



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTA DI INGEGNERIA

SEDE DI VICENZA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

TESI DI LAUREA DI PRIMO LIVELLO

**MODELLAZIONE NUMERICA DELLE PREFORME IN ACCIAIO
AL CARBONIO PER UN PROCESSO DI RING ROLLING**

RELATORE: PROF. GUIDO BERTI

CORRELATORE: DR. ING. MANUEL MONTI

LAUREANDO: POGGIANA ENRICO

ANNO ACCADEMICO 2010-2011

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, una progettazione integrata di prodotto e di processo, assistita da software CAD/CAE è diventata uno strumento vincente, soprattutto in ambienti di lavoro in cui il costo dell'errata progettazione e dei test è elevato. Nel processo convenzionale di design, il prodotto veniva progettato disgiuntamente al processo, con una conseguente necessità di apporre continue modifiche al progetto iniziale persino a produzione già iniziata. Come è comprensibile, i costi dei cambiamenti hanno un valore minore nelle prime fasi del processo di *engineering*, quando ancora molte decisioni sono a livello virtuale e pochi componenti riguardanti il processo sono già stati realizzati. Più avanti ci si pone in tale processo, più problematico diventa introdurre un cambiamento, per esempio modificare geometrie e materiale quando stampi e componenti sono già stati acquistati.

I software ad elementi finiti si stanno affermando come uno strumento fondamentale per realizzare una progettazione integrata di prodotto e processo. Questi programmi sono in grado di riprodurre e simulare l'andamento di svariati tipi di processi produttivi, permettendo di prevedere parte dei problemi che con metodologie standard di progettazione sarebbero emersi solamente in seguito a dei test svolti fisicamente, con conseguenti perdite di tempo, sprechi di materiale, impiego di ore uomo e ore macchina. L'utilizzo di questo strumento, unitamente all'esperienza di operatori specializzati, permette un livello di progettazione completamente innovativo ed in grado di soddisfare i tempi e gli standard di qualità sempre più esigenti richiesti dal mercato.

Per questo motivo l'azienda vicentina **ASFO acciai SpA**, da 40 anni uno dei maggiori produttori in Europa di anelli di svariate dimensioni con processi di *ring-rolling*, si sta muovendo verso questa nuova frontiera. Per sviluppare una ricerca che ha come scopo la verifica e l'implementazione di questo strumento presso la loro azienda, ASFO ha allacciato una collaborazione con il gruppo Tecnologia Meccanica della facoltà di Ingegneria di Padova. Presso il Laboratorio di Tecnologie e Sistemi di Lavorazione sito nella sede di Vicenza della facoltà di Ingegneria Gestionale, è stata avviata una postazione di simulazione numerica di processo dotata del software **Simufact.Forming 9.0.1**, un programma FEM per la simulazione di processi di formatura metallica a freddo e a caldo.

Grazie alla disponibilità ed al supporto di *ASFO spa*, è stato selezionato un processo di laminazione condotto presso l'azienda. Tale processo era già stato esaminato in un primo momento nel laboratorio sopra citato ma non aveva fornito i risultati sperati.

Questo lavoro di tesi è parte di un progetto più ampio che comprende altri due lavori svolti da colleghi, assieme ai quali il processo in questione è stato ripreso e sviluppato nella sua totalità.

L'intero progetto comprende infatti:

- analisi dei dati e dei risultati di studi precedenti presenti in laboratorio
- nuova progettazione dell'intero processo produttivo
- modellazione numerica dell'intero processo produttivo
- elaborazione ed analisi dei risultati ottenuti e individuazioni di eventuali problematiche e/o criticità nel processo produttivo
- formulazione di proposte di risoluzione dei problemi del processo produttivo ed eventuale riprogettazione

Il processo produttivo affrontato è un processo *ring rolling* (laminazione di anelli) di un anello flangiato e si compone essenzialmente di due fasi principali:

- preparazione della preforma
- espansione della preforma nel laminatoio

Questo lavoro di tesi, in particolare, si occupa della prima delle due fasi, e cioè del processo di **realizzazione della preforma**, e ha come obiettivi:

- Modellare in ambiente *Simufact.Forming 9.0.1* il processo di realizzazione della preforma in tutte le sue fasi, compatibilmente alle indicazioni fornite dall'azienda, al fine di ottenere un risultato finale idoneo per una corretta modellazione del processo di laminazione (trattato in un altro progetto di tesi).
- Individuare, in base ai risultati ottenuti dalla campagna sperimentale, eventuali problematiche e/o criticità del processo produttivo in questione, che saranno poi riprese e analizzate in dettaglio nel progetto di tesi dedicato alle proposte di riprogettazione.

ARTICOLAZIONE DEL LAVORO

Il seguente lavoro di tesi si articola in tre capitoli:

Il primo capitolo fornisce una panoramica generale sui processi *ring rolling* soffermandosi sulla preparazione della preforma; sono trattati poi in modo un po' più dettagliato i vari processi produttivi che compongono le varie fasi di preparazione della preforma, in particolare lo stampaggio, sia esso in stampi chiusi o aperti, e la tranciatura.

Il secondo capitolo illustra il caso aziendale completo. È presente la descrizione dettagliata dell'intero processo produttivo dell'anello flangiato CH-10337, completa di dati, parametri e precise indicazioni della *Asfo spa* riguardanti misure dei pezzi, materiali utilizzati e macchinari a disposizione.

Il terzo capitolo si occupa della modellazione numerica della realizzazione della preforma dell'anello in questione. Viene descritta la generazione del modello virtuale in ambiente *Simufact*, ed i risultati da esso forniti in seguito ad una campagna di simulazioni, nel tentativo di replicare il processo così come condotto dall'azienda. Le lavorazioni trattate in questo capitolo sono: primo upsetting, secondo upsetting, spinatura e tranciatura.

INDICE

INTRODUZIONE.....	3
ARTICOLAZIONE DEL LAVORO.....	5
INDICE.....	7
CAPITOLO 1	
LAMINAZIONE DI ANELLI: PREPARAZIONE DELLA PREFORMA.....	9
1.1 Introduzione ai processi ring rolling.....	9
1.2 Preparazione della preforma.....	10
1.3 Tecniche produttive usate per la preparazione.....	13
1.3.1 Introduzione alla deformazione plastica massiva.....	13
1.3.2 Introduzione allo stampaggio.....	14
1.3.3 Stampaggio in stampi aperti.....	14
1.3.4 Stampaggio in stampi chiusi.....	17
1.3.4.1 Impression – die forging.....	17
1.3.4.2 Closed – die forging.....	19
1.3.5 Difetti nello stampaggio.....	19
1.3.6 Tranciatura.....	21
CAPITOLO 2	
CASO AZIENDALE ASFO: DESCRIZIONE DEL PROCESSO DI FORMATURA A CALDO DELL' ANELLO FLANGIATO CH – 10337.....	25
2.1 Introduzione.....	25
2.2 Pezzo iniziale.....	27
2.3 Preparazione della preforma.....	28
2.3.1 Primo upsetting.....	28
2.3.2 Secondo upsetting.....	29
2.3.3 Spinatura.....	30
2.3.4 Tranciatura.....	31
2.4 Preforma.....	32
2.5 Laminazione.....	33
2.6 Pezzo finale.....	36
CAPITOLO 3	
MODELLAZIONE NUMERICA DELLE FASI DI REALIZZAZIONE DELLE PREFORMA.....	37
3.1 Introduzione.....	37
3.2 Pezzo iniziale.....	39
3.3 Primo upsetting.....	40
3.4 Secondo upsetting.....	45
3.5 Spinatura.....	47
3.6 Tranciatura.....	52
3.7 Preforma.....	56
CONCLUSIONI.....	59
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	61

CAPITOLO 1

LAMINAZIONE DI ANELLI: PREPARAZIONE DELLA PREFORMA

1.1 Introduzione ai processi ring rolling

La laminazione di anelli (*ring rolling*, in inglese) è un processo di formatura metallica estremamente versatile che consente di produrre prodotti di forma anulare, accurati nelle tolleranze e aventi una disposizione dei grani circonferenziale.

In questo processo, un anello pre-formato su una pressa e pre-riscaldato ad alte temperature, è infilato in un mandrino avente diametro minore del foro. Successivamente, lo spazio tra il mandrino (folle) ed il rullo principale posto in rotazione viene progressivamente ridotto. L'attrito 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 circonferenziale lungo il verso di rotazione e il diametro dell'anello cresce.

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, sia mediante l'utilizzo di rulli assiali (spesso aventi forma di coni) posti nel lato diametralmente opposto rispetto al mandrino.

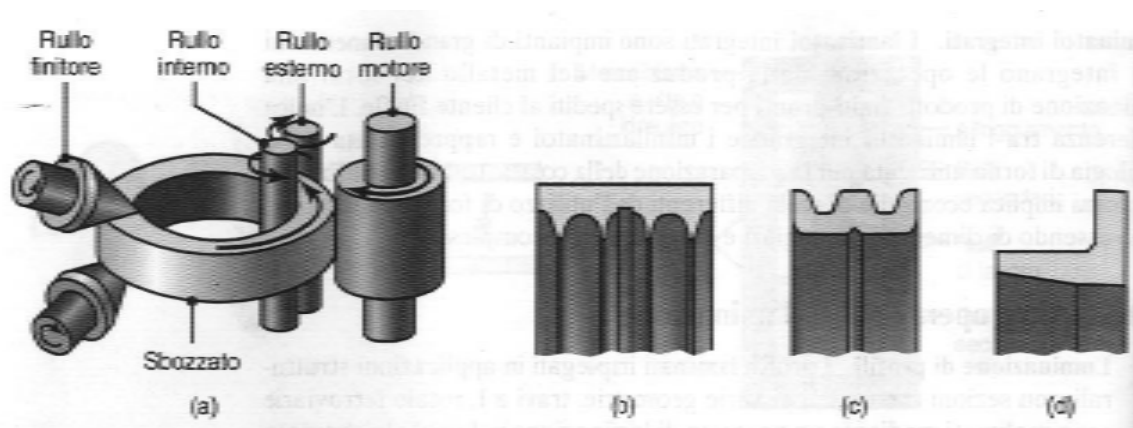


Figura 1.1: (a) Rappresentazione schematica di un' operazione di laminazione di anelli. (b) (c) (d) Tre esempi di sezioni trasversali che possono essere prodotte mediante questo processo (fonte [3]).

1.2 Preparazione della preforma

La produzione di componenti anulari tramite laminazione, prevede due fasi di processo:

1. *produzione della preforma*, tramite uno o più processi di formatura metallica convenzionale;
2. *espansione della preforma nel laminatoio*.

La lavorazione della preforma può essere eseguita adiacente alla postazione del laminatoio, rendendo così non necessari processi di ripresa di temperatura. Spesso però, soprattutto in impianti datati o con scarsità di spazio, la lavorazione della preforma avviene separatamente, rendendo necessario un ciclo di riscaldamento prima di poter iniziare la fase di laminazione.

La lavorazione separata della preforma viene spesso utilizzata nella produzione di componenti per l'industria aerospaziale, questo perché è necessaria un'attenta analisi della preforma a freddo per evitare ogni difetto e valutare se è necessaria un'ulteriore rettifica.

La preparazione della preforma consiste in operazioni convenzionali per una forgia. Avendo a disposizione operatori con esperienza e presse o magli a stampi aperti, è possibile produrre praticamente preforme per ogni esigenza di forma e dimensione. A tal fine, le presse a maglio sono ritenute le più versatili e presentano il vantaggio del minore costo di installazione rispetto agli altri macchinari, sebbene gli evidenti problemi acustici hanno limitato le nuove installazioni negli ultimi anni. La tendenza degli ultimi anni, soprattutto se nella lavorazione sono coinvolti materiali duttili, è integrare la pressa per le preforme con il laminatoio, creando un'unica unità produttiva.

L'obiettivo principale nella preparazione della preforma è semplicemente creare un foro al centro di essa, con un diametro sufficiente per l'inserimento del mandrino. Logicamente, minore è il diametro del foro, minore è il materiale sprecato, a patto che l'anello sia poi dello spessore corretto per essere laminato secondo le esigenze. In Figura 1.2 sono illustrate le sequenze tipiche per la preparazione di una preforma forata.

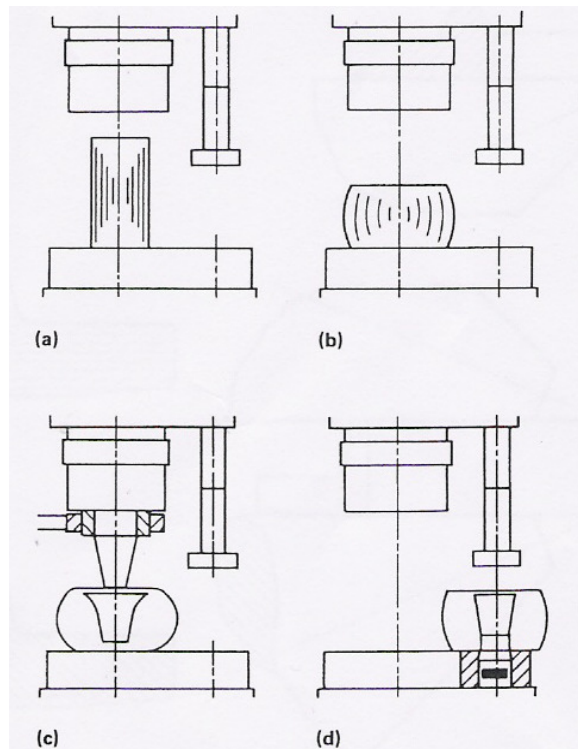


Figura 1.2: Fasi standard nella preparazione di una preforma anulare (fonte [2]).

Vediamo nel dettaglio questa sequenza:

- (a)- (b)** La prima fase prevede l'*upsetting* di una billetta cilindrica, per ridurne l'altezza.
- (c)** La seconda fase consiste nell'inserimento di un punzone, o spina, preferibilmente di forma conica, per creare l'innesto del foro. Al termine di questa operazione rimane solamente un sottile strato di materiale a tappare il foro sulla zona inferiore, chiamato *fondello*.
- (d)** In quest'ultima fase una trancia rimuove il fondello, che viene scartato.

In questa fase è molto importante la scelta del diametro della spina, soprattutto con pezzi di dimensioni ridotte, in quanto un punzone dal diametro eccessivo rischia di comportarsi più come uno stampo aperto, causando gravi problemi di distorsione, a meno di non racchiudere il pezzo in uno stampo chiuso (Figura 1.3).

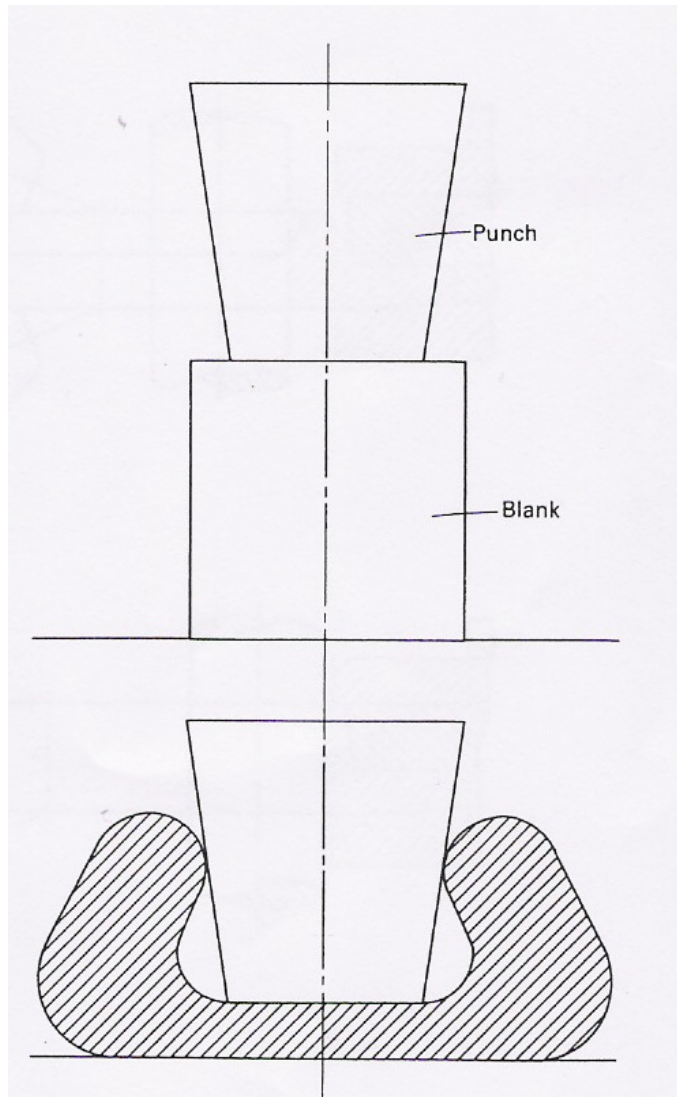


Figura 1.3: Billetta distorta erroneamente a causa di un punzone di diametro troppo elevato (fonte [2]).

1.3 Tecniche produttive usate per la realizzazione della preforma

Tutte le fasi di realizzazione della preforma, descritte nel paragrafo precedente, fanno riferimento a lavorazioni appartenenti al campo della deformazione plastica massiva; si tratta, nello specifico, di processi di stampaggio, sia esso in stampi chiusi o aperti, e di tranciatura.

1.3.1 Introduzione alla deformazione plastica massiva

I processi di deformazione nell'industria sono operazioni che inducono cambiamenti di forma al pezzo in lavorazione per mezzo di deformazione plastica, generata da forze applicate da diversi strumenti e utensili. I processi di deformazione possono essere classificati per temperatura, taglia o forma del pezzo in lavorazione. Inoltre, i processi di deformazione possono essere classificati per tipo di operazione, primaria o secondaria:

- Le operazioni di **lavorazione primaria** sono quelli che, a partire da una forma grezza di metallo (generalmente un lingotto ottenuto tramite colata), generano forme come lastre, piastre o billette. Tradizionalmente, i processi di lavorazione primaria sono lo stampaggio, la laminazione e l'estrusione.
- Le operazioni di **lavorazione secondaria** comprendono tutte quelle lavorazioni che trasformano il risultato di una lavorazione primaria in prodotti finiti o semilavorati, come bulloni, sottili lamine metalliche e fili.

Una classificazione più recente è stata stabilita in base alla taglia e alla forma del pezzo in lavorazione:

- I processi di **deformazione massiva** riguardano pezzi che hanno un'area superficiale relativamente piccola in rapporto al volume o allo spessore (da qui il termine massivo). In tutte queste lavorazioni lo spessore o l'area di sezione variano sensibilmente.
- I processi di **formatura della lamiera** riguardano invece pezzi per cui il rapporto area superficiale su spessore è relativamente elevato. In questi processi il materiale è soggetto a cambio di forma grazie a degli stampi, mentre le variazioni di spessore sono assolutamente indesiderate.

1.3.2 Introduzione allo stampaggio

Il processo di stampaggio racchiude una famiglia di processi in cui la deformazione plastica del pezzo in lavorazione è indotta tramite *forze di compressione*.

Tipiche parti prodotte per stampaggio al giorno d'oggi sono alberi a gomiti e bielle per motori, pale per turbine, ingranaggi, ruote, bulloni e teste di viti, attrezzi manuali e svariati tipi di componenti strutturali per macchinari o sistemi di trasporto.

I processi di stampaggio sono condotti a varie temperature ed in base ad essa si parla di stampaggio a caldo o a freddo.

Le due categorie principali dello stampaggio, descritte in seguito, sono a stampi aperti e a stampi chiusi.

1.3.3 Stampaggio in stampi aperti

Nella sua forma più semplice, lo stampaggio in stampi aperti si effettua generalmente posizionando un pezzo cilindrico tra due stampi piani (piatti) e riducendo la sua altezza per compressione (Figura 2.1a). Questa operazione è conosciuta anche come **upsetting**. Le superfici degli stampi possono essere sagomate, presentando ad esempio cavità coniche o curve, allo scopo di formare le estremità della billetta cilindrica durante la compressione.

A condizioni ideali, un cilindro solido si deforma come illustrato in Figura 2.1a: questo procedimento è conosciuto come **deformazione omogenea**.

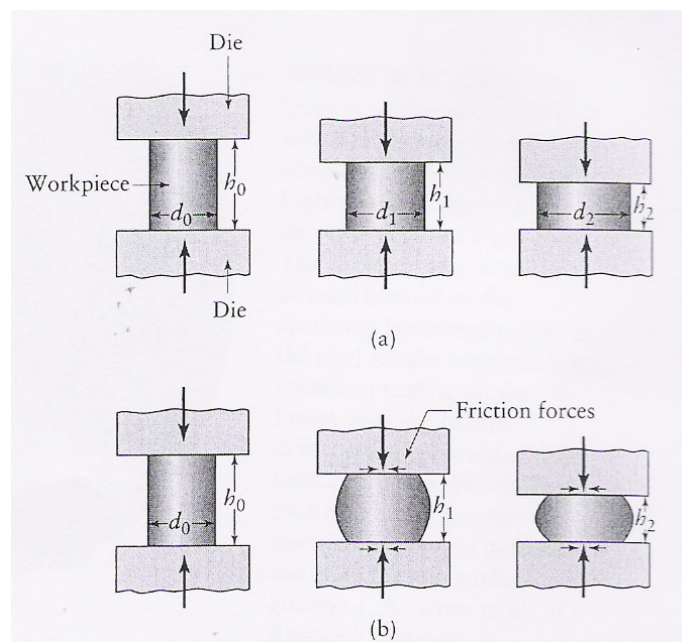


Figura 1.4: (a) Deformazione ideale di una billetta cilindrica compressa in stampi privi di attrito (*upsetting*). (b) Deformazione di *upsetting* con attrito all'interfaccia stampo-pezzo (fonte [3]).

Dato che il volume del cilindro rimane costante, ogni riduzione nella sua altezza comporta un aumento di diametro. Supponiamo di avere un cilindro, la cui altezza viene ridotta da una quota h_1 ad h_0 :

$$\text{Riduzione_in_altezza} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\% \quad (\text{Eq 1.1})$$

Usando valori assoluti, definiamo le deformazioni, reale ed ingegneristica, come segue:

$$e_1 = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \quad (\text{Eq 1.2})$$

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right) \quad (\text{Eq 1.3})$$

Con una velocità relativa v tra i piatti, la billetta è soggetta ad una velocità di deformazione di:

$$\dot{e}_1 = -\frac{v}{h_0} \quad (\text{Eq 1.4})$$

$$\dot{\varepsilon}_1 = -\frac{v}{h_1} \quad (\text{Eq 1.5})$$

Se la billetta venisse ridotta da h_0 a h_2 , sarebbe sufficiente cambiare il pedice 1 nelle equazioni precedenti con il pedice 2. Da notare il fatto che la velocità di deformazione $\dot{\varepsilon}$ aumenti rapidamente con l'avvicinarsi dell'altezza allo zero. Le posizioni 1 e 2 in Figura 1.4a possono essere considerate come posizioni istantanee durante un processo continuo di *upsetting*.

In un processo reale, la billetta è soggetta ad un fenomeno di **imbarilimento**, come illustrato in Figura 1.4b. Tale fenomeno è causato in primo luogo dalle forze d'attrito all'interfaccia stampo-pezzo che si oppongono al flusso di materiale. Questo fenomeno è maggiormente presente in processi di *upsetting* con pezzi ad elevata temperatura e stampi a temperatura ambiente. Con queste condizioni il materiale più prossimo agli stampi scambia calore con essi e si raffredda più velocemente rispetto al materiale nel nucleo. Dato che la resistenza del materiale diminuisce all'aumentare della temperatura, le estremità della billetta presenteranno una maggiore resistenza alla deformazione rispetto al materiale nel centro.

Nel fenomeno di imbarilimento, il flusso di materiale all'interno della billetta diventa non uniforme (o disomogeneo), come si può vedere dalla foto della sezione di un cilindro compresso in Figura 1.5. In questa figura si nota facilmente la zona inferiore in cui è avvenuto il raffreddamento accelerato

causa del fenomeno. In Figura 1.6 è ulteriormente illustrato tale fenomeno, grazie alla tracciatura di una griglia che illustra il flusso di materiale in condizioni ideali ed in presenza d'attrito.

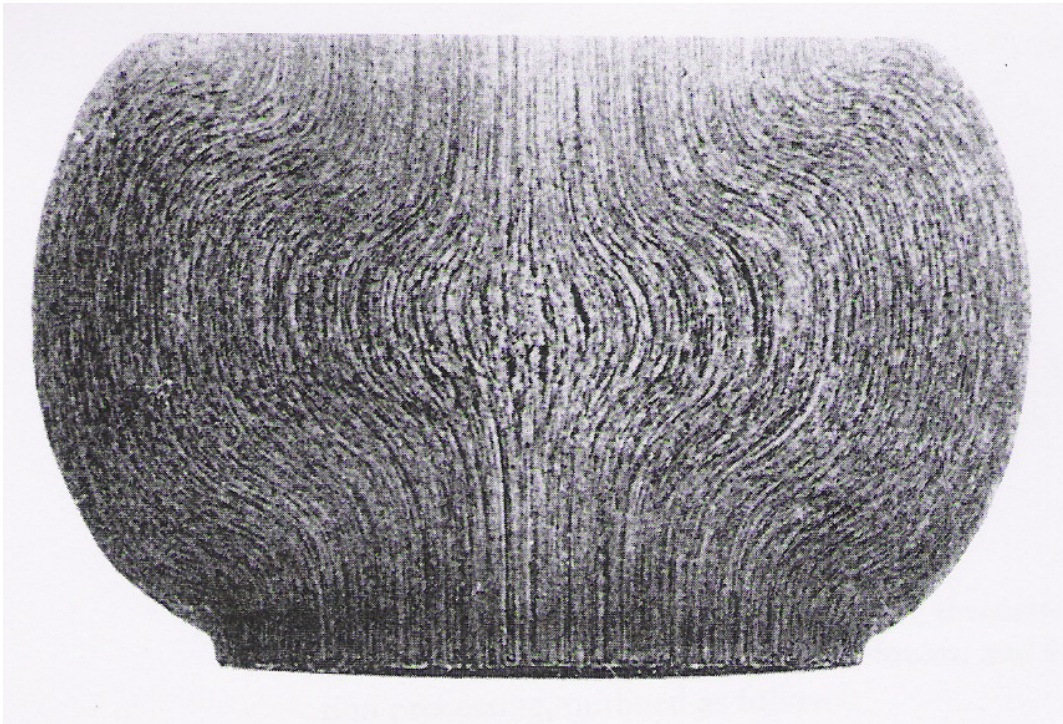


Figura 1.5: Foto della sezione di un cilindro solido sottoposto ad un *upsetting* ad alte temperature. Sono ben visibili le linee di flusso dei grani (fonte [3]).

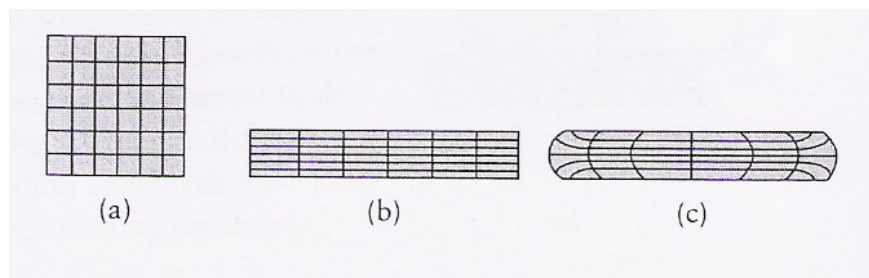


Figura 1.6: Rappresentazione schematica di della deformazione di una griglia durante un processo di *upsetting*. (a) Griglia originale (b) Dopo deformazione priva di attrito (c) Dopo deformazione con attrito. Questi disegni risultano utili per calcolare le deformazioni interne di un pezzo (fonte [3]).

Nel caso in cui tale fenomeno si presenti in entrambe le estremità della billetta, si parla talvolta di doppio imbarilimento.

Questo fenomeno viene ridotto in genere applicando del lubrificante ai piatti, o facendo vibrare questi ultimi per mezzo di ultrasuoni. L'utilizzo di stampi riscaldati o di barriere termiche all'interfaccia può essere di ulteriore aiuto.

1.3.4 Stampaggio in stampi chiusi

1.3.4.1 Impression - die forging

Nell' *impression-die forging*, il pezzo in lavorazione acquisisce la forma della cavità dello stampo, mentre esso viene deformato racchiuso tra la metà superiore e quella inferiore.

Un esempio tipico è illustrato in Figura 1.7. Una leggera quantità di materiale fluisce radialmente verso l'esterno, formando la cosiddetta *bava*. Tale bava, a causa del suo alto rapporto lunghezza su spessore (equivalente ad un elevato rapporto a / h), è soggetta ad una pressione elevata, la quale a sua volta causa un'alta resistenza d'attrito al flusso di materiale in direzione radiale. Dato che la presenza di una forza d'attrito elevata incoraggia il riempimento dello stampo, la bava ha un ruolo fondamentale in queste operazioni di stampaggio. Inoltre, se le operazioni sono eseguite a temperatura elevata, la bava si raffredda ad una velocità maggiore rispetto al resto del materiale, a causa della sua superficie elevata a contatto con lo stampo. Di conseguenza, la bava resiste maggiormente alla deformazione rispetto al nucleo, favorendo la corretta riempitura della cavità da parte del materiale che non può uscire ulteriormente.

A causa delle forme coinvolte più complicate, un calcolo accurato delle forze in questa metodologia di stampaggio risulta davvero difficile. In base alla propria posizione, ogni elemento all'interno del pezzo è generalmente soggetto a differenti deformazioni e velocità di deformazione. Di conseguenza, a causa delle elevate difficoltà riscontrate nel calcolare le forze, sono stati ideati dei fattori moltiplicativi K_p , come illustrato in Tabella 1.1. Questi fattori vengono utilizzati nell'espressione:

$$F = K_p \cdot Y_f \cdot A \quad (\text{Eq 1.6})$$

dove F è la forza di stampaggio, A è l'area proiettata dello stampo (inclusa la zona della bava), Y_f il *flow stress* del materiale al preciso stato di deformazione a cui è sottoposto.

Range di valori per K_p nello stampaggio impression-die	
Forma semplice, senza bava	3 - 5
Forma semplice, con bava	5 - 8
Forma complessa, con bava	8 - 12

Tabella 1.1

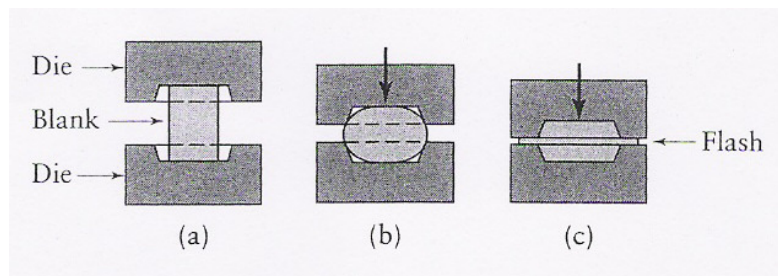


Figura 1.7: Illustrazione schematica delle fasi di un processo di *impression-die forging*. Da notare la formazione di bava, che deve essere asportata nelle fasi successive (fonte [3]).

Un tipico grafico del carico di stampaggio in funzione della corsa dello stampo è illustrato in Figura 1.8.

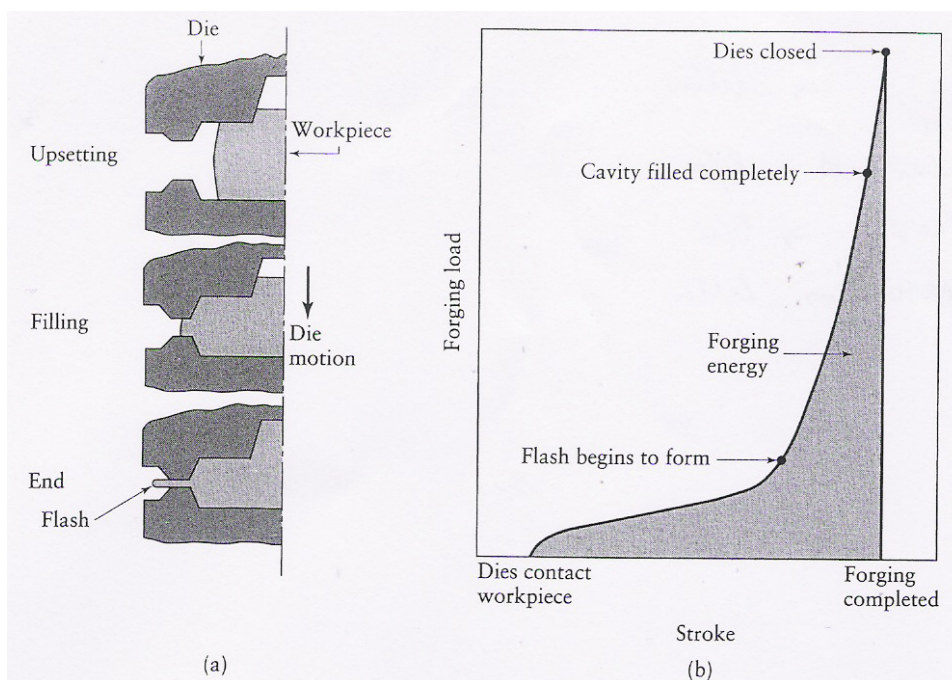


Figura 1.8: Curva carico-corsa per stampaggio *impression-die* (fonte [3]).

Per questo pezzo di forma assialsimmetrica, la forza aumenta gradualmente finchè la cavità viene riempita (Figura 1.8b). Da questo istante in poi, quando la bava inizia a formarsi, le forze aumentano rapidamente. Per ottenere le dimensioni finali e la forma corretta del pezzo, gli stampi devono chiudersi fino in fondo, aumentando in misura maggiore la forza di carico, che raggiunge il suo picco a stampo completamente chiuso.

1.3.4.2 Closed – die forging

Se si immagina che lo stampo superiore vada in battuta su quello inferiore, l'esempio in Figura 1.7 può essere definito anche come *closed – die forging*. Nel vero stampaggio a stampi chiusi, non vi è formazione di bava, dato che il pezzo è completamente circondato dagli stampi. Dato che il materiale non ha possibilità di sfogo nella formazione di bava, è essenziale controllare rigorosamente il volume del materiale che si intende stampare. Pezzi sovradimensionati, in questa tecnica di stampaggio, impediscono la completa e corretta chiusura dello stampo, oltre alla possibilità di arrecare danni allo stesso.

1.3.5 Difetti nello stampaggio

I difetti nello stampaggio sono causati principalmente dal percorso che segue il materiale nel fluire all'interno dello stampo. Tra i principali difetti troviamo:

- *Cricche superficiali*. Il pezzo in seguito alla lavorazione può presentare microscopiche fratture, anche non visibili ad occhio nudo.
- *Materiale in eccesso*. Come illustrato in figura 1.9, materiale in eccesso all'interno di uno stampo chiuso si storce su se stesso durante lo stampaggio originando *ripiegature (laps)*. Inoltre se la geometria della cavità dello stampo è sufficientemente spessa, il materiale in eccesso può fluire oltre le porzioni già compresse e sviluppare cricche interne (Figura 1.10). Questi esempi indicano l'importanza di distribuire correttamente il materiale e controllarne il flusso all'interno della cavità.
- *Cold shut*. La presenza di profili raggiati all'interno della cavità può influenzare significativamente l'insorgere di difetti. Come si può notare dalla Figura 1.11, il materiale segue un angolo avente ampio raggio in maniera migliore rispetto ad un raggio piccolo. In quest'ultima situazione, il materiale è portato a ripiegarsi su se stesso generando un

particolare tipo di ripiegatura chiamato *cold shut*. Durante la vita del componente, tale difetto può rappresentare un facile innesco per una cricca, portando alla prematura rottura a fatica, oltre ad una eccessiva corrosione ed usura. In questo caso è di fondamentale importanza l'applicazione di tecniche di controllo non distruttivo prima di iniziare il ciclo di vita del componente.

- *Disposizione dei grani*. Sebbene non possa essere considerato propriamente un difetto, un altro importante aspetto riguardante la qualità nello stampaggio è il *percorso del flusso dei grani*. In certi casi, il flusso dei grani induce alcuni di essi a raggiungere la superficie perpendicolarmente, esponendo i bordi dei grani all'ambiente. Durante l'utilizzo, i bordi esposti possono essere attaccati da agenti ambientali, generando una superficie scabrosa che favorisce l'innalzamento delle tensioni superficiali. Questo problema può essere evitato studiando correttamente l'orientamento del pezzo di partenza all'interno degli stampi.

In generale poi, a causa del flusso di metallo in varie direzioni durante lo stampaggio e della variazione di temperatura, le proprietà del materiale hanno generalmente una distribuzione *anisotropica*. A causa di ciò, resistenza e duttilità variano significativamente in varie locazioni e orientazioni in un pezzo stampato.

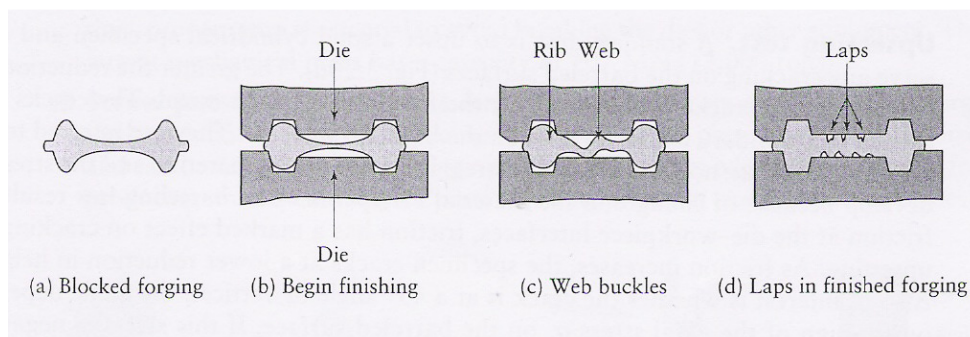


Figura 1.9: Ripiegature (*laps*) del materiale all'interno degli stampi (fonte [3]).

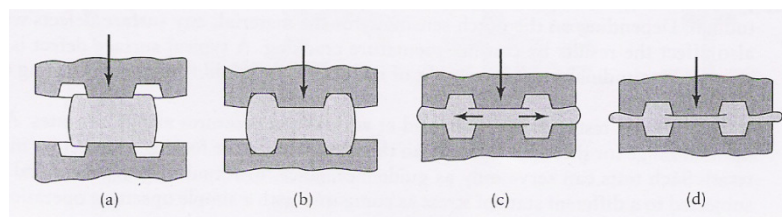


Figura 1.10: Difetti all'interno dello stampo a causa di una billetta sovradimensionata (fonte [3]).

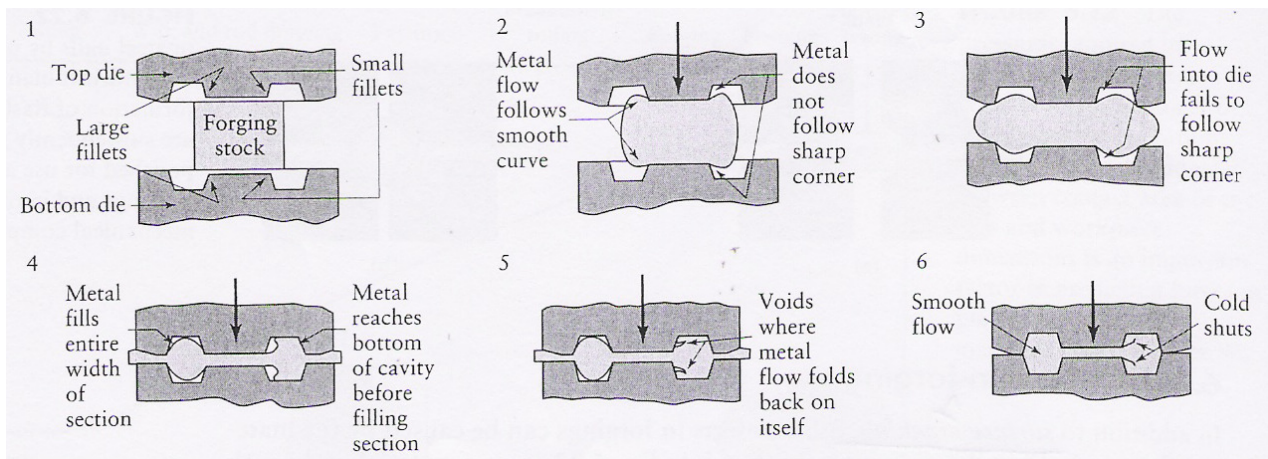


Figura 1.11: Effetti dei raggi di curvatura troppo piccoli sui difetti nello stampaggio (fonte [3]).

1.3.6 Tranciatura

Il processo di *tranciatura* consiste nel taglio di una lamiera, di un piatto o di un componente tubolare per ricavare componenti singoli sottoponendo il materiale a sollecitazioni di taglio, utilizzando un punzone e una matrice. Il punzone e la matrice possono essere di forme diverse, ad esempio a sezione circolare o rettangolare. Le principali variabili nel processo di tranciatura sono la forza del punzone, la velocità del punzone, la lubrificazione, la condizione dei bordi della lamiera, i materiali e i raggi del punzone e della matrice e il gioco tra di essi.

Il principio della tranciatura è illustrato in Figura 1.12. Durante l'abbassamento del punzone, collegato attraverso la piastra porta punzone alla slitta della pressa, e durante la sua penetrazione nella matrice, la lamiera viene tagliata secondo una forma corrispondente alla forma data sia al punzone sia alla matrice. L'oggetto tranciato, grazie all'angolo di sforno presente nella matrice, cade liberamente in un raccoglitore posto sotto lo stampo.

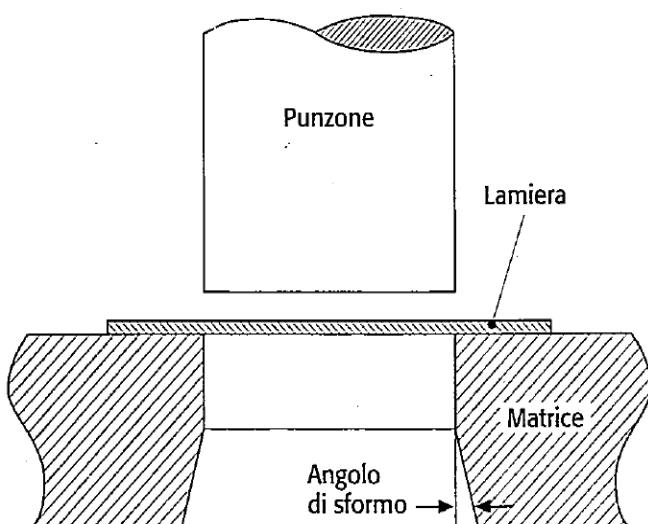


Figura 1.12: Principio della tranciatura (fonte [2]).

Dato che il punzone penetra nella matrice, è necessario prevedere un certo *gioco* tra questi due organi. Esso dipende dallo spessore della lamiera e del materiale. Nella pratica, il valore del gioco varia tra il 2 e l'8% dello spessore della lamiera, ma può anche essere ridotto fino a valore dell' 1% nel processo di tranciatura fine. In generale, maggiori sono lo spessore e la resistenza a trazione del materiale, maggiori sono i valori del gioco utilizzati. Un valore troppo basso del gioco dà origine a fratture secondarie e a un aumento della forza di tranciatura oltre che aumentare il costo dello stampo a causa delle tolleranze più strette; al contrario un valore troppo alto provoca eccessive bave, arrotondamenti e inclinazione della superficie di frattura. Una formula che, per lamiere di piccolo spessore, è spesso usata per approssimare il valore corretto del **gioco** è la seguente:

$$g = 0.002 \cdot s \cdot \sigma_t^{0.5} \quad (\text{Eq 1.7})$$

dove σ_t è la resistenza specifica al taglio del materiale [MPa] ed s è lo spessore [mm].

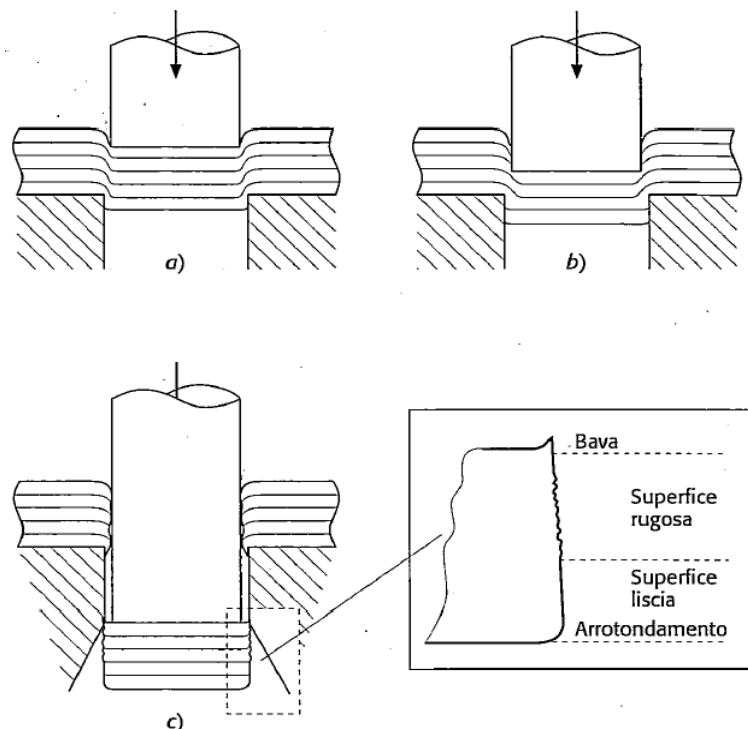


Figura 1.13: Fasi del processo di tranciatura: a) compressione; b) formazione della linea di frattura; c) distacco del tranciato (fonte [2]).

La Figura 1.13 illustra le varie fasi del processo di tranciatura. In una prima fase *a)* il punzone penetra nella lamiera provocando una deformazione della sua struttura fibrosa e la lamiera inizia a penetrare nella matrice; in questa fase, grazie alla struttura fibrosa, la lamiera si deforma, con arrotondamento dei bordi tranciati, nelle zone di contatto superiore con il punzone, e inferiore con la matrice. In una seconda fase *b)*, al raggiungimento della tensione di rottura a taglio del materiale, si genera una superficie di frattura che separa l' oggetto tranciato dal resto della lamiera.

Nella terza fase c) il punzone continua a spingere l' oggetto tranciato all' interno della matrice, finché esso non cade.

Questo processo provoca una geometria della sezione del tranciato diversa da quella teorica desiderata. Infatti, in corrispondenza di uno spigolo della sezione si ha una bava, mentre sull'altro si ha un arrotondamento. Inoltre la superficie laterale è caratterizzata da due zone: una *liscia*, a causa dello strisciamento sulle pareti del punzone (o della matrice), l'altra *rugosa* in quanto sede della frattura. Queste due zone sono ben riconoscibili anche a occhio nudo in un qualsiasi oggetto tranciato.

Questi aspetti geometrici del tranciato non influenzano normalmente le sue caratteristiche funzionali. Tuttavia i fenomeni di usura del punzone e della matrice, cioè arrotondamenti eccessivi degli spigoli taglienti e scheggiature dovute a fragilità del materiale, e un gioco eccessivo tra matrice e punzone , possono esasperare questi aspetti morfologici, fino a dover scartare il prodotto tranciato.

La forza di tranciatura, il cui calcolo è utile per la scelta della pressa e per la verifica di resistenza degli elementi dello stampo, non ha valore costante durante l' operazione, ma varia come riportato indicativamente nel grafico di Figura 1.14. La forza cresce fino alla formazione della superficie di frattura, poi decresce e per un certo tratto si mantiene costante, a causa dell' attrito che l' elemento tranciato trova nel suo scorrimento nella matrice.

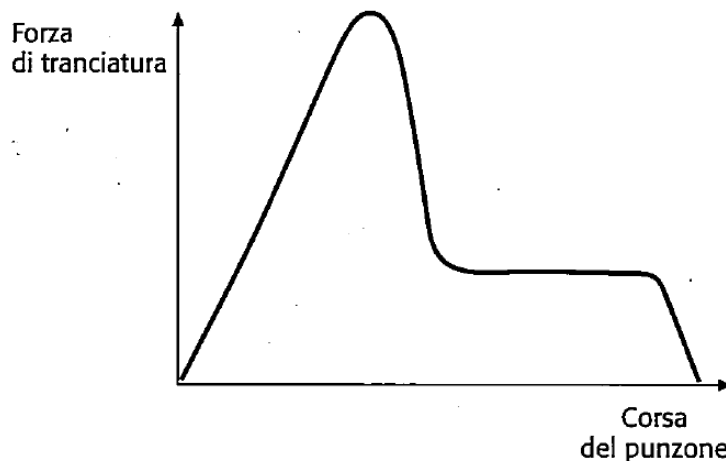


Figura 1.14: Andamento qualitativo della forza di tranciatura in funzione della corsa del punzone (fonte [2]).

Il valore massimo della **forza** può essere approssimativamente valutato con la seguente relazione:

$$P_{max} = l \cdot s \cdot \sigma_t \quad (\text{Eq 1.8})$$

dove l è il perimetro del contorno tranciato, s è lo spessore della lamiera, σ_t è la resistenza specifica a taglio, valutabile come:

$$\sigma_t = 4/5 \cdot R_m \quad (\text{Eq 1.9})$$

essendo R_m la resistenza a trazione del materiale.

In pratica è opportuno aumentare tale valore del 10 – 20%, per tenere conto di tutti gli attriti presenti nello stampo e dei fenomeni di usura che si manifestano con il progredire della produzione.

CAPITOLO 2

CASO AZIENDALE ASFO: DESCRIZIONE DEL PROCESSO DI FORMATURA A CALDO DELL' ANELLO FLANGIATO CH – 10337

2.1 Introduzione

Nello specifico il caso aziendale da noi trattato riguarda la produzione di un giunto meccanico utilizzato nella trasmissione del moto delle torri eoliche; si tratta di un anello flangiato costruito in acciaio al carbonio da Bonifica denominato WN 1.7225.

Lo scopo di questo progetto di tesi prevede la modellazione numerica del processo di formatura a caldo di questo componente, realizzato dalla ditta *ASFO spa*, sita a Chiuppano (VI).

Questa azienda vanta oltre 40 anni di esperienza nella produzione di anelli di vario tipo, soprattutto flangiati, tramite processi di *ring rolling*. I prodotti di *ASFO* possiedono una vasta gamma di dimensioni e vengono realizzati con una qualità tipica di un leader nel settore. Il gruppo Tecnologia Meccanica dalla facoltà di Ingegneria Gestionale dell'Università di Padova ha allacciato una collaborazione con la ditta *ASFO spa*, ai fini di sviluppare una collaborazione di ricerca nell'ambito degli elementi finiti ed introdurre questa metodologia di progettazione nella fase di *product engineering* dell'azienda.

Le simulazioni agli elementi finiti sono state effettuate con il *software Simufact.Forming*, attualmente alla *release* 9.0.1. Ai fini di tarare tale *software*, si è scelto assieme con *ASFO spa* il processo produttivo di un componente da poter modellare sul calcolatore, appunto la sopra citata flangia CH-10337, la cui sezione finale (dopo una lavorazione di sgrossatura successiva alla laminazione) è rappresentata in Figura 2.1.

Profilo di sgrossatura : (Giunto per trasmissioni eoliche)

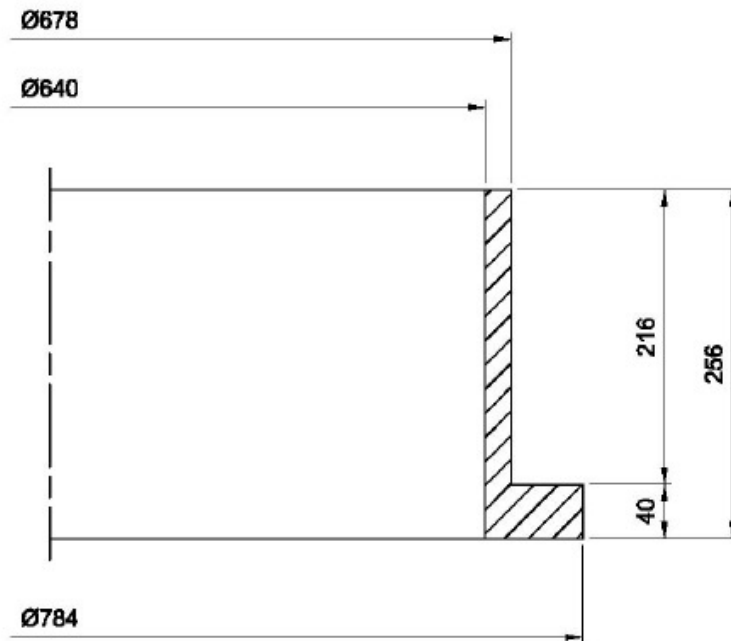


Figura 2.1: Sezione dell' anello flangiato CH-10337 oggetto dello studio (misure in mm).

Come già sopra citato 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*. La sua composizione chimica, per elementi di massima, risulta essere (analisi secondo norma (*EN 10083-1*)):

	C	Mn	Cr	Mo	S	Si	P
Da	0.40	0.60	0.90	0.15	-	-	-
A	0.45	0.90	1.20	0.30	0.035	0.40	0.025

Vediamo ora, grazie alle indicazioni forniteci dall' azienda, un elenco schematico delle varie le fasi di lavorazione da analizzare per la produzione del pezzo, dalla preparazione della preforma alla lavorazione del prodotto finale.

2.2 Pezzo iniziale

Dal reparto taglio della *ASFO spa*, vengono tagliate a freddo tramite sega circolare delle billette dell'altezza di 409 mm da una barra ottenuta in colata continua avente diametro 320 mm.

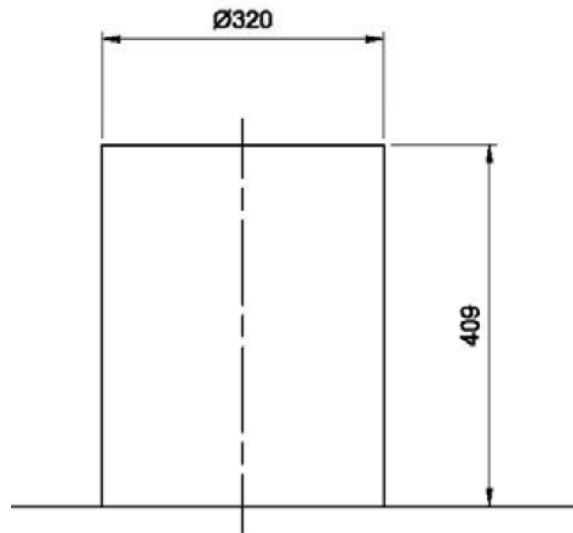


Figura 2.2: Billetta iniziale (misure in mm).

Questa billetta subisce successivamente un ciclo di riscaldamento di 14 ore in un ampio forno a metano (Figure 2.3), dove viene rigirata più volte per garantire una temperatura omogenea in tutto il pezzo. La temperatura finale della billetta è di 1240 °C e il grafico del ciclo di riscaldamento è riportato in Figura 2.4.



Figura 2.3: Il forno a metano presente in *ASFO spa*. Un carrello trilaterale di grosse dimensioni carica e scarica le billette dalla fornace (fonte [6]).

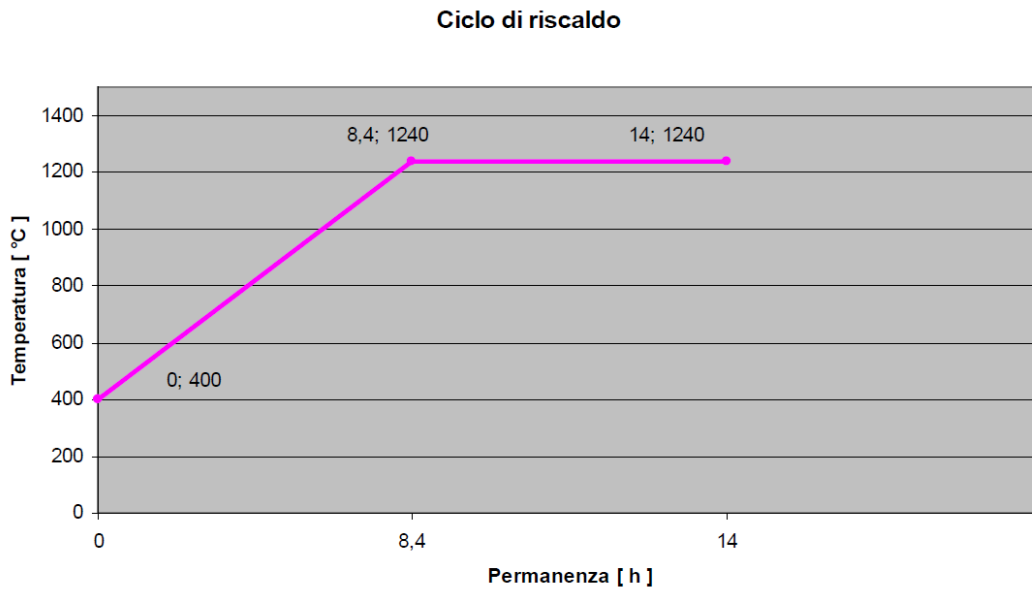


Figura 2.4: Grafico del ciclo di riscaldamento della billetta fino a 1240 °C.

2.3 Preparazione della preforma

2.3.1 Primo Upsetting

La billetta, alla temperatura di 1240 °C, è pronta per subire il processo di upsetting che la porterà all'altezza di 290 mm. Questa lavorazione viene compiuta su una pressa oleodinamica *MURARO*, modello *P1800*, dalla forza massima di 18000 kN. La lubrificazione è buona: sia le superfici degli impianti a diretto contatto con il pezzo, sia le attrezzature sono lubrificate con una miscela di olio e grafite che permettono un buon scorrimento/trascinamento del pezzo. Una raffigurazione del primo *step* è riportata in Figura 2.5.

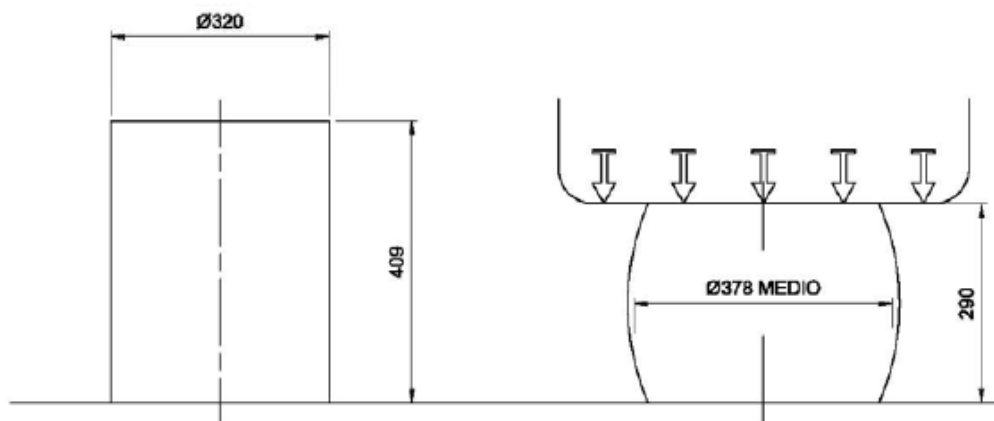


Figura 2.5: Raffigurazione schematica del processo di *upsetting* della billetta.

Come si può notare anche dalla figura soprastante, questo primo schiacciamento porterà la billetta a subire un “imbarilimento” (il fenomeno è spiegato nel Capitolo 1, paragrafo 1.3.3); si avrà inoltre una perdita di materiale dalla superficie del pezzo, la cosiddetta scaglia, pari a circa l’ 1% del suo volume iniziale (Figura 2.6).



Figura 2.6: Foto che rappresenta il momento della perdita della “scaglia” durante il primo upsetting.

2.3.2 Secondo Upsetting

La billetta deformata in uscita dal primo *step*, viene inserita nello stampo atto a dare la preforma. Questa operazione consiste nel ridurre leggermente in altezza il pezzo all’interno dello stampo (Figura 2.7), prima di essere forato con la spina (spinatura).

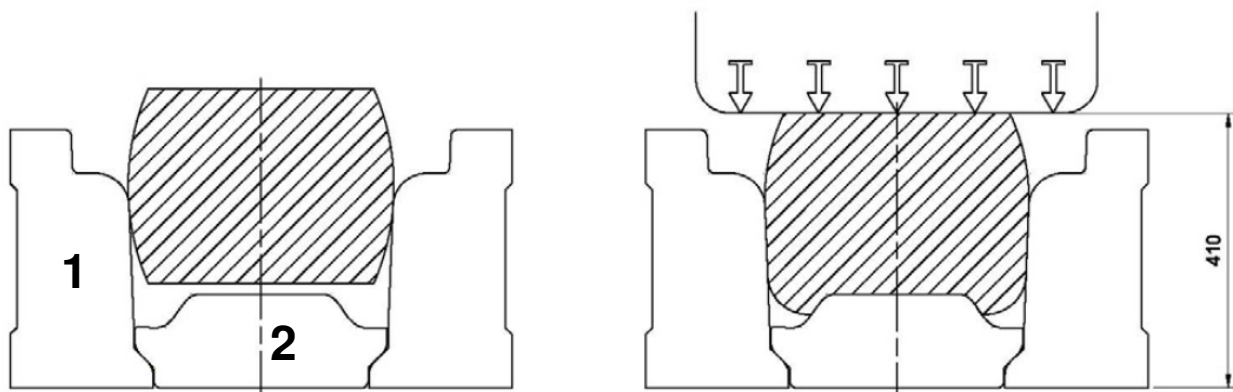


Figura 2.7: Secondo *upsetting* della billetta all’interno dello stampo.

La pressa utilizzata è la stessa del primo upsetting e anche le caratteristiche di lubrificazione sono le medesime. Questi parametri resteranno tali per tutte le lavorazioni riguardanti la preparazione della preforma.

Lo stampo, in 42CrMo4 e riscaldato fino a circa 400 °C prima dell' inizio della lavorazione, è composto da due pezzi:

- 1 Lo stampo laterale, avente un profilo con un raggio di 50 mm;
- 2 Il disco inferiore.

2.3.3 Spinatura

Una volta completato il processo di *upsetting* all'interno dello stampo, il piatto superiore della pressa viene alzato e sotto di esso viene inserita una spina tramite un braccio meccanico. La spina, realizzata in 30NiCrMoV94 e pre-riscaldata a 400 °C, viene pressata all'interno del pezzo, fino alla completa chiusura dello stampo (Figura 2.8).

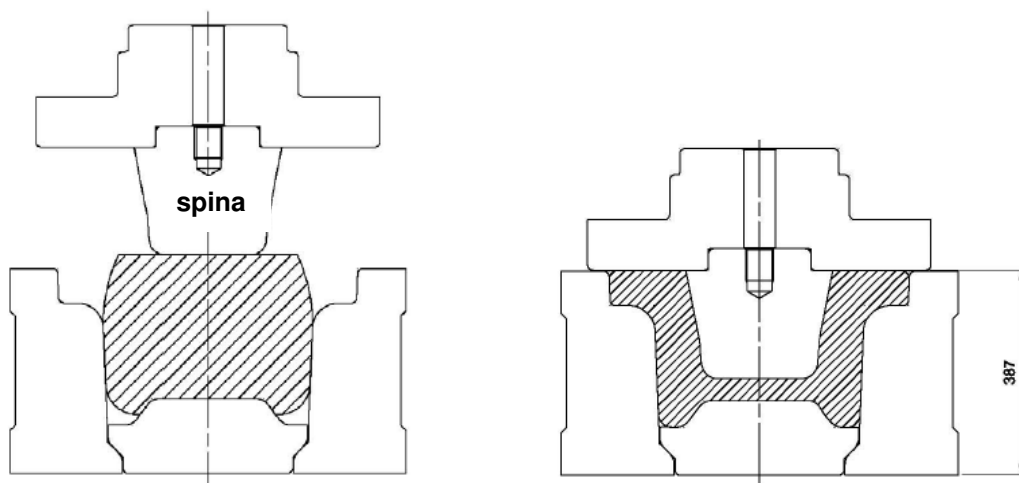


Figura 2.8: Rappresentazione schematica del processo di spinatura della billetta.

In realtà il processo di spinatura avviene in 2 step:

- in un primo momento viene effettuata solamente un' impronta sulla billetta per permettere l' applicazione di alcuni granelli di carbone, che fungono da lubrificanti, sulla superficie superiore del pezzo (Figura 2.9);
- a questo punto avviene la foratura vera e propria, con la spina che va in battuta sullo stampo.

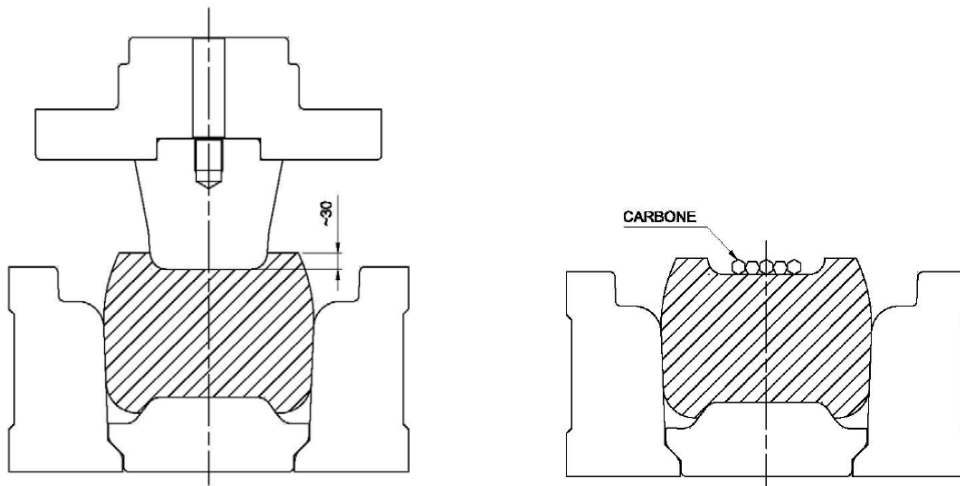


Figura 2.9: Improntatura della billetta per l' inserimento di granelli di carbone.

2.3.4 Tranciatura

Immediatamente dopo la fase di spinatura, il piatto inferiore di supporto della pressa trasla fino a porre il pezzo sotto una trancia a sezione circolare, che è un utensile integrato sul fianco della macchina. Prima della tranciatura, l'anello viene girato con la flangia verso il basso, per favorire l'eliminazione del fondello ed il centraggio del punzone senza rischiare di danneggiare il profilo interno (Figura 2.10).

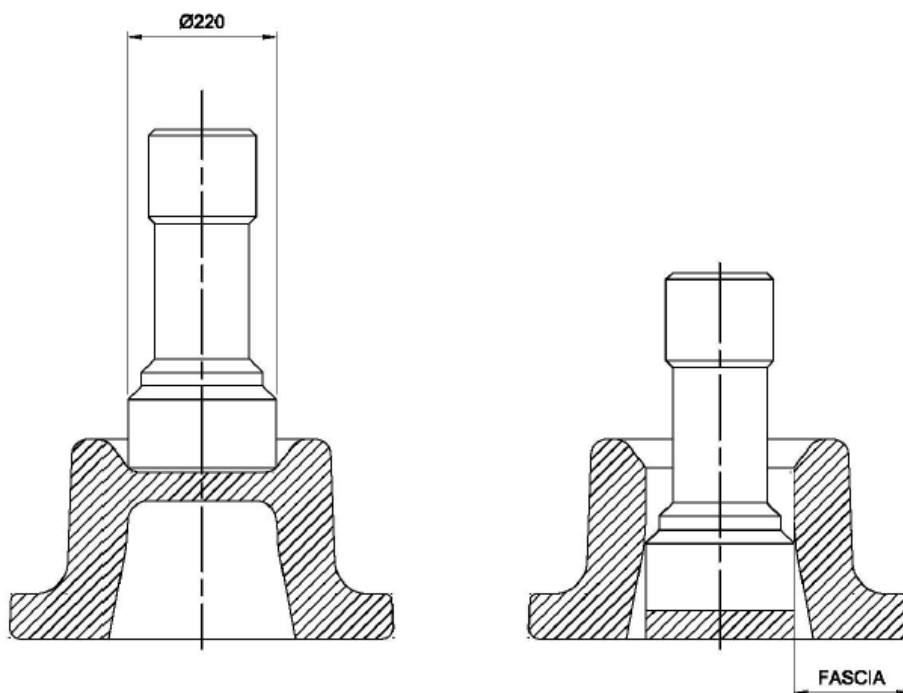


Figura 2.10: Schema del processo di tranciatura.

2.4 Preforma

Anche intuitivamente (comunque questo aspetto sarà esaminato in dettaglio nel capitolo 3 dedicato alle simulazioni) si può dedurre che il pezzo che si ottiene dopo la fase di tranciatura avrà una temperatura inferiore di quella della billetta iniziale; ciò è ovvio se si pensa che, a parte quello iniziale sopra citato, non sono previsti riscaldamenti intermedi tra le varie fasi di lavorazione, e che si devono considerare gli scambi termici con l'ambiente e con gli stampi (che come è già stato detto si trovano a 400 °C).

Per questo motivo l'anello preforma viene posto in forno per 60 minuti, per favorire una ripresa di temperatura fino a 1240 °C. Si inizierà, quindi, la laminazione con il pezzo esattamente a questa temperatura.

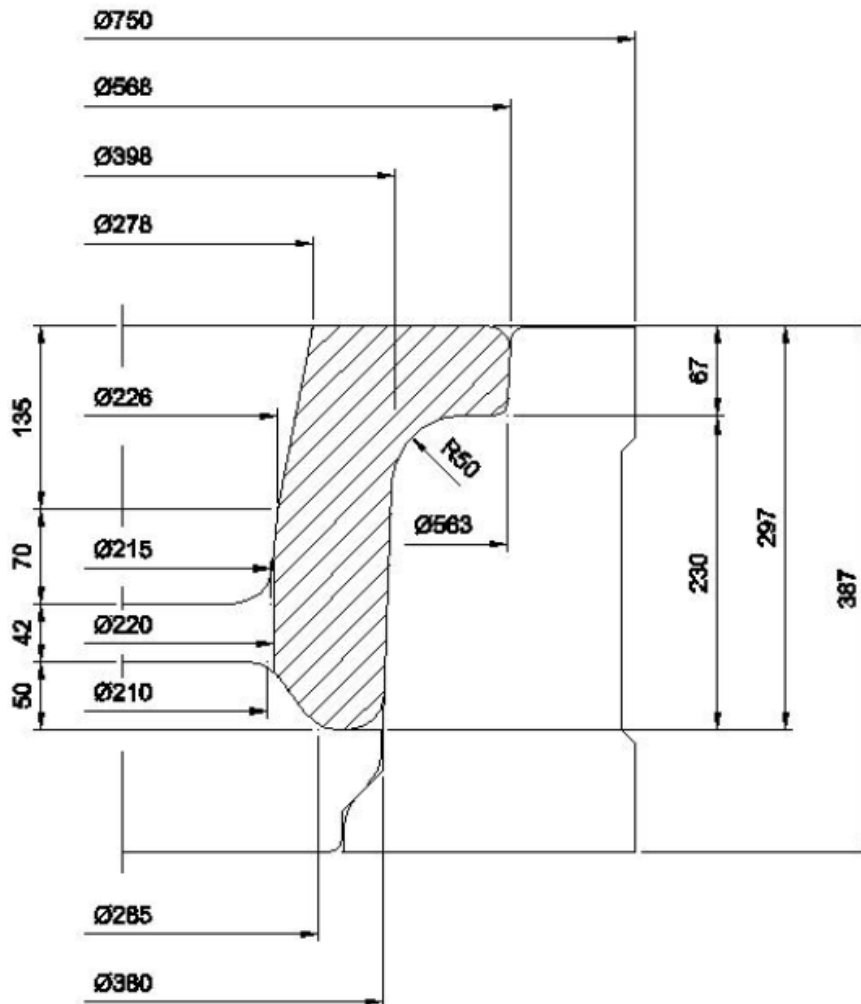


Figura 2.11: Sezione quotata della preforma ultimata.

2.5 Laminazione

La laminazione dell'anello in questione avviene esattamente come descritto all'inizio del Capitolo 1, tranne per il fatto che presso la *ASFO spa* per il caso in questione non sono stati utilizzati rulli di centratura. L'anello preforma, una volta estratto dal forno viene posizionato sui supporti del laminatoio grazie ad un carrello trilaterale. La macchina utilizzata per questa lavorazione di laminazione è un *Banning RAW 100/80*, avente una forza massima radiale di 1000 kN e assiale di 800 kN. Una volta che l'anello è in posizione, tramite un carro ponte viene calato il mandrino all'interno di esso ed agganciato con i supporti aventi cuscinetti a sfere. Al contempo, sull'asta motorizzata porta-sagome vengono infilati ed agganciati i vari dischi sagomati che compongono il rullo principale sagomato. Una volta che il sistema è in posizione, i coni assiali vengono inseriti a contatto con il pezzo. 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. Nella cabina di comando, un operatore monitora costantemente il processo in termini di forze, temperature e misure dei diametri, pronto ad intervenire manualmente qualora vi fosse necessità ad esempio di rallentare o velocizzare il processo. Il pezzo viene laminato fino a che il diametro esterno non raggiunga la dimensione desiderata, sapendo che tutte le altre misure sono correlate di conseguenza in base alla ripartizione del volume.

In Figura 2.12 e 2.13 sono riportate le principali curve di laminazione utilizzate, mentre in Figura 2.14 è visibile una ricostruzione schematica del processo.

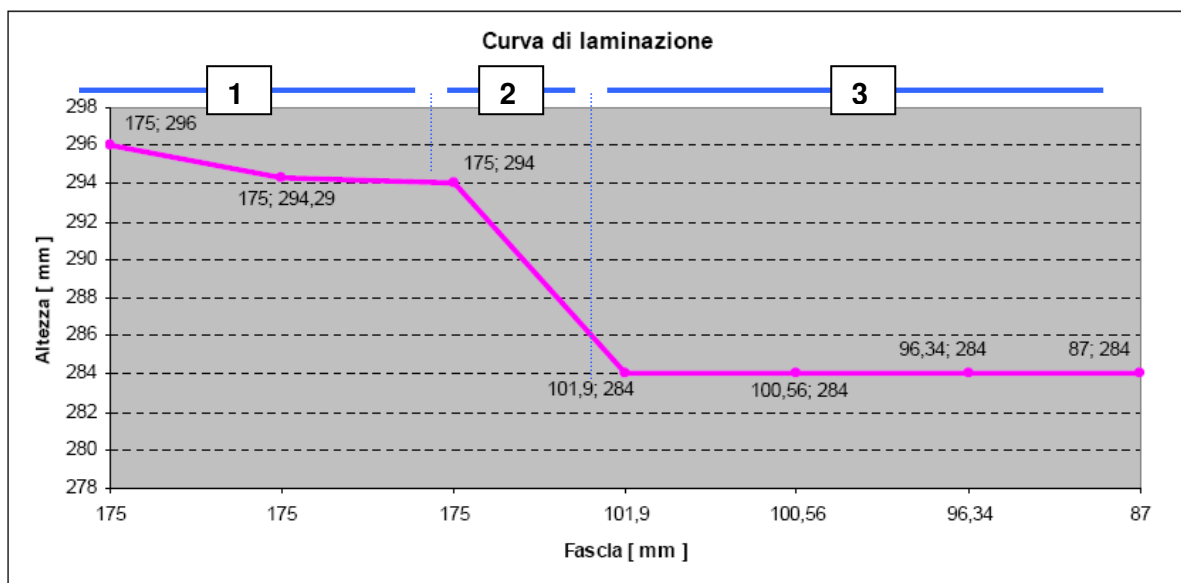


Figura 2.12: Curva di laminazione altezza in funzione della fascia (segnata in Figura 2.10).

Dal grafico precedente è possibile ricostruire il moto degli utensili nelle due principali direzioni di laminazione:

- **fase 1:** riduzione di 2 mm nella direzione assiale;
- **fase 2:** riduzione contemporanea dei due passi. L'altezza viene ridotta dai conigli di altri 10 mm, mentre si inizia a laminare in direzione radiale dove la fascia si riduce da 175 mm a 101.9 mm.
- **fase 3:** completa riduzione radiale. Il passo assiale non viene più ridotto, mentre la laminazione in direzione radiale prosegue dunque a parità di altezza portando la fascia a 87 mm.

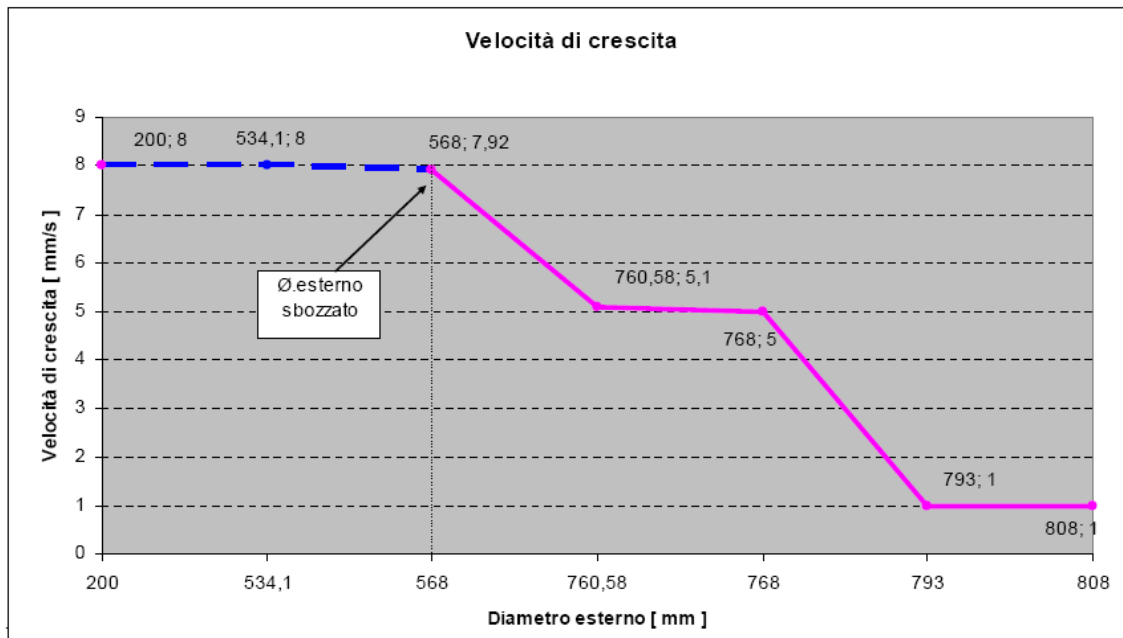


Figura 2.13: Curva di laminazione riportante le velocità di crescita del diametro in funzione del diametro esterno.

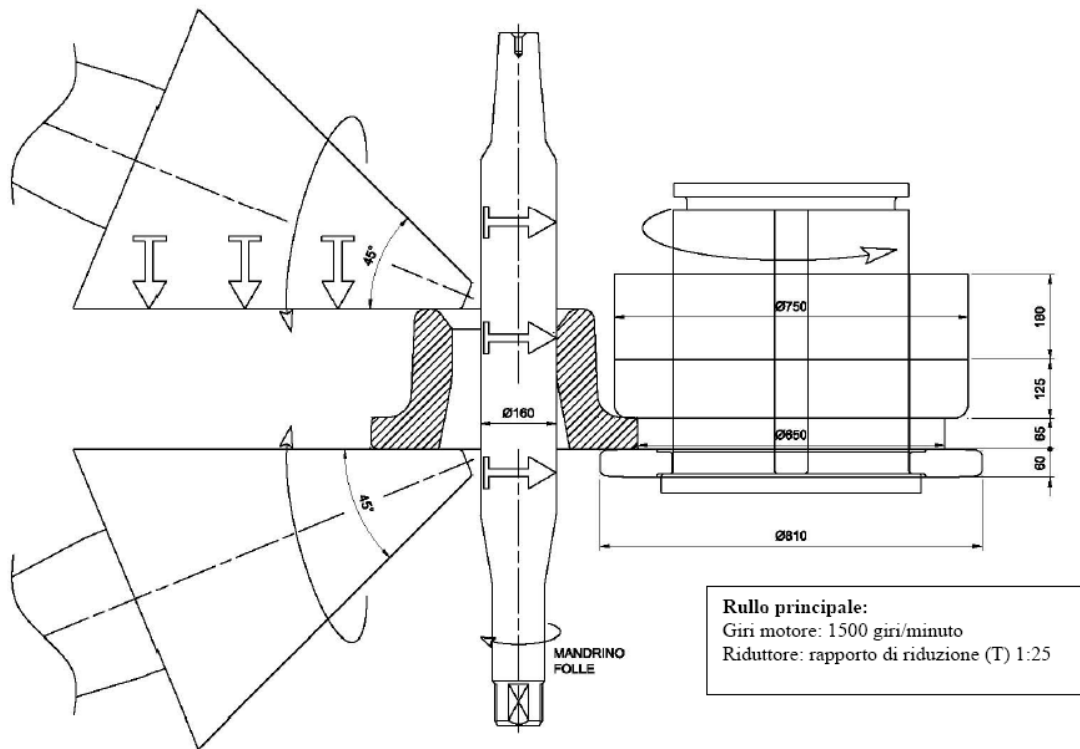


Figura 2.14: Riproduzione schematica del processo di laminazione della flangia CH-10337.

Il pezzo viene laminato fino a \varnothing_{est} 808 mm, \varnothing_{int} 634mm e altezza 284mm; queste dimensioni sono calcolate considerando la dilatazione termica del pezzo ad una temperatura di fine laminazione di 950 ± 10 [°C], più la successiva deformazione determinata dalla bonifica.

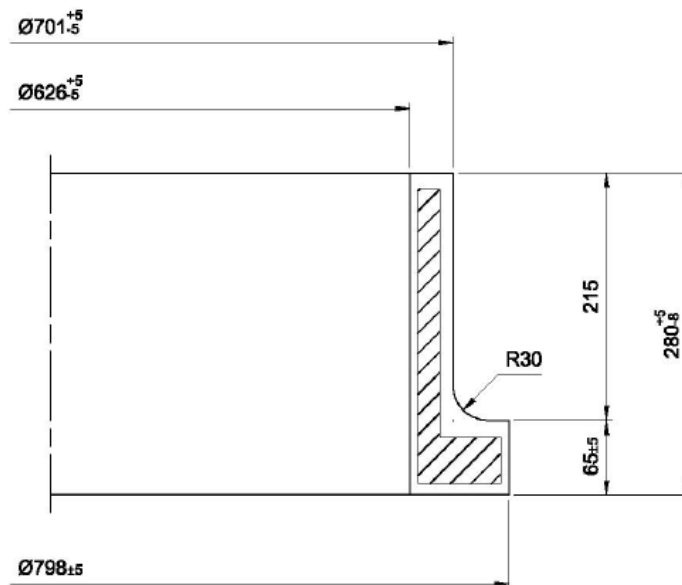


Figura 2.15: Profilo grezzo (prima della sgrossatura finale) a freddo dell'anello a laminazione ultimata.



Figura 2.16: Foto del componente CH-10337 a laminazione ultimata (ma prima della sgrossatura finale).

2.4 Pezzo finale

A questo punto, al pezzo che esce dal laminatoio (Figure 2.15 e 2.16), non resta che effettuare la sgrossatura finale che lo porterà ad essere l'anello flangiato CH-10337 cercato, la cui sezione quotata è rappresentata nella Figura 2.1 all' inizio del capitolo.

CAPITOLO 3

MODELLAZIONE NUMERICA DELLE FASI DI REALIZZAZIONE DELLA PREFORMA

3.1 Introduzione

Come già detto lo scopo di questo lavoro di tesi è quello di modellare numericamente il processo produttivo del prodotto in questione e il software da noi utilizzato è *Simufact.Forming 9.0.1*; si tratta di un programma per la simulazione di processi di formatura metallica a freddo e a caldo che si basa sul *metodo degli elementi finiti (FEM)*, un metodo numerico di calcolo che permette di approssimare i valori di una funzione qualsiasi in determinati punti.

Simulazioni di formatura metallica tramite il FEM è diventato comune negli anni ottanta, ma generalmente richiedeva una capacità di calcolo davvero notevole per quell'epoca.

Dalla seconda metà degli anni novanta, la rapida crescita della tecnologia informatica ha reso possibile modellare processi complessi anche su personal computers: le simulazioni al giorno d'oggi sono molto veloci, poco dispendiose e sufficientemente accurate.

Di conseguenza, questa soluzione viene comunemente adottata in tutte le aree della produzione, comprese la progettazione dei componenti, la progettazione dei processi produttivi, ottimizzazione dei trattamenti termici e superficiali.

Un modello può predire come un materiale si comporterà in un processo di laminazione, come riempirà uno stampo, come fluirà attraverso un processo di estrusione o come solidificherà in seguito ad una colata. Interi trattamenti termici possono essere simulati, compresi i processi di raffreddamento. I modelli possono anche predire la distribuzione delle deformazioni, le tensioni residue, la microstruttura e le proprietà finali in ogni locazione del componente lavorato. Tecniche avanzate di simulazione possono fornire una chiara comprensione del processo, eliminando costosi cicli di prove, errori e aggiustamenti in fase di sviluppo. In questo modo la progettazione del prodotto e i metodi di produzione possono essere ottimizzati in termini di qualità e affidabilità e al contempo ridurre i costi di produzione e i *lead time*. Se accoppiato con appropriati sensori, lo stesso modello può essere usato per determinare i tipi di aggiustamenti necessari per fornire un controllo collegato di processo.

In aggiunta, i modelli di processo possono essere utilizzati in laboratorio come strumenti per esplorare nuove idee o nuovi esperimenti.

E' importante notare, comunque, che l'accuratezza di un modello non po' mai essere superiore a quella propria delle variabili di input. Per esempio, modellando una operazione di formatura metallica, le proprietà meccaniche del materiale deformato (ad esempio tensione di snervamento, duttilità, ecc.) devono essere conosciute per delle specifiche condizioni di temperatura, quantità e velocità di deformazione prese in considerazione.

La descrizione matematica del comportamento di un materiale in funzione delle condizioni di processo è conosciuta come *relazione costitutiva*.

Lo sviluppo di tali relazioni non è comunque un compito facile, soprattutto a causa del fatto che lo stesso materiale può rispondere in maniera diversa alle stesse condizioni se la sua microstruttura è anche solo leggermente differente: la microstruttura e i suoi effetti sulle proprietà sono difatti difficili da descrivere in termini quantitativi tali che possano essere utilizzati da un calcolatore.

Un'altra variabile piuttosto problematica è l'attrito tra gli utensili e il pezzo in lavorazione.

Molti studi hanno dimostrato che il valore dell'attrito dipende da molti fattori:

- Pressione di contatto tra utensili e pezzo;
- Area di contatto;
- Finitura superficiale;
- Lubrificante;
- Velocità di lavorazione;
- Proprietà meccaniche dei materiali.

Sappiamo che questi parametri molto spesso variano da locazione a locazione e inoltre cambiano con il tempo durante il processo, ma molti modelli tendono a descrivere l'attrito con una singola variabile di valore costante. Qualsiasi variazione in termini di tempo e locazione è quindi semplicemente ignorata in favore di una semplicità matematica e computazionale, oppure semplicemente perché non si dispone di migliori informazioni.

A prima vista, problemi come quelli appena discussi sembrano rappresentare un ostacolo significativo all'utilizzo di modelli matematici.

E' da notare, comunque, che gli stessi problemi vengono affrontati anche nel caso in cui si stia percorrendo l'analisi in via sperimentale in laboratorio mediante una serie di esperimenti reali. La modellazione di processo spesso rivela aspetti che altrimenti potrebbero passare inosservati, mentre sono invece di utilità ai fini di eliminare difetti, ottimizzare le performance o estendere un processo verso un'area sconosciuta.

Qui di seguito sarà ora proposta la modellazione numerica in ambiente *Simufact Forming* di tutte le fasi di preparazione della preforma del componente flangiato CH-10337, pianificate e descritte nel capitolo 2.

3.2 Pezzo Iniziale

Grazie agli strumenti di semplice modellazione solida propri del *software*, è stato possibile creare la billetta di partenza (vedi paragrafo 2.2). Questa, che si trova a temperatura ambiente, viene innanzitutto riscaldata in forno fino a una temperatura di 1240 °C; è stata simulata questa operazione grazie alla funzione *Heat Up* di *Simufact Forming*: inserendo come dati di input la le temperature iniziale e finale del pezzo e il coefficiente di dilatazione termica del materiale di cui è composto è stata ottenuta la billetta riscaldata con le sue “nuove” dimensioni (Figura 3.1).

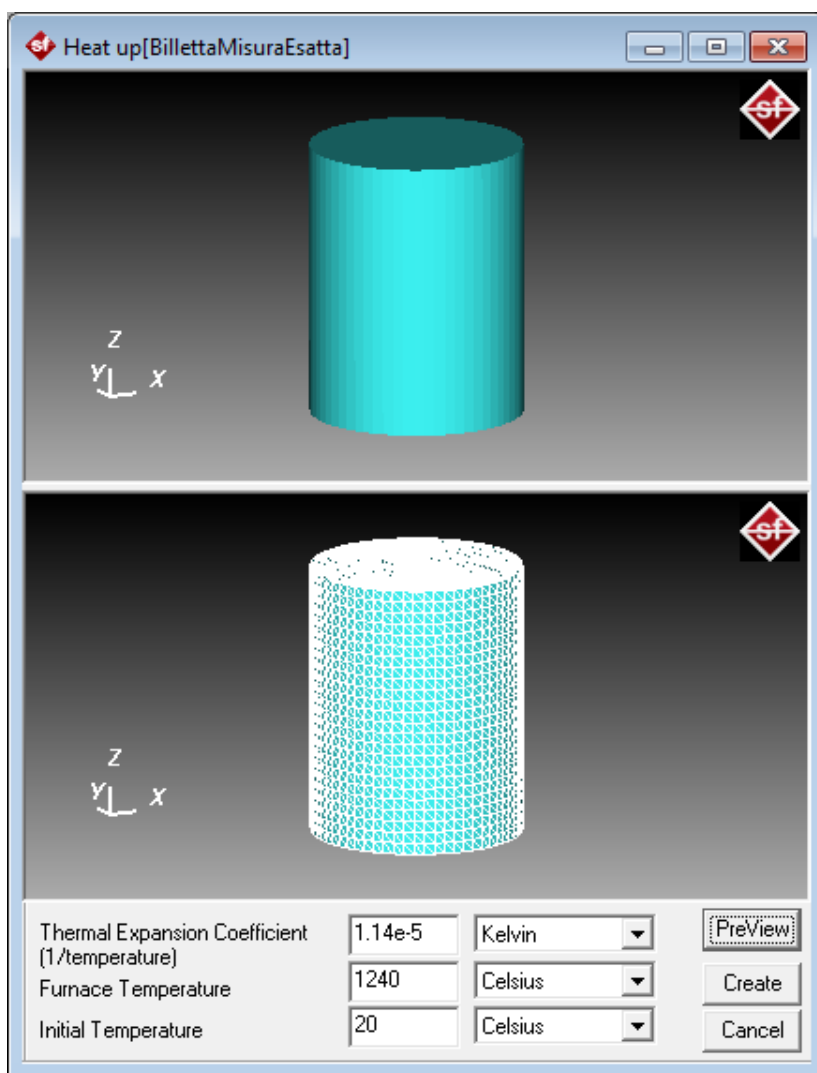


Figura 3.1: Rappresentazione in ambiente *Simufact Forming* del riscaldamento (*Heat up*) della billetta.

Sopra: billetta a temperatura ambiente (20 °C).

Sotto: billetta riscaldata fino a 1240 °C.

Coefficiente di espansione

termica del 42CrMo4: $c = 1.14 \cdot 10^{-5}$ 1/Kelvin (o indifferentemente 1/°C)

Billetta prima del riscaldamento: $\Phi = 320$ mm
 $h = 409$ mm
Volume = $3.28409 \cdot 10^7$ mm³
Temperatura = 20 °C (temperatura ambiente)

Billetta dopo il riscaldamento: $\Phi = 322.454$ mm
 $h = 412.136$ mm
Volume = $3.36022 \cdot 10^7$ mm³
Temperatura = 1240 °C

3.3 Primo Upsetting

Avendo a disposizione tutti i dati di input dal paragrafo 2.3.1, possiamo ora a modellare il primo upsetting in *Simufact.Forming*. Ai fini di minimizzare i tempi di calcolo, si è scelto, per tutto il processo di lavorazione della preforma, di effettuare le simulazioni in due dimensioni, essendo le geometrie di questi step assialsimmetriche.

Di seguito viene riportato il procedimento seguito per la modellazione del primo *step* e più in generale, a parte qualche piccola modifica caso per caso, per la realizzazione dell' "albero di processo" di tutte le fasi di lavorazione della preforma.

- 1 Workpiece, Upper Die, Lower Die.** Nella sezione *workpiece* è stata importata la billetta riscaldata a 1240 °C appena creata mentre come stampi sono stati utilizzati un piatto 2500x1500x250 [mm] (*lower die*) e uno 2200x1800x250 [mm] (*upper die*) realizzati con gli strumenti di modellazione solida propri del software; prima di implementarli nel processo, sono stati resi deformabili ed è stata applicata ad essi la funzione *Heat Up* in quanto durante la lavorazione devono trovarsi a 400 °C. Una volta posizionato il pezzo all' interno degli stampi, è stato definito un asse per la simmetria rotazionale (quello proprio del pezzo), in modo tale da definire una sezione per la simulazione in 2D. La sezione di *workpiece* è stata quindi discretizzata utilizzando una *mesh* dalla taglia di 7 mm, generando

1357 elementi. . Si è resa necessaria anche la discretizzazione dei piatti, in quanto è stato preso in considerazione lo scambio termico tra essi ed il pezzo.

- 2 Pressa.** È stata poi modellata la pressa virtuale idraulica, a cui sono state attribuite le caratteristiche della pressa utilizzata in produzione (velocità pari a 20 mm/s e un limite di forza di 18000 kN). In base alle altezze è stata calcolata una corsa di 122.136 mm verso il basso per il piatto superiore reso mobile.
- 3 Materiale.** All'interno del database del programma è stato individuato l'esatto materiale con cui si intende lavorare il componente flangiato ed associato al modello della billetta. Per gli acciai dei piatti è stato selezionato un acciaio *H13* (coefficiente di espansione termica $c = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$), tipicamente usato per la produzione di utensili.
- 4 Lubrificante (friction).** Come indicato dall'azienda il processo di *upsetting* viene lubrificato con una miscela di olio e grafite, per limitare il fenomeno di imbarilimento. Per simulare questa situazione, alle interfacce tra pezzo e stampi è stata selezionata l'opzione *DB.steel-hot-good* della sezione *Friction* ed è stato attribuito un coefficiente d'attrito coulombiano pari a 0.15.

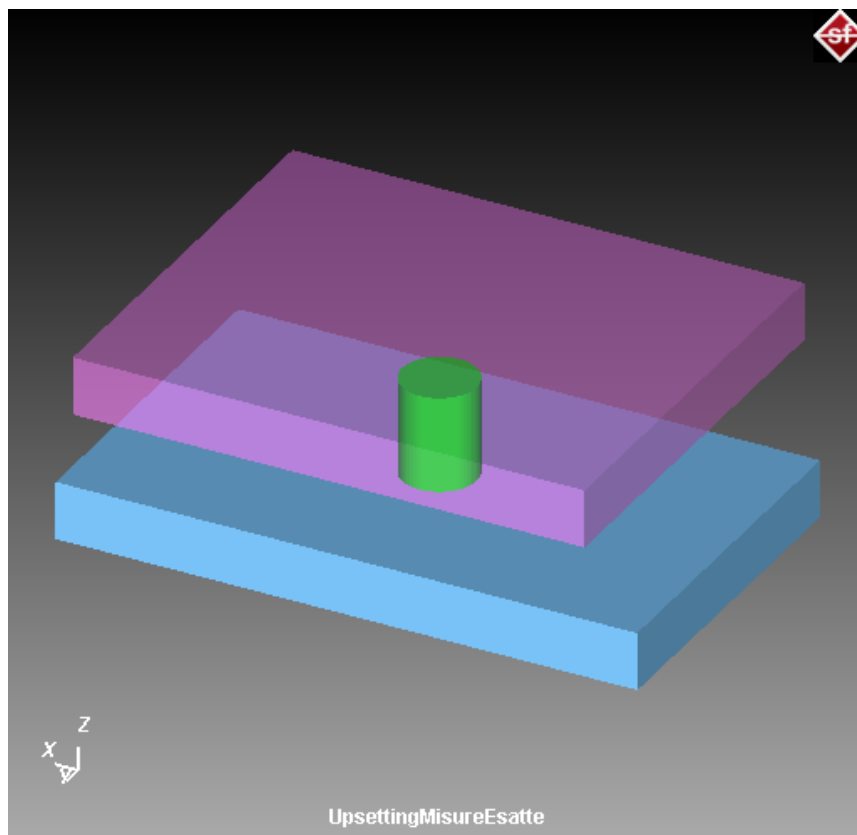


Figura 3.2: Modellazione geometrica del processo di *upsetting*. In viola e blu i piatti della pressa, in verde la billetta.

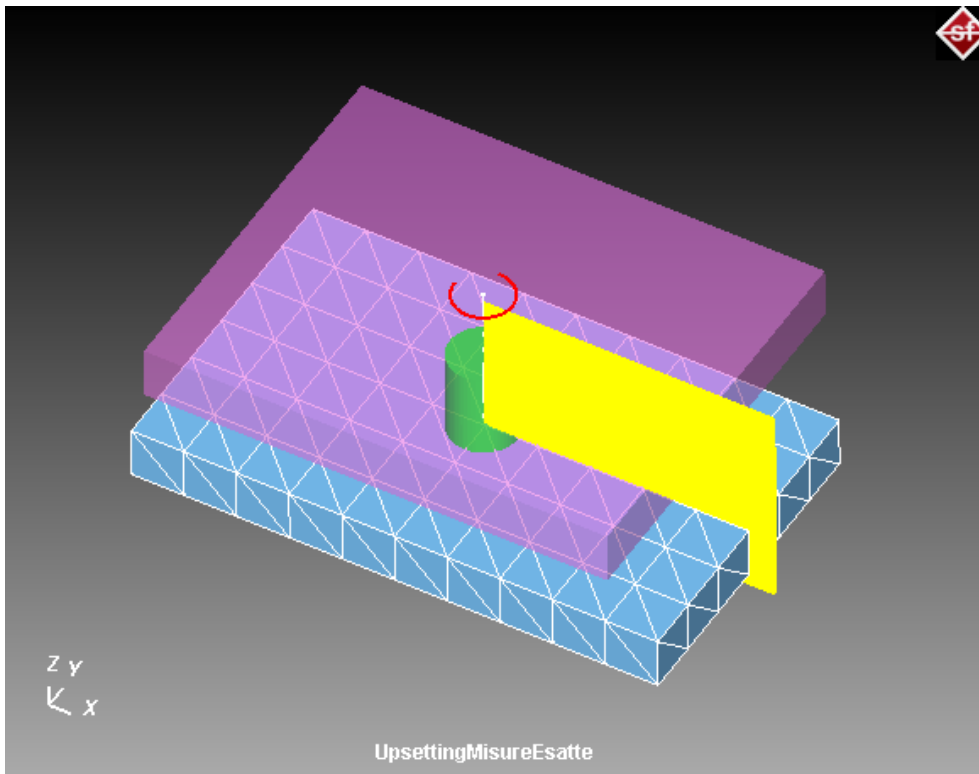


Figura 3.3: Generazione dell'asse di simmetria e del piano bidimensionale di lavoro.

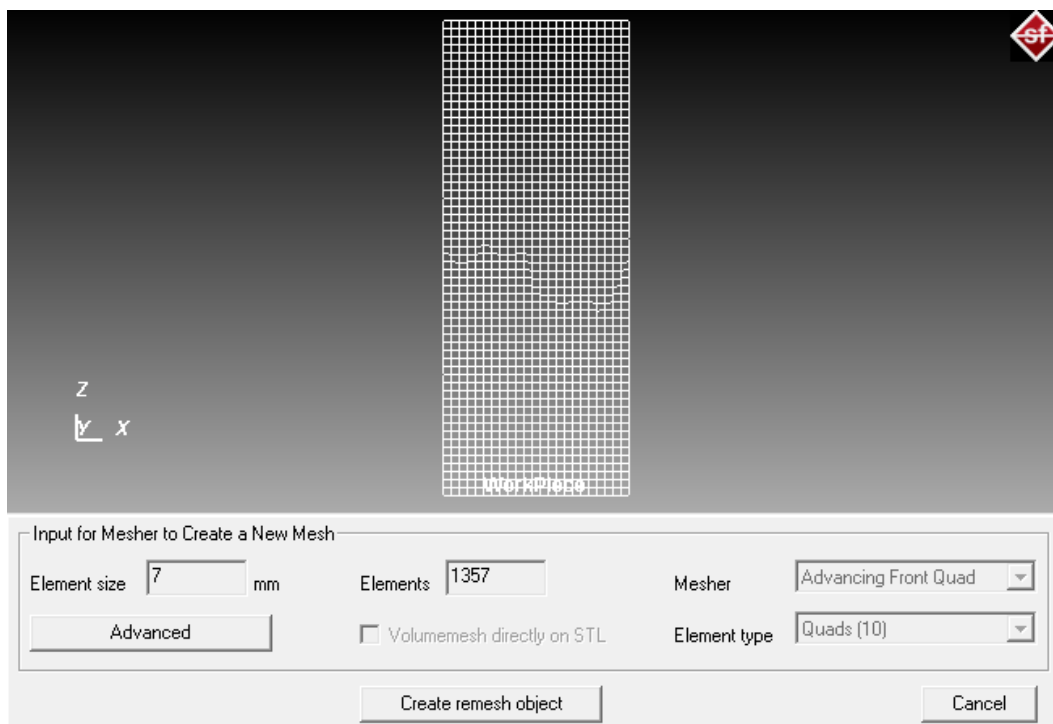


Figura 3.4: Generazione della *mesh* della sezione. Sono stati generati 1357 elementi con una taglia di 7 mm, utilizzando come *mesher Advancing Front Quad*.

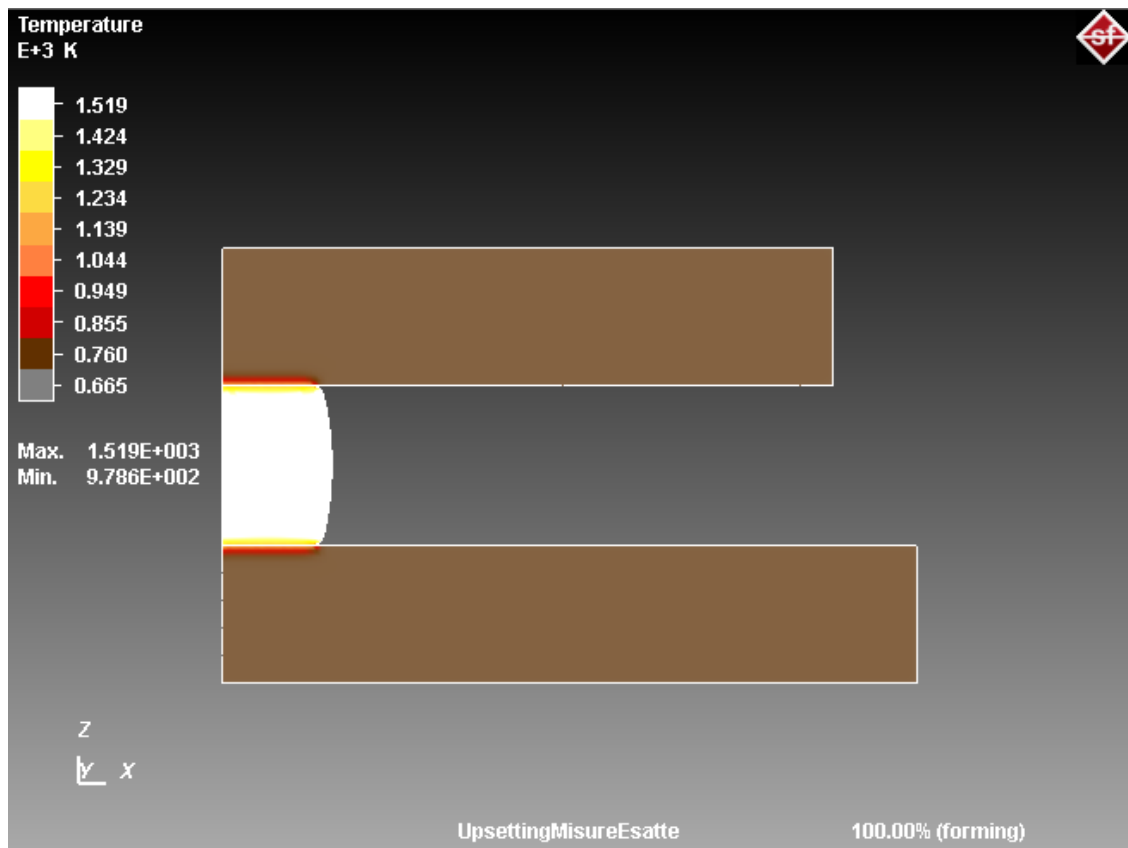


Figura 3.5: Profili di temperatura dopo il processo di *upsetting* (temperature in Kelvin).

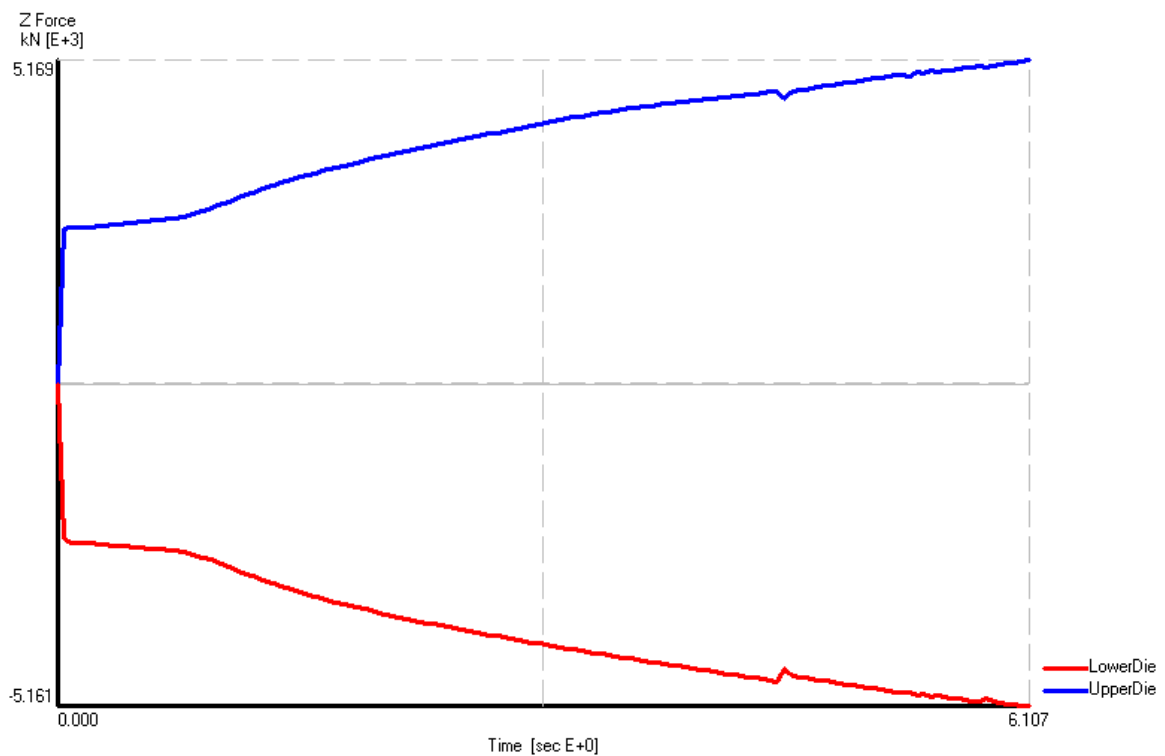


Figura 3.6: Profili delle forze sul piatto inferiore e superiore, espresse in *kN*.

Dalle Figure 3.5 e 3.7 si può notare la geometria della billetta pressata, con una forma a barile come ci si aspettava. Sono inoltre visibili i risultati dello scambio termico tra il pezzo e gli stampi. Si può rilevare come il volume del pezzo dopo l'upsetting risulti pari a $3.34704 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$ e quindi leggermente minore di quello prima della lavorazione; ciò, considerando che il programma non è in grado di simulare la perdita della *scaglia*, si può imputare al fatto che scambiando calore con gli stampi a $400 \text{ }^\circ\text{C}$ il pezzo si sarà leggermente raffreddato rispetto ai $1240 \text{ }^\circ\text{C}$ iniziali, diminuendo così il proprio volume.

In Figura 3.6 sono invece rappresentati i profili delle forze sul piatto inferiore e superiore, espressi in kN; si può notare che la forza richiesta per questo processo raggiunge un valore massimo di 5169 kN, che risulta largamente sostenibile dalla pressa a disposizione.

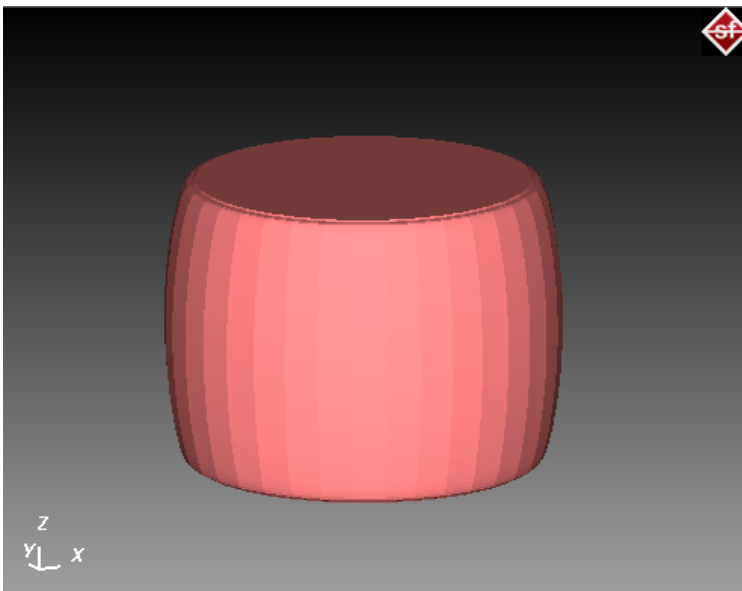


Figura 3.7: Billetta con forma a “barile” dopo il processo di *upsetting*.

$\Phi \text{ min} \cong 336.3 \text{ mm}$

$\Phi \text{ max} \cong 397.1 \text{ mm}$

$h \cong 290.2 \text{ mm}$

$\text{Vol} = 3.34704 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$

3.4 Secondo Upsetting

Nella costruzione dell' "albero di processo" del *secondo upsetting* i punti 2, 3, 4 del procedimento dello step precedente rimangono invariati mentre ciò che varia sono le impostazioni riguardanti gli stampi e il pezzo da lavorare.

In questo caso, infatti, come stampo superiore mobile è stato creato un piatto 2500x1500x250 [mm], mentre lo stampo inferiore fisso, grazie ai *file CAD*, è stato possibile riprodurlo in ambiente *Pro-Engineer*, esportando il file tridimensionale in formato *STL*; è stato infine possibile importarlo all'interno di *Simufact.Forming*. Per entrambi gli stampi, anche in questo caso, è stato simulato un preriscaldamento a 400 °C.

Per quanto riguarda il pezzo in fase di formatura (*workpiece*), è stata importata la geometria ottenuta dal primo *upsetting* (Figura 3.7), completa di profili termici, tensioni residue, ecc.

A questo punto gli stampi e il pezzo da lavorare sono stati posizionati come descritto nel paragrafo 2.3.2, è stato definito l'asse per la simmetria rotazionale (per definire la sezione per la simulazione 2D). Successivamente le sezioni di upper die, lower die e workpiece sono state discretizzate ed è stato lanciato il processo di simulazione.

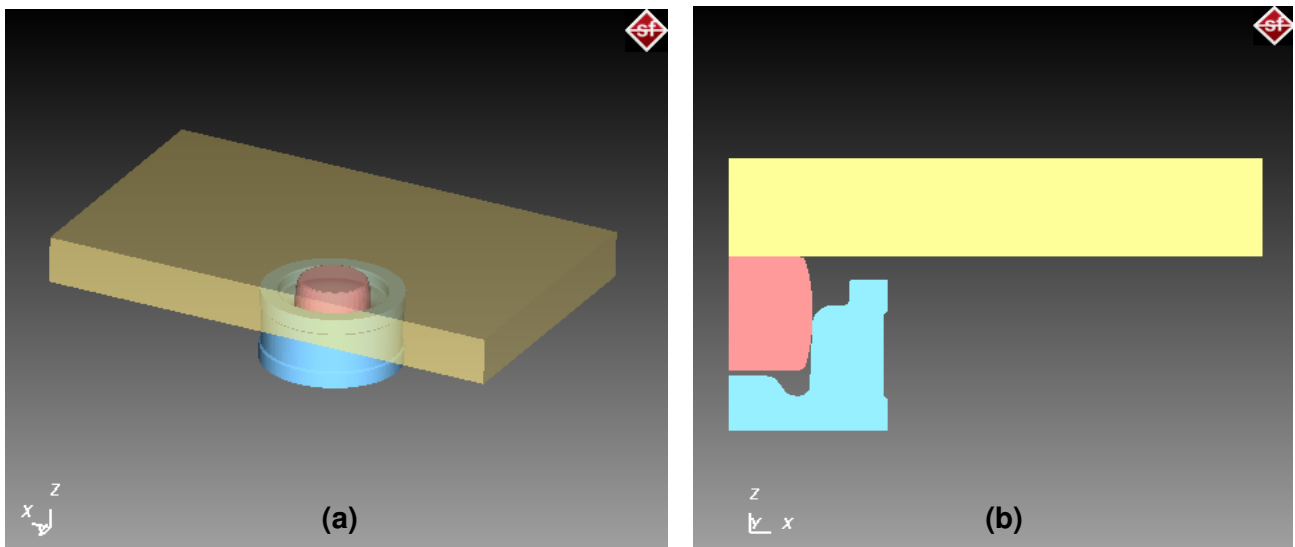


Figura 3.8: Modellazione tridimensionale (a) e bidimensionale (b) del secondo processo di upsetting. In giallo il piatto della pressa, in blu lo stampo e in rosso la billetta.

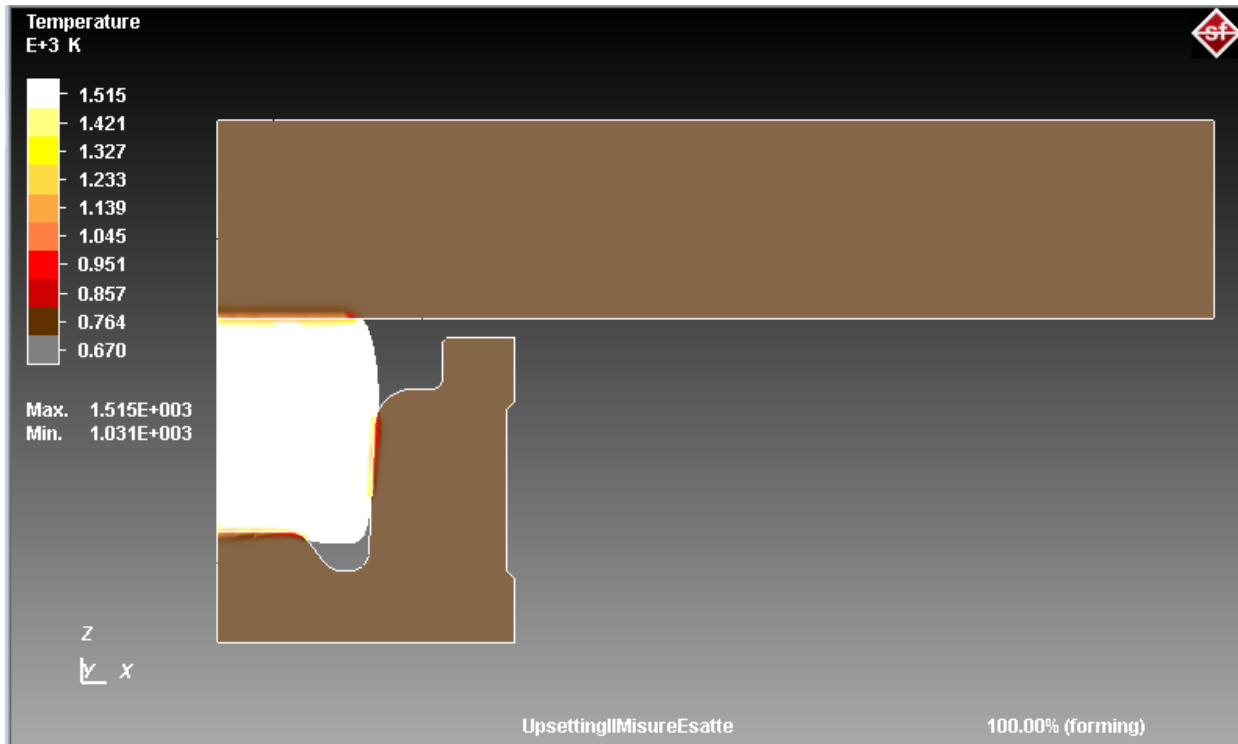


Figura 3.9: Profili di temperatura dopo il secondo processo di upsetting (temperature in Kelvin). La corsa del piatto superiore è stata calcolata e impostata a 35,39847 mm.

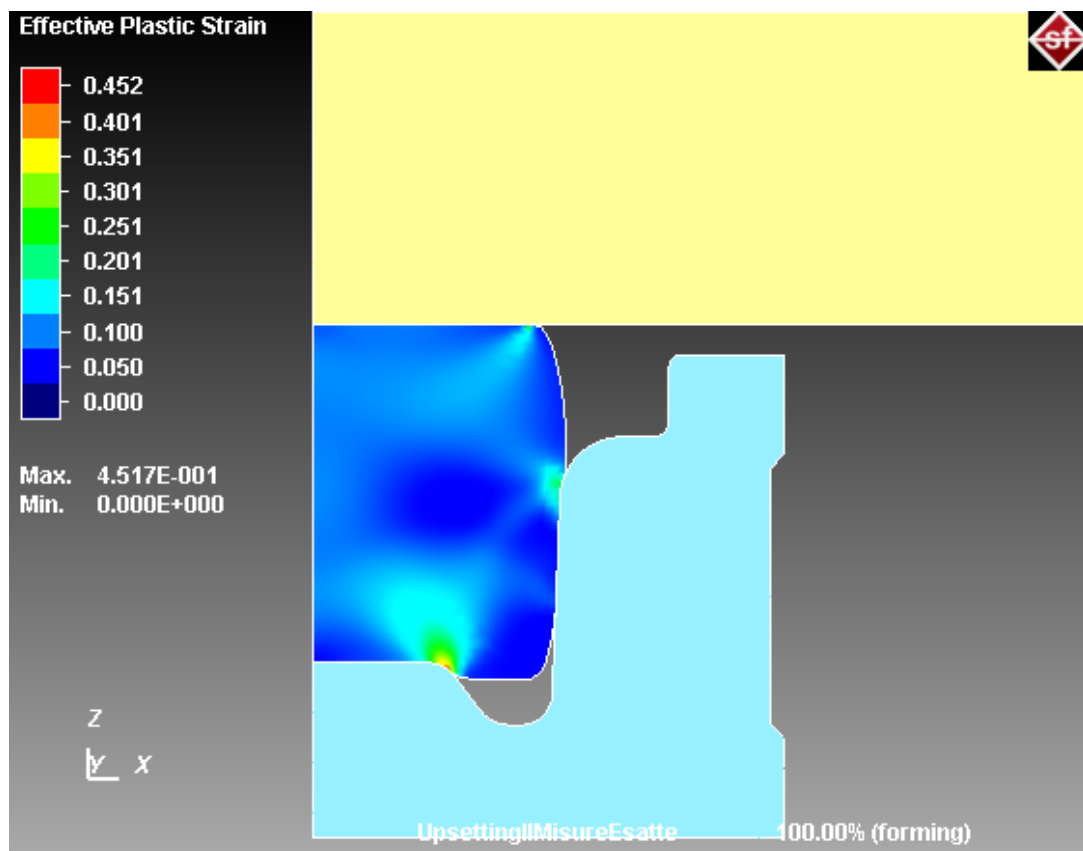


Figura 3.10: Mappa di deformazione plastica (*Effective Plastic Strain*) della billetta alla fine del secondo processo di upsetting.

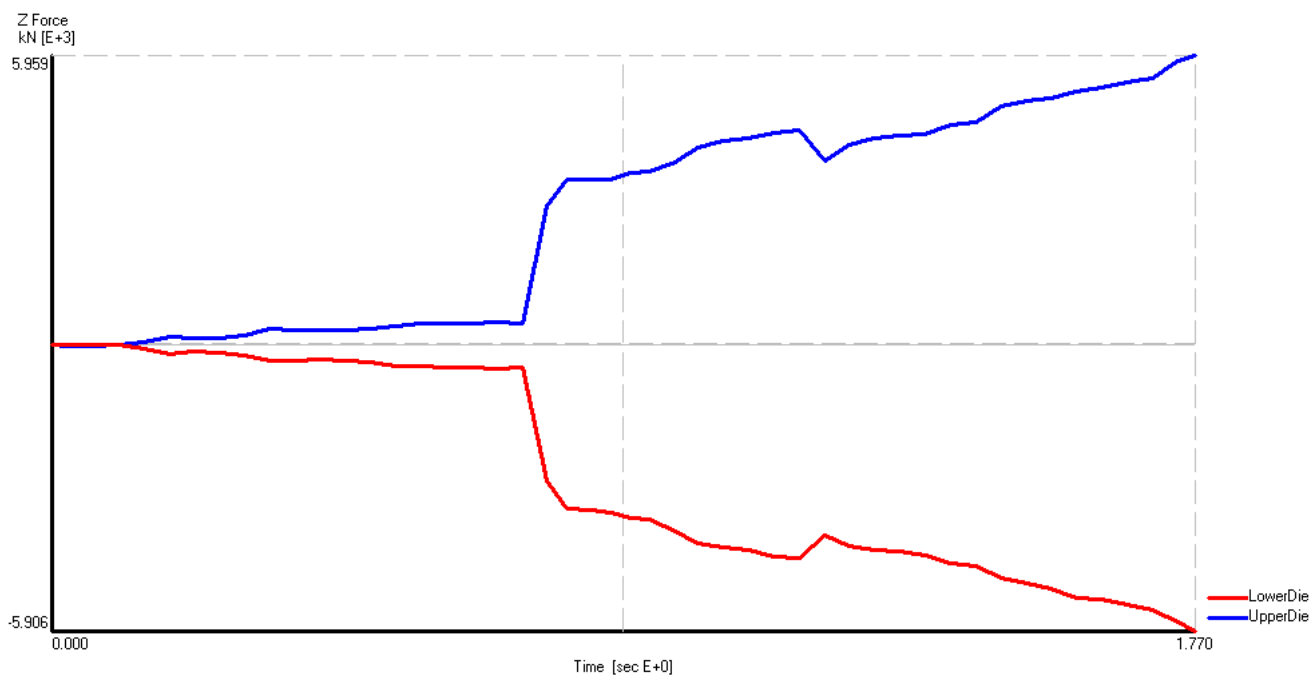


Figura 3.11: Profili delle forze sullo stampo inferiore e sul piatto superiore, espresse in kN.

Dal grafico soprastante si evince che anche il secondo upsetting, in termini di forza richiesta, è realizzabile. La forza sugli stampi raggiunge, infatti, un valore massimo di circa 6000 kN, pari a circa un terzo della capacità della pressa usata.

Il pezzo che si ottiene al termine del processo appena descritto viene lasciato all' interno dello stampo inferiore, mentre il piatto superiore mobile viene sostituito con la spina per procedere con la lavorazione successiva.

3.5 Spinatura

Nel modello virtuale della spinatura *workpiece* e *lower die* sono stati importati direttamente dai risultati del processo precedente, mentre per quanto riguarda la spina, è stata prima ricreata su *Pro-Engineer* sulla base delle indicazioni dell' azienda e dei file CAD a disposizione, e successivamente importata in *Simufact Forming*, assegnandole come materiale l' acciaio *H13* usato anche per lo stampo.

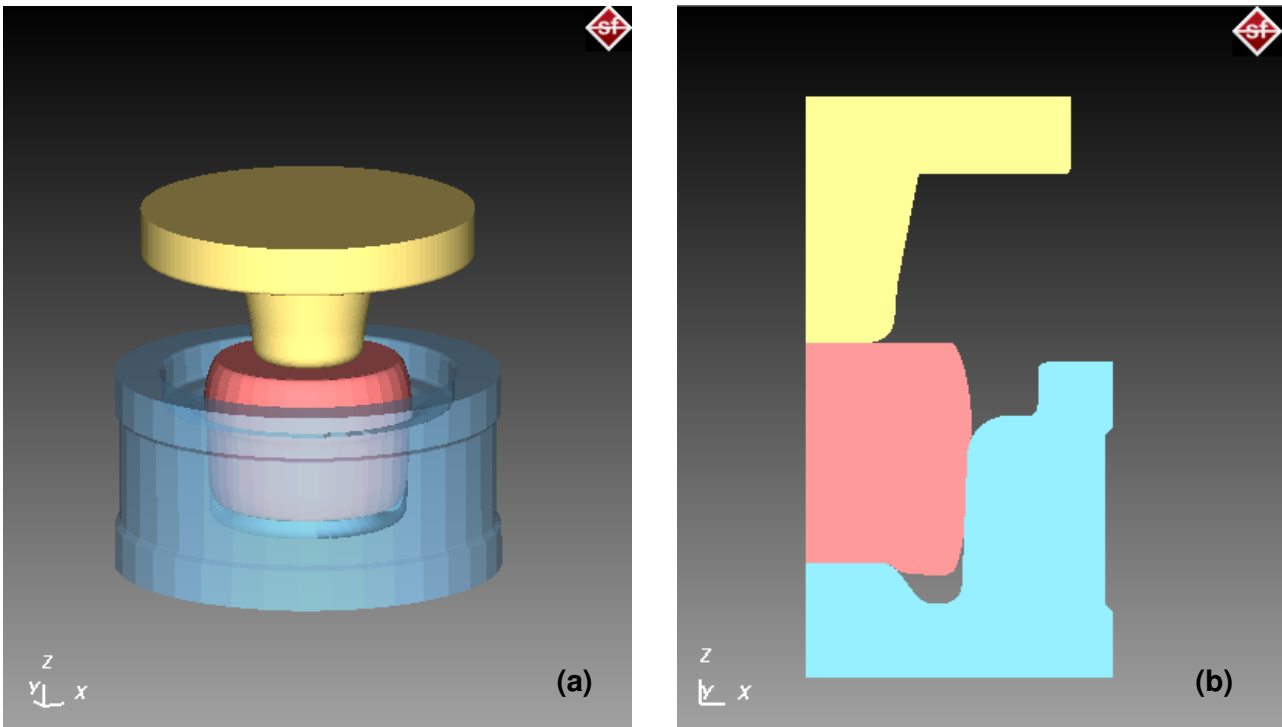


Figura 3.12: Modellazione 3D (a) e 2D (b) del processo di spinatura. In giallo la spina della pressa, in blu lo stampo e in rosso il pezzo da lavorare.

Come è descritto nel Capitolo 2 la spinatura nella realtà avviene in 2 fasi per permettere la lubrificazione tramite granelli di carbone, ma nel nostro caso le caratteristiche di lubrificazione sono state riprodotte tramite particolari opzioni presenti nel programma (vedi il punto 4 del paragrafo 3.3) e il processo simulato in un' unica fase.

Particolare importanza, in questa lavorazione, ha assunto il limite di forza della pressa (18000 kN) in quanto si può notare come, in presenza di questo vincolo, la spina non vada in battuta sullo stampo inferiore e quindi il riempimento risulti incompleto.

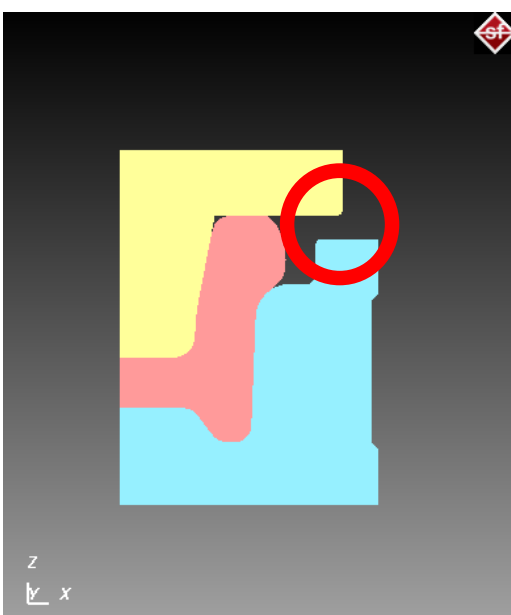


Figura 3.13: Fine del processo di spinatura con il limite di forza della pressa impostato a 18000 kN; si può notare come la spina non vada in battuta sullo stampo.

A questo punto è stato scelto di procedere modellando un altro processo di spinatura analogo al precedente, se non nell' omissione del vincolo che limita la forza della pressa.

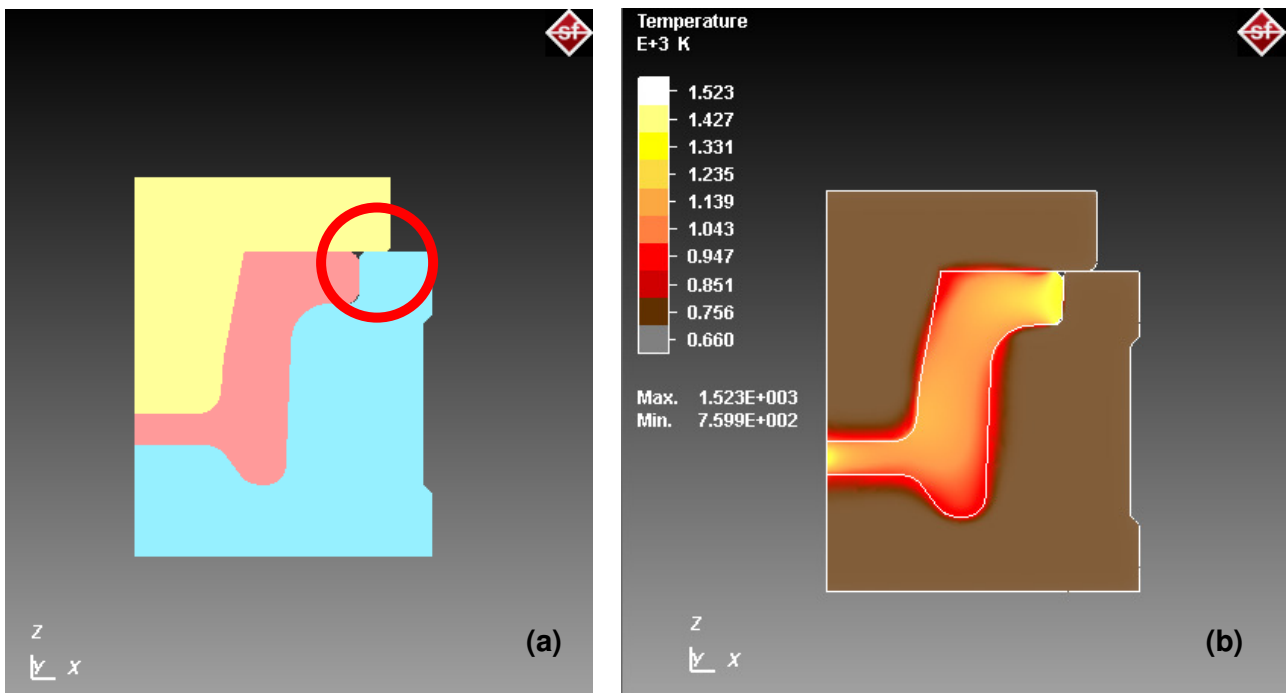


Figura 3.14: Fine del processo di spinatura senza alcun vincolo di forza. In (b) sono visibili anche i profili di temperatura (in Kelvin).

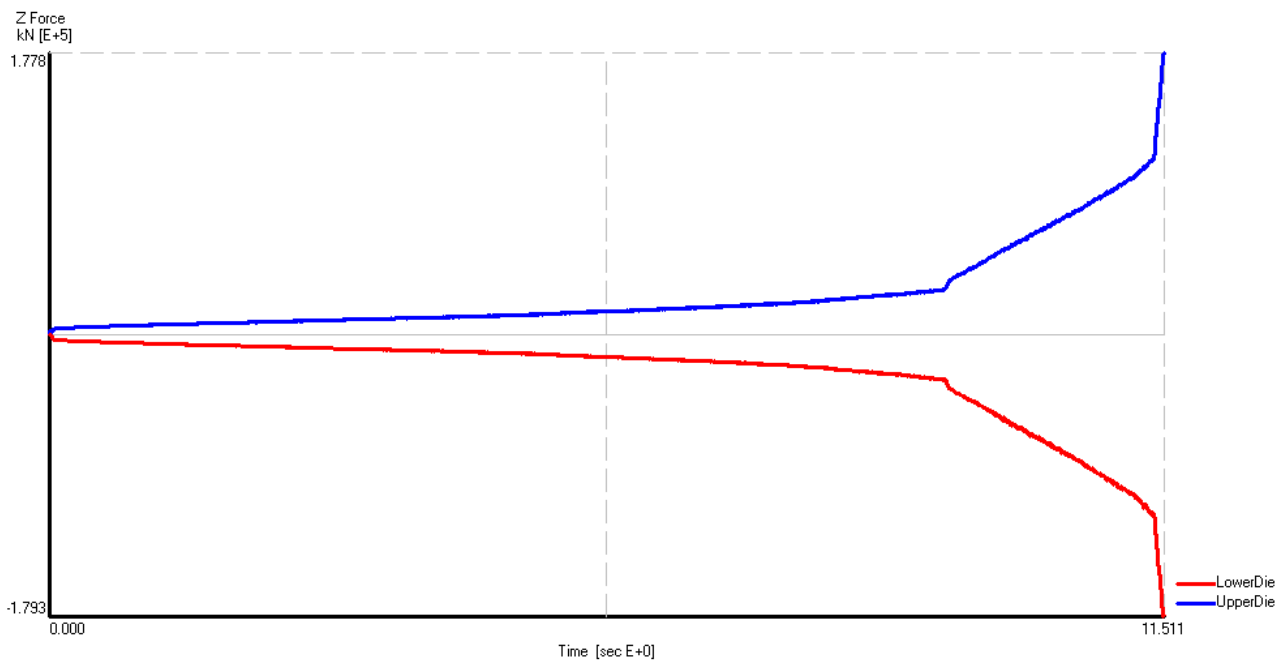


Figura 3.15: Profili delle forze sullo stampo e sulla spina, espresse in *kN*.

Dalla Figura 3.15 si può notare come la forza richiesta per portare a termine la spinatura sia di circa 180000 kN e quindi ben dieci volte maggiore di quella massima sostenibile dalla pressa a disposizione.

Un' ulteriore considerazione da fare sulla modellazione del processo di spinatura è la seguente. Il pezzo da lavorare è stato discretizzato in 3625 elementi con una mesh di taglia 5 mm, gli stampi superiore e inferiore rispettivamente in 1868 elementi con mesh di 10 mm e in 4175 elementi con mesh di 12 mm. Le dimensioni della mesh appena descritte sono piuttosto elevate e, soprattutto nel caso della sezione di workpiece, possono creare qualche problema; così facendo, infatti, si rende sì la simulazione del processo molto più rapida, ma è possibile incorrere in difetti o imprecisioni nel riempimento di alcune zone dello stampo (Figura 3.16).

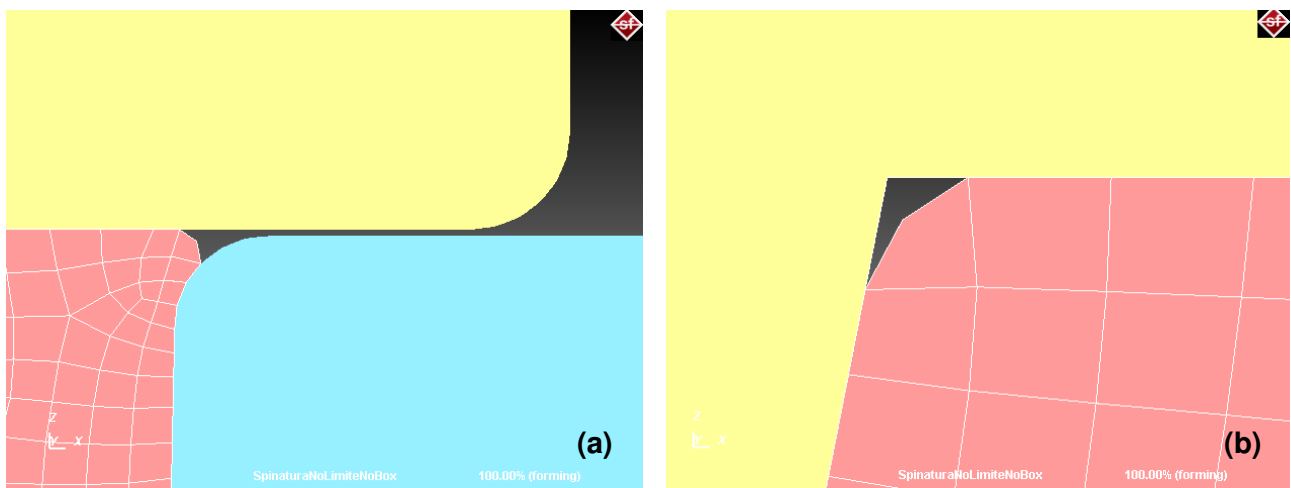


Figura 3.16: Particolari della simulazione del processo di spinatura che evidenziano difettosità dovute alla misura della mesh utilizzata. (a) Difficoltà della spina ad andare in battuta sullo stampo; (b) Difficoltà di riempimento di alcune zone dello stampo.

Per ovviare a questo inconveniente sono stati introdotti nel modello dei *box di refinement*, ovvero delle zone in cui durante la simulazione la taglia della mesh viene resa più piccola, limitando così le imperfezioni durante la deformazione del materiale (Figura 3.17).

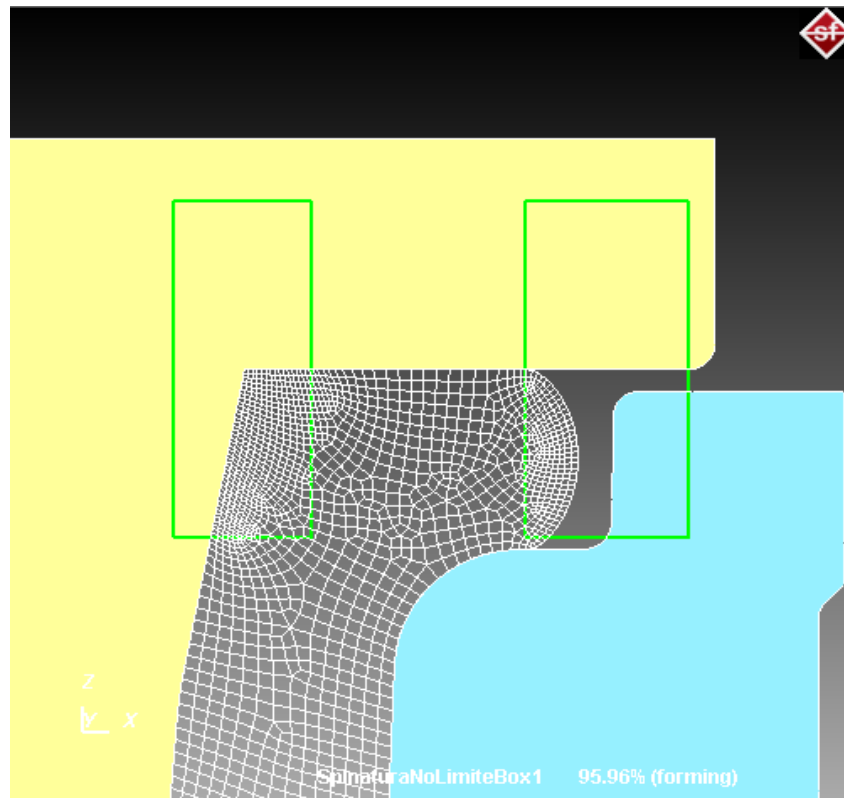


Figura 3.17: Fase della simulazione con due *box di refinement* (in verde). È ben visibile come all' interno di queste zone la taglia della mesh sia sensibilmente ridotta.

Nonostante l' utilizzo dei box di rifinitura, osservando il particolare della sezione proposto in Figura 3.18, è importante rilevare delle lievi mancanze di materiale rispetto alla cavità proposta. Ciò può essere causato dalla difficoltà del materiale nella zona della flangia a fluire oltre la zona raggiata dello stampo o più probabilmente da una mancanza di materiale vera e propria (e cioè da una sottostima del volume del pezzo da lavorare).

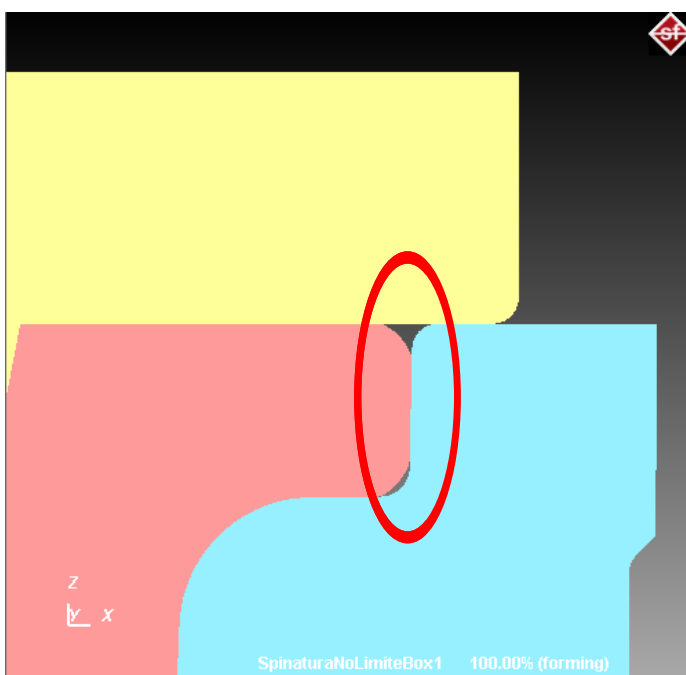


Figura 3.18: Particolare dell' istante finale della spinatura in cui è possibile notare mancanze di materiale.

3.6 Tranciatura

Per la realizzazione del modello di quest'ultima fase di preparazione della preforma sono stati utilizzati un piatto 2500x1500x250 [mm] preriscaldato a 400 °C (*lower die*), l'anello uscente dalla fase di spinatura (senza limite di forza) e una trancia, di diametro 220 mm, prima progettata con *Pro-Engineer* e poi importata in *Simufact Forming*; anche la trancia, come tutti gli utensili di tutti i processi finora descritti, è stata ricreata in acciaio *H13* e portata a 400 °C.

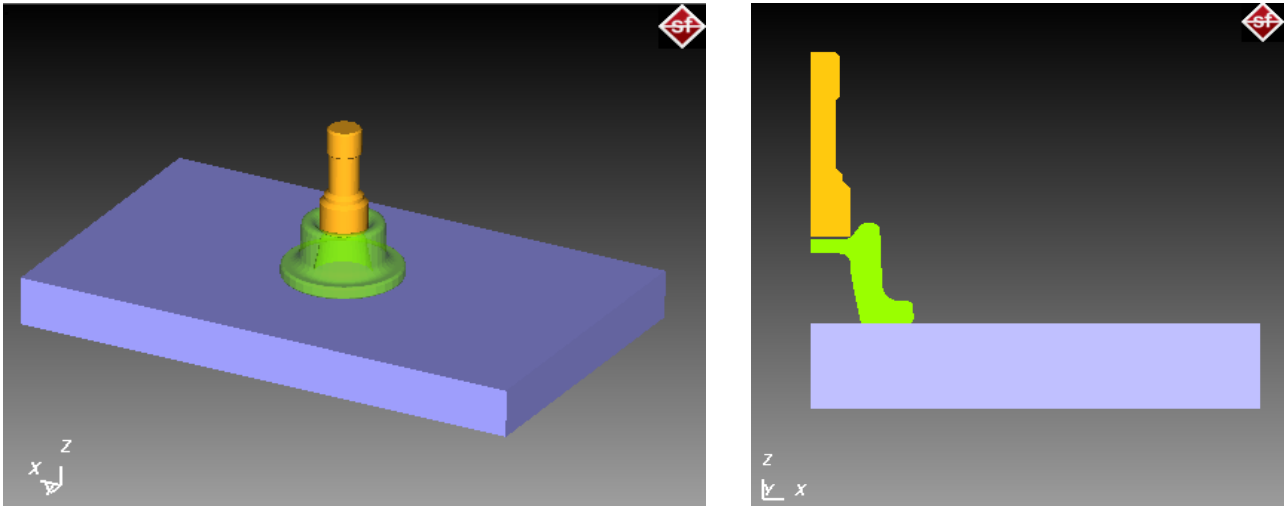


Figura 3.19: Modellazione 3D (a) e 2D (b) del processo di tranciatura. In arancione la trancia, in blu il piatto inferiore e in verde il pezzo da lavorare.

Oltre all' accurato posizionamento degli stampi e del pezzo da lavorare (Figura 3.19), alla meshatura, all' impostazione della pressa, al calcolo della corsa della trancia e a tutte le altre operazioni descritte anche nella modellazione dei processi precedenti, nel caso della tranciatura si è reso necessario impostare anche 2 nuovi parametri (nella sezione *punching*):

- *cut distance*, che è l'equivalente del *gioco* tra punzone e matrice descritto nel paragrafo 1.3.6;
- *part distance*, cioè la distanza dall'asse di simmetria del pezzo al punto in cui avviene il distacco del materiale; nel nostro caso è stato considerato il raggio della trancia.

L'assegnazione del valore a questi parametri non è stata immediata come ci si aspettava.

Inizialmente, infatti, il *gioco* è stato calcolato con l' Eq 1.7:

$$g = 0.002 \cdot s \cdot \sigma_t^{0.5}$$

s = spessore [mm]

σ_t = resistenza specifica al taglio del materiale [MPa]

con:

$$\sigma_t = 4/5 \cdot R_m$$

R_m = resistenza a trazione del materiale [MPa]

Nel nostro caso: $s \cong 41 \text{ mm}$
e $R_m = 460 \text{ Mpa}$

E quindi: $\sigma_t = 368 \text{ Mpa}$
e $g = 1.6 \text{ mm}$

Come *part distance*, invece, è stato semplicemente considerato il raggio della sezione della trancia e cioè 110 mm .

I risultati della modellazione, però, hanno evidenziato che queste condizioni non sono del tutto esatte: la simulazione, infatti, termina senza il completo distacco del fondello, come si può vedere in Figura 3.20.

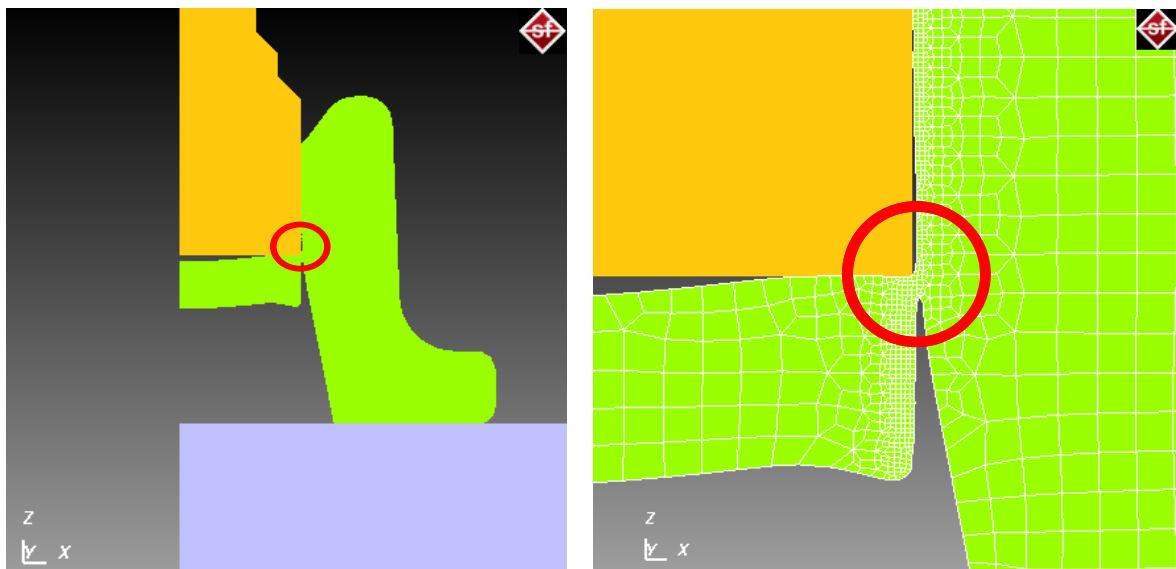


Figura 3.20: Risultato di una prima prova di tranciatura. É possibile vedere nel dettaglio come il fondello non si stacchi completamente dal pezzo.

Ciò può essere dovuto a un valore della *cut distance* troppo basso, che può causare un aumento della forza di tranciatura e quindi una maggiore difficoltà di asportazione del materiale. La formula utilizzata non è altro che una formula empirica approssimata per stimare il *gioco* tra punzone e matrice, quindi a questo punto è stato scelto di effettuare alcune prove di modellazione del processo utilizzando diversi valori del *gioco*, maggiori di quello calcolato in precedenza, ma pur sempre compresi tra il 2 e l'8% dello spessore della parte da tranciare.

I risultati sperimentali di queste prove hanno suggerito, per una corretta ed efficace tranciatura, un *gioco* di 3 mm e una *part distance* di 108 mm .

E' importante specificare, inoltre, che affinché la lavorazione fosse simulata con successo, si è scelto di impostare la temperatura della trancia a 400 °C ma senza considerare la sua

dilatazione termica durante il riscaldamento (no *Heat up*). È stata poi impostata per entrambi gli stampi l'opzione *Rigid without Heat Conduction*: in questo modo sono stati resi indeformabili ed è stato trascurato lo scambio termico tra essi e il pezzo durante il processo simulativo.

E' stato, infine, inserito un *box di refinement* per rendere più accurata la discretizzazione del pezzo nella zona di frattura.

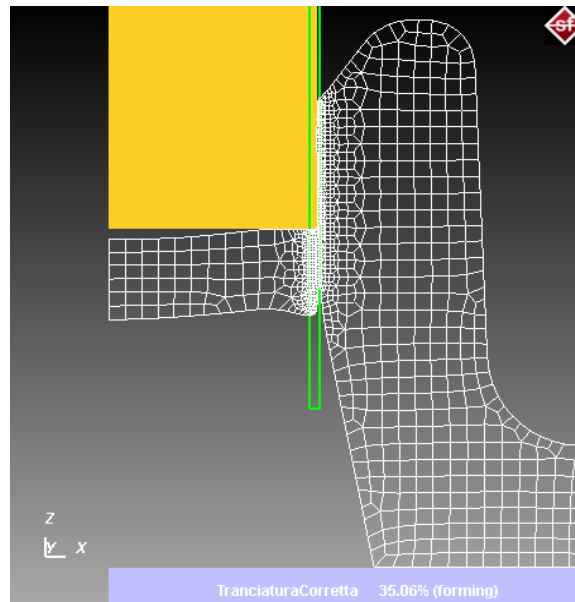


Figura 3.21: Fase del processo di tranciatura con l'applicazione di un *box di refinement* (in verde).

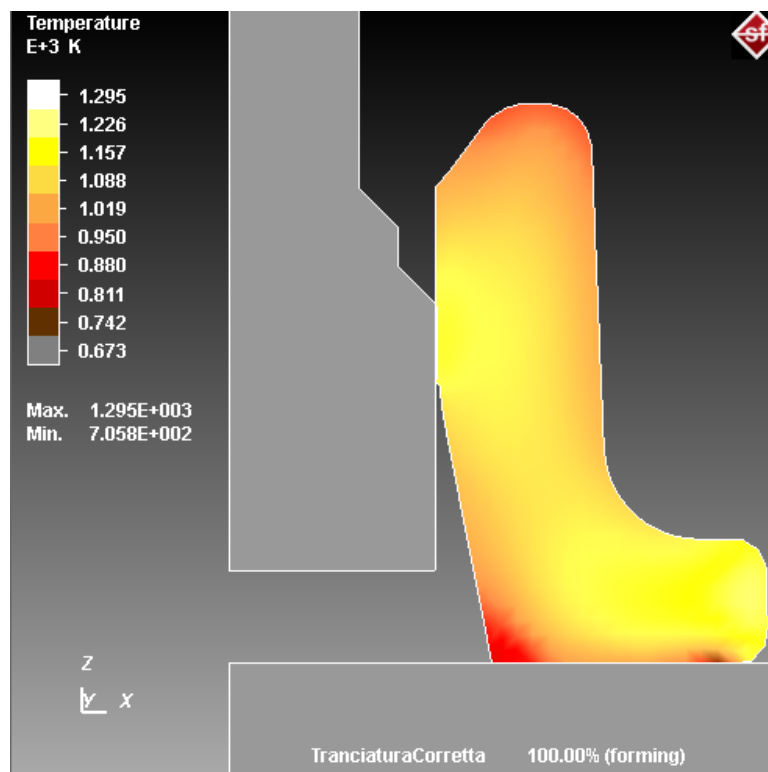


Figura 3.22: Profilo di temperatura del pezzo dopo il processo di tranciatura (temperature in Kelvin).

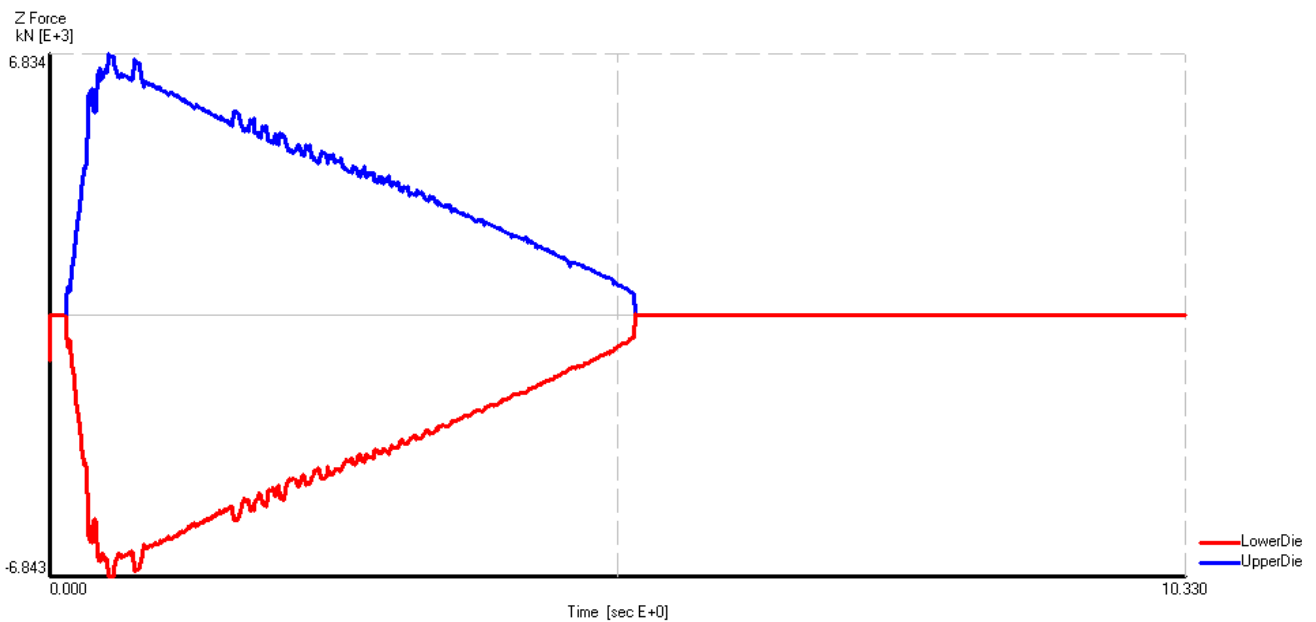


Figura 3.23: Profili delle forze sul piatto e sulla trancia, espresse in *kN*.

La forza massima teorica di tranciatura la posso calcolare anche usando l' Eq. 1.8:

$$P_{max} = l \cdot s \cdot \sigma_t \quad \text{dove:} \quad \begin{aligned} l &= \text{perimetro del contorno tranciato} \\ s &= \text{spessore della lamiera} \\ \sigma_t &= \text{resistenza specifica a taglio} = 4/5 R_m \\ R_m &= \text{resistenza a trazione del materiale} \end{aligned}$$

Nel il nostro caso specifico: Φ punzone = 110 mm
 $R_m = 460$ MPa
 $s = 41$ mm

Quindi: $l = 2\pi \cdot (\Phi \text{ punzone})/2 = 345.56$ mm
 $\sigma_t = 4/5 R_m = 368$ MPa

e $P_{max} = 5214$ kN

Il valore reale della forza (visibile dal grafico) risulta giustamente maggiore di circa il 20% di quello teorico calcolato. Questo perché l' Eq. 1.8 utilizzata non considera tutti gli attriti presenti nello stampo i fenomeni di usura che si manifestano durante il processo reale.

3.7 Preforma

Il pezzo ottenuto dal processo di tranciatura sopra descritto viene prelevato e reso tridimensionale, ottenendo quindi l'anello preforma rappresentato nelle Figure 3.24.

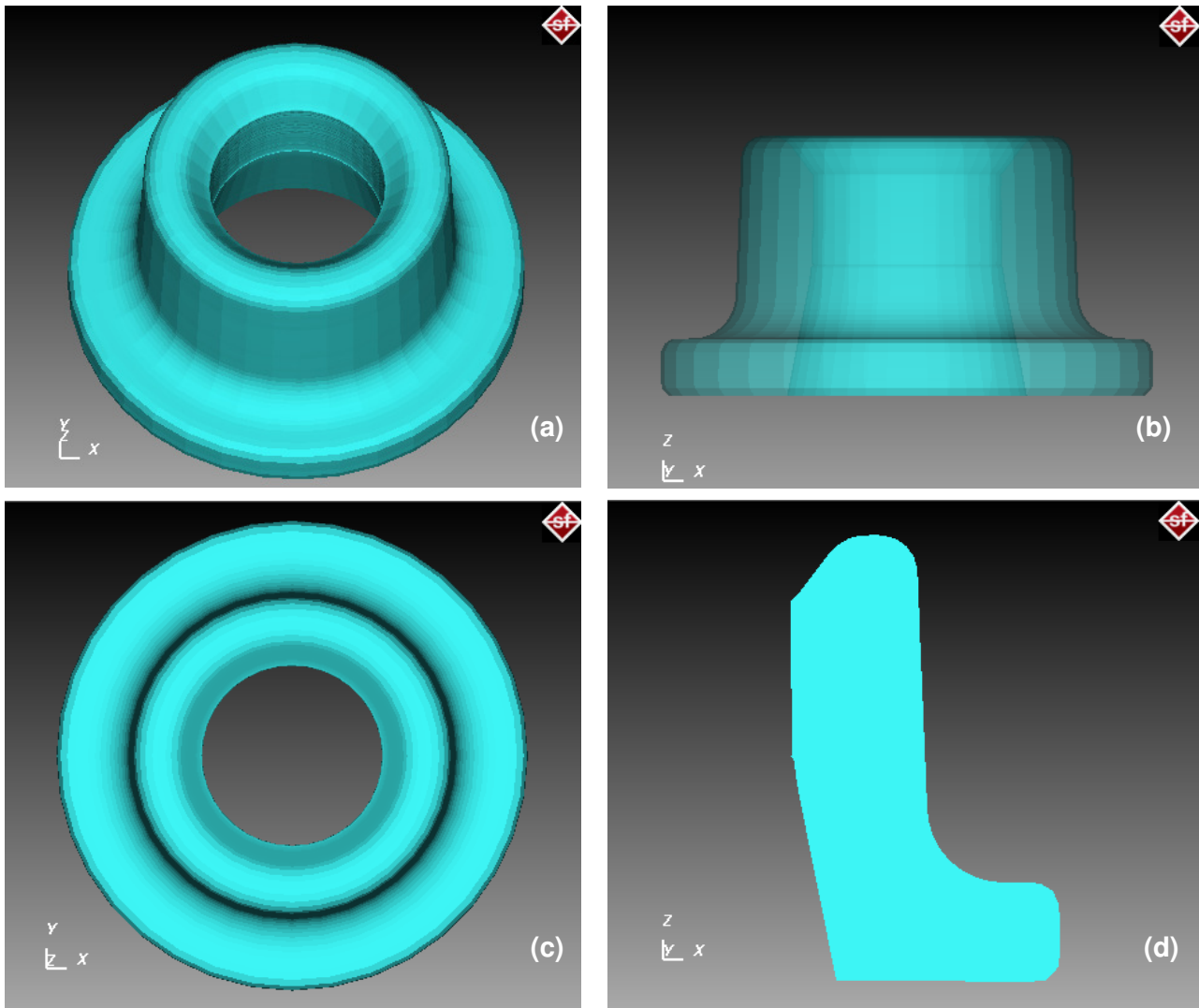


Figura 3.24: (a) (b) (c) Tre diverse visuali dell' anello preforma ottenuto. (d) Sezione dell'anello preforma.

Grazie al sistema di riferimento in coordinate cartesiane e a un sistema di misurazione delle distanze integrato nel programma, è stato possibile verificare che le misure della sezione della preforma ottenuta dalla modellazione numerica (Figura 3.24d) corrispondono con quelle pianificate dall' azienda riportate in Figura 2.11.

L' anello preforma ottenuto sarà esattamente quello utilizzato per la modellazione del processo di laminazione (non trattato in questo lavoro di tesi), comprensivo anche del suo stato di deformazione, rappresentato in Figura 3.26.

Per quanto riguarda la temperatura, invece, è interessante notare come nel corso delle simulazioni essa sia in diminuzione, a causa degli scambi termici con l'ambiente e con gli stampi, pre riscaldati a 400 °C. Dalle Figure 3.22 e 3.25 possiamo osservare come al termine del processo di foratura, il nucleo del materiale si trovi ad una temperatura che va dagli 830 ai 1000 °C, mentre le zone superficiali si aggirano in media sui 700 - 750 °C: le zone che si trovavano a contatto con gli stampi sono a circa 500 °C, mentre in prossimità della flangia e della superficie di tranciatura le temperature sono più elevate (probabilmente a causa delle maggiori deformazioni) e si toccano rispettivamente i 950 e gli 850 °C.

Prima di iniziare la laminazione dovrà quindi essere simulato un riscaldamento dell'anello fino a 1240 °C, temperatura alla quale dovrà giungere al laminatoio.

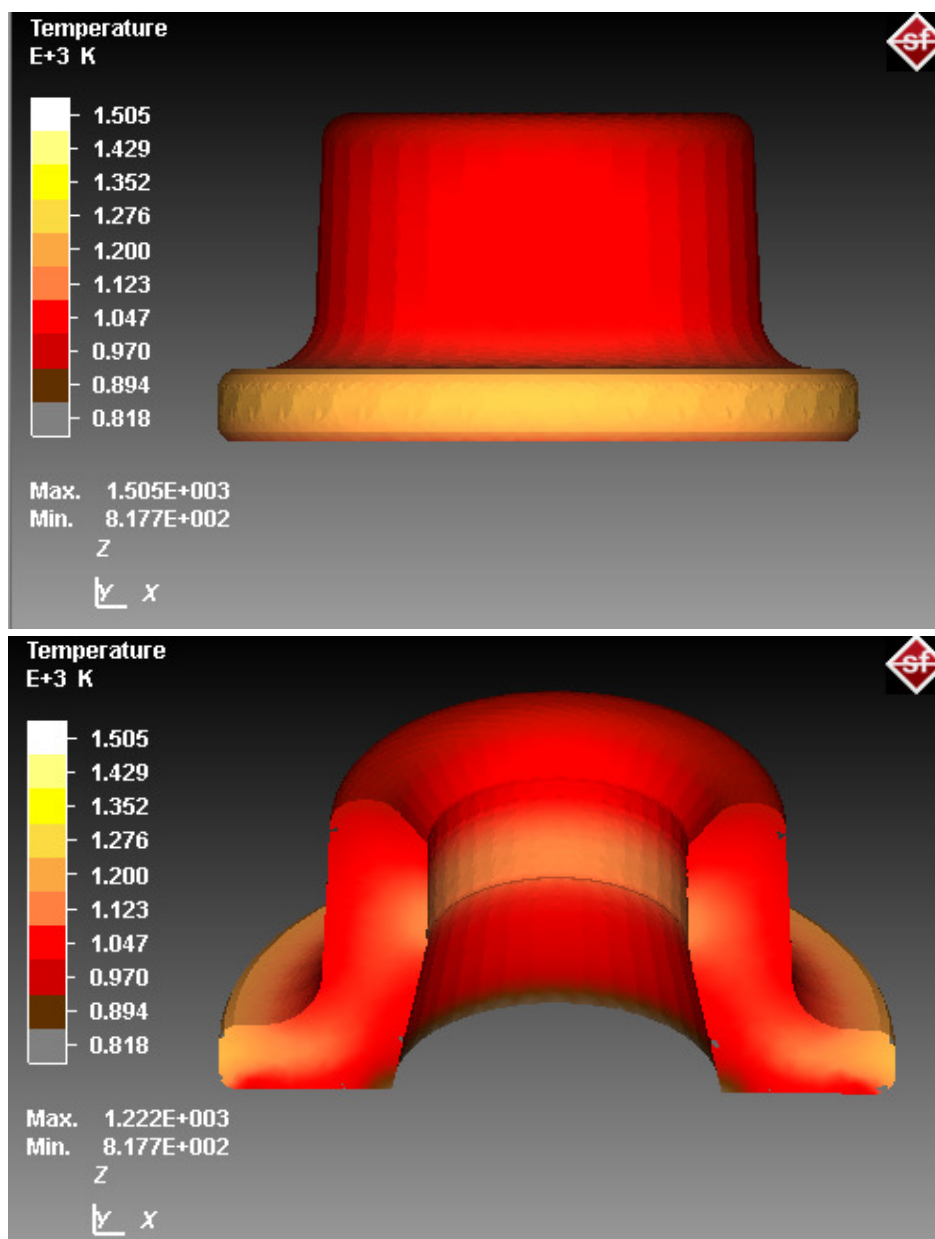


Figura 3.25: Mappe di temperatura della superficie esterna (a) e interna (b) dell'anello preforma. Le temperature sono in Kelvin.

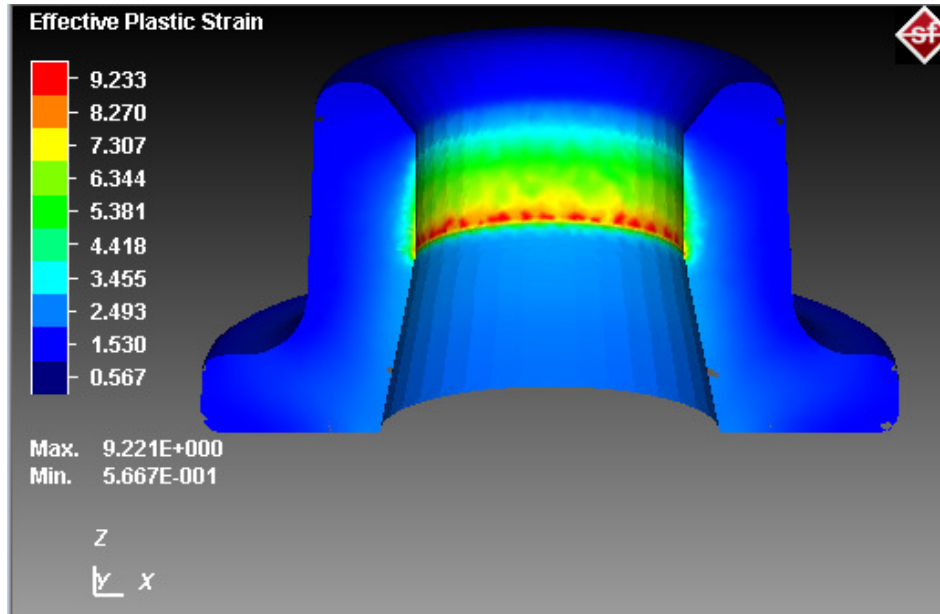


Figura 3.26: Mappa di deformazione plastica (*Effective Plastic Strain*) della superficie interna dell'anello preforma.

CONCLUSIONI

Durante la campagna di analisi numeriche svolte, il *software Simufact.Forming 9.0.1* si è rivelato un valido strumento da utilizzare in una progettazione concorrente ed integrata di prodotto e processo.

Questo programma fornisce un ambiente di lavoro professionale, grazie al quale è stato possibile in particolare:

- modellare tutte le fasi di realizzazione della preforma per il processo *ring rolling* in esame
- manipolare i risultati per considerazioni e confronti

L' esito di questa tesi è stato soddisfacente e la preforma ottenuta è risultata compatibile con quella pianificata dall' azienda e utilizzabile per la modellazione della laminazione.

L' analisi dei risultati ha evidenziato, inoltre, alcune criticità del processo in questione, quali:

- l' impossibilità di svolgere correttamente il processo di spinatura a causa di una forza richiesta maggiore della capacità massima della pressa utilizzata dalla *Asfo SpA*
- mancanze di materiale (riscontrata nella simulazione del processo di spinatura) dovute a una leggera sottostima del volume del pezzo da lavorare

Come già accennato nell' introduzione, queste problematiche saranno oggetto di studio di un successivo lavoro di tesi dedicato interamente alla formulazione di ipotesi e proposte di riprogettazione del processo produttivo trattato.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] E. Paul Degarmo, J.T. Black, Ronald A. Kohser: *"Materials and Processes in Manufacturing" – 9th edition*, Wiley 2003
- [2] *"Metals Handbook - 9th edition, vol. 14: Forming and Forging"*, ASM International
- [3] Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid: *"Manufacturing Processes for Engineering Materials - 4th edition"*, Prentice Hall 2003
- [4] Alfredo Secciani, Giovanni Villani: *"Produzione Metalmeccanica 1"*, Cappelli Editore 2000
- [5] Giusti F., Santochi M.: *"Tecnologia meccanica e studi di fabbricazione"*, CEA 2000
- [6] www.asfo.it

