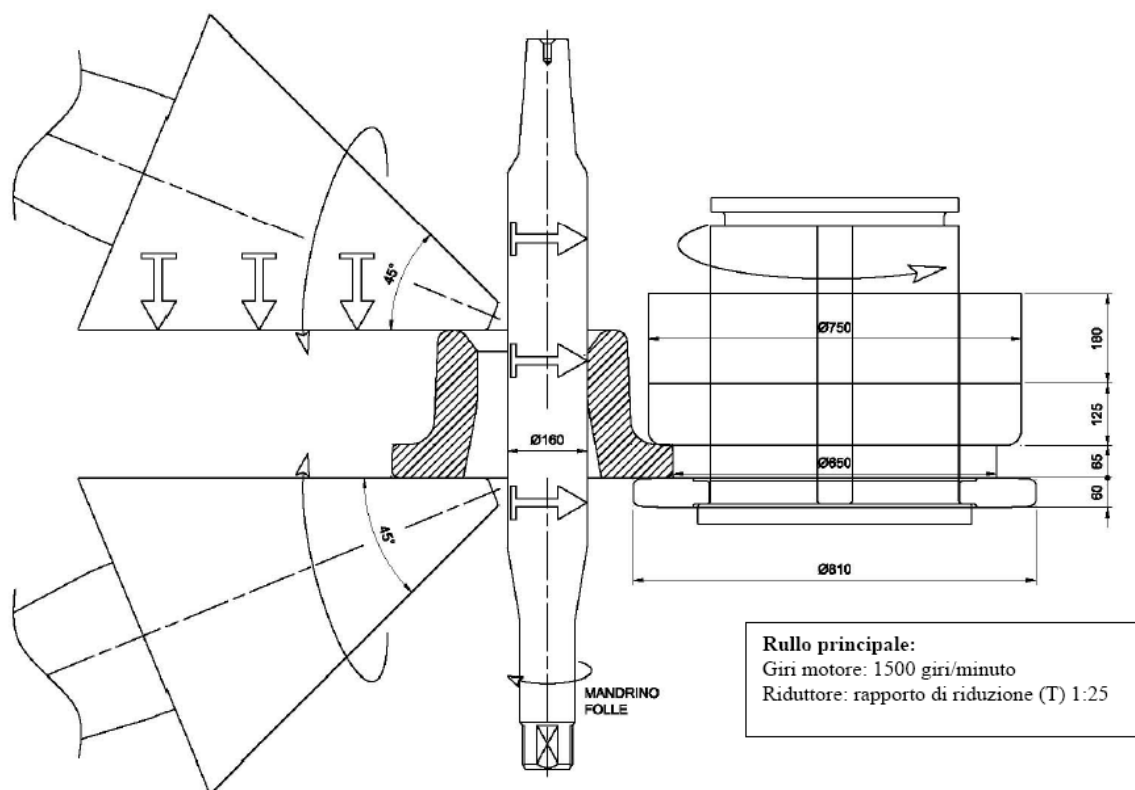


Figura 1.13: Riproduzione schematica del processo di laminazione della flangia CH-10337.

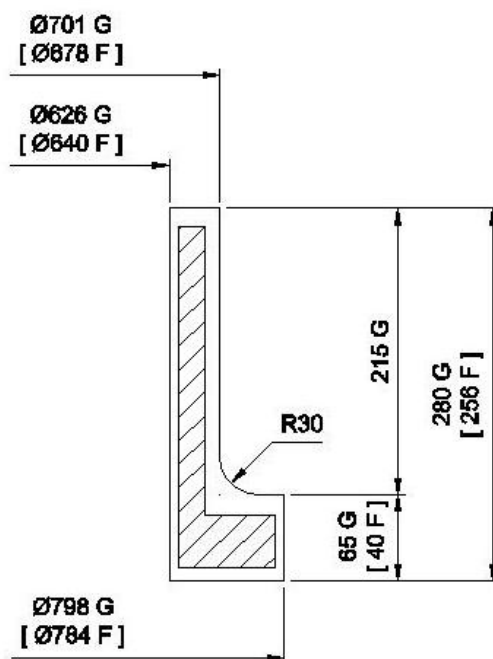


Figura 1.14: Anello a laminazione ultimata.

1.3.2 Modellazione del processo di laminazione

Come già accennato durante la descrizione delle fasi di preparazione della preforma, grazie ai file CAD forniti dall'azienda è stato possibile riprodurre le geometrie necessarie per replicare il processo di laminazione dell'anello in ambiente *Simufact.Forming 9.0.1*.

In Figura 1.15(a) e Figura 1.15(b) sono state riportate due illustrazioni del modello creato in ambiente *Simufact.Forming 9.0.1*, prima della simulazione del processo.

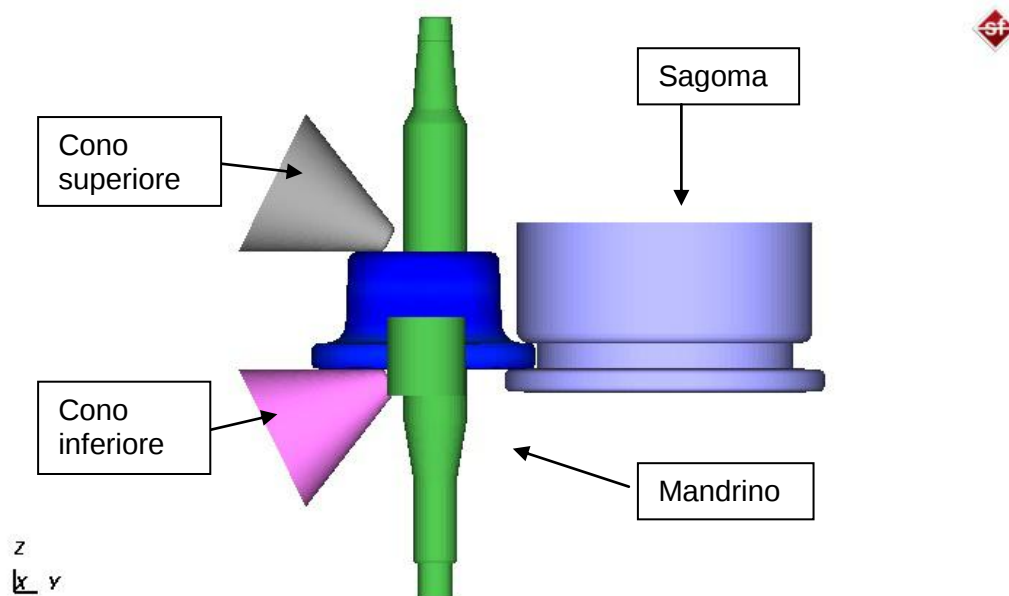


Figura 1.15(a): Modello FEM del processo di laminazione.

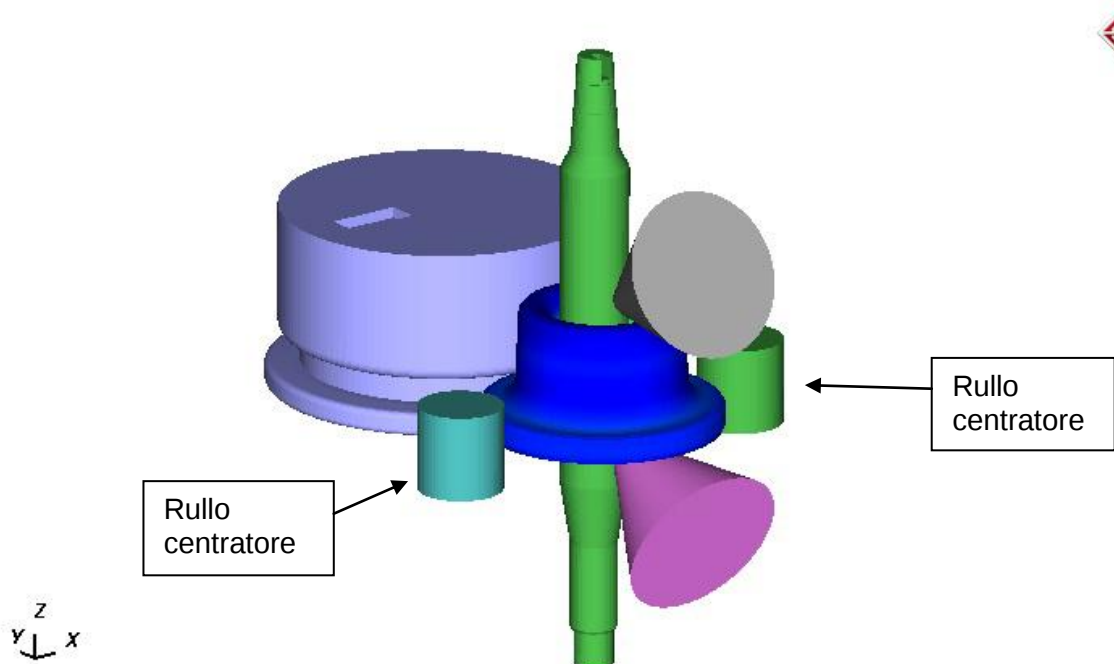


Figura 1.15(b): Modello FEM del processo di laminazione.

CAPITOLO 2

La laminazione di anelli

2.1 Introduzione

La laminazione di anelli è un processo di formatura metallica versatile che consente di produrre prodotti di forma anulare, accuratamente dimensionati e aventi un flusso circoferenziale dei grani.

In questo processo, un anello pre-formato su una pressa e pre-riscaldato a temperature elevate, viene posto in un mandrino avente diametro minore del foro. Successivamente, lo spazio tra il mandrino, che è in folle, ed il rullo principale posto in rotazione viene progressivamente ridotto per iniziare il processo di lavorazione. L'attrito che c'è tra il rullo principale e l'anello, causa la rotazione dello stesso, mentre al contempo l'anello in lavorazione pone in rotazione il mandrino montato su dei cuscinetti.

Al diminuire della sezione radiale, si verifica una estrusione circoferenziale lungo il verso di rotazione dell'anello con un conseguente aumento del diametro dello stesso.

I rulli principali possono essere piani, generando degli anelli di sezione rettangolare, oppure possono presentare scanalature o flange per produrre sezioni contornate. L'altezza dell'anello può essere controllata sia dalla forma stessa del rullo principale, sia mediante l'utilizzo di rulli assiali (spesso aventi forma conica e asse di rotazione inclinato) posti nel lato diametralmente opposto rispetto al mandrino.

2.2 Prodotti e applicazioni

Il processo di laminazione di anelli permette di lavorare qualsiasi prodotto avente forma anulare di qualsiasi materiale forgiabile. Le configurazioni di forma possono variare da pezzi molto piatti a forma di guarnizione fino a pezzi di altezza elevata e spessore ridotto a forma di manica. I materiali più tipici includono acciai a basso tenore di carbonio, rame, ottone, leghe di alluminio e titanio, e vengono lavorate anche leghe a base di nickel e cobalto, anche se sono resistenti e difficili da laminare.

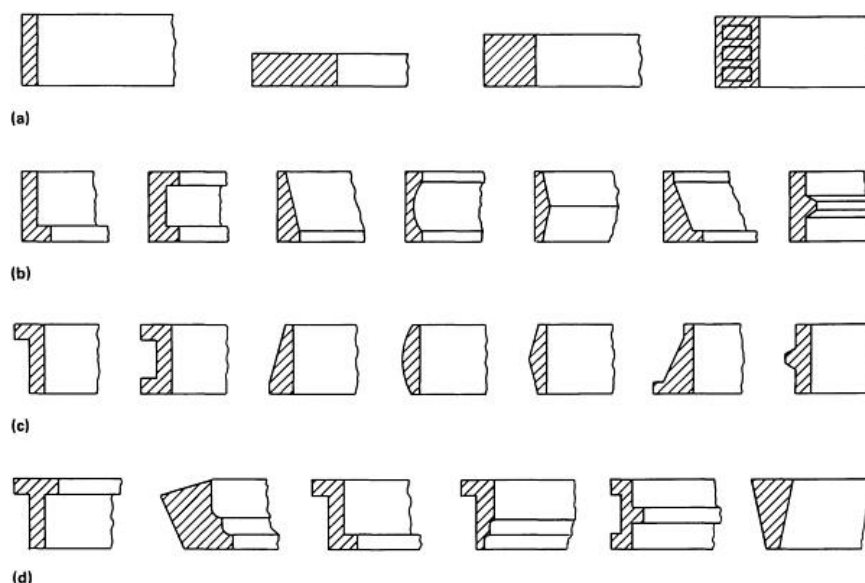


Figura 2.1: Tipiche sezioni di anelli laminati. (a) rettangolari; (b) con contorno interno; (c) con contorno esterno; (d) con entrambi i contorni (fonte: [2]).

Le applicazioni di questi anelli laminati è presente nelle parti per cuscinetti a sfera, cerchioni, cuscinetti per ruote di treni, anelli commutatori, anelli rotanti o non rotanti per motori a reazione e in altre applicazioni aerospaziali. Altresì sono applicabili nei componenti di reattori nucleari, componenti per ingranaggi a cono, flange di vario tipo, corpi di valvole, collegamenti per catene.

2.3 Laminatoi

2.3.1 Background storico

Durante la seconda metà del diciannovesimo secolo, la rapida espansione del sistema ferroviario generò un'importante domanda per la costruzione di ruote per vagoni. In origine, questi componenti venivano laboriosamente forgiati tramite l'utilizzo di magli. Durante l'anno 1852, in Inghilterra venne costruito il primo laminatoio. Il risultante aumento di produttività, la migliore performance dei prodotti laminati e la possibilità di poter creare forme diverse costituirono un decisivo passo in avanti nella storia dell'industria metallurgica.

Le prime macchine erano unicamente ad un passo radiale (Figura 2.2a): questa lavorazione implicava l'utilizzo di un solo paio di rulli, mentre l'altezza del pezzo lavorato veniva controllata grazie alla forma sagomata del rullo.

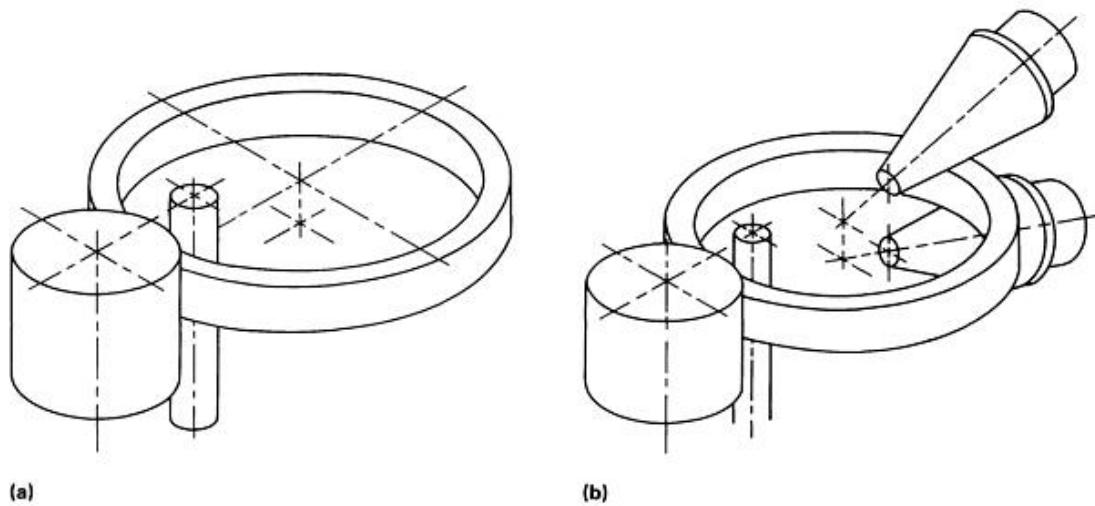


Figura 2.2: Schema illustrante:(a) laminazione a singolo passo (radiale); (b) laminazione a doppio passo (radiale – assiale) (fonte: [2]).

I laminatoi erano essenzialmente di due tipi, classificati in base al piano in cui girava l'anello durante il processo:

- **Orizzontale**, in cui l'anello ruota attorno al proprio asse posto verticalmente;
- **Verticale**, in cui l'anello ruota attorno al proprio asse posto orizzontalmente

La macchina a laminazione verticale comporta una limitazione sul diametro massimo dell'anello ottenibile, derivata dall'altezza dal suolo che si ha a disposizione per installare il laminatoio (Figura 2.3). Viceversa, in una laminazione orizzontale si è limitati dallo spazio che si ha a disposizione al suolo. Inoltre, con una laminazione orizzontale si è costretti a considerare alcuni supporti su cui deve poggiare la faccia inferiore dell'anello.

Dopo un breve utilizzo della macchina a singolo passo, diversi aspetti della lavorazione e difetti riscontrati suggerirono l'adozione di una macchina a passo doppio (Figura 2.2b). Dagli inizi del 1900 quindi, macchine orizzontali ad azionamento idraulico (ad acqua) iniziarono ad essere costruite con un secondo passo, disposto in posizione diametralmente opposta al primo passo radiale. Il secondo passo assiale aveva lo scopo di controllare la riduzione d'altezza del pezzo in lavorazione: queste macchine vennero chiamati laminatoi radiali-assiali. I primi laminatoi radiali-assiali idraulici a olio, controllati da servo-valvole, iniziarono ad apparire agli inizi del 1960. I rapidi progressi nel campo dell'elettronica hanno consentito l'applicazione di microprocessori e di computer tecnologici come sistemi di controllo riguardo questo tipo di laminazione di anelli.

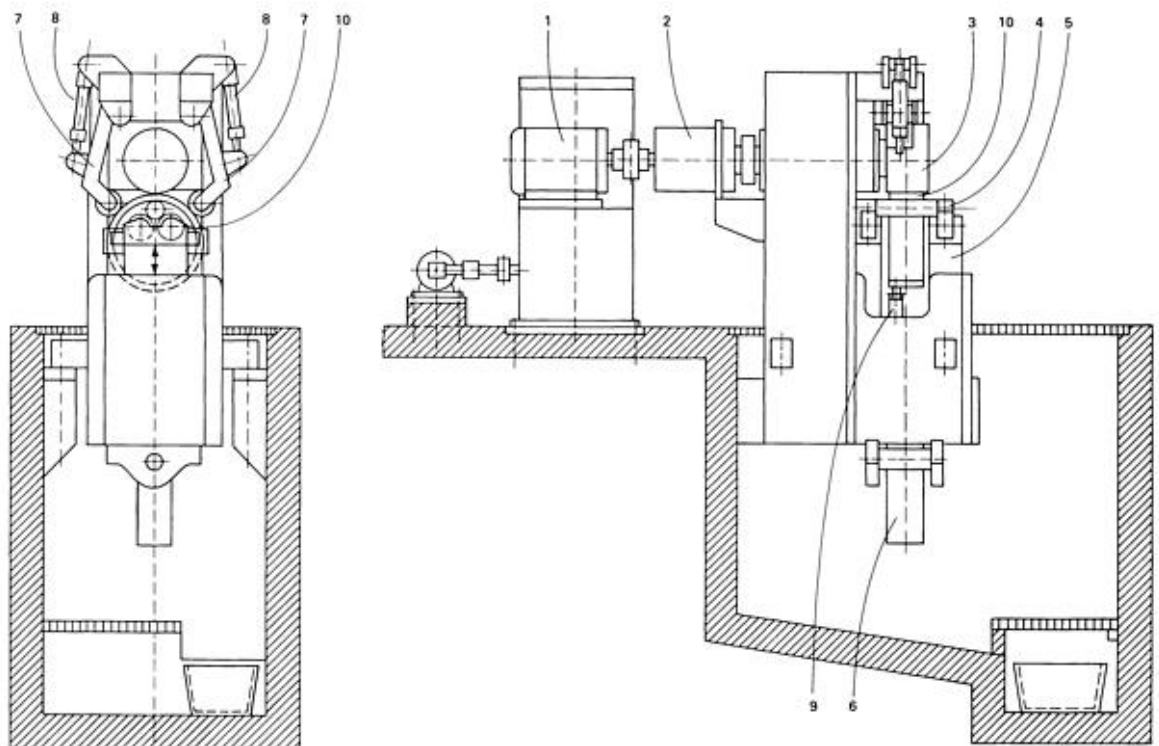


Figura 2.3: Schema illustrante di un laminatoio verticale:(1)Motore;(2)marcia innestata;(3)rullo principale;(4)mandrino;(5)mandrino trasporto;(6)cilindro idraulico per alzare ed abbassare il mandrino di trasporto;(7)rulli di centratura;(8)cilindro idraulico per il controllo di centraggio dei rulli;(9)rullo tracciante;(10)anello. (fonte: [2]).

2.3.2 Laminatoio orizzontale radiale-assiale

Sebbene molte macchine a passo singolo siano tuttora in uso, in questi ultimi ne sono state installate un numero esiguo. Il modello predominante rimane ancora oggi la macchina radiale-assiale a passo doppio. Il suo funzionamento è descritto ed illustrato in Figura 2.4.

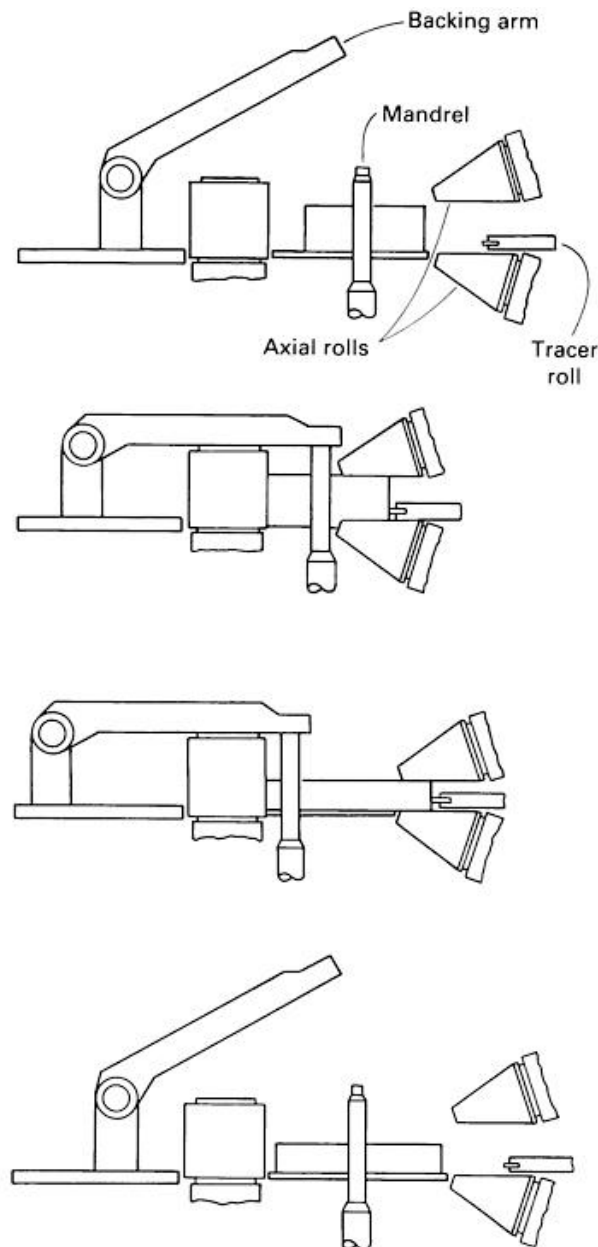


Figura 2.4: Principio di funzionamento del laminatoio radiale-assiale (fonte: [2]).

L'anello da lavorare (*preforma*) viene posizionato attorno ad un mandrino folle (il quale può essere retraibile, per facilitare l'operazione di carico e scarico del pezzo nonché le sostituzioni dello stesso utensile) ed appoggiato su un piatto che costituisce parte del supporto radiale. Una volta posizionato il pezzo, un braccio viene fatto scendere per agganciare il mandrino in una sede dotata di cuscinetti a sfera. Questo braccio è connesso al supporto radiale in maniera tale da farli muovere come un corpo unico,

attivato idraulicamente, verso il rullo principale motorizzato ad asse fisso. Il rullo principale ruota ad una velocità costante e pre-impostata. Una volta che il mandrino si pone in contatto con l'anello e lo schiaccia contro il rullo, il pezzo inizia a ruotare. Una volta innescato questo moto, il contatto anello-mandrino causa anche la rotazione di quest'ultimo, che ricordiamo essere folle.

A questo punto, un alloggio separato contenente un paio di rulli conici (assiali), avanza fino a che questi rulli entrano in contatto con la faccia inferiore e superiore dell'anello da laminare.

Il cono inferiore viene fissato in una posizione tale che la sua superficie a contatto con il pezzo si innalzi 3 – 5 mm sopra il livello del piatto d'appoggio. In questo modo il pezzo risulta sostenuto unicamente dai rulli assiali e dalla forza che il mandrino esercita verso il rullo principale, eventualmente sagomato per favorire ulteriormente il supporto dell'anello. Entrambi i rulli conici sono motorizzati e il cono superiore è mosso idraulicamente verso quello inferiore, per generare una riduzione di altezza qualora si desideri. Durante il processo, i coni si ritirano seguendo l'espansione di diametro, mantenendo il giusto attrito tra i rulli e le facce del pezzo.

Ai fini del controllo dimensionale, un rullo tracciante, montato in una slitta tra i due coni assiali, entra in contatto con il diametro esterno dell'anello in laminazione: in questo modo il diametro viene monitorato attraverso misurazioni sulla posizione relativa della ruota tracciante e del carrello dei coni.

Anche un paio di bracci idraulici di centraggio (Figura 2.5) entrano in contatto con il pezzo lungo il diametro esterno, per assicurarsi che l'anello mantenga la propria rotondità e rimanga in corretta posizione in relazione agli assi longitudinali del laminatoio. Delle celle di carico posti in questi bracci misurano gli scostamenti di forza tra i due rulli di centraggio. Attraverso un sistema di controllo in retroazione vengono perciò corretti sbilanciamenti di forza e scostamenti di posizione indesiderati, agendo sulla velocità del rullo assiale. Man mano che il processo avanza e la resistenza dell'anello diminuisce, la *forza di centraggio* viene ridotta sia manualmente (attraverso un potenziometro) che automaticamente se il sistema di controllo della macchina lo consente.

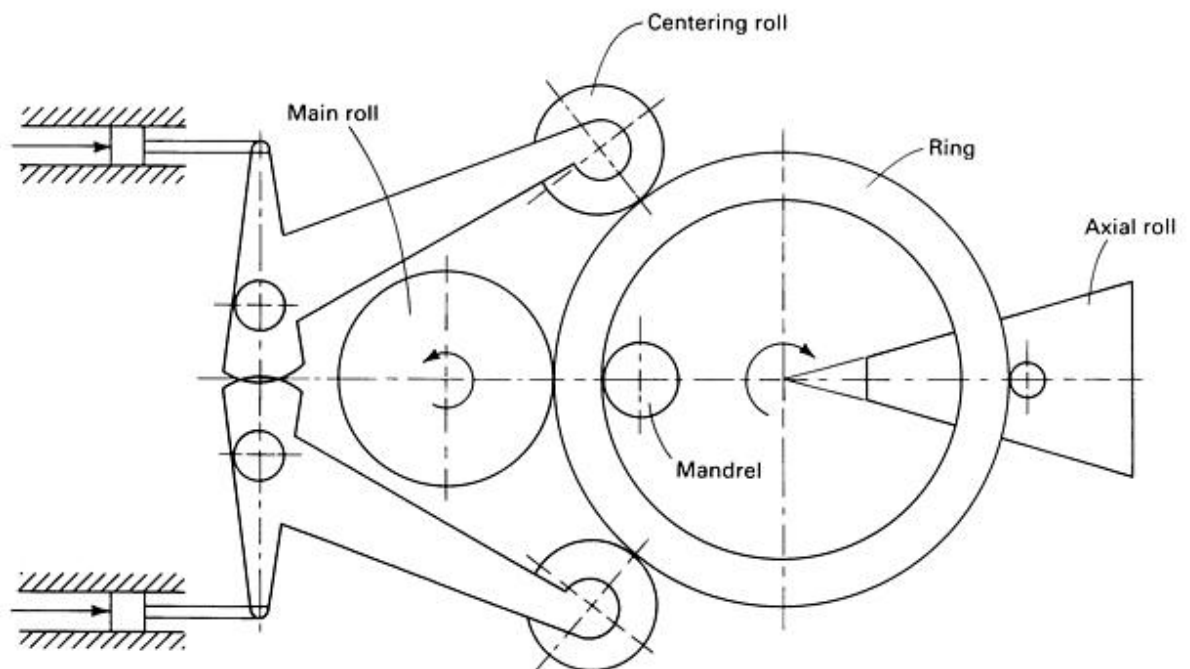


Figura 2.5: Schema del laminatoio radiale-assiale riportante anche i rulli di centratura (fonte: [2]).

La relazione tra la riduzione radiale (di spessore) e assiale (d'altezza) viene calcolata accuratamente a priori, per assicurarsi l'assenza di difetti superficiali, e viene mantenuta da un controllo automatico. Allo stesso modo, lo sviluppo di crescita del diametro può essere prestabilito e controllato dal computer. In questo modo il compito dell'operatore del laminatoio si riduce ad introdurre nell'interfaccia di controllo della macchina solamente le quote di inizio e fine lavorazione per iniziare il ciclo di laminazione. Una volta raggiunta la misura desiderata, per esempio di diametro esterno, interno o medio, a scelta dell'operatore, il processo si interrompe automaticamente.

La ragione che motiva la larga predominanza di macchine di questo tipo è l'ampia potenzialità e versatilità di lavorazione. Una tipica macchina di media potenza infatti, con una capacità di forza di 980 kN orizzontali e 780 kN verticali ed un motore dalla potenza di 500 kW, può laminare anelli dal peso di 45 kg fino ad anelli da 2000 kg. riguardo alle taglie, una macchina del genere può gestire diametri interni anche di 300 mm ed esterni di 3000, mentre le altezze dei pezzi possono variare da 50 a 500 mm. I sistemi di controllo della macchina sono stati progettati per compensare automaticamente le deviazioni dei membri della macchina sul telaio assiale. Questi membri portanti sono progettati per avere la massima rigidità aventi un minimo di deflessione.

2.4 Ottimizzazione di prodotto e processo

Anche se la laminazione di anelli può apparire a prima vista per un lettore casuale un processo semplice, in realtà esso si presenta come una lavorazione complessa e ad oggi non ancora perfettamente compresa e prevedibile. Per molti anni, con processi di sperimentazione, errori ed aggiustamenti, sono state sviluppate svariate tecniche dai costruttori di laminatoi e dagli utilizzatori degli stessi. Queste tecniche sono state progressivamente affinate e ad oggi permettono la produzione di anelli dalle ottime tolleranze e dalle forme a volte complesse. Il problema che persiste riguarda il fatto che tutto risiede nell'esperienza e nell'abilità degli operatori, non vi sono tecniche documentate con precisione e studiate con i dovuti metodi numerici. La crescita anche dell'esperienza dei costruttori, ha permesso la nascita nei primi anni ottanta delle prime macchine radiali-assiali controllate dal computer. Queste macchine erano in grado di produrre anelli esenti da difetti, aventi anche fattori altezza su spessore piuttosto elevati, ad una velocità considerevolmente più alta di quella possibile ottenibile con un controllo manuale. Il primo lavoro di indagine era concentrato sullo spostamento di due singole zone di materiale dell'anello in lavorazione. La deformazione, si è trovata verificarsi in tutta la sezione trasversale del anello se le zone di slittamento si sovrapponevano; i settori di slittamento sono creati dalla rientranza del metallo in rotazione lavorato (Figura 2.6). Uno spostamento considerevole di materiale è stato trovato

nel diametro interno, con un minor spostamento rispetto a quello che si verifica nel diametro esterno, entrambi però nella direzione di laminazione, rispetto al materiale piuttosto indisturbato nel diametro medio dell'anello (Figura 2.7).

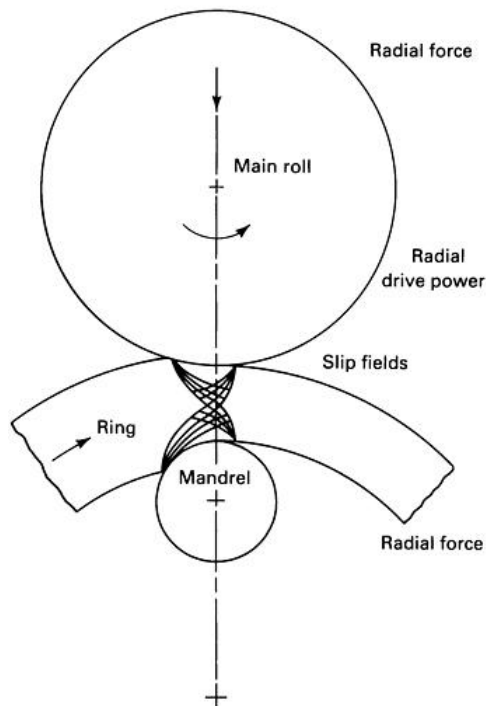


Figura 2.6: Schema dei settori di slittamento generati durante la laminazione ad anello (fonte: [2]).

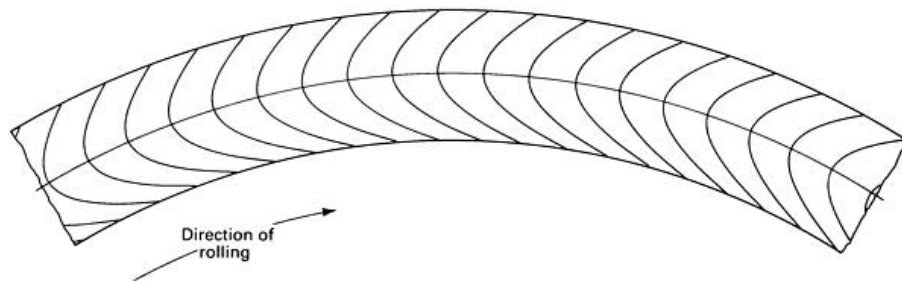


Figura 2.7: Schema del relativo spostamento di materiale in tutto lo spessore dell'anello durante la lavorazione. Il materiale esterno in prossimità delle pareti è spostato rispetto al materiale che si trova in prossimità del diametro medio che si verifica indisturbato (fonte: [2]).

Una ricerca fondamentale ha previsto e confermato, nella laminazione radiale-assiale, la formazione di cerniere plastiche diametralmente opposte al punto di rientranza del rullo (Figura 2.8).

Questo fenomeno è stato identificato come una possibile fonte di problematiche di controllo sulla rotondità dell'anello a tassi di penetrazione molto elevati.

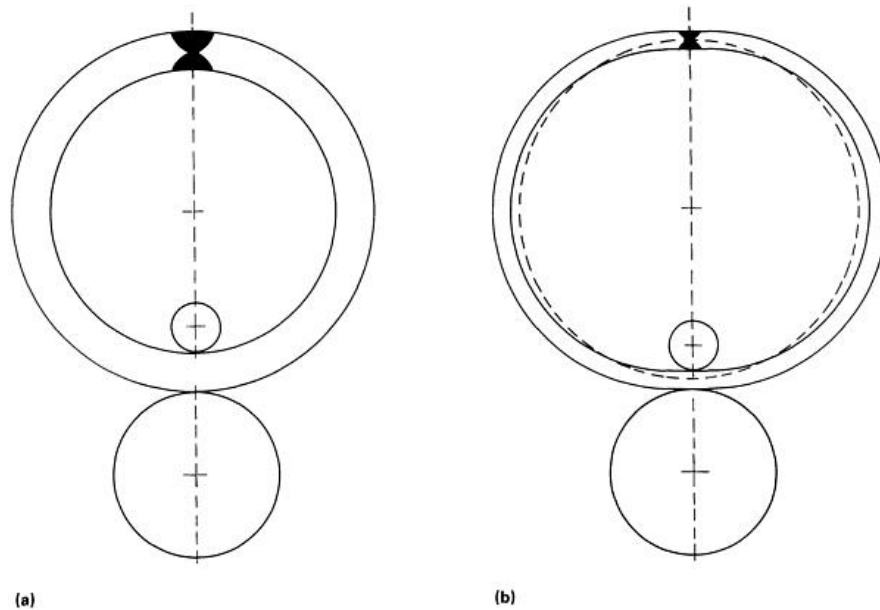


Figura 2.8: Schema riportante la formazione delle cerniere plastiche in seguito alla laminazione (a) e il risultato dell'ovalizzazione(fonte: [2]).

In base al tipo di servo valvola idraulica utilizzata, i laminatoi moderni possono essere controllati in *forza* oppure in base al *tasso di materiale* che alimenta sistema. Nei progetti più recenti, lo schema di velocità secondo cui avanzano i rulli viene programmato al computer. L'obiettivo del sistema di controllo diventa dunque duplice:

- Cambiare la sezione trasversale dell'anello in modo tale da evitare difetti superficiali;
- Controllare il tasso di crescita del diametro ad un livello tale da minimizzare il tempo per completare la laminazione, mantenendo però l'anello stabile e rotondo.

Riguardo ai cambiamenti nella forma della sezione, il rapporto tra riduzione radiale e assiale (spessore su altezza) deve essere mantenuto costantemente in accordo con la seguente relazione, detta equazione di Viaregge:

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = \frac{h}{b} \quad (\text{Eq 2.1})$$

dove Δb rappresenta l'incremento di riduzione dello spessore, Δh l'incremento di riduzione dell'altezza, b lo spessore dell'anello e h la sua altezza. L'equazione 2.1 deriva da considerazioni riguardo all'allargamento che si manifesta laminando con un passo aperto (Figura 2.9).

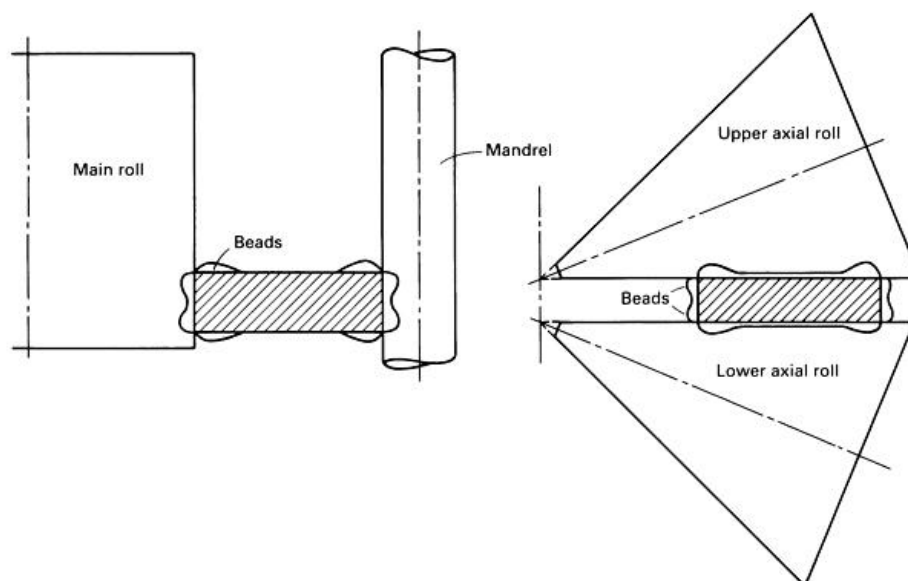


Figura 2.9: Formazione di addensamenti dei bordi durante una laminazione radiale-assiale (fonte: [2]).

Dato che nella laminazione di anelli entrano in gioco velocità di deformazione molto basse ad ogni giro, negli strati esterni del materiale si manifesta la deformazione plastica mentre il centro tende a rimanere rigido o al limite in campo elastico. Questo fenomeno può causare la formazione di addensamenti esterni di materiale dalla forma arrotondata, che seguono il profilo del rullo (vedi Figura 2.9). Quando questi addensamenti si presentano presso il passo radiale per essere laminati, si manifestano dei vistosi accrescimenti che interessano il diametro esterno ed interno a causa del materiale in eccesso. In questa zona il metallo può subire deformazioni e trazioni anomale, arrivando a presentare delle fratture superficiali e soprattutto una mancanza nella faccia superiore od inferiore. Un aumento della laminazione assiale può rimuovere questo difetto, ma causa per contro l'insorgere dello stesso difetto sulle superfici interna ed esterna dell'anello (Figura 2.10).

Un effetto secondario della formazione di questi addensamenti di materiale, causati da una eccessiva laminazione radiale, riguarda il fatto che l'altezza dell'anello all'uscita del passo radiale è significativamente maggiore di quella all'ingresso dello stesso. Se il materiale risulta parecchio deformato, è possibile che la faccia inferiore dell'anello tocchi i piatti inferiori di sostegno (dai quali il pezzo dovrebbe essere sollevato di pochi millimetri), sollevandosi dal piano orizzontale ed innescando un moto a spirale verso il passo radiale. L'anello risulta in questo modo fuori controllo e la lavorazione deve essere fermata; trattenere l'anello forzandolo verso il basso in queste situazioni infatti, soprattutto con pezzi a forma di guarnizione, può compromettere la sezione distorcendola. Per questo motivo mantenere la relazione di Viaregge è importante ai fini della prevenzione di questi difetti. Dall'equazione 2.1 si può ottenere un'altra relazione:

$$h^2 - b^2 = \text{costante} \quad (\text{Eq 2.2})$$

L'equazione 2.2 rappresenta di fatto la relazione iperbolica esistente tra lo spessore e l'altezza dell'anello. Dato che il volume del materiale si suppone costante, questa relazione tra i due parametri deve essere rispettata in ogni istante della lavorazione. Utilizzando le Equazioni 2.1 e 2.2 si possono tracciare delle curve per la laminazione corretta di una sezione, illustrate in Figura 2.12.

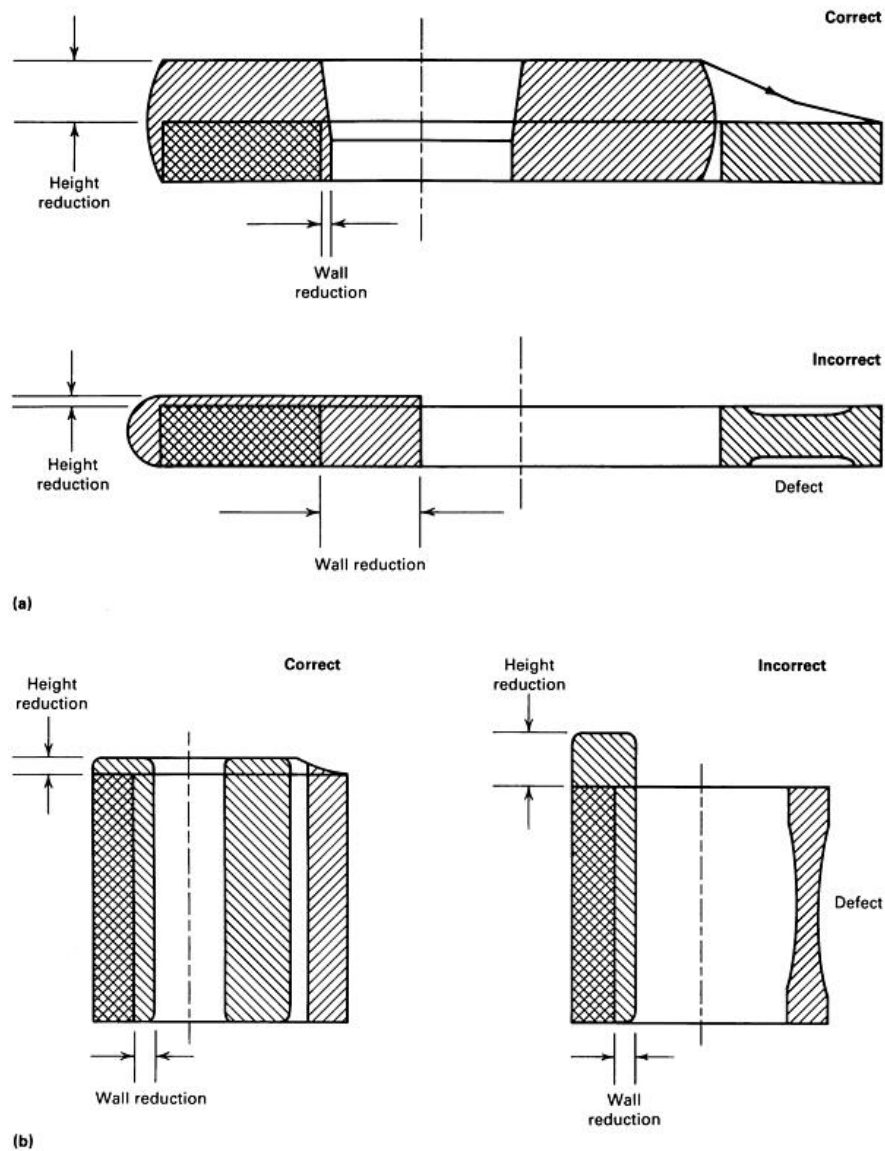


Figura 2.10: Riduzioni in base al corretto rapporto spessore su altezza. (a) Laminazione di un anello a forma di rondella. (b) Laminazione di un anello a forma di manica (fonte: [2]).

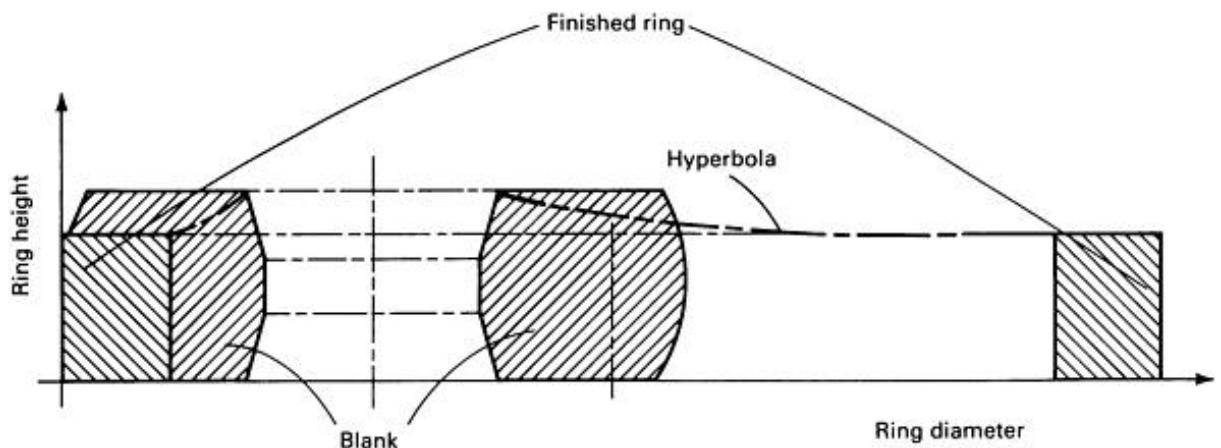


Figura 2.11: Relazione iperbolica tra l'altezza dell'anello ed il suo diametro che deve essere mantenuta in ogni istante (fonte: [2]).

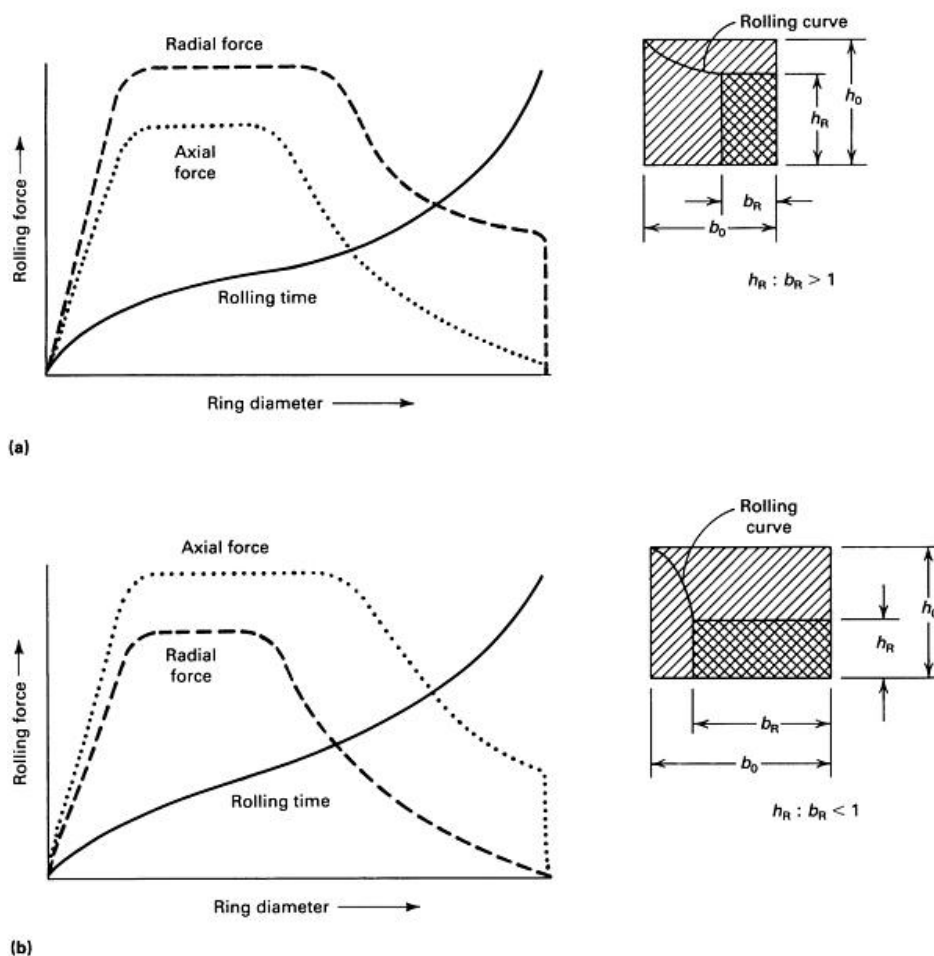


Figura 2.12: Strategie di laminazione per pezzi a forma di manica (a) e a forma di guarnizione (b). b_0 spessore iniziale; h_0 altezza iniziale; b_r spessore finale; h_r altezza finale (fonte: [2]).

La progettazione della pre-forma sembra essere assolutamente indispensabile, dato che, basandosi solamente sulle due equazioni precedenti (Eq. 2.1, 2.2), esiste una sola geometria teorica ideale di partenza, che sia ottima ai fini della lavorazione che si vuole svolgere. In pratica, con un po' di accortezza è possibile scostarsi abbastanza da questa forma teorica. A volte delle modifiche sulla forma iniziale possono essere obbligatorie, per esempio se imposte dall'attrezzatura a disposizione, per generare la preforma e per la laminazione stessa. I più moderni laminatoi permettono la selezione della forma desiderata della curva riduzione di altezza su riduzione di spessore, consentendo all'operatore di compensare l'utilizzo di pre-forme diverse da quella ideale.

La velocità alla quale si riduce la sezione influisce direttamente sulla crescita del diametro e sulla stabilità dell'anello durante la laminazione. Tipicamente, i moderni laminatoi possiedono fino a sei fasi di controllo sequenziali per la crescita dell'anello, sebbene tre sia un numero sufficientemente adeguato (Figura 2.13)

Durante la fase iniziale, la velocità di riduzione della sezione aumenta da un contatto leggero tra pezzo iniziale e rullo fino al massimo in pochi secondi. Nella seconda fase, che è generalmente quella principale, si manifesta una diminuzione del tasso di riduzione della sezione, comportando una crescita di diametro approssimabile come costante. Nella terza fase si manifesta una diminuzione della velocità di crescita del

diametro, ai fini di mantenere la stabilità dell'anello in una fase in cui la sua rigidità sta decrescendo. La fase finale richiede velocità di riduzione della sezione molto basse assieme a velocità di crescita del diametro ugualmente basse. Le dimensioni finali sono ottenute in questa fase.

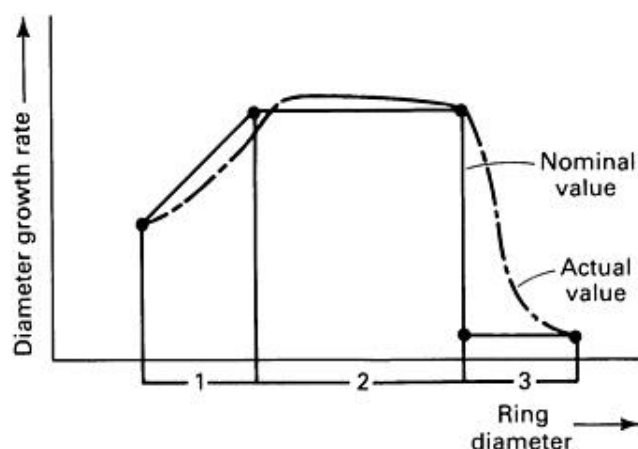


Figura 2.13: Grafico di un programma a tre sezioni in un laminatoio a controllo numerico (fonte: [2]).

2.4.1 Laminazione corretta di anelli contornati

Lavorando anelli a sezione contornata (indicati in Figura 2.14), risulta molto più difficile predire il comportamento del materiale rispetto ad una forma rettangolare. Grazie a molti studi sperimentali, sono state sviluppate nel corso degli anni delle relazioni teoriche ed empiriche che hanno fornito risultati piuttosto accurati nel calcolo della preforma dell'anello iniziale, riuscendo inoltre a predire il grado di successo nell'ottenere la forma desiderata da quella di partenza. I primi anelli sagomati, prodotti con laminatoi commercializzati, furono le ruote ferroviarie, prodotti a Manchester, in Inghilterra nel 1852.

Uno dei fattori ancora essenziali, però, per una moderna azienda di successo nel campo della laminazione di anelli, resta ancora l'esperienza pratica guadagnata, lavorando una vasta gamma di forme e materiale nel corso degli anni.

Molti contorni possono essere laminati a partire da anelli dalla sezione perfettamente rettangolare, specialmente forme asimmetriche con una sezione più sottile al centro, come in Figura 2.14.

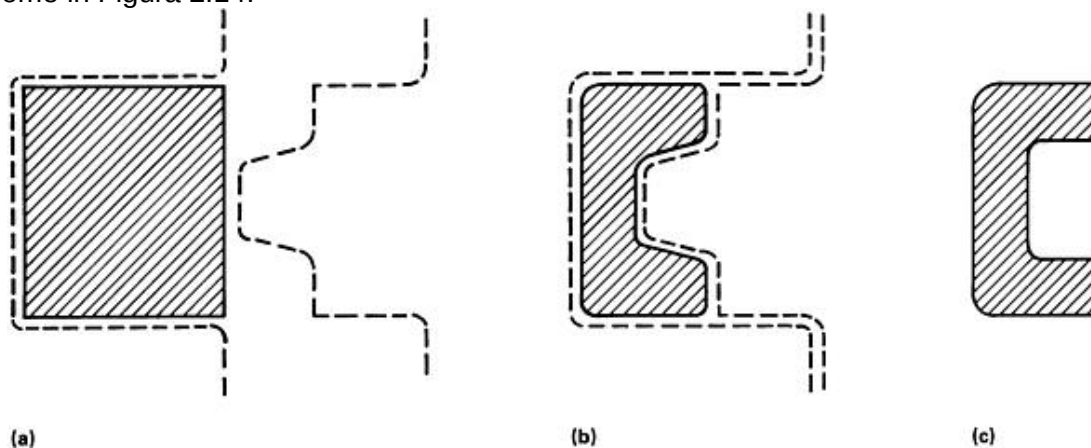


Figura 2.14: Vari step di lavorazione di un anello con sezione a C (fonte: [2]).

Può essere però necessario l'uso di un anello preformato, nel caso in cui non si riesca a raggiungere la forma desiderata partendo da un semplice rettangolo. Tipicamente, il punto di partenza per creare una nuova forma di contorno è applicare dall'anello alla preforma un semplice calcolo di distribuzione dei volumi. Con questo metodo, l'anello viene diviso in un numero di fette assiali, o dischi, dei quali viene calcolato il volume. Conoscendo la taglia del mandrino che dovrà essere utilizzato, assieme con il diametro interno dell'anello da lavorare, è possibile calcolare un diametro esterno teorico per ognuna delle fette che compongono il pezzo (assumendo che una fetta non subisca cambiamenti d'altezza). Aggregando i risultati di ogni sezione, è possibile generare la forma del diametro esterno contornato. Questo risultato riguardante la forma esterna dell'anello da lavorare non è necessariamente sempre efficace nella pratica, dato che per esempio non tiene conto del flusso assiale di materiale e considera singolarmente le singole fette.

Inoltre, una condizione ideale vedrebbe la forma del rullo sagomato cambiare istante dopo istante, modellandosi perfettamente alla preforma all'inizio della lavorazione e cambiando fino a fornire all'anello la forma finale. Questo ovviamente nella realtà non è possibile. Nella pratica, una soluzione efficace consiste nell'operare una laminazione a due fasi, usando all'inizio un rullo sagomato avente una forma intermedia tra l'anello preformato e quello finale.

Vediamo ora cosa suggerirebbe la teoria riguardo al nostro caso di studio, cioè riguardante un anello flangiato a contornatura esterna.

Nell'utilizzo di un laminatoio radiale-assiale invece, la preforma deve essere progettata in modo tale che la sua altezza sia ridotta all'altezza finale, prima che il materiale entri nella sezione più alta del passo, oppure si è costretti a programmare il moto del cono assiale superiore, in modo tale da farlo salire, invece che scendere (Figura 2.15).

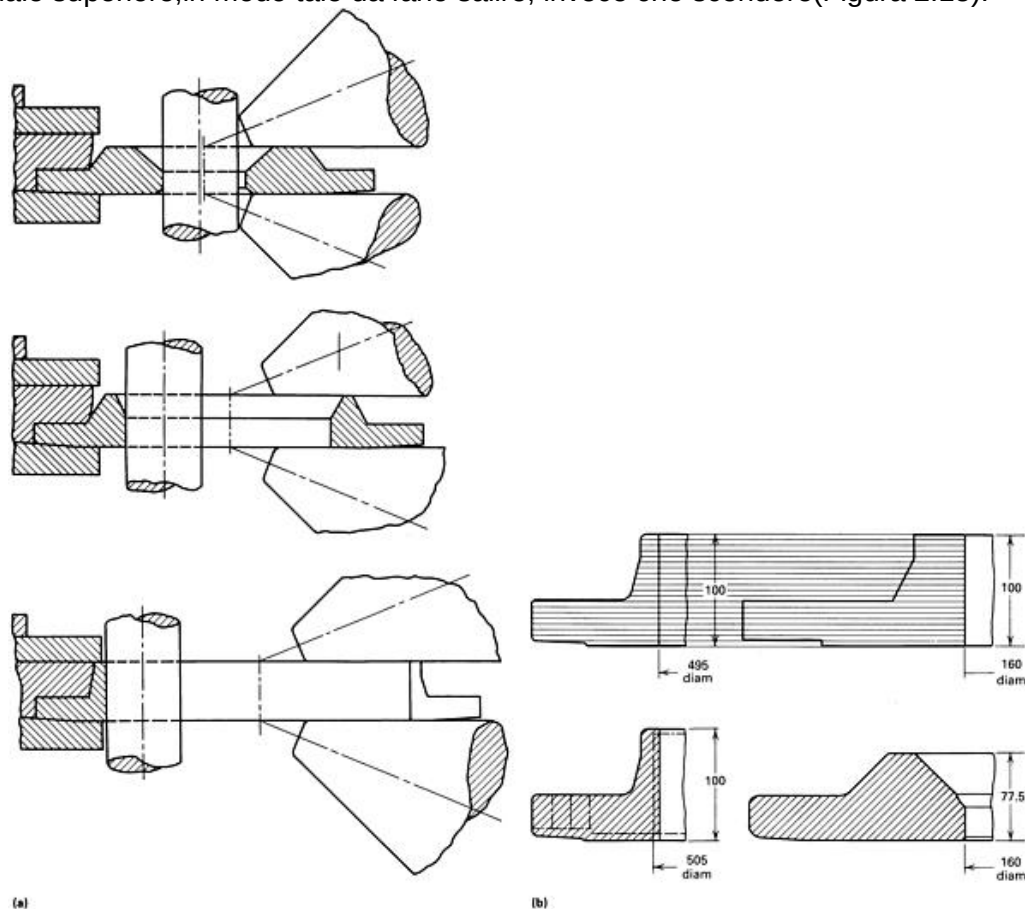


Figura 2.15: Laminazione di un anello flangiato in un laminatoio radiale-assiale con controllo del movimento del cono superiore verso l'alto (fonte: [2]).

Si possono effettuare anche alcune considerazioni riguardo alla forma iniziale da lavorare, confrontando due modelli:

- una geometria suggerita dalla teoria (Figura 2.15b, Figura 2.16a), avente il bordo interno perfettamente piano,
- la geometria che si utilizza nella pratica (Figura 2.15b, Figura 2.16b), con una preforma suggerita dall'esperienza grazie alla quale si favorisce il flusso di materiale verso la sezione superiore dell'anello.

La preforma suggerita dalla pratica presenta una flangia meno pronunciata rispetto a quella semplice teorica, pur mantenendo il volume necessario di materiale. La flangia teorica, essendo più pronunciata, risulterebbe solo parzialmente racchiusa dalla scanalatura del rullo principale, causando la formazione di ripiegature di materiale presso la giunzione tra faccia superiore della flangia e il diametro esterno. Questo fenomeno indesiderato accadrebbe a causa di zone di deformazione localizzate tra la giunzione e il diametro interno, in presenza di un nucleo dell'anello di materiale ancora elastico. La Figura 2.13 illustra i comportamenti dei due modelli di anello flangiato.

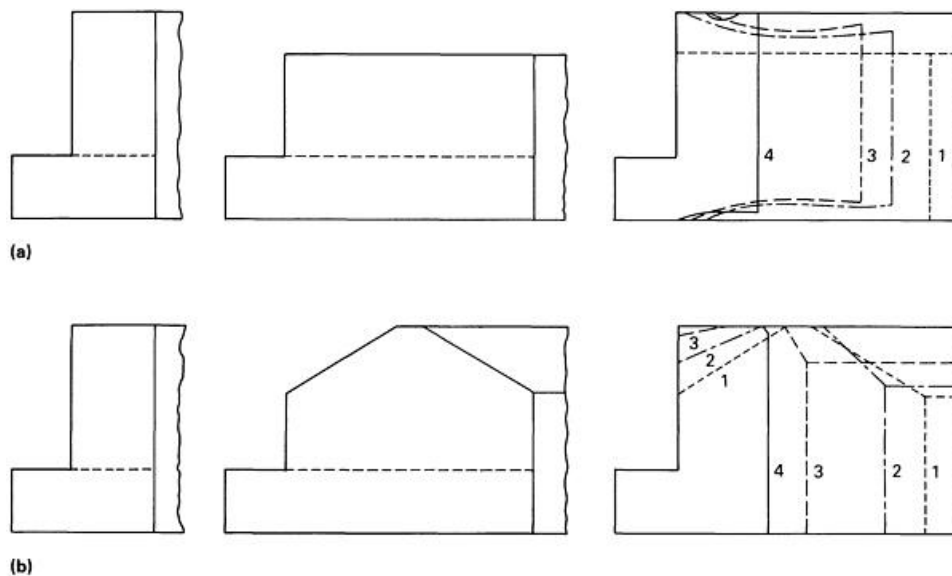


Figura 2.16: Sviluppo del profilo finito di un anello flangiato a partire da una preforma: (a) teorica, (b) pratica. Da sinistra a destra possiamo vedere il profilo finale richiesto (uguale per entrambi i modelli), la preforma, le fasi di sviluppo del pezzo durante la laminazione (di insuccesso, nel caso teorico) (fonte: [2]).

I benefici di una laminazione di contornatura riguardano soprattutto il minor materiale utilizzato e la riduzione delle lavorazioni successive per ottenere il prodotto finito. Tipicamente, l'utilizzo di anelli contornati rispetto a quelli a sezione rettangolare, contribuisce ad un risparmio di materiale del 15-30%, dato che la loro forma risulta molto prossima a quella finale che si intende realizzare, limitando così le lavorazioni successive di asportazione di truciolo. Per determinare se sia giustificato il costo aggiuntivo di utensili più costosi e tempi di setup aumentati, è possibile determinare il punto di pareggio con i risparmi. Persino con i pezzi di materiale più economico, la quantità minima del lotto da produrre per raggiungere il pareggio può essere solamente di 25-30 pezzi. Utilizzando materiali ad alto costo, come le superleghe, tre o quattro prodotti potrebbero essere sufficienti per giustificare l'utilizzo di questa lavorazione.

2.4.2 Forze, potenze e velocità di laminazione

Dal punto di vista economico, la produzione di anelli con tecniche di laminazione radiale-assiale deve essere effettuata alla maggiore velocità possibile, assicurandosi la correttezza dimensionale e l'integrità metallurgica necessari. Un fattore di primaria importanza di cui bisogna tenere conto in queste considerazioni, è la resistenza del materiale alla deformazione. Per fornire un esempio, utilizzando configurazioni tipiche del laminatoio per quanto riguarda velocità e tassi di riduzione della sezione e con temperature che si aggirano sui 1050-1100 °C la resistenza alla deformazione di un acciaio al carbonio è approssimativamente 160 MPa, mentre quella di un acciaio per cuscinetti è 196 MPa (Figura 2.17). Per questi materiali, una diminuzione di temperatura di 100 °C, aumenta la resistenza alla deformazione addirittura del 50%. Per questo motivo, si cerca di operare alla massima temperatura possibile, dal punto di vista metallurgico, per minimizzare la richiesta di forza. Il controllo della temperatura risulta però delicato, in quanto si verificano contemporaneamente perdite di calore (a causa di scambi termici con l'ambiente e gli utensili) assieme a fenomeni di surriscaldamento, dovuto ad attriti e deformazioni plastiche.

Risulta inoltre inutile considerare le forze di laminazione separatamente. La penetrazione del rullo viene infatti determinata dall'insieme della forza di laminazione e dalla resistenza alla deformazione del pezzo. All'aumentare della penetrazione, cresce anche la richiesta di potenza e, su laminatoi moderni, può raggiungere il limite del motore prima che sia stata applicata la massima forza di laminazione. Inoltre, quando vi è in gioco una penetrazione eccessiva, se il rullo folle presenta un diametro troppo ridotto, esso esercita una resistenza circonferenziale così elevata da causare lo scivolamento del rullo principale, arrestando il moto di rotazione del pezzo (Figura 2.17).

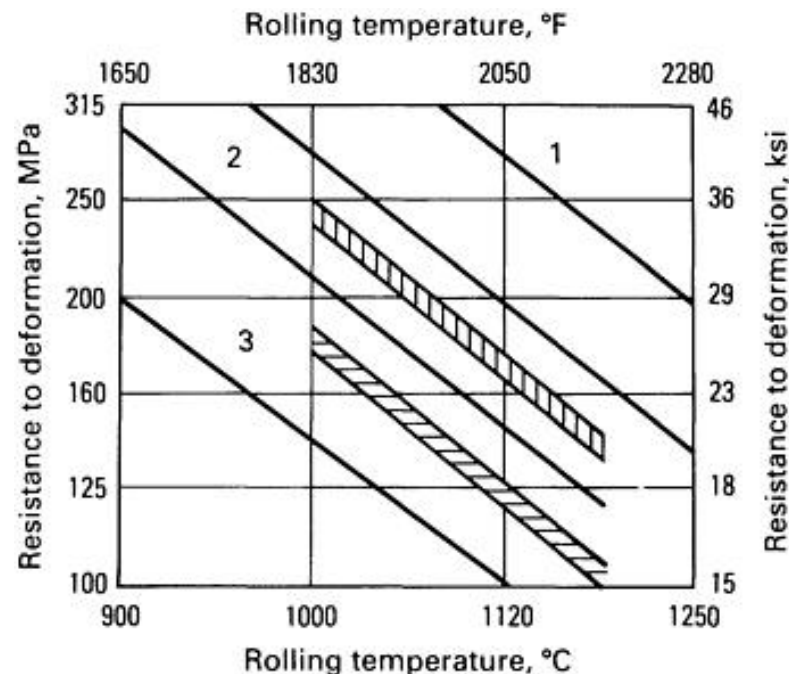


Figura 2.17: Resistenza alla deformazione in fase di laminazione in funzione della temperatura per alcuni acciai. (1) acciai al cromo-nichel (> 4% elementi di lega), (2) acciai per cuscinetti (cromo-nichel; 1-4% elementi di lega), (3) acciai al carbonio. (fonte: [2]).

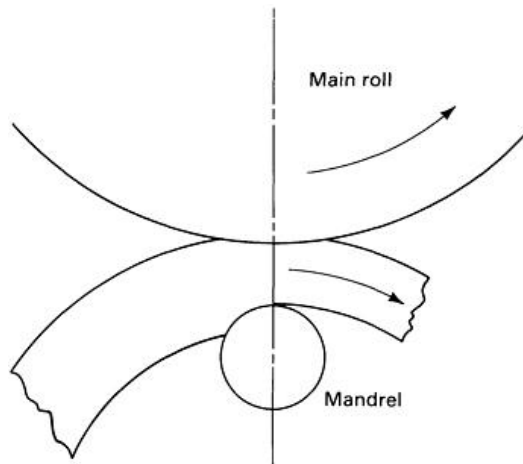


Figura 2.18: Eccessiva penetrazione del mandrino: ciò comporta lo scivolamento del rullo principale ed uno stallo del pezzo sul passo radiale (fonte: [2]).

Per evitare questo tipo di problemi, i moderni laminatoi applicano il principio del controllo adattativo. Questo principio prevede l'utilizzo di controllori per monitorare continuamente le forze e le coppie che caratterizzano il processo: se i parametri di forza superano il limite massimo del laminatoio, sono automaticamente ridotti in misura tale da mantenere i percorsi predeterminati di riduzione della sezione e crescita del diametro.

Molte delle analisi teoriche utilizzate per stimare o simulare le coppie e le forze durante una laminazione di anelli, sono state di fatto derivate dagli studi di laminazioni piane di barre a caldo. Vi sono senza dubbio però alcuni fattori che complicano la situazione riguardo alla laminazione di anelli e alle semplificazioni che si possono effettuare:

- Laminazione non simmetrica, dovuta alla differenza dei rulli radiali (rullo principale e mandrino);
- Rulli non necessariamente cilindrici, di diametro variabile (coni assiali);
- Un solo rullo è motorizzato, ossia quello principale;
- Il diametro dell'anello è in continua espansione, con conseguenza sulla velocità di rotazione;
- Riduzione continua di altezza e spessore;
- Deformazione presente in tre dimensioni: nella direzione di chiusura dei rulli, nella direzione di laminazione e nell'allargamento laterale.

Un ulteriore fattore limitante, riguardo alla velocità con cui un anello può essere laminato, riguarda la stabilità dell'anello durante il processo. In presenza di rotazione a velocità eccessiva, l'anello può mancare di rigidità nel momento in cui le varie forze in gioco agiscono su di esso, anche a causa del fatto che, le varie estrusioni nei due passi generano continue variazioni di velocità. Nella pratica, si è soliti trovare velocità fino a 3.6 m/s sui laminatoi di dimensioni più piccole, mentre sui laminatoi più grandi le velocità possono essere dell'ordine di 1 – 1.6 m/s. Le *velocità di crescita* del diametro possono raggiungere anche i 35 mm/s durante la fase principale di espansione, mentre durante la fase di calibrazione finale si è soliti impostare tali velocità a 1 mm/s.

CAPITOLO 3

Messa a punto del modello FEM del processo di laminazione a caldo di un anello flangiato

3.1 Messa a punto del modello numerico

3.1.1 Geometrie

Come viene accennato nel capitolo 1 grazie ai disegni quotati, degli stampi e delle sagome utilizzate, è stato possibile tarare il software per replicare nel modo più reale possibile il processo di laminazione ad anello, con il software di simulazione *Simufact Forming9.0.1*

In Figura 3.1 viene riportata una illustrazione del modello riprodotto in ambiente *Simufact Forming9.0.1*.

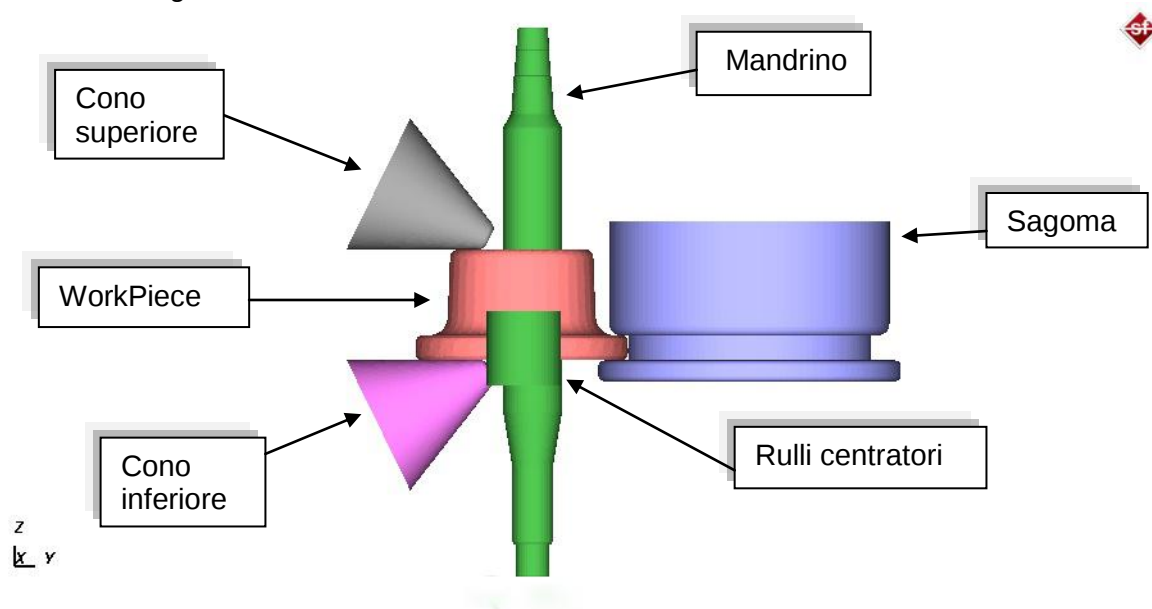


Figura 3.1: Modellazione geometrica del processo di laminazione.

1. **WorkPiece.** Grazie agli strumenti di esportazione del software, è stato possibile generare il modello 3D dalla preforma a partire dalla geometria 2D mediante rivoluzione attorno all'asse di simmetria.

Una volta creata la preforma in 3D, è stato simulato il processo di riscaldamento alla temperatura di 1240°C per portare il materiale alla temperatura di inizio lavorazione e per ridurre eventuali tensioni indotte durante le fasi di lavorazioni precedenti. In Figura 3.2 viene rappresentata un'illustrazione del WorkPiece creato in ambiente *Simufact Forming9.0.1*. Nella Figura seguente viene riportata la sezione in 2D dell'anello e il pezzo in 3D.

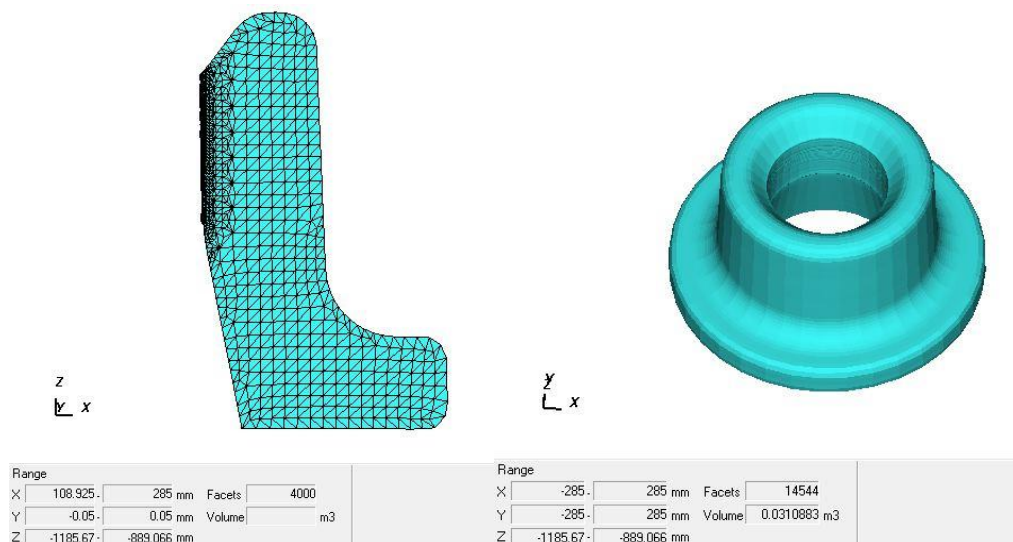


Figura 3.2: Geometria del WorkPiece.

- 2. Laminatoio.** I componenti del laminatoio quali: sagoma, mandrino, coni e rulli centratori sono stati realizzati grazie alla modellazione solida in ProEngeneer . Questa modellazione dei componenti del laminatoio è stata resa possibile grazie ai disegni quotati forniti dall'azienda ASFO spa di ogni singolo componente . Si è realizzato quindi un modello di laminatoio in *Simufact.Forming9.0.1* in grado di replicare in modo più fedele possibile il laminatoio reale presso l'azienda. In Figura 3.3 viene riportata il modello 3D del laminatoio replicato in ambiente *Simufact.Forming9.0.1*.

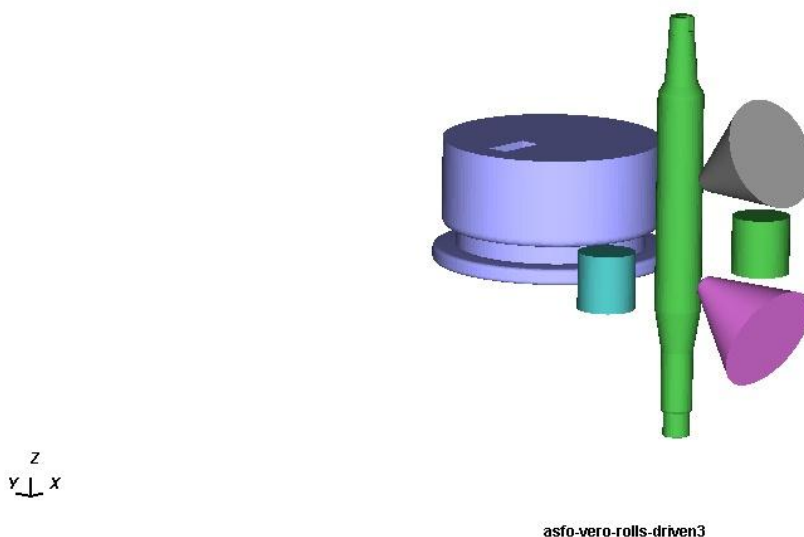


Figura 3.3: Modello del laminatoio ad anelli.

3.1.2 Parametri di processo

Attriti

Per spiegare più in dettaglio la teoria degli attriti viene proposto in seguito una breve spiegazione riguardo al problema, facendo uso di semplici rappresentazioni illustrative (Figura 3.4, figura 3.5, Figura 3.6).

Le forze di attrito dipendono da alcuni fattori quali:

- Pressione di contatto;
- Materiale;
- Temperatura;
- Lubrificante;
- Cambiamento di forma delle superfici;
- Rugosità;
- Velocità relativa (attrito statico o dinamico);

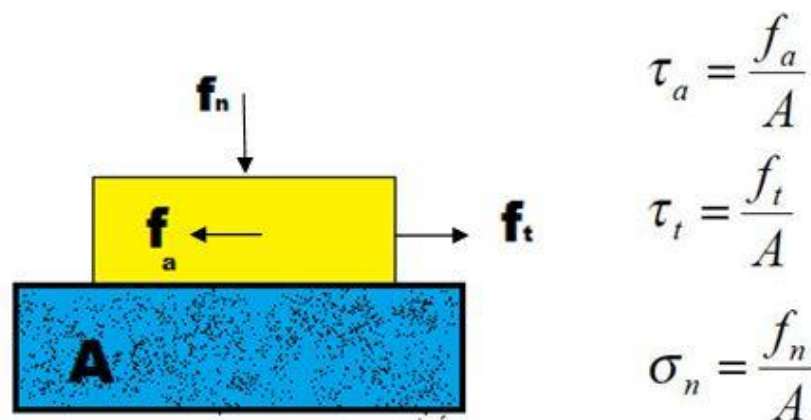


Figura 3.4: Illustrazione forze di attrito in gioco quando sottoposte ad una forza esterna.

Nei casi reali l'area di contatto A è sempre molto inferiore all'area nominale, per via delle asperità della superficie.

L'effetto dell'attrito limita il flusso delle zone vicine al contatto, verificando un effetto di distorsione (effetto dell'imbarilimento) con conseguente aumento del lavoro speso.

Il modello dell'attrito di Coulomb è valido solo quando le pressioni in gioco sono molto elevate. Nel *Metal Forming*, le pressioni sono invece spesso elevate, e le caratteristiche dei materiali dovrebbero entrare nel modello.

Come è ben illustrato nella Figura 3.5 al crescere della forza in gioco la τ_a , secondo il modello di Coulomb, cresce linearmente senza limiti anche superando il limite di

resistenza al taglio dei materiali interessati. Per evitare dunque questo problema si può mettere in relazione la τ_a di Coulomb e la τ_a di Tresca. Così facendo l'attrito secondo Coulomb cresce fino ad un certo punto e poi con l'aumentare della forza entra in gioco solo l'attrito secondo Tresca.

In particolare la τ_a non può essere maggiore della resistenza massima a taglio $\tau_{\max}$ del materiale più tenero.

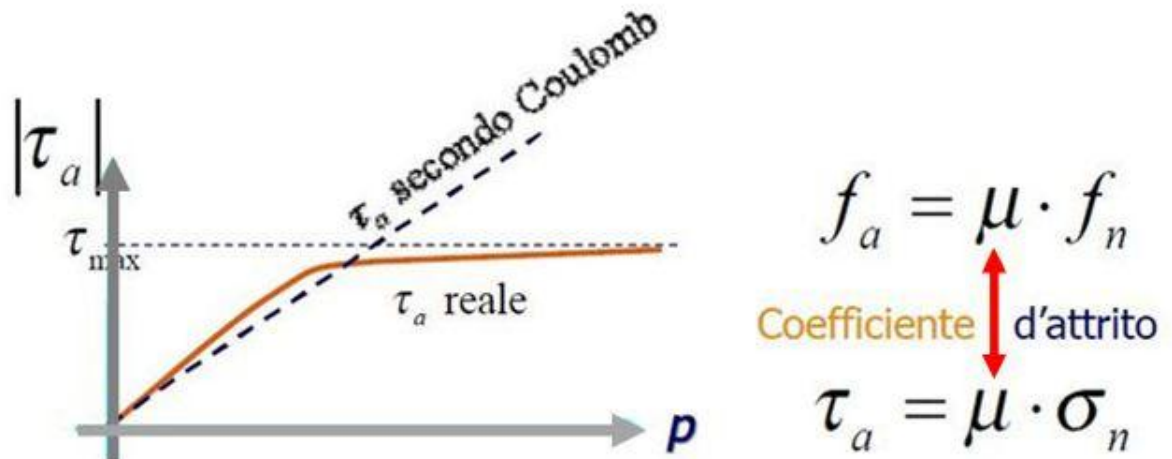


Figura 3.5: Rappresentazione schematica modello di Coulomb.

Il valore del massimo sforzo di taglio lo si ottiene mediante il modello del massimo sforzo di taglio definito secondo Tresca. Questo modello afferma che la τ_a non può superare la resistenza massima al taglio del materiale più tenero. Si possono definire quindi due criteri della $\tau_{\max}$ secondo Von Mises e secondo Tresca.

- Secondo Von Mises:

$$\tau_{\max} = \frac{\bar{\sigma}}{2}$$
- Secondo Tresca:

$$\tau_{\max} = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}}$$

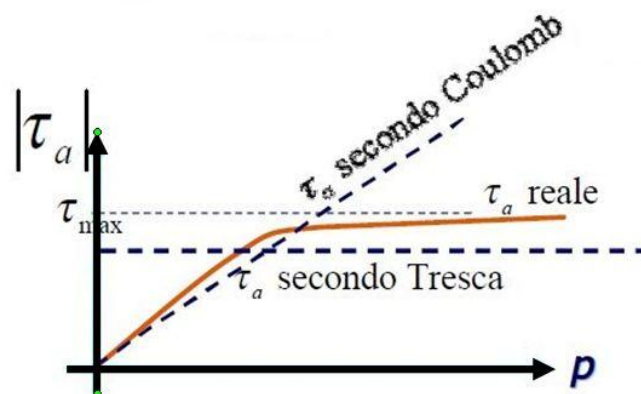


Figura 3.6: Rappresentazione schematica modello di Tresca.

A questo proposito, quindi, sarebbe opportuno ed efficace simulare il processo con una formulazione dell'attrito mista, dato che come già spiegato una formulazione esclusivamente coulombiana potrebbe dare problemi con il crescere delle forze in gioco durante il processo di laminazione.

Per semplicità, però, nella simulazione sono stati impostati dei coefficienti di attrito basandosi sulla libreria del software. Si è usato un valore costante di attrito secondo Tresca pari a 0.85 fra sagoma e workpiece, e un valore pari a 0.6 fra tutti gli altri componenti del laminatoio e il workpiece.

In figura 3.7 viene riportata un'illustrazione di come sono stati impostati i coefficienti di attrito nel software di simulazione, in questo caso particolare viene illustrato il coefficiente di attrito tra sagoma e workpiece.

The image shows a software window for configuring friction parameters. It has three main sections: 'Type of Friction' with a dropdown menu, 'Plastic Shear Friction' with a text input for the 'Interface friction factor (m) [0 - 1]' set to 0.85, and 'Die wear' with inputs for 'Hardness' (1 Pa) and 'Wear coefficient' (1e-012 1/m). There is also a checkbox for 'Dependent on heat' and a button labeled 'Open table...'.

Figura 3.7: Esempio rappresentativo dei coefficienti di attrito.

Temperature

Un fattore di primaria importanza di cui bisogna tenere conto in queste considerazioni, è la resistenza del materiale alla deformazione. Per fornire un esempio, utilizzando configurazioni tipiche del laminatoio per quanto riguarda velocità e tassi di riduzione della sezione e con temperature che si aggirano sui 1050-1100 °C, la resistenza alla deformazione di un acciaio al carbonio è approssimativamente 160 MPa, mentre quella di un acciaio per la produzione di cuscinetti è 196 MPa. Per questi materiali, una diminuzione di temperatura di 100 °C, aumenta la resistenza alla deformazione addirittura del 50%. Per questo motivo, si cerca di operare alla massima temperatura possibile, dal punto di vista metallurgico, per minimizzare la richiesta di forza. Il controllo della temperatura risulta però delicato, in quanto si verificano contemporaneamente perdite di calore (a causa di scambi termici con l'ambiente e gli utensili) assieme a fenomeni di surriscaldamento, dovuto ad attriti e deformazioni plastiche.

Il processo di laminazione dell'anello in analisi viene eseguito a caldo, laminando una preforma alla temperatura rispettivamente di 1240°C. Le attrezzature utilizzate per

effettuare la laminazione vengono sottoposte ad un processo preriscaldato per favorire e garantire un processo omogeneo anche dal punto di vista delle deformazioni plastiche. Sagoma e mandrino vengono pre-riscaldati alla temperatura di 400°C, mentre i coni alla temperatura di 350°C. Anche il workpiece viene riportato alla temperatura di 1240°C visto che durante le fasi che lo portano alla formatura, scambia calore per conduzione con le attrezzature che lo deformano. Per iniziare, quindi, la lavorazione con la temperatura del materiale esattamente alla temperatura del 1240°C viene fatta riprendere la temperatura dell'anello mediante un riscaldamento di 60 secondi in un forno a metano.

In Figura 3.8 viene riportata un'illustrazione della distribuzione della temperatura un istante prima di iniziare la lavorazione.



Figura 3.8: Mappe di temperatura del laminatoio e dell'anello ad inizio simulazione.

Legge di moto

Durante il processo reale di laminazione un operatore monitora costantemente il diametro esterno dell'anello in lavorazione con una misuratore laser. Sulla base di rilievo del diametro l'operatore può agire su alcuni parametri di processo, seguendo le opportune curve di accrescimento stabilite. Le curve di accrescimento vengono riportate in Figura 3.9 e 3.10. Le curve delle leggi di moto fornite dall'azienda quindi, non possono essere considerate affidabili dal momento che durante il processo reale un operatore regola al bisogno le velocità di laminazione comportando quindi variazioni sulle curve stesse. Si è preferito quindi semplificare le leggi di moto nella simulazione, semplificando la legge di moto del mandrino e dei coni. In Figura 3.9 e 3.10 sono riportate le principali curve di laminazione utilizzate, in funzione della fascia e in funzione del diametro esterno.

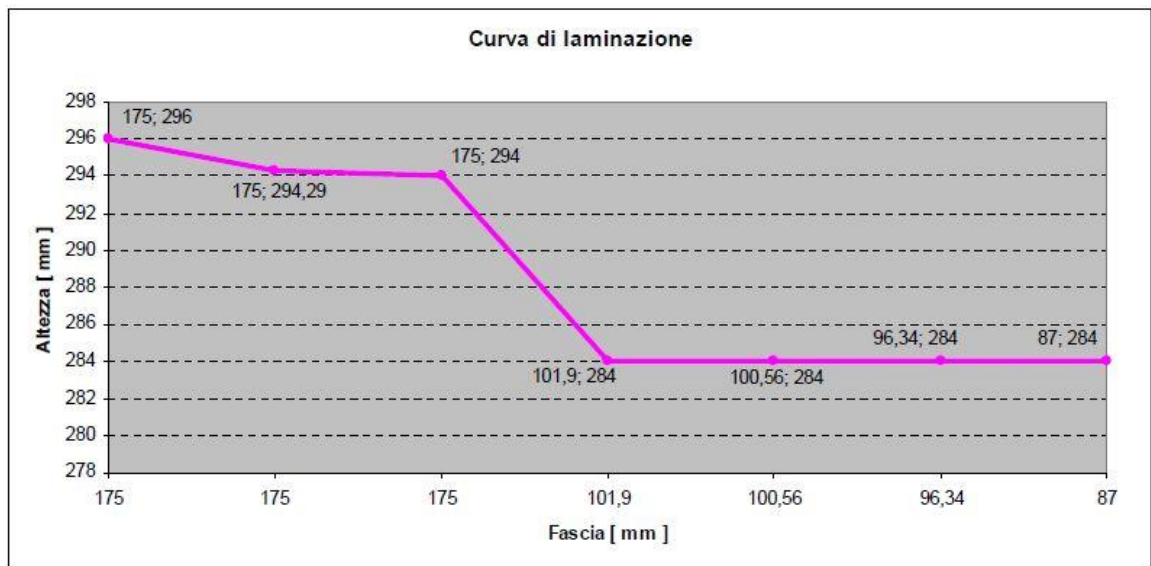


Figura 3.9: Curva di laminazione altezza in funzione della fascia.(Fascia da intendersi come differenza fra diametro esterno sbozzato e diametro spinatura).

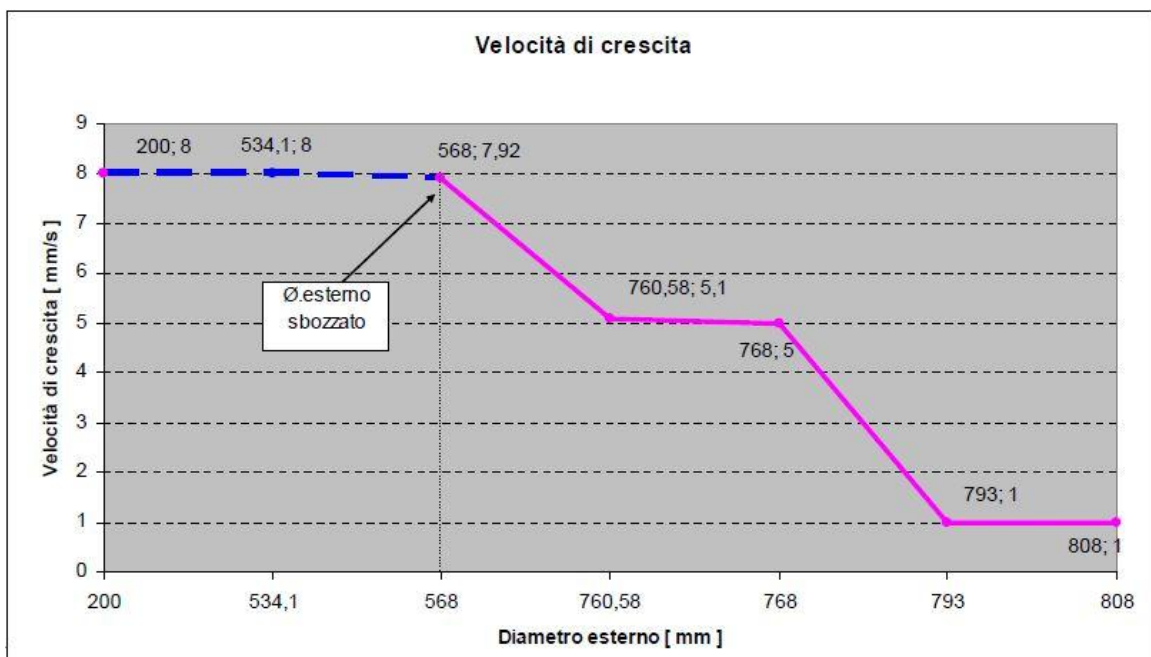


Figura 3.10: Curva di laminazione riportante la velocità di crescita del diametro in funzione del diametro esterno.

Da queste curve di laminazione si può ricavare la legge cinematica attribuita al mandrino, calcolando in primo luogo i tempi di percorrenza dei tratti del grafico di Figura 3.10. rappresentati in Figura 3.11

Conoscendo la velocità media di percorrenza del tratto e di quanto il diametro viene accresciuto in ogni tratto, vengono riportati i calcoli fatti nella tabella seguente (Tabella 3.1) per determinare il tempo di percorrenza su ciascuna rampa del grafico di Figura 3.10.

Vel.cresc[mm/s]	D.iniziale[mm]	D.finale[mm]	Diff.Diametro [mm]	Vel.media crescita	Tempo[s]
7,92	568	760,58	192,58	6,51 mm/s	29,5821813
5,1	760,58	768	7,42	5,05 mm/s	1,46930693
5	768	793	25	3 mm/s	8,33333333
1	793	808	15	1 mm/s	15

Tabella 3.1: tabella riportante i tempi di percorrenza dei tratti del grafico in Figura3.11.

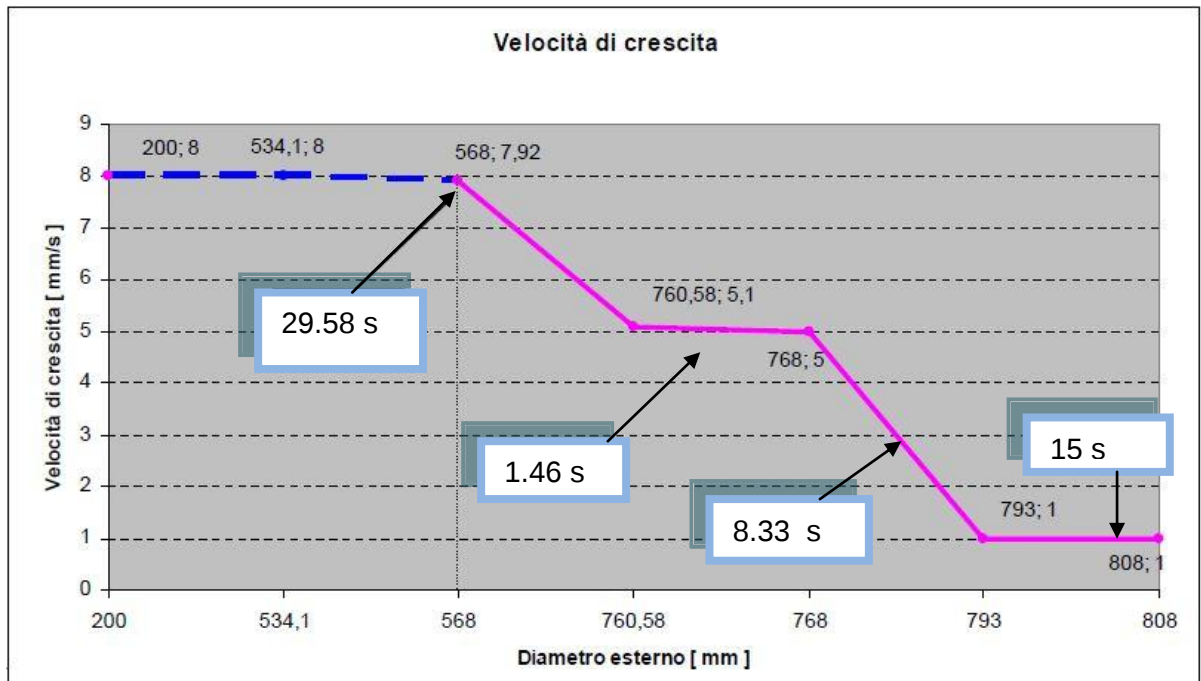


Figura 3.11: Curva di laminazione riportante la velocità di crescita del diametro in funzione del diametro esterno.

Una volta determinati i tempi di percorrenza si è valutato il tratto di traslazione del mandrino.

Inizialmente il mandrino si trova ad una distanza dalla sagoma di $Y = 127,129 \text{ mm}$ come viene rappresentato in Figura 3.12.

A laminazione ultimata si deve ottenere un collare dello spessore di 37,5mm.

Si ricava banalmente quindi che la corsa del mandrino è di 89.629 mm in direzione verso la sagoma.

Introduciamo ora un coefficiente x di proporzionalità che mette in relazione la velocità di crescita del diametro con la velocità di avanzamento del mandrino. La velocità di accostamento ($V_{\text{accostamento } i}$) sarà legata alla velocità media di crescita ($V_{\text{media } i}$) dalla legge:

$$V_{\text{accostamento } i} = V_{\text{media } i} * x$$

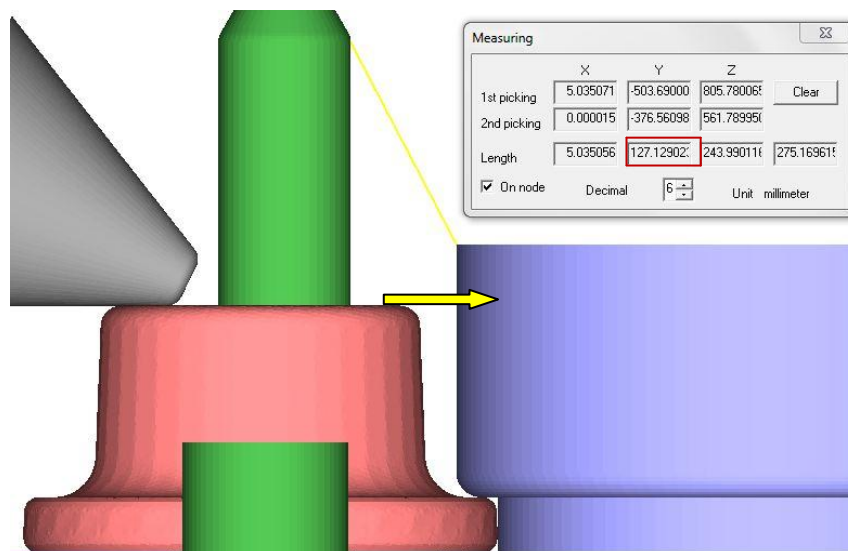


Figura 3.12: Distanza iniziale SAGOMA-MANDRINO.

A questo punto conoscendo la corsa del mandrino e gli spazi percorsi nelle rampe del grafico(Figura3.11) si può formulare la seguente equazione:

$$29.58 * x + 1.46 * x + 8.33 * x + 15 * x = 89.629 \text{ mm}$$

Si determina il valore di x che per questa simulazione è pari a 0,37345.

Essendo x=0,37345 ora è possibile ricavare dalle velocità di crescita, le velocità di accostamento del mandrino nei rispettivi tratti.

In figura 3.13 viene riportata in forma tabulare la legge di moto del mandrino una volta determinate tutte le velocità di accostamento con i rispettivi tempi.

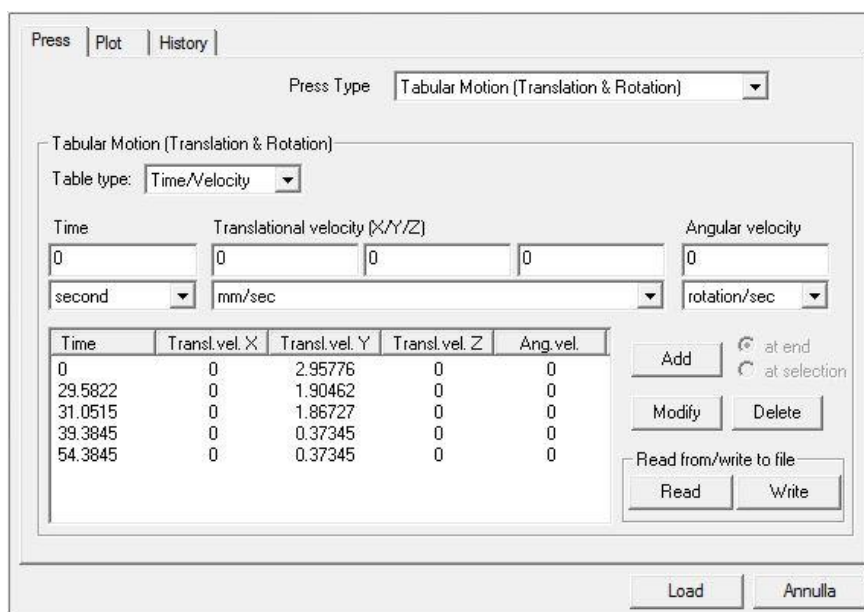


Figura 3.13: Legge di moto tabulare attribuita al mandrino.

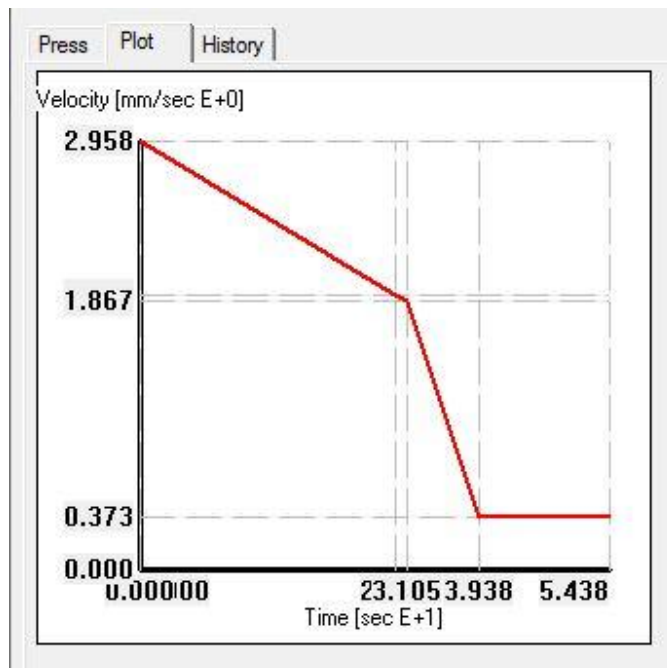


Figura 3.14:Grafico della legge di moto attribuita al mandrino.

Per semplicità, come già accennato prima, si è preferito attribuire al mandrino una legge di moto semplificata con una velocità di accostamento costante pari a 2 mm/s. Anche con questa velocità di accostamento semplificata si è determinato il tempo necessario affinché il mandrino arrivi ad una distanza dalla sagoma desiderata.

Velocità angolari

Il mandrino come specificato dai dati fornitici da ASFO spa, è in folle e la sua rotazione angolare è data grazie al contatto con il pezzo.

La rotazione del pezzo è garantita dalla sagoma, la quale è alimentata da un motore la cui velocità di rotazione è 1500 giri/minuto caratterizzato da un riduttore con rapporto 1:25. La sagoma quindi ruota ad 1 giro/sec.

Durante la simulazione di questo processo di lavorazione è stato garantito in ogni momento di calcolo che la rotazione del mandrino non fosse nulla.

In Figura 3.15 viene portato un grafico della velocità angolare relativa al mandrino nella fase di laminazione con la rispettiva legenda in basso a destra.

La curva in rosso descrive l'andamento della velocità angolare del mandrino, la retta blu descrive la velocità costante della sagoma mentre la retta gialla descrive la velocità costante del cono superiore. Gli altri componenti segnalati nella legenda e non visibili nel grafico delle velocità, sono componenti la cui loro velocità angolare è nulla.

Da figura 3.15 quindi è possibile vedere che il mandrino è sempre in rotazione, e questo è un dato molto positivo ai fini del processo.

Nel caso in cui il contatto tra mandrino e workPiece non fosse sempre garantito durante la simulazione di lavorazione, questo avrebbe compromesso i risultati finali con vari schiacciamenti, oscillazioni del pezzo non volute e una forma finale dell'anello differente da quella di progettazione.

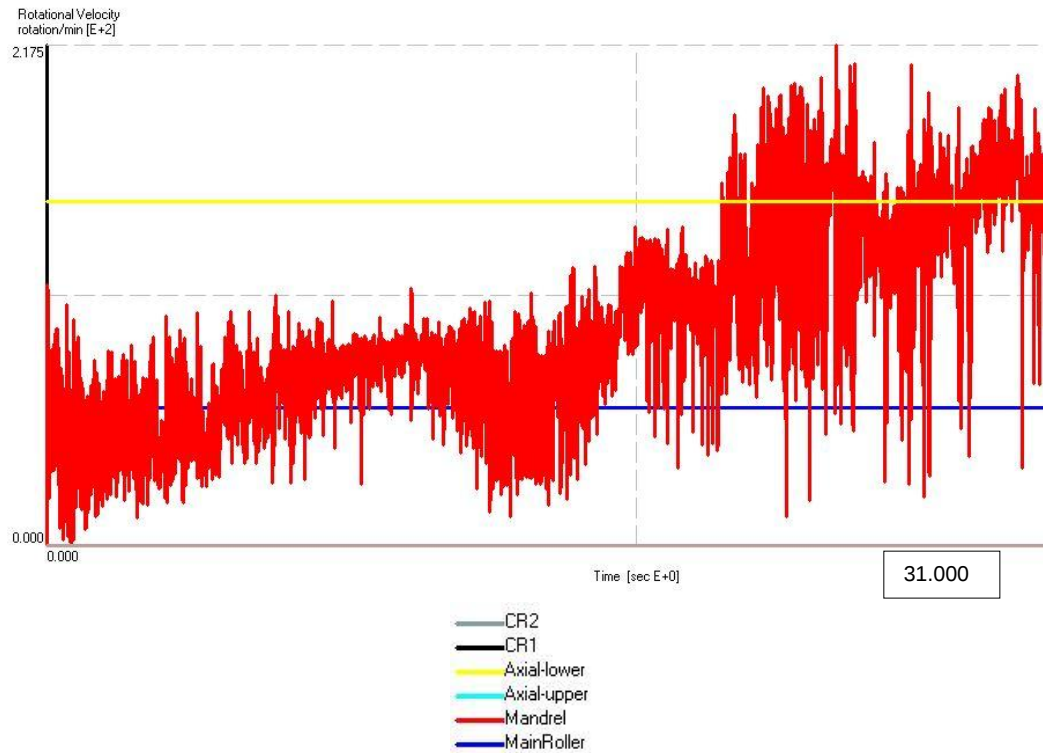


Figura 3.15:Grafico della velocità angolari dei componenti del laminatoio.

3.1.3 Parametri del materiale

Materiale

Il materiale di cui è costituito il pezzo da lavorare è l'acciaio 42CrMo4. Il materiale è stato definito sulla base dei dati presenti nel database dei materiali di Simufact. Le proprietà termiche e meccaniche sono riportate nelle Figure 3.16,3.17,3.18. La composizione chimica del materiale è espressa i seguenti elementi chimici:

42 CrMo4 EN10083-1

Bonificato HB 320-360

Composizione chimica (elementi di massima)

$C = 0.40 \div 0.45$ $Mn = 0.60 \div 0.90$ $Cr = 1.00 \div 1.20$ $Mn = 0.20 \div 0.30$

Basic Material Constants		
Young's Modulus	210000000000	Pascal
Poisson's Ratio	0.3	
Density	7800	kg/m3

Heat Material Constants		
Thermal Conductivity	24.6	Watt/(m*K)
Specific heat capacity	460	Joule/(kg*K)

Figura 3.16: Proprietà meccaniche e termiche dell'acciaio 42CrMo4 .

Plasticity	
Hot Forging Material Form2	$\bar{\sigma} = \max \left[S, C \dot{\epsilon}^M \right]$

Constants For Hot Forging Material Form2		
Minimum Yield Stress(S)	1000000000	Pascal
Yield Constant(C)	0	Pascal
Strain Rate Hard. Exp.(M)	0	
☒ Dependent on heat	Open Table...	
Fraction of mechanical work that will be converted to heat	0	
Coeff. of Thermal Expansion	1.1e-005	1/ Kelvin
Reference Temp. at stress-free state	0	Kelvin

Figura 3.17: Legge reologica dell'acciaio 42CrMo4.

Per quanto riguarda le attrezzature si è considerato fossero realizzate in acciaio per lavorazioni a caldo H-13, le cui proprietà termiche/meccaniche sono state ricavate dal database di materiali di Simufact.

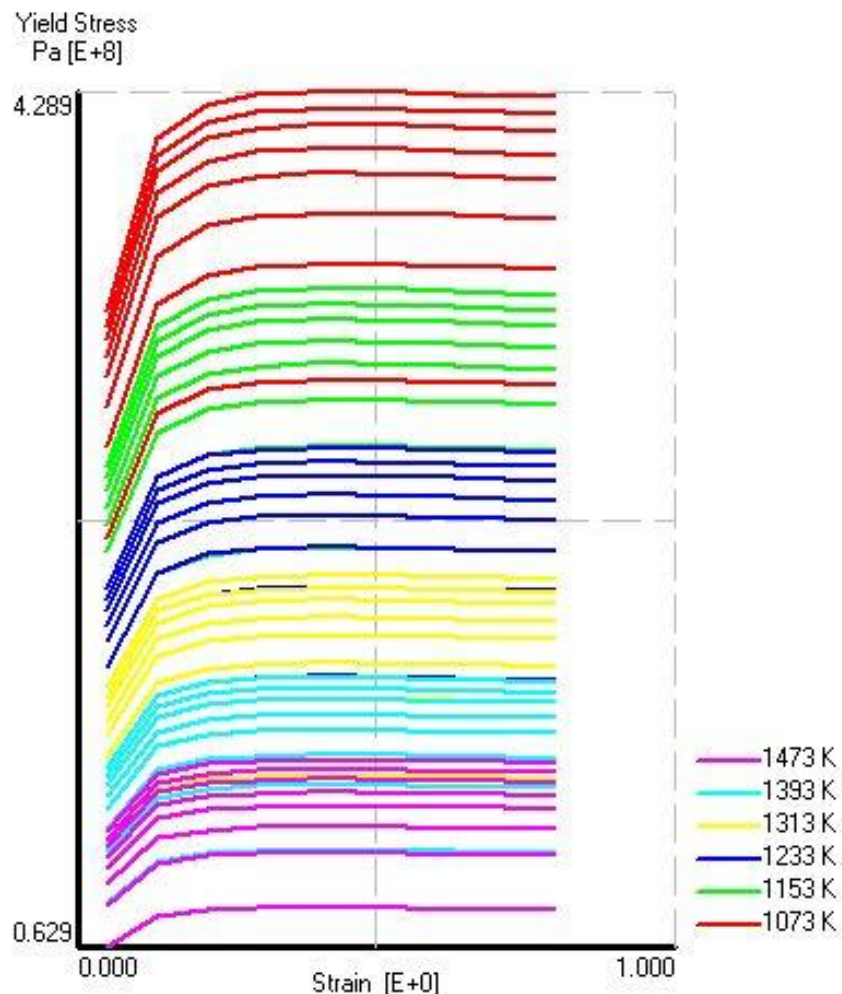


Figura 3.18: Curve di flusso dell'acciaio 42CrMo4 .

3.1.4 Parametri simulazione

Mesh

Un parametro fondamentale riguardante la simulazione è il parametro mesh. Il metodo agli elementi finiti si basa su una tecnica di calcolo atta a cercare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali e da derivate parziali, riducendo queste ultime in un sistema descritto da equazioni algebriche. Questi software utilizzando questo metodo di calcolo si prestano molto bene a risolvere equazioni e derivate parziali quando il dominio ha una forma complessa e variabile. La mesh quindi, è la parte unitaria con cui viene suddiviso il componente da studiare. Su ciascun elemento caratterizzato da questa forma elementare, la soluzione del problema è espressa dalla combinazione lineare di funzioni dette funzioni di base o funzioni di forma. In ambiente *Simufact.Forming9.0.1* si è cercato di impostare un adeguato livello di mesh per non fare risultare troppi elementi e quindi, di conseguenza, aumentare il tempo di calcolo garantendo allo stesso tempo una geometria dell'anello discreta.

Il workpiece è stato generato utilizzando una *mesh* dalla taglia di 25 mm, generando 7840 elementi (Figure 3.18). Il *mesher* utilizzato è chiamato *Ringmesh* essendo il componente di forma anulare.

Questo *mesher* discretizza il componente a intervalli angolari regolari. Gli elementi creati sono di tipo esadrico con una dimensione di 25 mm.

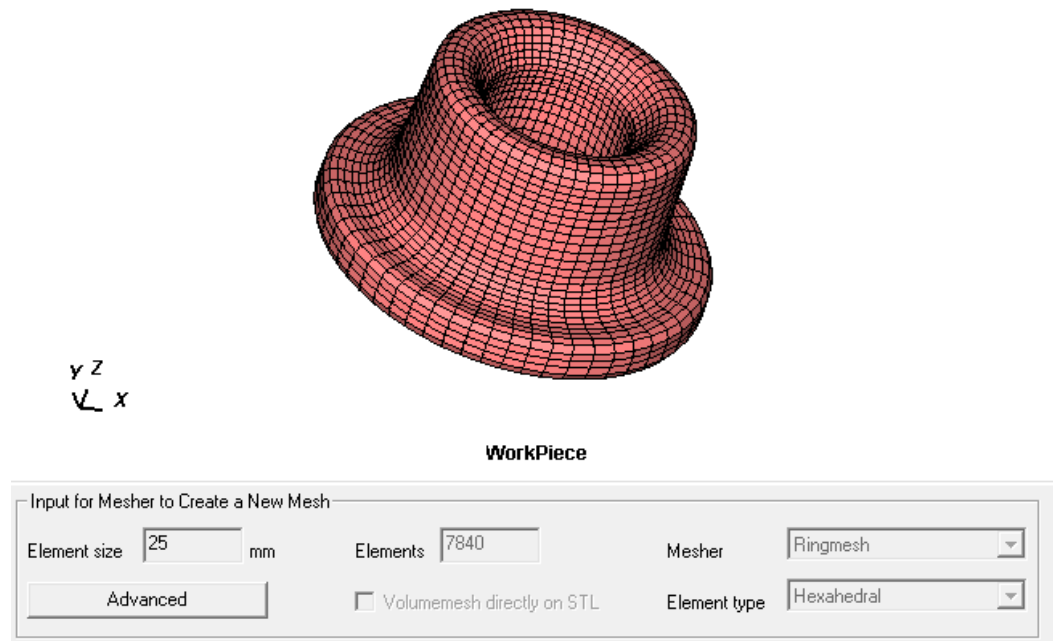


Figura 3.19: WorkPiece discretizzato.

In questa fase di impostazione della mesh si sono creati due refine box per migliorare il profilo della preforma utilizzando un maggior numero di mesh nelle parti più delicate del pezzo. In Figura 3.20 viene riportata una rappresentazione illustrativa dei due refine box impostati nella sezione 2D della preforma.

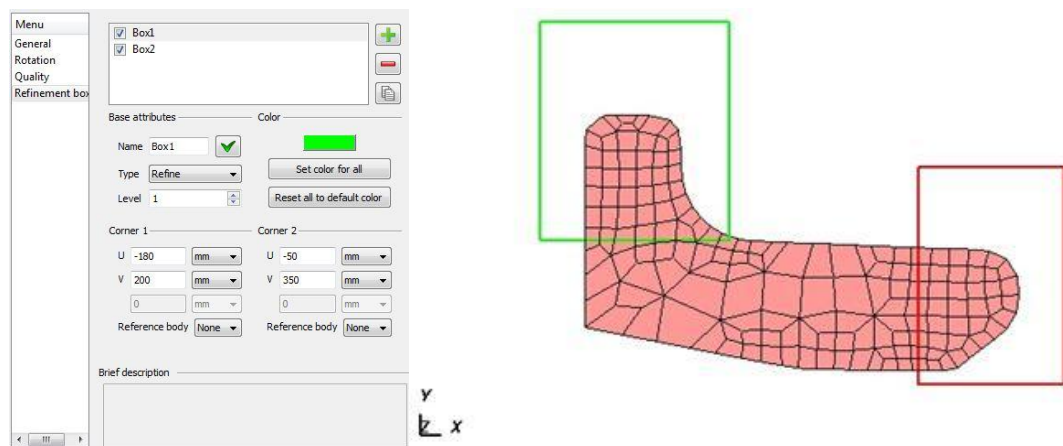


Figura 3.20: Rappresentazione dei due refine box nella sezione 2D della preforma.

Time step

Nella sezione modalità riguardante il *Time Step*, in ambiente *Simufact.Forming9.0.1*, è possibile selezionare la modalità con cui il solutore li determina il *Time Step del processo*. I *Time Step* sono l'intervallo in cui il solutore calcolerà i risultati della simulazione.

I *Time Step* possono essere basati su molte proprietà della simulazione. Nei *Time Step* a passo fisso il tempo del processo totale è diviso per il numero di passaggi per determinare la dimensione dello stesso. Il passo è quindi un valore di tempo e costante in questa modalità a passo fisso. Questo metodo è utilizzato al meglio per la simulazione di processi stazionari come l'azione di una pressa. Il *Time Step* può essere adattativo basato in funzione della deformazione. Qui il solutore avrà inizio con un certo passo. Questo passo può cambiare durante il corso della simulazione, a seconda dello stato corrente del processo. Se non è un momento critico della simulazione, il passo sarà aumentato. Se si tratta di un momento critico, il passo sarà diminuito per consentire una simulazione più dettagliata. Per il 2D, il passo può essere ridotto fino a $1 / 8$ del passo iniziale, per il 3D questo fattore può essere fino a $1 / 5$. Questo metodo è utilizzato al meglio con i processi dinamici come forgiatura. Il *Time Step* inoltre può essere adattativo in base all'incremento delle tensioni. Il passo è calcolato in relazione alla tensione incrementale degli elementi. Se gli elementi si deformano troppo, il passo sarà diminuito per consentire una simulazione più dettagliata. È possibile immettere il valore di soglia dopo la quale un nuovo passo deve essere ricalcolato. Tale valore deve essere compreso tra 0 e 1 e rappresenta la deformazione percentuale degli elementi. Il *Time Step* è basato sul cambiamento della temperatura ed è principalmente usato per processi di raffreddamento e di riscaldamento. La temperatura quindi entra nel campo di input ed essa viene utilizzata per calcolare la dimensione del passo. Questo significa che il prossimo passo accadrà ogni volta che la temperatura del pezzo varia per il valore di gradi selezionati come input. Il *Time Step* basato sul cambiamento di spostamento funziona in opposizione a intervalli di tempo fissi. La distanza totale (stroke) della simulazione è diviso per il valore immesso e il numero di passi viene poi calcolato rispettivamente. Qui il passo è una distanza ed è costante. Ciò è particolarmente utile se si dispone di un processo con alternanza di velocità. Inoltre, è possibile impostare il numero di passi da automatico o manuale. Se è impostato su automatico, il programma calcola automaticamente il numero di passaggi, a seconda della selezione delle funzioni sopra descritte. Se è impostato su manuale/fisso, è possibile immettere manualmente il numero di passi desiderati. La funzionalità manuale deve essere usata per processi più complicati, in particolare per i processi di controllo degli utensili. Vi è una funzione speciale per i processi anello rotante che ti aiuta a trovare un numero ragionevole di passi (*Time Step*).

Per le simulazioni del processo di laminazione dell'anello il *Time Step* viene calcolato in base al movimento desiderato tangenziale di un punto su un rullo, con il raggio e la velocità di rotazione del rullo. Per usarlo, deve essere definito prima di tutto un punto su un rullo, che essendo attaccato a una macchina viene definita una velocità di rotazione o di una pressa RAW. Dopo aver selezionato questo punto, $1 / 3$ delle dimensioni dell'elemento tangenziale del pezzo in lavorazione con la propria discretizzazione della mesh è proposta come la distanza per passo. Poi la formula indicata è utilizzata con i valori mostrati per calcolare il numero di passi temporali successivi. Il tempo finale è preso dalla corsa specificata della macchina, oppure è determinato nella tabella di moto della pressa.

In Figura 3.21 e Figura 3.22 viene riportata un'illustrazione del calcolo del *Time Step* in ambiente *Simufact.Forming.9.0.1*.

$$n = 2\pi \cdot r \cdot |U| \frac{\Delta t}{\Delta s}$$

Figura 3.21: Rappresentazione del calcolo del time step.



radius = 376.561 mm
 rotational velocity = 60 rotation/min
 start time = 0 sec, end time = 12 sec
 distance per step = 10 mm
 number of steps = $2 \cdot \pi \cdot \text{radius} \cdot \text{rotational velocity} \cdot \text{time} / \text{distance}$
 per step
 => 2839.2 steps

Figura 3.22: Rappresentazione del calcolo del time step.

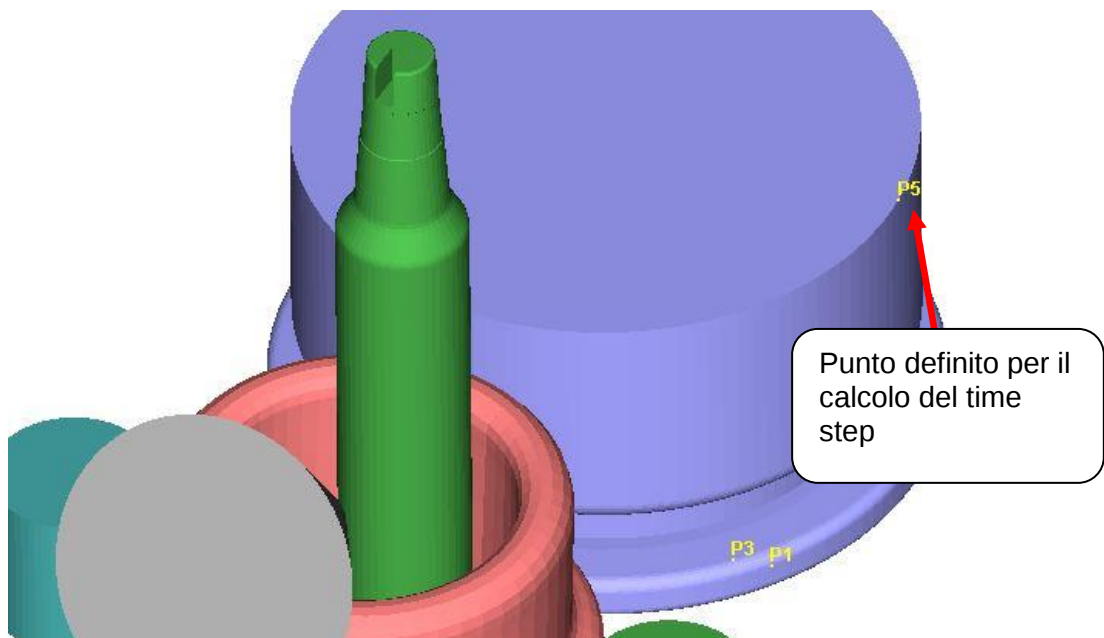


Figura 3.23: Illustrazione del punto per il calcolo del time step.

3.2 Risultati della simulazione

Una volta terminata la fase di modellazione numerica creando quindi il modello tridimensionale e impostando i rispettivi dati del processo si è lanciata la simulazione. Dalla simulazione ottenuta sono emersi in modo ben visibile alcuni fondamentali problemi.

Prima di soffermarsi a ragionare sui problemi riscontrati, però, in Figura 3.24 viene illustrato il risultato della simulazione a laminazione ultimata.

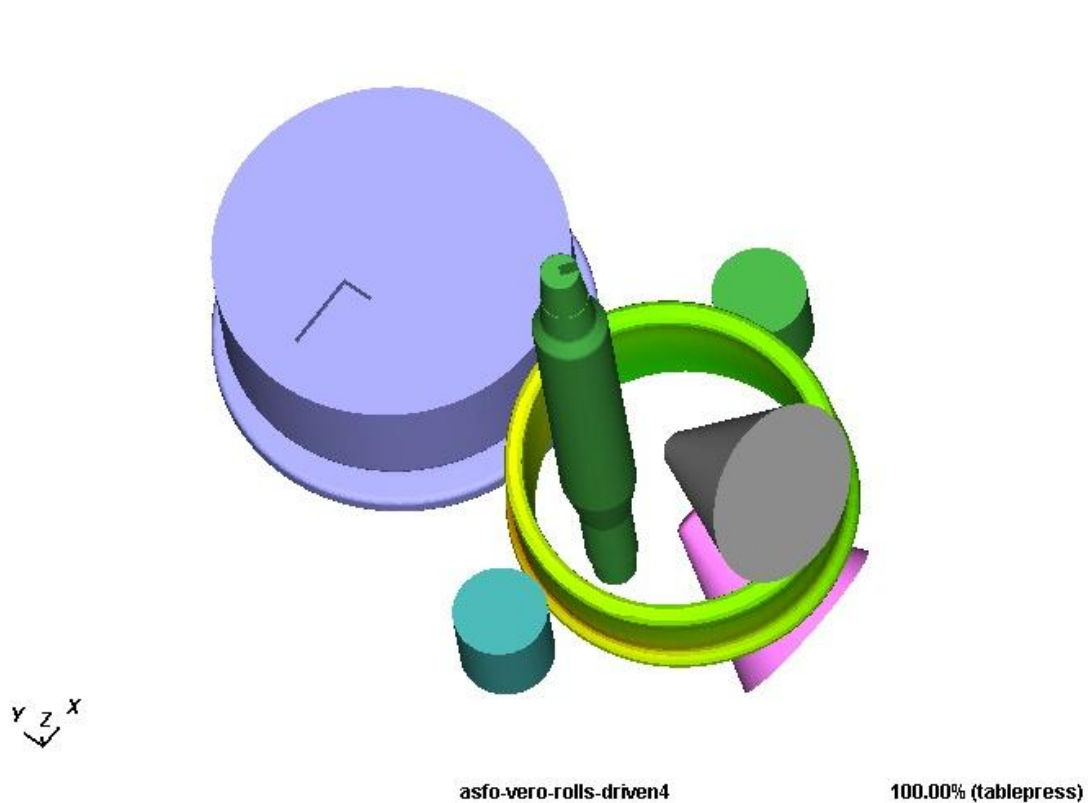


Figura 3.24: Visuale della simulazione al 100% della corsa .

Confrontando l'anello ottenuto mediante la simulazione con il l'anello reale prodotto presso l'azienda ci rediamo conto che il workPiece simulato ha una forma molto simile a quella del dell'anello reale.

In figura 3.25 viene riportato il confronto fra i due anelli,quello reale e quello simulato con le rispettive misure in millimetri di diametro,di flangia e altezza.

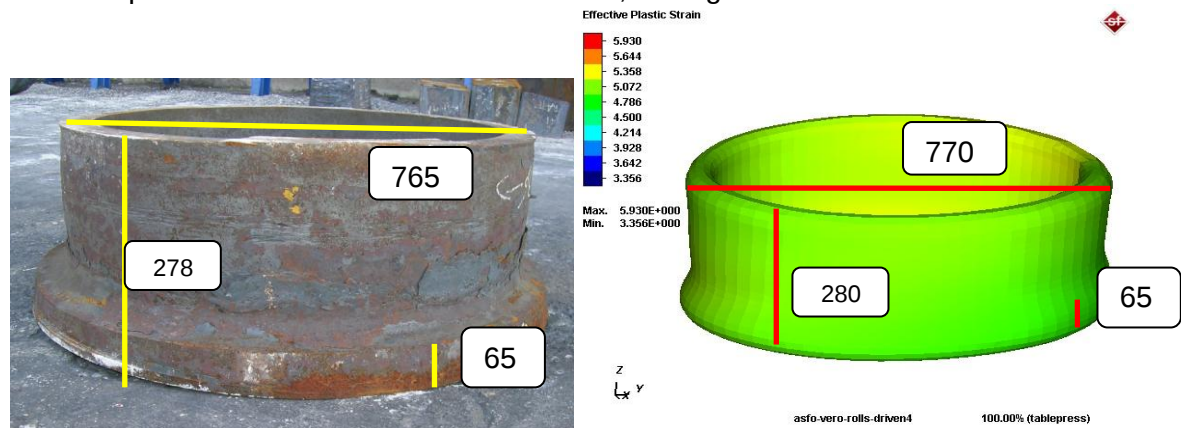


Figura 3.25: Confronto fra i due anelli.

3.2.1 Problemi emersi dalla simulazione

- **Primo problema riscontrato: sollevamento del pezzo**

Il primo problema ben visibile risulta essere l'instabilità del pezzo sul piano orizzontale: esso infatti tende a sollevarsi generando un momento che interessa i coni assiali.

Analizzando attentamente le geometrie della preforma e della sagoma e il contatto con il mandrino, è possibile notare come sia inevitabile il verificarsi di questo fenomeno.

I punti di contatto tra il mandrino e la superficie interna del workpiece e tra sagoma e flangia del componente, generano delle forze agenti ad altezze diverse. Queste forze vengono messe in evidenza in Figura 3.26 dalle frecce gialle, generando un momento segnalato con la freccia rossa. La Figura 3.26 mette in evidenza che questo fenomeno si verifica fin dall'inizio del processo al 14,51% della corsa del mandrino.

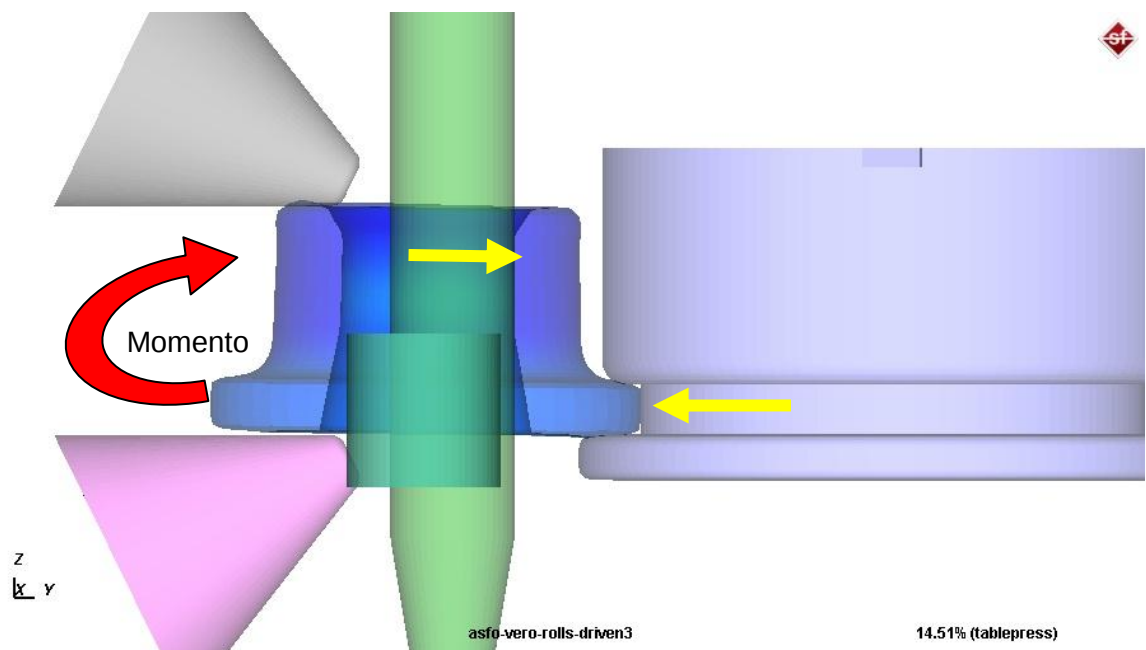


Figura 3.26: Illustrazione del problema dei contatti in ambiente *Simufact.Forming9.0.1*.

- **Secondo problema riscontrato: formatura della flangia**

Il precedente problema riguardante il sollevamento del pezzo porta ad un secondo problema molto importante interessante la flangia del componente.

Come si può vedere, dai risultati della simulazione (Figura 3.27), la flangia non si modella nel modo desiderato ma tende a ritirarsi fino a scomparire quasi del tutto. Questo comporta, ai fini della produzione, di ottenere una forma finale del pezzo differente da quella che si vuole ottenere.

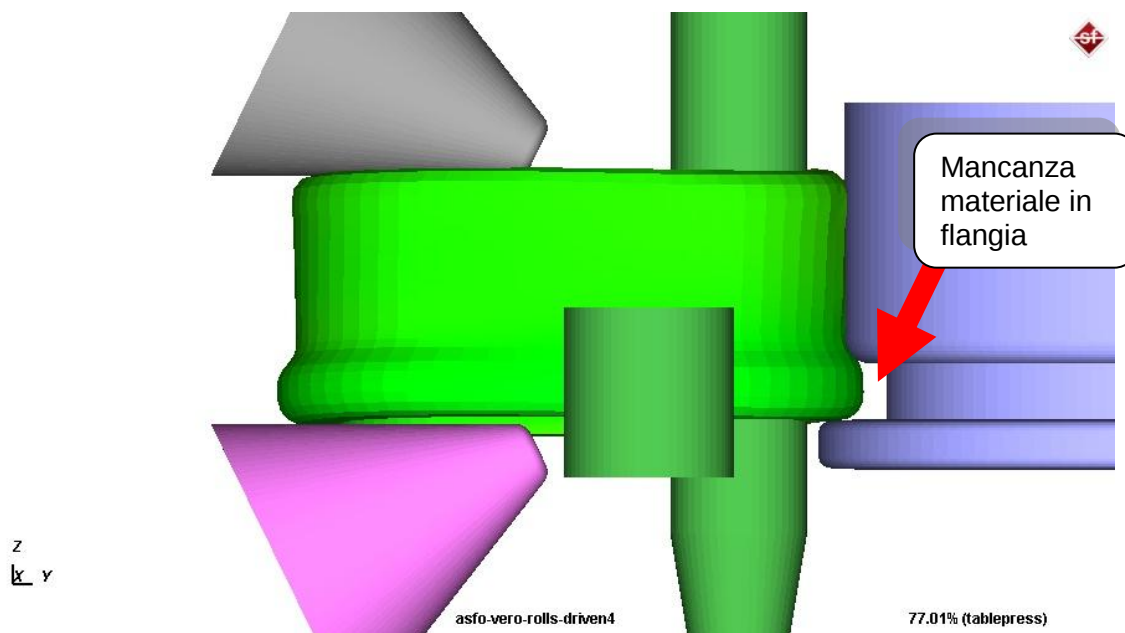


Figura 3.27: Illustrazione del problema della flangia.

- **Terzo problema riscontrato: flusso di materiale.**

Alla luce di quanto descritto nel paragrafo 2.4.2 riguardo alla preforma ottimale suggerita dalla pratica si può notare che durante la fase di progettazione di questo processo non è stata rispettata. Nella pratica il flusso di materiale durante la lavorazione è spinto a crescere dal basso verso l'alto. Rispettando i parametri di processo reali, dai risultati della simulazione emerge chiaramente questo problema. Il problema sta nella geometria della preforma la quale non è stata progettata tenendo conto di questo flusso di materiale.

In Figura 3.28 viene illustrato il problema della geometria iniziale del pezzo, con le frecce rosse vengono indicate le direzioni delle forze agenti e, con la freccia blu la direzione del flusso di materiale. Dalla pratica quindi si dovrebbe partire con un anello di altezza inferiore rispetto a quella finale.

Nel caso in esame invece, si parte con un anello da un'altezza più alta rispetto a quella che si vuole ottenere a fine laminazione. Questo tipo di lavorazione porta a una laminazione poco corretta, come si può verificare dai risultati ottenuti dalla simulazione (Figura 3.29).

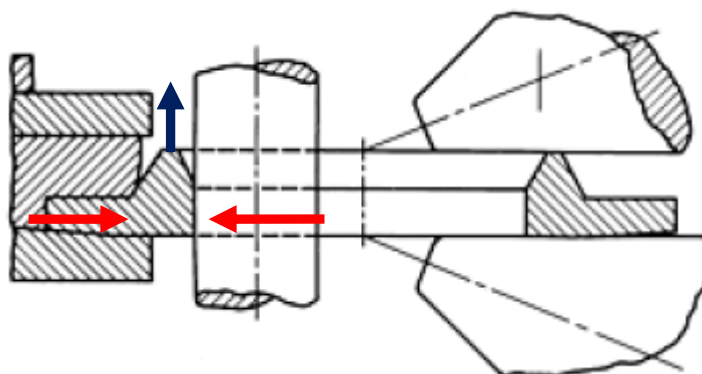


Figura 3.28 Illustrazione del problema del flusso di materiale.

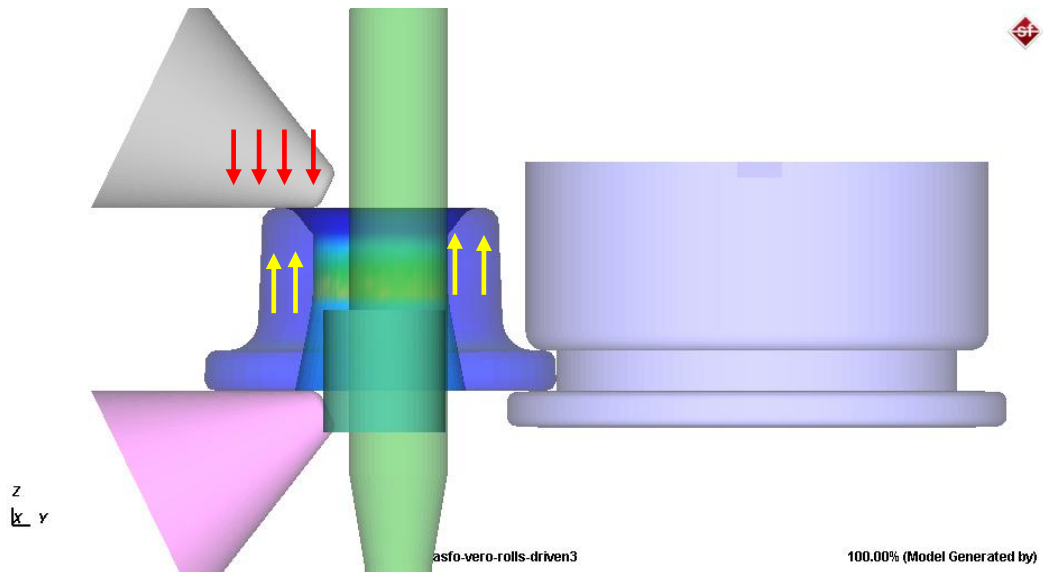


Figura 3.29: Illustrazione del problema del flusso di materiale.

Restando fedeli alle leggi di moto fornite dall'azienda ASFO spa, la legge di moto che regola i coni assiali va contro a ciò che viene descritto nel paragrafo 2.4.2. Anziché seguire il flusso di crescita del materiale (freccie gialle Figura 3.29) i coni devono abbassarsi riducendo un'altezza (freccie rosse Figura 3.29), creando delle irregolarità durante il processo di laminazione.

- **Quarto problema riscontrato: mancanza di materiale nella preforma.**

Il quarto problema riscontrato dalle simulazioni effettuate è la mancanza di materiale verificata nella parte interna della preforma, precisamente nella parte flangiata. Questa mancanza di materiale comporta una irregolarità del processo e il primo problema evidenziato, quello del sollevamento del pezzo. Il problema in questione fa notare la mancanza di materiale nella parte flangiata dell'anello dovuta all'inclinazione della parete interna. Finché il mandrino non arriva a contatto con quella zona (freccia Figura 3.30) il materiale tende a seguire il proprio flusso di crescita uscendo e sollevandosi dalla parte flangiata. Se ci fosse la presenza di materiale, e quindi il contatto con il mandrino fosse fin dai primi momenti della laminazione, la forza impressa dal mandrino porterebbe a fare restare più materiale nella parte flangiata, ottenendo un risultato finale più regolare.

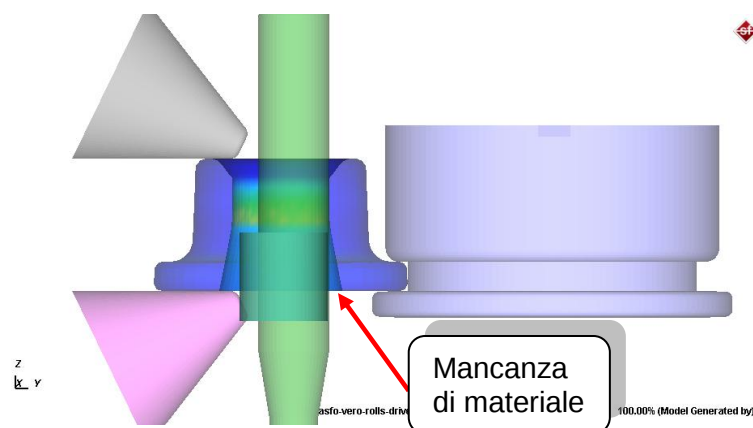


Figura 3.30: Illustrazione del problema della mancanza di materiale.

3.2.2 Forze emerse dalla simulazione

Dalla simulazione ottenuta si può verificare se la laminazione rispetta i termini di forza del laminatoio utilizzato presso *ASFO spa*. Dai dati forniti dall'azienda il laminatoio è una macchina *Banning RAW 100/80*, avente una forza massima radiale di 1000KN e una forza assiale di 800KN. In Figura 3.31 3.32 viene riportata un'illustrazione del grafico delle forze in x e y che esprimono le forze agenti radiali e assiali. Da questi grafici si può notare che le forze risultanti per la lavorazione del pezzo sono un po' superiori rispetto ai limiti di forza forniti dall'azienda.

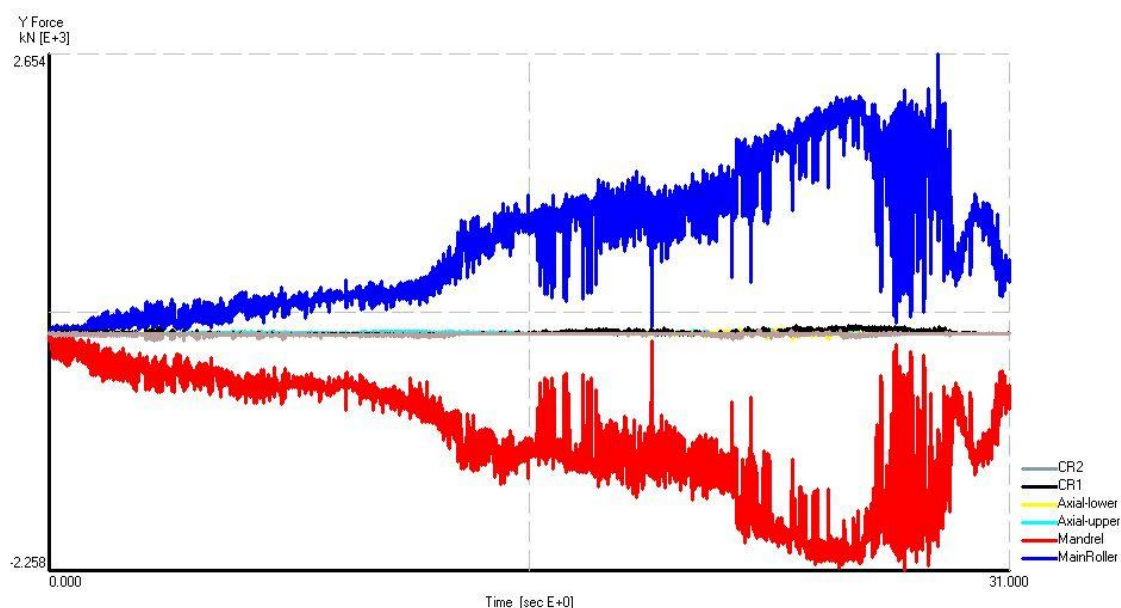


Figura 3.31: Grafico illustrante le forze assiali (forze in Y).Massima forza prevista: 2200KN.

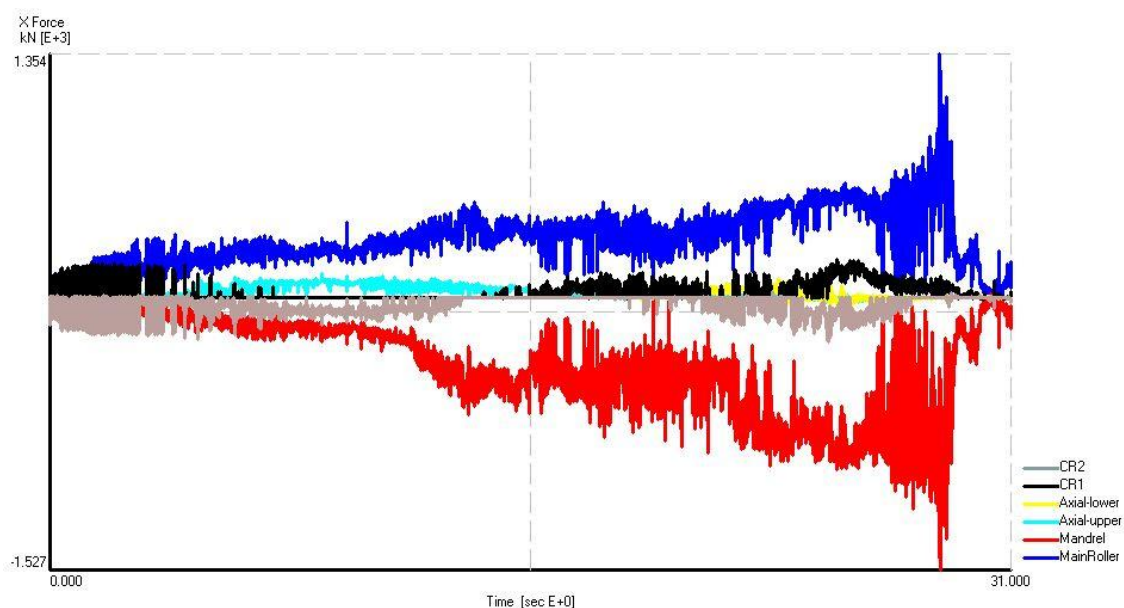


Figura 3.32: Grafico illustrante le forze radiali (forze in x),Massima forza prevista: 1100KN.

CAPITOLO 4

Proposte di riprogettazione

4.1 Introduzione

I problemi che sono emersi dalla simulazione e sinteticamente discussi nel capitolo precedente, sono molto simili ai problemi che si sono verificati presso il reparto produzione dell'azienda ASFO spa. Questi problemi sono indice di una errata progettazione da parte del processo, o di alcune geometrie dei componenti che ne fanno parte. Ai fini di migliorare la realizzazione di questo componente si sono formulate alcune proposte di modifica per il miglioramento dello stesso.

Tra le varie considerazioni emerse, la proposta di progettazione che merita di essere approfondita è la modifica del profilo della sagoma, ai fini di migliorare il contatto con la preforma. Una successiva considerazione alla modifica della sagoma porta ad un'altra considerazione la quale vede sottoposta la modifica della preforma mediante un semplice processo di *upsetting*.

Le prime due modifiche sono state proposte ai fini di migliorare il risultato finale del processo senza andare a modificare le fasi che portano alla formazione della preforma. Una terza proposta di riprogettazione, però, coinvolge l'intero processo di lavorazione in modo particolare le fasi di realizzo della preforma.

4.2 Prima proposta: modifica del profilo della sagoma

4.2.1 Modifica del rullo sagomato

La modifica della sagoma risulta essere una semplice soluzione al problema dei contatti vista nel capitolo 2. Questa modifica favorisce una laminazione più scorrevole ed un processo più omogeneo evitando quindi il verificarsi del momento causante problemi successivi.

Attualmente la sagoma reale ha le seguenti misure (Figura 4.1):

- Disco inferiore: diametro 810mm, altezza 60mm;
- Anello inferiore: diametro 650mm e altezza 65mm;
- Sagoma: presenta un profilo arrotondato di raggio 30mm, diametro di 750 mm e altezza di 125mm;
- Prolunga: semplice cilindro che serve solo a prolungare la sagoma in altezza, ha diametro di 750mm e altezza di 180mm;

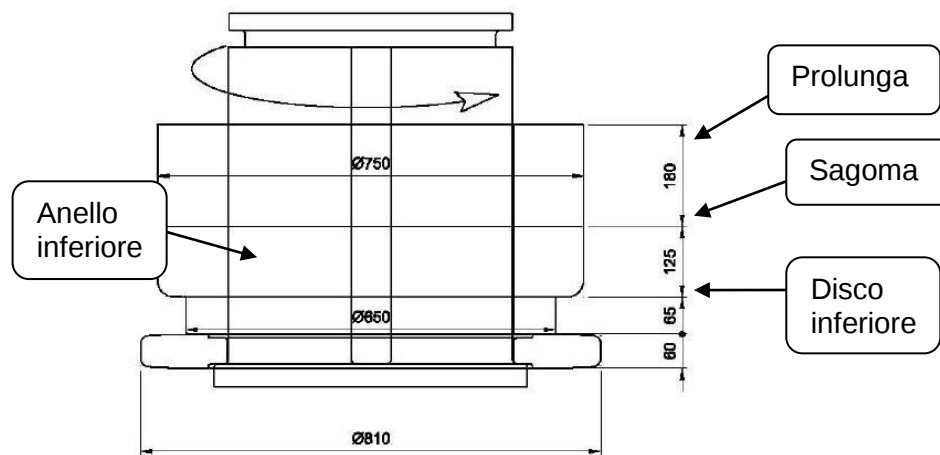


Figura 4.1:Disegno quotato del rullo sagomato reale.

Al fine di creare miglior contatto tra preforma e sagoma, è stato progettato un nuovo modello di rullo sagomato modificando le geometrie e i diametri del disco inferiore e della sagoma.

Lo scopo di questa modifica è di creare fin dai primi istanti della laminazione un maggior contatto e uniformemente distribuito. In figura 4.2 è visibile il nuovo rullo sagomato importato in *Simufact.Forming9.0.1*.

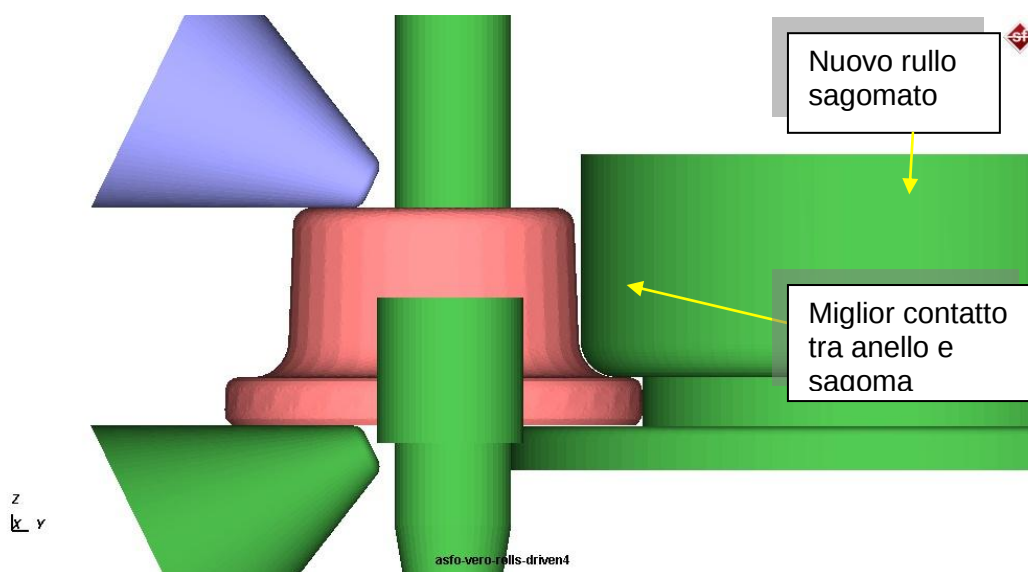


Figura 4.2:Illustrazione dei contatti con la sagoma riprogettata in ambiente *Simufact.Forming9.0.1*.

In Figura 4.3 viene presentata un'illustrazione della sagoma importata e creata tridimensionalmente in ambiente *Simufact.Forming9.0.1*. Le misure della sagoma riprogettata sono le seguenti:

- Disco inferiore: diametro 1000mm, altezza 60mm;
- Anello inferiore: diametro 630mm e altezza 67mm;
- Sagoma: presenta un profilo arrotondato di diametro di 800 mm e altezza di 125mm;
- Prolunga: presenta diametro di 800mm e altezza di 180mm;

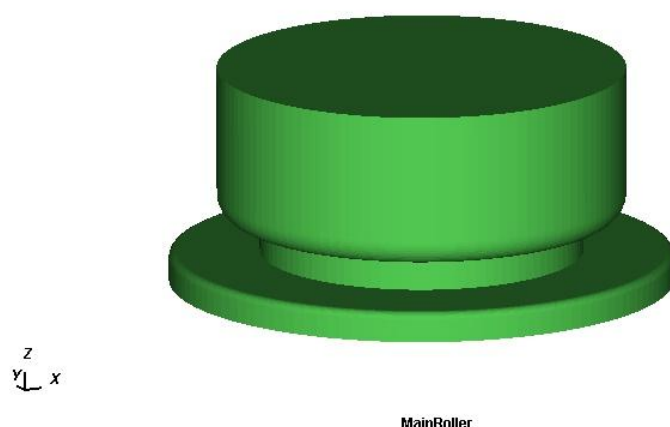


Figura 4.3:Illustrazione dei contatti con la sagoma riprogettata in ambiente *Simufact.Forming9.0.1*.

4.2.2 Parametri di processo

Una volta messo a punto il modello con la sagoma riprogettata,sono state effettuate una serie di simulazioni per testare l'efficacia della modifica apportata. Per queste simulazioni sono stati riportati i seguenti parametri di processo:

- **Mesh:** Per quanto riguarda il WorkPiece non è stata effettuata alcuna modifica,sia sulla geometria del pezzo,sia sulla taglia della discretizzazione rispetto alla simulazione reale.
- **Leggi di moto:** Aumentando l'altezza del disco inferiore la preforma riesce ad inserirsi più facilmente nella sagoma. Di conseguenza la distanza tra mandrino e sagoma si è ridotta e quindi il moto della velocità del mandrino rimane invariata pur rispettando il percorso indotto,come illustra la figura 4.4 .E' stata impostata una velocità di accostamento pari a 1.5 mm/s per un tempo di 39 sec.

Tabular Motion (Translation & Rotation)

Table type: Time/Velocity

Time: 0 Translational velocity (X/Y/Z): 0 0 0 Angular velocity: 0

second mm/sec rotation/sec

Time	Transl.vel. X	Transl.vel. Y	Transl.vel. Z	Ang.vel.
0	0	1.5	0	0
39	0	1.5	0	0

Add at end at selection

Modify Delete

Read from/write to file

Read Write

Figura 4.4:Rappresentazione della legge di moto del mandrino con la sagoma riprogettata in ambiente *Simufact.Forming9.0.1*.

4.2.3 Risultati della simulazione

Una volta modellato il rullo sagomato mediante ProEngineer la simulazione è stata rilanciata per testare l'efficacia di questa modifica. Dai risultati ottenuti si può notare la soluzione al primo problema discusso del paragrafo 3.2.1. riguardante il sollevamento del pezzo. In Figura 4.5 viene riportata l'illustrazione della lavorazione simulata in ambiente *Simufact.Forming9.0.1*.

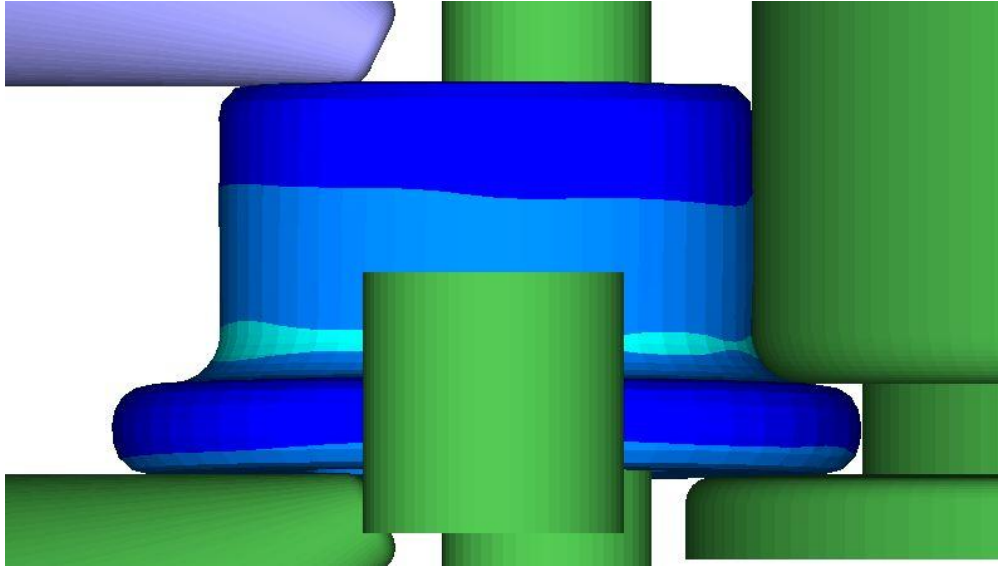


Figura 4.5:Modello FEM con sagoma riprogettata. Inizio simulazione.

In Figura 4.6 e 4.7 si nota ancora delle irregolarità sulla forma finale del pezzo. Queste imperfezioni sono dovute alla presenza ancora di momenti e vibrazioni non desiderate.

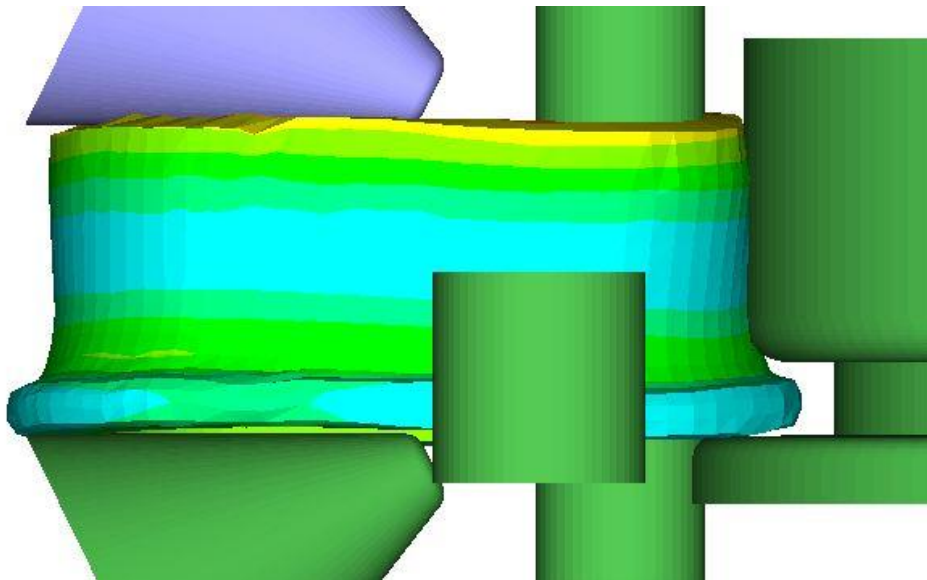


Figura 4.6:Illustrazione del pezzo ottenuto. Risultati simulazione.

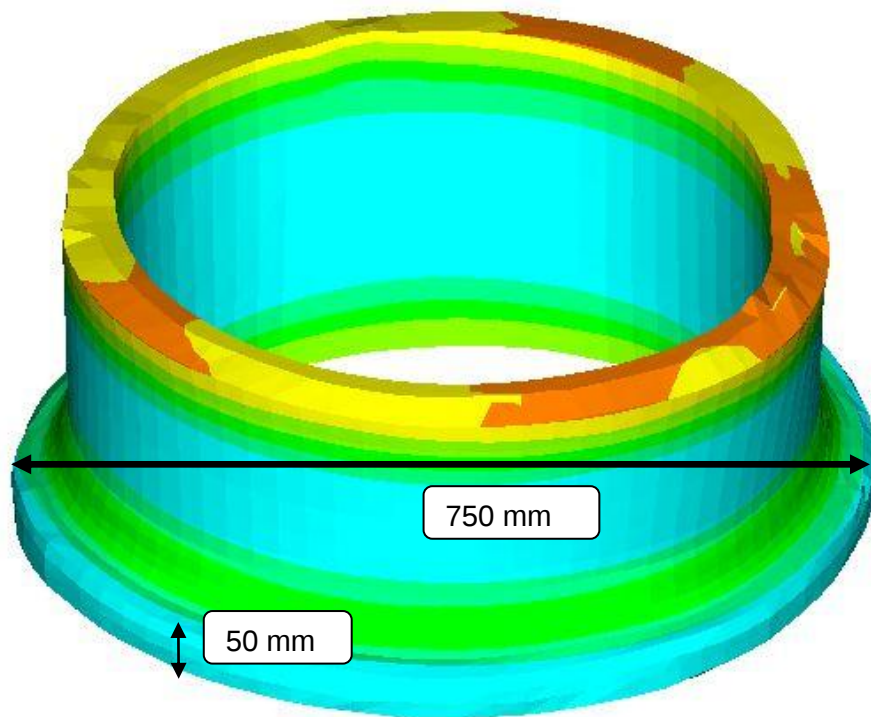


Figura 4.7: Illustrazione del pezzo ottenuto mediante la lavorazione a seguito della modifica della sagoma in ambiente *Simufact.Forming9.0.1*.

4.3 Seconda proposta: modifica del processo di laminazione

4.3.1 Modifica della preforma

La modifica del processo di laminazione è una seconda possibile soluzione ai problemi riscontrati e descritti nel capitolo 3. Questa modifica comporta una possibile soluzione al terzo problema discusso del paragrafo 3.2, infatti la modifica consiste nel effettuare un *upsetting* alla preforma prima di subire la vera e propria laminazione favorendo la direzione di crescita del materiale. Mediante questa modifica la preforma viene abbassata rispetto alla sua altezza originale da progetto di 40 mm. I risultati di questa simulazione hanno portato alla soluzione dei principali problemi riscontrati con i parametri di processo reali.

Effettuando infatti questa modifica si è ottenuto un processo molto più omogeneo e senza movimenti indesiderati.

In Figura 4.8 viene riportata un'illustrazione del processo di *upsetting* in 2D della preforma prima della laminazione. Come si può vedere lo schiacciamento porta la preforma ad avere una altezza minore rispetto alla sua altezza iniziale, infatti la preforma viene schiacciata di 50mm.

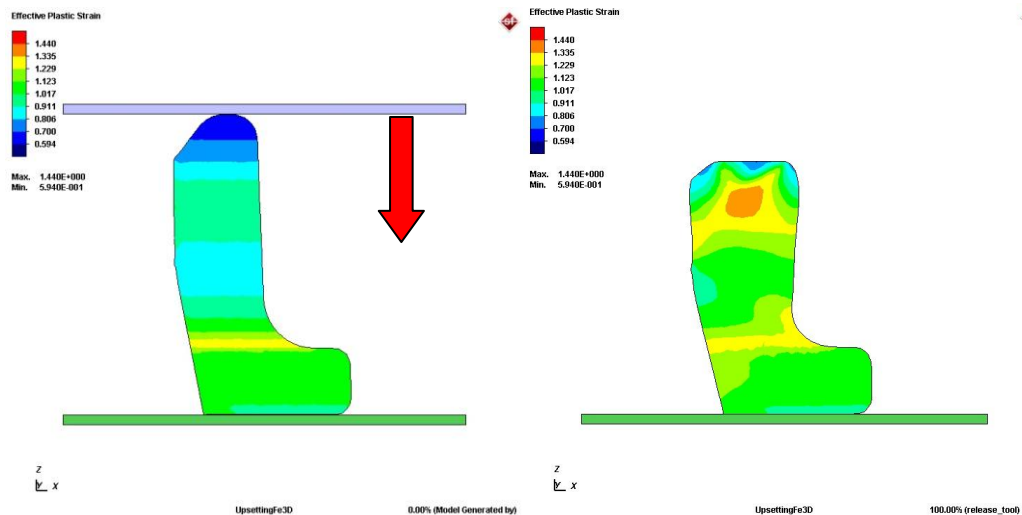


Figura 4.8:Riprogettazione della preforma,UPSETTING dell'anello.

Una volta effettuata la simulazione di upsetting la preforma viene messa nel laminatoio e viene fatta partire la simulazione della laminazione dell'anello. In Figura 4.9 viene riportata una rappresentazione in 3D della preforma dopo avere subito lo schiaccio. I parametri di processo della laminazione restano invariati rispetto alla precedente simulazione varia soltanto la preforma e il rullo.

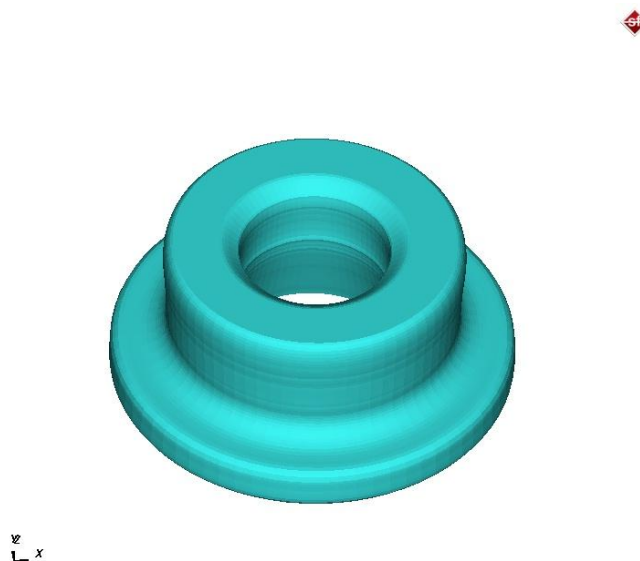


Figura 4.9:Rappresentazione preforma dopo lo schiaccio in ambiente *Simufact.Forming9.0.1*.

4.3.2 Risultati della simulazione

La preforma inserita nel laminatoio, come si può ben notare in Figura 4.10, è in maggior contatto con la sagoma e quindi di conseguenza subisce fin dai primi istanti di lavorazione la vera e propria laminazione (Figura 4.11). Grazie a questo contatto immediato tra preforma e rullo non si verifica il momento riscontrato mediante la simulazione reale. In Figura 4.10 viene evidenziato il flusso di crescita corretto del materiale con i coni che salgono invece che schiacciare come avveniva per la simulazione reale.

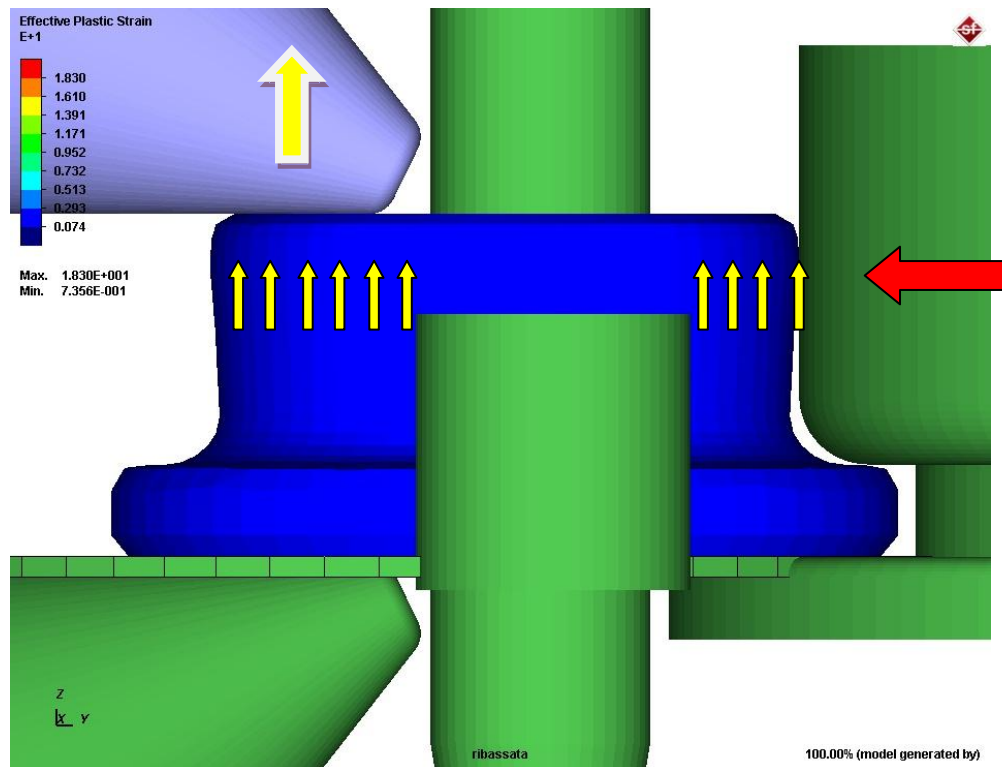


Figura 4.10: Rappresentazione della seconda modifica in ambiente *Simufact.Forming9.0.1*.

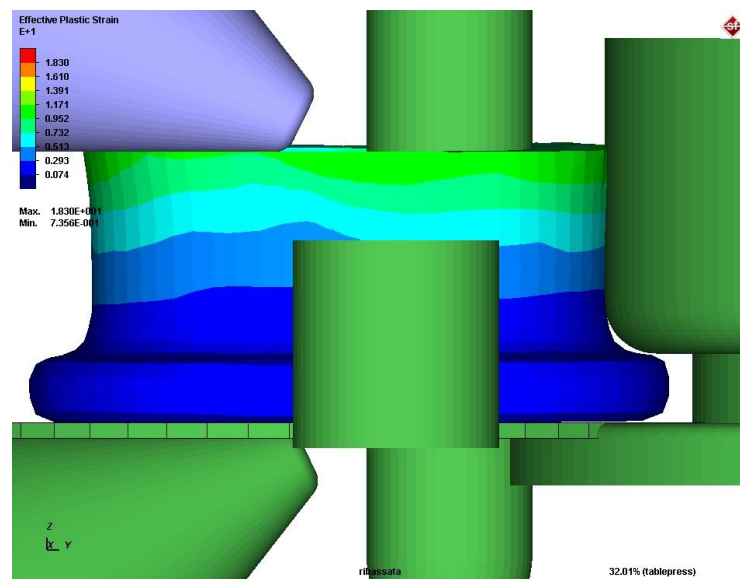


Figura 4.11: Modello FEM con preforma e sagoma riprogettata.

A laminazione ultimata il pezzo assume una forma migliore rispetto a quella ottenuta con il processo reale (Figura 3.12). In Figura 4.12 viene riportato il pezzo a laminazione ultimata con le rispettive misure di diametro, flangia e spessore.

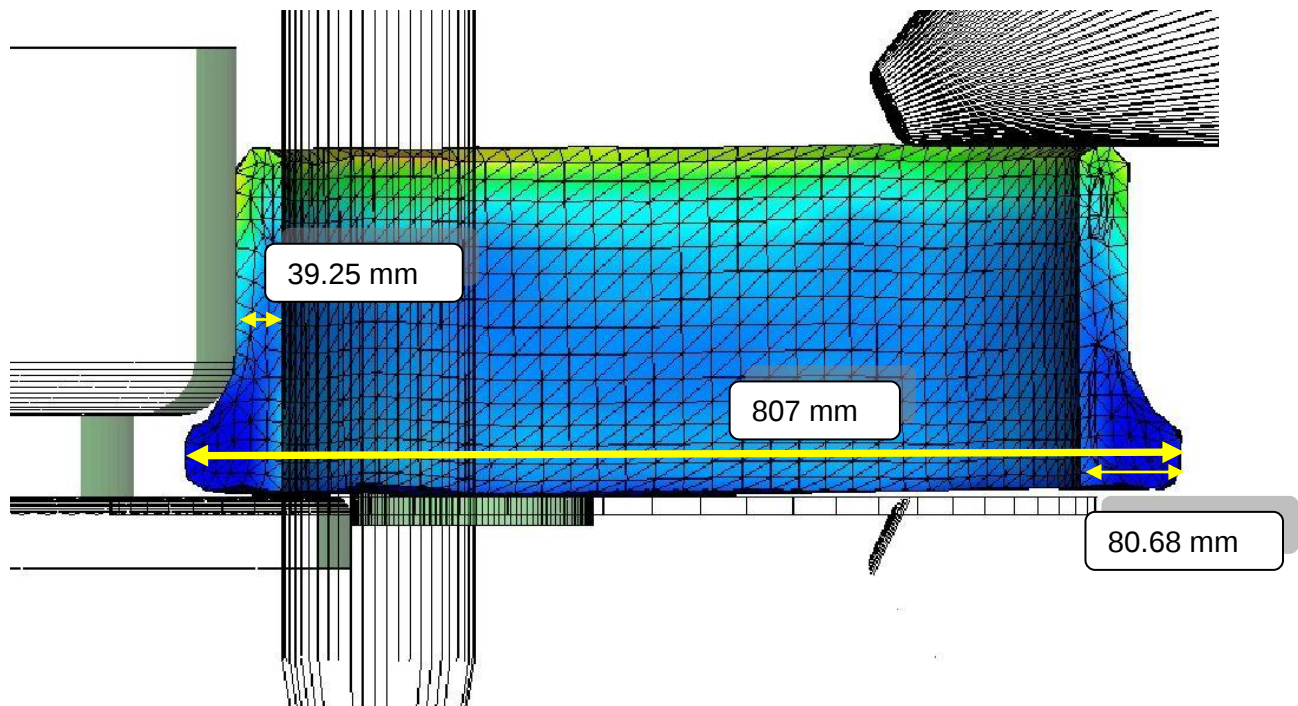


Figura 4.12: Dimensioni anello flangiato a fine simulazione.

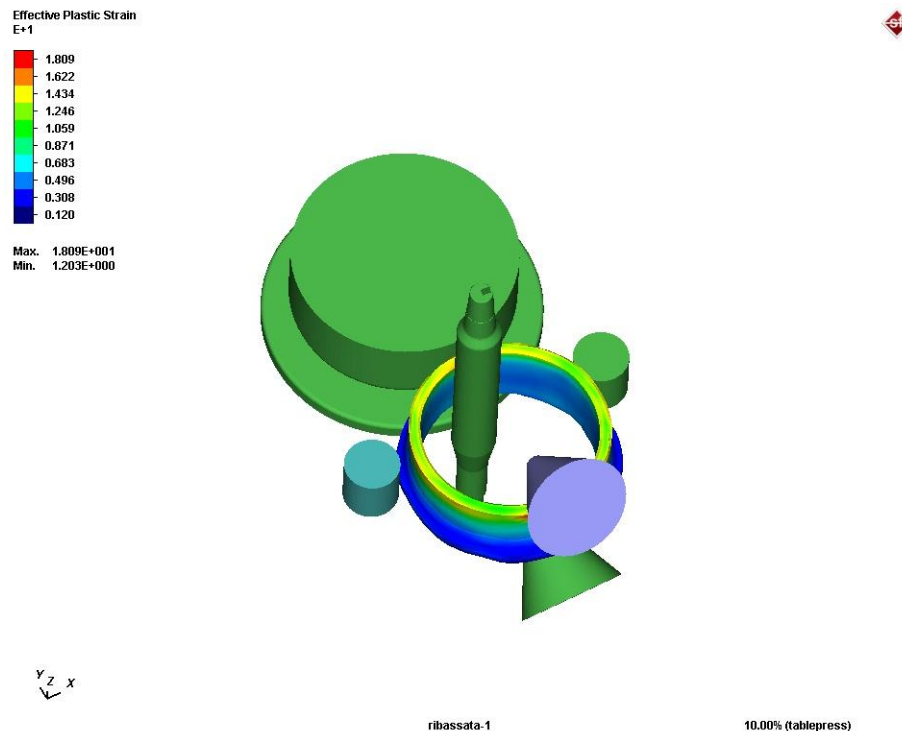


Figura 4.13: Rappresentazione del pezzo in lavorazione in seguito alla modifica effettuata in ambiente *Simufact.Forming9.0.1*.

In Figura 4.14 viene riportata un'illustrazione del pezzo finale che si ottiene a laminazione ultimata.

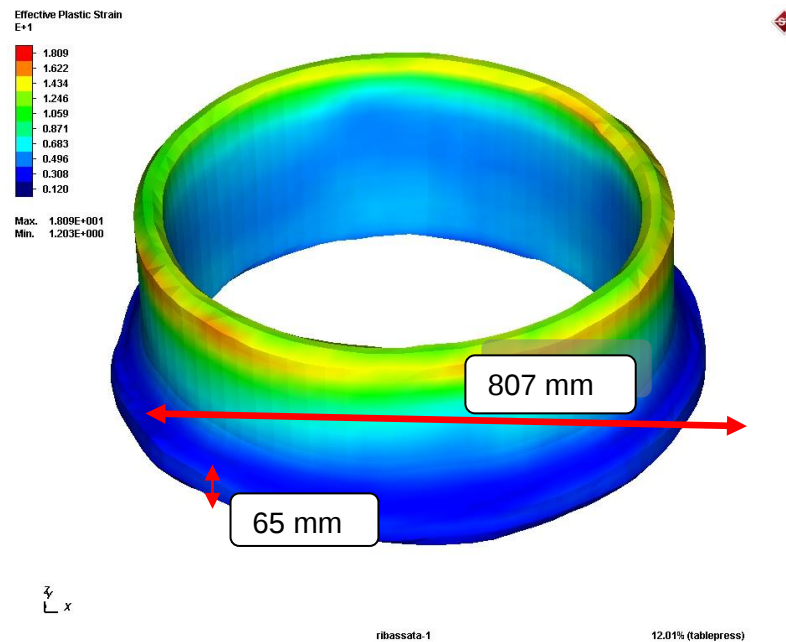


Figura 4.14: Rappresentazione del pezzo ottenuto in seguito alla modifica effettuata in ambiente *Simufact.Forming9.0.1*.

4.3.3 Forze risultanti dalla simulazione

Le forze risultanti con questa proposta di modifica rispettano i valori di forza dati da *ASFO spa*. Si può verificare quindi che dalla simulazione effettuati i valori ottenuti dalla simulazione e quelli rilevati presso l'azienda durante la lavorazione sono molto simili.

In Figura 4.15 e 4.16 vengono riportati i grafici delle forze assiali e radiali.

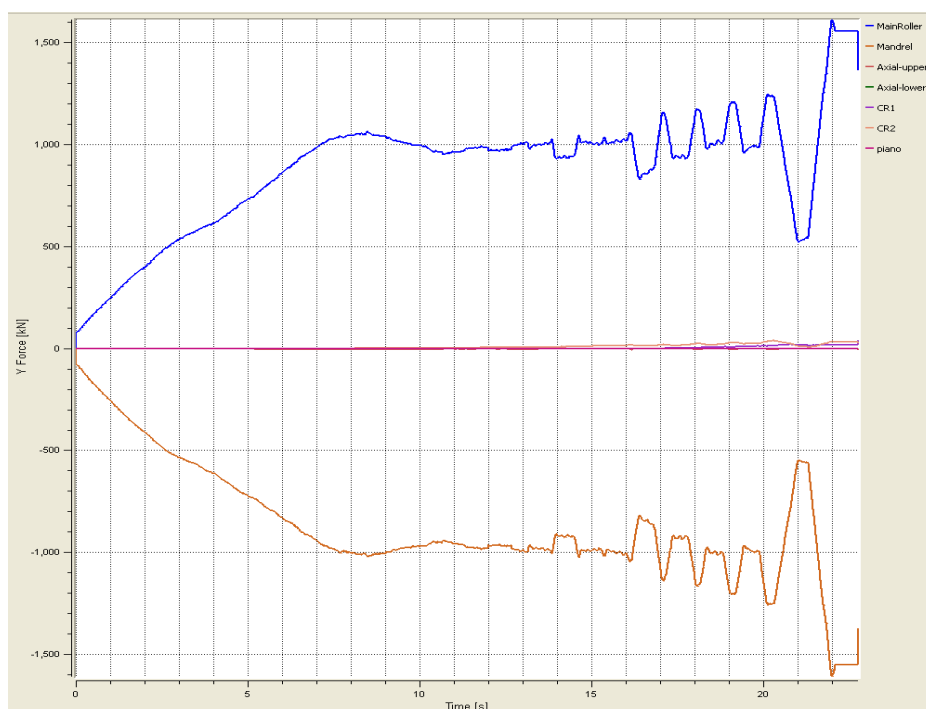


Figura 4.15: Rappresentazione delle forze agenti assiali (forze in Y) durante la simulazione.

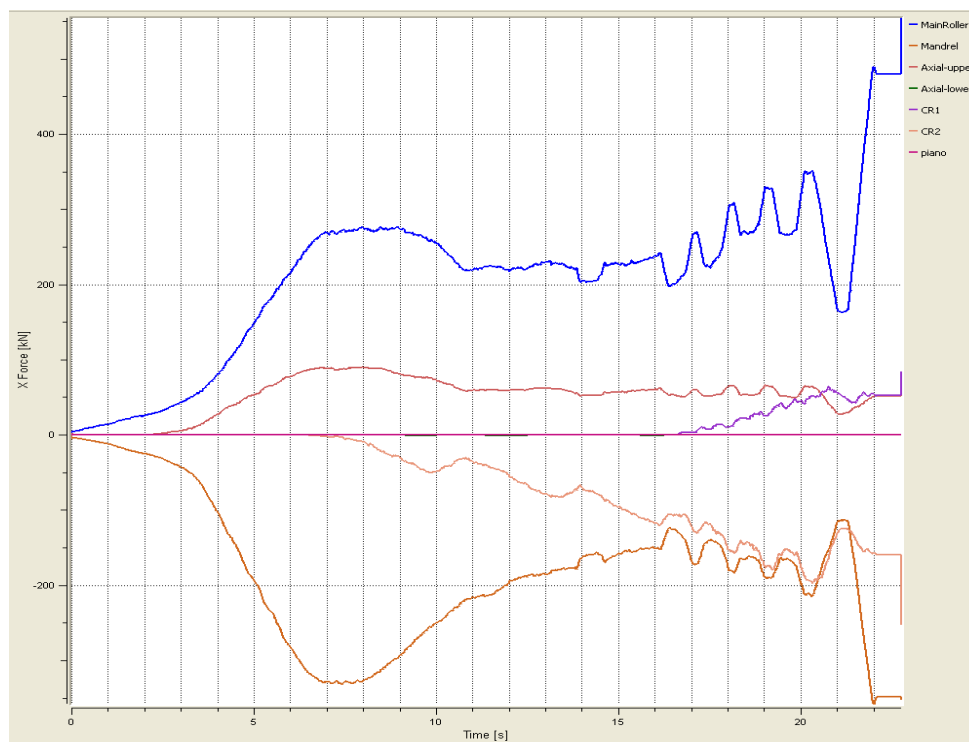


Figura 4.16: Rappresentazione delle forze agenti radiali (forze in x) durante la simulazione.

4.4 Terza proposta: modifica del processo di realizzo della preforma

4.4.1 Modifica del processo di realizzo della preforma

A differenza delle precedenti proposte di modifica, questa proposta prevede la riprogettazione del processo fin dalle sue fasi iniziali di lavorazione.

Gli stampi e le fasi che venivano utilizzati per realizzare la preforma originale sono state completamente revisionate portando alla realizzazione di una forma dell'anello più idonea al tipo di lavorazione che successivamente subirà. La riprogettazione delle fasi di realizzo della preforma, infatti, è stata basata sulle informazioni discusse in dettaglio nel capitolo 2, creando appunto una preforma capace di risolvere quasi tutti i problemi riscontrati con la preforma utilizzata presso il reparto di produzione di ASFO spa. Gli stampi sono stati modellati mediante il software di modellazione solida ProEngineer, creando stampi e utensili che, utilizzati durante la simulazione, creassero la preforma desiderata.

In Figura 4.17 viene riportata un'illustrazione della preforma ottenuta con gli stampi modificati e si può notare la differenza notevole dalla preforma utilizzata rispetto alla preforma utilizzata nelle precedenti simulazioni.

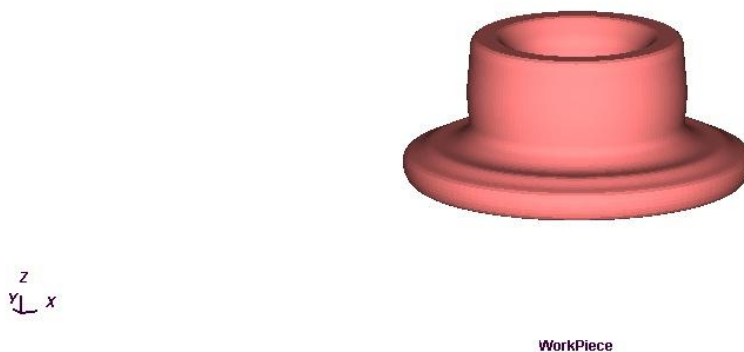


Figura 4.17: Rappresentazione della preforma riprogettata in ambiente Simufact.Forming9.0.1.

4.4.2 Parametri di processo

Una volta creata la preforma riprogettata, è stata effettuata una simulazione di laminazione dell'anello per testare l'efficacia della modifica effettuata. Per questa simulazione sono stati riportati i seguenti parametri di processo:

- **Mesh:** Per quanto riguarda il WorkPiece è stata selezionata una taglia della mesh di valore pari a 30mm con un totale di 8768 elementi. Si è preferito, quindi, selezionare un refine globale di valore 1;
- **Leggi di moto:** Per questa simulazione la legge di moto che è stata variata è quella del cono superiore. A seguito delle opportune osservazioni, discusse nel paragrafo 2.4.1, si è preferito fare salire il cono invece che scendere e andare contro il flusso naturale del materiale in lavorazione. In Figura 4.18 viene

riportata una rappresentazione della legge di moto del mandrino mentre in Figura 4.20 la legge di moto del cono superiore.

Tabular Motion (Translation & Rotation)

Table type: Time/Velocity

Time: 0 Translational velocity (X/Y/Z): 0 0 0 Angular velocity: 0

second mm/sec rotation/sec

Time	Transl. vel. X	Transl. vel. Y	Transl. vel. Z	Ang. vel.
0	0	3	0	0
10	0	3	0	0
25	0	2	0	0
40	0	1	0	0

☒ at end
☐ at selection

Read from/write to file

Figura 4.18: Rappresentazione della legge di moto del mandrino.

Tabular Motion (Translation & Rotation)

Table type: Time/Velocity

Time: 0 Translational velocity (X/Y/Z): 0 0 0 Angular velocity: 0

second mm/sec rotation/sec

Time	Transl. vel. X	Transl. vel. Y	Transl. vel. Z	Ang. vel.
0	0	-0.5	0.15	5
10	0	-0.5	0.15	5
25	0	-2	0.25	5
40	0	-2	0.25	5

☒ at end
☐ at selection

Read from/write to file

Figura 4.19: Rappresentazione della legge di moto del cono superiore.

4.4.3 Risultati della simulazione

Questa ultima proposta si è rivelata la più efficace ,rispetto alle altre due idee proposte anche se, porterebbe ad una revisione più importante in termini economici confrontando le stesse. I risultati ottenuti da questa simulazione sono molto performanti sul risultato finale che si vuole ottenere e vengono risolti le maggiori criticità riscontrate con la simulazione replicante il processo condotto in azienda. L'anello ottenuto assume una forma molto più precisa e cilindrica e durante la laminazione non si verificano più i momenti e le vibrazioni indesiderate. In Figura 4.20 viene riportata un'illustrazione del pezzo all'inizio della lavorazione.

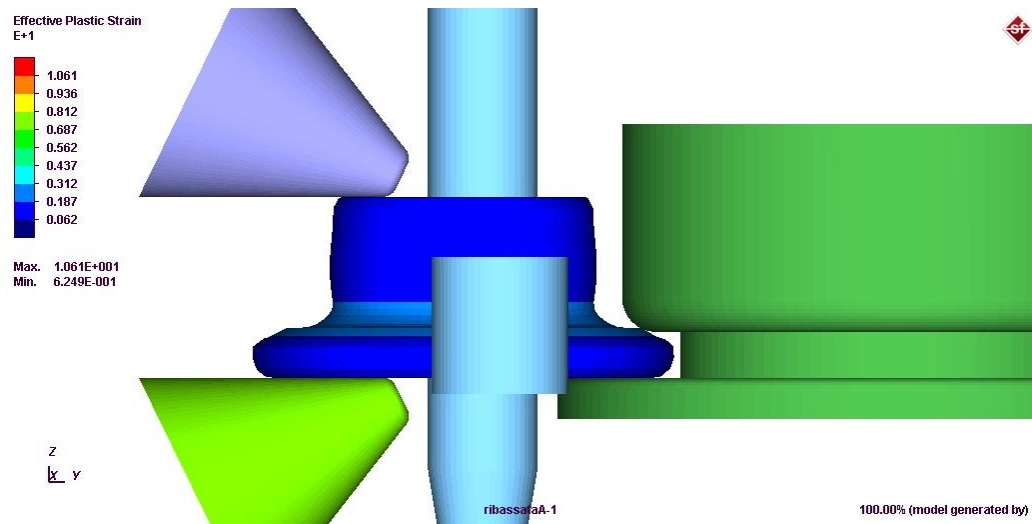


Figura 4.20:Modello FEM,riprogettazione preforma e sagoma.

In figura 4.21 viene riportata un'illustrazione del pezzo negli ultimi istanti di lavorazione.

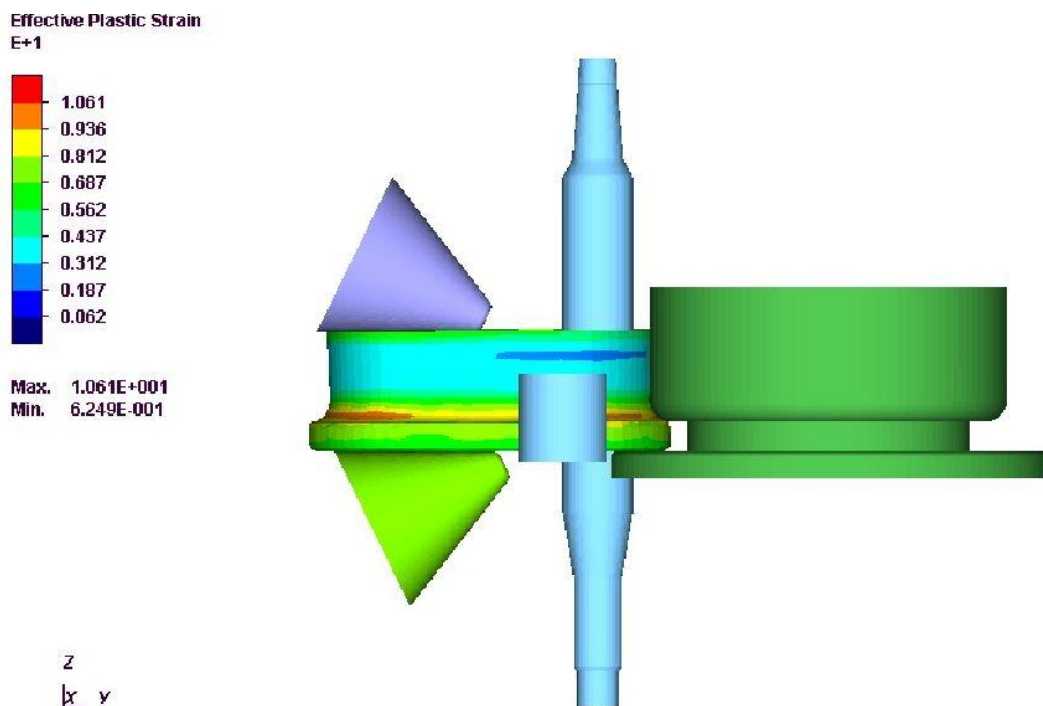


Figura 4.21:Illustrazione del pezzo in lavorazione.

Il pezzo finale assume una forma molto buona rispetto a tutte le precedenti simulazioni, senza schiacciamenti o mancati completamenti di materiale. Infatti in figura 4.22 4.23 vengono riportate delle immagini del pezzo a laminazione ultimata in varie prospettive con le rispettive dimensioni quotate. Le dimensioni finali del pezzo ottenuto rispettano con molta precisione le dimensioni quotate dati dall'azienda *ASFO spa*(Figura 1.14).

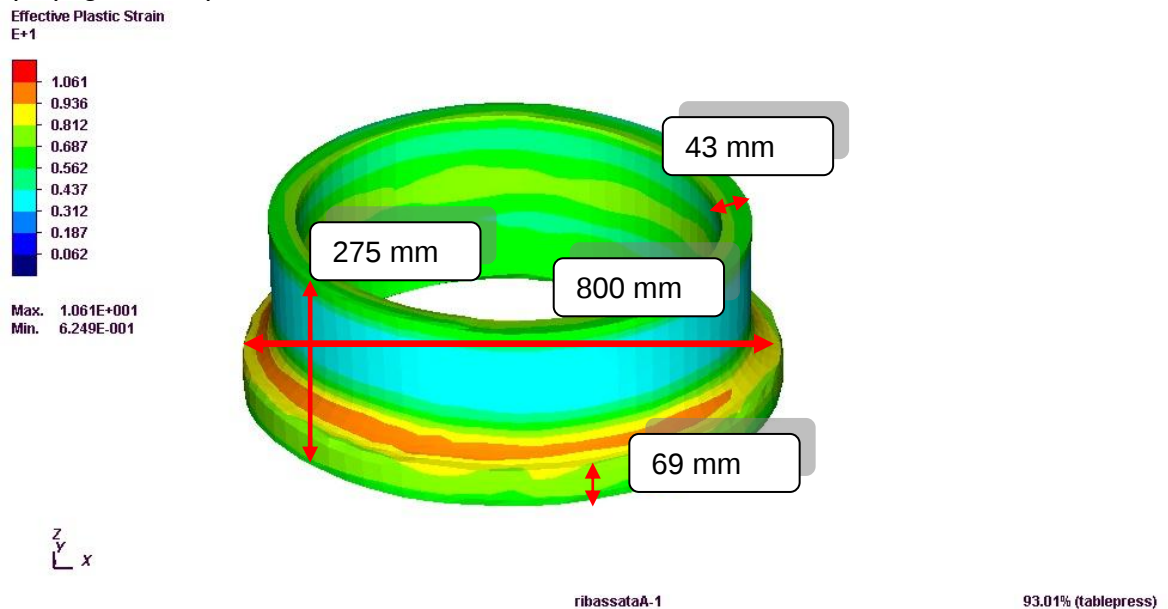


Figura 4.22:Illustrazione del pezzo a laminazione ultimata.

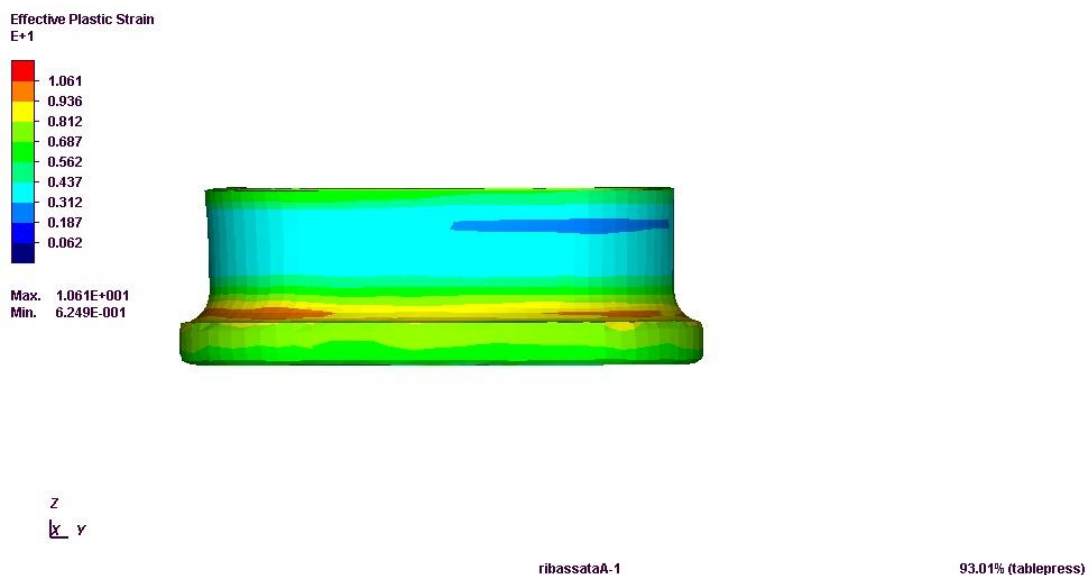


Figura 4.23:Illustrazione del pezzo a laminazione ultimata in ambiente *Simufact.Forming9.0.1*.

I risultati di questa simulazione sono stati eseguiti riferendosi a quote a pezzo caldo. Visto il buon esito della simulazione già ad alte temperature si è pensato di ricavare le misure dell'anello anche a freddo. Si è simulato quindi, un processo di raffreddamento per verificare le quote risultanti per poi confrontarle con quelle reali. Dopo questo processo di *cooling* sono state ricavate le misure dell'anello a freddo ottenendo risultati molto soddisfacenti riscontrando le stesse quote del pezzo effettivo. In Figura 4.25 e 4.26 vengono riportate delle immagini del pezzo quotato dopo aver simulato il processo di *cooling*. In Figura 4.24 viene riportato il disegno quotato del profilo del pezzo a freddo.

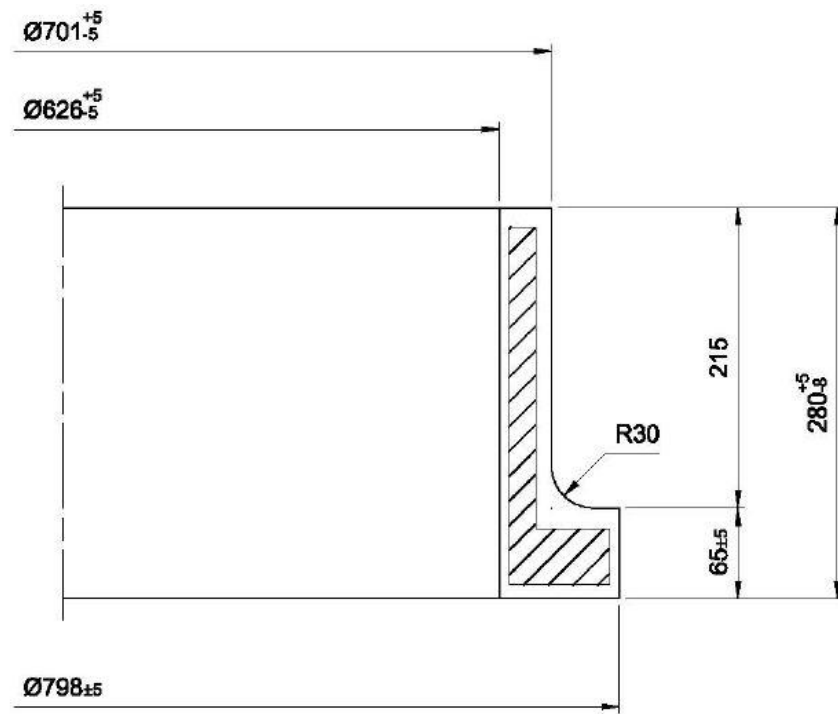


Figura 4.24 :Disegno quotato del profilo del pezzo a freddo.

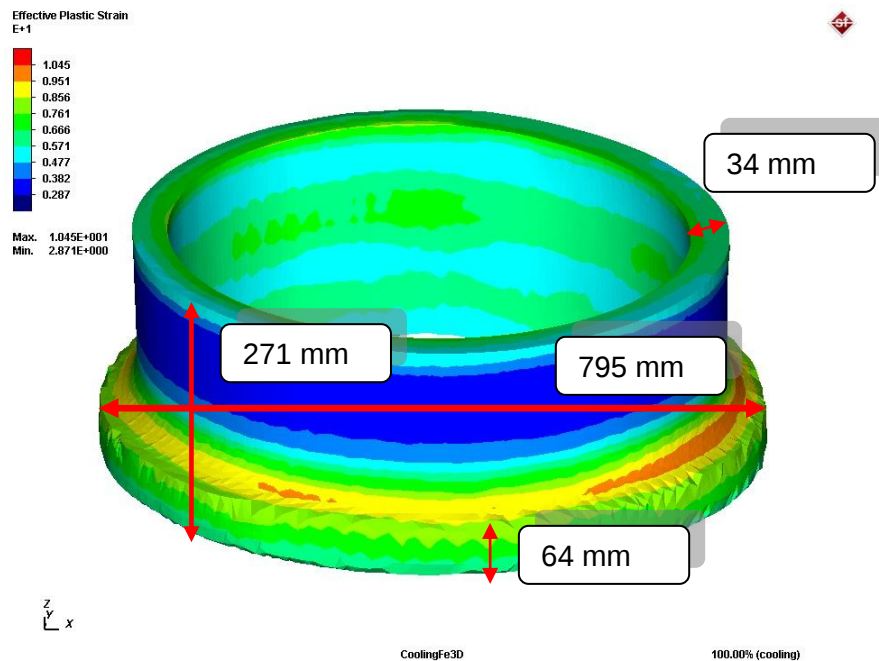


Figura 4.25 :Illustrazione del pezzo quotato dopo il processo di *cooling*.

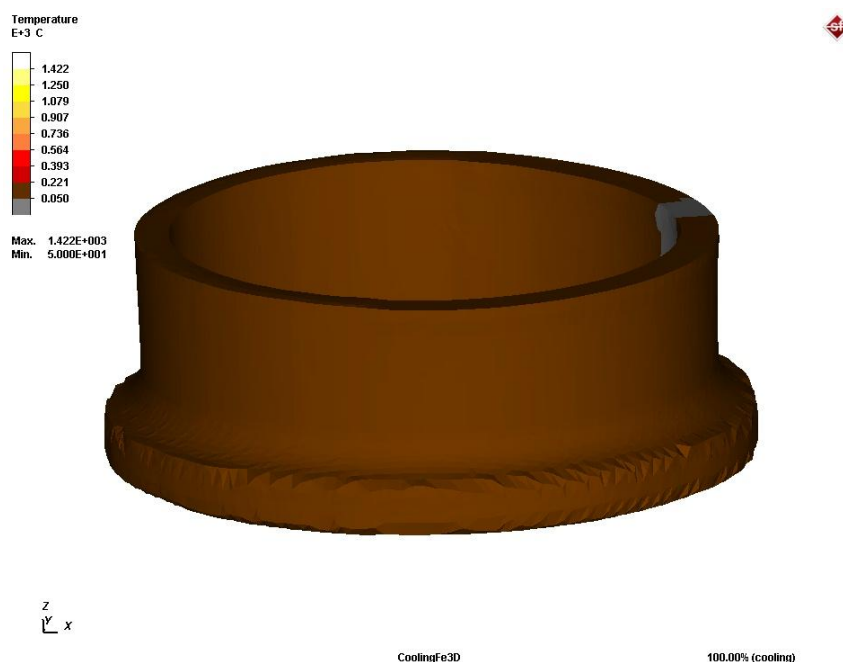


Figura 4.26: Illustrazione del pezzo dopo il processo di *cooling* con mappa delle temperature.

4.4.4 Forze risultanti dalla simulazione

Le forze risultanti da questa simulazione, riportate in Figura 4.27, 4.28, 4.29, lanciate con le opportune modifiche descritte nei paragrafi precedenti, rispettano i valori di forza dati da ASFO spa. Si può verificare quindi che dalla simulazione effettuata i valori ottenuti dalla simulazione e quelli rilevati presso l'azienda durante la lavorazione sono molto simili.

Nelle figure seguenti vengono riportati i grafici delle forze assiali, radiali e la velocità angolare del mandrino.

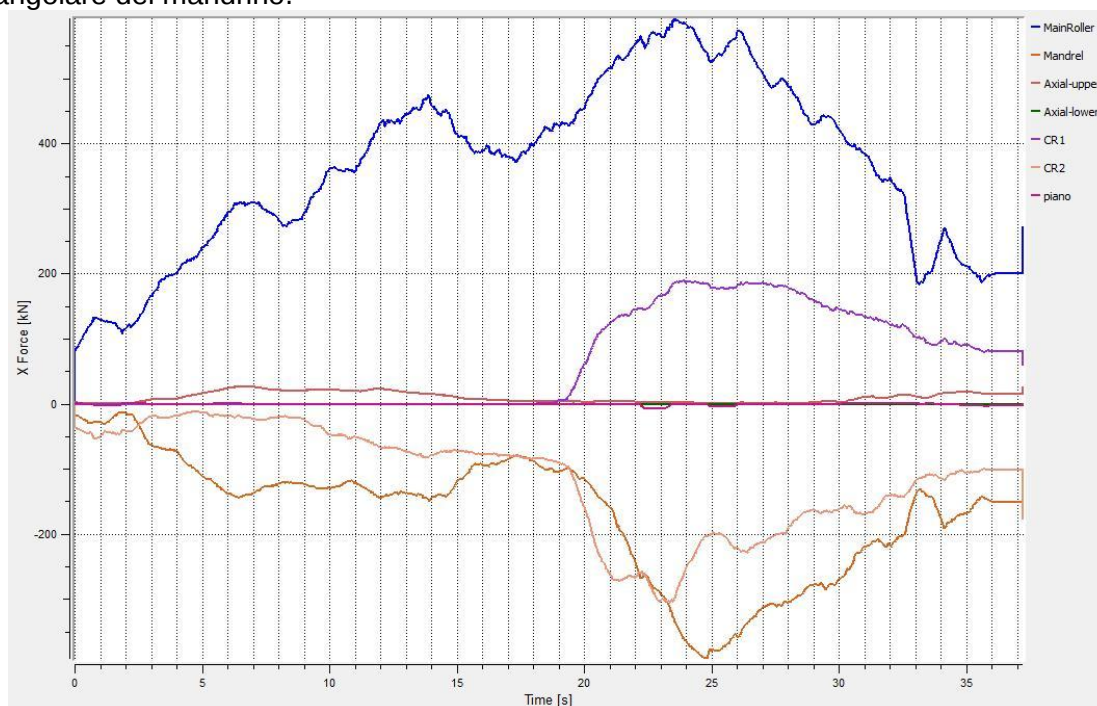


Figura 4.27 :Rappresentazione delle forze agenti radiali (forze in x) durante la simulazione.

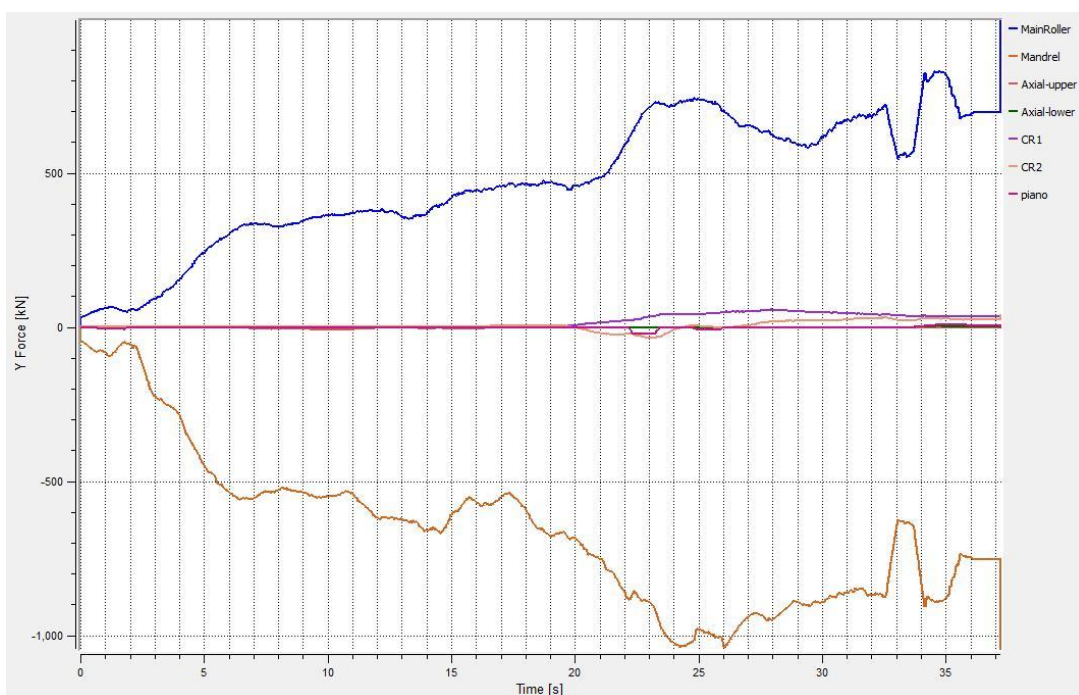


Figura 4.28:Rappresentazione delle forze agenti assiali (forze in y) durante la simulazione.

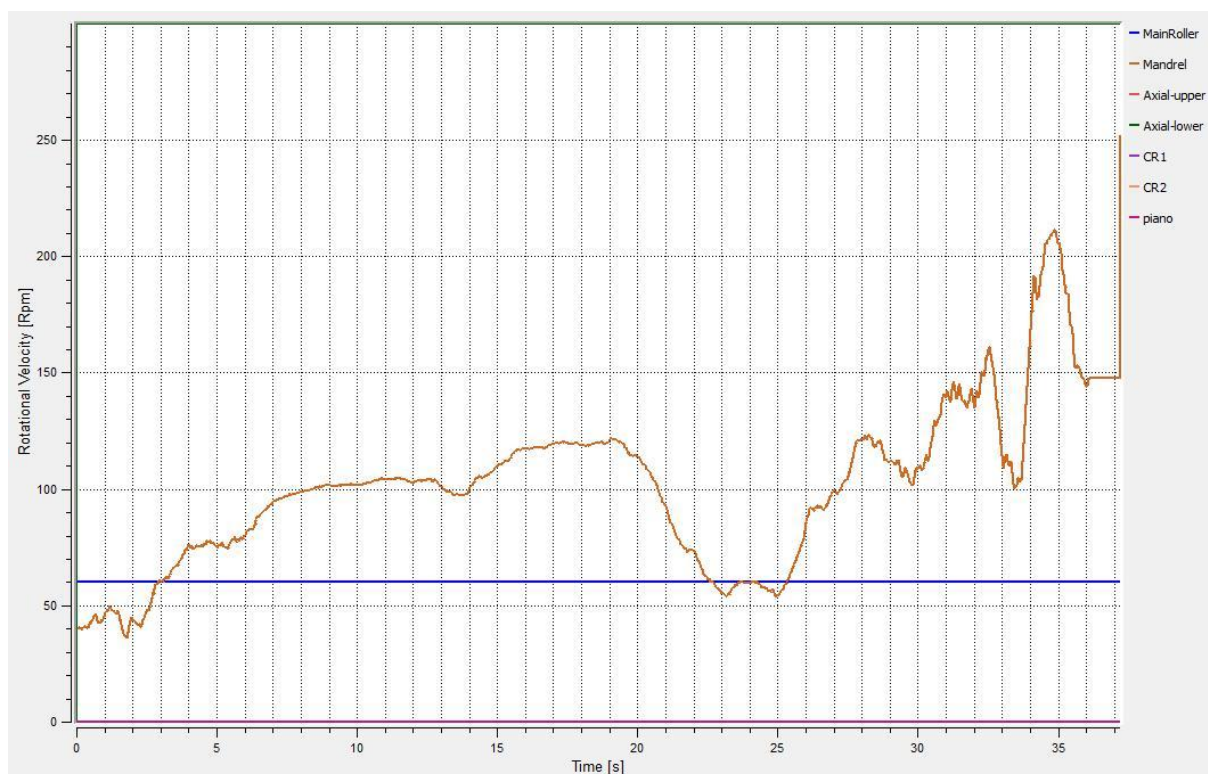


Figura 4.29:Rappresentazione della velocità angolare del mandrino durante la simulazione in ambiente *Simufact.Forming9.0.1*.

CONCLUSIONI

Il tempo dedicato a quest'analisi di simulazione ha portato ad una valida considerazione del software **Simufact.Forming9.0.1**. I risultati ottenuti tramite questo software sono stati positivi e risolutivi per varie e molteplici criticità. Il software si è rivelato un valido strumento anche per verificare l'efficacia di un processo di lavorazione ancora prima di essere testato realmente, utilizzando materiali e attrezzature senza rischiare di andare incontro a rotture o a irregolarità nello svolgersi del processo. Grazie a **Simufact.Forming9.0.1**, dunque, è stata effettuata una serie di simulazioni riguardanti il processo condotto nell'azienda ASFO spa per la produzione della flangia in questione. Dai risultati ottenuti si sono potuti evidenziare le importanti criticità emerse anche presso il reparto produttivo dell'azienda ASFO spa, tra cui:

- Problemi di posizione del pezzo durante la lavorazione;
- Errati contatti tra i profili della preforma e del rullo sagomato;
- Geometria della preforma utilizzata;
-

Dai problemi riscontrati è stato possibile proporre, dopo varie e importanti considerazioni, le possibili modifiche di riprogettazione nel tentativo di risolvere le problematiche riscontrate:

- Modifica del profilo del rullo sagomato, per migliorare il contatto con la preforma;
- Modifica di uno step aggiuntivo di schiaccio (*Upsetting*) della preforma prima della laminazione;
- Modifica del processo di produzione della preforma, per ottenere una preforma che rispetta i principi ottimali descritti nella letteratura;

Per quanto riguarda la prima proposta, è stato possibile modellare il profilo della sagoma grazie ad un software di modellazione solida. Le simulazioni svolte con questa sagoma hanno generato risultati apprezzabili, rendendo il processo simulato più stabile e con una discreta forma finale del pezzo. Riguardo alla seconda proposta, è stato simulato un processo di schiaccio della preforma prima di essere laminata. I risultati ottenuti mediante questo ulteriore schiaccio sono stati anch'essi positivi, ottenendo anche in questo caso una forma finale del pezzo molto apprezzabile. La terza proposta è una proposta più impegnativa in termini economici. Si è ricreato in ambiente **Simufact.Forming9.0.1** l'intero processo di realizzo della preforma utilizzando differenti utensili rispetto a quelli utilizzati per replicare il processo dell'azienda ASFO spa. L'intero processo di realizzo della preforma è stato riprogettato in modo tale da essere in grado di generare un modello di preforma rispettante le indicazioni suggerite dalla letteratura riguardo le geometrie ottimali. Tale profilo della preforma favorisce il flusso di materiale e una partizione dei volumi migliori, oltre ad un corretto contatto con il rullo sagomato.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *“Tesi di Stefano Basso (2008/2009) :” Simulazione numerica mediante software ad elementi finiti dell’intero processo di formatura a caldo di un anello flangiato in acciaio al carbonio.”*
- [2] *“Metals Handbook - 9th edition, vol. 14: Forming and Forging”, ASM International.*

