

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Chimica e dei Materiali

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria dei Materiali

Tesi di Laurea Magistrale

Realizzazione e ottimizzazione di un ciclo produttivo di microcomponenti in acciaio



Relatore
prof. Mario Rosso

Candidato
Nicolò Straziota

Sommario

Introduzione	4
Capitolo 1	7
Processi di stampaggio.....	7
1.1. Processi di stampaggio	7
1.2. L'estrusione	10
1.3. La trafilatura.....	14
1.4. La forgiatura.....	17
Capitolo 2.....	24
L'azienda e lo stampaggio a freddo.....	24
2.1. L'azienda	24
2.2. La ricalcatura	27
2.3. Macchinari utilizzati	29
2.4. Le prove meccaniche	37
2.4.1. Prova di trazione a temperatura ambiente	38
2.4.2. Prova di compressione	44
2.4.3. Prova di flessione	45
2.4.4. Prove di Durezza	49
2.5. Analisi FEA e simulatore FEM.....	54
2.6. Analisi degli stress sulle attrezzature	58
Capitolo 3.....	61
Il ciclo produttivo	61
3.1. Il caso studio: la boccia	61
3.2. Il primo ciclo produttivo.....	64
3.3. Il secondo ciclo produttivo	67
3.4.1. Differenze nella fase di foratura	72

3.4.2. Differenze nella fase di tranciatura del nottolino	77
3.4.3. Differenze nella fase che precede la zigrinatura	88
Capitolo 4.....	92
Conclusioni	92
Bibliografia	97

Introduzione

L'elaborazione di questa tesi è stata condotta all'interno dell'azienda SATER s.r.l., che si occupa della realizzazione di fasteners mediante stampaggio a freddo da filo per mezzo di presse multistazione. Per garantire l'efficienza del processo produttivo, l'ufficio tecnico dispone di un software di simulazione agli elementi finiti (FEM) per i processi di deformazione a freddo, il COLDFORM. Con tale software è possibile infatti simulare a priori un intero ciclo produttivo, azzerando gli scarti di lavorazione, analizzando gli sforzi agenti sui macchinari e prevedendo gli stress e gli eventuali danneggiamenti presenti sul pezzo prodotto.

L'obiettivo della tesi è quello di studiare e ottimizzare, mediante l'uso del simulatore COLDFORM, il ciclo di produzione di una boccia realizzata in acciaio C4C.

Il nucleo centrale del lavoro è costituito essenzialmente da due parti: una prima parte inerente allo studio del primo ciclo produttivo, tendente ad evidenziare i difetti della boccia realizzata mediante tale procedimento, ed una seconda parte incentrata sullo studio del nuovo ciclo mediante simulatore per poi confrontare i risultati ottenuti con quelli del primo ciclo. Entrambe le analisi dei cicli produttivi sono condotte mediante il simulatore COLDFORM utilizzato nell'ufficio tecnico dell'azienda Sater s.r.l. Le simulazioni sono state effettuate

sia sul componente prodotto, sia sulle attrezzature, per studiare le evoluzioni delle tensioni in ogni stazione della macchina.

L'attrezzatura è costituita da un contenitore metallico esterno (di solito W720), all'interno del quale alloggia una camicia di acciaio S600 che ospita degli inserti in widia o S600: tutti questi elementi sono anelli cilindrici e coassiali.

Considerando gli stampi deformabili, vengono analizzati gli stress e le deformazioni a cui tutti questi elementi sono soggetti, per poterne preservare l'integrità e la vita d'utilizzo.

Il materiale utilizzato per la realizzazione della boccola è il C4C, un acciaio dolce che, per le sue caratteristiche fisiche, si presta bene allo stampaggio a freddo.

I capitoli di questa tesi sono ordinati nella seguente maniera:

- capitolo primo: illustrazione dei processi fondamentali dello stampaggio a freddo, condotti all'interno della Sater s.r.l.;
- capitolo secondo: breve storia dell'azienda Sater s.r.l. e presentazione più dettagliata dell'acciaio C4C;
- capitolo terzo: presentazione del primo processo ideato per la realizzazione della boccola con il suo studio al simulatore agli

elementi finiti COLDFORM e, successivamente, del secondo processo nato dall'ottimizzazione del primo;

- capitolo quarto: differenze tra i due componenti prodotti, ed evidenziazione della miglior qualità della boccia prodotta col processo ottimizzato.

Capitolo 1

Processi di stampaggio

1.1. Processi di stampaggio

I processi di lavorazione meccanica ai quali i componenti metallici sono sottoposti si dividono nelle seguenti categorie⁽¹⁾:

- forgiatura;
- estrusione;
- trafilatura;
- laminazione;
- piegatura;
- taglio.

Tali processi sono ulteriormente suddivisi in base alle condizioni operative. Nello specifico per:

- temperatura: il componente può essere lavorato a freddo (*cold working*), a media temperatura (*warm working*) ed a caldo (*hot working*);
- tipi di operazione secondo che si tratti di una lavorazione primaria (dal lingotto al semilavorato) o secondaria (formazione del pezzo finito);
- in base alla forma e alla dimensione del componente; la deformazione può essere di volume e prende il nome di *bulk deformation* o può portare alla formatura della lamiera, detta *sheet forming*.

Il presente lavoro rivolge l'attenzione allo studio della boccia prodotta a mezzo di un processo di stampaggio a freddo, pertanto focalizza l'attenzione sui procedimenti caratterizzati come *cold working*, in particolare l'estrusione, la forgiatura e la trafilatura; tali processi rispetto ai *warm working* e all'*hot working* presentano notevoli vantaggi:

- elevata velocità di produzione;

- costanza del processo;
- precisione dimensionale;
- qualità e finitura superficiale elevate;
- miglioramento delle caratteristiche meccaniche;
- risparmio di materia prima ed eliminazione dello sfrido.

Queste caratteristiche che accomunano le tipologie di processi a freddo portano ad un'economicità complessiva del processo produttivo in quanto, grazie ad esse, viene utilizzato meno materiale, si eliminano i costi dello smaltimento dello sfrido e vengono prodotte notevoli quantità di componenti in virtù dell'elevata velocità di produzione. I componenti prodotti risultano di elevata qualità e precisione dimensionale, in quanto le deformazioni plastiche a cui è soggetta la materia prima avvengono in un intervallo di tempo e a temperatura tale da non permettere il rilassamento dell'incrudimento del materiale. Non è da trascurare, inoltre, il fatto che il flusso dei grani dovuto alla deformazione plastica può causare una desiderabile direzionalità delle proprietà del componente.

1.2. L'estrusione

L'estrusione è un processo di produzione industriale di deformazione plastica che consente la realizzazione di pezzi a sezione costante. Consiste nel passaggio di una billetta attraverso una matrice (*die*) di cui prende la forma e può essere effettuato sia a caldo (*Hot Extrusion*) per incrementare la duttilità del componente da estrudere, che a freddo (*Cold Extrusion*).

L'estrusione può avvenire secondo due metodologie:

- estrusione diretta: la billetta contenuta in un contenitore viene compressa da una parte dal pistone e fuoriesce dalla parte opposta, dove è posizionata la matrice; il flusso del materiale, dunque, è concorde al moto del pistone.

In figura 1 è mostrato uno schema esemplificativo dell'estrusione diretta;

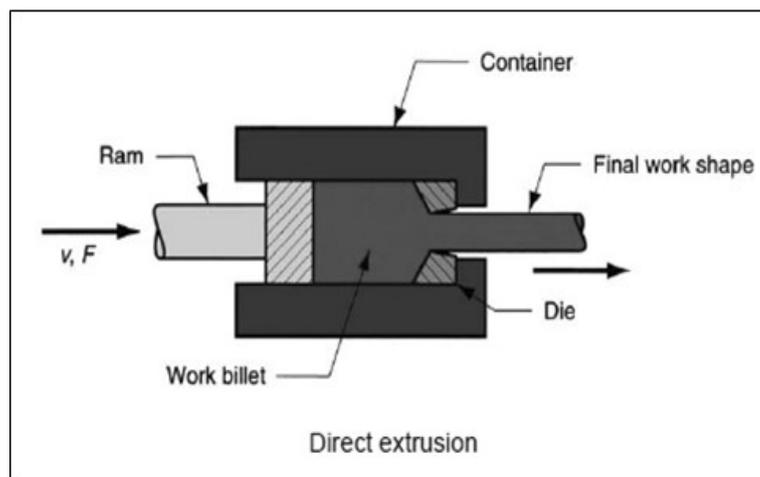


Fig.1 – Schema esemplificativo del processo di estrusione diretta

- estrusione indiretta: tipologia di estrusione utilizzata per la produzione di componenti cavi; la billetta e il contenitore si muovono assieme, consentendo che le forze di attrito sviluppate siano minori rispetto a quelle sviluppate con l'estrusione diretta.

In figura 2 uno schema esemplificativo dell'estrusione indiretta.

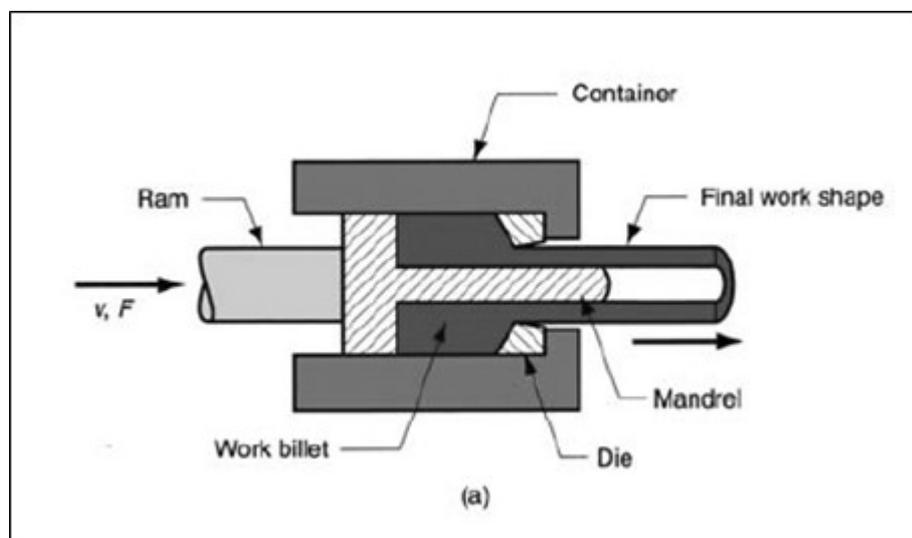


Fig.2 – Schema esemplificativo del processo di estrusione indiretta

Un parametro di fondamentale importanza nell'estrusione è il rapporto tra la superficie della sezione iniziale della billetta e la superficie della sezione finale della stessa, cioè la superficie della sezione della billetta in uscita dallo stampo. Tale parametro permette un'ulteriore classificazione dell'estrusione in:

- estrusione aperta, così detta perché garantisce un massimo rapporto di estrusione compreso tra il 30% e il 35%;
- estrusione chiusa o controllata, così definita perché garantisce un rapporto di estrusione compreso tra il 70% e il 75%.

In figura 3 è possibile osservare la differenza tra estrusione aperta ed estrusione chiusa.

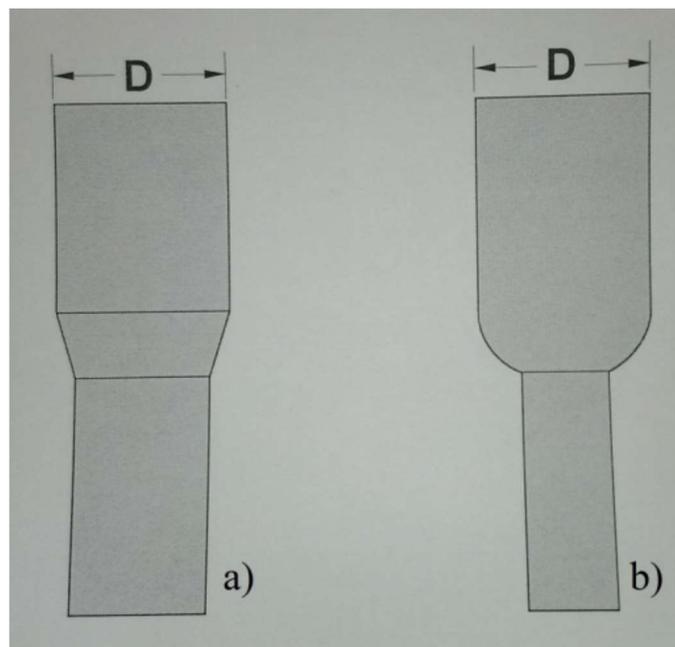


Fig. 3 – Rappresentazione di estrusione aperta (a) ed estrusione scatola (b) ⁽²⁾

Un ulteriore parametro di fondamentale importanza è il *Die Angle*, cioè l'angolo di entrata della matrice che, se eccessivamente piccolo, comporta l'aumento dell'attrito all'interfaccia tra la matrice e la billetta; se, invece, è eccessivamente grande, favorisce la creazione di turbolenze nel flusso di metallo durante la riduzione, turbolenze

che portano ad un aumento della forza richiesta per l'estrusione. L'angolo ideale affinché un processo di estrusione sia condotto in maniera ottimale dipende dal tipo di metallo lavorato, dalla temperatura e dalle condizioni di lubrificazione.

In figura 4 è possibile osservare uno schema esemplificativo del *Die Angle*.

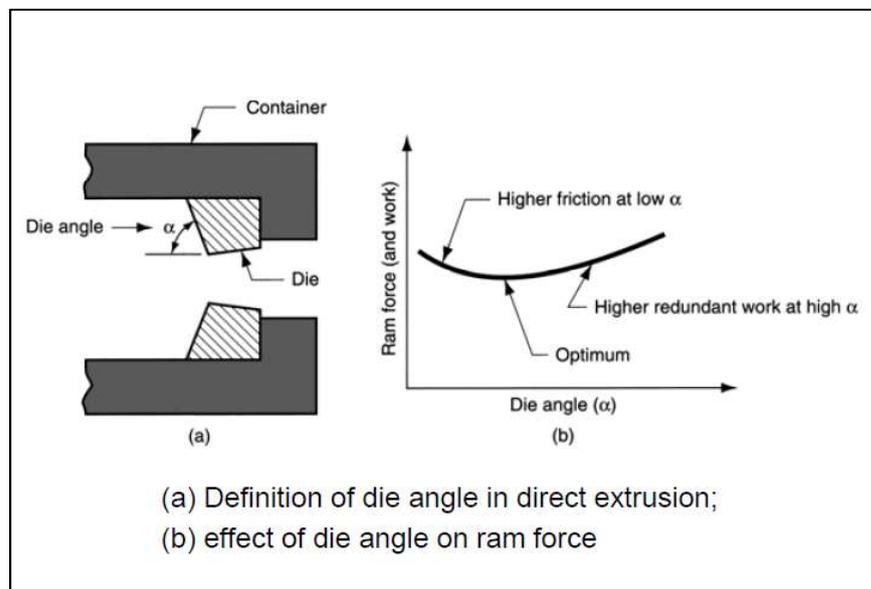


Fig.4 –Schema esemplificativo del *Die Angle*

La pressione richiesta per l'estrusione viene dunque calcolata con la formula semi-empirica

$$P = YY(pp + qq \ln RR)$$

dove p e q sono costanti da determinare sperimentalmente ($p \approx 0.8$ e $q \approx 1.2-1.5$), R è il rapporto di estrusione e Y è la *yield strength* (snervamento) del materiale.

L'estrusione condotta a freddo permette di ottenere i seguenti benefici:

- proprietà meccaniche elevate grazie all'incrudimento del materiale;
- buone tolleranze dimensionali;
- buona finitura superficiale del componente, grazie anche all'utilizzo di lubrificanti adeguati;
- assenza di ossidi superficiali;
- elevata produttività.

1.3. La trafilatura

Simile all'estrusione è la trafilatura, processo di lavorazione meccanica mediante il quale è possibile ridurre il diametro di fili, cilindri o tubi metallici. A differenza del processo di estrusione nel quale il materiale veniva spinto attraverso la matrice (*die*), forzando così la modifica della sua forma, nel processo di trafilatura il materiale viene tirato all'uscita del *die*. In figura 5 è possibile osservare uno schema esemplificativo del processo di trafilatura.

Come nel caso del processo di estrusione, esiste un angolo di uscita ottimale e sono riscontrabili gli stessi possibili difetti nel componente: possono, infatti, presentarsi cricche superficiali dovute alle elevate velocità del processo o alle elevate temperature sviluppatesi durante

quest'ultimo, inclusioni di ossidi e impurità inglobati nel materiale e cricche interne dovute alle deformazioni disomogenee che si riducono aumentando l'attrito tra materiale e matrice.

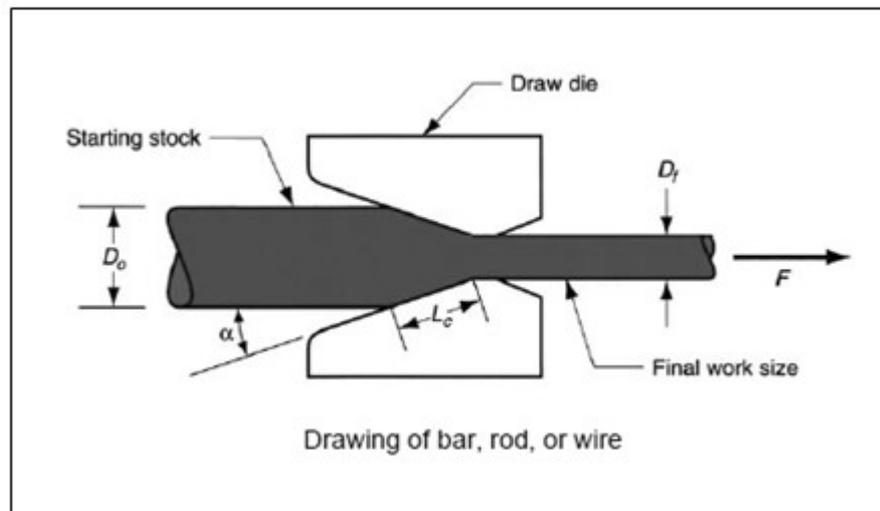


Fig.5 – Schema esemplificativo del processo di trafilatura

La trafilatura può essere distinta in due categorie, in base alla forma del materiale di partenza. Si può infatti identificare la trafilatura di barre, detta *bar drawing*, o la trafilatura di fili, detta *wire drawing*, quando il diametro del filo di partenza è inferiore ai 0,03 mm. Le due tipologie di trafilatura prevedono lo stesso meccanismo, tuttavia possono essere diverse le metodologie e i macchinari utilizzati per il processo.

Un parametro notevolmente importante nel processo di trafilatura è il rapporto di riduzione di sezione, calcolato come il rapporto tra la differenza di sezione iniziale e finale del componente, con la sezione iniziale di quest'ultimo

$$r = \frac{A_0 - A_f}{A_0}$$

con

- r: rapporto di riduzione;
- A_0 : sezione iniziale;
- A_f : sezione finale.

I componenti da processare vengono posti in trazione e trafilati dai seguenti macchinari:

- banchi da trafilatura, simili a macchine per trazione orizzontali, che riescono ad applicare carichi elevati e a trafilare pezzi grossi fino a 30m grazie a sistemi idraulici;
- i *bull block*, rulli avvolgitori automatizzati che trafilano e avvolgono fili.

È possibile trafilare in serie, ma nel caso di trafilatura in serie a freddo si ha incrudimento del materiale, ciò che rende necessario procedere ad un rinvenimento tra due stadi successivi.

1.4. La forgiatura

La forgiatura è un processo di lavorazione meccanica che prevede l'applicazione di forze di compressione mediante due matrici per ottenere la forma desiderata dell'oggetto. Una prima classificazione dei processi di forgiatura può essere fatta in base alle temperature in cui tale processo meccanico è condotto:

- a freddo: $T/T_m < 0,3$;
- a media temperatura: $0,3 < T/T_m < 0,5$;
- ad alta temperatura: $T/T_m > 0,6$.

Nelle formule sopra elencate T rappresenta la temperatura utilizzata durante il processo di forgiatura e T_m è la temperatura di fusione del metallo.

Un'ulteriore classificazione dei processi di forgiatura può essere fatta in base ai diversi tipi di stampo utilizzati. Ve ne sono di tre tipi:

- stampo aperto o *open die*: il materiale è pressato tra due martelli piatti in cui non sono presenti dei limiti laterali e il materiale può allargarsi lateralmente senza costrizioni (Fig. 6a);

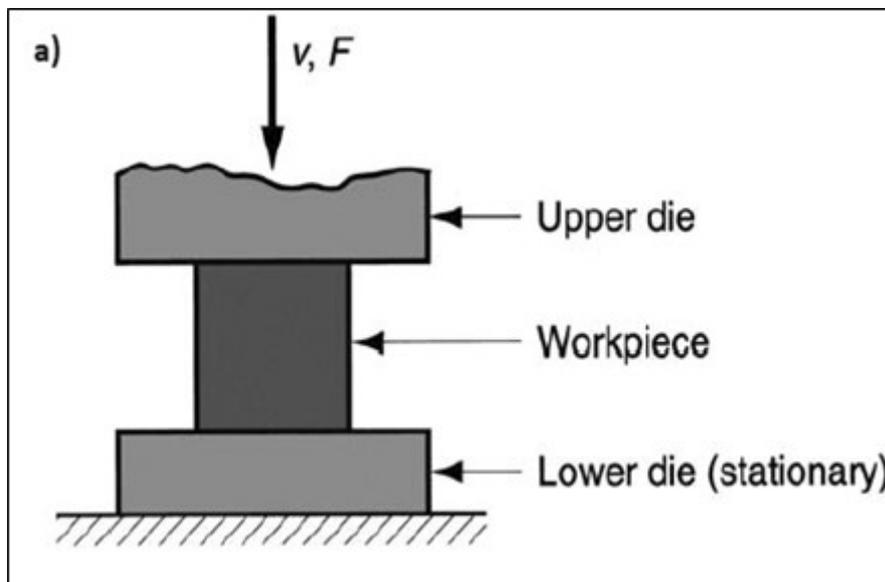


Fig. 6° - Schema esemplificativo dell'*open die*

- stampo chiuso con bava o *impression die*: il materiale è pressato tra due superfici contenenti delle cavità o delle geometrie che vengono impartite al componente (Si vengono a creare bave come in Fig. 6b);

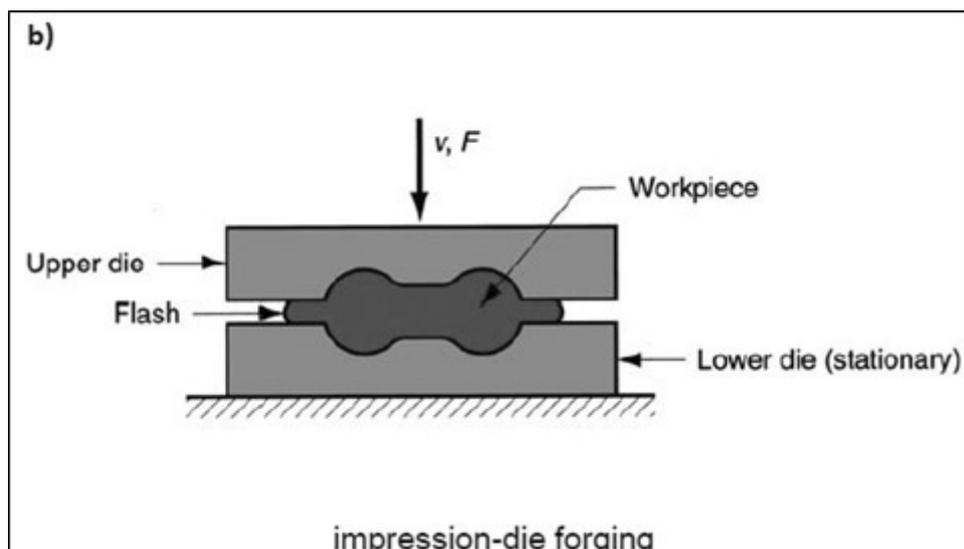


Fig. 6b – Schema esemplificativo dell'*impression die*

- stampo chiuso senza bave o *closed die*; il materiale è pressato in un contenitore chiuso che non permette la formazione di bave (Fig.6c).

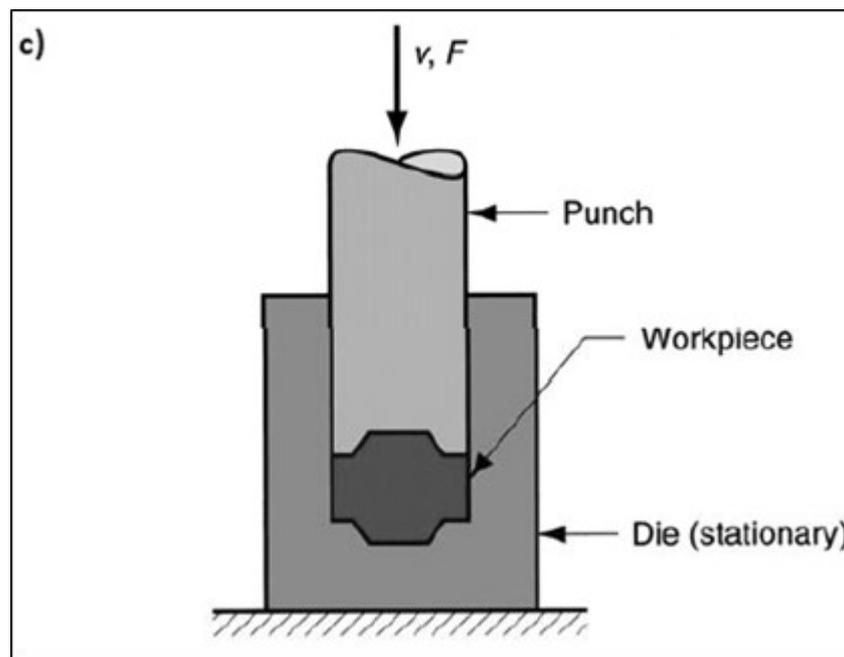


Fig. 6c – Schema esemplificativo del *closed die*

A seconda delle condizioni di temperatura e di stampo utilizzato, la forgiatura può essere divisa in:

- fucinatura, durante la quale il metallo viene lavorato a caldo, utilizzando un martello e un'incudine; tale processo è utilizzato per produrre componenti di elevata dimensione, che non richiedono una notevole precisione dimensionale; viene utilizzato un *open die*;

- stampaggio, durante il quale il materiale viene pressato per riempire due semi-stampi; può essere condotto a caldo o a freddo e permette di ottenere tolleranze ristrette; per tale famiglia di processo possono essere utilizzati l'*impression die*, in cui si formano bave che dovranno essere successivamente eliminate, o può essere utilizzato il *closed die*;
- ricalcatura, lavorazione durante la quale al materiale viene impresso uno sforzo di compressione lungo l'asse longitudinale, al fine di aumentarne il diametro; tale processo viene condotto generalmente a freddo, utilizzando sia stampi chiusi che stampi aperti.



Fig.7 – Schema esemplificativo della ricalcatura prima dell'applicazione della pressione (1) e dopo l'applicazione della pressione (2)

Le applicazioni meccaniche appena elencate e finalizzate alla deformazione plastica vengono eseguite con macchinari specifici scelti in base alla pressione massima da realizzare, alla velocità massima di lavoro e all'incremento del carico. Essi possono essere

di diverso tipo, seconda la maniera in cui la pressione viene esercitata. Le presse utilizzate in genere sono le seguenti⁽³⁾:

- pressa idraulica che, prevede l'uso di una pompa idraulica destinata a inviare l'olio o l'acqua sotto pressione al pistone e regolata dalla valvola a due vie; il pistone, collegato ad un'apposita piastra, riduce lo spazio comprimendo il materiale; al termine della compressione, la valvola viene azionata nella seconda posizione in modo da inviare l'olio nella parte anteriore del pistone, facendogli compiere il percorso contrario per rimetterlo in posizione di riposo; la pressa sfrutta la legge di Pascal⁽⁴⁾ e permette di arrivare ad esercitare un carico massimo di circa 75000 tonnellate;
- pressa meccanica, che può essere di due tipi: pressa a piani o con movimento alternativo⁽⁵⁾ e pressa rotativa o a rulli; le presse a piani sfruttano l'energia di un volano posto in rotazione da un motore elettrico, per movimentare la slitta o mazza attraverso una o più bielle; attualmente stanno conquistando sempre più mercato le cosiddette *presse servo*, presse meccaniche senza volano in cui uno o più motori *brushless*, motori elettrici a corrente continua, sono collegati direttamente o tramite riduttori all'albero di comando e quindi alla cinematica della pressa; l'utilizzo di un tale tipo di pressa consente una maggiore versatilità connessa alla possibilità di variare la corsa della slitta durante la produzione, grazie al fatto che tali motori permettono rapidi cambi di direzione del moto;

le servo presse, se corredate di sensore di forza, trovano un largo impiego nelle applicazioni di assemblaggio, dove è richiesto il monitoraggio del processo; le presse a rulli sono motorizzate invece direttamente all'asse dei rulli a contrasto mediante motori idraulici o elettrici attraverso opportuni riduttori;

- pressa a vite, che può utilizzare una frizione a due dischi calettati sopra un albero che si sposta assialmente o può utilizzare un ingranaggio mosso da una potenza idraulica o elettrica che accelera un volano, causando in questa maniera il movimento della vite⁽⁶⁾; è una pressa che lavora a limite di energia, nel senso che, tramite il volano, l'energia cinetica angolare è convertita in energia cinetica lineare; le velocità sono inferiori rispetto a quelle degli altri tipi di presse, ma le pressioni sono elevate, raggiungendo un carico massimo di 100000 tonnellate⁽⁷⁾;
- pressa a maglio o martello, che lavora sfruttando l'energia di impatto, ovvero trasforma l'energia potenziale di un martello in energia cinetica; la forza del colpo dipende dall'altezza di caduta e dalla massa del martello; tale processo viene utilizzato particolarmente nei processi di fucinatura, che si serve di stampi aperti; la massima energia prodotta è di 1200 kJ.

Le presse meccaniche e idrauliche possono essere sia a singolo effetto che a multiplo effetto, secondo il numero di operazioni che devono essere eseguite sul componente da realizzare. Generalmente le presse lavorano con pochi colpi al minuto, mentre i magli possono raggiungere i 300 colpi al minuto. Quest'ultimo tipo di attrezzatura è scelto nel caso in cui si devono applicare maggiori deformazioni al pezzo, proprio per la maggior velocità di applicazione del carico. Il maglio, inoltre, avendo una maggior velocità di esecuzione, implica un ridotto tempo di contatto tra pezzo e stampo, quindi una maggior velocità di dissipazione del calore che porta ad un allungamento della vita degli stampi. Tuttavia l'attrezzatura del maglio risulta essere più massiva rispetto alle presse e questo comporta la necessità di uno spazio maggiore e di un investimento iniziale maggiore.

Nella figura che segue è possibile osservare uno schema dei diversi tipi di presse e magli.

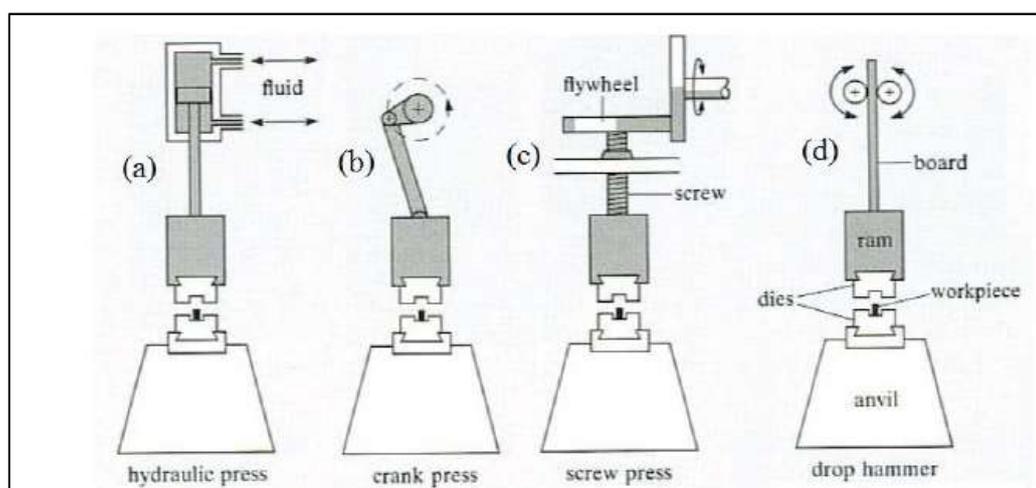


Fig. 8 Schema esemplificativo dei diversi tipi di pressa utilizzati per la lavorazione dei metalli: pressa idraulica (a), pressa meccanica (b), pressa a vite (c), maglio (d)

Capitolo 2

L'azienda e lo stampaggio a freddo

2.1. L'azienda

L'elaborazione di questa tesi è stata condotta presso l'azienda SATER s.r.l., acronimo di Società Anonima Trafileria e Ribattini fondata nel 1937 con sede a Nichelino (TO)⁽⁸⁾. Le prime produzioni prevedevano la realizzazione di ribattini semiforati utilizzati per rivettare pentole o i ceppi dei freni. Con il susseguirsi degli anni l'azienda si è trasformata in produttrice di componenti stampati a freddo, su disegno del cliente, partendo da filo metallico. Tali componenti rientrano nella famiglia dei cosiddetti *fastners* e comprendono principalmente perni, boccole, bussole e viteria speciale, destinati al settore elettronico ed elettrodomestico, al settore automotivi e al settore degli infissi. Attualmente l'azienda SATER s.r.l. esporta il 65% della propria produzione, fornendo gli stabilimenti di tutto il mondo.

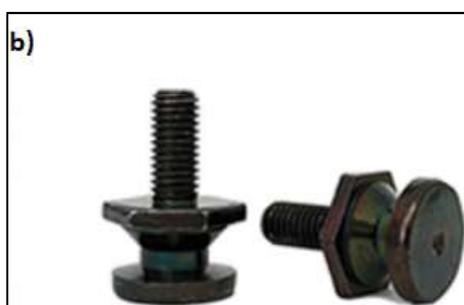


Fig.9 – Alcuni componenti prodotti dall'azienda SATER s.r.l.:
perni scalinati (a), viteria speciale (b), perni speciali (c), boccole/distanziali/bussole (c)

L'azienda è stata sempre attenta alla qualità dei suoi prodotti, ottenendo in questa maniera le certificazioni UNI EN ISO 9001:2008 (per fabbricazione mediante stampaggio a freddo su specifiche tecniche da clienti e commercio di ribattini ed articoli in acciaio, alluminio e sue leghe, rame e ottone) e ISO/TS 16949:2009 (per

fabbricazione mediante stampaggio a freddo di ribattini ad articoli per bloccaggio in acciaio, alluminio e sue leghe, rame, ottone, acciaio inox per applicazioni automotive). La specializzazione dell'azienda inoltre è incentrata sull'affiancamento del cliente sin dalle prime fasi di progettazione, lavorando in tal maniera in *co-design* e mediante l'utilizzo di software di simulazione di ultima generazione, passando per le molteplici fasi di produzione per concludersi nella fase della spedizione merci. Difatti l'azienda parte da idee e progetti preliminari del cliente, per cercare in sinergia con lui la soluzione più funzionale e più economica, garantendogli in tal modo assistenza e collaborazione a 360°.

Tale metodo, chiamato *Fastener Solution*, parte infatti dalla valutazione di fattibilità tecnica, per passare allo studio sulla reazione e lo stress cui sono sottoposti i materiali ed i componenti utilizzati e concludere con una vera e propria consulenza sulla soluzione di assemblaggio completo.

Anche il rispetto per l'ambiente non passa in secondo piano, come si può evincere dalla certificazione UNI EN ISO 14001:2004 per il sistema di gestione ambientale (per fabbricazione mediante stampaggio a freddo su specifiche tecniche fornite dal cliente, ripresa, pulitura, trattamenti termici, confezionamento e commercializzazione di ribattini ed articoli in acciaio, alluminio e sue leghe, rame ottone, acciaio inox) e dall'installazione dell'impianto fotovoltaico da 82 KW, che permette di soddisfare il 30% del fabbisogno annuale energetico dell'azienda.

2.2. La ricalcatura

La ricalcatura è uno processo che fa parte della famiglia dei processi di stampaggio a freddo che è associata ai procedimenti di estrusione, tranciatura e estrusione. Il componente da ricalcare difatti viene lavorato ad alte velocità con presse multi-stazione per produrre oggetti di piccole e medie dimensioni, che attualmente possono raggiungere i 300 mm e pesare più di 3 kg. I vantaggi di questa tecnica sono notevoli e prevedono:

- il livello estremamente basso di scarti di produzione;
- l'aumento della resistenza dei componenti grazie all'incrudimento indotto all'interno del materiale⁽⁹⁾;
- la presenza di flusso dei grani controllato;
- alte velocità di produzione.

La ricalcatura o *cold heading* ha due parametri di processo principali. Il primo è il rapporto di ricalcatura per la lunghezza (*ULR- Upset Length Ratio*) e determina il numero di colpi del punzone con i quali si può effettuare la ricalcatura, senza provocare difetti all'interno del componente, quali sono le incurvature o le distorsioni nello spezzone. Si calcola come il rapporto fra la lunghezza iniziale e il diametro iniziale dello spezzone. Il valore del ULR dipende dal materiale sottoposto a lavorazione. Per gli acciai:

- ULR fino a 2.5: 1 colpo;
- ULR fino a 4: 2 colpi;
- ULR fino a 8: 3 colpi.

Il secondo parametro di processo è il rapporto di ricalcatura per (*UDR-Upset Diameter Ratio*) e determina il diametro massimo di ricalcatura ottenibile. Si calcola come il rapporto fra diametro finale e diametro iniziale. Anche in questo caso, come in quello dell'ULR, il valore del parametro UDR dipende dal materiale ma, a differenza del primo caso, anche dalle condizioni di lubrificazione e dalle forme degli stampi e dei punzoni. Generalmente, per rapporti compresi tra 2 e 2.5 vengono utilizzati stampi chiusi. Dal valore di 3 in poi vengono utilizzati stampi aperti.

Per la progettazione dell'operazione di formatura sono utilizzati altri parametri, come ad esempio la deformazione di ricalcatura, definita come il logaritmo naturale del rapporto tra la lunghezza dello spezzone iniziale e quello finale $\varepsilon = \ln (l_0/l_f)$, in cui come regola empirica si imposta generalmente il parametro $\varepsilon = 1,6$. Un altro parametro da tenere in conto è quello per la successione delle operazioni, in cui si prendono i seguenti accorgimenti:

- non superare il 35% di riduzione della sezione per un acciaio con l'estrusione aperta;
- non superare il 70%-75% di riduzione della sezione per un acciaio sottoposto ad estrusione controllata;

- procedere preferibilmente con una ricalcatura prima di un estrusione aperta;
- eseguire per prima la riduzione maggiore nel caso di estrusioni multiple;
- limitare al 30% massimo la riduzione di sezione nel caso di estrusione doppia diretta;
- limitare a tre il numero di estrusioni sulla stessa porzione assiale;
- avere una riduzione di sezione minima del 25% e massima del 70%-75% nel caso di estrusione indiretta.

2.3. Macchinari utilizzati

I processi di *cold-heading* prevedono l'utilizzo di macchine orizzontali che vengono alimentate da filo continuo proveniente da vergella nel caso di elevate produttività, come nel caso della Sater s.r.l. Il numero delle operazioni che esse possono eseguire dipende dal numero di stazioni presenti. Un esempio di macchine presenti in azienda è illustrato in figura 10⁽¹⁰⁾ in cui si possono notare le singole stazioni della pressa.

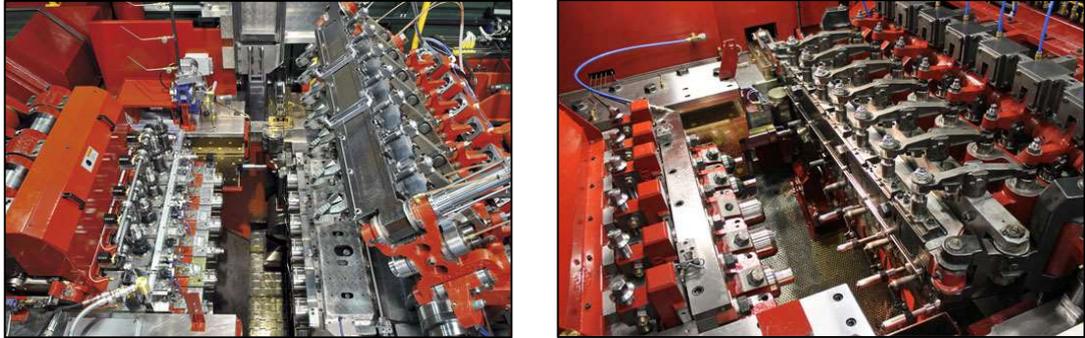


Fig.10 – Esempio di multistazione in cui è possibile osservare le singole stazioni della pressa

Nel metodo convenzionale il filo di materiale del componente viene trasportato all'interno della prima stazione, dove si fermerà al contatto con una piastrina. Questa, in base alla scelta dell'operatore, determinerà la lunghezza di filo da tagliare, che verrà trasferito mediante apposite pinze dette *transfert* alla stazione successiva. In figura 11 è illustrato il meccanismo di taglio dello spezzone iniziale.

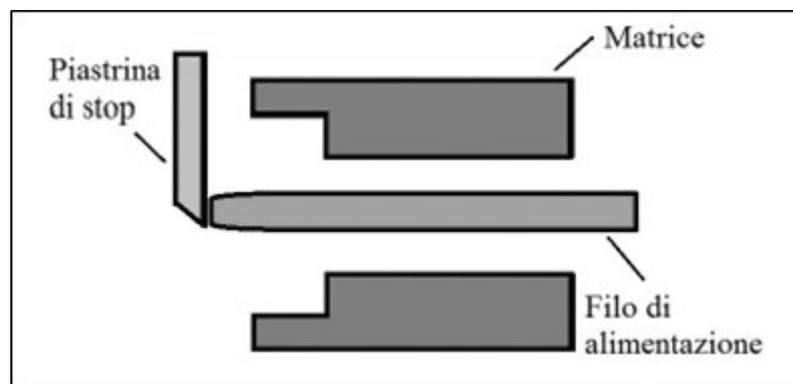


Fig.11 – Schema esemplificativo del taglio dello spezzone iniziale

Le stazioni successive prevedono la presenza di una matrice, di un punzone e di un eiettore, che si occupano della lavorazione sul componente. Il punzone si muove in avanti forzando l'entrata del componente nella matrice. In contemporanea il transfer, il quale aveva posizionato lo spezzone davanti all'apposita matrice, torna nella sua posizione iniziale per movimentare il componente successivo. L'eiettore presente nella matrice, invece, ha dapprima il compito di fermare il flusso plastico del filo e successivamente quello di espellere lo spezzone dalla matrice una volta che il componente ha subito la lavorazione progettata. Tali applicazioni avvengono in contemporanea in ogni stazione, al fine di produrre elevate quantità di componenti al minuto.

Per quanto riguarda i materiali e le geometrie in cui sono realizzati i componenti all'interno della pressa multi-stazione, essi sono diversi e sono correlati al compito che deve svolgere il singolo componente all'interno della pressa. La matrice è generalmente composta da un unico pezzo di metallico, con geometria cilindrica e con un foro (sagomato) presente lungo il suo asse. Tuttavia alcune matrici, presenti anche nelle presse multi-stazione della Sater s.r.l., sono realizzate con due materiali: si ha sempre un cilindro metallico, ma con foro ricavato in un inserto coassiale, al fine di garantire maggiori durezza e resistenza ad usura alla superficie dell'attrezzatura che va in contatto con lo spezzone da deformare. In figura 12 un esempio di matrice di una pressa multistazione.

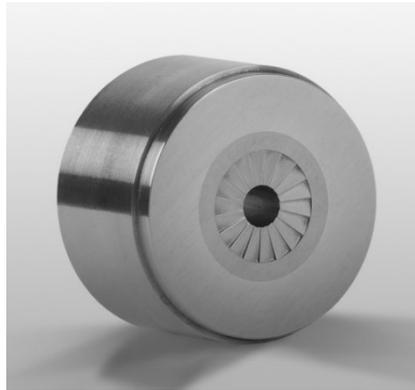


Fig.12 – Esempio di matrice in metallo duro di una pressa multistazione⁽¹¹⁾

L'inserto della matrice è generalmente composto da metallo duro o *widia*, un materiale costituito dalla presenza di particelle dure di carburo di tungsteno inglobate in una matrice metallica, generalmente di cobalto ed è prodotto mediante un processo di sinterizzazione da polveri per rendere gli utensili realizzati in tale materiale estremamente duri⁽¹²⁾. La matrice è realizzata mediante bonifica, dopo la quale si procede all'allargamento del foro, in modo da eliminare eventuali distorsioni dovute alla tempra e all'inserimento dell'inserto.

Per quanto riguarda l'operazione di ricalcatura con la quale si va a realizzare la testa del componente, la cavità può essere presente sia nella matrice che nel punzone, ma l'importante è che sia presente la possibilità di estrarre il pezzo durante la lavorazione. Quando si va a ideare un ciclo per la produzione di un componente è da tenere presente che la modifica del design del componente o del ciclo produttivo potrebbe causare una variazione nella vita degli utensili:

maggiore è lo sforzo richiesto alle attrezzature durante la realizzazione di un *fastener*, minore sarà la vita dell'attrezzatura, con la conseguenza di un maggiore costo produttivo per quel componente. Bisogna inoltre considerare le tensioni residue presenti nell'inserito e la posizione degli sfiati durante la progettazione del ciclo, in quanto è necessario che l'aria o l'olio lubrificante sfiatino dall'interno dei macchinari, in modo da non aumentare deformazioni non volute allo spezzone o da non favorire l'aumento indesiderato delle sollecitazioni all'interno delle presse multi-stazioni.

I materiali utilizzati per la realizzazione delle attrezzature devono essere caratterizzati principalmente da elevata resistenza all'usura, elevata tenacità, elevata durezza, resistenza a compressione e a fatica. Per i punzoni possono essere usati utensili temprati in acqua come ad esempio il W1 o il W2 quando, i carichi presenti non sono eccessivi, o anche acciai rapidi per lavorazioni a freddo come il M2 o M4. Questi ultimi vengono preferiti quando è necessario avere utensili con maggiore durezza e un buon grado di tenacità. In alternativa possono essere utilizzati gli acciai rapidi della classe HS, quando si vuole favorire lo smaltimento del calore⁽¹³⁾. Per aumentare ulteriormente lo standard qualitativo rispetto al metallo lavorato, si possono ottenere acciai ricavati mediante metallurgia delle polveri, realizzando in tal modo utensili più performanti, grazie alla mancanza di difetti come porosità e segregazioni e con miglior distribuzione dei carburi e taglia del grano più fine. Per quanto riguarda le matrici già citate, i materiali utilizzati per la loro realizzazione possono essere sempre acciai W1 e W2, quando non

sono presenti inserti, altrimenti si vara su metalli meno duri accoppiati ad inserti realizzati in metallo duro o acciai alto-legati (quest'ultimi più economici ma meno performanti).

Per aumentare la vita di utilizzo degli utensili occorre ricorrere a rivestimenti in PVD o CVD⁽¹⁴⁾. Il primo richiede temperature di circa 500° e consente di creare rivestimenti con uno spessore tale da non incidere sulle tolleranze (circa 1µm-5 µm) e da non richiedere lucidatura al termine del processo; il secondo richiede temperature comprese tra i 950°C e 1050°C e può incidere sulle tolleranze dei prodotti. Mentre con il PVD possono essere ottenuti rivestimenti in TiN, TiCN e TiAlN, con il CVD si possono realizzare rivestimenti in TiN e TiCN.

L'azione della pressa è dovuto alla trasformazione da un moto circolare ad un moto rettilineo grazie all'uso di un meccanismo articolato, il meccanismo biella-manovella⁽¹⁵⁾(fig.13).

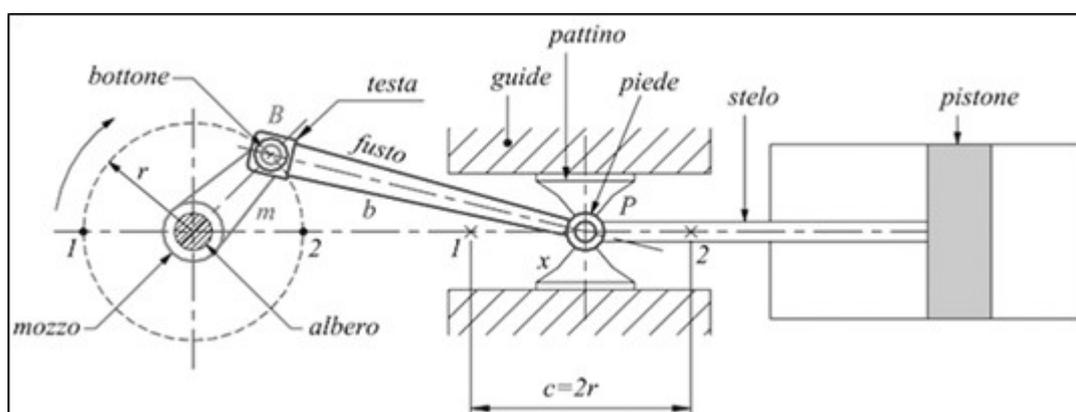


Fig.13 – Meccanismo biella-manovella⁽¹⁶⁾

In tale sistema di trasmissione il moto rotatorio della manovella viene trasformato in un moto rettilineo grazie all'utilizzo di una biella, un'asta articolata ai due estremi con la manovella e un pistone (o stantuffo). Il meccanismo biella-manovella rappresentato in figura 14 mostra tre fasi distinte.

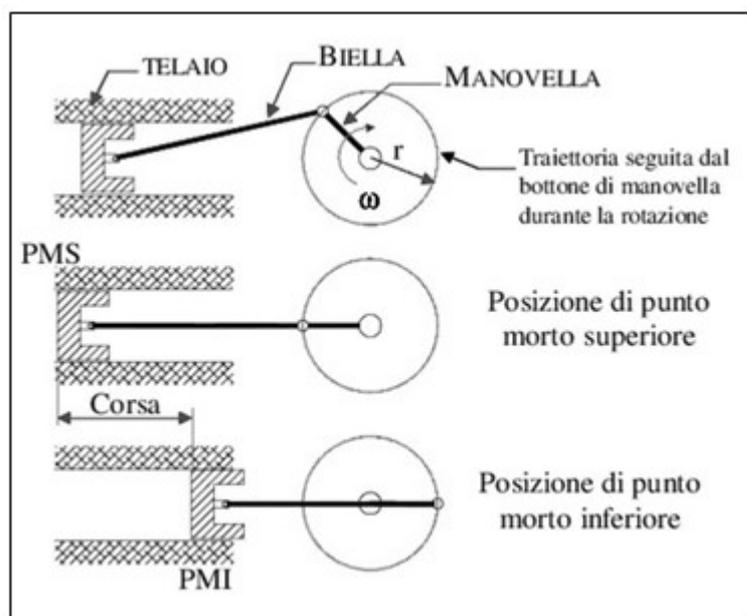


Fig.14 – Meccanismo biella-manovella rappresentato in tre fasi distinte

Dal punto di vista puramente cinematico il moto del meccanismo biella-manovella può essere assimilato a quello di un'asta rigida i cui estremi descrivono traiettorie diverse, e precisamente il piede si muove di moto rettilineo mentre la testa descrive una traiettoria circolare (fig.15).

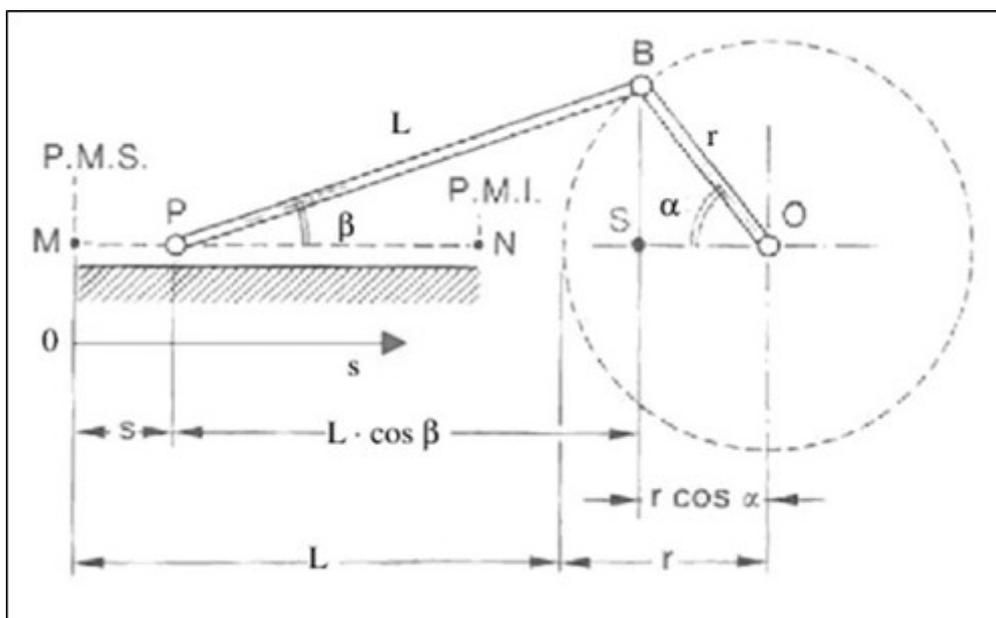


Fig.15 – Moto del meccanismo biella-manovella

Se il punto B, detto bottone di manovella, si muove di moto uniforme su una circonferenza di raggio r e velocità v , il punto P, detto piede della biella e collegato al punto B mediante la biella di lunghezza L , è obbligato a spostarsi lungo la retta OM e compiere uno spostamento massimo pari al doppio del raggio r della manovella. Se viene posto $\mu = L/r$, dove L è la lunghezza della biella e r il raggio della manovella, lo spostamento s del piede della manovella, che

rappresenta a tutti gli effetti il pistone, dipende dall'angolo di rotazione della manovella α . Tale spostamento s viene calcolato con la seguente formula:

$$s = r \times (1 - \cos\alpha + \mu - \sqrt{\mu^2 - \sin^2 \alpha})$$

Durante la realizzazione di componenti all'interno della pressa multistazione l'operatore imposta la velocità di rotazione della biella e, dunque, anche la velocità di traslazione del pistone e lo spostamento che questo deve compiere durante le lavorazioni meccaniche.

2.4. Le prove meccaniche

Per caratterizzare il comportamento di un determinato materiale è necessario conoscere il suo comportamento reologico. Per tale motivo è necessario studiare come varia lo sforzo necessario per deformare plasticamente il materiale all'aumentare della deformazione. Tale sforzo è noto come *flow stress*. Questo, in alcuni casi, aumenta all'aumentare della deformazione, a causa dell'incrudimento di altri materiali, in altri casi diminuisce. Esso dipende da vari fattori, come la temperatura, la deformazione e la velocità di deformazione del materiale. Poiché nel presente lavoro si

analizza un componente prodotto mediante deformazione a freddo, l'effetto della velocità di deformazione sul *flow stress* è trascurabile. Molto spesso la sua curva, ottenuta per una deformazione a temperatura ambiente, segue una legge esponenziale del tipo $\sigma = K\varepsilon^n$, in cui σ rappresenta il *flow stress*, ε la deformazione, K ed n delle costanti che dipendono dal materiale e prendono il nome di coefficiente di sforzo ed esponente di incrudimento⁽¹⁷⁾.

Ora verranno passate in rassegna le comuni prove uniassiali che si conducono per ricavare una corretta curva reologica.

2.4.1. Prova di trazione a temperatura ambiente

Il metodo più comune per valutare sperimentalmente le caratteristiche meccaniche di un materiale è rappresentato dalla prova di trazione. Essa consiste nel sottoporre una provetta normata a carico di trazione assiale crescente, generalmente fino a produrne la rottura. Durante la prova si registrano coppie di valori carico-allungamento per costruire il relativo diagramma⁽¹⁸⁾. L'esecuzione delle prove è regolata da norme che descrivono i parametri geometrici delle provette, la modalità di applicazione del carico ed i procedimenti utilizzati per l'elaborazione dei risultati.

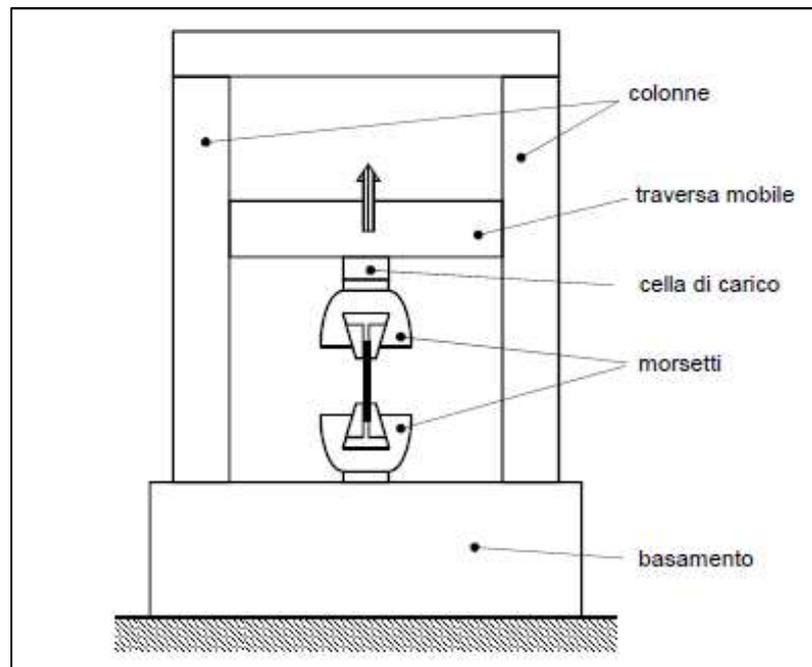


Fig.16 – Schema di macchinario per la prova a trazione

La misura della forza esercitata dal macchinario sulla provetta è ottenuta per mezzo di un apposito dinamometro chiamato “cella di carico”, funzionante per mezzo di un circuito estensimetrico posto in serie sul sistema di applicazione della forza di trazione. La misura dell’allungamento della provetta è eseguita in due modi diversi a seconda della precisione richiesta e dell’entità dell’allungamento stesso:

- misurando lo spostamento della traversa mobile si rileva qualunque livello di allungamento, ma la precisione non è elevata (errori dovuti ai giochi metallici e alla deformabilità della traversa);

- utilizzando un estensometro che viene agganciato alla provetta e misura l'allontanamento tra due sezioni di riferimento; la precisione è molto elevata ma la corsa misurabile è breve.

La risposta dei materiali metallici sottoposti a trazione è diversa a seconda del tipo di materiale e dei trattamenti che questo ha subito, sia in termini qualitativi che in termini quantitativi. Durante la prova la sezione retta del provino è sollecitata dall'unica componente di tensione perpendicolare, che è la tensione principale. I dati rilevati nel corso di tale prova sono riportati su un diagramma forza-allungamento o, dividendo la prima per la sezione iniziale del calibrato, su un diagramma tensione-allungamento. Nella prove di tutti i materiali si può osservare che nella fase iniziale della prova, finché il carico si mantiene sufficientemente basso, il comportamento del materiale è elastico e il corrispondente tratto del diagramma è lineare. La pendenza di tale retta nel diagramma forza-allungamento rappresenta il modulo elastico E del materiale. Continuando ad esercitare la trazione sulla provetta, si arriva ad un livello tale per cui la forza e l'allungamento cessano di essere proporzionali e il diagramma si scosta dalla linearità. Da questo punto in poi il comportamento della curva si differenzia a seconda del tipo di materiale in esame.

Per alcuni materiali, come ad esempio per gli acciai a basso contenuto di carbonio, al termine del tratto elastico la forza cessa

improvvisamente di salire, mentre la provetta continua a deformarsi. Tale fenomeno segna la fine del comportamento elastico del materiale e l'inizio delle deformazioni plastiche. Successivamente, continuando ad esercitare la trazione sulla provetta, la forza riprende a salire, ma con pendenza di gran lunga inferiore a quella del tratto elastico: siamo nella fase delle deformazioni plastiche aventi entità assai superiori a quelle elastiche. In tale fase il volume del materiale si mantiene approssimativamente costante e l'allungamento è compensato da una contrazione trasversale. Il fatto che la forza continui a salire, nonostante la riduzione della sezione indica che il carico necessario per la deformazione del materiale cresce in misura tale da compensare la perdita di sezione resistente: il fenomeno prende il nome di incrudimento. Questo comportamento prosegue finché la curva presenta un massimo valore di forza, detto carico di rottura. Da questo punto in poi si verifica la riduzione di una zona localizzata della provetta, fenomeno detto strizione, che antecede il momento di rottura del provino, che sarà determinata da un'ulteriore forza necessaria all'allungamento della provetta.

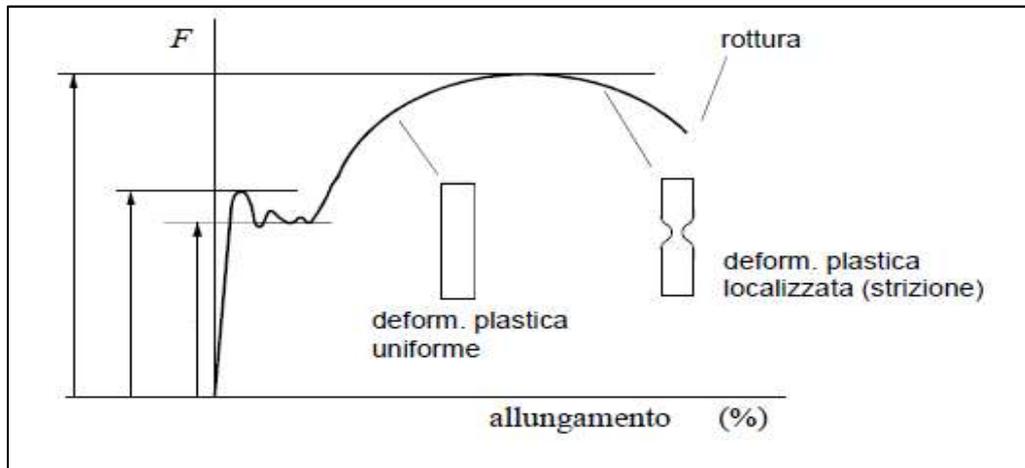


Fig. 17 – Esempio di una curva forza-deformazione di un materiale a bassissimo contenuto di carbonio

Per altri materiali, come ad esempio gli acciai a medio contenuto di carbonio, il fenomeno dello snervamento non è evidente, mentre è osservabile una semplice e progressiva deviazione dalla linearità. Anche in questo caso il termine della prova è dettato dalla rottura del provino.

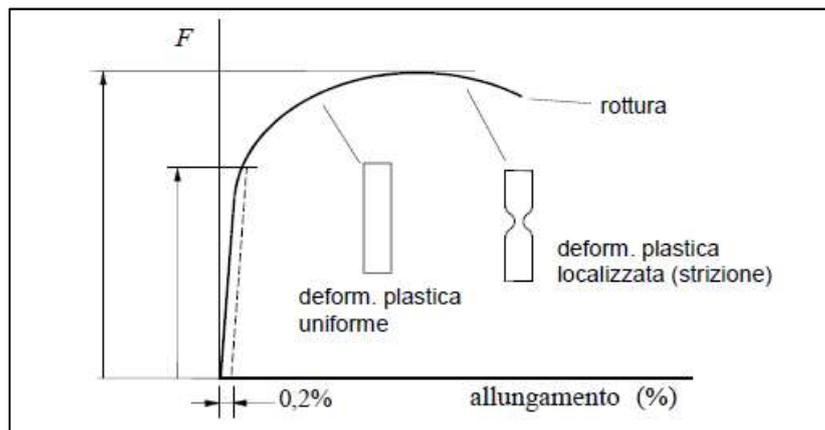


Fig. 18 – Esempio di una curva forza-deformazione di un materiale a medio contenuto di carbonio

Per alcuni materiali, come ad esempio le ghise grigie, la fase delle deformazioni plastiche è assente o praticamente trascurabile. La rottura si manifesta immediatamente alla fine del tratto elastico della curva.

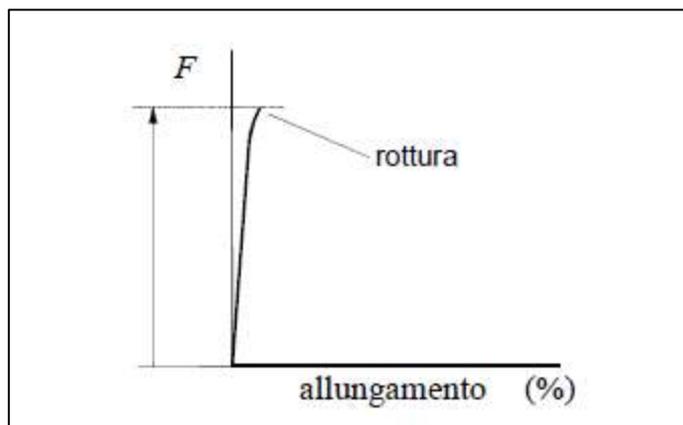


Fig.19 – Esempio di una curva forza-deformazione di un materiale ad elevato contenuto di carbonio

Le prove di trazione danno la misura dell'allungamento dopo rottura. Riaccostando, infatti, i due spezzoni della provetta, si può calcolare la lunghezza finale L_f tra i due riferimenti tracciati prima della prova a distanza L_0 . Tale lunghezza è utilizzata per la misura dell'allungamento a rottura A

$$A = 100 * \frac{L_f - L_i}{L_i}$$

Tale tipo di allungamento, infatti, permette di definire il tipo di materiale in analisi:

- un materiale con $A > 10\%$ è definito materiale duttile;

- un materiale con $A < 5\%$ è definito materiale fragile;
- un materiale con $5\% < A < 10\%$ ha un comportamento intermedio tra fragilità e duttilità.

Dal grafico riportato in figura 17 si evince il comportamento di un materiale duttile, quello in figura 19 rappresenta il comportamento di un materiale fragile.

2.4.2. Prova di compressione

Questo test viene utilizzato per ricavare la curva reologica dei metalli a differenti temperature e per ampi range di deformazione, e consiste nella compressione di un provino cilindrico. La macchina utilizzata è come quella utilizzata per la prova di trazione, con la differenza che non si hanno degli afferraggi che vanno allontanandosi, ma delle piastre che vanno avvicinandosi. La corretta esecuzione della prova è garantita quando il campione viene ricalcato senza il fenomeno del *barreling* (ingobbimento) e quando viene garantito il mantenimento di uno sforzo uniassiale sul cilindro. Il fenomeno dell'ingobbimento viene limitato ricorrendo ad una lubrificazione adeguata. Nel caso in cui la prova venga condotta a temperatura ambiente si potranno utilizzare lubrificanti solidi o olio lubrificante; nel caso in cui la prova venga condotta a caldo, invece, si utilizzerà grafite in olio per leghe di alluminio, vetro fuso per acciai, leghe di titanio e altre leghe resistenti alle alte temperature. L'assenza dell'attrito e lo sforzo

uniassiale permetteranno di ricavare così una curva sforzo-deformazione che coincida con la curva reologica del metallo. Il cilindro su cui si effettua la prova deve essere in grado quindi di trattenere il lubrificante, caratteristica di cui è dotato il provino Rastegaev a cui si fa ricorso, perché lo stesso dispone di una geometria tale da permettere l'intrappolamento del fluido lubrificante. Un altro accorgimento da prendere per effettuare questo test è la verifica del parallelismo tra le piastre che effettuano la compressione e le sezioni circolari del provino: in assenza di tale condizione, lo sforzo sul cilindro non risulterà uniassiale.

2.4.3. Prova di flessione

La prova di flessione permette di determinare il modulo di Young e quindi di stimare la tensione di rottura di materiali fragili; tale tensione deve essere indicata come tensione di rottura *a flessione srf*. Nella prova *a tre punti* i provini vengono vincolati con due appoggi nella parte inferiore e caricati al centro da un cuneo solidale alla traversa mobile della macchina. Nella prova *a quattro punti* la traversa mobile spinge due cunei disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria del provino. Nel corso della prova si misurano lo spostamento della traversa Y , coincidente con la freccia in mezzeria, e il carico applicato $F^{(15)}$. In figura 20 un esempio della geometria del provino a flessione.

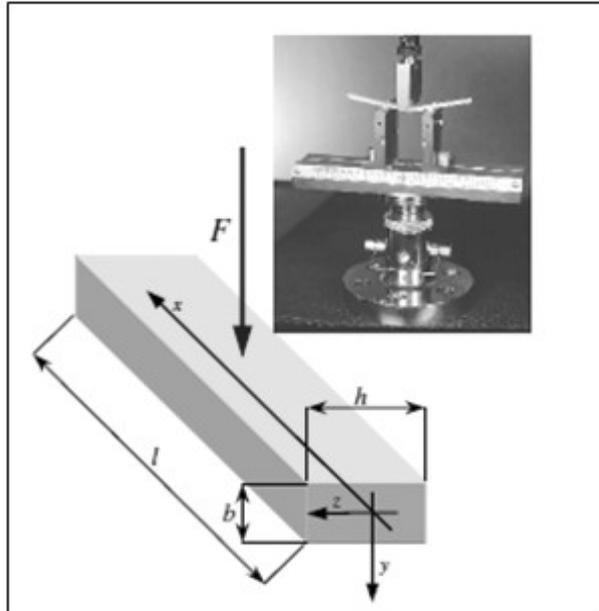


Fig. 20 – Esempio di provino a flessione

La prova di flessione presenta i seguenti vantaggi:

- semplicità d'afferraggio ed esecuzione;
- semplice geometria del provino, generalmente a sezione rettangolare;
- spostamenti ampi di misurazione più precisa.

Poiché la tensione varia linearmente lungo lo spessore, lo snervamento viene raggiunto inizialmente solo in un sottile strato superficiale; superato il campo elastico, inoltre, gli spostamenti misurati non possono essere utilizzati per calcolare le deformazioni e l'unica informazione utile è la forza a rottura F_r . La prova di

flessione risulta, quindi, poco sensibile per la determinazione dell'inizio dello snervamento ed è adatta alla caratterizzazione di materiali fragili con comportamento lineare.

La geometria del provino è descritta dai seguenti parametri:

- l =lunghezza utile (la parte tra gli appoggi);
- b =larghezza della sezione;
- h =altezza della sezione.

La tensione massima agisce in mezzeria sulla superficie del lato teso ($x=l/2$, $y=h/2$). Nel caso di flessione a tre punti essa può essere espressa mediante la formula di Navier come segue:

$$\sigma = \frac{3}{2} \frac{l}{(bh^2)} F$$

La deformazione massima, a sua volta, può essere espressa nel seguente modo:

$$\varepsilon = \frac{6h}{l^2} Y$$

In teoria il modulo di Young potrebbe essere valutato con una qualsiasi coppia di valori F , Y misurati in campo elastico mediante la seguente relazione

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{1}{4} \frac{l^3}{bh^3} \frac{F}{Y}$$

Una migliore precisione può essere ottenuta utilizzando due punti sperimentali nel seguente modo:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{1}{4} \frac{l^3}{bh^3} \frac{\Delta F}{\Delta Y}$$

In particolare, utilizzando i punti $F_1=Fr/10$, Y_1 e $F_2=Fr/2$, Y_2 si ottiene:

$$E = \frac{1}{10} \frac{l^3}{bh^3} \frac{F_r}{Y_2 - Y_1}$$

Riscrivendo le equazioni precedenti utilizzando la pendenza K della retta $F(Y)$, che descrive l'andamento del carico in funzione della freccia in campo elastico, ovvero $K = F/Y = \Delta F/\Delta Y$ si ottiene la seguente formula

$$E = \frac{1}{4} \frac{l^3}{bh^3} K$$

Questa relazione permette di calcolare E nel caso in cui K può essere stimato dai dati sperimentali F - Y nella zona lineare, ad esempio mediante regressione lineare.

2.4.4. Prove di durezza

La *durezza* è l'attitudine degli strati superficiali di un materiale a resistere all'indentazione (creazione di una impronta sulla superficie), alla scalfittura, all'abrasione e alla deformazione per compressione. La durezza si determina creando un'impronta sulla superficie del materiale mediante un elemento penetratore (*indentatore*), che viene pressato ortogonalmente alla superficie in modo statico con un valore di carico F prefissato e misurando una dimensione caratteristica dell'impronta stessa. Esistono vari metodi (Brinell, Rockwell, Vickers e Knopp) che si differenziano per la forma del penetratore e per il modo di misurare l'impronta. Le prove di durezza non sono distruttive e possono essere eseguite direttamente sul componente.

Durezza Brinell

La prova di durezza Brinell viene effettuata con una sfera con diametro $D=10\text{mm}$ e carichi F pari a 500, 1500 o 3000 Kg applicati per un periodo superiore a 15 sec. La durezza Brinell HB è espressa con un numero risultante dal rapporto tra il carico e l'area dell'impronta costituita da un segmento di sfera di diametro d in millimetri, ottenuto mediante la seguente equazione:

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Il numero di durezza Brinell può essere usato per ottenere una stima della resistenza a trazione degli acciai o delle ghise, per le quali si hanno rispettivamente:

$$\sigma_r = 3.1 HB \quad \sigma_r = 1.58HB - 86$$

con le tensioni espresse in MPa.

Durezza Rockwell

La prova di durezza Rockwell viene effettuata con due diversi tipi di indentatori e vari valori di forza. Le combinazioni danno luogo a diverse scale di misura (tab.3) e i valori ottenuti possono essere confrontati solo se appartengono alla stessa scala. La grandezza che viene misurata nella prova Rockwell è la profondità di penetrazione h determinata come differenza tra l'affondamento h_1 ottenuto ad un valore di carico iniziale, detto *carico minore* pari a 10kg, e l'affondamento h_2 ottenuto al carico di prova finale, detto carico maggiore. Gli indentatori sono dati da un diamante conico con angolo al vertice di 120° (indentatore di Brale) e sfere con diametri tra 1.588 e 12.7 mm. I carichi variano tra $F=60\text{Kg}$ e $F=150\text{ Kg}$. Le

combinazioni, le sigle delle scale e i campi di applicazione sono riassunte in Tabella 1.

Scala X	Indentatore	Carico [kg]	Max	Applicazione
A	Brale	60	100	Materiali per utensili
B	Brale	100	130	Ghise, lastre metalliche
C	Brale	150	100	Acciai, leghe di alluminio, ghise dure
D	1.588	100	100	Acciai teneri, leghe di alluminio e rame
E	3.175	100	130	Metalli teneri, polimeri rinforzati
M	6.350	100	130	Metalli molto teneri, polimeri con alto modulo
R	12.70	60	130	Metalli molto teneri, polimeri con basso modulo

Tabella 1 - Scale di durezza Rockwell

Il valore della durezza si ottiene mediante la relazione

$$HRX = Max - \frac{h}{0.02},$$

nella quale ad X deve essere sostituita la lettera relativa alla scala e Max è il valore massimo di quest'ultima.

Durezza Vickers

Questa tecnica è stata introdotta per le misure di durezza di materiali estremamente duri. Utilizza un penetratore di diamante a forma di piramide a base quadrata. I carichi variano da 1 a 120 Kg e l'angolo al vertice è di 136°. L'impronta (piramide a base quadrata) per essere valida deve essere perfettamente regolare e, se misurando le diagonali si ottengono valori troppo diversi, allora occorre ripetere

la misura. Per minimizzare questo errore si effettuano 3 misurazioni, di cui si considera il risultato medio. Le misure delle lunghezze delle diagonali (mi interessa la media al quadrato) sono prese attraverso un microscopio.

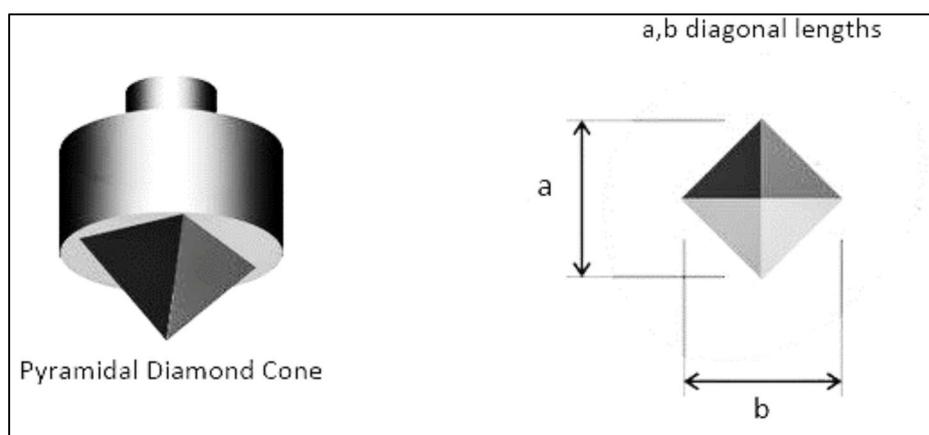


Fig. 21 – Esempio di indentatore per prova Vickers

Tale tecnica è molto precisa, ma molto costosa perché il penetratore presenta una punta in diamante che si rompe facilmente se l'ortogonalità non viene rispettata (il diamante è duro e fragile, se sottoposto a flessione si rompe). Questo tipo di misura è presa quasi esclusivamente in laboratorio, perché non è da officina.

Un altro problema del penetratore di diamante è il fatto che si possa scheggiare e in questo caso occorre sostituirlo. Tuttavia è molto difficile accorgersi delle piccole scheggiature.

La durezza Vickers di un materiale si calcola con la seguente formula:

$$\text{Durezza Vickers} = \frac{1.854}{d^2} F$$

Durezza Knoop

Il test di durezza Knoop viene fatto con un indentatore simile a quello usato per determinare la durezza nella scala Vickers. L'indentatore anche in questo caso ha una punta di diamante con forma piramidale, ma con base romboidale allungata anziché quadrata come nella prova Vickers. Il carico applicato varia normalmente da 5 a 25 kg. È chiamato anche "test di microdurezza" perché le dimensioni dell'impronta vengono lette con un microscopio. In figura 22 è illustrata la geometria dell'indentatore utilizzato per la prova di durezza Knoop⁽¹⁹⁾.

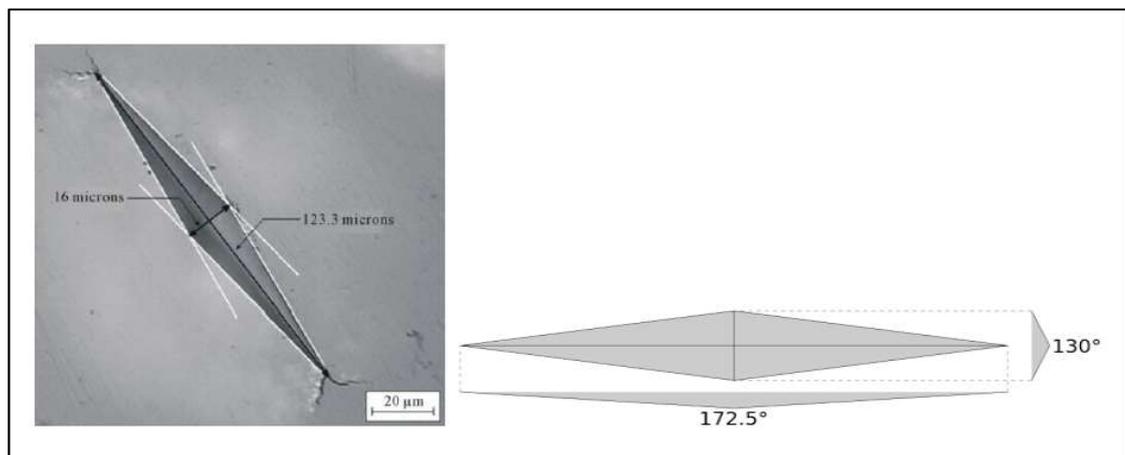


Fig. 22 – Indentatore utilizzato per la prova Knoop

Una volta noto il carico applicato P in Kg e la lunghezza L dell'indentazione lungo la diagonale maggiore espressa in mm, il

valore HK di durezza nella scala di Knoop viene calcolato con la seguente formula:

$$HK = \frac{P}{C_p L^2}$$

dove C_p è un fattore di correzione dipendente dalla forma dell'indentatore, idealmente 0,070279.

Uno dei motivi che porta alla scelta della scala di durezza Knoop è dato dal fatto che, avendo l'indentatore degli angoli diversi, evidenzia facilmente se si sta analizzando un materiale fragile o duttile, perché nel primo caso dall'angolo acuto partono delle cricche.

2.5. Analisi FEA e simulatore FEM

La tecnica di analisi FEA, acronimo che sta per *analisi agli elementi finiti* è una tecnica di simulazione al computer utilizzata per eseguire analisi ingegneristiche. Questa tecnica di simulazione prevede l'utilizzo del metodo degli elementi finiti (FEM- *Finite Element*

Method), il cui obiettivo è essenzialmente la risoluzione in forma discreta di generali sistemi di equazioni alle derivate parziali⁽²⁰⁾. Con tale metodo è possibile simulare i processi di *metal working* al fine di predire i flussi dei metalli ed eventuali difetti che si vengono a creare durante i processi di formatura, e dunque per ottimizzare tali processi. I vantaggi principali dell'analisi agli elementi finiti FEA consistono nella possibilità di trattare problemi di campo:

- definiti su geometrie complesse;
- relativi ad una larga varietà di problemi ingegneristici, riguardanti ad esempio la meccanica dei solidi, dei fluidi, i flussi di calore e problemi elettrostatici;
- trattare complesse condizioni di vincolo;
- trattare complesse condizioni di carico.

Il metodo FEM si applica a corpi fisici suscettibili di essere suddivisi in un certo numero, anche molto grande, di elementi di forma definita e dimensioni contenute. Nel continuum, ogni singolo elemento viene considerato un campo di integrazione numerica di caratteristiche omogenee⁽²¹⁾. La caratteristica principale degli elementi finiti è la discretizzazione attraverso la creazione di una griglia, o *mesh* (figura 23) composta da elementi finiti (primitive) di forma codificata, come ad esempio triangoli e quadrilateri per domini in 2D e esaedri per domini 3D.

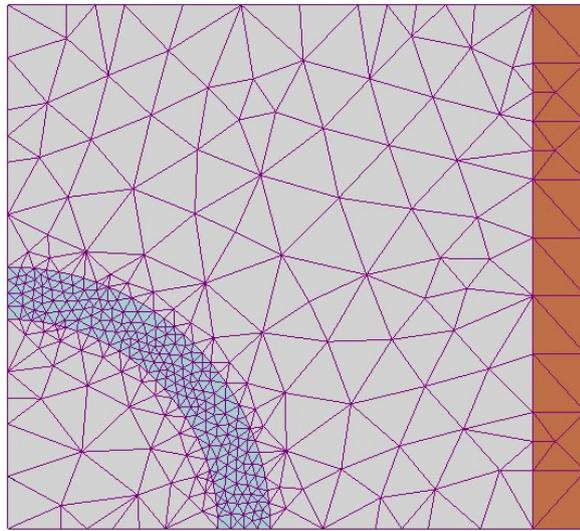


Fig.23 – Esempio di *mesh*. Si noti l'infittirsi di quest'ultima in prossimità dell'oggetto di interesse

Si ritiene che, per ciascun elemento caratterizzato da questa forma elementare la soluzione del problema sia espressa dalla combinazione lineare di funzioni di base dette anche funzioni di forma. E' importante notare che tale funzione viene approssimata e che, pertanto, non saranno necessariamente i suoi valori esatti quelli calcolati nei punti, ma i valori che forniranno il minor errore su tutta la soluzione.

Nella sua forma originaria e tuttora più diffusa il metodo agli elementi finiti viene utilizzato per risolvere problemi poggianti su leggi costitutive di tipo lineare, quali i problemi di sforzi, deformazioni in campo elastico, la diffusione del calore all'interno di un corpo materiale. Alcune soluzioni più raffinate consentono di esplorare il comportamento dei materiali anche in campo fortemente non lineare, consentendo di ipotizzare comportamenti di tipo plastico o visco-

plastico. A volte, si considerano problematiche *accoppiate*, all'interno delle quali si possono risolvere simultaneamente diversi aspetti complementari riconducibili ciascuno per conto proprio ad un'analisi F.E.M. separata⁽²²⁾.

Oggigiorno è disponibile una grande varietà di software di analisi agli elementi finiti. Comune a tutti i pacchetti di tale software è la suddivisione dell'analisi in tre steps:

- fase di pre-processing, in cui è costruito il modello ad elementi finiti;
- fase di processing, in cui viene condotta l'analisi vera e propria con la risoluzione del problema agli elementi finiti;
- fase di post processing, che rappresenta la soluzione.

La fase di pre-processing si articola in ulteriori sei steps:

- step 1, relativo alla scelta del tipo di analisi da effettuare (ad esempio analisi statica/dinamica o analisi lineare/non lineare);
- step 2, relativo alla scelta degli elementi finiti (se per problemi piani o tridimensionali);
- step 3, in cui si definiscono i parametri che caratterizzano il comportamento costitutivo dei materiali;
- step 4, relativo alla definizione del reticolo di nodi del problema discreto;

- step 5, fase di costruzione e discretizzazione ad elementi finiti, assegnando per ognuno i nodi a cui essi fanno riferimento;
- step 6, relativo alle applicazioni di vincolo e carico.

Le fasi di post-processing infine elabora e rappresenta la soluzione sia nelle quantità fondamentali, rappresentate direttamente in forma discreta nel metodo FEM (per esempio gli spostamenti in ambito strutturale) sia delle quantità da esse derivate, importanti nella fisica del problema analizzato. La fase di pre-processing e post-processing godono della possibilità di un'interfaccia grafica per l'interazione con l'utente.

2.6. Analisi degli stress sulle attrezzature

Quando si esegue una simulazione sul COLDFORM si ha la possibilità di scegliere se considerare le attrezzature rigide ed indeformabili o meno. Finora sono state considerate le rigide per concentrarsi solo sulla differenza derivante dalla diversa reologia del materiale.

Poiché nelle applicazioni reali gli stampi si deformano, si è deciso di investigare questo fenomeno, allo scopo di calcolare soprattutto gli stress a cui sono soggette le matrici.

Come detto precedentemente, le attrezzature consistono in un inserto che viene impiantato su una matrice. Nella realtà, tuttavia, non si ha a che fare solo con questi due componenti, in quanto è presente un terzo elemento (frapposto tra i due), chiamato camicia. La struttura totale è data quindi da un contenitore cilindrico esterno, nel caso di SATER s.r.l. un W720, al cui interno alloggia una camicia, realizzata in materiale duro qual è l'acciaio S600, e sulla quale viene impiantato l'inserto, che può essere in widia o sempre in S600. In questo modo è possibile preservare il componente più massivo, e quindi più costoso, dall'usura dovuta al continuo piantaggio e spiantaggio degli inserti che vengono cambiati quando è necessario mandare in produzione un componente diverso, permettendo di usurare in questo modo soltanto la camicia, di costo inferiore.

Per permettere al simulatore di calcolare le effettive deformazioni a cui sono soggette le attrezzature, è necessario fornire il modulo elastico dei materiali che le costituiscono. Il COLDFORM non ha disponibile il modulo elastico del materiale utilizzato per la camicia ma, utilizzando un acciaio, lo si imposta pari a $E = 200$, valore che il software offre per tutti gli acciai presenti nel suo database. Impostato tale parametro, si simulerà il processo di formatura dell'ultima stazione di stampaggio utilizzando gli stampi deformabili, di cui si calcoleranno gli sforzi e le deformazioni subite. Ci si concentra sull'ultima stazione sia perché viene considerata la più importante,

sia per economia di calcolo: le stazioni precedenti, infatti, possono essere considerate preparatorie, mentre è quella finale che restituisce il pezzo con le tolleranze desiderate. Con questa modalità, comunque, i tempi di computazione aumentano. Grazie all'analisi degli stress, è possibile prevenire rotture o danneggiamenti indesiderati e preservare la vita delle attrezzature.

Capitolo 3

Il ciclo produttivo

3.1. Il caso studio: la boccia

Questa tesi ha per obiettivo lo studio del processo produttivo di una boccia, già presente in Sater s.r.l., e della sua ottimizzazione finalizzata alla realizzazione di un prodotto finito esente dai difetti riscontrati nel precedente ciclo.

La boccia in questione è realizzata in C4C (denominazione secondo la norma UNIEN 10263-2), un acciaio a bassissimo contenuto di carbonio. In Tabella 2 è possibile osservare le specifiche tecniche.

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Al%
0,02%- 0,06%	0,10%	0,25%- 0,4%	0,02%	0,025%	0,02%- 0,06%

Tabella 2 –Specifiche tecniche della boccia in C4C

Il materiale della boccia dunque è un acciaio basso-legato austenitico con una struttura FCC, quindi un acciaio molto duttile. I metalli con struttura FCC e molti con struttura HCP inoltre non

mostrano transizione duttile-fragile, quindi non comportano un infragilimento del materiale all'abbassarsi della temperatura. La maggior parte di questi materiali infatti riduce l'energia assorbita. Per alcuni si verifica addirittura un aumento della duttilità al diminuire della temperatura. Ciò è dovuto al fatto che gli sforzi necessari a muovere le dislocazioni non sono fortemente dipendenti dalla temperatura nei CFC e quindi la frattura avviene per deformazione plastica invece che tramite la propagazione di una cricca in modo fragile⁽²³⁾.

Gli altri elementi invece presenti nella boccola le conferiscono altre proprietà importanti:

- fosforo P, che riduce la tenacità dell'acciaio e migliora la truciolabilità;
- zolfo S, che migliora la lavorabilità alle macchine utensili;
- manganese Mn, che migliora la combinazione resistenza-tenacità (può aumentare il tasso di incrudimento, effetto gammageno);
- alluminio Al, utilizzato come dissodante e affinante del grano;
- silicio Si, che associato al minerale di ferro è utilizzato come dissodante.

La dimostrazione dell'effettiva duttilità del materiale della boccola in C4C è offerta dalla curva di trazione in figura 24.

LAMINATO			CLIENTE	Q.LI	TRAFILATO			DUREZZE		Rm N/mm ²	Rp 0.2 N/mm ²	A5 %	Z %	Difetti Superficiali	CONTR. DIMEN.	COLATA	DATA
Sigla	Sez.	Misura			Esecuzione	Sez.	Misura										
T	10.60		SATER SRL				ACCIAIO C4C TRAF ROT T	10.60		380.1	.0	32.1	80.8	AC	10.55	-	13/11/2018 09.09

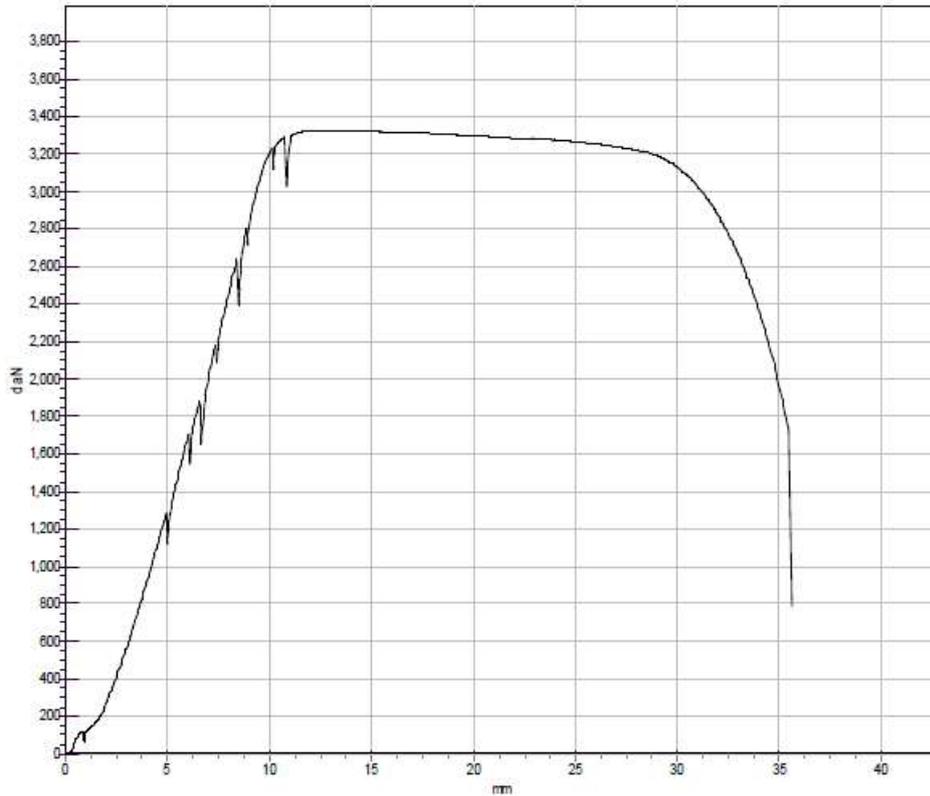


Fig. 24 – Curva carico-corsa del materiale C4C della boccia

Nella figura 24 il materiale C4C mostra una curva simile alla curva esemplificativa presente in figura 20. L'allungamento percentuale del 32 % inoltre conferma la duttilità di tale materiale. Difatti i processi di stampaggio a freddo vengono eseguiti su materiali notevolmente duttili per ottenere componenti con la forma desiderata, con elevata durezza data dall'incrudimento del materiale ed elevata stabilità dimensionale.

Una volta definito il materiale per la realizzazione della boccia è possibile passare all'illustrazione del primo ciclo, quello con il quale le boccie realizzate presentavano due difetti di notevole importanza, la perdita di smusso ad un capo e la superficie grippata. Successivamente verrà proposto e illustrato il secondo ciclo produttivo della boccia, nato dall'ottimizzazione del primo, grazie anche all'uso del simulatore COLDFORM. Come si vedrà la realizzazione della boccia questa volta risulterà senza difetti e con una qualità strutturale migliore.

Per dimostrare questo effettivo miglioramento, verranno messe a confronto alcune fasi cardine dei due cicli indicati, rivolgendo l'attenzione anche agli sforzi a cui le attrezzature sono sottoposte. In un bilancio aziendale e nel calcolo dell'efficienza di produzione della macchina va infatti tenuto conto dei fermi macchina dovuti alla sostituzione degli utensili all'interno di esse.

3.2. Il primo ciclo produttivo

Il primo ciclo produttivo, già sviluppato in Sater s.r.l., portava alla produzione di una boccia che presentava due macro-difetti notevoli, responsabili di un abbassamento delle performance e della qualità del pezzo finito.

Esso prevedeva l'utilizzo di una pressa multi-stazione, precisamente a 5 stazioni, in cui la vergella in C4C introdotta in macchina, veniva

tranciata nella prima stazione. Lo spezzone ottenuto delle dimensioni richieste, veniva poi trasferito con le pinze del *transfer* alle successive stazioni, per subire di stazione in stazione, le seguenti lavorazioni: un'estrusione inversa, per formare un foro interno alla billetta e un nottolino di determinate dimensioni; un'estrusione per ridurre il diametro della billetta ad un capo, in modo tale che essa entrasse solo per la sezione desiderata nella stazione della zigrinatura; la tranciatura del nottolino; la zigrinatura.

In figura 25 è presente lo schema che illustra l'intero primo ciclo produttivo. Sono state omesse le dimensioni per questioni di privacy aziendale.

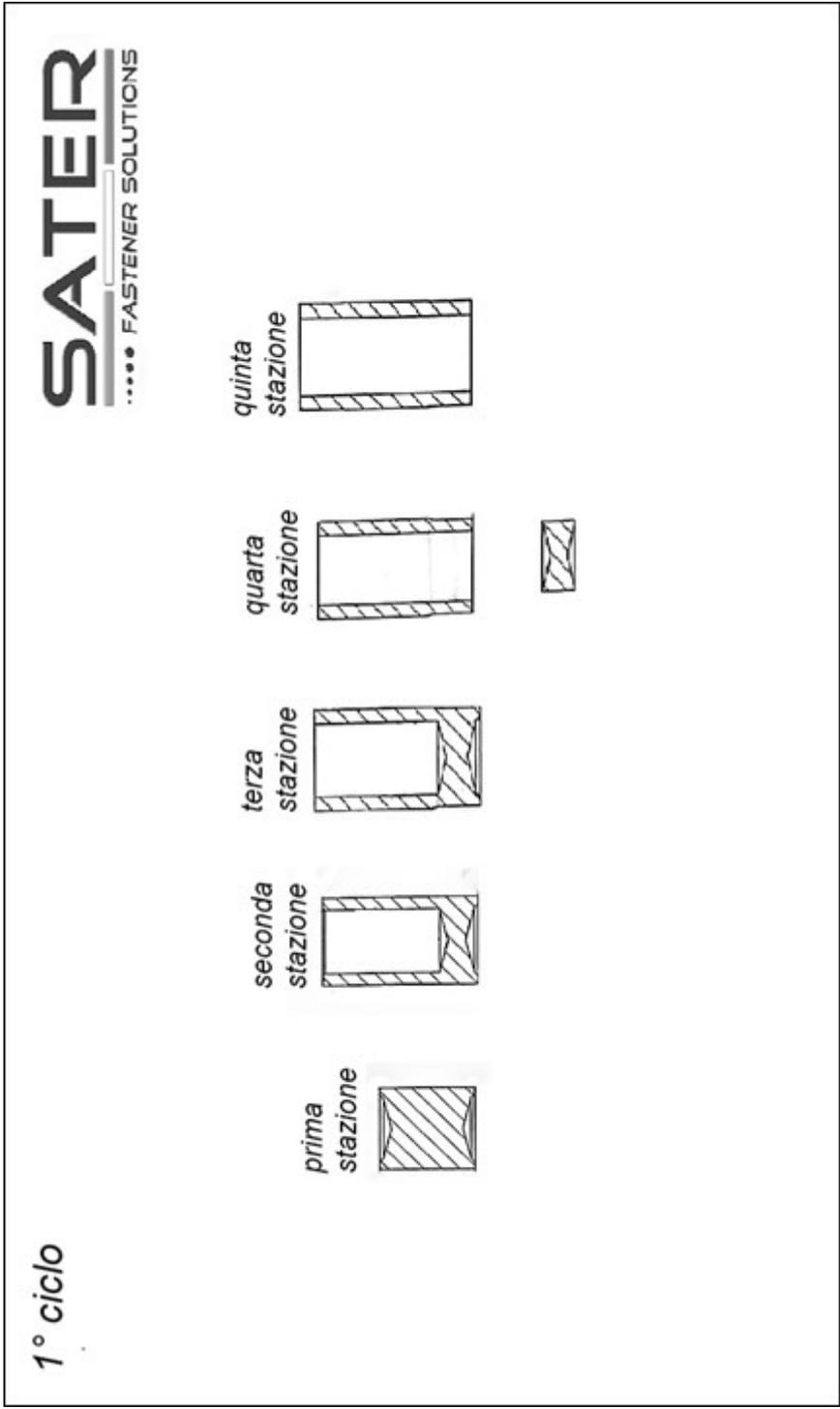


Fig.25 – Primo ciclo produttivo della boccola

Come si rileva chiaramente dal grafico, il procedimento seguito in precedenza in Sater s.r.l. constava di 5 passaggi e perciò necessitava di una pressa multi-stazione, precisamente una pressa a 5 stazioni. E' importante notare che, se la parte inferiore del componente illustrato si trova all'interno della matrice e la parte superiore è quella che subisce la lavorazione del martello, l'estrusione inversa e la tranciatura del nottolino avvengono dal lato martello, caratteristica importante di tale processo. E' utile, infine, notare anche che lo stadio di tranciatura del nottolino precede lo stadio di zigrinatura, che avviene nella quinta stazione. Questo, come vedremo nei paragrafi successivi relativi al confronto tra 1° e 2° ciclo produttivo, influenza notevolmente il processo. Al termine del secondo ciclo, infatti, le boccole prodotte non risulteranno grippate sulla superficie esterna e lo smusso prima perso risulterà presente all'estremità dello spezzone.

3.3. Il secondo ciclo produttivo

Il secondo ciclo produttivo nasce dall'ottimizzazione del primo: analizzando al simulatore COLDFORM i singoli passaggi del primo

ciclo, con l'intento di capire quali fossero i possibili step da migliorare, si è elaborato un percorso alternativo per la produzione della boccia. Tale processo, nuovamente studiato al simulatore, ha messo in luce notevoli miglioramenti apportati alla qualità del componente finito. La prova finale è stata data dalla produzione di una boccia esente dai difetti prima elencati e, quindi la sua qualità migliorata.

Analizzando il primo ciclo produttivo, si è pensato di mantenere invariata la fase di tranciatura del componente per ottenere le dimensioni desiderate, in quanto al simulatore COLDFORM non sono state evidenziate problematiche di sorta. Già partendo dal secondo step del ciclo però sono state apportate le modifiche di seguito elencate:

- secondo step, in cui, per aumentare la stabilità del componente durante il processo all'interno dell'attrezzatura (probabilmente risultava mancare nel primo processo), si è pensato di eseguire il processo di estrusione inversa dal lato matrice; in questa maniera lo spezzone in C4C viene totalmente inserito all'interno della matrice, che lo circonda in modo tale che lo stesso non può subire spostamenti (L'operazione di estrusione inversa difatti avviene mediante l'uso di una spina matrice presente all'interno della matrice stessa);
- terzo step, in cui, a differenza di quanto avveniva nel primo ciclo produttivo, in cui era prevista l'estrusione per la

preparazione della zigrinatura della boccola già nella terza stazione della macchina, si è pensato di eseguire la fase di tranciatura del nottolino già dal terzo step; in questa maniera si “guadagna” uno step utile per l’operazione di compattazione pre-zigrinatura; il taglio del nottolino inoltre avviene dal lato martello, come conseguenza dell’estrusione dal lato matrice, e le sue dimensioni vengono modificate; quest’ultima variazione ha infatti permesso sia di aumentare la vita dell’attrezzatura, in quanto è necessario un minore sforzo per la tranciatura del nottolino sia, come vedremo in seguito, di conservare lo smusso che veniva perso con il primo ciclo;

- quarto step, in cui viene eseguito il processo di estrusione del componente, per prepararlo alla fase di zigrinatura;
- quinto step, dove è stata introdotta una fase di compattazione del componente prima del processo di zigrinatura; tale step è stato pensato per garantire una miglior stabilità dimensionale del componente e per mettere quest’ultimo in uno stato tensionale di compressione, che risulta sicuramente migliore dello stato tensionale di trazione, che porta alla formazione di cricche;

- sesto step, che, come nel primo ciclo produttivo, prevede la zigrinatura della boccola.

E' dunque agevole capire che per migliorare la qualità del componente finito è stato aumentato il numero di step necessari alla produzione della boccola. Questo aumento porta anche alla necessità di avere in sede una pressa a sei stazioni. La Sater s.r.l. possiede tale macchina, ragione per la quale ha potuto ideare e supportare la presenza di uno step in più all'interno del processo produttivo. In figura 26 è illustrato il nuovo ciclo produttivo. Nel paragrafo successivo si esamineranno in maniera più approfondita le differenze riscontrate al simulatore COLDFORM tra i due cicli produttivi descritti.

2° ciclo

SATER
..... FASTENER SOLUTIONS

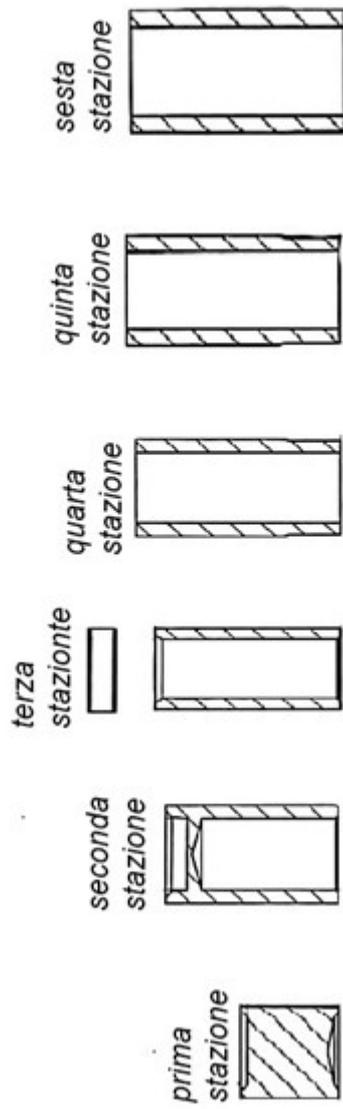


Fig.26 – Illustrazione secondo ciclo produttivo

3.4 Differenze tra i cicli produttivi evidenziate al simulatore COLDFORM

In questo paragrafo sono esaminate tutte le differenze significative tra i due cicli produttivi, differenze evidenziabili grazie all'uso del simulatore COLDFORM presente in azienda, partendo dalla fase di foratura, per passare alla tranciatura del nottolino ed infine alla fase di compattazione finale. Saranno esaminate sia le differenze sul materiale elaborato, sia sulle attrezzature utilizzate all'interno della pressa multi-stazione.

3.4.1. Differenze nella fase di foratura

La fase di foratura, che è a tutti gli effetti una fase di estrusione inversa, è uno degli step cardine di entrambi i cicli produttivi, in quanto permette di dare una prima forma significativa allo spezzone di materiale in arrivo dalla prima stazione. Per questa ragione in entrambi i cicli produttivi tale fase occupa la seconda stazione della pressa. Le trasformazioni che subirà la billetta nelle successive stazioni, ovvero la tranciatura del nottolino e l'estrusione diretta avvengono sul componente estruso inversamente. La principale differenza tra i due cicli in questa fase di lavorazione è data dal fatto

che nel primo ciclo il componente è forato dal lato martello, mentre nel secondo ciclo il componente è forato dal lato matrice. Questa modifica è stata effettuata per garantire una maggiore stabilità dimensionale al componente ed evitare il suo grippaggio nel modo di seguito descritto: inserendo l'intera boccola all'interno della matrice, lo spezzone è completamente circondato dall'attrezzatura, non subendo in questa maniera spostamenti indesiderati del materiale, responsabili potenziali di grippaggio superficiale di quest'ultimo e della diminuzione della sua stabilità dimensionale. Dall'analisi al simulatore COLDFORM si è osservato come non ci sono notevoli differenze all'interno dello spezzone, in termini di danneggiamento, incrudimento e stato tensionale. Ce ne sono e notevoli, invece, sull'attrezzatura utilizzata. In figura 27 si può notare la differenza relativa allo sforzo dell'attrezzatura, che ci dà informazioni sul materiale con il quale realizzare la spina matrice e la spina martello, e in figura 28 si rileva il livello di usura dell'attrezzatura.

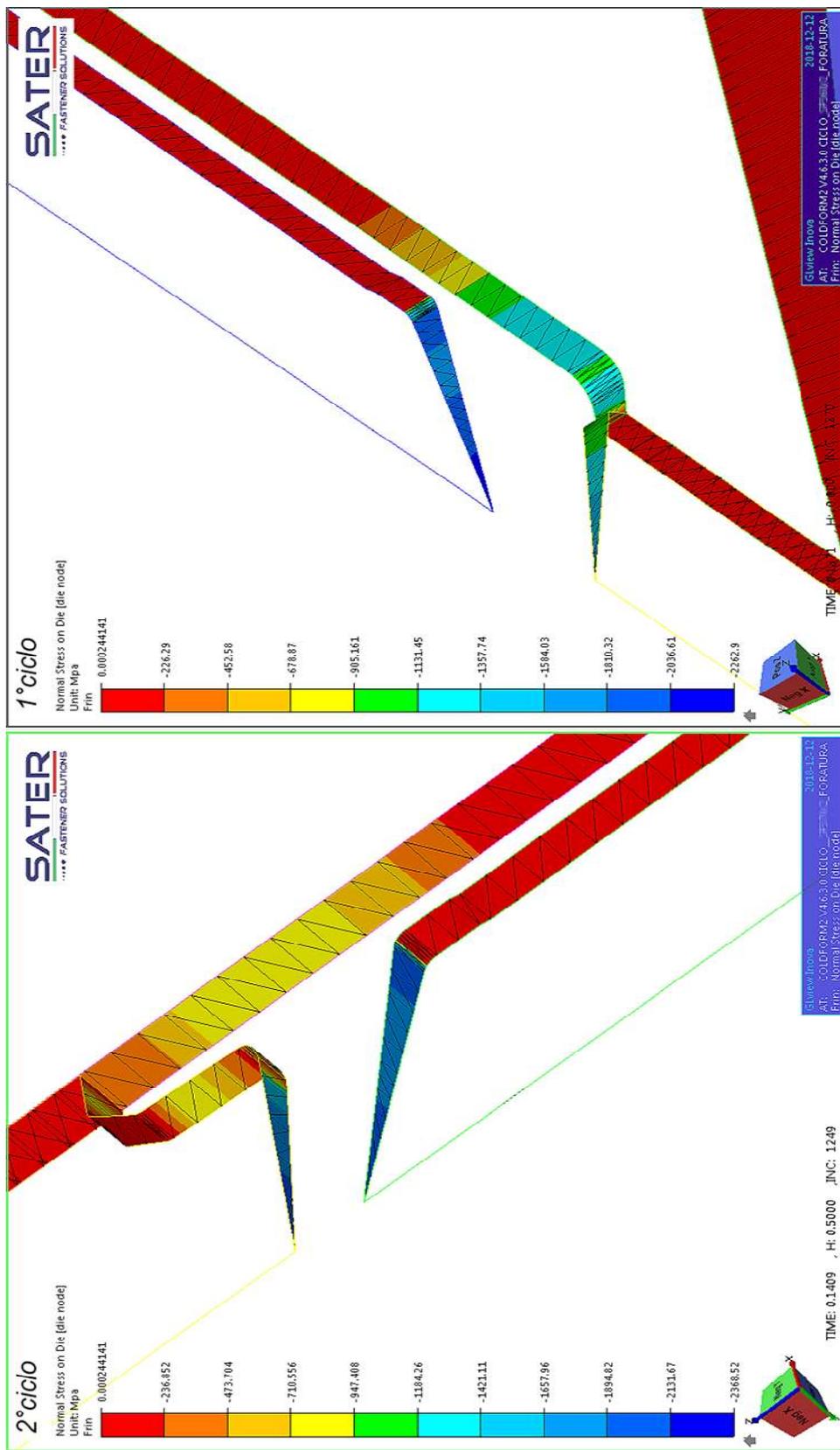


Fig. 27 – Confronto tra lo sforzo subito dalle attrezzature

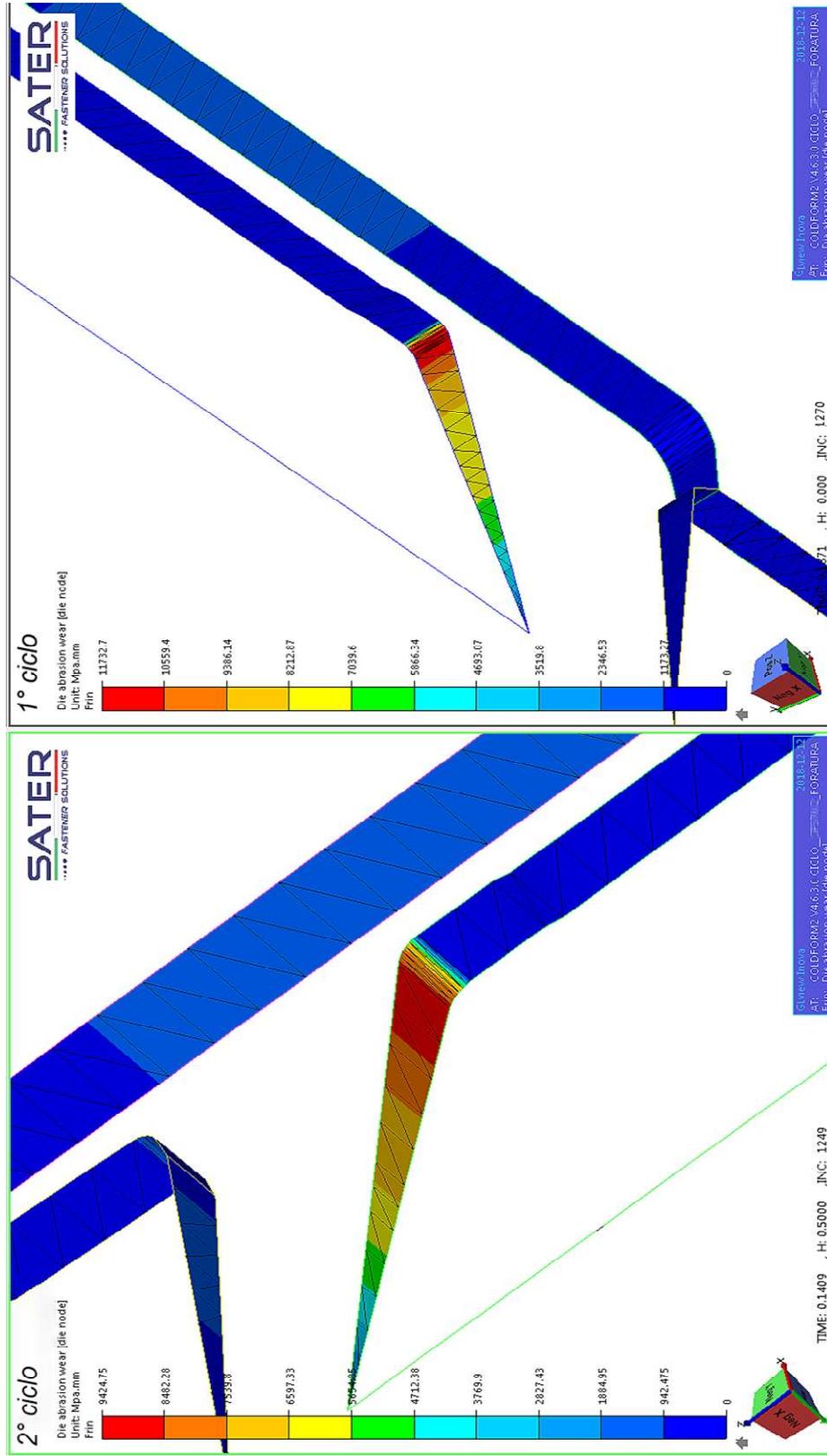


Fig. 28 – Confronto sul livello di usura tra i due componenti

Dalla figura 27, inoltre, si evince che sia nel primo ciclo che nel secondo, lo sforzo subito dalle attrezzature è molto simile. Il suo valore espresso in mega Pascal, ci permette di scegliere il materiale utilizzato per la spina martello, nel primo ciclo, e per la spina matrice, nel secondo ciclo. Empiricamente il valore di pressione compreso tra i 2000 MPa e i 4000 MPa ci suggerisce l'uso di un'attrezzatura in ASP30, fortunatamente presente in azienda.

Il risultato più importante derivante dal confronto tra i cicli produttivi, tuttavia, è rilevabile dall'analisi del livello di usura dell'attrezzatura. Come si può osservare in figura 28, l'usura che si registra nel primo ciclo, in prossimità dell'angolo di raccordo, è notevolmente maggiore di quella che si registra con il secondo: la prima infatti ha un valore di circa 11732 MPa.mm, mentre la seconda ha un valore di circa 9424 MPa.mm. Questo confronto ci suggerisce come l'attrezzatura utilizzata nel secondo ciclo avrà una vita notevolmente maggiore rispetto a quella del primo ciclo. Inoltre, sempre come ci suggerisce la figura 28, l'usura maggiore si verifica più vicino all'angolo di raccordo nel primo ciclo rispetto a quella risultante nel secondo ciclo. Tale angolo ha un'importanza fondamentale nel processo produttivo in quanto, se esso si usura, il materiale in arrivo trova difficoltà a scendere e nasconde i difetti presenti nel materiale con compromissione della qualità. Questo è un ulteriore punto a favore del secondo ciclo produttivo, dal momento che potrà contare su un'attrezzatura più longeva, in quanto l'usura si concentra più lontana dall'angolo di raccordo rispetto a quanto accade nel primo ciclo.

3.4.2. Differenze nella fase di tranciatura del nottolino

Dall'analisi e confronto della fase di tranciatura tra primo e secondo ciclo emerge che in quest'ultimo essa è prevista già dalla terza stazione della pressa, mentre nel primo ciclo avveniva nella penultima stazione. Si spiega così il "guadagno" di uno step, utile per l'operazione di compattazione pre-zigrinatura. In conseguenza, inoltre, della estrusione dal lato matrice, il taglio del nottolino avviene dal lato martello, con modifica delle sue dimensioni, nel senso di un suo minore spessore. Queste modifiche, come vedremo, hanno permesso di ottenere notevoli vantaggi nel ciclo produttivo. La conferma, innanzitutto, della duttilità del materiale dello spezzone ci viene fornita dalla tipologia di frattura che la billetta subisce, come si può osservare dalla figura 29.

La superficie di frattura, infatti, a seguito dello stacco del nottolino, risulta frastagliata, caratteristica tipica dei materiali duttili. Come ho già detto, il materiale con cui è realizzata la boccia è il C4C, un materiale con struttura CFC che non subisce transizione-duttile fragile e che dunque subisce una rottura di tipo duttile.

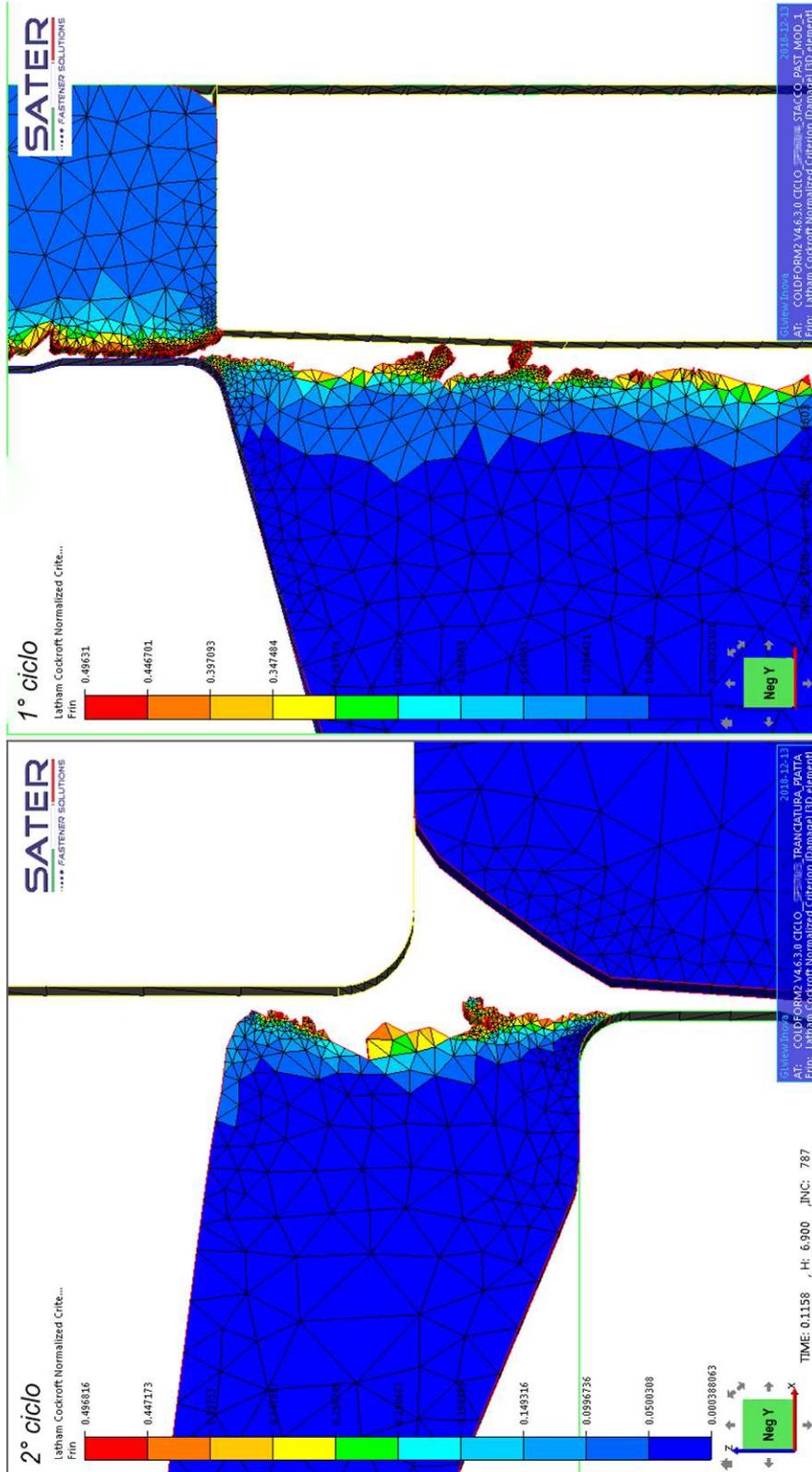


Fig. 29 – Illustrazione della superficie di frattura elaborata al simulatore del componente a seguito della tranciatura.

A conferma di ciò è possibile osservare in figura 30 gli stati di tensione contrapposti, ovvero di compressione e di trazione all'interno dello spezzone, che dimostrano la propagazione della cricca.

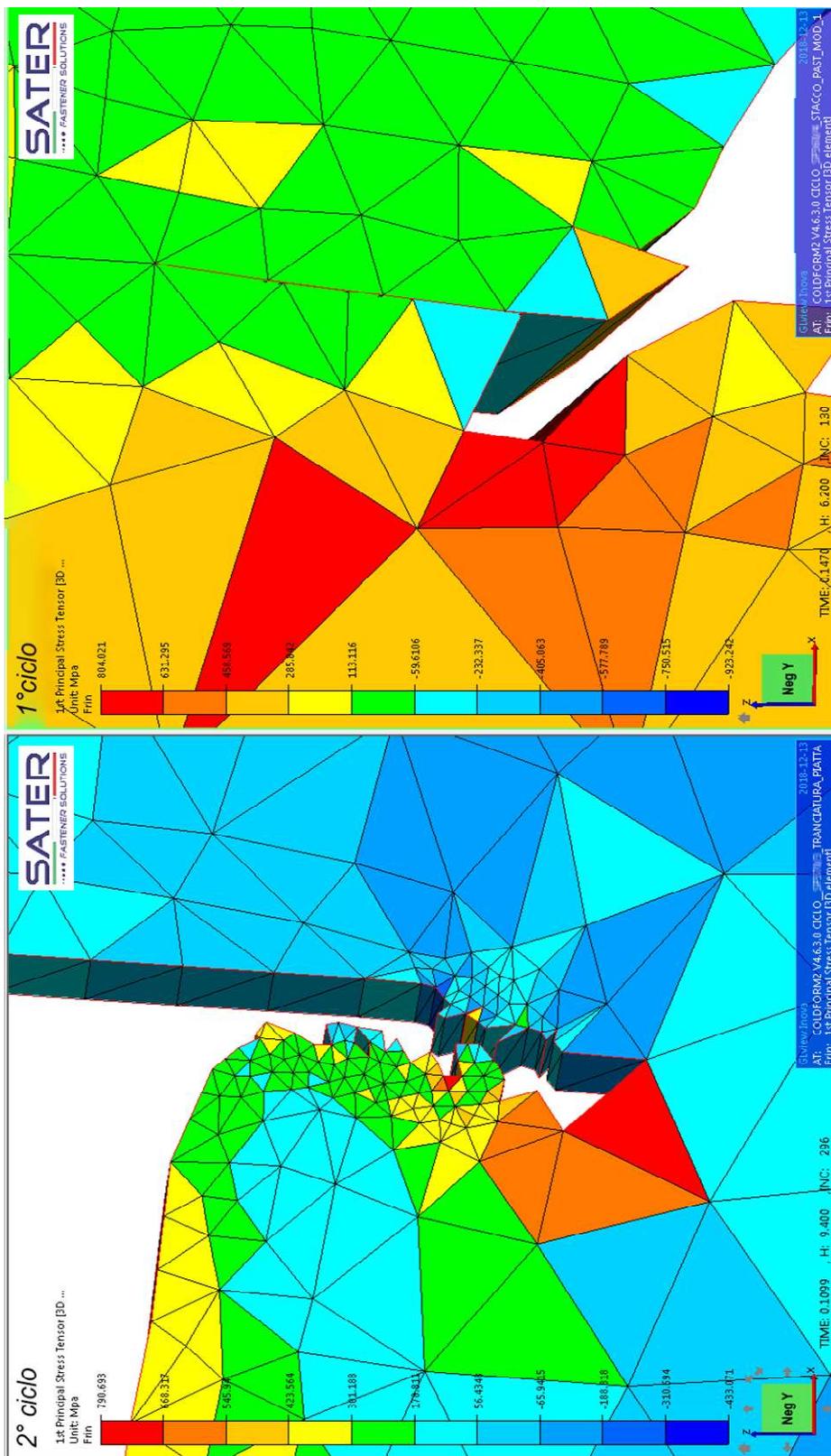


Fig. 30 – Alternanza degli stati tensionali che simboleggiano l'avanzamento della cricca

Quest'ultima infatti avanza nel materiale mediante cicli alternati di trazione e compressione⁽²⁴⁾, come è spiegato in figura 31.

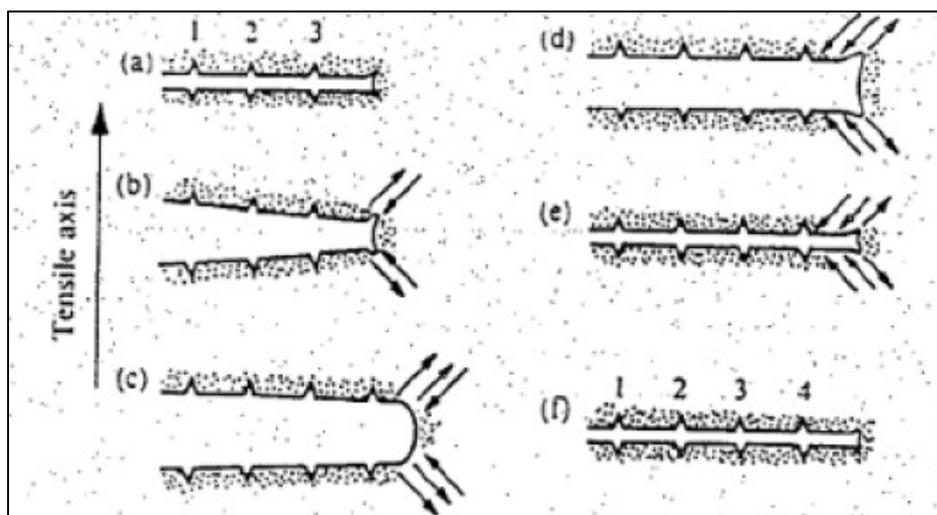


Fig. 31 – Stati tensionali di evoluzione della cricca: a) carico nullo; b) minimo stato di trazione; c) massimo stato di trazione; d) minimo stato di compressione, e) massimo stato di compressione; f) carico nullo

Un altro importantissimo risultato che si ottiene con il secondo ciclo di produzione è la conservazione dello smusso realizzato sulla parte superiore dello spezzone, smusso che nel primo ciclo veniva perso a seguito della tranciatura del nottolino. Tale risultato era stato già previsto sulla base dell'esperienza in fase di progettazione del secondo ciclo, come conseguenza della variazione del lato di tranciatura, per conferire una maggiore stabilità dimensionale al componente, e riduzione delle dimensioni del nottolino. Il raggiungimento di questo importante obiettivo, che permette un ulteriore aumento della qualità del componente e dunque la risoluzione dei macro-difetti prima elencati, è stato confermato dal

simulatore COLDFORM prima e successivamente dal componente ottenuto dalla produzione. In figura 32 è possibile osservare la perdita e la conservazione di smusso evidenziata in fase di studio del secondo ciclo confrontato al primo condotto al simulatore.

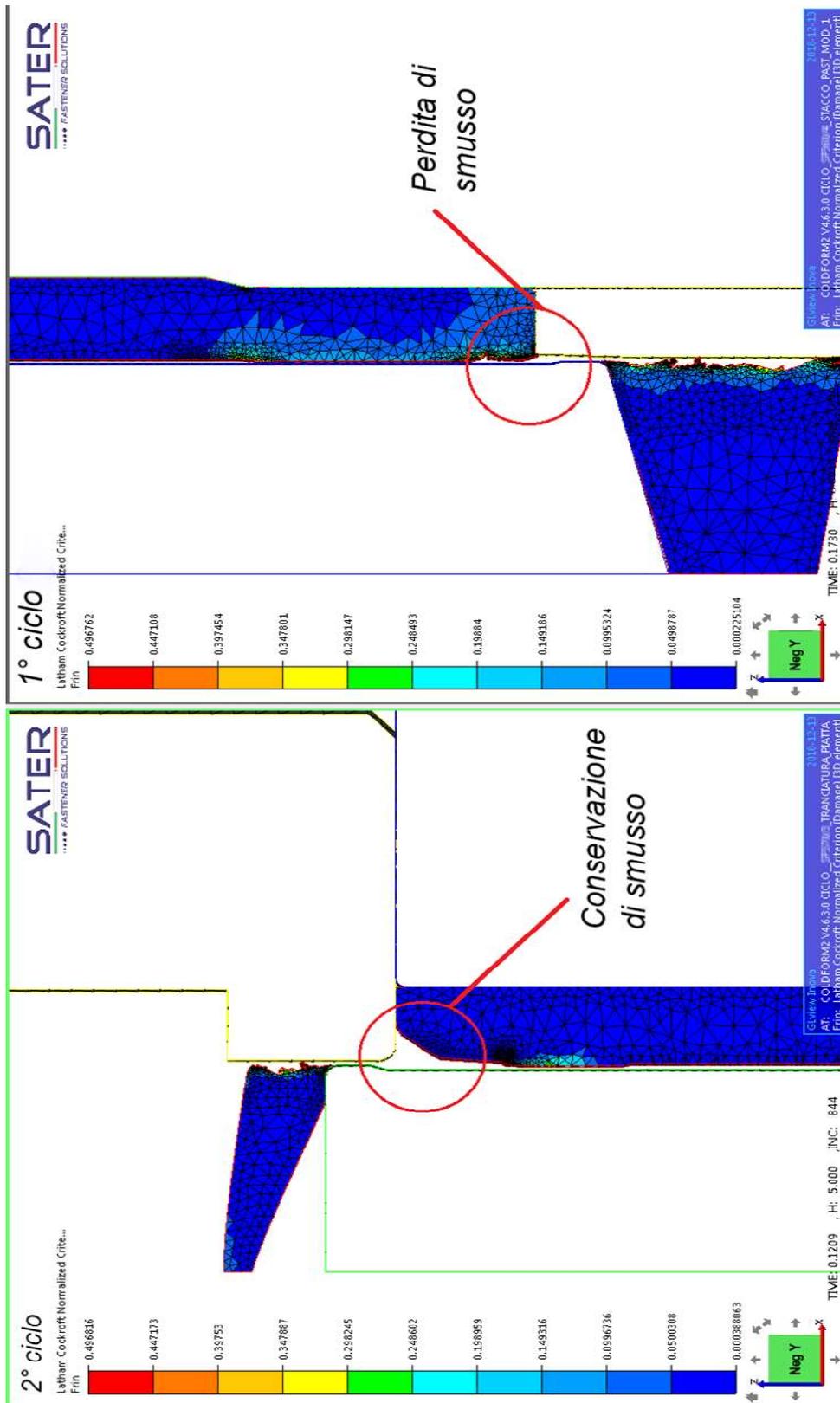


Fig. 32 – Evidenza al simulatore della perdita e della conservazione di smusso all'interno del componente a seguito della tranciatura

Nella figura 32 sopra riportata, sono state evidenziate le zone degli spezzoni in cui si verificano rispettivamente la perdita e la conservazione dello smusso. Nel primo ciclo, dopo la tranciatura del nottolino lo spezzone risulta perso, mentre nel secondo ciclo lo smusso si conserva. Come ho più volte ribadito, questo risultato è stato prima di tutto pensato possibile grazie alla variazione del lato di tranciatura e riduzione delle dimensioni del nottolino (osservabile anche in figura 31), successivamente confermato al simulatore COLDFORM, ed infine riscontrato anche sul pezzo prodotto con il secondo ciclo. Il ciclo ottimizzato, quindi, già con le variazioni apportate fino a questo momento permette di eliminare i difetti principali della boccola realizzata con il primo ciclo produttivo, ovvero la superficie esterna grippata e la perdita di smusso.

Un importante risultato è stato osservato anche in termini di aumento della vita dell'attrezzatura. In fase di progettazione si era pensato che, riducendo le dimensioni del nottolino, la forza richiesta per tranciarlo sarebbe stata maggiore, ma applicata per un tempo minore. Questo non avrebbe cambiato notevolmente la vita dell'attrezzatura. Analizzando però mediante il simulatore tale parametro dell'attrezzatura si è potuto osservare un importante fenomeno: l'attrezzatura oltre a tranciare il nottolino in minor tempo, come già previsto, utilizza anche un minore sforzo, come si può osservare in figura 33, dove il grafico relativo al secondo ciclo è posto al contrario rispetto a quello del primo, come fa il COLDFORM per evidenziare il confronto.

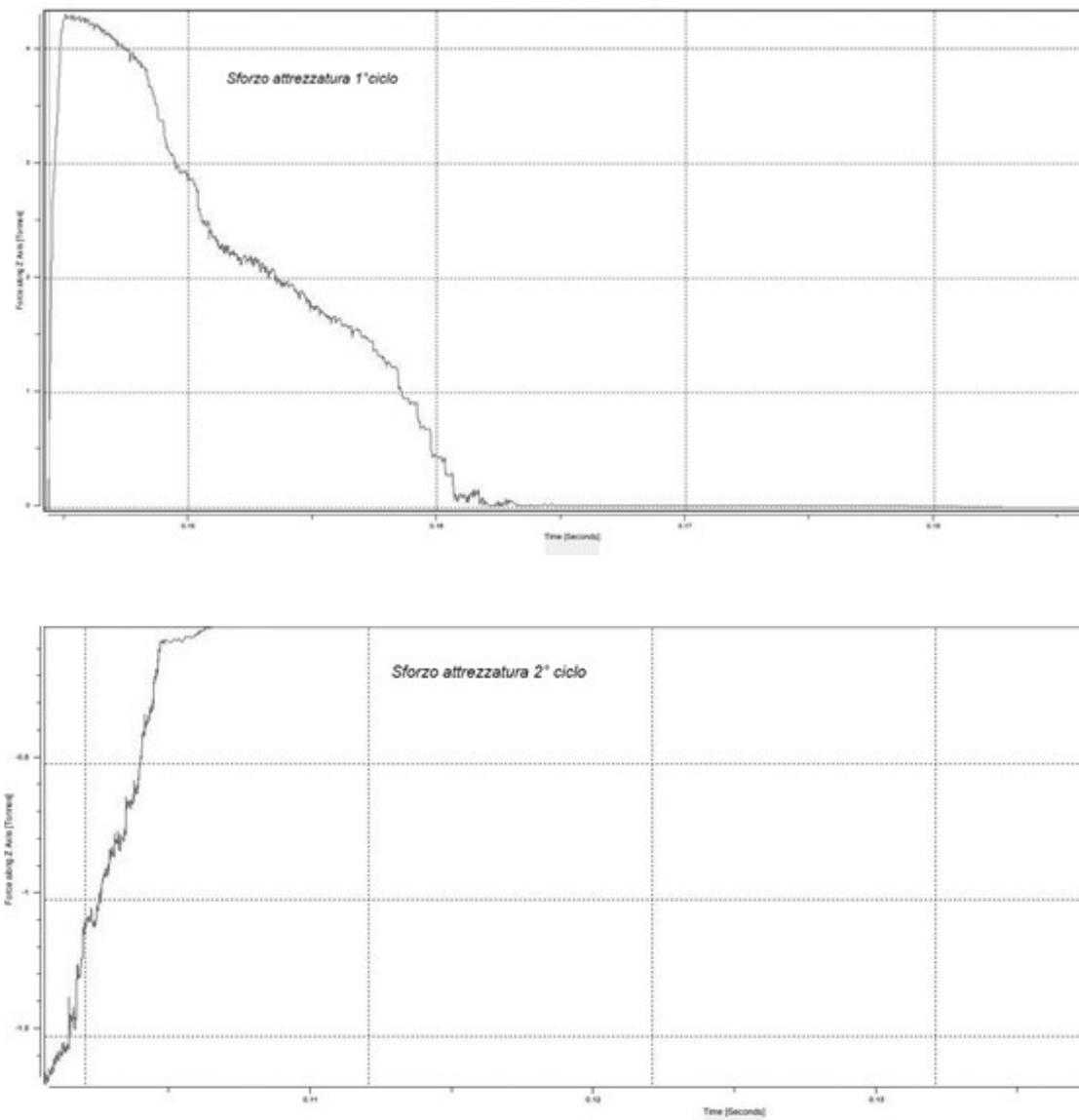


Fig. 33 – Sforzo in funzione del tempo per la tranciatura del nottolino.
 Sopra quello riferito al primo ciclo, sotto quello riferito al secondo

Nelle immagini sopra riportate, sono poste a confronto due curve riferite rispettivamente al primo e al secondo ciclo produttivo. In esse è possibile osservare l'andamento della forza in funzione del tempo necessario alla tranciatura del nottolino. In fase di progettazione ci si

aspettava un tempo di tranciatura minore nel secondo ciclo in quanto lo spessore del nottolino era stato ridotto. È stato, invece, sorprendente vedere che per la tranciatura il secondo ciclo richiede una forza, espressa in tonnellate nei grafici, minore di quella richiesta nel primo ciclo e che essa dovesse risultare maggiore o al limite uguale a quella del primo ciclo, in quanto il grado di incrudimento nel materiale a quel punto della lavorazione doveva essere abbastanza elevato e, quindi, avrebbe richiesto all'attrezzatura uno sforzo maggiore per eseguire l'operazione di tranciatura. A seguito di questo risultato certamente positivo, in quanto significa chiaramente un allungamento della vita dell'attrezzatura utilizzata nel secondo ciclo, si è voluto indagare sull'origine di questo fenomeno, andando proprio a studiare il grado di incrudimento dello spezzone un attimo prima della fase di tranciatura. Con il simulatore COLDFORM si è studiato l'andamento dell'*Effective Strain*, un parametro che, come spiegato in azienda da un ingegnere della Transvalor, permette di valutare lo stato di incrudimento del materiale. A seguito dell'analisi di tale valore si è constatato in effetti che nel processo di lavorazione del secondo ciclo produttivo lo spezzone di materiale risulta meno incrudito dello stesso spezzone utilizzato con il ciclo non ottimizzato. In figura 34 vengono posti a confronto gli stati di incrudimento della billetta nel primo ciclo e in quello ottimizzato.

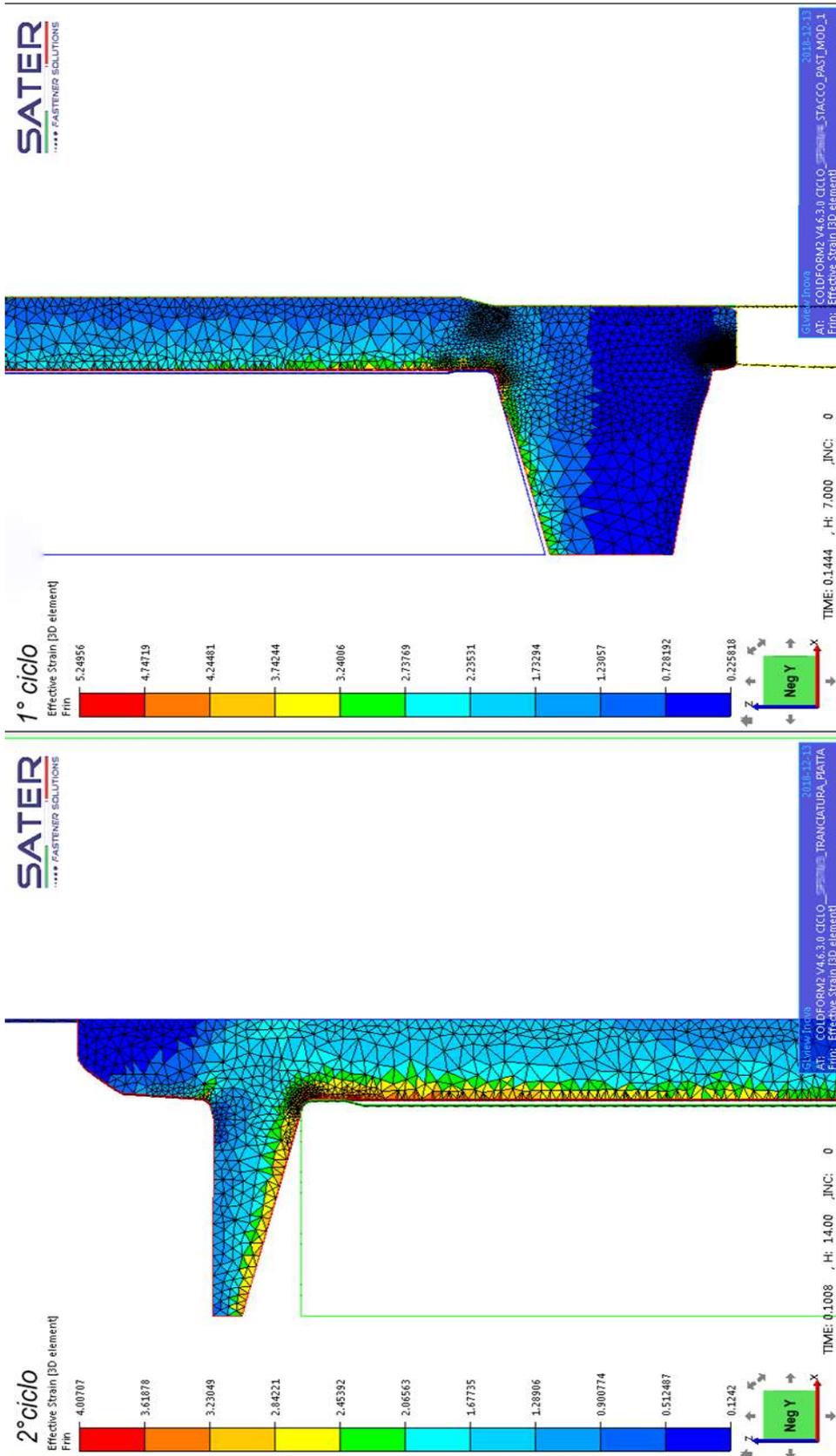


Fig.34 – Stato di incrudimento nei due spezzoni prima della fase di tranciatura

Si rileva agevolmente come lo stato di incrudimento all'interno del componente del 1° ciclo è maggiore di quello del componente del 2° ciclo. Nasce di qui la necessità di uno sforzo maggiore, nel primo ciclo, da parte dell'attrezzatura, con la conseguente riduzione della sua stessa vita.

3.4.3. Differenze nella fase che precede la zigrinatura

Come già spiegato nel capitolo 3.3 la fase di tranciatura nel secondo ciclo è prevista alla terza stazione della pressa, mentre nel primo ciclo avveniva nella penultima stazione. In questa maniera si “guadagna” uno step utile per l'operazione di compattazione pre-zigrinatura. Si è, infatti, osservato al simulatore COLDFORM che il componente prodotto con il ciclo non ottimizzato, oltre a possedere i difetti non ancora corretti, si trovava in uno stato tensionale di trazione. Quest'ultimo è più pericoloso dello stato tensionale in quanto lo stress di trazione tende a formare le cricche e ad aprire il loro apice, quindi a farle avanzare⁽²⁵⁾, con la conseguenza il componente prodotto risulta essere meno “sicuro” dello stesso componente, ma in uno stato tensionale di compressione. Per combinare dunque l'esigenza di ottenere un componente stabile in termini dimensionali e porlo in uno stato tensionale di compressione per ottenere una boccia maggiormente sicura, si è pensato in fase di progettazione di introdurre nel nuovo ciclo uno stato di

compattazione che preceda la fase di zigrinatura. Al termine di quest'ultimo lo spezzone di materiale risulta avere uno stato di compressione uniforme in tutto il suo corpo, come si evince meglio dalla figura 35.

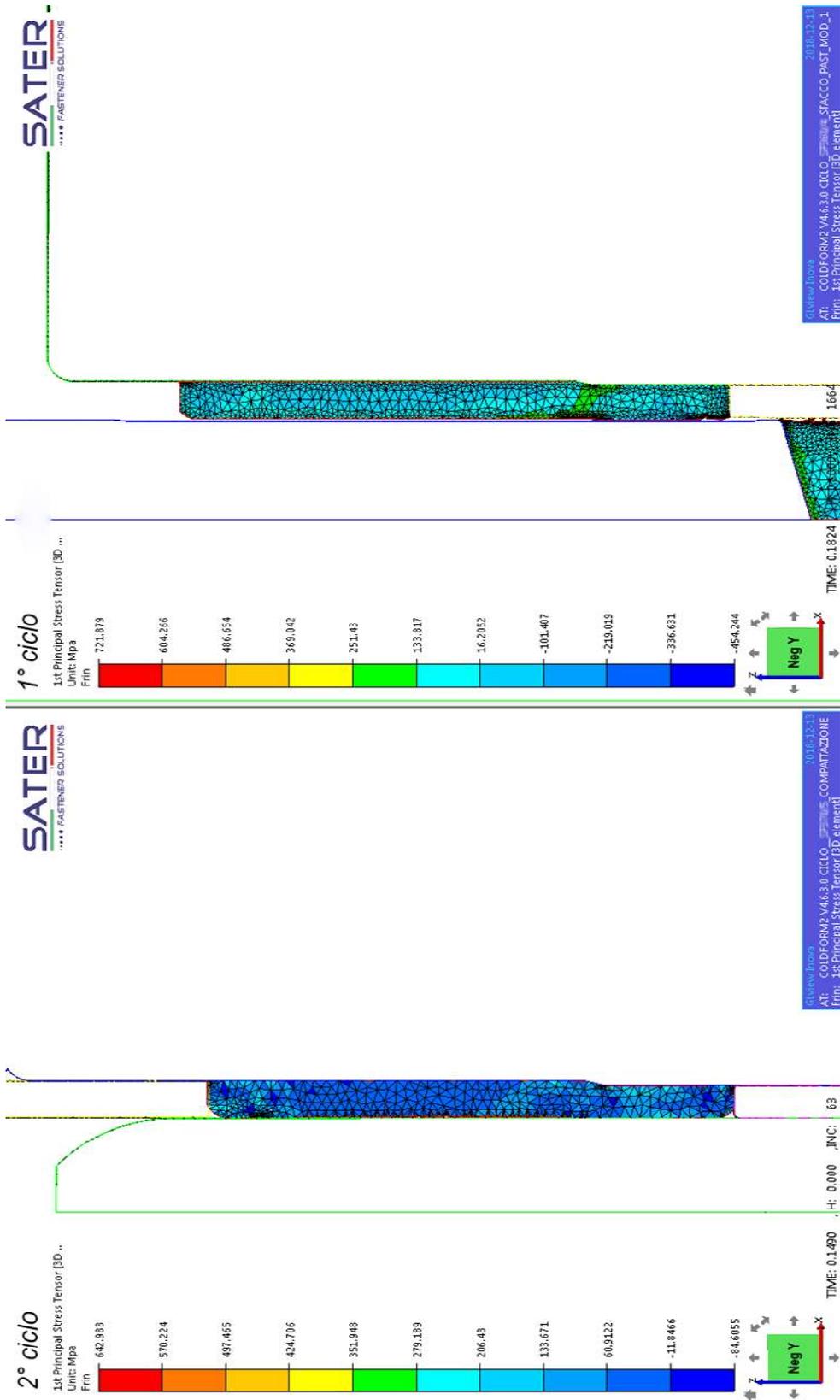


Fig.35 – Confronto tra lo stato tensionale dei due componenti nel momento antecedente la fase di zigrinatura

Come si può osservare dalla figura 35 il componente prodotto con il secondo procedimento ideato conserva ancora lo smusso (osservabile nella parte superiore del solido) e mostra uno stato tensionale di compressione distribuito in maniera omogenea in tutto il suo corpo. Si possono osservare anche stati di trazione all'interno di quest'ultimo, ma i valori di questi sono nettamente inferiori ai valori di tensione di trazione osservabili con il componente prodotto nel primo ciclo.

L'ultimo step si riferisce al procedimento di zigrinatura del componente. Nel presente lavoro non è stato illustrato in quanto non vi sono evidenze sperimentali nella singola fase. Tuttavia, a seguito della modifica dell'intero processo produttivo il componente prodotto con il ciclo ottimizzato risulterà certamente migliore in termini di stabilità dimensionale e di assenza di difetti che possano influenzare il suo funzionamento. Risulterà, quindi, un prodotto dalla massima qualità.

Capitolo 4

Conclusioni

La presente tesi ha avuto per oggetto uno studio approfondito sul processo di produzione di una boccia in metallo duttile C4C mediante stampaggio a freddo, già ideato in Sater s.r.l., con l'obiettivo di correggere i macro-difetti che essa presentava al termine della produzione, quali la presenza di una superficie esterna danneggiata e la mancanza di smusso sulla parte terminale della boccia. Tale studio è stato possibile grazie alla presenza in azienda di un simulatore per processi di stampaggio a freddo, il COLDFORM firmato Transvalor, con il quale si sono indagate le criticità di ogni singola stazione della pressa utilizzata in Sater s.r.l., per capire dove poter intervenire.

Analizzando il primo ciclo produttivo, si è pensato di mantenere invariata la fase di tranciatura del componente per ottenere le dimensioni desiderate, in quanto al simulatore COLDFORM non sono state evidenziate problematiche di alcun genere. Già dalla seconda stazione, tuttavia, sono state apportate modifiche al ciclo produttivo. Difatti, mentre nel primo il compito di forare lo spezzone del materiale avveniva dal lato martello, nel secondo ciclo il componente viene forato dal lato matrice. Questa modifica è stata

effettuata per garantire una maggiore stabilità dimensionale alla billetta ed evitare il suo grippaggio: inserendo l'intera boccola all'interno della matrice, lo spezzone è completamente circondato dall'attrezzatura, che gli impedisce in questa maniera spostamenti indesiderati del materiale, causa di grippaggio superficiale di quest'ultimo e di diminuzione della sua stabilità dimensionale. Grazie al simulatore COLDFORM si è osservato un altro importantissimo risultato, ottenuto grazie alla modifica del lato di tranciatura. Analizzando il livello di usura si osserva che quella registrata con il primo ciclo e in prossimità dell'angolo di raccordo tra spezzone e spina martello è notevolmente maggiore dell'usura registrata con il ciclo ottimizzato. Questo confronto ci suggerisce che l'attrezzatura utilizzata con il secondo ciclo avrà una vita notevolmente maggiore rispetto a quella del primo. Inoltre, sempre nel primo ciclo, l'usura maggiore si verifica più vicino all'angolo di raccordo rispetto al secondo procedimento. Tale angolo ha un'importanza fondamentale nel processo di produzione, in quanto, se esso si usura, il materiale in arrivo trova difficoltà a scendere e nasconde quindi difetti che ne compromettono la qualità. Questo è un ulteriore punto a favore del secondo ciclo produttivo. La sua attrezzatura è più longeva, anche grazie al fatto che l'usura si concentra più lontana dall'angolo di raccordo rispetto a quello del primo ciclo.

Circa la terza stazione della pressa, mentre nel primo ciclo avviene un'estrusione diretta, che ha il compito di preparare lo spezzone di materiale alla fase di zigrinatura finale, nel secondo ciclo è stato

pensato di eseguire la tranciatura del nottolino. In questa maniera si “guadagna” uno step utile per l’operazione di compattazione pre-zigrinatura. Il taglio del nottolino con il ciclo ottimizzato inoltre avviene dal lato martello, come conseguenza dell’estrusione dal lato matrice, e le sue dimensioni vengono modificate, rendendolo di minore spessore. Queste modifiche hanno permesso di ottenere notevoli vantaggi, primo fra tutti la conservazione dello smusso nella parte superiore dello spezzone, smusso che nel primo ciclo veniva perso a seguito della tranciatura del nottolino. Tale risultato era stato già previsto sulla base dell’esperienza in fase di progettazione ed è stato confermato dal simulatore COLDFORM prima, e successivamente sul componente stesso a seguito della sua produzione.

Un altro importante risultato è stato osservato anche in termini di aumento della vita dell’attrezzatura. In fase di progettazione si era pensato che, riducendo le dimensioni del nottolino, la forza richiesta per tranciarlo risultasse maggiore ma applicata per un tempo minore. Questo non avrebbe cambiato notevolmente la vita dell’attrezzatura. Analizzando però mediante il simulatore tale parametro dell’attrezzatura, si è potuto osservare un importante fenomeno: l’attrezzatura, oltre a tranciare il nottolino in meno tempo, come già previsto, utilizza anche un minore sforzo. A seguito di questo risultato certamente positivo, in quanto significa chiaramente un allungamento della vita dell’attrezzatura utilizzata nel secondo ciclo, si è voluto indagare sull’origine di questo fenomeno, andando proprio a studiare il grado di incrudimento dello spezzone in entrambi i cicli,

un attimo prima della tranciatura del nottolino e si è osservato che lo stato di incrudimento all'interno del componente del 1° ciclo è maggiore di quello del componente del 2° ciclo.

Circa l'analisi della stazione che precede lo step di zigrinatura, con il secondo ciclo, si è pensato di inserire una fase di compattazione, a differenza del primo ciclo, in cui la zigrinatura avveniva immediatamente dopo la tranciatura del nottolino. Il simulatore COLDFORM ha rivelato che il componente prodotto con il ciclo non ottimizzato, oltre a possedere i difetti non ancora corretti, si trova in uno stato tensionale di trazione, che è più pericoloso dello stato tensionale di compressione, in quanto lo stress di trazione tende a formare le cricche e ad aprire il loro apice, quindi a farle avanzare. Il componente prodotto risulta essere meno "sicuro" dello stesso componente, ma in uno stato tensionale di compressione. Per combinare dunque l'esigenza di ottenere un componente stabile in termini dimensionali e porlo in uno stato tensionale di compressione per ottenere una boccia maggiormente sicura, si è pensato, in fase di progettazione di introdurre nel nuovo ciclo uno step di compattazione. In tal modo il componente prodotto raggiunge una stabilità dimensionale maggiore e si induce in esso uno stato tensionale di compressione.

A seguito di tutte queste considerazioni si può affermare con certezza che il ciclo nato dall'ottimizzazione di quello già esistente in azienda permette di ottenere un componente privo di macro difetti

e, dunque, con una miglior qualità e possibilità di migliori performance della boccia. E' opportuno, però, fare una considerazione. Il raggiungimento di tale livello è stato possibile grazie alla presenza in Sater s.r.l. di una pressa multi-stazione a sei stazioni, che ha permesso una maggior libertà nell'ideare e realizzare un nuovo ciclo. L'utilizzo di tale pressa richiede, in termini energetici, un costo maggiore, che va certamente ad influenzare il prezzo del singolo componente. Si può affermare allora che, il componente realizzato con il primo ciclo presenta difetti che ne abbassano la qualità ma che, se tali difetti non incidono sulle richieste del cliente o sono contenuti entro le tolleranze da lui imposte, il prezzo inferiore permetterà un facile acquisto e dunque un maggior guadagno dell'azienda. Convertire il ciclo produttivo per ottenere un prodotto di alta qualità, ma più costoso, è un rischio che l'azienda prende e che accetta dopo un'attenta analisi sulla variazione dei costi e dei possibili guadagni, ivi compresa la sua affidabilità in Italia e all'Estero.

Bibliografia

- (1) Slide del corso “Metal Forming Technologies”.2018. PoliTo
- (2) Da Sater s.r.l.
- (3) http://www.engr.mun.ca/~adfisher/3941/Ch14_Metal-Forging-HO.pdf
(online)
- (4) https://it.wikipedia.org/wiki/Pressa_idraulica
- (5) <https://it.wikipedia.org/wiki/Pressa>
- (6) <http://my.liuc.it/MatSup/2004/Y70750/Corso%20di%20Tecnologia%20Mecanica%20-%20Mod.3.7%20Deformazione%20plastica.pdf>
- (7) Da tesi magistrale dell'ingegner Elia Spinnato “Innovazione ed ottimizzazione nel ciclo di stampaggio a freddo di acciai legati: analisi FEM e validazione sperimentale”
- (8) <http://www.sater.it/azienda/> (online)
- (9) <https://it.wikipedia.org/wiki/Incrudimento>
- (10) https://www.google.it/search?q=cold+heading+sacma&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjV0aCFjJbfAhWE1SwKHXwkBQAQ_AUIDigB&biw=1536&bih=790&dpr=1.25
- (11) https://www.google.com/search?q=matrici+presse+multistazioni&client=firefox-b&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiy7-70jpfAhULCiwKHZtQCSMQ_AUIDygC&biw=1536&bih=790&dpr=1.25#imgsrc=TBX7bLHkQI5FwM
- (12) <https://it.wikipedia.org/wiki/Widia> e Slide del corso “Metal Forming Technologies”.2018. PoliTo.
- (13) Slide del corso “Materiali Metallici” 2018. PoliTo
- (14) Slide del corso “Fisica, chimica ed ingegneria delle superfici” 2018. PoliTo
- (15) “Meccanica Applicata” di Carlo Ferraresi e Terenziano Raparelli, casa editrice CLUT

- (16) <http://www.chimica-online.it/download/meccanismo-biella-manovella.htm>
- (17) https://en.wikipedia.org/wiki/Flow_stress
- (18) Slide del corso "Fondamenti di Meccanica Strutturale". 2017 PoliTo
- (19) <http://www1.unipa.it/giovanni.petrucci/Disp/Materiali.pdf>
- (20) http://it.wikipedia.org/wiki/Analisi_agli_elementi_finiti
- (21) https://it.wikipedia.org/wiki/Metodo_degli_elementi_finiti#Funzionamento
- (22) <https://www.britannica.com/science/finite-element-method>
- (23) Materials engineering science processing and design. M. Ashby, H. Shercliff, D. Cebon
- (24) Slide del corso di Ingegneria dei Materiali, PoliTo 2017
- (25) Slide del corso di Ingegneria dei Materiali, PoliTo 2018

Ringraziamenti

Ringrazio innanzitutto il professor Mario Rosso per avermi permesso di svolgere questa attività di tirocinio, per l'attenzione e la pazienza rivoltami nonostante i tanti impegni accademici.

Vorrei ringraziare il signor Marco Oberto ed Enrico Oberto, titolari della Sater s.r.l. che hanno permesso di svolgere la mia attività presso l'azienda e per aver dedicato tempo prezioso al mio lavoro.

Ringrazio particolarmente il signor Alessandro Montabone per la pazienza e l'interesse mostratomi in ogni momento della mia attività.

Ringrazio tutti i miei colleghi e amici con i quali ho condiviso le molte ore di studio, lezioni e laboratori; hanno conosciuto la parte migliore e peggiore di me, e nonostante ciò mi sono ancora accanto, mostrandomi tutto il loro volermi bene

Ringrazio i miei genitori, le mie sorelle e i miei nonni, che mi hanno permesso di vivere l'esperienza di "studente fuori sede" e che mi hanno sostenuto con pazienza, dispensandomi consigli e incoraggiando in ogni mia scelta.

Un ringraziamento particolare a mio "fratello" Sandro, compagno di mille avventure che in tutti questi anni di amicizia è sempre stato presente, nonostante i miei difetti, per ascoltare qualsiasi mio discorso non criticandomi mai. Un amico leale che non mai fatto sentire i 1000 km di distanza che ci separavano.

Infine un ringraziamento speciale va alla mia fidanzata Nicla, che in questi anni di studio mi è sempre stata vicina, spronandomi e riuscendo a tirare fuori sempre il meglio di me. Con il suo modo di essere mi ha permesso di comprendere a fondo il significato della parola amore e capire l'importanza imprescindibile degli affetti.