



**Politecnico
di Torino**



Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

A.a. 2024/2025

Sessione di Laurea Dicembre 2025

Comprensione e caratterizzazione dell'operazione di strappo pastiglia

Relatori aziendali:

Ing. Di Gennaro Nicholas

Ing. Corradini Paolo

Relatore accademico:

Ing. Rosso Carlo

Candidato:

Tabbia Stefano s334385





Sommario

1. Introduzione.....	4
1.1 Tesi in azienda	4
1.2 Stampaggio a freddo	6
1.3 Descrizione processo aziendale	9
1.4 Componente analizzato	27
2. Comprensione del fenomeno di frattura	34
2.1 Analisi della bava.....	36
2.2 Gioco tra punzone e matrice.....	37
2.2.1 Tranciatura fine	39
2.2.2 Flusso materiale	41
2.3 Duttilità materiale	42
2.4 Effetti secondari	44
2.4.1 % Carbonio	44
2.4.2 Lubrificazione	45
2.4.3 Temperatura.....	45
2.4.4 Velocità di deformazione	46
3. Costruzione del modello per analisi FEM	48
3.1 Impostazione modello di simulazione	49
3.2 Strumenti a supporto della simulazione	60
3.2.1 Calcolo del coefficiente di Latham-Cockcroft.....	63
3.3 Impostazione modello di ottimizzazione / simulazione iterattiva	77
4. Definizione regole e parametrizzazione	78
4.1 Definizione MESH	79
4.1 Raccolta dei risultati.....	86
4.2 Definizione regole teoriche.....	87
4.4.1 Definizione altezza pastiglia	87
4.4.2 Deformazioni	92
5. Conclusioni.....	105
Riferimenti	107

1. Introduzione

1.1 Tesi in azienda

La presente tesi è stata realizzata in stretta collaborazione con **CVB S.r.l.** avente sede a Tronzano Vercellese (VC). CVB opera nel settore della bulloneria industriale, con una specializzazione nella **produzione di viteria e minuteria metallica di precisione** (fasteners) per i settori **automotive** ed elettrotecnico.



Figura 1 - immagine satellitare di CVB S.r.l (Earth, s.d.)

Nel 2003, CVB è stata acquisita dal **Gruppo AGRATI**, player globale nel settore dei **sistemi di fissaggio per l'automotive**. Agrati, attiva nella produzione di viti e bulloneria fin dagli anni '40, è oggi riconosciuta a livello internazionale per la sua innovazione, sostenibilità e la forte presenza nei mercati europeo, americano e asiatico.

Svolgere la tesi in azienda presso CVB–Agrati mi ha permesso di entrare in un contesto operativo altamente specializzato, partecipando attivamente allo studio della **formabilità a freddo** dei metalli all'interno di un processo industriale reale.

L'obiettivo principale del mio lavoro è stato quello di **ottimizzare l'operazione di strappo pastiglia**, un processo specifico di **tranciatura di una boccola metallica**, fase critica per la qualità del componente finale. Questo mi ha dato l'opportunità di contribuire concretamente al miglioramento dei processi produttivi aziendali, applicando al contempo le competenze teoriche e pratiche maturate nel corso del mio percorso di studi in ingegneria meccanica.

In particolare, l'attività si è focalizzata sulla risoluzione di criticità specifiche legate alla fase di strappo, quali:

- l'eliminazione di **bave** di tranciatura non ammesse oltre il piano di taglio;
- il raggiungimento di una finitura superficiale adeguata nella zona di strappo, tale da consentire una successiva **maschiatura**;

- la prevenzione di **ripieghe** che comprometterebbero la geometria del pezzo e la qualità del processo.

Per comprendere la tipologia di componenti realizzati nello stabilimento produttivo di CVB, nelle immagini seguenti sono riportati alcuni esempi di semilavorati forati, insieme alle rispettive pastiglie generate durante la creazione del foro:



Figura 2 - esempi di semilavorati forati prodotti in azienda senza ancora nessuna lavorazione successiva (Stefano)



Figura 3 – esempi di semilavorati forati prodotti in azienda senza ancora nessuna lavorazione successiva (Stefano)

In Figura 2 e 3 è possibile osservare come la gamma di componenti prodotti nello stabilimento spazi da elementi complessi, come dadi, a componenti più semplici, come boccole, variando per dimensioni e funzionalità. L'azienda è quindi in grado di realizzare, su richiesta, qualsiasi forma di componente, dal più piccolo e semplice al più grande e complesso.

È importante sottolineare che i componenti mostrati in figura 2 e 3 sono prelevati direttamente dalla macchina, **senza alcuna lavorazione successiva**. Ad esempio, il secondo componente da sinistra —



che costituirà l'oggetto di studio di questa analisi che si approfondirà nella sezione 1.4 — verrà successivamente sottoposto a maschiatura, in modo che il foro interno presenti una filettatura. Nelle immagini, tuttavia, sono rappresentati esclusivamente i semilavorati.

1.2 Stampaggio a freddo

L'azienda presso cui è stato svolto il presente lavoro di tesi opera nel settore della **deformazione plastica a freddo**, con una consolidata specializzazione nello stampaggio a freddo **multistazione**. Lo stampaggio a freddo è un processo produttivo ad alta velocità in cui uno spezzone di filo metallico viene prima tagliato con precisione, quindi trasferito attraverso una serie di stazioni dove subisce **deformazioni progressive** fino ad assumere la geometria finale desiderata, formando quindi un ciclo di stampaggio come mostrato in figura 6. La scelta del numero di stazioni dipende dalla complessità della geometria finale del componente da realizzare e dal numero di stazioni disponibili sulla macchina.

Il materiale viene deformato oltre il punto di resistenza elastica e assume quindi la forma dello stampo. Il metallo non viene spinto però oltre il carico di rottura altrimenti subirebbe frattura (ad eccezione delle operazioni di traciatura e/o foratura). Il materiale non raggiunge la temperatura di ricristallizzazione ma subisce comunque un **incrudimento**.

Questa tecnologia consente di trasformare spezzoni di materiale metallico in componenti finiti o semi-finiti, attraverso una sequenza di operazioni progressive effettuate a temperatura ambiente, senza ricorrere ad asportazione di truciolo.

Il principio di funzionamento si basa sull'azione combinata di una **matrice** (o stampo/*lower die*) e di un **punzone** (o martello/*upper die*), i quali, premendo lo spezzone tra loro con forze elevate, inducono una deformazione plastica controllata in grado di generare la geometria desiderata:

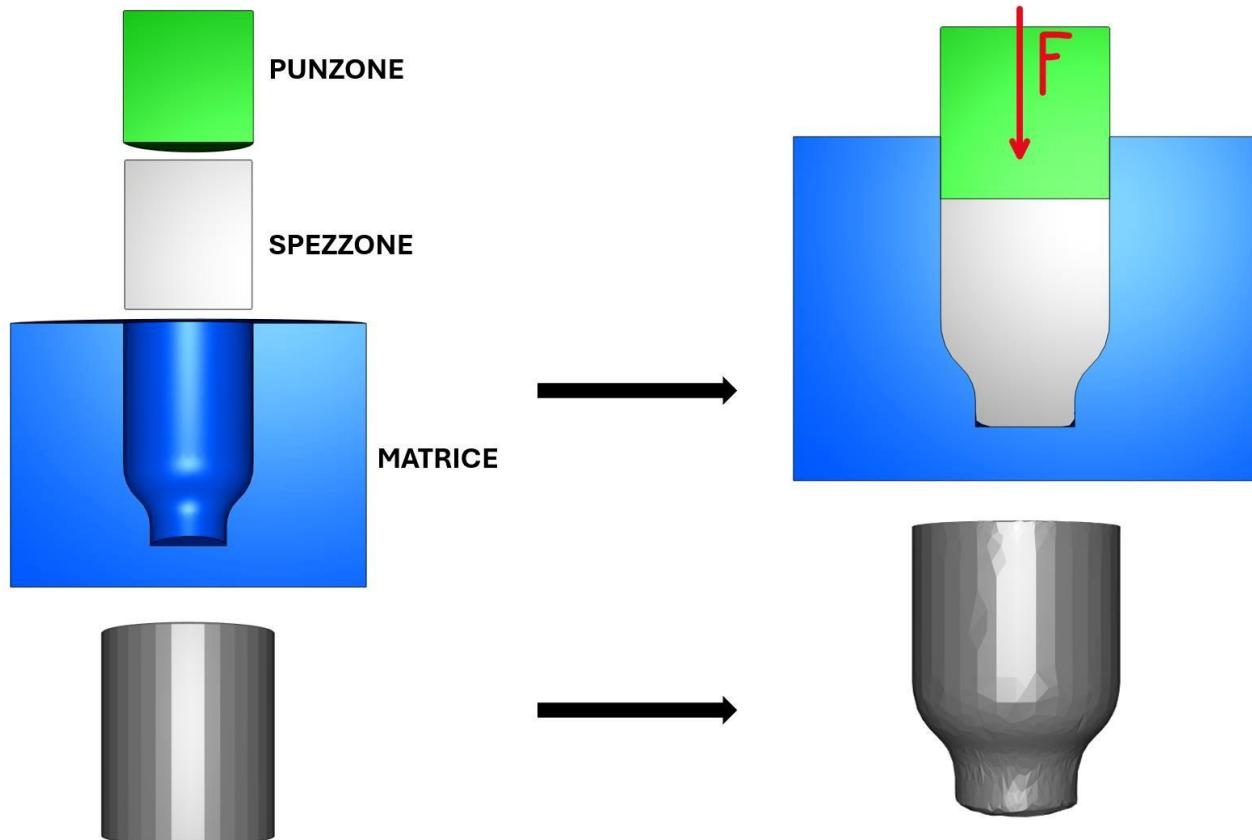


Figura 4 - illustrazione deformazione a freddo (Stefano)

Uno degli aspetti caratterizzanti di tale processo è la **conservazione del volume** del materiale durante la deformazione: a differenza di lavorazioni come la tornitura o la fresatura, non vi è produzione di truciolo, e pertanto gli scarti di materiale risultano estremamente contenuti. Questo si traduce in alta efficienza produttiva, contenimento dei costi e riduzione dell'impatto ambientale come mostrato in figura 5:

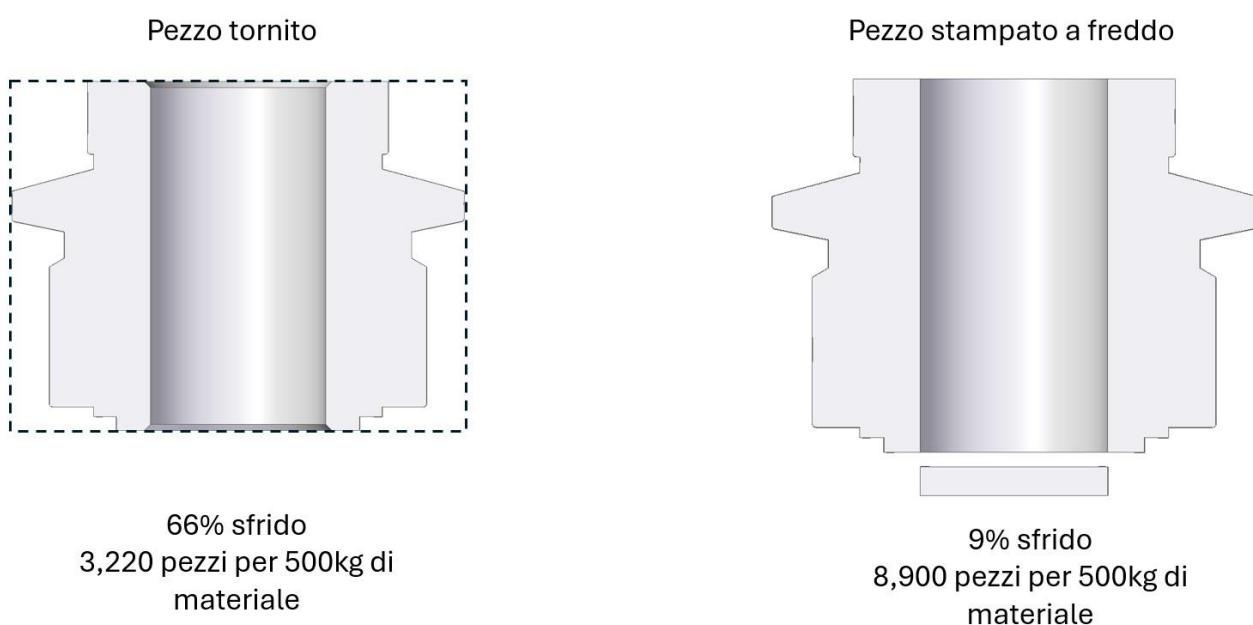


Figura 5 – confronto tra tornitura (a sinistra) e stampaggio a freddo (a destra) (LLC, 2016)

È importante sottolineare che la configurazione del **ciclo di stampaggio** non è univoca: a seconda della tipologia di boccola, delle caratteristiche della macchina disponibile e di altri parametri di processo, la pastiglia traciata può essere espulsa sia dal lato della matrice, sia dal lato del martello comportando quindi variazioni nel ciclo in base alla scelta fatta. La scelta della soluzione più adatta dipende da un compromesso tecnico tra efficienza, qualità e vincoli impiantistici. A titolo esemplificativo, viene riportato di seguito in figura 6 un ciclo di lavorazione rappresentativo adottato per la produzione di una boccola dove in questo caso si ha l'espulsione della pastiglia lato matrice:



Figura 6 - Ciclo di stampaggio di una boccola forata (AGRATI-CVB)

- **1° Stazione:** estrusione scatolata in avanti;
- **2° Stazione:** formazione nicchie in preparazione del foro;
- **3° Stazione:** estrusione inversa e ottenimento delle dimensioni della pastiglia;
- **4° Stazione:** strappo pastiglia con foratura e calibratura;
- **5° Stazione:** ricalcatura per migliorare tolleranze dimensionali e finitura superficiale.

Per definire un ciclo di stampaggio è necessario eseguire uno **studio di fattibilità**, volto a individuare la sequenza di deformazioni più efficiente, ovvero quella che consente di ottenere il componente desiderato con il minor numero possibile di stazioni.

A tal fine, il processo progettuale parte dal componente finito e procede “a ritroso” per determinare le dimensioni iniziali dello spezzone, poiché il volume deve rimanere costante tra lo spezzone e il componente finale (fatta eccezione per l’operazione di strappo della pastiglia dove al volume bisogna sommare le dimensioni della pastiglia che in questo caso sono individuabili nella terza stazione).

Poiché le geometrie dei componenti possono risultare complesse e il calcolo del volume può diventare oneroso, a supporto viene impiegata la modellazione CAD. Una volta realizzato il modello del componente finale, il software fornisce direttamente il valore del volume complessivo, che può essere confrontato con quello dello spezzone e delle stazioni intermedie, garantendo così la conservazione del volume lungo l’intero ciclo di stampaggio.

Una volta fissato il diametro del filo, ossia dello spezzone, l’altezza risulta una conseguenza diretta del vincolo di volume costante. Determinate così le dimensioni iniziali, è possibile procedere “in avanti” nella definizione delle stazioni di formatura e delle relative geometrie fino a ottenere il componente finale.

Il focus della presente tesi è incentrato **sull’ottimizzazione dell’operazione di traciatura** di una boccola metallica, dunque sull’ultima stazione del ciclo di stampaggio, fase delicata del processo che incide direttamente sulla qualità del pezzo e sulla sua idoneità a subire lavorazioni successive come la maschiatura e l’assemblaggio.

Anche se il principio fondamentale della deformazione plastica a freddo è la conservazione del volume, esistono alcune operazioni in cui questa assunzione non vale più in modo stretto. Un esempio è rappresentato dalla fase di strappo della pastiglia, durante la quale una porzione di materiale viene separata dal pezzo principale. Tuttavia, è importante notare che, se si considera complessivamente il volume della boccola privata della pastiglia e il volume della pastiglia stessa, la somma dei due rispetta comunque il volume complessivo della stazione precedente, confermando il **principio di conservazione su scala globale** del processo.

1.3 Descrizione processo aziendale

Il processo produttivo ha inizio dalla **vergella**, un filo metallico fornito in bobine che rappresenta la materia prima. Prima di poter essere utilizzata nella pressa, nella maggior parte dei casi la vergella deve essere sottoposta a un'operazione di trafilatura, necessaria per ottenere il diametro e le caratteristiche superficiali richieste per la lavorazione.



Figura 7 - vergella (CVB, Tabbia Stefano)



Figura 8 - come entra la vergella nella trafila (CVB, Tabbia Stefano)



Figura 9 - magazzino vergelle (CVB, Tabbia Stefano)

L'azienda si approvvigiona di vergelle di acciaio da diverse fonderie partner, tra cui Trafilati Martin, ABS, Acciaierie Venete e Valbruna. Queste aziende producono le vergelle mediante **processi di fusione e laminazione**, spesso utilizzando anche materiale di recupero, come ad esempio scarti industriali provenienti direttamente dall'azienda stessa (inclusi residui di produzione come le pastiglie siccome una volta strappate vengono direzionate in contenitori di recupero). Questo recupero avviene attraverso un processo chiamato **cernita**, per cui l'azienda viene retribuita per il conferimento degli scarti metallici, che vengono poi rifiuti per produrre nuova materia prima. Al momento della ricezione in accettazione, le vergelle vengono marcate con una striscia di vernice colorata tramite bomboletta spray per identificarne il materiale in modo rapido e visivo, utile nel caso si smarrisca la documentazione associata.

Ogni vergella è associata a una **colata**, che definisce il lotto di produzione. All'interno di una stessa colata possono esserci più vergelle, e anche se vi possono essere leggere variazioni tra esse, vengono considerate identiche ai fini della tracciabilità. Il lotto è identificato attraverso un codice assegnato dal fornitore.

Le vergelle in arrivo in azienda possono avere caratteristiche diverse a seconda del livello di lavorazione già subito. Le principali tipologie di lavorazioni sono:

- **Laminato crudo**: materiale base, più economico ma meno lavorabile.
- **Laminato cotto** (serie C): più morbido e facilmente lavorabile, utilizzato frequentemente.
- **Trafilato ricotto in misura** (serie B): il materiale viene trafilato e successivamente ricotto per ottenere dimensioni precise. Viene utilizzato nel 30% dei casi.
- **Passo dal cotto** (serie A): la vergella è pronta per essere utilizzata direttamente in macchina senza necessitare di essere trafilata. È la tipologia più costosa (fino a 2000€ rispetto ai 1300€ di una vergella standard), in quanto ha già subito tutti i trattamenti necessari.



I primi due formati offrono diametri selezionabili a passi di 0,5 mm (a partire da 5 mm), mentre le vergelle delle serie B e A possono essere personalizzate in misura (ad esempio 17,45 mm), ma con tolleranze, poiché l'intera lunghezza del filo non può essere perfettamente uniforme.

Una volta ricevute, le vergelle seguono il seguente processo:

1. Scarico: le vergelle vengono scaricate dai camion in zona accettazione.
2. Movimentazione: tramite muletto, le vergelle vengono spostate in magazzino.
3. Trasporto a bordo macchina: quando necessario, vengono portate alla macchina per la lavorazione.

Durante queste operazioni, le forche del muletto possono danneggiare la superficie del filo (ad esempio, causare graffi o lacerazioni). Nonostante fosse stata valutata l'idea di applicare protezioni alle forche, tale soluzione è stata scartata, poiché il muletto è utilizzato per molteplici scopi e lavorazioni.

Prima di entrare nella trafia, dove il filo subisce una riduzione del diametro e un incrudimento, la vergella deve essere trattata per migliorarne le caratteristiche superficiali e ridurre eventuali difetti, come quelli causati dalla movimentazione (ad esempio lacerazioni). I principali trattamenti possono essere:

- **Decapaggio:** Rimozione dell'ossidazione (scaglia) dalla superficie tramite agenti chimici. Questo trattamento è fondamentale per ottenere una superficie pulita e priva di contaminanti.
- **Polimero:** Dopo il decapaggio, viene applicato un film protettivo che protegge il filo dall'ossidazione. È una soluzione ecologica e impedisce che il materiale si corroda nel tempo.
- **Saponatura:** Applicazione di un lubrificante che facilita la scorrevolezza del filo nella trafia, riducendo l'attrito e migliorando la lavorabilità.
- **Oleatura:** Trattamento che protegge il filo e facilita il suo passaggio in macchina, riducendo l'usura.

Questi trattamenti sono fondamentali per migliorare la qualità della superficie e per prepararla alle successive fasi di lavorazione.

In base alle necessità, le vergelle possono essere sottoposte a ulteriori lavorazioni, che migliorano la scorrevolezza, l'uniformità e la resistenza all'usura:

- **Fosfatazione:** Deposito di uno strato uniforme di cristalli di fosfato di zinco sulla superficie del filo.
- **Sabbiatura:** Trattamento meccanico che utilizza abrasivi per pulire la superficie.
- **Polverizzazione:** Applicazione di uno strato protettivo che deve essere rimosso prima della saldatura.



- **Saponatura** (secondaria): In alcuni casi, viene applicato zinco stearato come lubrificante solido.

Questi trattamenti migliorano la preparazione della superficie per operazioni come trafilatura, estrusione, stampaggio o ricalcatura, riducendo l'usura e ottimizzando la lavorabilità.

Quando una vergella termina, per non interrompere a lungo il processo produttivo (che comporterebbe ricalibrazione, reinfilaggio nella trafila, ecc.), si effettua un giunto di **saldatura** tra la fine della vergella vecchia e l'inizio di quella nuova.

Procedura:

- Si rimuove la polverizzazione (non si può saldare su quella superficie).
- Si saldano le due estremità con un macchinario che le mantiene allineate.
- Si mola la saldatura per uniformarla.

La porzione di filo risultante dalla saldatura delle estremità di due bobine **non viene utilizzata** per la produzione dei componenti: essa viene scartata prima che entri nella macchina. È responsabilità dell'operatore individuare questa sezione e procedere al suo taglio tramite cesoia, in modo da evitare che venga stampata. Infatti, a causa del processo di saldatura, tale tratto presenta una **maggior durezza e una minore deformabilità**, caratteristiche che potrebbero compromettere l'integrità degli utensili o, nei casi peggiori, causare l'arresto della macchina per sovraccarico.

Ogni vergella viene campionata, si taglia uno spezzone e si invia al reparto qualità per il controllo di diametro e composizione chimica.

Il fornitore fornisce i valori nominali delle percentuali di elementi (C, Mn, B, S, ecc.), che vengono verificati tramite un database conforme alla **norma EN10263-4**. Se i valori non rientrano nelle specifiche, il sistema segnala l'anomalia.

Anche la durezza del materiale viene controllata: un valore medio utilizzato può essere di circa 500 MPa.

Il costo della vergella rappresenta la voce economica più rilevante nella produzione dopo l'acquisizione dei macchinari, poiché è la materia prima di partenza. La scelta della tipologia di vergella deve quindi essere basata non solo sul prezzo, ma sulla compatibilità con il componente da produrre.

Ad esempio: spendere 1000€ per una vergella economica che però compromette il prodotto finito (e quindi il rapporto con il cliente) può portare a penali elevate, anche milionarie, a fronte di un risparmio marginale. È quindi preferibile scegliere una vergella più costosa ma di qualità superiore se il componente lo richiede.

Nel caso specifico di componenti come le **boccole** (oggetto di studio), i materiali più utilizzati sono:

- **C10**
- **C15**
- **20MnB4**

Nella maggior parte dei casi, la vergella deve essere sottoposta a **un'operazione di trafilatura**, che ha due obiettivi principali: ridurre il diametro del filo e incrementarne la durezza e la resistenza tramite incrudimento. Sebbene questa lavorazione non elimini completamente eventuali difetti superficiali, contribuisce a renderne la superficie più omogenea e regolare. La trafilatura rappresenta quindi una fase fondamentale per garantire una sezione trasversale costante e conforme alle tolleranze richieste, condizione indispensabile per assicurare la qualità e l'affidabilità nelle successive operazioni di stampaggio.

Un esempio concreto: una vergella entra in macchina con un diametro di 12,5 mm e, passando attraverso la trafila, viene ridotta a 11,8 mm.



Figura 10 – entrata filo nella trafila attraverso rulli tira-filo (CVB, Tabbia Stefano)



Figura 11 - percorso filo nella trafila per entrare in macchina (CVB, Tabbia Stefano)

Dalla figura 11 si può osservare come la **vergella** venga inserita all'interno della **filiera**, la quale ha la funzione di trafiltrarla, riducendone il diametro e migliorandone le caratteristiche superficiali. Successivamente, il filo trafiltrato viene **avvolto su un rullo** che, ruotando, esercita un'azione di richiamo, consentendo l'avanzamento continuo della vergella. Come mostrato nella figura 12, il filo attraversa poi una serie di **rulli raddrizzatori**, la cui funzione è quella di **eliminare eventuali curvature e garantire l'ingresso rettilineo** del filo all'interno della macchina.

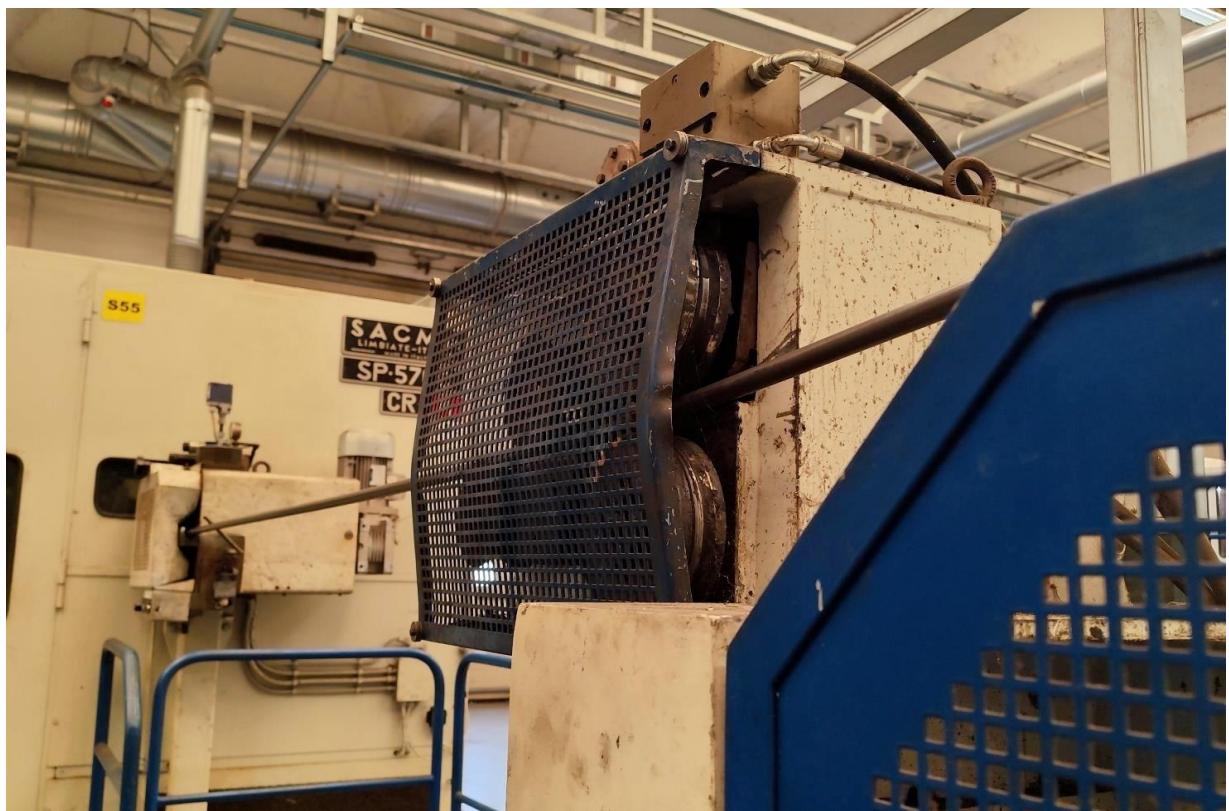


Figura 12 - percorso filo dopo la trafila per entrare in macchina (CVB, Tabbia Stefano)

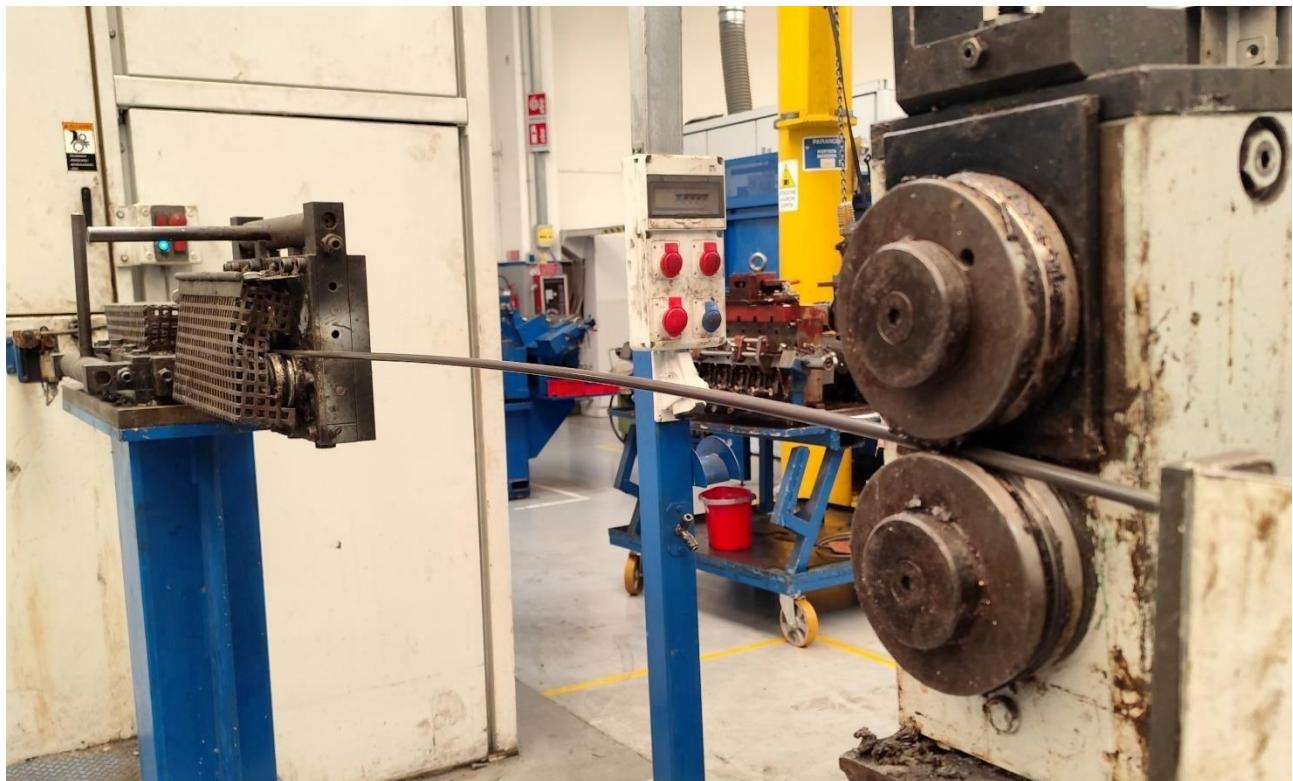


Figura 13 - percorso filo dopo la trafilatura per entrare in macchina (CVB, Tabbia Stefano)



Figura 14 - percorso filo che entra nella filiera e quindi nella trafilatura (CVB, Tabbia Stefano)

Una volta trafilato, il filo viene tagliato tramite **tranciatura** in spezzoni di lunghezza prestabilita. Questi spezzoni rappresentano i **semilavorati** di partenza che verranno successivamente sottoposti al processo di **stampaggio a freddo**, cuore del ciclo produttivo.

Lo stampaggio avviene all'interno di una **pressa meccanica**, costituita da due parti principali: il lato **matrice** (fisso) e il lato **martello** (mobile). Durante il ciclo di pressatura, lo spezzone viene inserito tramite delle pinze nella matrice e il martello, scendendo con una forza controllata, lo deforma plasticamente conferendogli la geometria finale del componente, come si vede in figura 4.

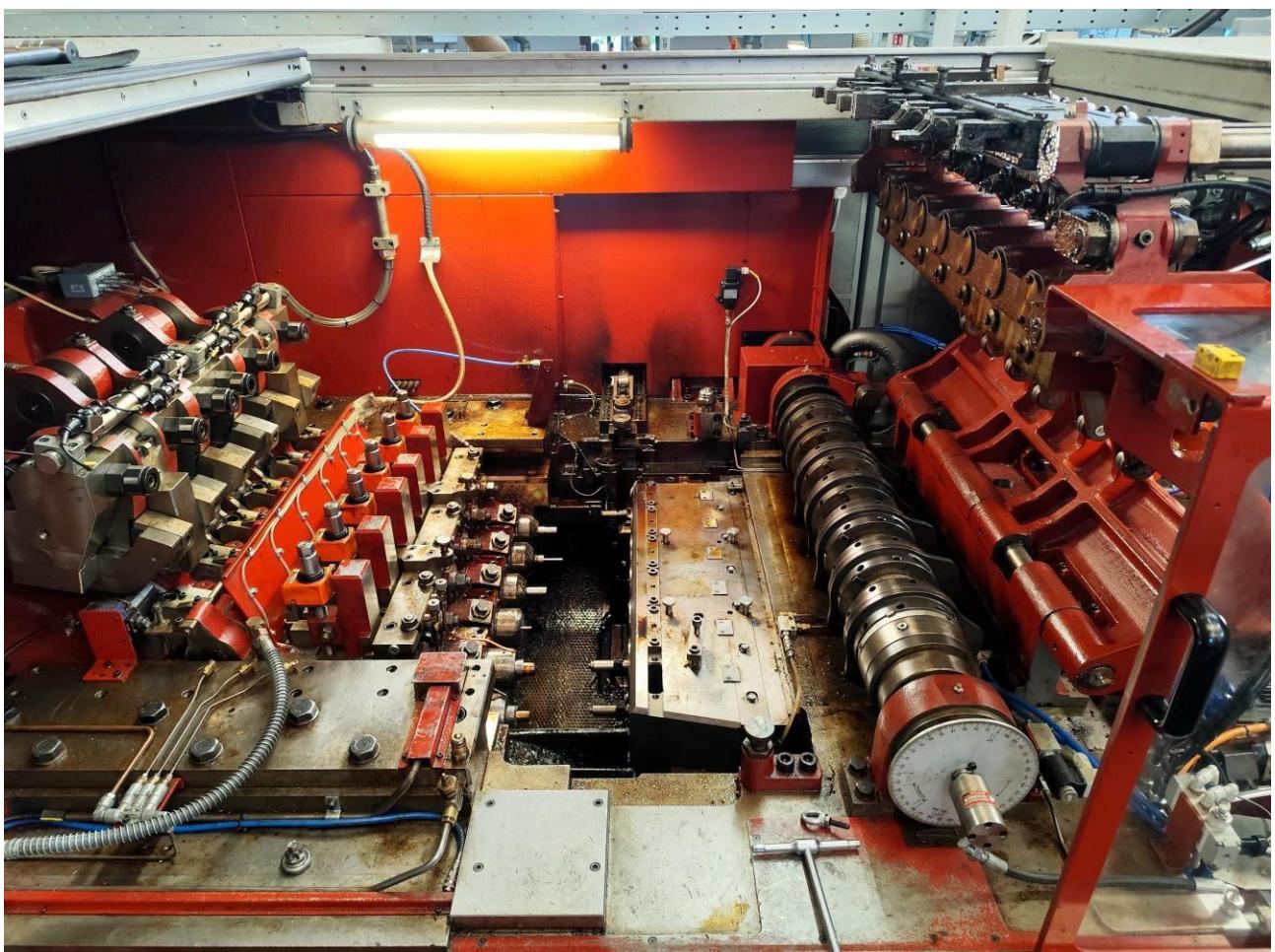


Figura 15 - pressa meccanica (CVB, Tabbia Stefano)

L'azienda dispone di **macchinari multistazione**, in cui lo spezzone attraversa progressivamente più stazioni di formatura, come illustrato in figura 6. Il trasferimento da una stazione all'altra avviene tramite **pinze meccaniche**, che afferrano e movimentano il pezzo con precisione sincronizzata rispetto al ciclo della macchina, illustrate in figura 16. Questo consente una produzione continua, automatizzata e ad alta produttività. Ogni **pinza** è comandata da un proprio sistema **camma-biella-manovella**, che ne regola l'apertura nel momento esatto del ciclo. La corretta sincronizzazione è essenziale per garantire la presa del pezzo al momento giusto, evitando difetti o collisioni durante il trasferimento tra stazioni.



Figura 16 - pinze nella dima di setup (CVB, Tabbia Stefano)

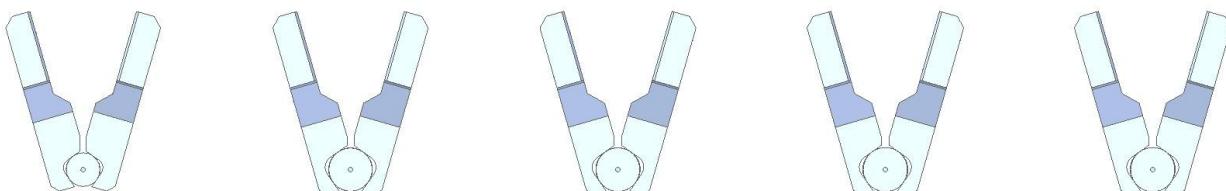


Figura 17 - pinze realizzate a CAD (AGRATI-CVB)

Nel contesto produttivo dell'azienda dispongono di due tipologie di presse: **SACMA** di produzione italiana e **National Machinery** di origine americana. Entrambe sono progettate per realizzare pezzi metallici ad alta produttività e con elevata ripetibilità, ma presentano caratteristiche tecniche e funzionali differenti, che influenzano la gestione del processo e delle attrezzature.

Uno degli aspetti operativi più rilevanti è la **regolazione della velocità di ciclo**, ovvero il numero di giri al minuto (rpm) della macchina, che l'operatore può impostare tramite il pannello di controllo.



Figura 18 - pannelli controllo (CVB, Tabbia Stefano)

Aumentare la velocità consente di incrementare la produttività, ma comporta un'usura più rapida dei componenti critici come **punzoni, matrici e boccole**, influenzando negativamente la qualità del pezzo e la stabilità del processo. A supporto della manutenzione, per mantenere elevati standard qualitativi e prevenire rilavorazioni o scarti, l'azienda ha implementato un sistema di **gestione preventiva dell'usura degli utensili**, con particolare attenzione al **punzone** (parte montata sul lato del martello che, durante il ciclo di stampaggio, penetra nel materiale per conferirgli la forma finale prevista dal processo), elemento critico per la precisione dello stampaggio, soprattutto nelle fasi di foratura. Attraverso un database interno basato sulla durata storica degli utensili, viene stabilito un numero massimo di cicli ammessi per ogni punzone. Raggiunto tale limite, il sistema genera un alert per la **sostituzione preventiva**, evitando il rischio di formazione di **bave**. Questo è particolarmente importante per componenti di precisione come le **boccole forate**, dove anche piccole sporgenze possono compromettere il corretto accoppiamento o l'inserimento in assiemi meccanici.

Dal punto di vista economico, questa scelta è pienamente sostenibile: ad esempio, un punzone dal costo unitario di circa 60 euro che ha già prodotto oltre 100.000 pezzi ha un'incidenza trascurabile sul costo del singolo componente. La sostituzione anticipata rappresenta quindi una misura efficace per garantire la qualità senza aumentare significativamente i costi.

Gli utensili (matrici e punzoni) sono realizzati quasi esclusivamente da fornitori esterni specializzati



(per circa il 98% dei casi). Tuttavia, in caso di rottura o urgenze produttive, è possibile realizzare alcuni componenti in **attrezzeria interna** tramite lavorazioni al tornio, sebbene con costi e tempi più elevati.

Gli utensili arrivano in attrezzeria smontati: **un operatore li assembra** seguendo una distinta base, creando quello che viene chiamato **pacchetto di attrezzaggio**, che poi viene installato sulla presa. Ogni macchina è dotata di un determinato numero di stazioni operative e può montare **pacchetti lunghi o corti**, in base alla serie e al tipo di pezzo da produrre. Ad esempio, nella sigla *SACMA SP 370*, la sigla indica:

- **SP**: stampatrice progressiva,
- **3**: serie (pacchetto lungo o corto),
- **7**: numero di stazioni (inclusa la traciatura dello spezzone).

National e Sacma differiscono sotto vari aspetti:

- **Capacità di formatura**: la National ha una forza massima maggiore e può lavorare pezzi con diametri più elevati e lunghezze di estrazione superiori.
- **Sistema di alimentazione**: la SACMA utilizza rulli di trascinamento per l'avanzamento del filo, mentre la National impiega ganasce tira-filo.
- **Cambio attrezzaggio**: la National è dotata di sistema di cambio rapido (quick change) tramite dimes di set-up esterne, che consentono di preparare l'intero gruppo utensili fuori macchina, riducendo drasticamente i tempi di fermo. La SACMA, al contrario, ha un sistema più tradizionale: alcune parti, come pinze e coltelli, non sono smontabili, e il cambio richiede più tempo.

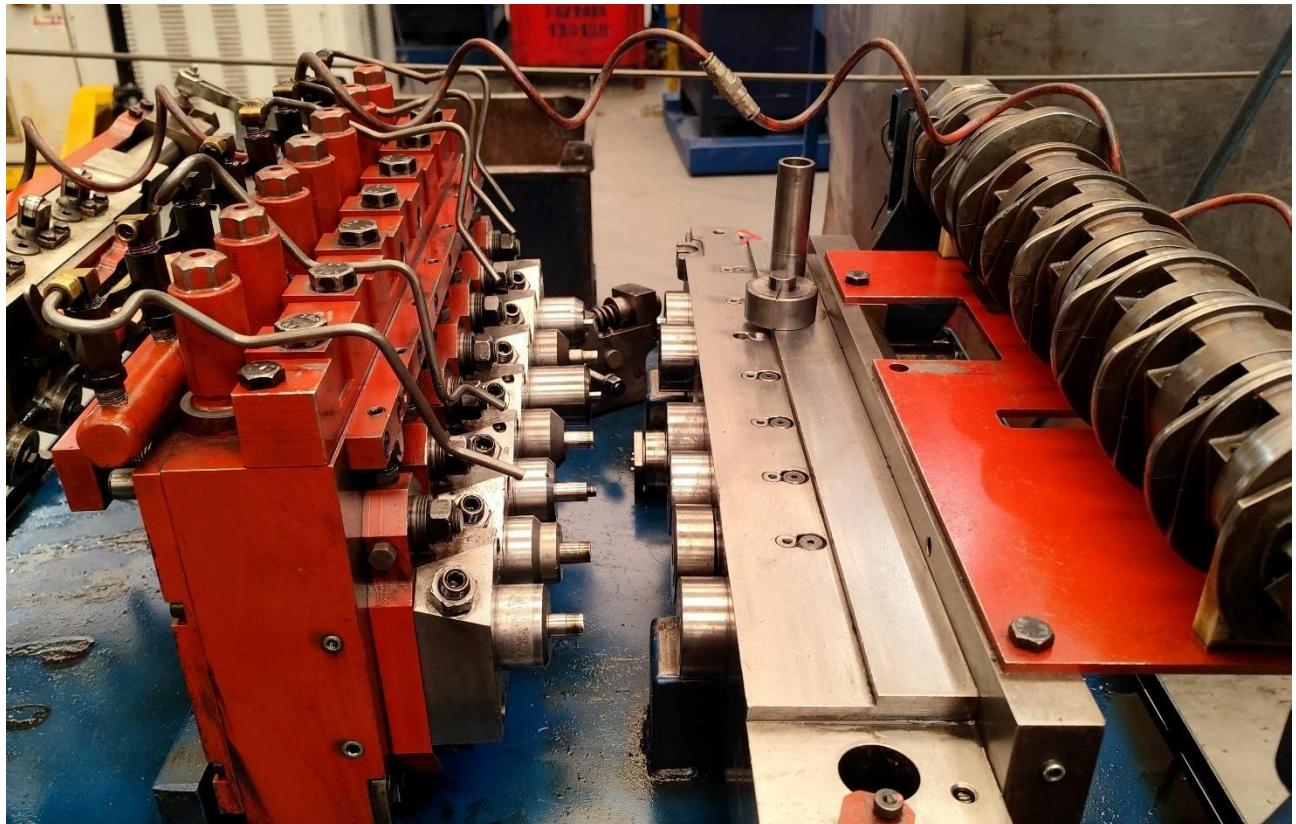


Figura 19 - dima setup (CVB, Tabbia Stefano)



Figura 20 - dima setup (CVB, Tabbia Stefano)

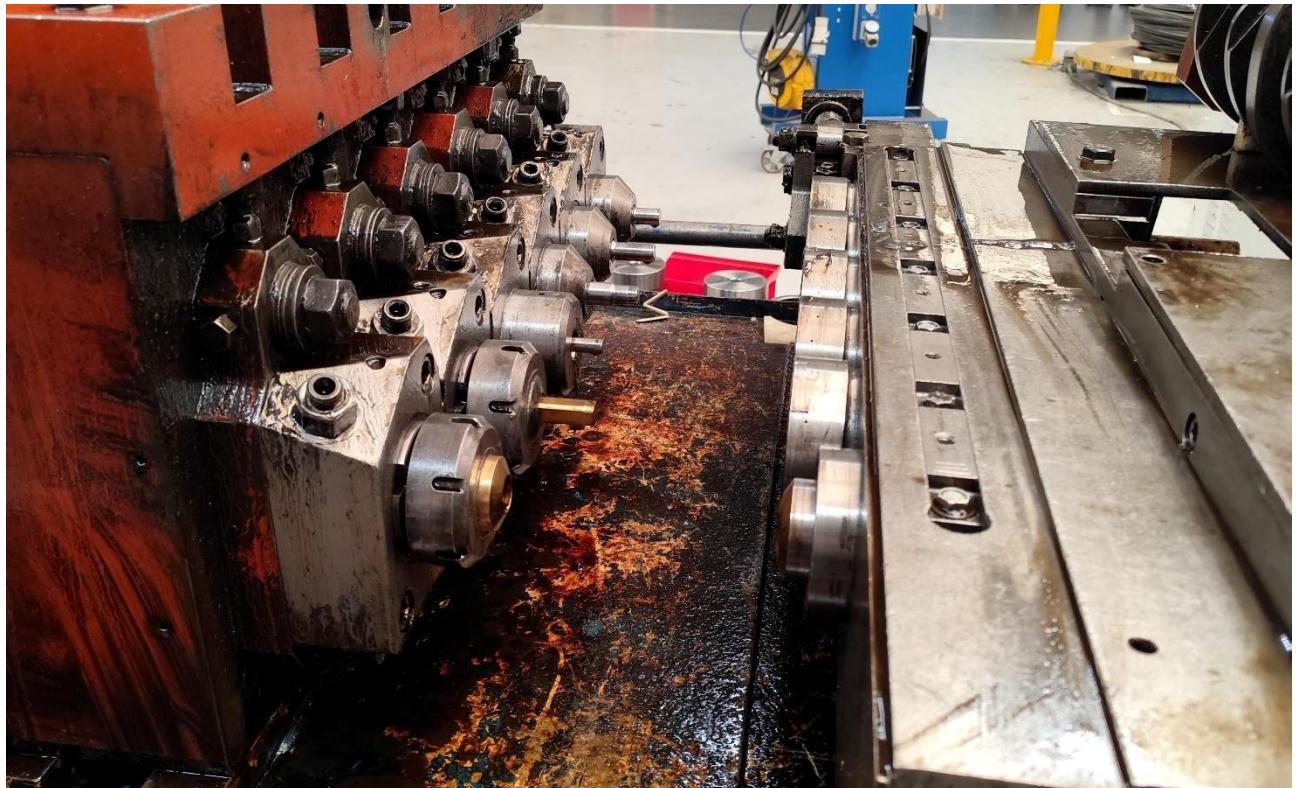


Figura 21 - dima setup (CVB, Tabbia Stefano)

Le **dime di attrezzaggio** permettono di montare l'attrezzatura fuori macchina e verificarne il corretto posizionamento, simulando le condizioni di montaggio reale. Sulla dima viene verificata, ad esempio:

- La **battuta del punzone** nella matrice;
- Il **posizionamento delle pinze**;
- La centratura tramite un **tampone di calibrazione**, che deve entrare nel martello con precisione.

Una volta montato il pacchetto in macchina, l'operatore effettua una **regolazione fine tramite i cunei di registrazione** posti dietro i martelli. I cunei hanno una superficie inclinata e sono regolabili con una vite micrometrica: un giro della vite corrisponde a uno spostamento di circa tre decimi di millimetro. Questo consente di adattare con precisione la corsa del martello alla lunghezza richiesta, compensando eventuali tolleranze degli spessori. Ogni regolazione viene registrata su un **foglio di settaggio cunei**, utile per future produzioni dello stesso pezzo.

Dietro ai cunei sono installate delle **celle di carico** che rilevano il tonnellaggio istantaneo durante ogni ciclo di stampaggio. L'operatore imposta un valore soglia di tonnellaggio massimo: se durante il ciclo questo limite viene superato, la macchina si arresta automaticamente per prevenire eventuali danni agli utensili e all'impianto.

Un aspetto da non trascurare è il lubrificante che viene spruzzato tramite **ugelli direzionabili** e la quantità è regolata "a sentimento" dall'esperienza dell'operatore, in base all'operazione. Le fasi più critiche – **estrusione inversa, traciatura dello spezzone, e strappo della pastiglia** – richiedono maggiori quantità di lubrificante per evitare surriscaldamento e usura utensili.

Durante la produzione dopo l'ultima stazione di formatura, i pezzi cadono in due **rompilotto**, che separano i pezzi buoni da quelli di scarto (come le pastiglie), anche se occasionalmente può verificarsi la miscelazione.

Per l'**espulsione della pastiglia** illustrata in figura 22, all'interno del foro della matrice è presente una boccola di uscita, spesso dotata di inserti di trattenuta, come mostrato in figura 23. Quando il punzone prosegue nel suo movimento e supera questa zona con gli inserti, può ritornare indietro. Gli inserti, infatti, impediscono che la pastiglia rimanga incastrata, evitando che venga riportata indietro dal punzone. Se necessario, sarà la pastiglia successiva a spingere quella precedente fuori.

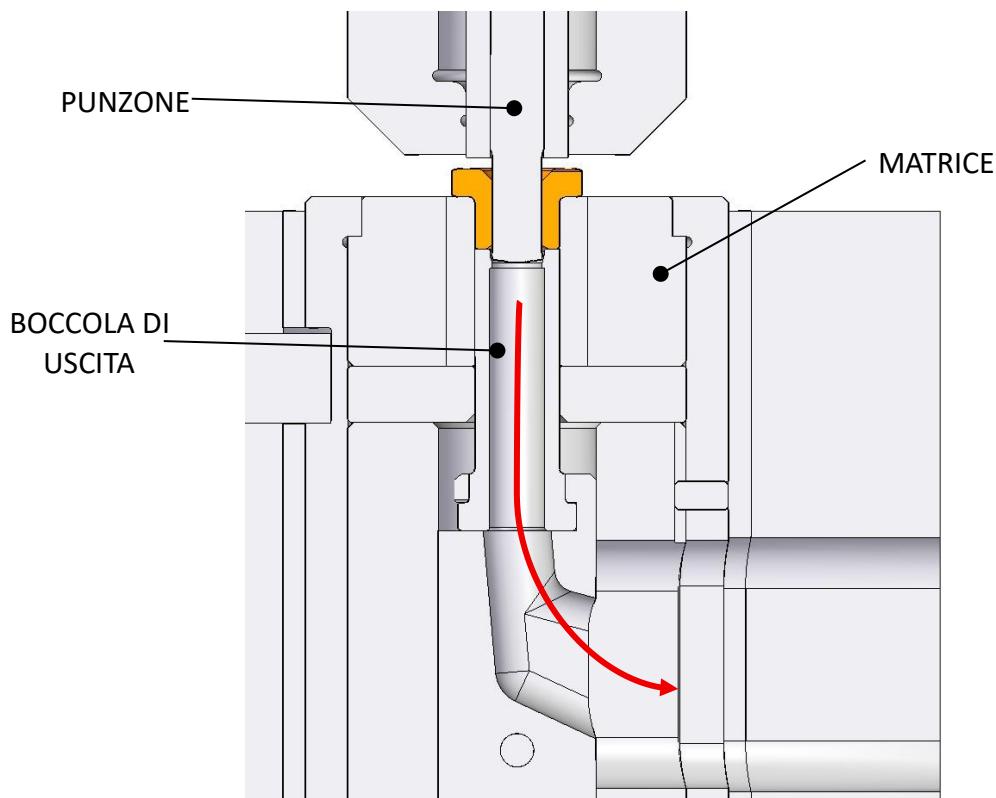


Figura 22 – percorso espulsione pastiglia (AGRATI-CVB)

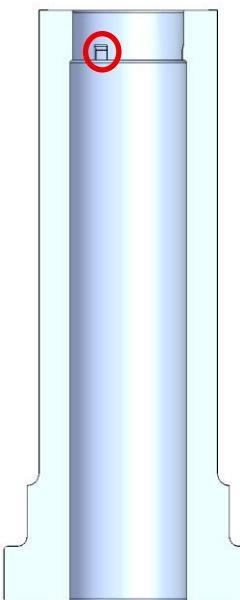


Figura 23 – esempio boccola fuoriuscita pastiglia con inserto (AGRATI-CVB)



Figura 24 - raccolta uscita pezzi (CVB, Tabbia Stefano)



Durante il primo avvio di una **nuova produzione**, si generano inevitabilmente pezzi di scarto. Il numero può variare in base alla complessità del pezzo e alla precisione iniziale dell'attrezzaggio, da circa **100 fino a 4000 pezzi**. Ridurre questi scarti è uno degli obiettivi principali dell'ottimizzazione del processo, sia tramite simulazione FEM, sia con metodologie di set-up avanzate.

Al termine dello stampaggio, ogni componente è sottoposto a un **controllo qualità** finalizzato alla verifica dell'assenza di bave o altri difetti superficiali. Questo controllo può essere effettuato in due modalità:

- **Controllo visivo manuale**, eseguito manualmente dall'operatore per individuare difetti macroscopici;
- **Controllo automatico tramite sistema di visione artificiale**, in cui una fotocamera analizza il foro della boccola. Se l'immagine restituita risulta completamente bianca, il foro è considerato pulito; eventuali zone scure indicano la presenza di bave residue.

Nel caso in cui venga rilevata la presenza di bava, l'azienda può adottare diverse strategie, in funzione del valore del componente e delle quantità in gioco:

1. **Scarto del pezzo**: se il componente è di piccole dimensioni e basso valore unitario, viene semplicemente eliminato, evitando costi inutili di rilavorazione.
2. **Vibrofinitura**: i pezzi vengono inseriti in un contenitore vibrante, insieme a pietre abrasive e a un fluido di processo. L'azione abrasiva generata dalle vibrazioni rimuove le bave superficiali e migliora la finitura estetica e funzionale del componente. Tuttavia, in presenza di **fori molto piccoli**, le pietrine abrasive possono incastrarsi all'interno, rendendo il processo inefficace o persino dannoso.
3. **Scovolinatura**: quando né lo scarto né la vibrofinitura risultano applicabili, si ricorre alla scovolinatura, un'operazione manuale in cui un operatore utilizza **scovolini cilindrici** per rimuovere le bave interne al foro.

Questo metodo è preciso ed efficace, ma presenta costi e tempi elevati, per cui viene riservato a casi urgenti o a componenti critici difficilmente sostituibili.



Figura 25 – scovolinatura (AGRATI-CVB)

1.4 Componente analizzato

Passando ad un'analisi più dettagliata di un componente prodotto internamente, che costituirà l'oggetto dell'indagine, identifico il prodotto mostrato nella figura 27 con il ciclo di stampaggio in figura 26, come già sottolineato in precedenza, il ciclo di stampaggio di una boccola non è univoco, ma può variare in funzione della configurazione scelta. In questo caso specifico, l'espulsione della pastiglia avviene **dal lato matrice**, soluzione che influisce sia sulla sequenza operativa della pressa sia sulla progettazione degli utensili coinvolti.

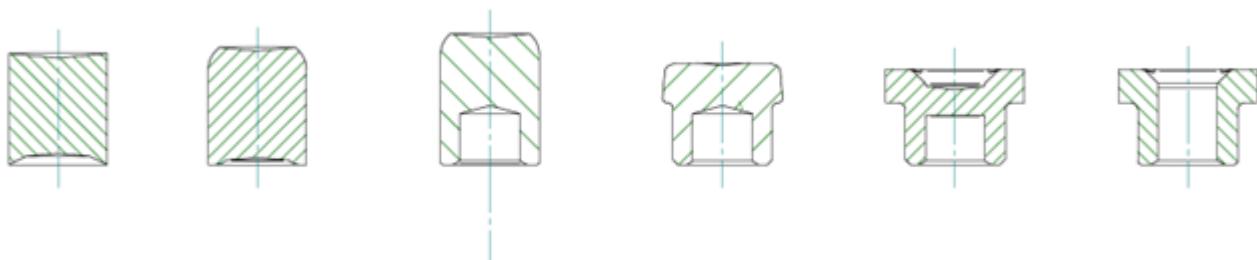


Figura 26 - ciclo stampaggio oggetto studio (AGRATI-CVB)

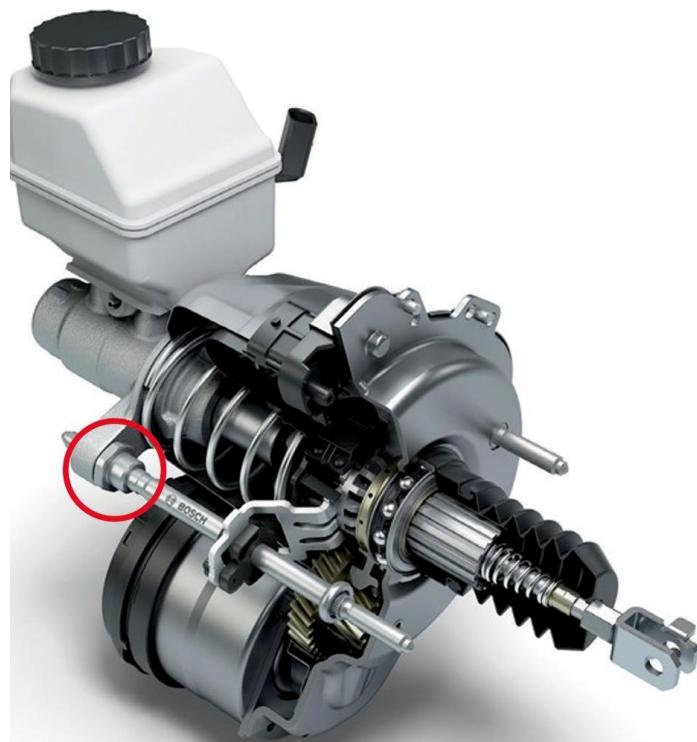


Figura 27 – sezione iBooster, cerchiato il dado caso studio

Questa boccola fa parte del sistema frenante **iBooster** che rappresenta una tecnologia avanzata nel campo dei veicoli, sfruttando un servofreno elettromeccanico che amplifica la forza frenante in modo intelligente. Questo sistema è caratterizzato da un motore elettrico che contribuisce a incrementare la potenza di frenata, permettendo una decelerazione sicura e controllata del veicolo. Il cuore del sistema si trova **dietro il pedale del freno**, dove la forza applicata dal conducente viene trasmessa tramite una serie di ingranaggi e componenti meccanici. Questi ultimi

convertono la forza in una pressione sufficiente per fermare il veicolo, migliorando la reattività e la sicurezza complessiva dell'auto.



Figura 28 – ibooster in esposizione in azienda (CVB, Tabbia Stefano)



Figura 29 - iBooster in esposizione in azienda (CVB, Tabbia Stefano)

Un aspetto distintivo del sistema iBooster è la sua alta modularità, che lo rende adattabile a una vasta gamma di veicoli con diverse configurazioni di impianti frenanti, tra cui quelli di marchi come **Volkswagen, Tesla, Porsche e Toyota**. Questa capacità di adattarsi a configurazioni diverse è garantita anche dalla progettazione di componenti specifici come il dado caso studio, un elemento essenziale per il corretto funzionamento del sistema.



Figura 30 – configurazioni tiranti e dadi per diverse case costruttrici (CVB, Tabbia Stefano)

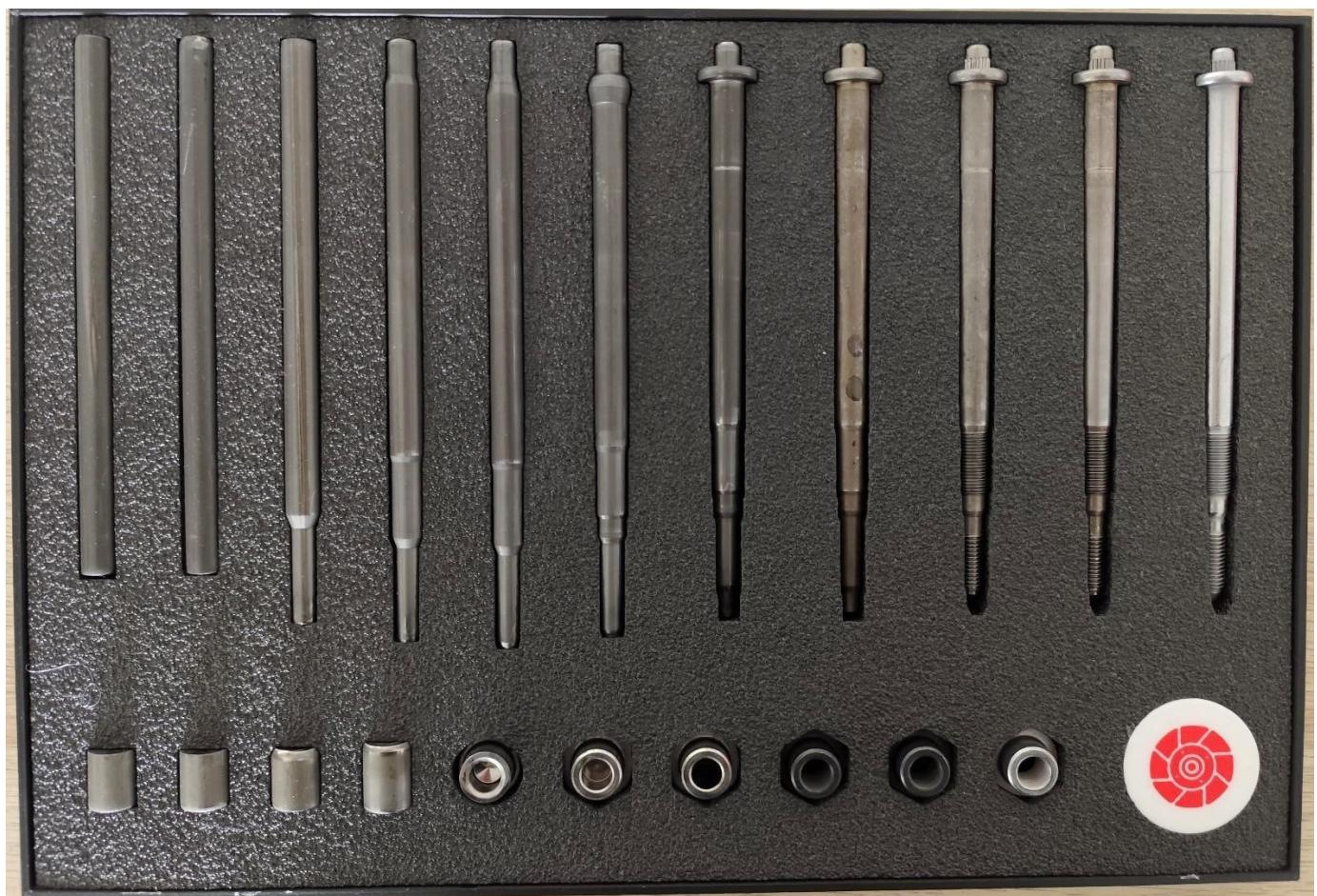


Figura 31 - configurazioni tiranti e dadi per diverse case costruttrici (CVB, Tabbia Stefano)

Il dado caso studio gioca un ruolo cruciale nel mantenere la **stabilità del sistema frenante**. La sua funzione principale è quella **di fissare i tiranti del servofreno**, i quali sono responsabili del trasferimento della forza frenante dal pedale all'impianto frenante.

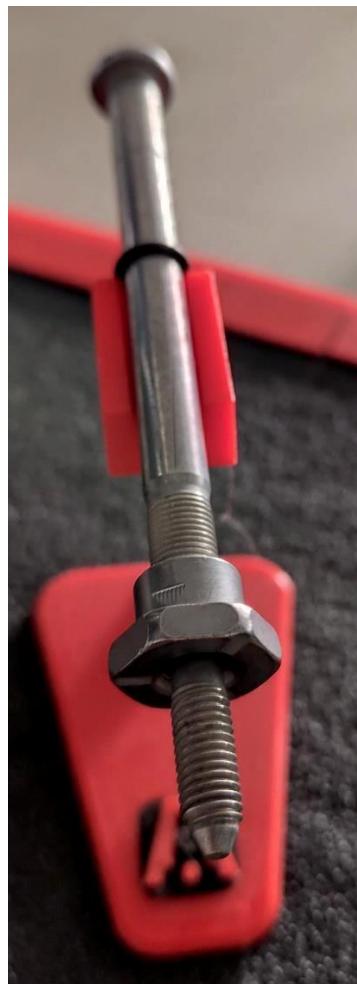


Figura 32 – avvitamento dado nel tirante (CVB, Tabbia Stefano)

Il dado assicura che il sistema sia montato correttamente e che la pressione generata dal conducente venga efficacemente trasmessa. Questo componente è progettato per adattarsi a differenti configurazioni di veicoli, poiché ogni modello ha specifiche esigenze di spazio e montaggio. Pertanto, il dado deve garantire una connessione stabile e sicura in tutte le applicazioni, gestendo correttamente la forza di serraggio tramite le coppie di serraggio regolabili. Le **coppie di serraggio** sono fondamentali per il corretto montaggio del dado e per la sicurezza del sistema. Ogni veicolo ha tolleranze e configurazioni diverse, quindi la coppia di serraggio deve essere regolata con precisione. Una coppia di serraggio **troppo alta** potrebbe danneggiare i componenti, mentre una **troppo bassa** potrebbe compromettere la stabilità del sistema e la corretta trasmissione della forza frenante. Per garantire l'affidabilità del dado, è essenziale che la sua **filettatura interna sia ben definita, priva di bave e di alta qualità**.



Figura 33 – filettatura interna (CVB, Tabbia Stefano)

La filettatura interna è progettata in modo particolare: la parte iniziale ha un diametro ridotto, che permette un avvitamento facile e fluido, mentre una sezione più avanzata presenta un **diametro maggiore**, creando un aumento dell'attrito. Questo cambio di diametro è fondamentale per il corretto raggiungimento della coppia di serraggio ottimale, poiché quando il dado raggiunge questa zona di diametro maggiore, l'attrito aumenta, dando un feedback tattile che indica che la coppia di serraggio corretta è stata raggiunta.

Inoltre, la finitura superficiale della filettatura deve essere impeccabile, con un processo di **maschiatura**, preferibilmente alesato, che assicura una precisione maggiore rispetto alla maschiatura rullata. La maschiatura alesata permette una migliore qualità della superficie interna, fondamentale per l'affidabilità del serraggio. **La filettatura mal realizzata, o la presenza di bave, potrebbe compromettere il serraggio, portando a malfunzionamenti nel sistema frenante.** Il dado caso studio è progettato con un **cono funzionale** e un anello di gomma interno che sigilla il dado per evitare infiltrazioni di polvere o perdite. Questo anello, insieme alla parte filettata, permette un montaggio stabile senza compromettere la funzionalità del sistema frenante. Il dado include anche una **tacchetta visibile sul diametro esterno**, che serve come indicatore per verificare che sia stata raggiunta la coppia di serraggio corretta.



Figura 34 – tacchetta per coppia serraggio (CVB, Tabbia Stefano)

Questa tacchetta è una caratteristica cruciale per garantire che il dado sia serrato con la forza giusta, evitando serraggi eccessivi che potrebbero danneggiare il sistema o serraggi insufficienti che potrebbero causare un'operazione imprecisa del freno.

La gestione delle tolleranze è quindi cruciale: una variazione minima potrebbe influire negativamente sul funzionamento del sistema frenante. Per questo motivo, il dado e tutti i suoi componenti vengono sottoposti a **rigorosi controlli di qualità** durante la produzione. Inizialmente, questi controlli erano effettuati manualmente siccome nelle fasi preliminari del progetto il cliente è maggiormente attento, ma oggi il processo è automatizzato con l'ausilio di telecamere per verificare la conformità delle specifiche tecniche. Inoltre, il dado viene trattato con un rivestimento di **zinco-nichel sigillato** per proteggerlo dalla corrosione e garantirne la durabilità nel tempo, migliorando anche le proprietà meccaniche del componente.

In conclusione, il dado caso studio è un componente fondamentale del sistema frenante iBooster, assicurando la stabilità e la precisione necessarie per una frenata sicura ed efficiente. La sua progettazione accurata, che include la filettatura precisa, il cono funzionale, l'anello di gomma e la tacchetta per il controllo della coppia di serraggio, lo rende un componente indispensabile per la sicurezza del veicolo. Le tolleranze strette e i rigorosi controlli di qualità sono essenziali per garantire che il dado svolga correttamente il suo ruolo in tutte le applicazioni automobilistiche. La cura nella progettazione e nella produzione di questo dado riflette l'impegno di nel fornire soluzioni tecnologiche avanzate per il miglioramento della sicurezza e dell'affidabilità dei veicoli.

2. Comprensione del fenomeno di frattura

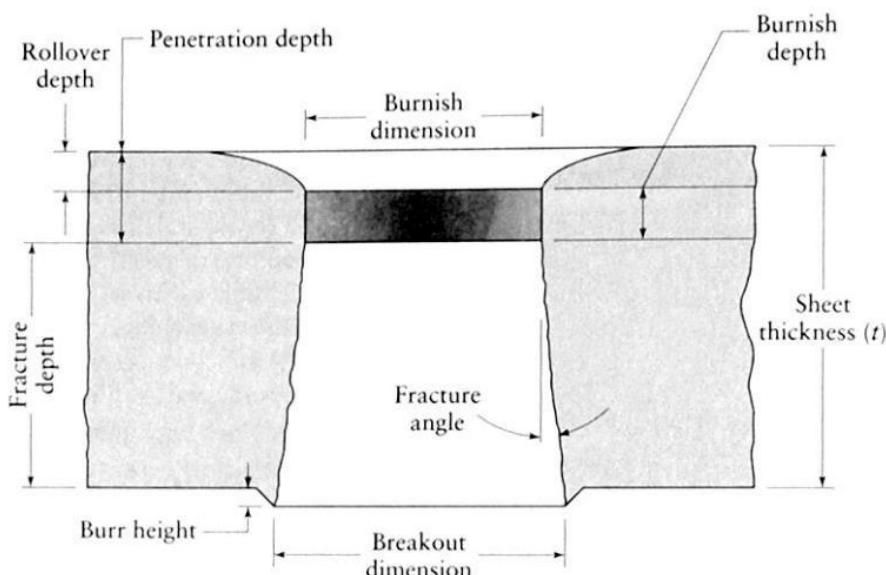


Figura 35 - Caratteristiche di un foro trinciato. Curvatura e angoli sono esagerati per enfatizzare. (ASM International, 1996)

Durante l'analisi morfologica della superficie traciata di una boccola metallica, è possibile distinguere **quattro zone** caratteristiche rappresentate in figura 35, ciascuna rappresentativa di una specifica fase del processo di separazione del materiale. Comprendere la natura e l'evoluzione di queste regioni è fondamentale per ottimizzare la qualità del taglio e prevenire difetti che potrebbero compromettere le successive operazioni di formatura:

1. **Zona di rollover:** si tratta della porzione iniziale del bordo tagliato, caratterizzata da un arrotondamento o depressione visibile sulla superficie. Essa è causata dalla deformazione plastica locale che si genera nel momento in cui il punzone entra in contatto con il pezzo, prima che avvenga la separazione vera e propria.
2. **Zona di brunitura (burnish):** immediatamente successiva al rollover, questa regione presenta una superficie relativamente liscia e regolare. È il risultato della penetrazione del punzone nel materiale sotto elevata pressione, durante la quale avviene una deformazione plastica quasi pura, prima dell'innesto della frattura.
3. **Zona fratturata:** si tratta della porzione visibilmente ruvida del bordo tagliato. Qui, il movimento continuo del punzone verso il basso provoca l'avvio e la propagazione della frattura del materiale. L'aspetto disomogeneo di questa zona è indicativo della rottura fragile o semi-fragile, spesso influenzata dalle caratteristiche meccaniche del materiale e dalle condizioni del processo.
4. **Zona di bava:** è l'estremità finale del bordo tagliato, tipicamente rappresentata da uno spigolo vivo o una protuberanza. La bava si genera durante la fase conclusiva del processo, quando la separazione dei due lembi avviene in modo netto e il materiale tende ad allungarsi plasticamente, lasciando un bordo sottile e tagliente.

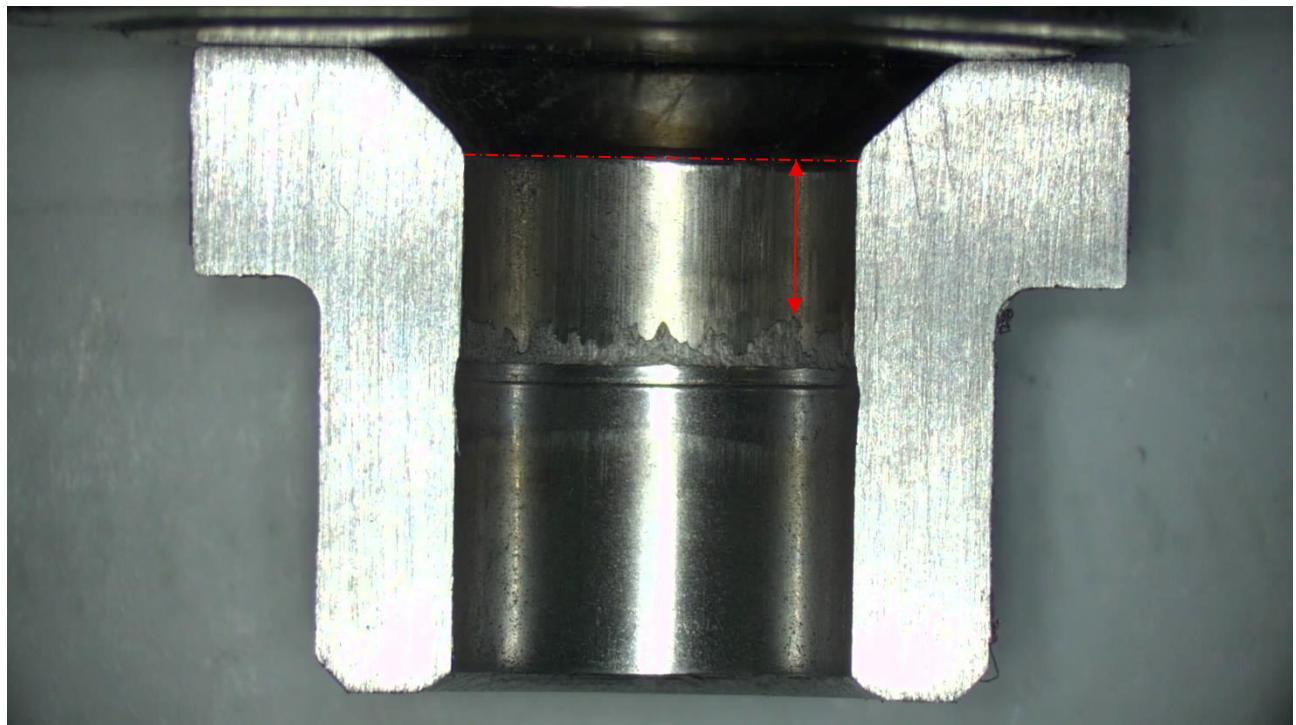


Figura 36 – sezione del componente analizzato per comprendere come avviene la frattura, la quota in rosso rappresenta l'altezza di inizio frattura che corrisponde a 3,41 mm, con una distanza media di 3,8 mm

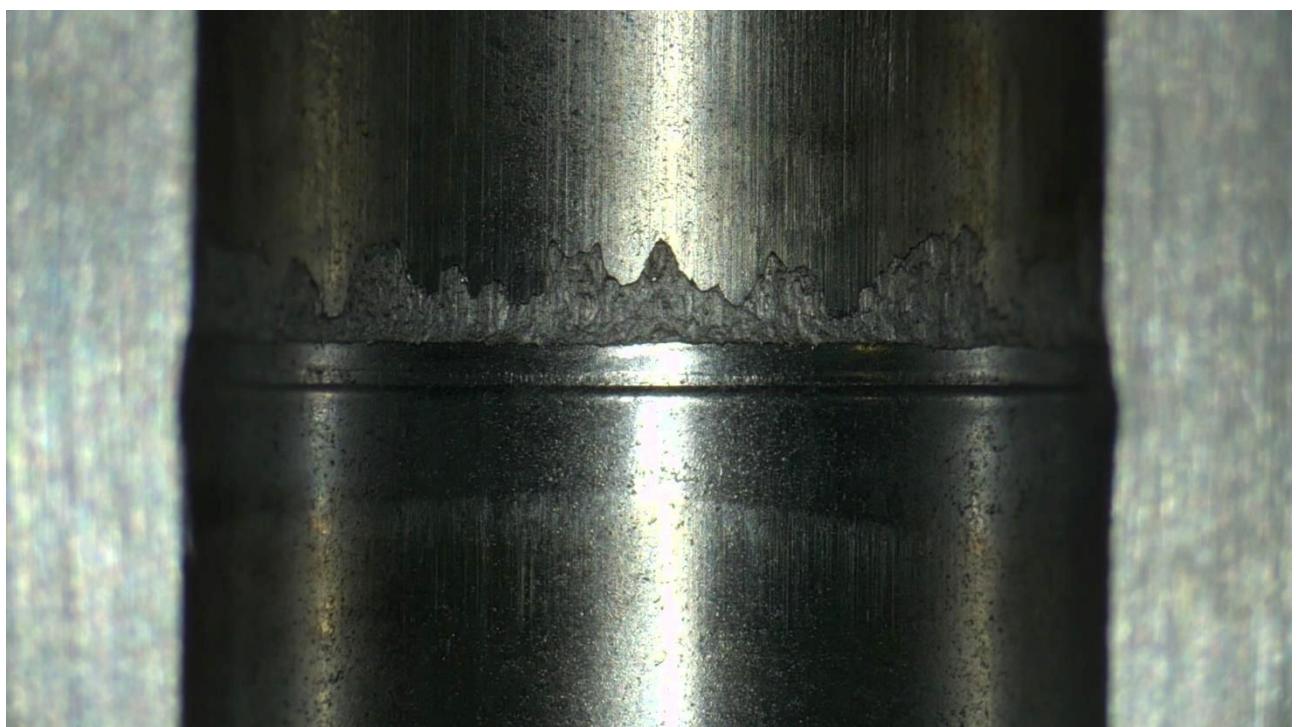


Figura 37 - zoom della frattura della figura 36

2.1 Analisi della bava



Figura 38 - pastiglia con bava evidente



Figura 39 - differenza pastiglia con bava vs pastiglia senza bava (CVB, Tabbia Stefano)

Tra tutte le zone sopra descritte, particolare attenzione deve essere riservata alla bava, in quanto essa influisce direttamente sulla qualità del pezzo finito e sulla sua idoneità alle lavorazioni successive come la maschiatura, per esempio. La presenza di bave eccessive non è ammessa nei processi ad alta precisione e può costituire un fattore critico di scarto. La formazione della bava è influenzata da diversi parametri, tra cui:

- **Il gioco punzone-matrice:** rappresenta la distanza tra i due utensili e costituisce il principale parametro di controllo della bava. Un gioco eccessivo o insufficiente può compromettere la qualità del taglio e aumentare l'altezza della bava, si approfondirà questo aspetto nella sezione 2.2.
- **La duttilità del materiale:** materiali più duttili tendono a generare bave più pronunciate durante la separazione, a causa del maggiore allungamento plastico prima della frattura, si approfondirà questo aspetto nella sezione 2.3.
- **Le condizioni degli utensili:** punzone e matrice usurati o non affilati generano bave più evidenti, e i limiti tollerabili di bava sono spesso utilizzati come criterio per la riaffilatura degli utensili stessi.

La presenza di bave può comportare problematiche rilevanti durante le operazioni successive di formatura o assemblaggio:

- **Possibili fratture** durante processi come l'orlatura o l'imbutitura;

- **Interferenze meccaniche** dovute al distacco della bava, che può danneggiare il pezzo o rigare le superfici degli utensili;
- **Contaminazione dei lubrificanti** con particelle metalliche, che compromette l'efficacia della lubrificazione;
- **Rischi per la sicurezza**, in quanto le bave creano bordi taglienti.

In relazione al tipo di taglio, si distinguono due principali tipologie di bava:

1. **Bava da compressione**: si origina nella fase iniziale del taglio, a causa della forte pressione tra punzone e matrice.
2. **Bava da trazione**: compare nella fase finale, durante il distacco definitivo del materiale, quando la frattura si completa generando un sottile bordo stirato.

L'accurata gestione di questi fenomeni risulta pertanto fondamentale per garantire la qualità del prodotto e la robustezza del processo industriale.

2.2 Gioco tra punzone e matrice

Il fattore che più influenza la qualità e forma delle superfici è il gioco tra la matrice e il punzone.

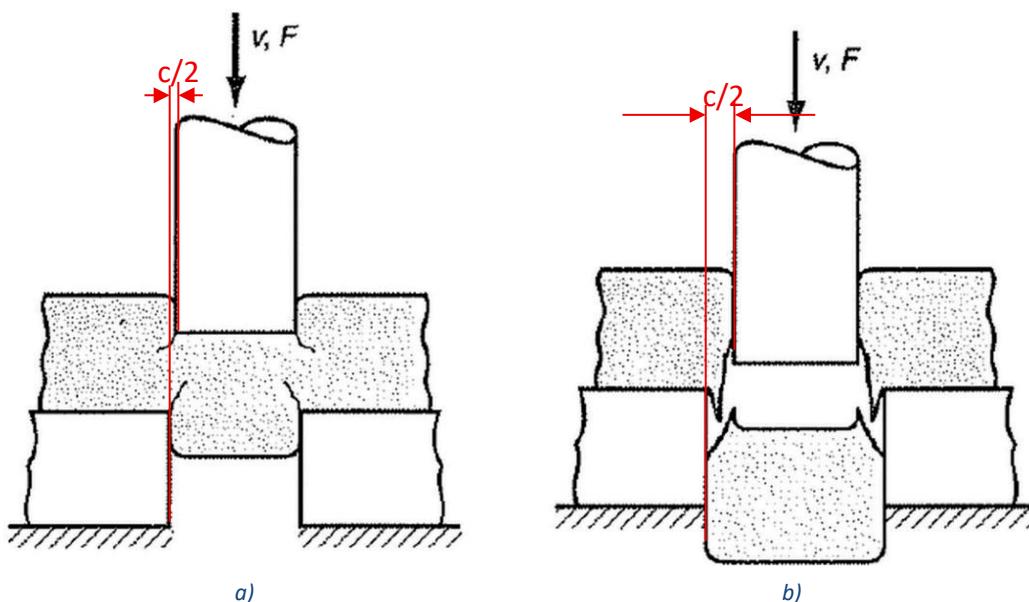


Figura 40 - a) gioco troppo piccolo b) gioco troppo grande (Torino)

Un aspetto fondamentale nella progettazione del processo di trasciatura è la corretta scelta del gioco tra punzone e matrice. Questo parametro influisce direttamente sulla qualità del bordo tagliato, sulla forza necessaria per la separazione del materiale e sulla durata degli utensili. Quando il gioco è **troppo ridotto** come in figura 40a, le linee di frattura generate dal punzone e dalla matrice tendono a sovrapporsi o incrociarsi in maniera anomala, provocando la formazione di superfici frastagliate e irregolari. Inoltre, in questa condizione, è richiesta una forza di taglio più elevata, con conseguente maggiore usura degli utensili e rischio di scheggiature o deformazioni eccessive, soprattutto nei materiali più duttili.

Al contrario, **un gioco eccessivo**, figura 40b, comporta un'altra serie di problematiche. In questo caso, il metallo tende ad essere schiacciato tra i bordi taglienti di punzone e matrice prima della frattura, il che porta alla formazione di bave sovradimensionate e bordo irregolare. Tale condizione può compromettere le successive lavorazioni, in particolare nei casi in cui siano richieste elevate finiture superficiali o precisione dimensionale.

Dunque per determinare il gioco ottimale, si utilizza una **relazione empirica** consolidata:

$$c = a \cdot t \quad (1.0)$$

dove:

- **c** è il gioco totale (che va successivamente suddiviso in due parti, una per lato);
- **a** è un coefficiente empirico, detto anche *allowance*, che dipende dal tipo di materiale;
- **t** è lo spessore della lamiera.

La scelta del coefficiente **a** è cruciale:

- un **valore troppo elevato**, soprattutto in presenza di materiali fragili o poco duttili, può portare a fratture irregolari, cricche o danneggiamento dei bordi;
- al contrario, un **valore troppo basso** può risultare problematico per materiali molto duttili, determinando un aumento dell'usura degli utensili, difficoltà nel distacco del materiale e deformazioni indesiderate.

Ma i fori possono essere ottenuti in un'ampia gamma di distanze tra punzone e matrice come in figura 41, ciascuna delle quali determina una diversa condizione del bordo:

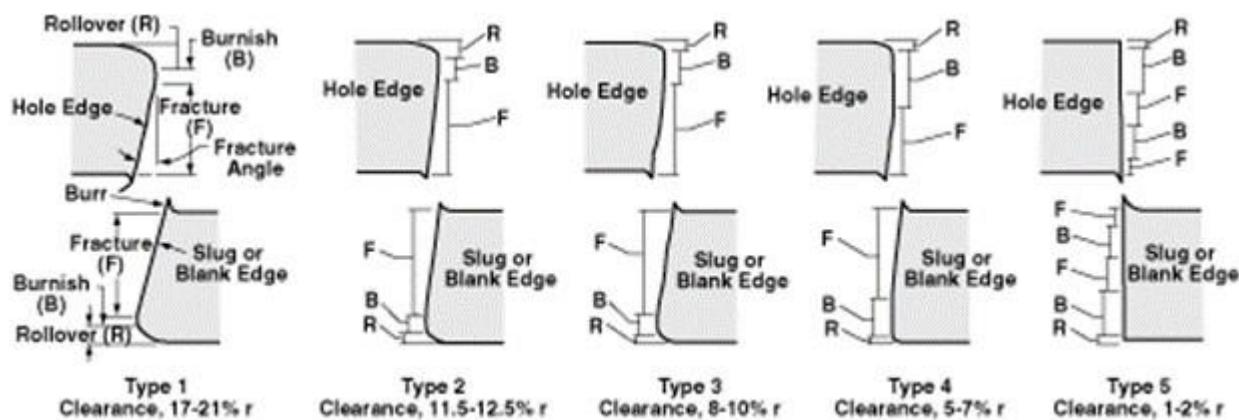


Figura 41 – Effetto del gioco tra punzone e matrice per lato (in percentuale sullo spessore del pezzo, *t*) sulle caratteristiche dei bordi di fori e spezzoni prodotti mediante foratura o tranciatura. (ASM International, 1996)

La Tabella 1 elenca i giochi per la produzione dei cinque tipi di bordi:

Tipo	Gioco (% dello spessore)	Qualità del bordo	Caratteristiche principali
1	17 – 21%	Scarsa	Molto <i>rollover</i> , ampia zona di frattura, bava evidente
2	11.5 – 12.5%	Discreta	Ridotto <i>rollover</i> , frattura ancora estesa
3	8 – 10%	Accettabile	Meno bava, inizio di controllo sulla frattura
4	5 – 7%	Buona	Maggiore zona <i>burnish</i> , frattura più netta
5	1 – 2%	Ottima	Bordo netto e liscio, minima frattura e bava

Tabella 1 - effetto del gioco

Con l'aumento del gioco dai valori bassi utilizzati per i bordi di tipo 5 a quelli utilizzati per i bordi di tipo 1, sono evidenti diversi effetti. Il profilo del bordo si discosta sempre più dalla rettilineità e dalla perpendicolarità con l'aumento del *rollover*, dell'angolo di frattura e della profondità di frattura, mentre la profondità di brunitura diminuisce proporzionalmente. L'altezza totale della bava inizialmente diminuisce con la diminuzione della componente di compressione, lasciando solo la bava di trazione essenzialmente costante sui bordi di tipo 2 e 3.

2.2.1 Traciatura fine

La traciatura fine rappresenta un'**evoluzione** della traciatura convenzionale, sviluppata per ottenere componenti in lamiera con bordi particolarmente lisci, diritti e tolleranze dimensionali molto ristrette. Rispetto alla traciatura tradizionale, questo processo si distingue per un **gioco estremamente ridotto tra punzone e matrice** e per una velocità di avanzamento del punzone significativamente inferiore. È generalmente applicato a lamiere di spessore relativamente contenuto.

Il principale vantaggio offerto dalla traciatura fine è la possibilità di produrre componenti ad alta precisione geometrica e dimensionale, riducendo o eliminando la necessità di successive lavorazioni di finitura. Il miglioramento qualitativo del bordo tagliato è reso possibile dall'aumento significativo della superficie di contatto tra gli elementi dell'utensile e la lamiera, che porta a una maggiore adesione e controllo durante l'azione di taglio.

Dal punto di vista del processo, è possibile distinguere due tipologie di traciatura fine:

- **Tipo "finitura"**: caratterizzato da un **gioco positivo** tra punzone e matrice.

- **Tipo “estrusa”:** in questo caso si impiega un **gioco negativo**, ovvero la matrice ha dimensioni inferiori rispetto al punzone.

Le distribuzioni della **tensione di von Mises** e della **tensione principale massima** per entrambe le configurazioni sono riportate rispettivamente nelle Figure 42 e 43, riferite alla medesima condizione di penetrazione del punzone pari all’80% dello spessore del materiale.

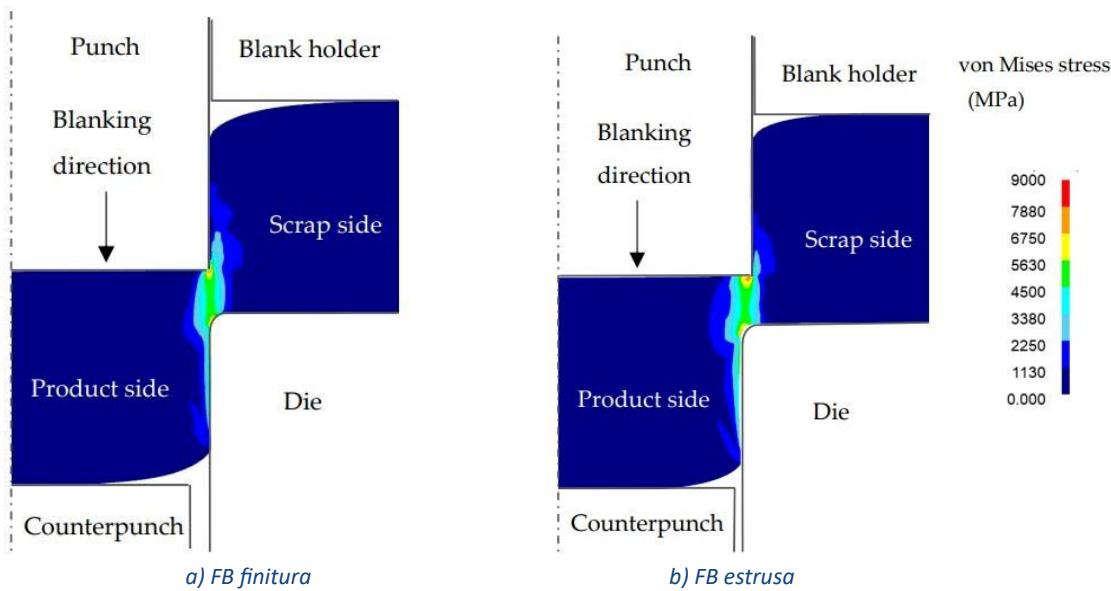


Figura 42 - tensione Von Mises (Suzuki, Shiratori, Yang, & Murakawa, 2019)

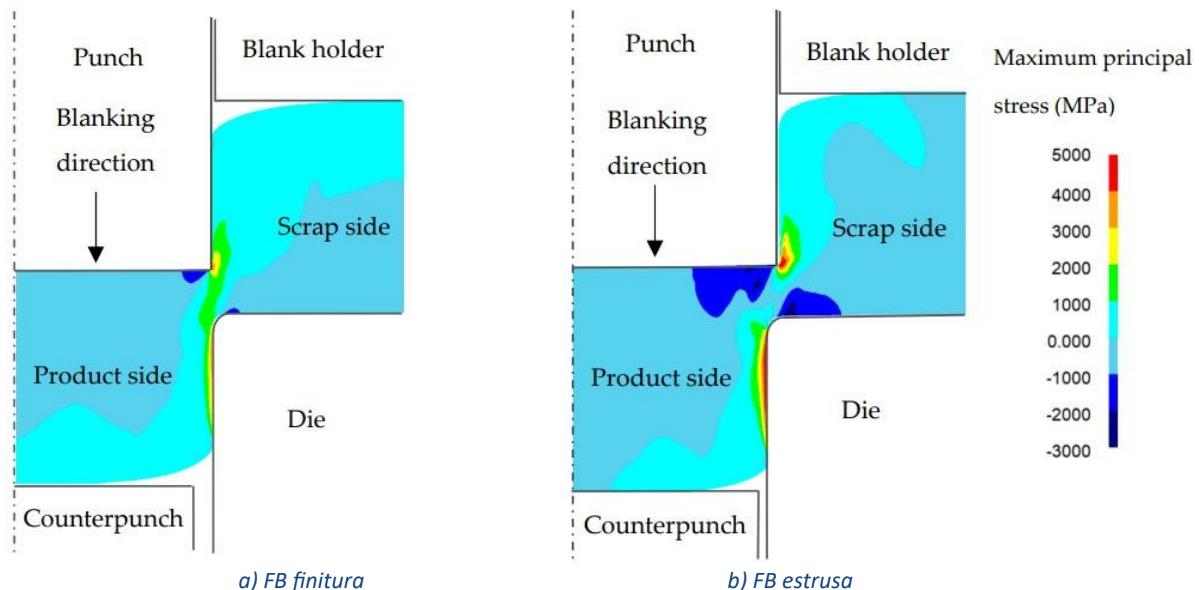


Figura 43 – tensione principale massima (Suzuki, Shiratori, Yang, & Murakawa, 2019)

I risultati evidenziano che, pur mostrando distribuzioni simili degli sforzi di von Mises, la distribuzione della tensione principale massima varia significativamente tra le due configurazioni:

- Nel **tipo finitura**, prevalgono **sforzi di trazione** nella zona tra lo scarto e il pezzo, il che facilita l'innescio della frattura già con una penetrazione pari all'80% dello spessore.
- Nel **tipo estruso**, si osserva una predominanza di **sforzi di compressione**, in particolare sulla spalla e lungo il lato del punzone, mentre la zona di taglio resta meno sollecitata da danni. Questo permette di ritardare o addirittura evitare la frattura.

In conclusione, la distribuzione degli sforzi di compressione nel tipo estruso risulta determinante nel ridurre il valore del danno e nel sopprimere la propagazione della frattura, anche a fronte di valori simili di tensione equivalente di von Mises.

Il comportamento del flusso di materiale osservato durante la deformazione fornisce ulteriore conferma della prevalenza di sforzi di trazione nel tipo finitura e di compressione nel tipo estruso che si vedrà nella sezione 2.2.2.

2.2.2 Flusso materiale

La distribuzione delle sollecitazioni all'interno di un materiale è correlata al flusso del materiale durante la lavorazione.

Di seguito in figura 44 si analizza come la direzione del flusso del materiale (ovvero come il metallo si muove e si deforma durante la punzonatura) influenzi il comportamento della frattura del pezzo.

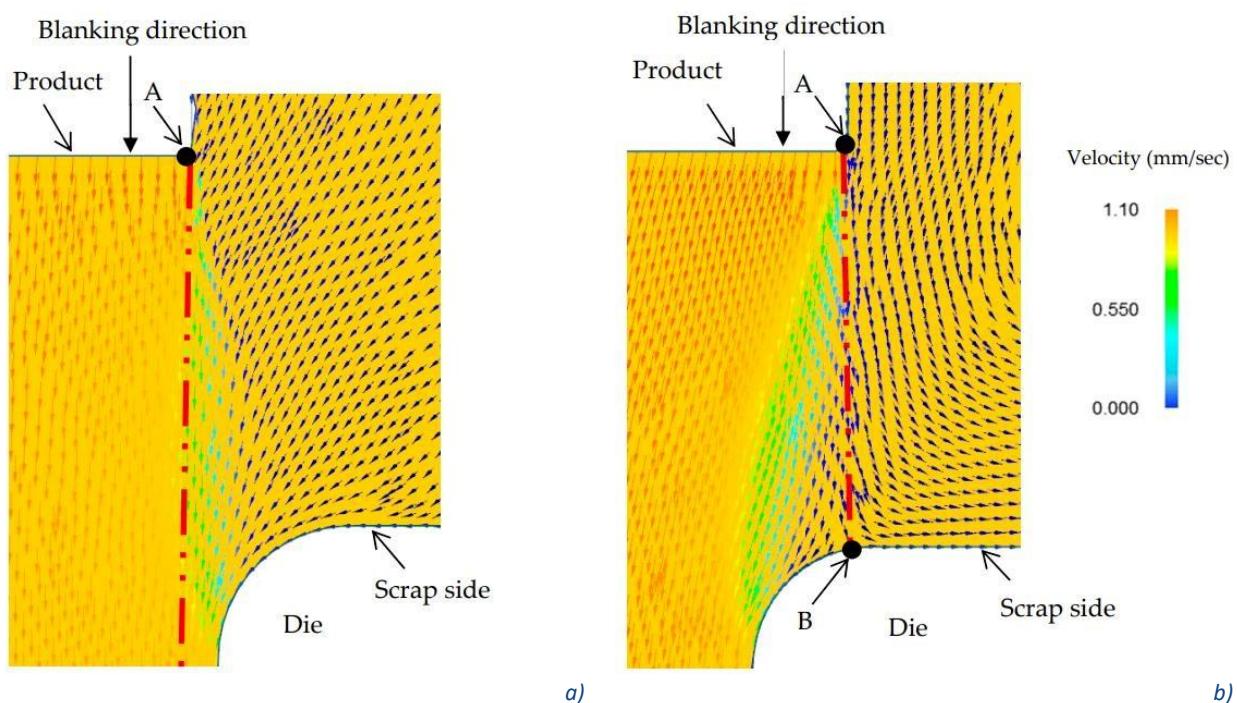


Figura 44 - flusso materiale. a) gioco positivo b) gioco negativo (Suzuki, Shiratori, Yang, & Murakawa, 2019)

Gioco positivo:

- Il materiale sotto il punzone scorre quasi perpendicolarmente rispetto al flusso nella parte interna.
- Il flusso di materiale vicino al bordo del lato scarto viene deviato e scorre verso l'interno del pezzo.

- Questo movimento crea un campo di **tensione** tra il lato scarto e il materiale sotto il punzone.
- Questo porta a un'alta concentrazione di danno, quindi alla **rottura** del materiale.

Gioco negativo:

- Il flusso del materiale cambia direzione vicino al punto B, verso la matrice.
- Questo flusso verso la matrice fa comportare il materiale come se si auto-comprimesse.
- Di conseguenza, si genera un campo di **compressione** che sopprime la frattura.

2.3 Duttilità materiale

Nel processo di traciatura, la **duttilità del materiale** gioca un ruolo fondamentale nella determinazione della **qualità del bordo traciato** e nella **tendenza alla formazione di bave**. La duttilità, ovvero la capacità di un materiale di deformarsi plasticamente prima di rompersi, influisce direttamente sul tipo di frattura che si sviluppa durante il taglio.

Per comprendere questo effetto, si possono confrontare due tipologie di acciaio ad alta resistenza comunemente utilizzate nella formatura a freddo:

- Lamiera da 390 MPa di resistenza a compressione;
- Lamiera da 980 MPa di resistenza a compressione;

Le lamiere con una resistenza a compressione di 390 MPa presentano una **maggior duttilità**.

Durante il processo di traciatura, ciò consente la formazione di una **superficie brunita ampia**, che può arrivare a costituire circa metà del bordo traciato come mostrato in figura 45.

Questa zona liscia e compressa, tipica della deformazione plastica controllata, è indice di una buona qualità del taglio.

La frattura vera e propria si innesca più tardi, quando il materiale ha già subito una significativa deformazione. Questo comportamento riduce la probabilità di generare superfici irregolari o bave evidenti, rendendo la lamiera da 390 MPa più facile da lavorare e con bordi più regolari.

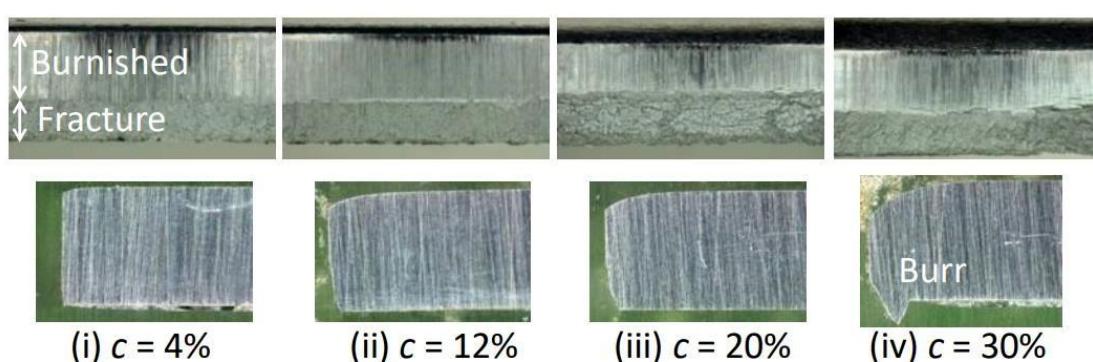


Figura 45 - Superficie e sezioni trasversali dei bordi punzonati per lamiera di acciaio ad alta resistenza da 390MPa (Mori, 2020)

Diversamente, le lamiere da 980 MPa in figura 46 mostrano una **resistenza meccanica più elevata**, ma sono **molto meno duttili**. Durante il taglio, il materiale si rompe precocemente con un

comportamento più fragile: la superficie brunita risultante è **più piccola**, mentre la porzione fratturata è **maggior**e.

Inoltre, a causa dell'elevata resistenza e del minor allungamento prima della rottura, si forma una **seconda superficie brunita** dovuta alla connessione non ottimale tra le fratture originate rispettivamente dai bordi del punzone e della matrice, soprattutto in presenza di **gioco ridotto**. Questo può portare alla formazione di un **gradino visibile** sul bordo trinciato, con conseguente **riduzione della qualità**.

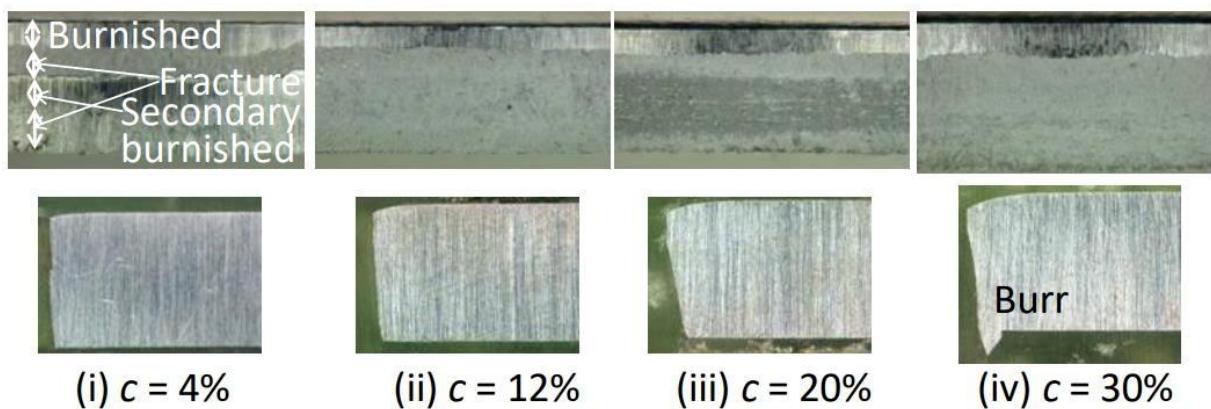


Figura 46 - Superfici e sezioni trasversali dei bordi punzonati per lamiera di acciaio ad alta resistenza da 980 MPa (Mori, 2020)

Dunque, più la lamiera è resistente, più tende a fratturarsi in modo netto, generando bordature irregolari, maggior propensione alla formazione di bave e peggior comportamento a fatica nei componenti finiti.

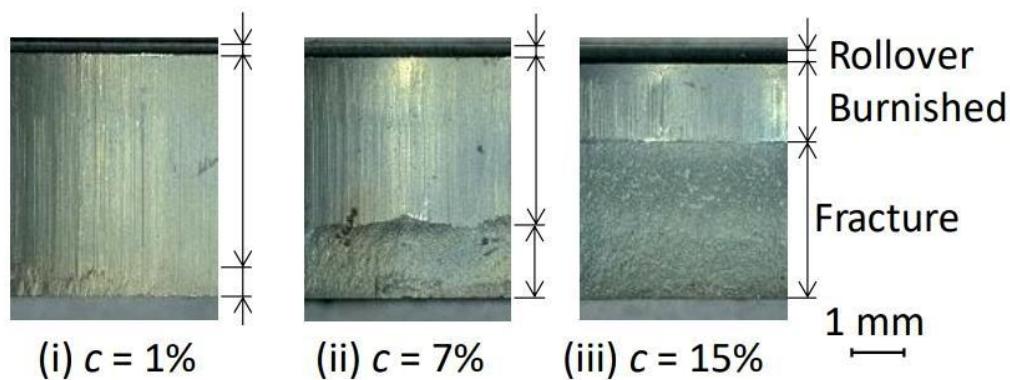


Figura 47 - superfici del bordo tagliato in funzione del gioco (Mori, 2020)

In generale come mostrato in figura 47, la **riduzione del gioco** consente di ottenere **superfici più regolari** e una **qualità del bordo superiore**, migliorando anche la **resistenza a fatica** del componente. Tuttavia, un gioco troppo ridotto può accentuare il fenomeno della frattura nelle lamiere molto resistenti (come quelle da 980 MPa), peggiorando il collegamento tra le superfici e aumentando la possibilità di generare gradini o bave.

Conclusioni:

- Le lamiere con **bassa resistenza** sono **più duttili**, si deformano in modo più controllato prima della rottura e quindi producono **bordi più regolari** e con **meno bave**.

- Le lamiere con **alta resistenza** sono **meno duttili**, tendono a rompersi più bruscamente e mostrano **maggiori porzioni fratturate**, con **bordi più irregolari** e **maggior tendenza alla formazione di bave**.
- La **combinazione tra materiale e gioco punzone-matrice** deve essere attentamente ottimizzata per ottenere una traciatura di qualità, come già la formula 1.0 espone, specialmente quando si lavorano **acciai altoresistenziali**.

2.4 Effetti secondari

2.4.1 % Carbonio

La deformabilità e la risposta degli acciai ai processi di formatura a freddo, come la traciatura fine o l'estruzione dipendono fortemente dal **contenuto di carbonio**. Al variare di questo parametro, cambiano in modo significativo le proprietà meccaniche e la lavorabilità del materiale. Si possono distinguere tre principali categorie:

1. Acciai a basso tenore di carbonio (fino a 0,20% C)

Questi acciai, noti anche come "acciai dolci", sono caratterizzati da **un'eccellente formabilità a freddo**, grazie alla loro bassa durezza (tipicamente compresa tra 75 e 87 HRB) e alla elevata duttilità. Durante la deformazione plastica, **induriscono poco**: ciò significa che possono sopportare più cicli di lavorazione senza compromettere la qualità del pezzo né causare danni agli utensili. Questa combinazione di proprietà li rende particolarmente adatti per operazioni multiple e complesse come estrusione, traciatura e stampaggio a freddo. Inoltre, la **minore usura** degli utensili in fase di lavorazione li rende vantaggiosi anche sotto il profilo economico e produttivo. Sono comunemente impiegati nella realizzazione di bulloni, dadi, boccole, componenti stampati e altri elementi meccanici di uso generale, dove sono richieste buone prestazioni meccaniche a costi contenuti.

2. Acciai a medio tenore di carbonio (0,20–0,45% C)

Con l'aumento del contenuto di carbonio, gli acciai di questa categoria offrono una **maggior resistenza** meccanica ma, al contempo, presentano una **minore duttilità**. Ciò comporta un aumento della difficoltà di deformazione a freddo: è necessaria una **forza maggiore** per lavorarli, con un conseguente aumento del rischio di cricche, rotture o altri difetti.

Per migliorare la loro lavorabilità e ridurre la fragilità, vengono spesso sottoposti a trattamenti termici preliminari, tra cui:

- Ricottura: per abbassare la durezza e aumentare la lavorabilità generale;
- Sferoidizzazione: un trattamento specifico volto a trasformare la cementite lamellare in cementite sferoidale, migliorando la plasticità e la tenacità dell'acciaio.

Tuttavia, rispetto agli acciai dolci, questi materiali tendono a provocare una maggiore usura degli utensili, con conseguente aumento dei costi e della manutenzione.

3. Acciai ad alto tenore di carbonio (> 0,45% C) e acciai legati

Questi acciai sono progettati per applicazioni ad alta resistenza e spesso legati con elementi aggiuntivi (come Cr, Mo, V) per migliorarne ulteriormente le proprietà. Tuttavia, la loro lavorazione a freddo è particolarmente difficile: si **induriscono rapidamente** durante la deformazione, rendendo la lavorazione problematica e aumentando significativamente il rischio di:

- formazione di cricche o fratture premature nel materiale;
- rottura o danneggiamento degli utensili.

Proprio per queste ragioni, prima di qualsiasi lavorazione plastica a freddo, questi materiali vengono sempre trattati termicamente. Il trattamento più utilizzato è la ricottura sferoidizzante, che favorisce la formazione di cementite sferoidale e conferisce al materiale una maggiore plasticità. Tuttavia, anche in queste condizioni, questi acciai tollerano solo un numero limitato di cicli di deformazione prima di danneggiarsi, con una **resa produttiva generalmente più bassa** rispetto agli acciai a minor tenore di carbonio.

2.4.2 Lubrificazione

Durante l'azione di taglio, l'incremento significativo dell'area di contatto utensile-materiale comporta un'elevata tendenza all'**adesione superficiale**, che può compromettere la qualità del pezzo e ridurre la vita degli utensili.

Per controllare efficacemente questi fenomeni, risulta fondamentale l'adozione di **lubrificanti adeguati**, in grado di garantire una rugosità superficiale ottimale e un'usura contenuta degli utensili. Una lubrificazione efficace contribuisce infatti a mantenere la stabilità del processo, riducendo l'attrito e prevenendo il danneggiamento per fenomeni di grippaggio o *pick-up*. Nel contesto della deformazione a freddo dell'acciaio, le condizioni tribologiche sono particolarmente critiche: le pressioni di contatto all'interfaccia utensile-pezzo possono superare i 2000 MPa, mentre le temperature superficiali, pur mantenendosi inferiori alla temperatura di rinvenimento, possono raggiungere localmente valori anche superiori a 600 °C a causa della forte deformazione plastica localizzata. In tali condizioni, i lubrificanti tradizionali non sono in grado di garantire prestazioni affidabili.

Nel caso di acciai al carbonio o debolmente legati, il sistema lubrificante più diffuso si basa su un trattamento preliminare di **fosfatazione**, che forma uno strato di **fosfato di zinco** o **fosfato misto zinco/ferro** sulla superficie del pezzo. Questo rivestimento fornisce un'elevata resistenza all'usura da contatto e una buona capacità di trattenere il lubrificante.

2.4.3 Temperatura

Anche nei processi di traciatura condotti a freddo, l'elevata deformazione plastica concentrata in zone ristrette può generare **innalzamenti localizzati della temperatura**. Questo riscaldamento, sebbene limitato nel tempo e nello spazio, può influenzare significativamente il comportamento del materiale nella zona di taglio.

Uno degli effetti principali è legato alla formazione della **bava**. Quando il materiale si riscalda localmente, tende ad ammorbidente e a diventare più duttile proprio in quelle zone. Di conseguenza, la resistenza al flusso plastico si riduce, favorendo una **fuoriuscita più marcata di materiale** lungo i bordi del taglio. Questo fenomeno è ulteriormente accentuato nel caso in cui il gioco tra punzone e matrice non sia stato impostato in modo ottimale, poiché il calore aggiuntivo

amplifica la capacità del materiale di fluire lateralmente, aumentando la quantità e l'irregolarità della bava.

Un altro difetto strettamente legato alla temperatura è la formazione di **ripieghe superficiali**, in particolare nelle aree vicine agli spigoli del punzone o della matrice. In queste zone, la temperatura localmente elevata può causare un ammorbidente prematuro del materiale, che, invece di seguire un flusso rettilineo verso il taglio, tende a deviare lateralmente o a invertirsi. Ciò può generare instabilità nel flusso del materiale, con conseguente formazione di irregolarità, grinze o ripieghe sul bordo trinciato.

Questi difetti sono più probabili in presenza di geometrie complesse, variazioni di sezione o disallineamenti, dove il controllo del flusso risulta più difficile. Pertanto, la gestione termica, pur essendo spesso trascurata nei processi a freddo, riveste un ruolo cruciale nel garantire **la qualità del bordo trinciato e la ripetibilità del processo**.

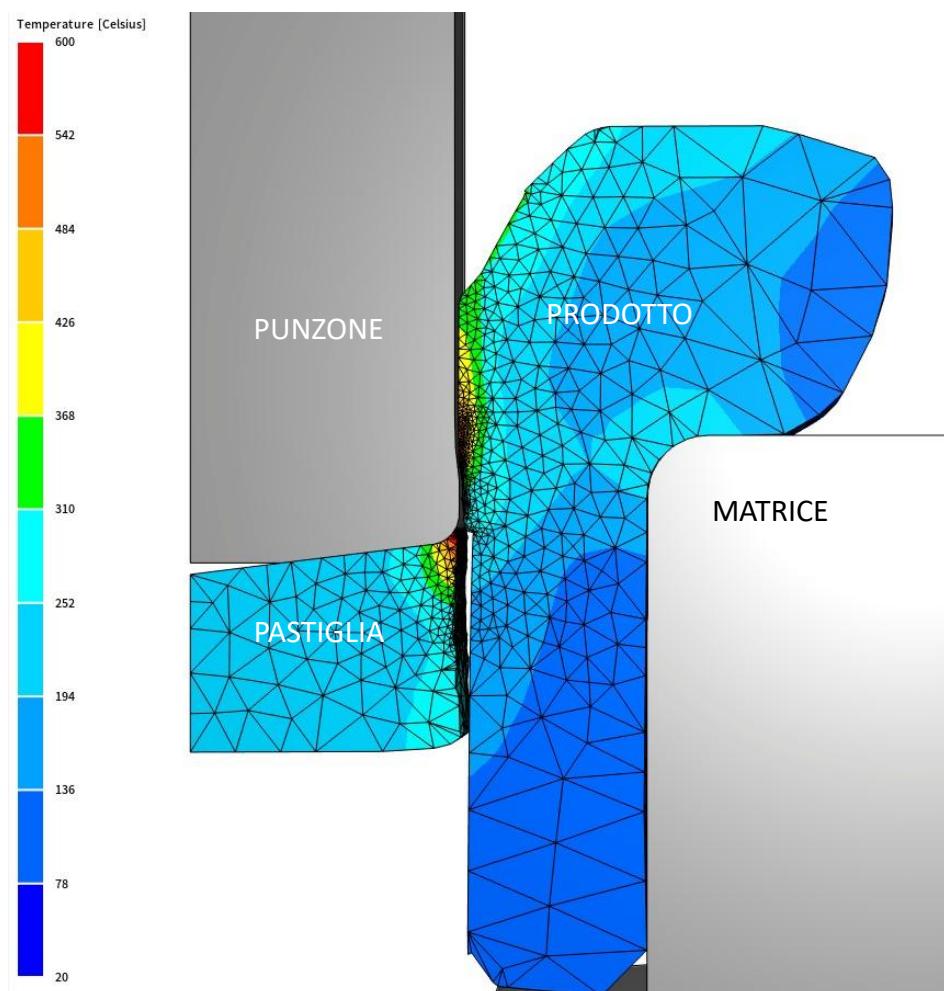


Figura 48 - temperatura in strappo pastiglia, rappresentazione 2D (Coldform)

2.4.4 Velocità di deformazione

Durante i processi di formatura a freddo, all'interno della zona plastica del pezzo lavorato, è fondamentale monitorare e comprendere alcune grandezze meccaniche chiave, come:

- la **deformazione plastica** (ε);
- la **velocità di deformazione** ($\dot{\varepsilon}$);
- e la **tensione di flusso** (σ), ovvero la tensione necessaria affinché il materiale continui a deformarsi plasticamente.

Inoltre, nell'interfaccia tra il materiale e l'utensile, risultano determinanti anche parametri locali come:

- la **temperatura** (T);
- la **pressione di contatto** (p);
- e la **tensione tangenziale da attrito** (τ), che influisce sullo scorrimento del materiale.

In una serie di prove di compressione su cilindri, effettuate a due diverse velocità costanti, è stato osservato che la **tensione di flusso del materiale reale mostra una dipendenza moderata dalla velocità di deformazione**, come evidenziato dal confronto tra le relative curve di flusso in figura 49.

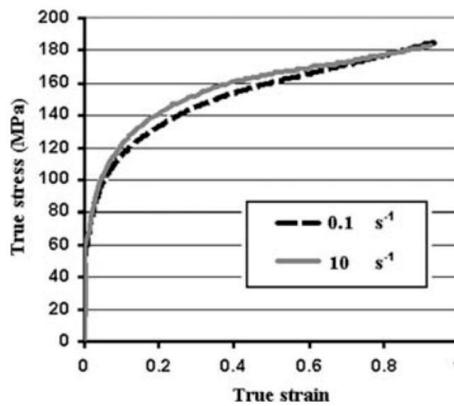


Figura 49 - velocità deformazione (Valberg, 2002)

Tuttavia, per la maggior parte dei materiali metallici lavorati a freddo, la tensione di flusso dipende principalmente dalla deformazione accumulata, risultando **poco sensibile sia alla temperatura sia alla velocità di deformazione**. Di conseguenza, la velocità di compressione può essere considerata un parametro secondario quando si raccolgono dati per curve di flusso a freddo.

Tuttavia, questa indipendenza non è assoluta: **la velocità di deformazione può avere un impatto significativo su fenomeni localizzati**, in particolare durante le operazioni di punzonatura, traciatura o cesoiaatura. In questi casi, una variazione della velocità del punzone può influenzare il meccanismo di frattura e la formazione di bava plastica.

L'effetto della **velocità del punzone** può essere riassunto come segue in tabella 2:

Velocità del punzone	Effetto sulla bava	Qualità del bordo	Note operative
Bassa	Tende ad aumentare	Bordi lisci, ma più bava	Maggiore flusso plastico prima della frattura
Alta	Tende a ridursi	Bordi più netti ma fratturati	Frattura anticipata, minore deformazione laterale

Tabella 2 - effetto velocità punzone



A **velocità più basse**, il materiale ha più tempo per fluire plasticamente prima dell'innesto della frattura. Questo può generare **zone di taglio più estese**, migliorando la finitura del bordo, ma favorendo la formazione di **bava plastica**.

Al contrario, a **velocità elevate**, la frattura si innesca più rapidamente, con minore coinvolgimento della plastificazione: si ha quindi **una riduzione della bava**, ma i bordi risultano **più irregolari o fratturati**, con una finitura meno precisa.

Altri fattori influenzati dalla velocità:

1. **Effetti termici locali:** A velocità elevate, l'aumento del calore generato dall'attrito può causare un riscaldamento localizzato del materiale, in particolare vicino agli spigoli di taglio. Questo riscaldamento può ammorbidente la zona interessata, favorendo ulteriore deformazione plastica laterale e quindi l'insorgenza di bave, soprattutto in assenza di lubrificazione efficace o gioco utensile-pezzo non ottimale.
2. **Dinamica utensile e rigidezza dello stampo:** Se lo stampo o la macchina presenta cedevolezza meccanica (ossia non è perfettamente rigido), l'aumento della velocità può introdurre:
 - micro-vibrazioni,
 - effetti di rimbalzo (*rebound*),
 - o un leggero ritorno elastico.

Tali fenomeni dinamici possono alterare la traiettoria di taglio, **modificando la linea di frattura** e contribuendo indirettamente alla formazione di difetti, tra cui **bave residue**.

3. Costruzione del modello per analisi FEM

Al fine di ridurre significativamente gli sprechi di materiale e di velocizzare le fasi sperimentali nella messa a punto di **nuovi** processi produttivi, risulta ormai prassi consolidata l'impiego di **software di simulazione numerica**. Tali strumenti consentono di prevedere, con ragionevole accuratezza, il comportamento reale delle lavorazioni effettuate su macchine industriali, permettendo così un'analisi preliminare a basso costo e ad alta efficienza. Tuttavia, permane una discrepanza non trascurabile tra i risultati forniti dal simulatore e quelli effettivamente osservati in produzione. Tale divergenza impone la necessità di un continuo affinamento dei modelli predittivi, volto a ottimizzare la corrispondenza tra realtà simulata e realtà operativa che si affronterà nel capitolo 3.2.

Nell'ambito aziendale in esame, il software impiegato per tale scopo è **COLDFORM**, sviluppato da Transvalor, un avanzato sistema di simulazione agli elementi finiti specificamente concepito per l'analisi dei processi di formatura a freddo.

COLDFORM rappresenta uno strumento strategico in tutte le fasi del ciclo produttivo:

- Durante la fase di **ricerca e sviluppo**, esso consente:



- di contenere i costi legati alla progettazione e allo sviluppo; ○ di incrementare l'affidabilità dei prodotti riducendo i rischi tecnici;
- In **ambito produttivo**, il software contribuisce a:
 - minimizzare i costi di prototipazione e di testing sperimentale; ○ ottimizzare l'impiego delle materie prime; ○ perfezionare le sequenze di lavorazione; ○ prolungare la vita utile degli utensili impiegati.

Il software consente di simulare con elevato grado di precisione:

- la geometria finale dei componenti, considerando il ritorno elastico;
- l'efficienza della sequenza di formatura;
- la presenza di difetti quali pieghe o riempimenti incompleti;
- la distribuzione delle fibre, delle tensioni residue e degli sforzi interni;
- nonché variabili complesse come la marcatura delle superfici, lo spostamento del materiale, la deformazione plastica, l'evoluzione termica e altri parametri definiti dall'utente.

Gli utensili impiegati nella formatura a freddo sono soggetti a intensi carichi meccanici e fenomeni tribologici che, se non correttamente previsti, possono condurre a rotture premature e costi elevati. In tal senso, COLDFORM si configura come un prezioso ausilio nella fase progettuale, in quanto consente:

- l'analisi dettagliata della resistenza meccanica degli stampi;
- il calcolo delle sollecitazioni e delle deformazioni in tempo reale;
- la valutazione dell'usura, delle temperature e dei meccanismi di danneggiamento.

3.1 Impostazione modello di simulazione

La costruzione del modello numerico parte da una definizione accurata della geometria tridimensionale dei componenti di **contatto** coinvolti nel processo di formatura, che, a livello generale, comprende:

- la **matrice**;
- il **punzone**;
- lo **spezzone** (o billetta) da deformare.

All'interno dell'azienda, la modellazione CAD viene eseguita utilizzando il software **SolidEdge**. Si cerca sempre di trovare la parte di geometria assialsimmetrica così che la modellazione viene realizzata sfruttando una sezione angolare di 90° anziché l'intero dominio radiale (360°). Questo approccio consente di ridurre significativamente il carico computazionale nella successiva fase di simulazione FEM, mantenendo comunque l'accuratezza del modello.

Affinché le geometrie siano compatibili con l'ambiente di simulazione COLDFORM®, esse devono essere esportate in un formato idoneo. Per ciascun componente, si generano quindi tre file distinti:

- un file **.par** (part), che rappresenta il modello solido tridimensionale;
 - un file **.dft** (drawing), necessario per la messa in tavola;
 - un file **.dxf**, esportato dal disegno, che costituisce il formato finale compatibile con il simulatore.

Questo flusso di lavoro garantisce una corretta trasferibilità delle geometrie dal CAD al software di simulazione, preservando la coerenza dimensionale e la struttura geometrica necessaria per l'analisi FEM.

Per la realizzazione delle matrici (*lower die*) e dei punzoni (*upper die*) destinati a deformare la billetta, si fa riferimento alle messe in tavola delle stazioni fornite dall'ufficio tecnico, visualizzabili in figura 50. Queste messe in tavola supportano il ciclo di stampaggio illustrato in figura 26. Come si può osservare, la stazione non è costituita unicamente da matrici e punzoni; tuttavia, ai fini della simulazione, l'attenzione è rivolta esclusivamente ai **componenti che entrano in contatto** con lo spezzone, ossia quelli che ne provocano la deformazione diretta.

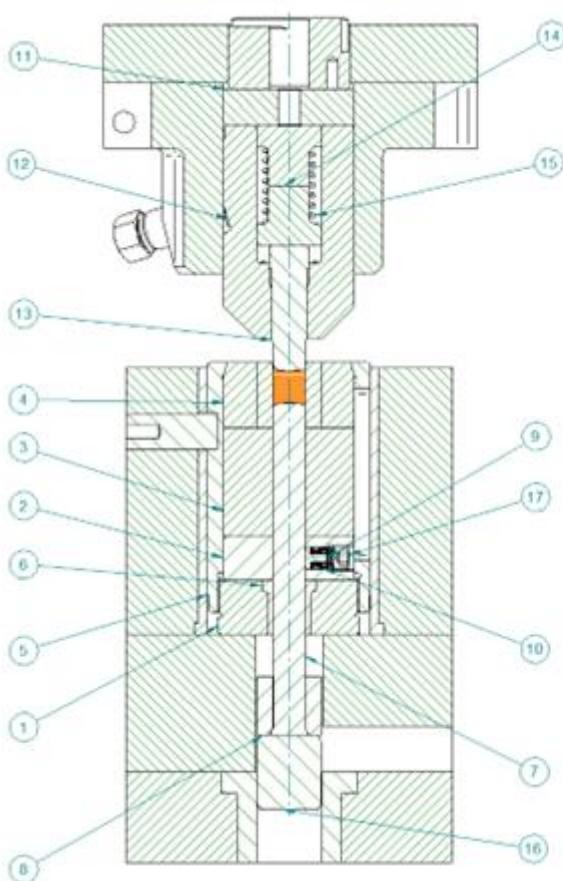


Figura 50 - messa in tavola della 1° stazione del ciclo di stampaggio in figura 26 (AGRATI-CVB)

Grazie alla messa in tavola della stazione è possibile individuare con precisione le geometrie necessarie e riprodurle in Solid Edge. Come mostrato in figura 50 nella tabella a destra, a ciascun componente della stazione corrisponde un codice identificativo. Infatti, in azienda è presente un **database** centralizzato in cui vengono archiviati tutti i componenti realizzati: per ogni elemento è

disponibile sia il modello 3D sia la relativa messa in tavola. In questo modo, quando si rende necessario utilizzare un componente, è sufficiente richiamarne il codice per accedere direttamente alla sua documentazione tecnica e procedere così alla progettazione e alla realizzazione come illustrato nella figura seguente:

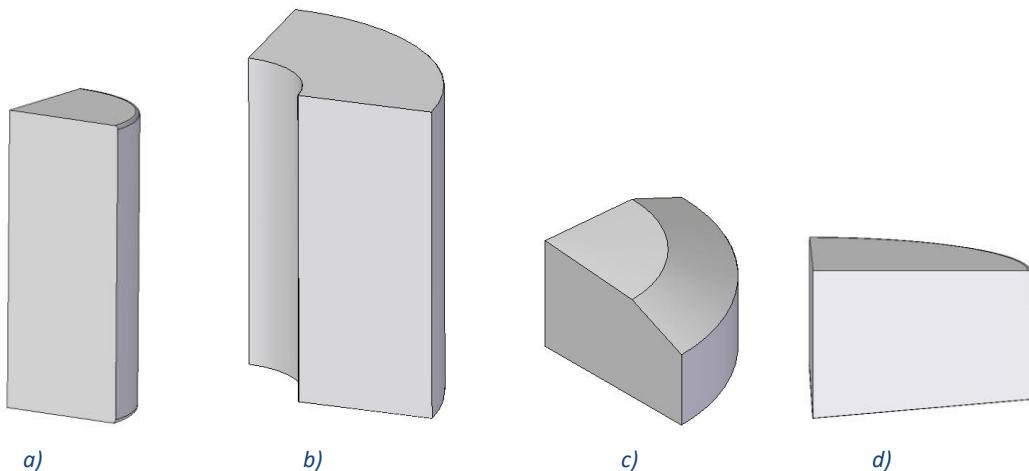


Figura 51 - geometrie CAD(90°) di a) spezzone b) lower die 1 c) lower die 2 d) upper die relative alla prima stazione

Una volta completata la preparazione delle geometrie e convertite nei formati compatibili, è possibile importarle nel simulatore COLDFORM. Poiché il componente in esame ha una testa esagonale, non sarebbe possibile eseguire una **simulazione 2D**. Tuttavia, fino alla terza stazione, la simulazione è comunque realizzabile bidimensionalmente, in quanto le geometrie sono assialsimmetriche. Però per semplificare i calcoli, consideriamo la vista 2D della testa esagonale come un diametro equivalente.

In seguito, si procede con il **posizionamento** corretto dei componenti nello spazio di lavoro e con la successiva definizione della **mesh**, una mesh più fitta comporta tempi di calcolo più elevati ma consente di ottenere risultati più accurati. Il dominio fisico è stato discretizzato mediante elementi finiti tetraedrici, la cui densità è stata adattata in funzione della complessità geometrica locale e dei gradienti di deformazione attesi. Particolare attenzione deve essere dedicata all'affinamento della mesh nelle zone di contatto tra utensili e pezzo in lavorazione, nonché lungo i bordi critici, soggetti a concentrazioni di sforzo, come tagli e piegature. Per semplicità di modellazione è stata impiegata una mesh uniforme con passo pari a 0,2 mm su tutta la billetta, valore ritenuto adeguatamente fine per descrivere in modo accurato la deformazione del materiale.

La configurazione 2D risultante della prima stazione è illustrata in figura 52:

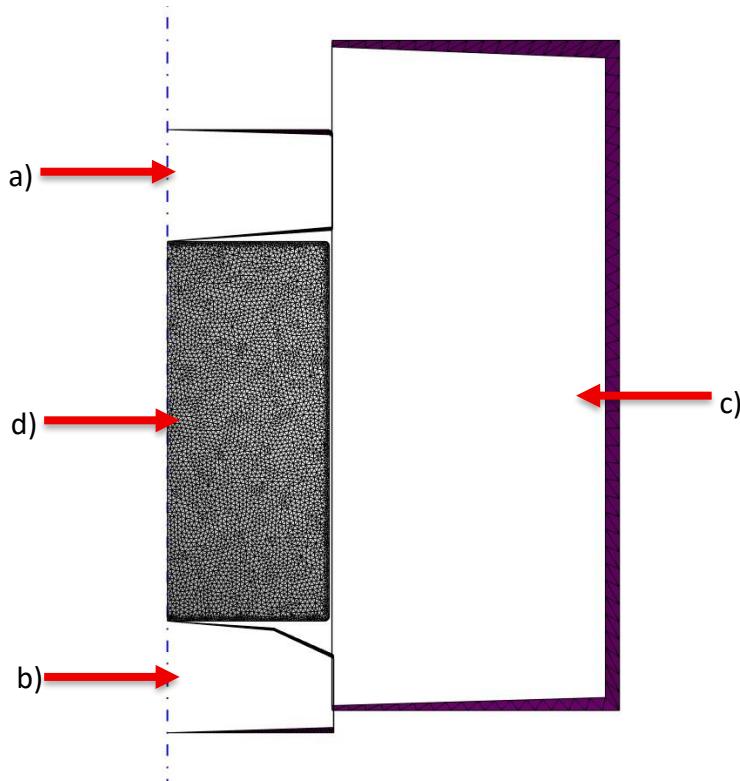


Figura 52 - rappresentazione 2D su COLDFORM della prima stazione con riferimenti degli utensili alla figura 51 (Coldform)

Successivamente si procede con la definizione dei parametri di simulazione. Per la billetta viene assegnato il **materiale** in accordo con la composizione reale del pezzo da deformare, selezionandolo dal database interno del software o inserendolo manualmente qualora necessario. Per quanto riguarda *l'upper die*, vengono specificati i **parametri cinematici e meccanici** relativi alla macchina deformante, ovvero:

- **la corsa da eseguire:** in generale, si assume come riferimento la distanza tra *a* e *b* (indicati in Figura 52), selezionando due punti caratteristici da monitorare durante l'analisi. Tali punti rappresentano la distanza tra punzone e matrice nella posizione di partenza, ovvero quella in cui entrambi gli utensili sono a contatto con la billetta (*d*) ma si trovano ancora in condizione di riposo.

Considerando la posizione della stazione da progettare, si valuta quindi la variazione di quota che i due punti selezionati devono raggiungere: la differenza tra le due quote definisce la corsa scelta per la stazione.

È tuttavia importante sottolineare che tra il ciclo di stampaggio teorico e la simulazione numerica interviene la realtà del processo. Il progettista, infatti, elabora il ciclo di stampaggio sulla base di considerazioni teoriche, principalmente legate alla conservazione del volume nelle diverse fasi di formatura. Spetta poi alla simulazione verificare e confermare le quote teoriche del ciclo, poiché in alcuni casi, rispettandole rigidamente, si rischierebbe di comprimere eccessivamente il materiale. Ciò comporterebbe un incremento eccessivo delle pressioni interne al componente, che devono rimanere entro limiti di sicurezza per evitare il danneggiamento o la rottura degli utensili;

- la **velocità di rotazione**, espressa in giri/min (**RPM**), rappresenta un valore caratteristico di ogni pressa meccanica, già definito e riportato nelle relative tabelle tecniche;
- il **rapporto R/L** (raggio manovella/lunghezza biella): sempre univoco alla pressa;

- e il **raggio di manovella**, che influisce sul profilo di avanzamento, sempre univoco alla pressa.

In seguito, si definiscono le condizioni di interfaccia tra utensili e materiale, ovvero **attrito** e **scambio termico**, per entrambi i componenti: *lower die* e *upper die*.

L'attrito è modellato assumendo un elevato coefficiente, coerente con un regime di lubrificazione a olio, mentre per il trasferimento di calore si imposta un livello di interazione termica moderata, compatibile con utensili in acciaio temprato, tenendo conto delle proprietà termofisiche dei materiali coinvolti.

Come ultimo step prima dell'avvio della simulazione, è necessario configurare i parametri di memorizzazione (**storage parameters**). In particolare, si specifica ogni quanti incrementi temporali il software debba aggiornare le variabili di processo e di quanto progredire lungo la corsa del punzone. Questa impostazione risulta fondamentale per garantire un corretto bilanciamento tra la risoluzione temporale del modello e i tempi computazionali.

La scelta dei *time steps* è stata guidata dalla necessità di ottenere un compromesso ottimale tra stabilità numerica, accuratezza dei risultati ed efficienza computazionale.

I procedimenti descritti in precedenza si riferivano a operazioni come estrusione diretta, inversa e ricalcatura. Tuttavia, nel caso specifico della simulazione del processo di strappo pastiglia, è necessario adottare un approccio differente. Il software utilizzato permette di simulare la formazione della frattura impiegando il **criterio di danno normalizzato di Latham e Cockcroft**. Questo metodo consente di monitorare la concentrazione di danno negli elementi finiti (tipicamente tetraedrici), e di rimuoverli automaticamente dal calcolo una volta superato un determinato **valore soglia di danno**. Il parametro di attivazione del danno – detto *trigger* – assume generalmente valori compresi tra **0,2 e 1,0**, in funzione delle condizioni di lavorazione: **valori inferiori (0,2–0,5)** sono tipici della tranciatura a freddo, mentre processi a caldo tollerano soglie più elevate.

L'impostazione corretta di questo parametro risulta fondamentale poiché influenza direttamente:

- la **superficie di taglio** ottenuta;
- il **carico massimo registrato durante il processo**;
- e la **distribuzione della deformazione plastica** all'interno del pezzo.

Proprio per questo motivo, nella sezione 3.2.1 si andrà a studiare nel dettaglio l'effetto di tale parametro sulla simulazione, con l'obiettivo di calibrare correttamente il modello e ottenere un risultato quanto più vicino possibile al comportamento reale osservato in macchina.

Dunque la configurazione alla fine della corsa del punzone della figura 52 è rappresentata in figura 53:

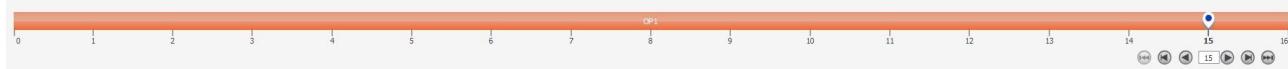
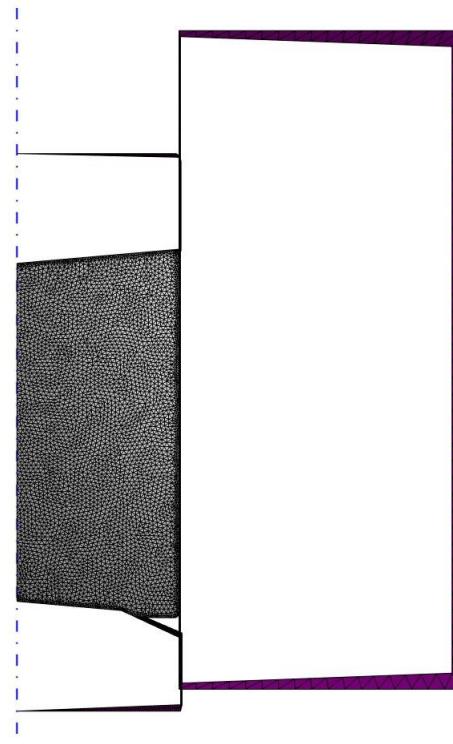
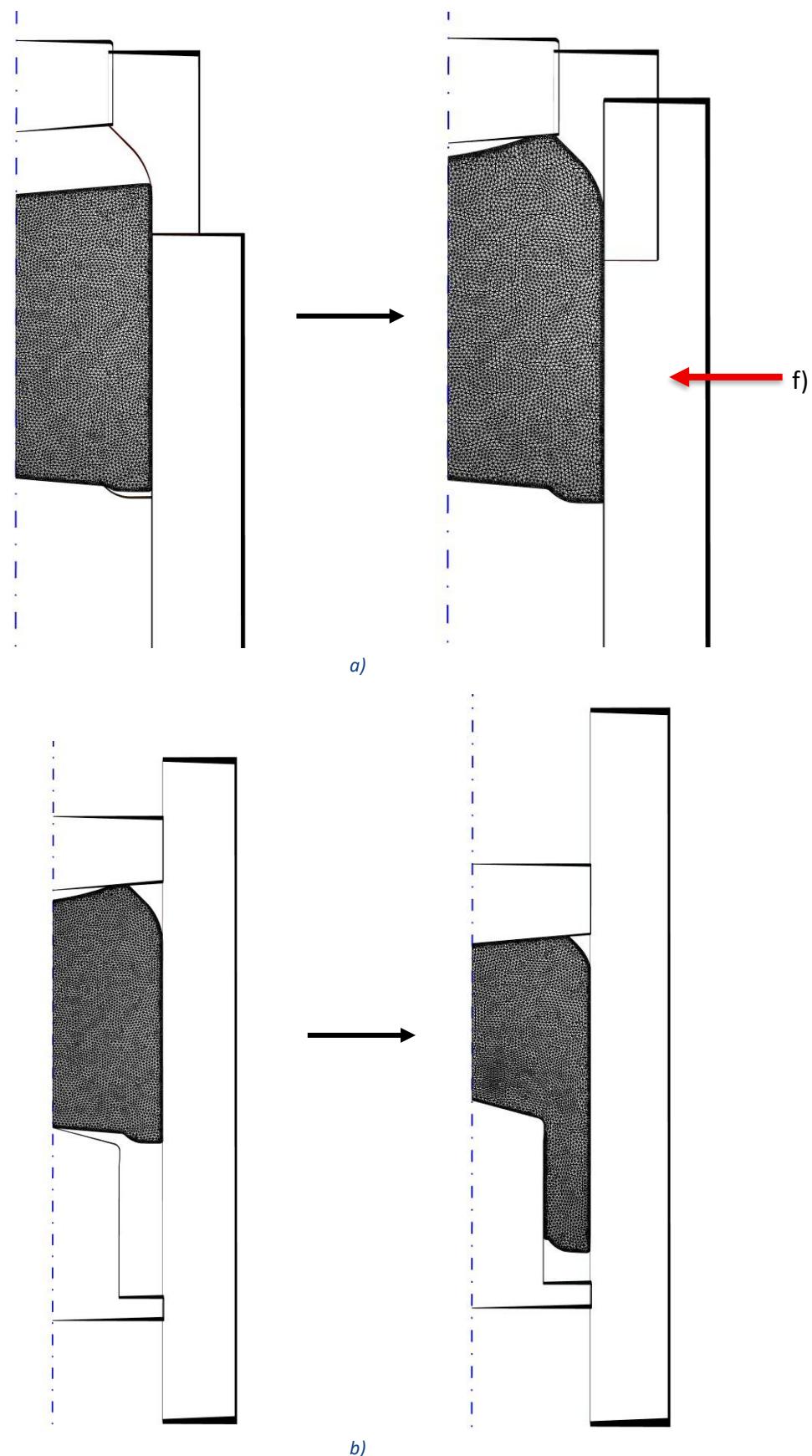
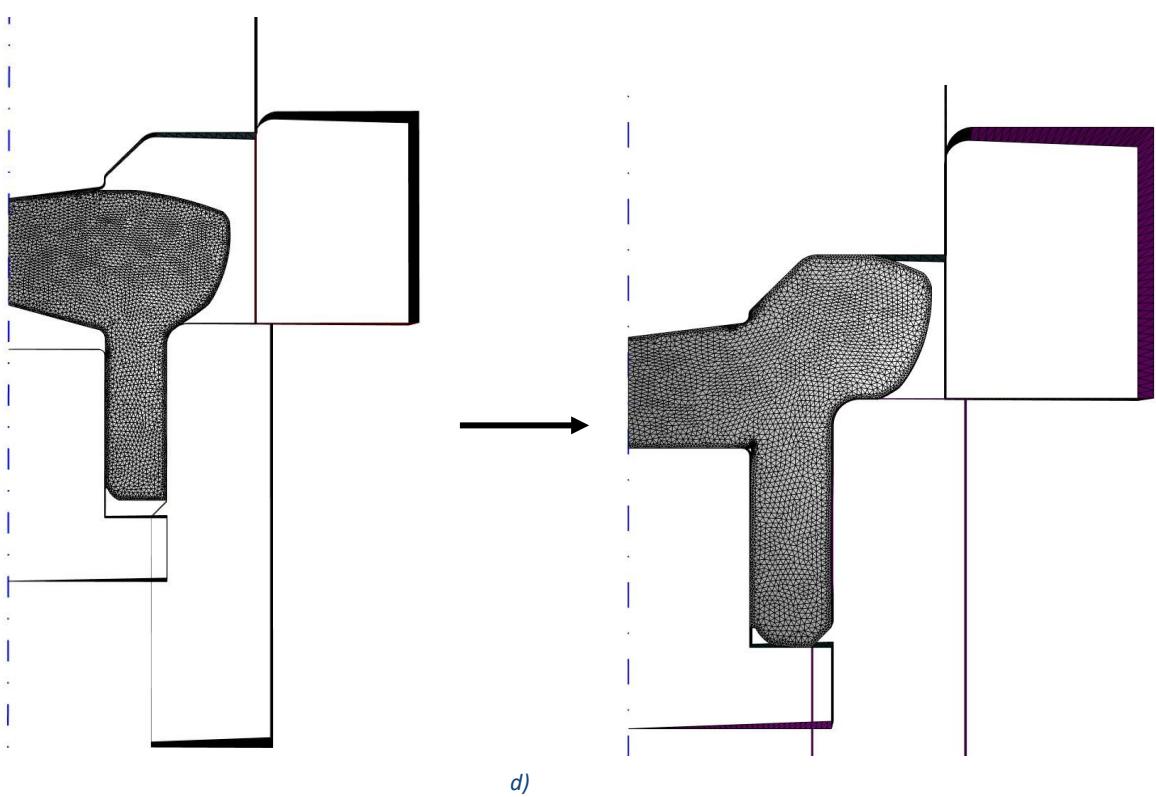
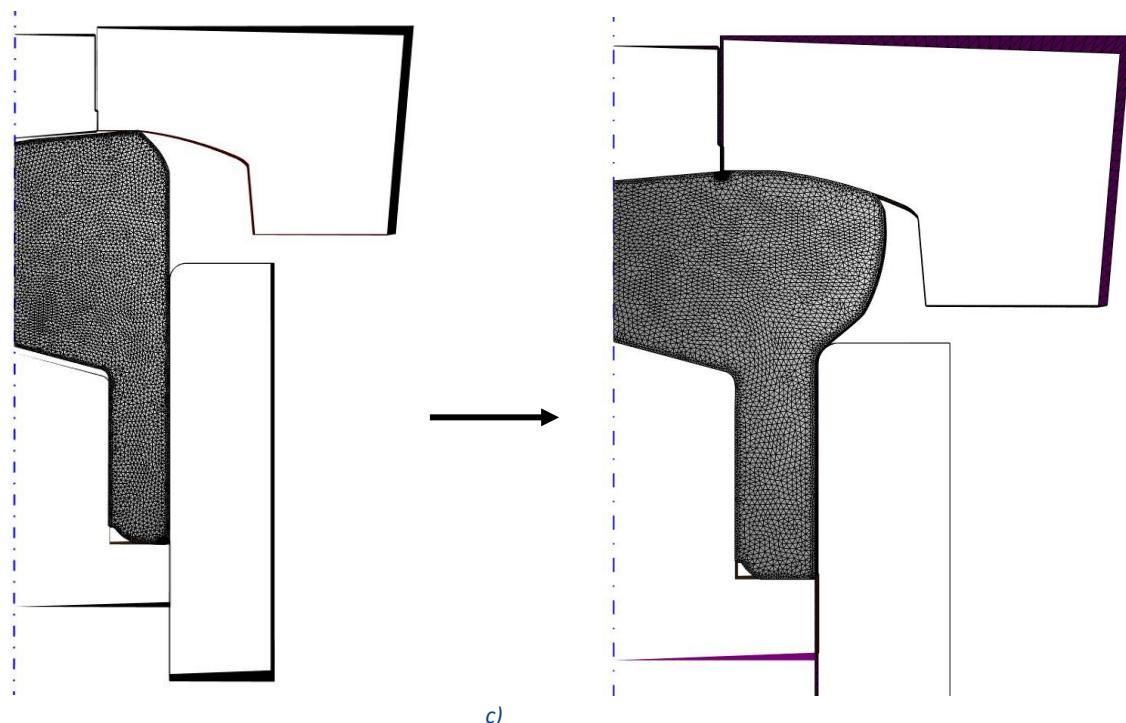


Figura 53- ultimo step 1° stazione (Coldform)

Come si può osservare, il penultimo step rappresenta in realtà l'ultima fase attiva del processo, in quanto lo step finale corrisponde esclusivamente al **ritorno elastico** del materiale.

Lo stesso principio viene applicato a tutte le stazioni successive del ciclo illustrato in Figura 26. Di seguito sono riportate le configurazioni finali ottenute, dalle quali è possibile osservare come sia possibile avere più *lower die* e più *upper die*. In presenza di geometrie complesse, si tende a evitare la modellazione di un'unica geometria complessiva, preferendo invece suddividere il sistema in più **sotto-geometrie**. Tale approccio consente di analizzare in modo più dettagliato il comportamento di ciascun elemento e di interpretare meglio i risultati della simulazione:





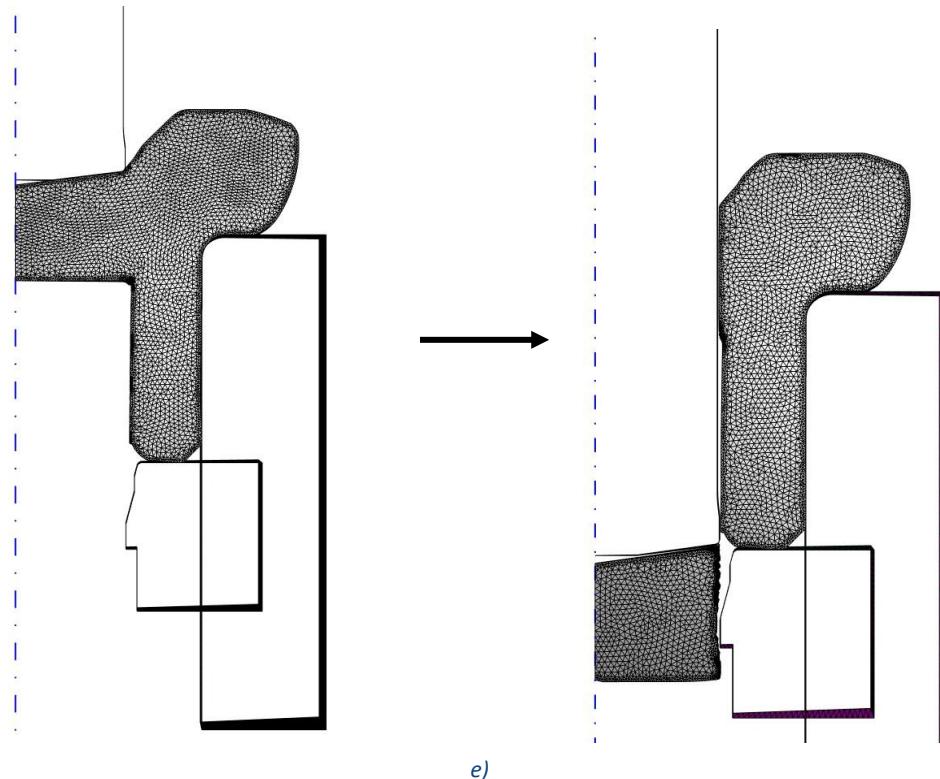


Figura 54 – simulazioni 2D di stazione a) 2° b) 3° c) 4° d) 5° e) 6° (Coldform)

Come si può osservare confrontando la configurazione della seconda stazione con quella a riposo, dopo la discesa del punzone la matrice indicata con la lettera *f* in Figura 54 risulta risalita rispetto alla posizione iniziale.

Ciò avviene perché si tratta di una **matrice scorrevole**, come è possibile comprendere più chiaramente dalla Figura 55:

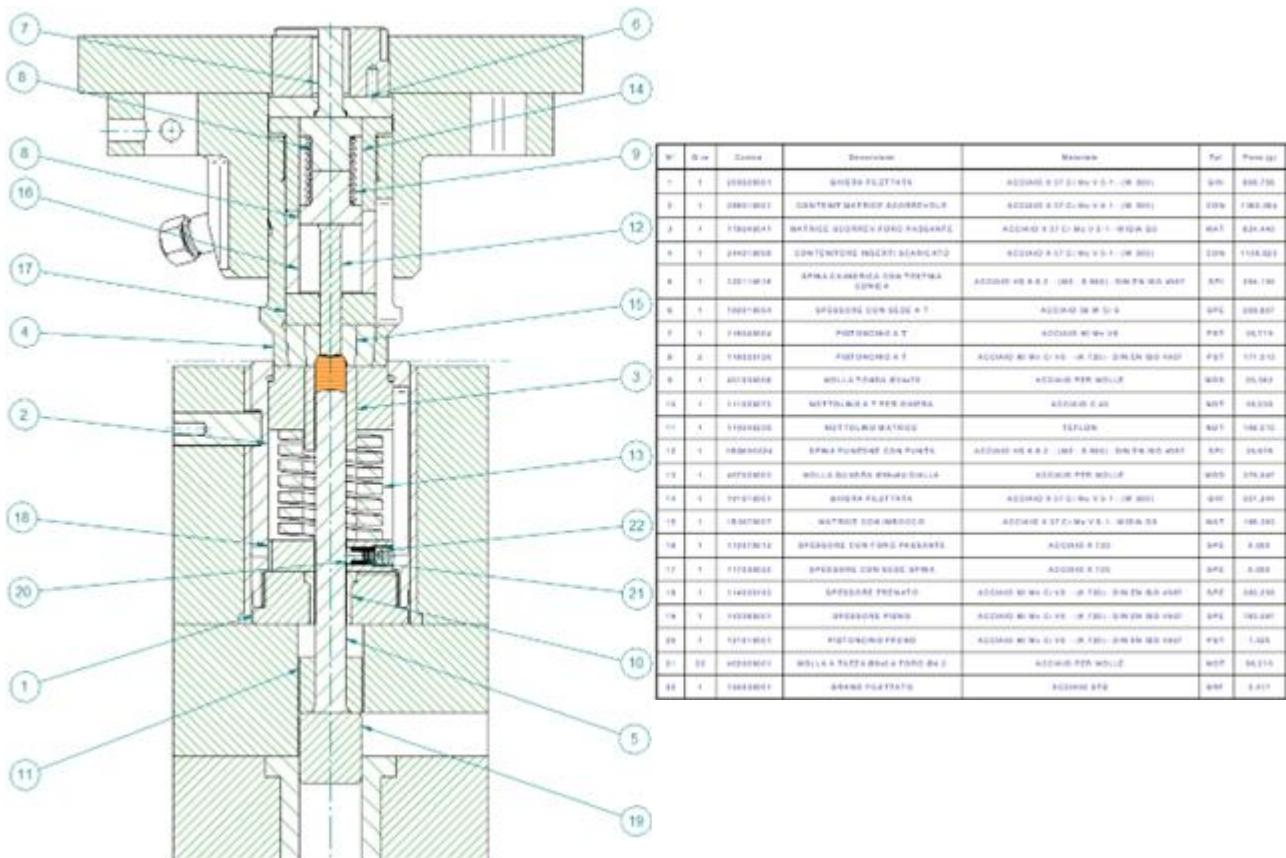


Figura 55 - messa in tavola della 2° stazione del ciclo di stampaggio in figura 26 (AGRATI-CVB)

Come si può osservare dalla bollatura della messa in tavola, la matrice in esame è identificata con il numero 3 ed è denominata **matrice scorrevole foro passante**. Al di sotto di essa è presente l'elemento 13, corrispondente a una molla quadra Ø50 x 64 gialla.

La presenza della molla sotto la matrice consente di generare una **controforza** di risalita in risposta alla forza impressa dalla discesa del martello. In questo modo, durante la corsa del punzone, la matrice si muove in direzione opposta, permettendo il completamento corretto della forma desiderata.

Nel modello simulativo le molle non vengono rappresentate geometricamente, ma sostituite da una molla equivalente applicata alla matrice. Il simulatore consente di impostare questa condizione mediante l'opzione *Generic Floating Die*, che richiede la definizione di due parametri fondamentali:

- **Force Z (ton):** rappresenta la forza di controreazione applicata in direzione Z, ovvero la forza massima che la molla equivalente può esercitare opponendosi alla discesa del punzone.
- **Stiffness Z (N/m):** indica la **rigidezza della molla equivalente** lungo l'asse Z, ossia il rapporto tra la forza applicata e lo spostamento conseguente. Questo parametro consente di definire la risposta elastica della matrice scorrevole durante la fase di deformazione.

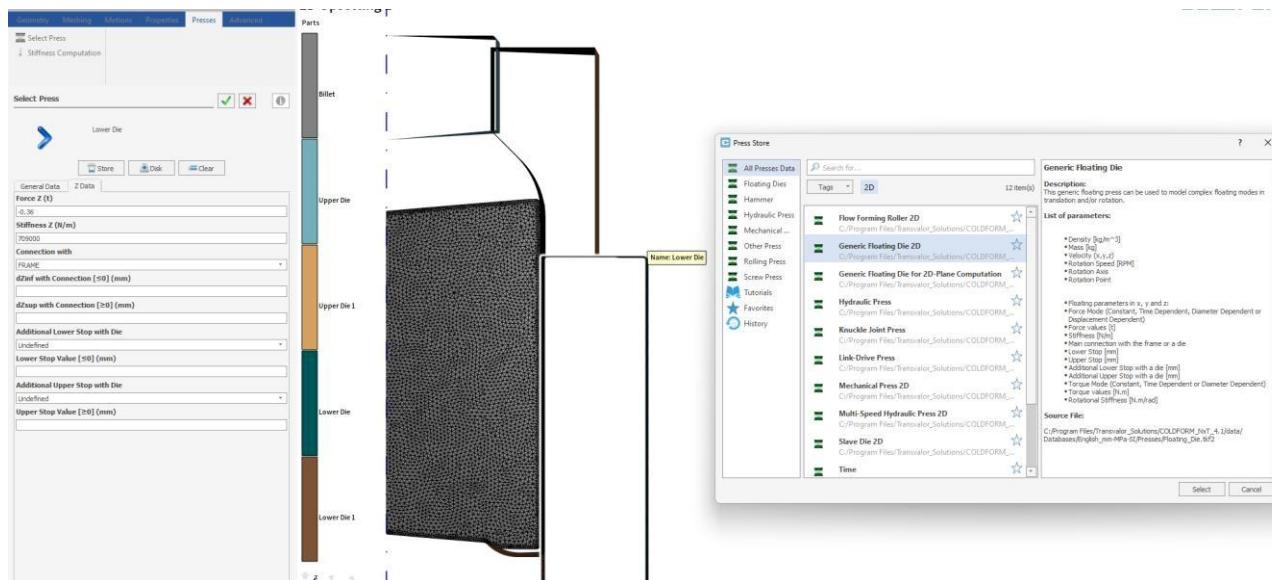


Figura 56 - impostazione matrice scorrevole su COLDFORM (Coldform)

Per il calcolo della rigidezza è necessario consultare il catalogo delle molle Bordignon conforme alla norma **ISO 10243**, individuare il modello di molla corrispondente a quella utilizzata e ricavare dal catalogo il relativo valore di **rigidezza**:

ISO 10243 3S		ISO 10243 4S		ISO 10243 5S																									
Carico forte Heavy load		Carico extra forte Extra heavy load		Carico super forte Super heavy load																									
L₀	R	XLL 20% S ₁ F ₁	Max 30% S ₂ F ₂	R	XLL 17% S ₁ F ₁	Max 25% S ₂ F ₂	R	XLL 10% S ₁ F ₁	Max 15% S ₂ F ₂																				
Lungh. libera Free length mm	Codice Ctg. No.	Rigidità Rate N/mm	Corsa Stroke mm	Carico Load N	Corsa Stroke mm	Carico Load N	Codice Ctg. No.	Rigidità Rate N/mm	Corsa Stroke mm	Carico Load N	Codice Ctg. No.	Rigidità Rate N/mm	Corsa Stroke mm	Carico Load N	Codice Ctg. No.	Rigidità Rate N/mm	Corsa Stroke mm	Carico Load N	Codice Ctg. No.	Rigidità Rate N/mm	Corsa Stroke mm	Carico Load N							
(D) Sede • Housing Ø mm 50										(d) Spina • Rod Ø mm 25																			
Sezione filo • Wire section 11,3 x 7,4										Sezione filo • Wire section 11,4 x 9,1										Sezione filo • Wire section 11,8 x 13,4									
64	3S51065	413,0	12,8	5286	19,2	7930	4S51065	709,0	10,9	7714	16,0	11344	5S50064	1980,0	6,4	12672	9,6	19008	20										

Figura 57 - catalogo molle bordignon (AGRATI-CVB)

Il calcolo della forza avviene applicando la relazione:

$$F = K \cdot \Delta L$$

dove K rappresenta la (stiffness) rigidezza della molla e ΔL lo spostamento elastico, assunto in letteratura pari a 5 mm.

Sostituendo i valori, si ottiene una forza di **0,36 tonnellate**, come riportato in Figura 56. Il valore assume segno negativo poiché la forza agisce in direzione opposta all'asse Z, opponendosi alla discesa del punzone.

Anche la terza stazione dispone di una matrice scorrevole.

Inoltre, come si può osservare dalla Figura 54, i diversi utensili risultano parzialmente **compenetrati** tra loro. Si tratta di una scelta puramente rappresentativa adottata nel simulatore per evitare la formazione di spazi vuoti tra i componenti. In questo modo si impedisce che, durante la fase di compressione, il materiale dello spezzone penetri in tali zone d'aria. Per questo motivo, è considerata una buona pratica modellativa far compenetrare leggermente i componenti tra loro.

3.2 Strumenti a supporto della simulazione

Durante la fase di simulazione numerica, è possibile avvalersi di una serie di strumenti integrati nel software FEM che permettono di analizzare in dettaglio il comportamento del processo e di valutare la qualità del risultato ottenuto. Questi strumenti sono fondamentali non solo per comprendere l'efficienza del processo, ma anche per individuare tempestivamente eventuali criticità.

Uno dei principali strumenti di analisi è il **grafico forza-corsa** in figura 58, comunemente rappresentato **in tonnellate**. Questo diagramma mostra l'andamento della forza necessaria in funzione della corsa del punzone, fornendo indicazioni immediate sulla distribuzione degli sforzi lungo il ciclo di traciatura. Un picco anomalo o una variazione irregolare può segnalare la presenza di difetti, un cattivo riempimento o un'usura anomala degli utensili.

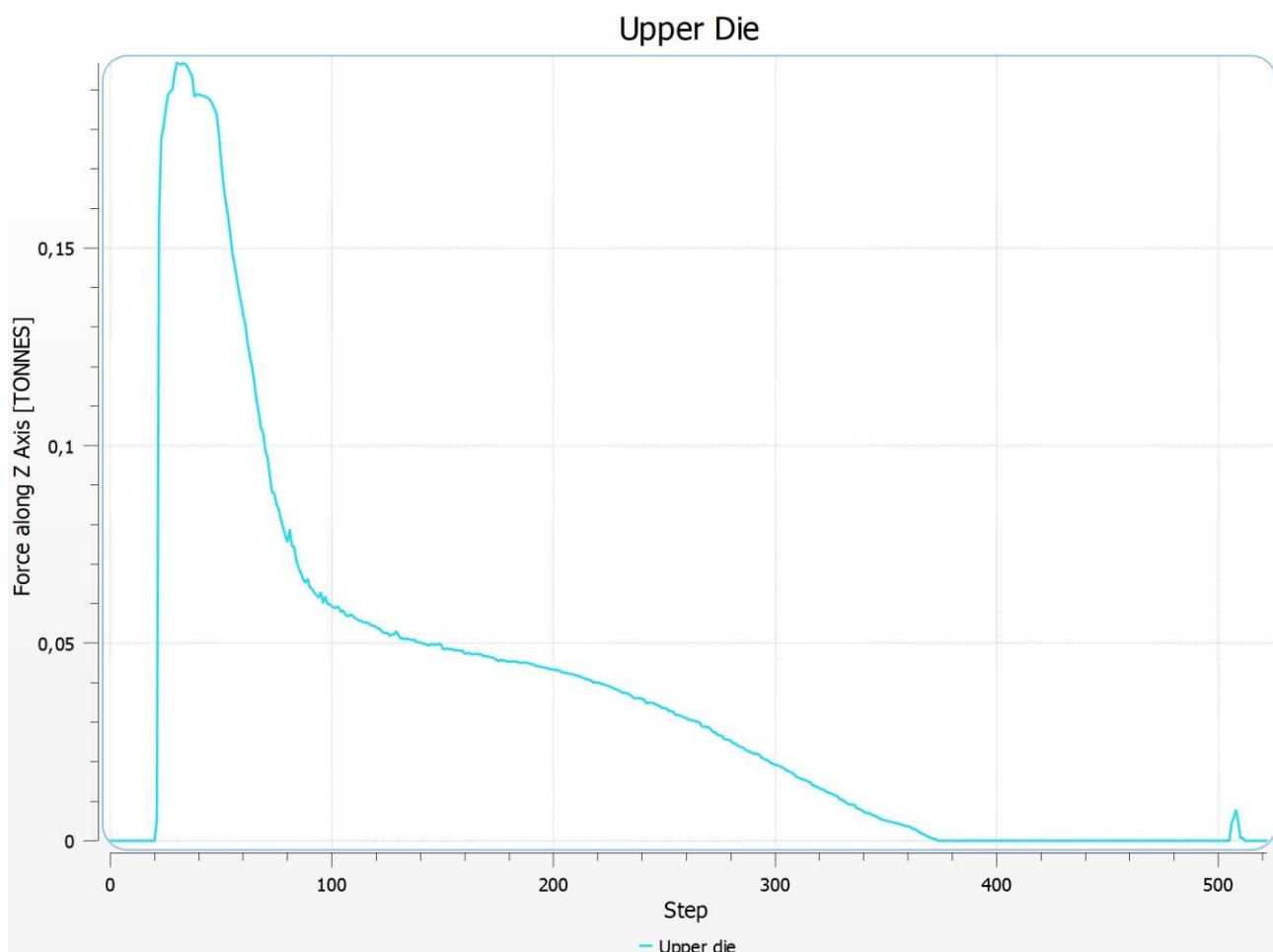


Figura 58 - plot tonnellaggio 6° stazione ovvero lo strappo pastiglia(Coldform)



Figura 59 - plot tonnellaggio 6° stazione reale in produzione (CVB, Tabbia Stefano)

Un secondo parametro di notevole importanza è la distribuzione delle **pressioni di contatto** all'interno della billetta, da analizzare nell'ultimo step operativo, escludendo la fase di ritorno elastico. Qualora i valori superino i **2500 MPa**, è necessario attivare un allarme di attenzione, poiché pressioni di tale entità potrebbero causare la rottura degli utensili durante la produzione:

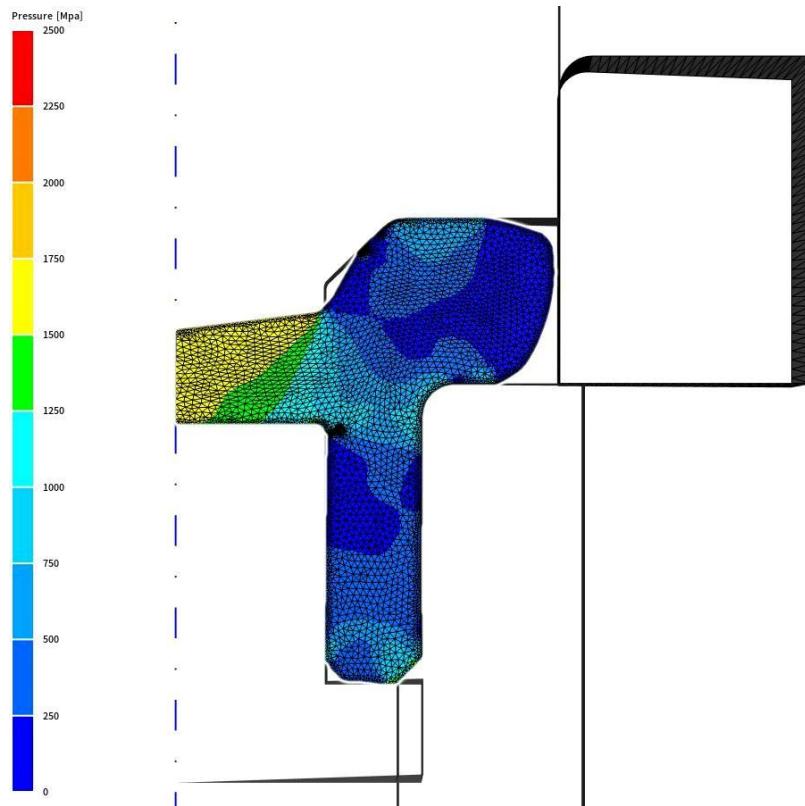


Figura 60 - pressioni 5° stazione (Coldform)

È inoltre possibile visualizzare **l'orientamento e la deformazione dei grani** del materiale in seguito alla formatura, al fine di analizzare il comportamento delle fibre e comprendere come queste si distribuiscono e si muovono internamente durante il processo, come mostrato in figura 61.

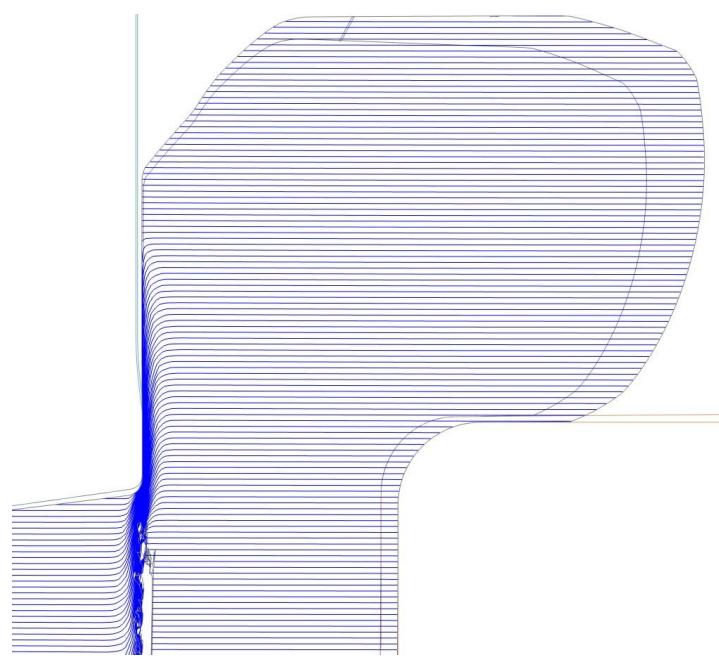


Figura 61 – movimento grani 6° stazione vicino allo strappo (Coldform)

Un altro parametro fondamentale fornito dal simulatore è l'**equivalent strain**, che rappresenta la deformazione plastica equivalente subita dal materiale durante il processo di formatura. Questo

valore consente di valutare l'entità complessiva della deformazione in ogni punto della billetta e di identificare eventuali zone critiche soggette a eccessivo allungamento o rischio di rottura.

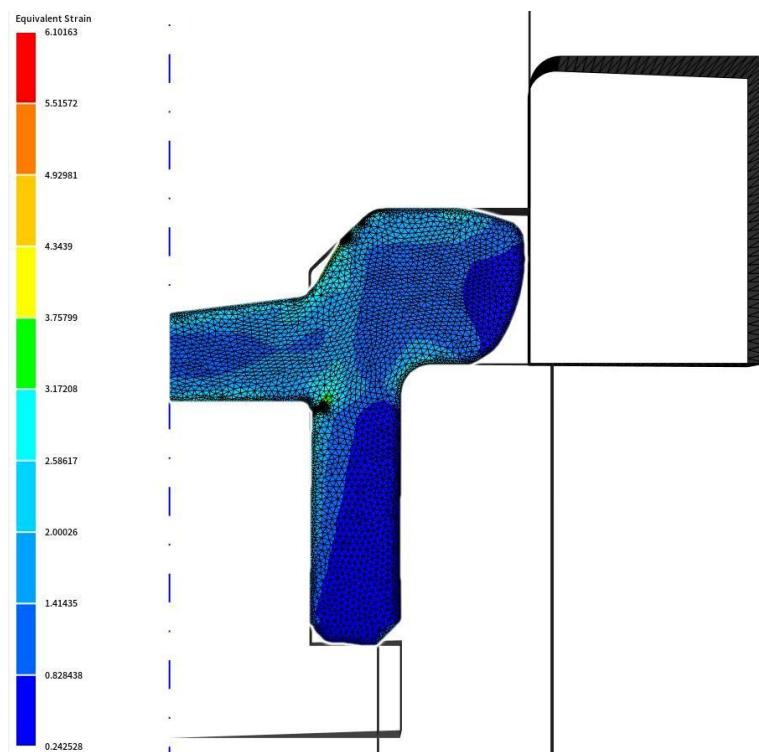


Figura 62 - equivalent strain 5° stazione (Coldform)

Infine, è spesso disponibile una **mappa della temperatura**, anche nei processi nominalmente a freddo, osservabile in figura 48. Durante operazioni ad alta deformazione plastica, infatti, si possono generare incrementi termici localizzati che influenzano la risposta del materiale. La rappresentazione delle temperature locali consente di evidenziare zone a rischio di ammorbidente, trasformazioni di fase indesiderate o fenomeni tribologici critici come il *pick-up*. Questi strumenti di analisi permettono, nel complesso, di **interpretare i risultati della simulazione in modo più completo**, fornendo una base solida per il miglioramento del progetto e la validazione del processo prima della fase sperimentale o produttiva.

3.2.1 Calcolo del coefficiente di Latham-Cockcroft

Per ridurre il divario tra modello numerico e dati sperimentali per prima cosa bisogna validare il comportamento del simulatore FEM e migliorare la coerenza tra i risultati numerici e la realtà produttiva; quindi, è stato necessario identificare un valore realistico del **coefficiente di frattura Latham Cockcroft (LCF)**. Questo parametro è fondamentale poiché descrive il momento in cui il materiale raggiunge la condizione critica per la frattura, specialmente in operazioni come lo strappo della pastiglia, dove i gradienti di deformazione e trazione sono estremamente elevati.

Per ottenere una stima attendibile del valore del coefficiente, è stata effettuata un'**analisi metallografica** comparativa tra la simulazione e il campione reale del dato caso studio prodotto in stabilimento.

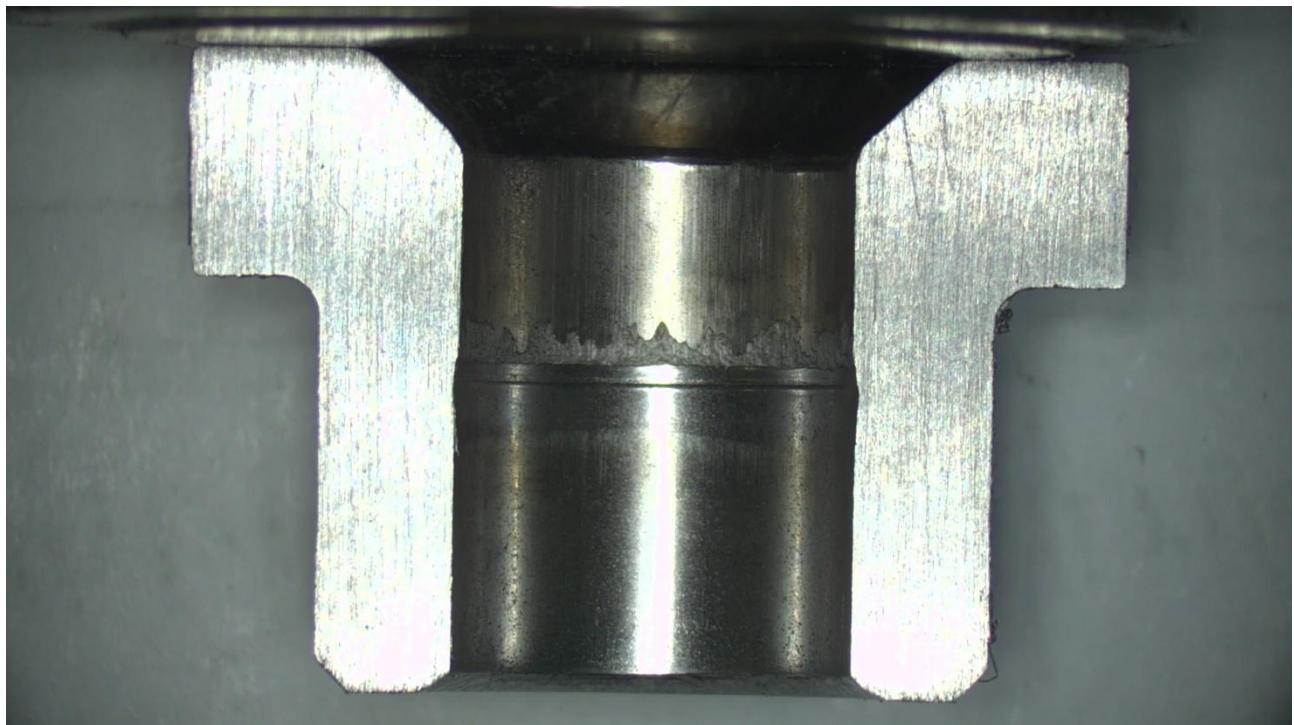


Figure 63 - sezione mediante elettroerosione del componente per analisi delle fibre

Un operatore esperto ha proceduto con la sezione a filo mediante elettroerosione di due campioni come illustrato in figura 63, successivamente lucidati con appositi strumenti di laboratorio e inseriti in placchette metallografiche. Questa soluzione ha permesso di alloggiare comodamente i pezzi (di forma circolare) sul piano del microscopio, semplificando le analisi successive. L'analisi delle fibre interne è stata poi condotta tramite **attacco chimico con reagente Nital**, standard nelle indagini microstrutturali su acciai, per evidenziare la direzione di scorrimento e la deformazione del reticolo cristallino nella zona soggetta allo strappo. Questi risultati sono stati confrontati con le **mappe di danno previste dalla simulazione FEM** nel momento in cui viene superato il valore soglia del criterio di Latham-Cockcroft, al fine di trovare un valore numerico che riproducesse fedelmente la morfologia di frattura osservata nei campioni reali.

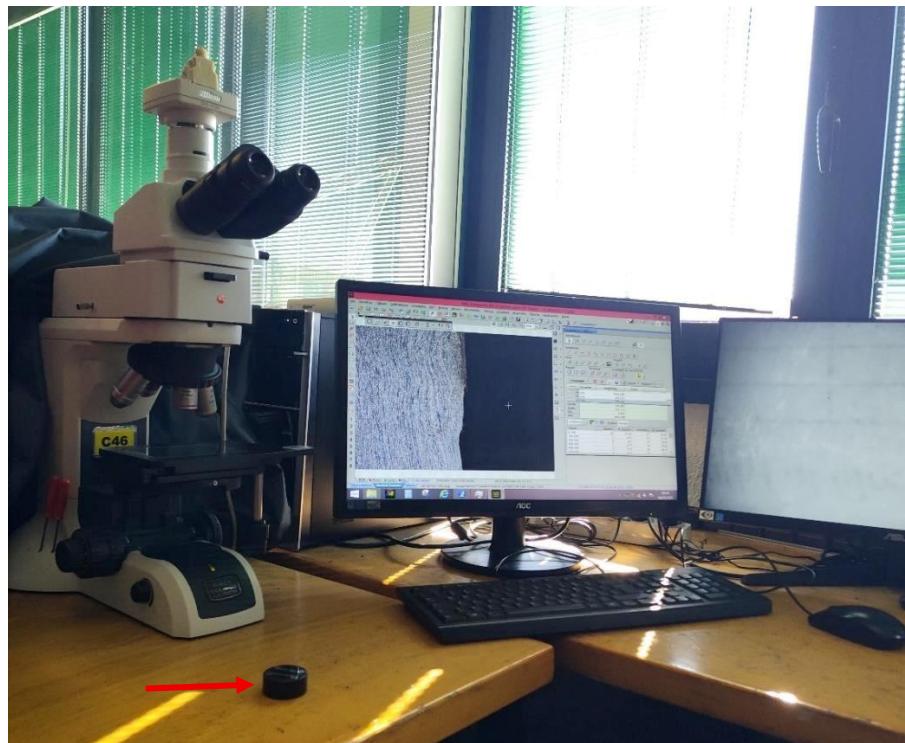


Figura 64 - analisi fibre in laboratorio (Stefano)

Di seguito sono riportate alcune immagini acquisite al **microscopio**, che mostrano il componente nella sua interezza, dalla parte superiore — dove è possibile osservare chiaramente il *rollover* — fino alla base. Alcune immagini includono inoltre misurazioni effettuate sul componente.

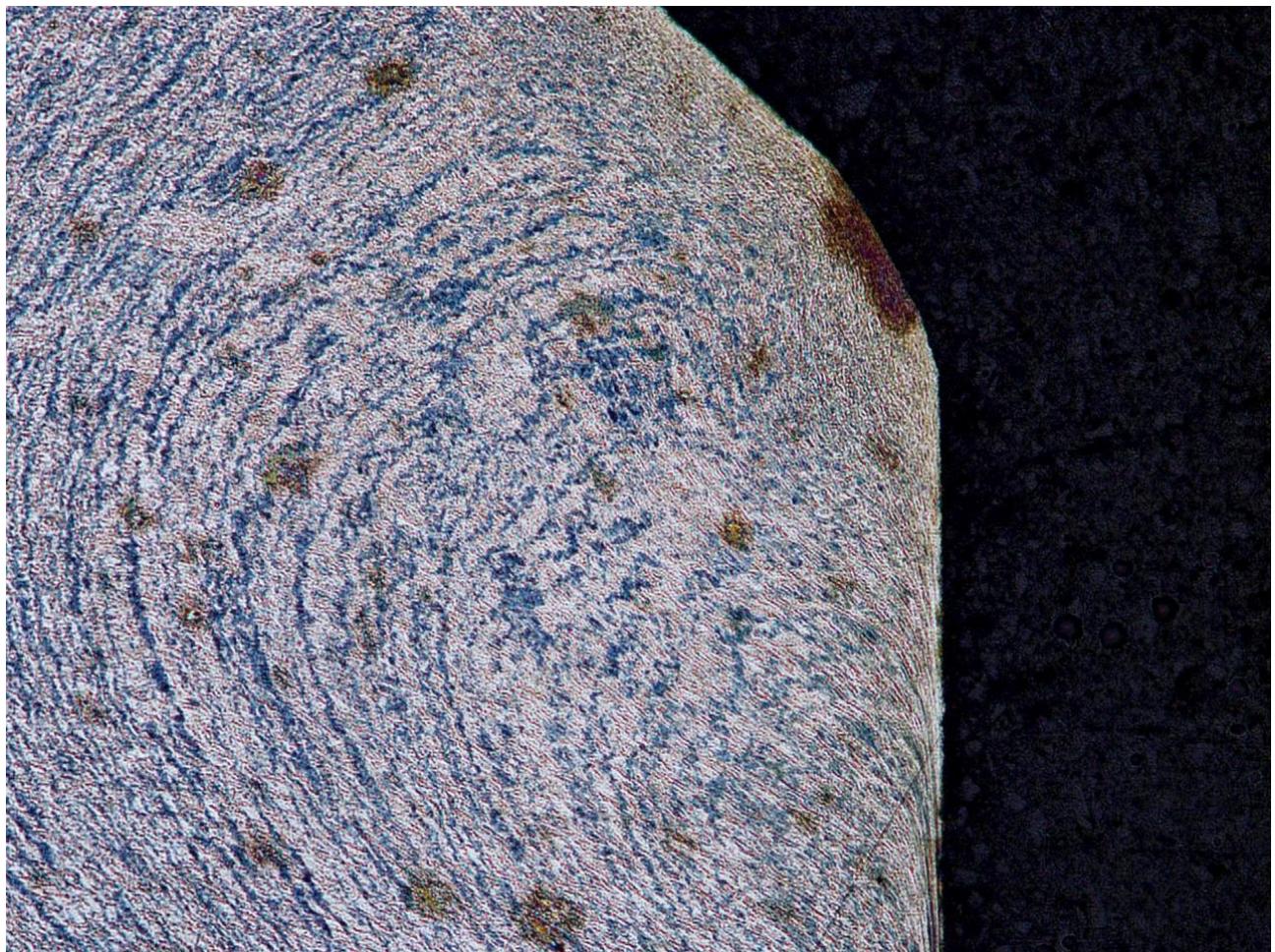


Figura 65 - immagine al microscopio, visibile chiaramente il rollover (microscopio)

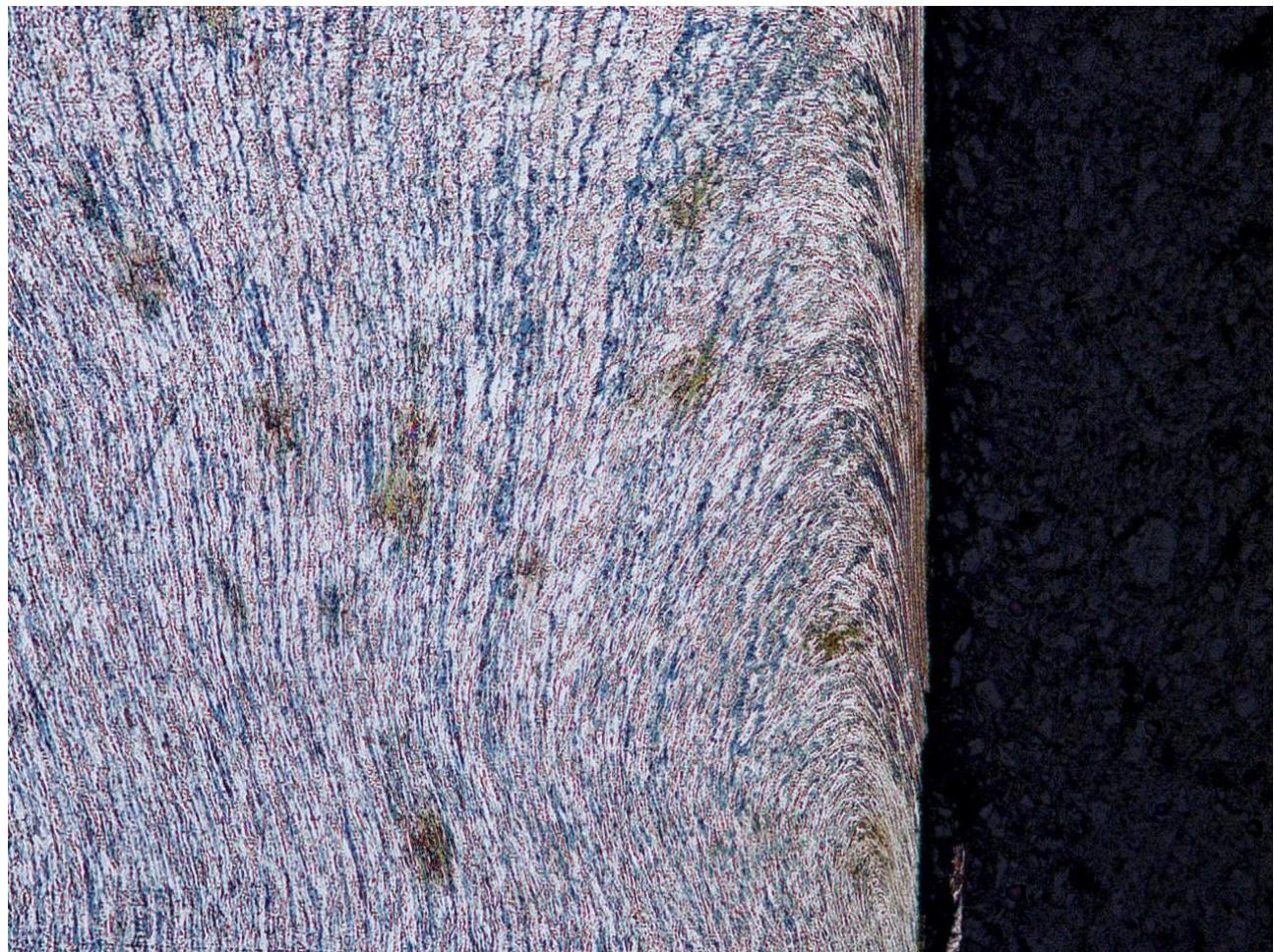


Figura 66 - immagine al microscopio, visibile dove inizia la frattura (microscopio)



Figura 67 - immagine al microscopio (microscopio)

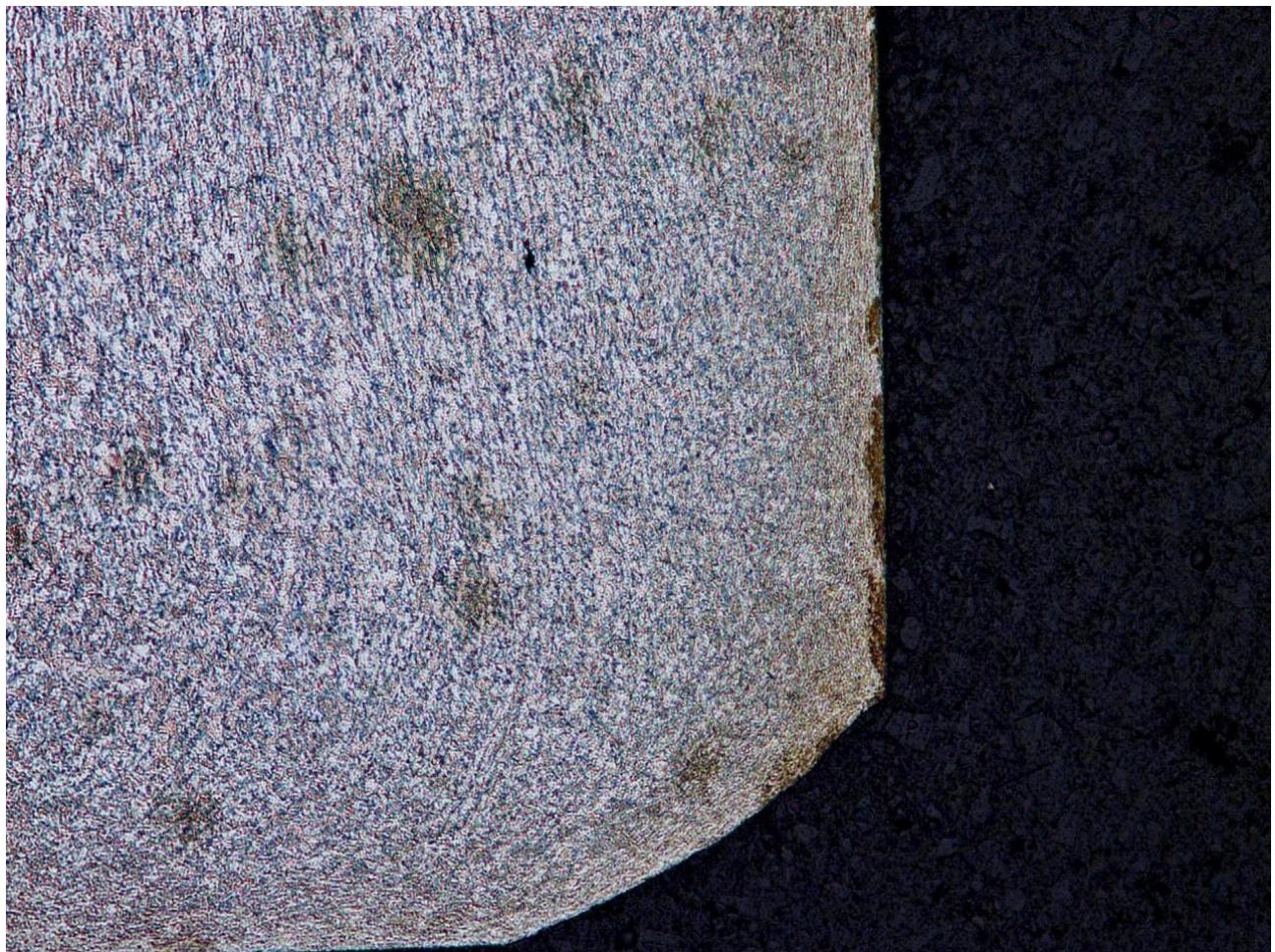


Figura 68 - immagine al microscopio, base del componente (microscopio)

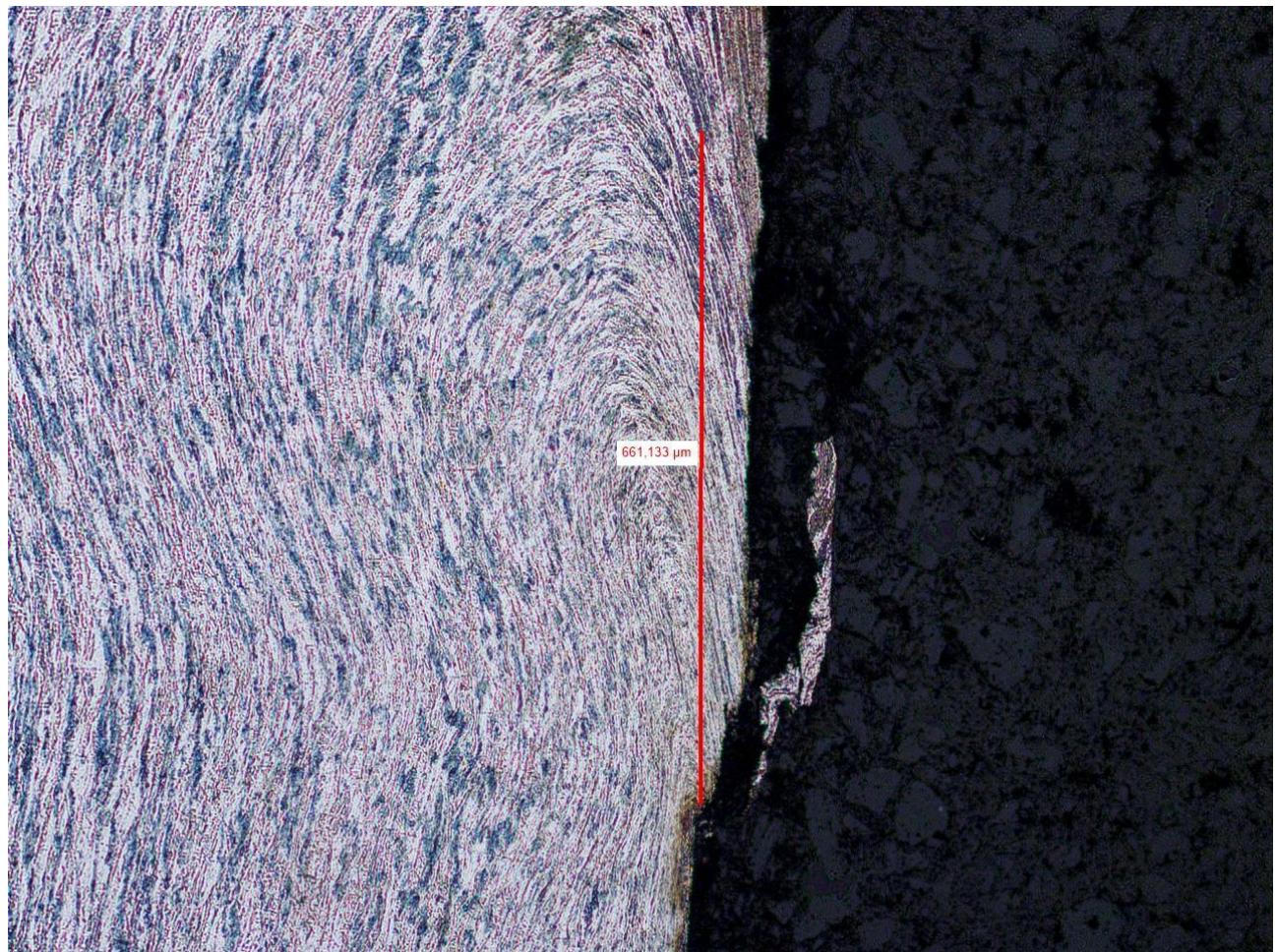


Figura 69 - immagine al microscopio, lunghezza frattura (microscopio)

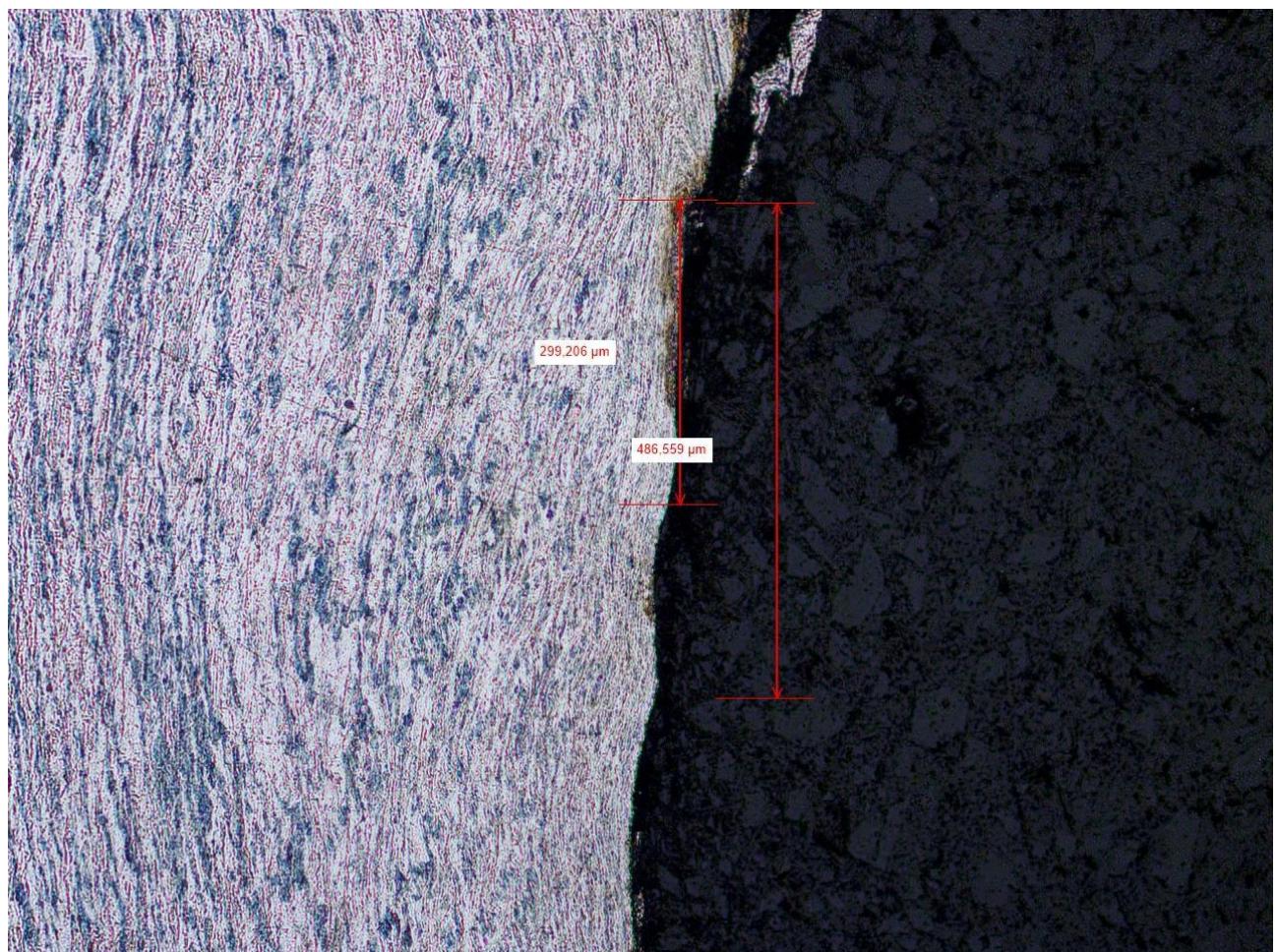


Figura 70 - immagine al microscopio, lunghezza frattura (microscopio)

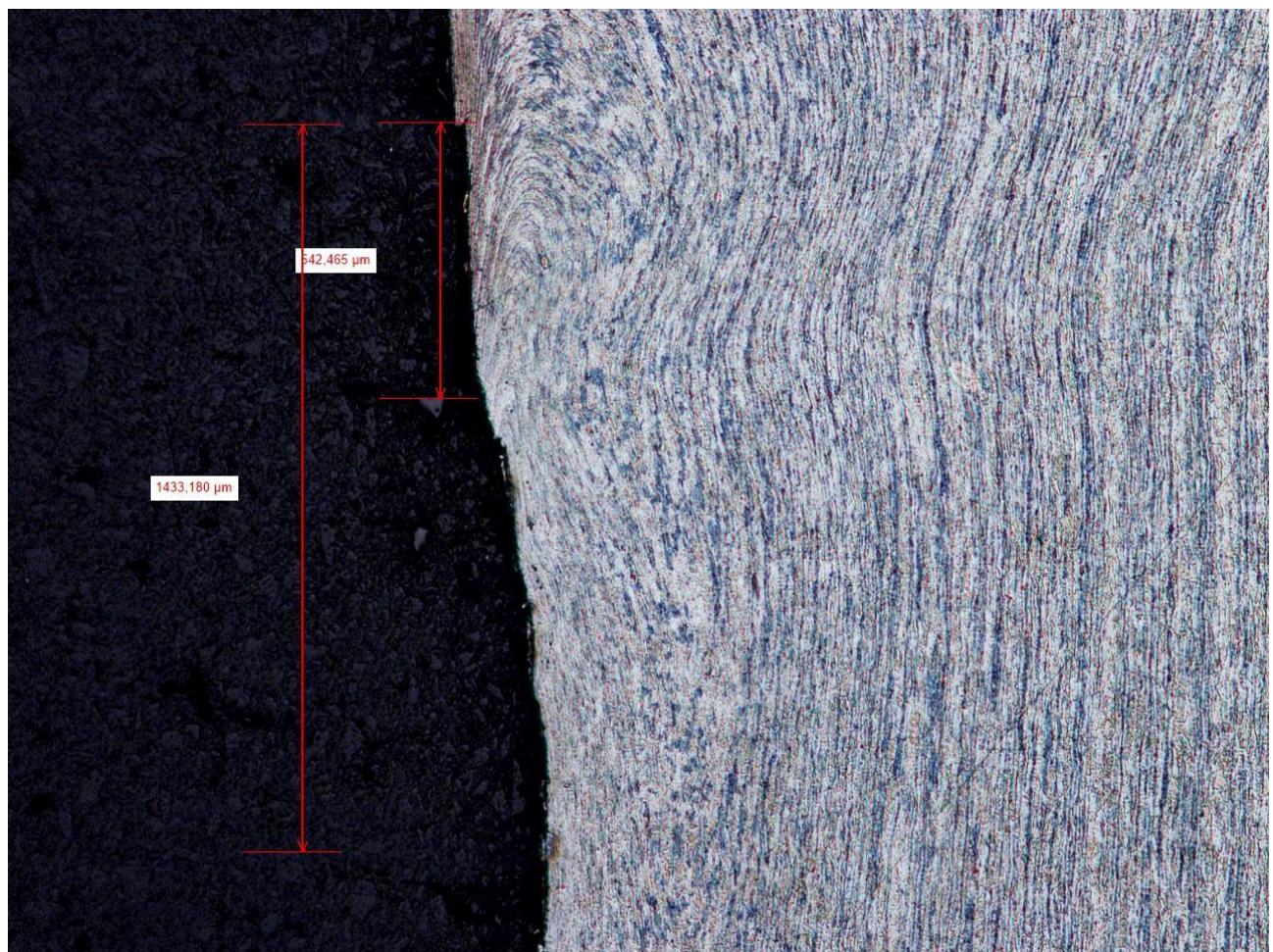


Figura 71 - immagine al microscopio, lunghezza frattura (microscopio)

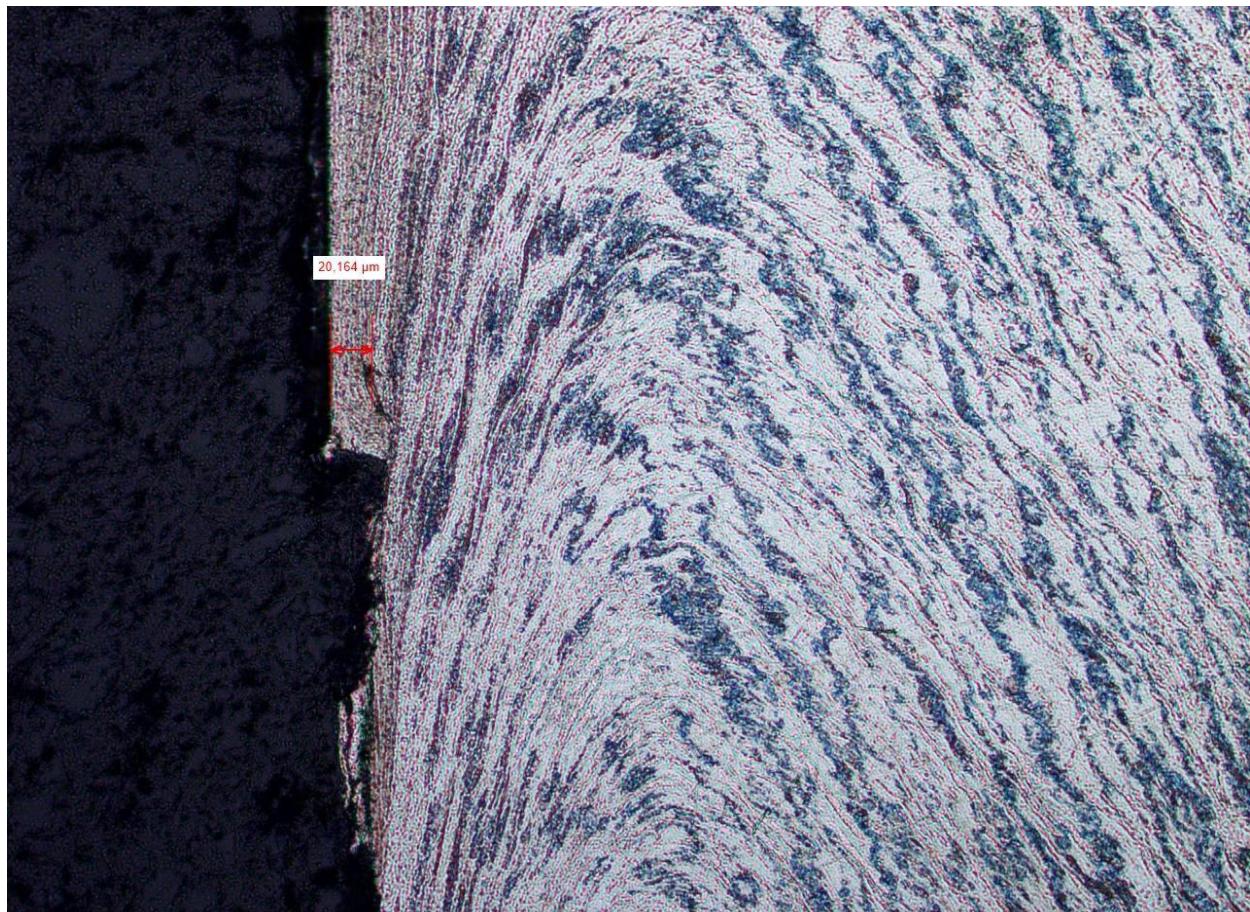
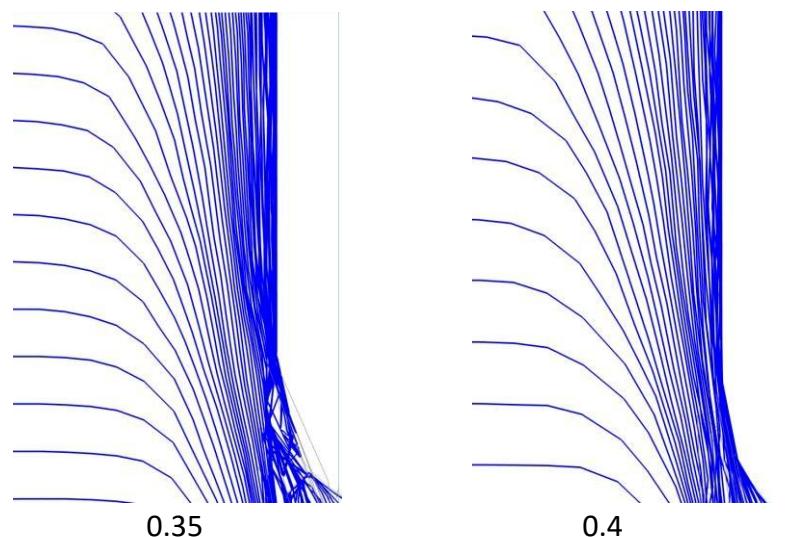


Figura 72 - immagine al microscopio, profondità frattura (microscopio)

Dunque, ho proceduto con la simulazione dell'intero ciclo del prodotto in questione fino alla quinta stazione per poi simulare la sesta stazione (lo strappo pastiglia) con **diversi coefficienti di Latham Cockcroft** per così capire attraverso l'analisi delle fibre quale si avvicinasse di più rispetto al campione in produzione, abbiamo scelto un prodotto che non avesse calibratura nel punzone di foratura così da capire solo ed esclusivamente come avviene lo strappo della pastiglia.

I risultati sono riportati nella seguente immagine:



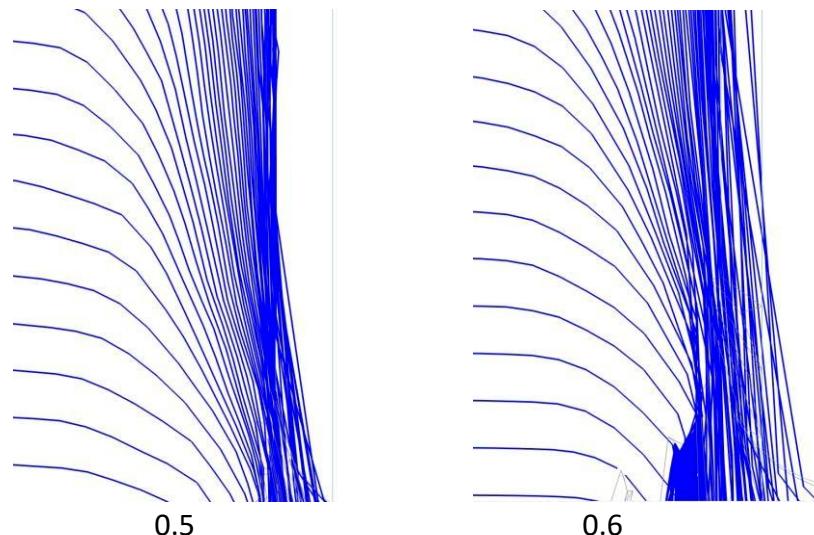


Figura 73 – analisi delle fibre con zoom nella zona di frattura con rispettivi coefficienti di Latham Cockcroft (Coldform)

Il confronto tra l’analisi metallografica in figura 65 e delle simulazioni numeriche in figura 72 consente di valutare la coerenza dell’orientamento delle fibre e, di conseguenza, l’attendibilità dei diversi valori di coefficiente ipotizzati.

L’immagine al microscopio mostra un andamento delle fibre caratterizzato da una **curvatura progressiva e armoniosa verso il bordo, senza brusche deviazioni né sovrapposizioni irregolari**. Osservando i risultati della simulazione con coefficiente pari a 0.6 si nota un comportamento anomalo delle linee di flusso, con accentuata concentrazione e disordine in prossimità della frattura, non coerente con quanto riscontrato sperimentalmente. Tali condizioni suggeriscono che il valore **0.6 debba essere escluso**.

I casi con coefficienti intermedi (0.4–0.5) presentano invece una distribuzione delle fibre più regolare e compatibile con la curvatura osservata al microscopio, rappresentando quindi un intervallo più realistico per la calibrazione del modello.

L’approccio basato sulle fibre ha fornito indicazioni utili per definire il **range di coefficienti** da considerare, permettendo di acquisire una prima stima delle possibili condizioni operative. Sebbene questo confronto tra le fibre nel pezzo reale e quelle nel simulatore possa risultare **soggettivo**, rappresenta comunque un punto di partenza valido. Va sottolineato che non è un’operazione semplice, ma costituisce un confronto iniziale che può orientare ulteriori analisi.

Per affinare la scelta del coefficiente di Latham Cockcroft è stata condotta una misurazione di diversi parametri al fine di **oggettivare il processo di selezione**:

- step rottura dove avviene quindi la separazione della pastiglia;
- altezza della frattura;
- distanza della frattura;

queste misurazioni si trovano indicate nelle seguenti immagini e riassunte nella successiva tabella:

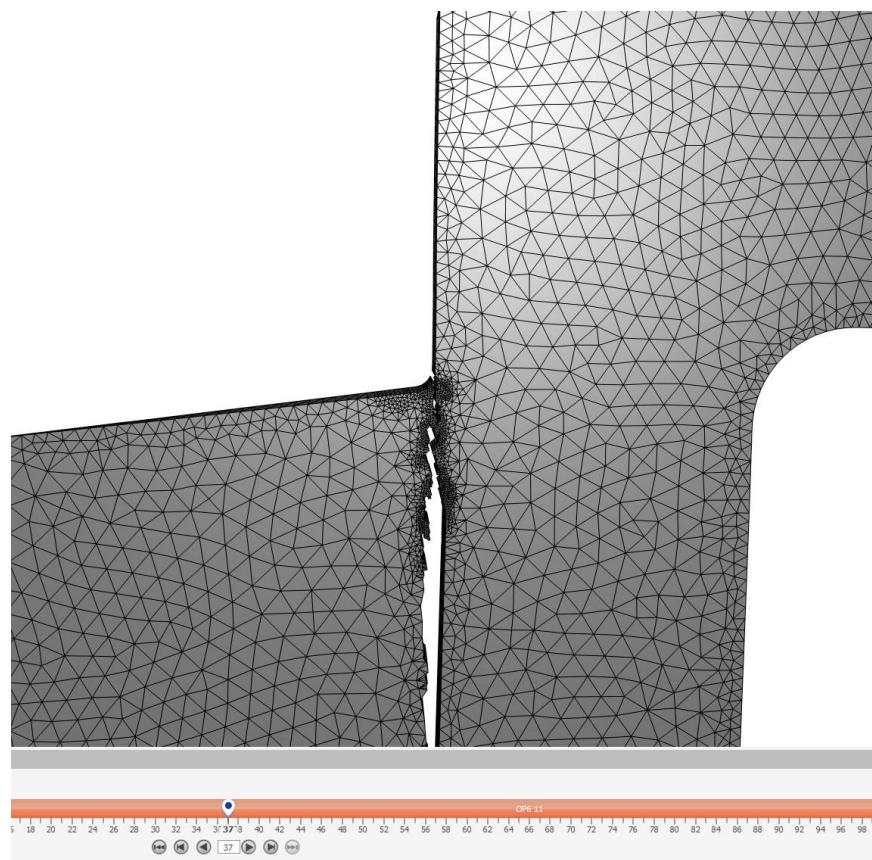


Figura 74 - step rottura (Coldform)

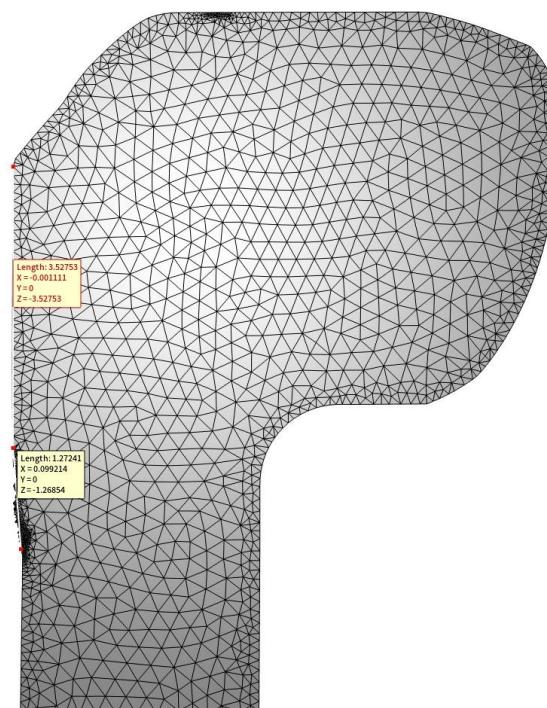


Figura 75 - altezza e distanza della frattura (Coldform)



Mesh 0.2mm Storage parameters 0.1mm	0.35	0.4	0.45	microscopio
Step rottura	31	37	42	36
Lunghezza frattura	1.93 mm	1.26 mm	0.74mm	1.147 – 1.433mm
Profondità frattura	0.03 mm	0.03 mm	0.02 mm	0.02 mm
Distanza della frattura	2.85 mm	3.52 mm	3.99 mm	3.41 mm

Tabella 3 - scelta del coefficiente di Latham Cockcroft

Osservando i dati della tabella 3 e confrontandoli con le misure reali ottenute al microscopio emerge chiaramente che la simulazione con *storage parameters* 0.1mm e mesh 0.2mm fornisce risultati coerenti soprattutto nel caso con **0.4** come valore di coefficiente di Latham Cockcroft.

- **Step rottura:** il microscopio indica 36, e proprio il valore di 0.4 restituisce il valore più vicino, mentre 0.35 e 0.45 si discostano rispettivamente verso valori inferiori (31) e superiori (42).
- **Lunghezza frattura:** al microscopio è compresa tra 1.147mm e 1.433mm. Il valore 0.4 fornisce 1.26mm, perfettamente dentro al range sperimentale, mentre 0.35 (1.93mm) e 0.45 (0.74mm) risultano chiaramente fuori.
- **Profondità frattura:** il microscopio misura 0.02mm. Anche qui, 0.4 riporta 0.03mm, che rappresenta una buona approssimazione, mentre 0.45 coincide perfettamente (0.02mm), ma va considerato il quadro complessivo.
- **Distanza della frattura:** il microscopio indica 3.41mm. La simulazione con 0.4 restituisce 3.52mm, valore molto vicino, mentre 0.35 (2.85mm) sottostima e 0.45 (3.99mm) sovrastima.

In sintesi, anche se nel parametro “profondità frattura” il valore 0.45 sembra più vicino, è evidente che la simulazione con **0.4** è quella che riproduce in maniera più fedele **tutti i parametri contemporaneamente**, garantendo coerenza con le osservazioni sperimentali. Per questo motivo, il valore ottimale da scegliere è **0.4**.

3.3 Impostazione modello di ottimizzazione / simulazione iterattiva

Una volta scelto il **coefficiente di Latham Cockcroft**, è stato possibile procedere con la fase di **ottimizzazione dei parametri critici**. Questi ultimi assumono particolare rilevanza in quanto, al variare rispetto ai valori nominali, influenzano direttamente le condizioni di innesco e propagazione della frattura durante il processo di deformazione plastica.

Quindi, ho proceduto con la modifica del ciclo, identificando un totale di 10 parametri, di cui 2 risultano dipendenti da altri parametri, ovvero (3) e (10). Per ciascuna variabile, è stato definito un intervallo di valori e una risoluzione specifica, al fine di ottimizzare le condizioni operative, si trovano le scelte fatte nella seguente immagine:

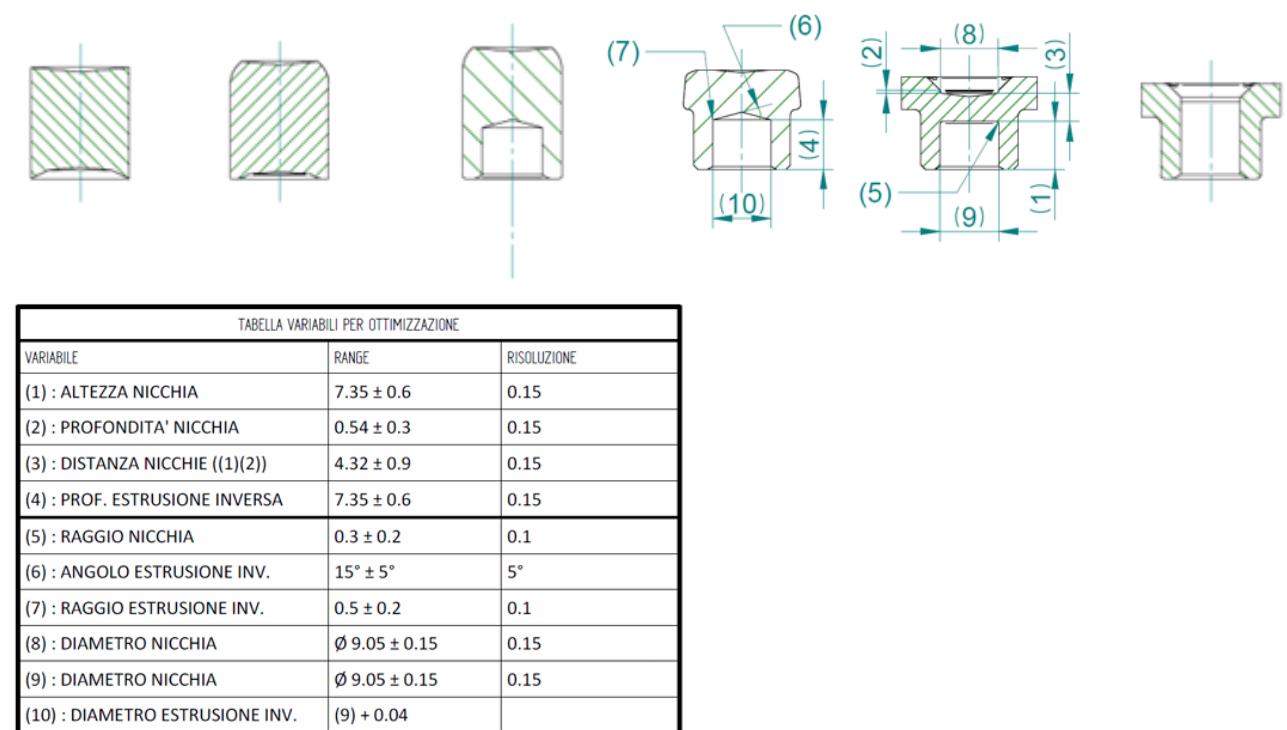


Figura 76 - ciclo per ottimizzazione (AGRATI-CVB)

L'ottimizzazione del ciclo di stampaggio è finalizzata a identificare, tra i dieci parametri selezionati come più influenti sulla sesta stazione (strappo della pastiglia), quelli che incidono in **misura maggiore** sul comportamento del materiale durante l'operazione.

L'analisi verrà condotta mediante una serie di simulazioni 3D, variando un parametro per volta, al fine di quantificare l'effetto specifico di ciascuna variabile sullo strappo della pastiglia.

Si è deciso di eseguire le simulazioni in modalità **tridimensionale**, analizzando **uno spicchio di 15°** del modello. Questa scelta consente di **ridurre significativamente l'onere computazionale** rispetto alla simulazione completa a 360°, mantenendo al contempo una rappresentazione fedele del comportamento del componente, trattandosi di un solido di rivoluzione. È stata fatta questa scelta siccome l'obiettivo in questa fase è individuare il parametro che influenza maggiormente sull'operazione di strappo della pastiglia, garantendo quindi la massima precisione nei risultati. Inoltre, il passaggio al 3D risulta vantaggioso anche dal punto di vista computazionale: l'operazione di strappo comporta infatti un elevato carico di calcolo per il simulatore, e l'utilizzo di modelli

tridimensionali consente una gestione più stabile e robusta delle simulazioni, riducendo il rischio di crash che potrebbero verificarsi in ambiente 2D.

4. Definizione regole e parametrizzazione

Per poter rendere le simulazioni tra loro confrontabili come primo parametro si è standardizzato la scelta della **mesh** con maggiore attenzione nella zona dello strappo pastiglia, valutando fino a che livello di infittimento fosse realmente conveniente spingersi. Oltre una certa soglia, infatti, l'aumento di elementi comportava soltanto un maggiore peso computazionale senza apportare benefici significativi all'output della simulazione, in particolare in termini di forza di traciatura (tonnellaggio). Per questo motivo ho eseguito diverse prove di mesh con differenti gradi di infittimento, allo scopo di analizzare l'influenza di ciascuna configurazione e individuare il punto oltre il quale la soluzione tendeva a stabilizzarsi, ossia l'asintoto.

In un primo momento ho scelto di analizzare il parametro **remeshing deformation**, che definisce la frequenza con cui il simulatore effettua un nuovo remesh della zona interessata. A tal fine ho eseguito 4 simulazioni, variando il valore da 1 a 2,5 con passo 0,5 e i risultati sono riassunti nel grafico seguente.

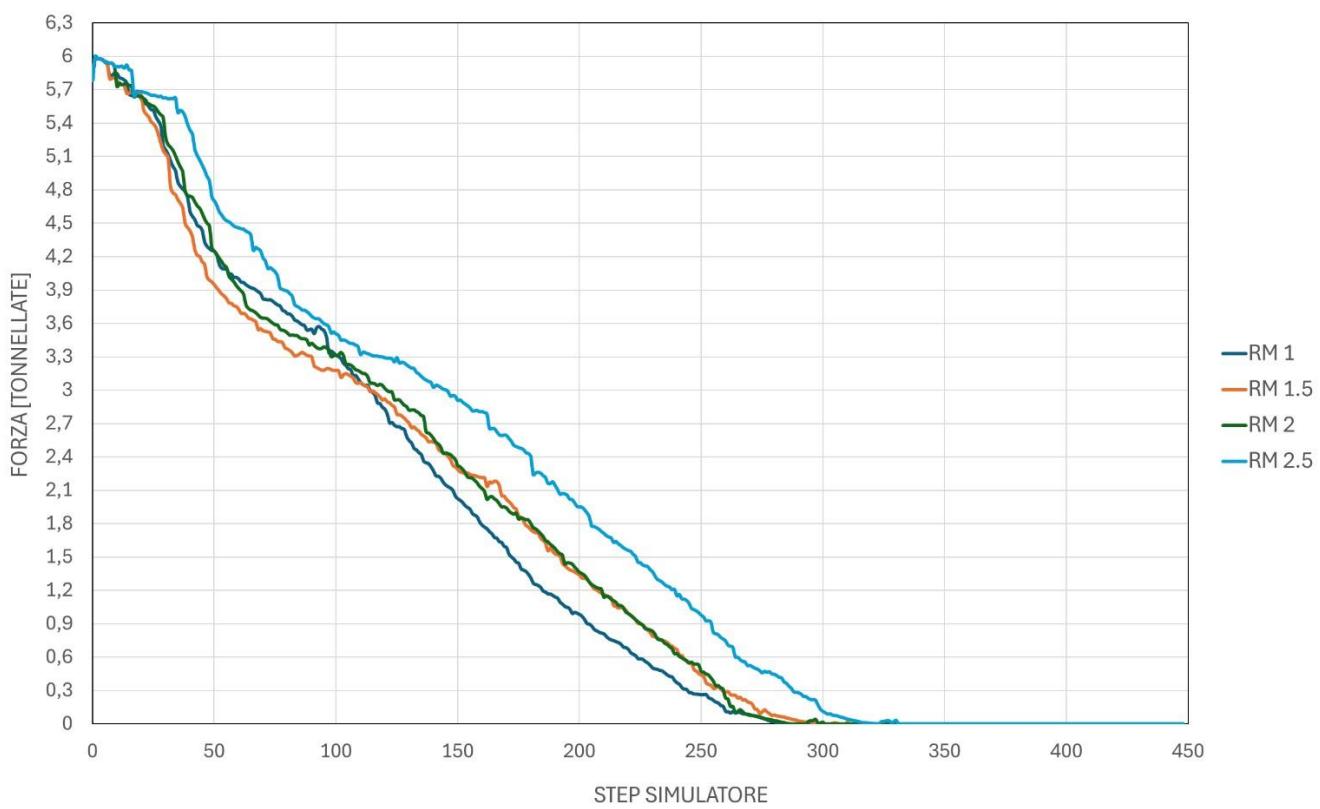


Figura 77 - Remeshing Deformation

L'asse delle ordinate rappresenta la **forza** (in tonnellate), mentre le ascisse lo **step del simulatore**. Le curve mostrano l'andamento della forza al variare del parametro *remeshing deformation* (RM = 1, 1.5, 2, 2.5).



- Tutti i casi partono da circa 6 tonnellate e mostrano un calo progressivo della forza fino ad annullarsi verso lo step 250–300.
- La curva **RM 1** decresce più rapidamente, segnalando che il remeshing troppo frequente può introdurre instabilità numeriche o ridurre l'accuratezza della previsione di carico.
- La curva **RM 2.5** è quella che mostra il decadimento della forza più lento e con più oscillazioni, indicando una simulazione più pesante e meno “pulita” dal punto di vista numerico.
- Le curve **RM 1.5** e **RM 2** sono molto simili, entrambe più stabili rispetto a RM 1 e meno “rumorose” di RM 2.5.

Dunque il *remeshing deformation 2* rappresenta il **miglior compromesso** tra stabilità e accuratezza:

- più affidabile e stabile rispetto a RM 1 (che sottostima il comportamento reale),
- meno “irregolare” e computazionalmente onerosa di RM 2.5.

Inoltre, la curva RM 2 si avvicina maggiormente al comportamento medio atteso del processo, senza presentare deviazioni marcate. In conclusione, **RM = 2** è il valore ottimale perché garantisce un buon equilibrio tra precisione della simulazione e tempi di calcolo, riducendo sia gli errori numerici dovuti a remeshing troppo frequenti che le irregolarità dovute a remeshing troppo rarefatti.

4.1 Definizione MESH

Una volta standardizzato il parametro *Remeshing Deformation*, si è proceduto alla **definizione della mesh**.

Poiché il componente in esame è una boccola, ovvero un solido di rivoluzione, il simulatore consente di analizzare soltanto un settore angolare del modello a 360°. Minore è l'ampiezza dello spicchio considerato, minore risulta il carico computazionale richiesto; per questo motivo, è stato scelto uno spicchio di **15°**, come in precedenza. Di conseguenza, anche la mesh assume una conformazione cilindrica, motivo per cui nelle tabelle 4 e 5 compariranno valori relativi al diametro interno e diametro esterno.

L'analisi è stata inizialmente avviata con una mesh di **0,2 mm**, successivamente affinata a **0,15 mm** e ulteriormente infittita, ottenendo una serie di configurazioni di mesh riportate nelle tabelle e nelle figure seguenti.

valore mesh		PROVA 1	PROVA 2	PROVA 3
0,1	diametro esterno	11	11	12
	diametro interno	9,5	10	9,5
0,2	diametro esterno	13	13	13
	diametro interno	11	11	12
0,4	diametro esterno	15	15	15
	diametro interno	13	13	13
0,6	diametro esterno	17	17	17
	diametro interno	15	15	15
0,8	diametro esterno	21	21	21
	diametro interno	18	18	18
1	diametro esterno	25	25	25
	diametro interno	21	21	21

Tabella 4 - prime prove valori mesh, valori in mm

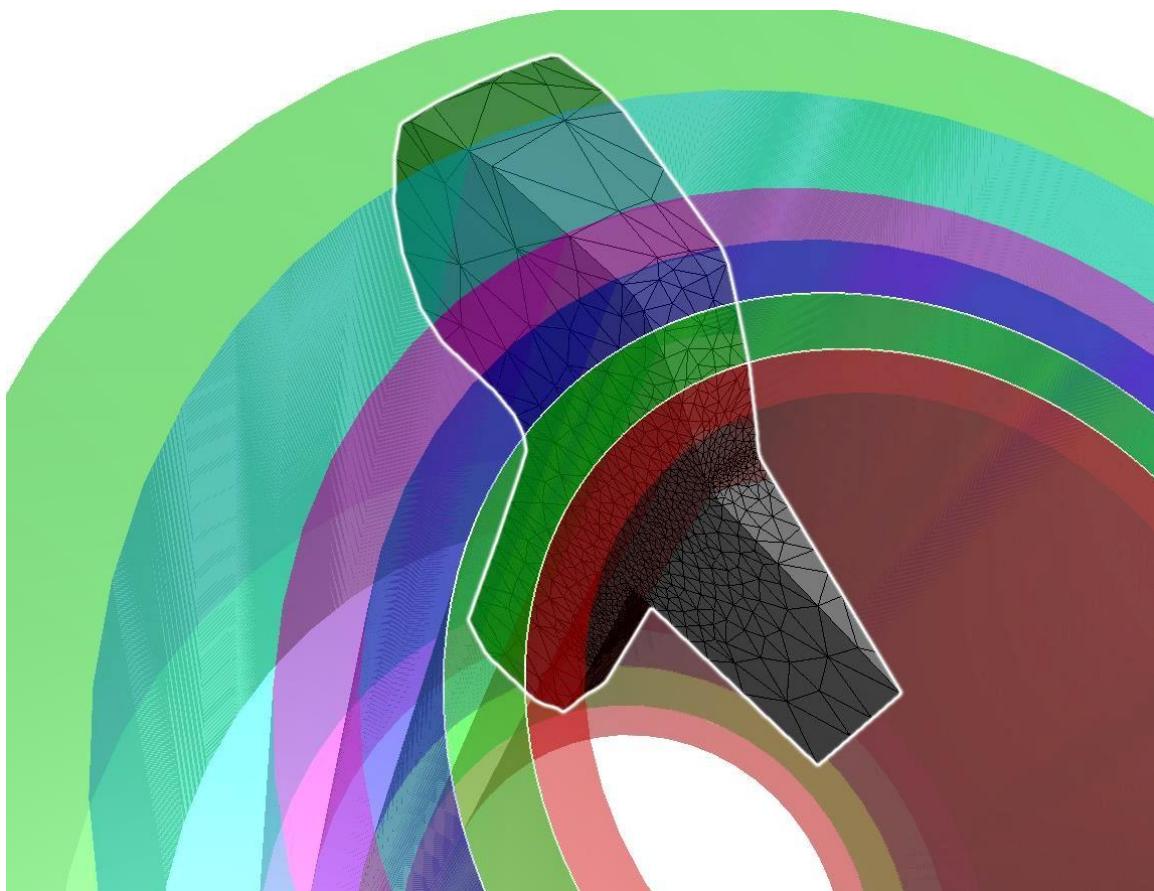


Figura 78 - immagine associata a tabella 4 (Coldform)

Per poi infittirla maggiormente come in figura e tabella seguente:

valore mesh		PROVA 4	PROVA 5	PROVA 6	PROVA 7
0,1	diametro esterno	11,5	12	13	13
	diametro interno	9,5	9,5	9	8,5
0,2	diametro esterno	14	14	14	14
	diametro interno	11,5	12	13	13
0,3	diametro esterno	16	16	16	16
	diametro interno	14	14	14	14
0,5	diametro esterno	18	18	18	18
	diametro interno	16	16	16	16
0,8	diametro esterno	21	21	21	21
	diametro interno	18	18	18	18
1	diametro esterno	25	25	25	25
	diametro interno	21	21	21	21

Tabella 5 - mesh infittita, valori in mm

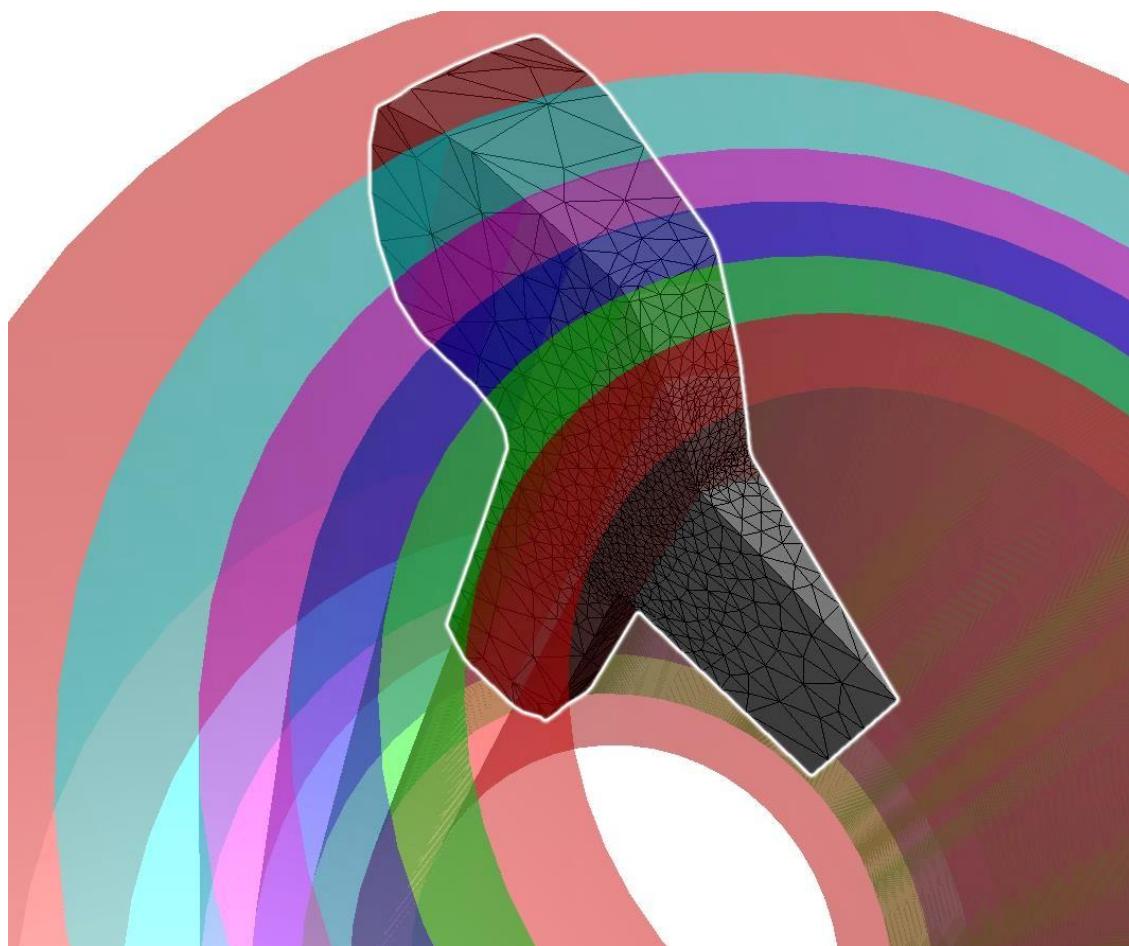


Figura 79 - immagine associata tabella 5 (Coldform)

Sovrapponendo i grafici di tonnellaggio in funzione degli step del simulatore si ottiene quello in figura seguente:

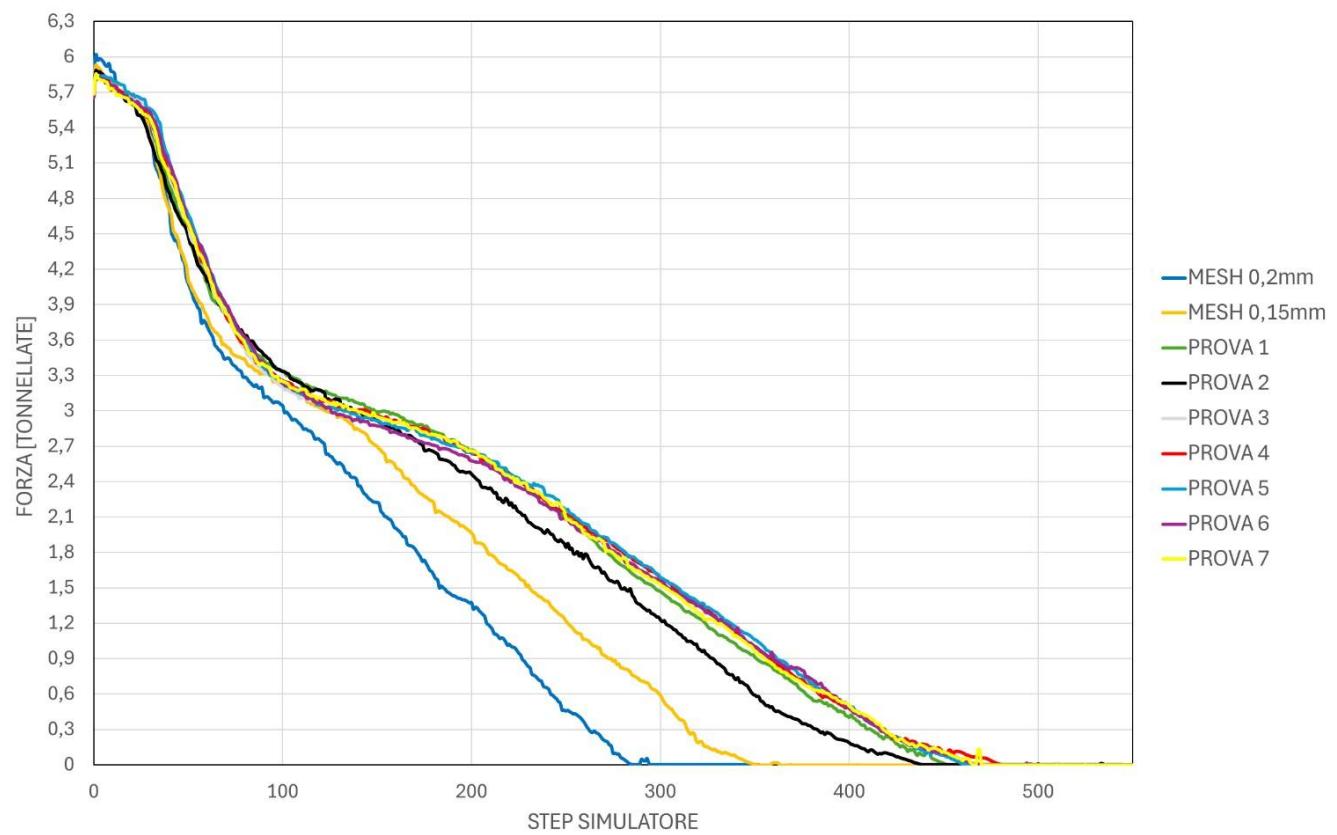


Figura 80 - Grafico forza-step per confronto mesh

Le curve in figura 79 rappresentano l'andamento della forza (tonnellate) in funzione degli step del simulatore per diversi valori di mesh, tale grafico è stato ricreato tramite Excel esportando in formato CSV da coldform i valori di tonnellaggio in funzione degli step del simulatore. Si nota che, dopo una certa densità di mesh, le curve tendono ad allinearsi verso un comportamento **asintotico**, segno che un ulteriore raffinamento non porta cambiamenti significativi nei risultati. Alcune curve (ad esempio mesh 0,2mm e 0,15mm) si discostano maggiormente dalle altre, mentre quelle centrali (PROVA 3, 4, 5, 6, 7) risultano più vicine tra loro e quindi rappresentative di una condizione stabile.

Per definire un criterio utile alla scelta della mesh più adeguata, sono stati individuati alcuni **parametri di confronto** tra le diverse prove.

La selezione di parametri realmente confrontabili non è tuttavia immediata: infatti, modificando la mesh tra una simulazione e l'altra, variano anche i punti di calcolo. In altre parole, a parità di step del simulatore, la posizione del punzone può risultare leggermente diversa a seconda della discretizzazione adottata.

Per ridurre al minimo il rischio di confronti non coerenti, sono stati quindi scelti più parametri di riferimento, in modo da ottenere una valutazione complessiva più robusta. I risultati di tale analisi sono riassunti nella tabella seguente:

	0,2	0,15	PROVA 1	PROVA 2	PROVA 3	PROVA 4	PROVA 5	PROVA 6	PROVA 7
Forza picco [TON]	6,02	5,93	5,84	5,88	5,85	5,84	5,85	5,85	5,86
variazione precedente		1,48%	1,55%	-0,73%	0,52%	0,18%	-0,17%	0,02%	-0,13%
variazione prova 7	2,80%	1,28%	-0,30%	0,43%	-0,10%	-0,28%	-0,10%	-0,13%	0,00%
Forza strappo [TON]	0,10	0,11	0,14	0,10	0,11	0,13	0,11	0,11	0,13
variazione precedente		-10,03%	-33,03%	31,82%	-15,98%	-13,78%	9,81%	1,02%	-18,13%
variazione prova 7	-27,11%	-19,80%	6,69%	-27,26%	-15,63%	-4,00%	-14,47%	-15,35%	0,00%
Forza separazione [TON]	2,99	3,13	2,39	2,26	2,44	2,62	2,85	2,54	2,74
variazione precedente		-4,75%	23,87%	5,39%	-8,09%	-7,48%	-8,80%	11,07%	-8,08%
variazione prova 7	9,09%	14,27%	-13,00%	-17,69%	-11,03%	-4,37%	4,04%	-7,48%	0,00%
Forza step 260 [TON]	0,35	1,07	1,97	1,78	1,90	2,02	2,04	1,97	1,96
variazione precedente		-203,85%	-84,71%	9,53%	-6,57%	-6,17%	-1,31%	3,71%	0,18%
variazione prova 7	-82,13%	-45,69%	0,32%	-9,24%	-3,28%	2,69%	4,04%	0,18%	0,00%
Forza step 150 [TON]	2,22	2,70	2,99	2,92	2,94	2,96	2,91	2,87	2,95
variazione precedente		-21,52%	-10,78%	2,54%	-0,77%	-0,77%	1,64%	1,34%	-2,60%
variazione prova 7	-24,61%	-8,39%	1,49%	-1,09%	-0,33%	0,44%	-1,21%	-2,53%	0,00%
tempo simulazione	1h8min	1h37min	2h35min	2h17min	3h5min	2h26min	4h21min	5h36min	4h52min
core simulazione	2	3	3	3	2	3	3	2	3
step rottura	45	44	42	43	43	43	43	42	43
step rottura corrispondente	275	332	430	416	420	453	444	444	447

Tabella 6 - risultati prove per standardizzazione mesh

Per ciascun parametro sono stati considerati due valori di confronto, al fine di analizzare la variazione percentuale sia tra una prova e quella precedente, sia tra una prova e la configurazione con la mesh più fitta, ovvero la prova 7. Poiché le mesh sono state progressivamente infittite — dalla prova iniziale con passo di 0,2 mm fino alla prova 7 — l'obiettivo è individuare la configurazione in cui le variazioni percentuali tra prove successive risultano minime, segnalando così il raggiungimento della **convergenza della mesh**.

1. Forza di picco

La forza di picco parte da 6,02 TON per la mesh 0,2 mm e si stabilizza attorno a 5,85–5,86 TON a partire dalla Prova 3.

- **Variazioni rispetto alla prova precedente:**

Si osserva che le variazioni si riducono progressivamente, risultando stabili ($\pm 0,2\%$) dalla **Prova 4** in poi.

Ciò indica che oltre tale soglia di raffinamento la forza di picco non subisce variazioni significative.

- **Variazioni rispetto alla Prova 7:**

Le prime due prove mostrano scostamenti del +2,8% e +1,28%, mentre dalla Prova 3 in poi gli scarti restano inferiori all'1%, confermando il raggiungimento della convergenza numerica.

Conclusione: la forza di picco converge rapidamente; la stabilità è raggiunta dalla **Prova 4**, dove le variazioni diventano inferiori al 0,3%.



2. Forza di strappo

La forza di strappo varia tra 0,10 e 0,14 TON, con oscillazioni più marcate rispetto alla forza di picco.

- **Variazioni rispetto alla prova precedente:**

La forza di strappo presenta oscillazioni fino al $\pm 30\%$ tra prove consecutive, **senza una tendenza monotona**, il che evidenzia una maggiore sensibilità al raffinamento locale della mesh nella zona di innesco del danneggiamento.

- **Variazioni rispetto alla Prova 7:**

Le differenze oscillano tra -27% e $+7\%$, stabilizzandosi parzialmente solo dalla **Prova 5** in poi, dove le deviazioni restano inferiori al 15%.

Conclusione: la forza di strappo mostra **scarsa stabilità** rispetto alla mesh, con convergenza solo parziale; le oscillazioni residue indicano che questa grandezza è influenzata in modo sensibile dalla discretizzazione fine del contorno di frattura.

3. Forza di separazione

La forza di separazione mostra una variabilità iniziale più evidente ma tende a stabilizzarsi nelle ultime prove.

- **Variazioni rispetto alla prova precedente:**

Dopo oscillazioni iniziali significative, le variazioni si mantengono entro $\pm 10\%$ dalla **Prova 4** in avanti, segnalando un progressivo avvicinamento alla stabilità.

- **Variazioni rispetto alla Prova 7:**

Gli scarti iniziali raggiungono $+14\%$ e -17% , ma dalla Prova 5 in poi le differenze scendono sotto il 5%, indicando una buona convergenza numerica.

Conclusione: la forza di separazione si stabilizza a partire dalla **Prova 5**, con differenze trascurabili rispetto al valore convergente.

4. Forza step 260:

Questo parametro cresce rapidamente nelle prime prove, segno che la mesh grossolana non cattura bene la propagazione di frattura.

- **Variazioni rispetto alla prova precedente:**

La variazione cala drasticamente dopo la Prova 3 e si stabilizza entro $\pm 3\%$ dalla **Prova 5** in poi.

- **Variazioni rispetto alla Prova 7:**

Le prime due prove sottostimano fortemente il valore (-82% e -45%), mentre dalla **Prova 4** in avanti le differenze restano inferiori al 5%.

Conclusione: la forza allo step 260 mostra una **chiara convergenza numerica a partire dalla Prova 4**, con variazioni minime tra le ultime simulazioni.



5. Forza step 150:

La forza allo step 150 aumenta progressivamente con il raffinamento di mesh, segno che la discretizzazione iniziale era troppo grossolana.

- **Variazioni rispetto alla prova precedente:**

Dopo una crescita iniziale marcata, la forza si **stabilizza dalla Prova 3**, con variazioni inferiori al 3%.

- **Variazioni rispetto alla Prova 7:**

Gli scostamenti scendono da -25% (mesh 0,2 mm) a meno del -0.33% dalla Prova 3 in poi, indicando ottima stabilità numerica.

Conclusione: la forza allo step 150 converge rapidamente, risultando stabile già dalla **Prova 3**, con variazioni trascurabili rispetto alla mesh più fitta.

6. Tempo di calcolo:

L'analisi dei tempi di simulazione mostra una chiara correlazione tra la **densità della mesh** e il **tempo computazionale totale**.

Il tempo di calcolo passa da 1h08min per la mesh più grossolana (0,2 mm) fino a 4h52min per la Prova 7, con un incremento complessivo superiore al +300%.

Tale andamento riflette la crescita esponenziale del numero di elementi finiti e del conseguente carico computazionale sul solver.

Osservando la tabella, si nota che:

- le prove da 0,2 a Prova 2 mostrano un incremento pressoché lineare del tempo (da 1h08min a 2h35min);
- a partire dalla Prova 3, il tempo cresce in modo più marcato, superando le 4 ore nelle simulazioni con mesh più fitte (Prove 5-7);
- il numero di core di simulazione utilizzati rimane costante (2-3), per cui l'aumento di durata è imputabile unicamente alla maggior complessità del modello.

L'analisi dimostra che un ulteriore raffinamento della mesh oltre la Prova 4 non porta a un miglioramento significativo dell'accuratezza, ma comporta un incremento notevole del tempo di calcolo.

Pertanto, la **Prova 4** rappresenta un **ottimo compromesso tra accuratezza numerica e efficienza computazionale**, garantendo risultati già convergenti con un tempo di simulazione ridotto di circa il 40-50% rispetto alla mesh più fitta.

Conclusione generale:

Il modello mostra una **buona convergenza numerica complessiva a partire dalla Prova 4**, con differenze inferiori al 5% per tutte le grandezze principali, eccetto la forza di strappo (che rimane più sensibile alla mesh).

Pertanto, la **Prova 4** rappresenta la **configurazione ottimale della mesh**, garantendo un equilibrio tra accuratezza e tempo di calcolo.

4.1 Raccolta dei risultati

Una volta individuata la mesh ottimale da adottare, si può affermare che eventuali confronti tra simulazioni forniranno risultati coerenti e confrontabili tra loro. In questo modo, l'influenza della mesh viene eliminata, consentendo di attribuire le variazioni dei risultati unicamente al parametro oggetto di studio.

Nella tabella seguente sono riportati i risultati riassuntivi delle simulazioni eseguite:

	VARIABILE OTTIMIZZATA	VALORE STANDARD [mm]	VALORE OTTIMIZZATO [mm]	TONNELLAGGIO	VARIAZIONE % RISPETTO REFERENCE	VARIAZIONE DI TONNELLAGGIO
REFERENCE				6,02		
PROVA 1	(9) (10)	8,96	9,2	5,91	-1,92%	-0,116
PROVA 2	(8)	8,9	9,2	5,92	-1,76%	-0,106
PROVA 3	(5)	0,3	0,1	6,01	-0,30%	-0,018
PROVA 4	(5)	0,3	0,5	6,03	0,17%	0,010
PROVA 5	(2)	0,54	0,24	6,31	4,80%	0,289
PROVA 6	(2)	0,54	0,84	5,70	-5,43%	-0,327
PROVA 7	(4) (1)	7,35	6,75	6,68	10,84%	0,653
PROVA 8	(4) (1)	7,35	7,95	5,27	-12,53%	-0,755
PROVA 9	(6)	15°	10°	6,02	-0,12%	-0,007
PROVA 10	(6)	15°	20°	5,98	-0,65%	-0,039
PROVA 11	(7)	0,5	0,3	5,99	-0,57%	-0,034
PROVA 12	(7)	0,5	0,7	5,93	-1,50%	-0,091

Tabella 7 - parametro che maggiormente influenza lo strappo pastiglia

Spiegazione delle prove eseguite in tabella 7, relative alle scelte delle variabili da ottimizzare in figura 75:

- PROVA 1: aumento diametro nicchia lato matrice
- PROVA 2: aumento diametro nicchia lato martello
- PROVA 3: diminuzione raggio nicchia lato matrice
- PROVA 4: aumento raggio nicchia lato matrice
- PROVA 5: diminuzione altezza profondità nicchia
- PROVA 6: aumento altezza profondità nicchia
- PROVA 7: diminuzione altezza profondità estrusione inversa lato matrice
- PROVA 8: aumento altezza profondità estrusione inversa lato matrice
- PROVA 9: diminuzione angolo estrusione inversa quarta stazione
- PROVA 10: aumento angolo estrusione inversa quarta stazione
- PROVA 11: diminuzione raggio estrusione inversa quarta stazione
- PROVA 12: aumento raggio estrusione inversa quarta stazione

Per identificare **il parametro che influisce maggiormente** sull'operazione di strappo della pastiglia, è stata condotta una serie di simulazioni. In queste simulazioni, sono stati variati i valori indicati in Figura 75, partendo dagli estremi del range e modificando i parametri ai valori massimi e minimi

per valutare immediatamente l'effetto di queste variazioni. È stato scelto di variare per ogni simulazione **un parametro alla volta** tra (1), (2), (4), (5), (6), (7), (8) e (9). L'obiettivo principale era osservare l'effetto di ciascuna variazione sul tonnellaggio, confrontandolo con il ciclo di riferimento già utilizzato in azienda, privo di ottimizzazione.

I risultati ottenuti sono riassunti nella Tabella 7, che evidenzia come la modifica del **parametro (4)** (relativo alla quarta stazione) e del **parametro (1)** (relativo alla quinta stazione, in particolare l'altezza della matrice di tenuta per la creazione della pastiglia da strappare nella sesta stazione) **influenzino in modo significativo il tonnellaggio**.

In particolare, è stato osservato che un incremento dell'altezza della matrice da 7,35 mm a 7,95 mm comporta una riduzione del tonnellaggio, con una variazione percentuale rispetto al ciclo di riferimento pari a -12,53%. Al contrario, una diminuzione dell'altezza da 7,35 mm a 6,75 mm porta a un aumento del tonnellaggio, con una variazione percentuale positiva del 10,84%.

E' di particolare interesse osservare come varia il **tonnellaggio**, poiché una sua diminuzione implica la necessità di applicare forze minori da parte dei macchinari in produzione. Inoltre, tale variazione potrebbe rappresentare un parametro cruciale che, oltre ad influire sul consumo energetico e sull'usura dei macchinari, potrebbe anche avere un impatto diretto sulla qualità del componente prodotto. Un tonnellaggio più basso potrebbe infatti compromettere la precisione e la conformità del componente alle specifiche desiderate, evidenziando così l'importanza di ottimizzare questo parametro per garantire sia l'efficienza operativa che la qualità del prodotto finale.

4.2 Definizione regole teoriche

4.4.1 Definizione altezza pastiglia

In realtà, la variazione del parametro (4) è strettamente correlata al parametro (1), quindi l'attenzione si concentrerà principalmente su quest'ultimo. Tuttavia, **modificare il parametro (1) non è altro che un'alterazione del parametro (3)**, che rappresenta l'altezza della pastiglia. Di conseguenza, il parametro che influisce maggiormente sull'operazione di strappo della pastiglia nella sesta stazione è in effetti il parametro (3).

Tuttavia, il parametro (3) da solo non fornisce un'informazione completa e ripetibile per la definizione di regole generali applicabili in modo universale. Per superare questa limitazione, è necessario focalizzarsi sul **rapporto L/D**, che consente di ottenere una grandezza adimensionale, utile per condurre analisi più strutturate e ripetibili. Questo approccio permetterà di stabilire regole più generali e applicabili a diverse situazioni operative.

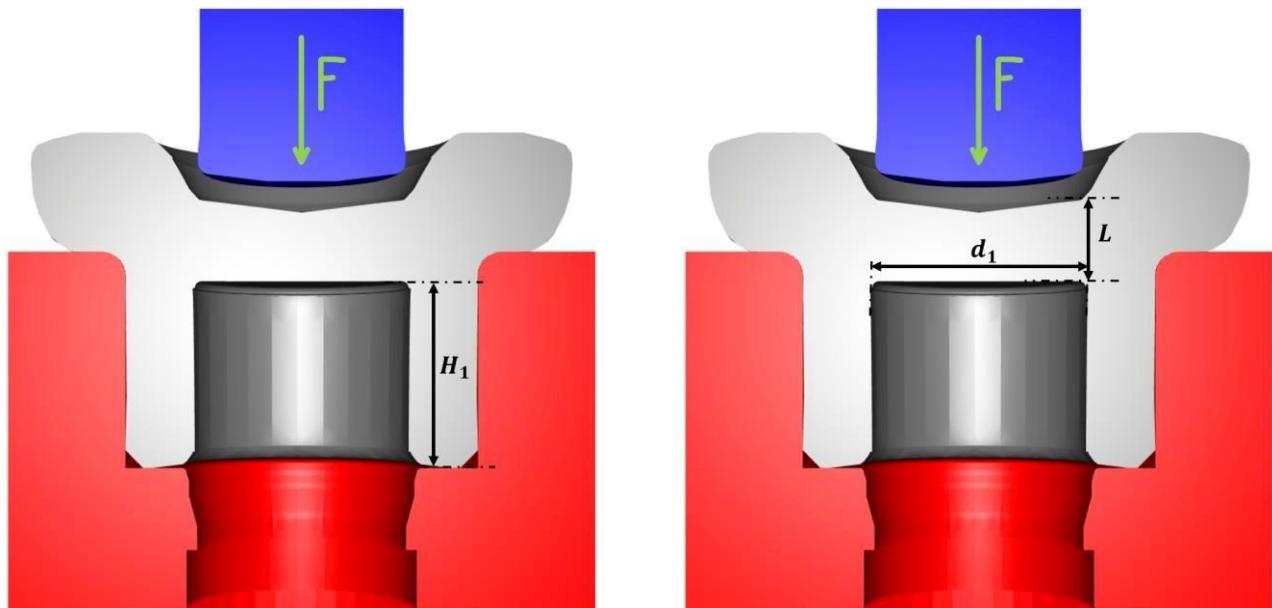


Figura 81 - individuazione del rapporto L/D, facendo riferimento alla figura 75 H1 equivale a (1), L a (3), d1 a (9) (Coldform)

In realtà, come si può osservare dalla figura 75, la variabile (9) risulta strettamente correlata alla variabile (8), poiché le due grandezze sono tra loro proporzionali: una variazione del valore della variabile (8) comporta inevitabilmente una variazione della variabile (9). Di conseguenza, il loro rapporto deve rimanere costante.

Per questo motivo, l'analisi sarà condotta considerando il rapporto **L/D**, definito come il rapporto tra le variabili (3)/(8).

Per analizzare in modo più preciso l'influenza delle variabili sull'operazione di strappo della pastiglia, ho avviato una serie di simulazioni variando i parametri (1) e di conseguenza (4), non più limitandomi agli estremi massimi e minimi del range indicato in Figura 75, ma utilizzando una **risoluzione di 0,15**. Questo approccio ha permesso di ottenere una valutazione più dettagliata e accurata dell'effetto di queste variabili.

Le simulazioni sono state condotte con altezze della matrice di tenuta pari a: 7,95 mm, 7,65 mm, 7,5 mm, 7,2 mm, 7,05 mm e 6,75 mm. Inoltre, oltre a variare l'altezza, ho modificato anche il diametro della matrice, passando da 8,9 mm a 9,05 mm e 9,2 mm, per ottenere una serie di rapporti L/D. Per ogni simulazione sono stati acquisiti i dati di tonnellaggio delle stazioni cinque e sei, direttamente estratti dal simulatore.

Per la **stazione sei** i valori di tonnellaggio sono stati presi **sull'upper die** mentre per la **stazione cinque**, inizialmente i valori di tonnellaggio sono stati rilevati **sull'upper die** con i risultati riportati nella seguente tabella:

	(8)=(D)	(9) [mm]	(3)=L [mm]	L/D	TON OP6	TON OP6 NORMALIZZATO	TON OP5	TON OP5 NORMALIZZATO	
(3)/(8)	(8)=	8,9	8,96	3,42	0,384	4,88	0,689	29,69	1,000
		8,9	8,96	3,57	0,401				
		8,9	8,96	3,72	0,418	5,27	0,744	29,43	0,991
		8,9	8,96	3,87	0,435				
		8,9	8,96	4,02	0,452	5,70	0,805	29,50	0,994
		8,9	8,96	4,17	0,469	5,93	0,838	28,49	0,960
		8,9	8,96	4,32	0,485				
		8,9	8,96	4,47	0,502	6,25	0,882	28,39	0,956
		8,9	8,96	4,62	0,519	6,44	0,909	28,10	0,947
		8,9	8,96	4,77	0,536				
		8,9	8,96	4,92	0,553	6,68	0,943	29,83	1,005
		8,9	8,96	5,07	0,570				
		8,9	8,96	5,22	0,587	7,08	1,000	27,72	0,934
(3)/(8)	(8)=	9,05	9,11	3,42	0,378	4,72	0,667	30,55	1,000
		9,05	9,11	3,57	0,394				
		9,05	9,11	3,72	0,411	5,17	0,730	29,07	0,951
		9,05	9,11	3,87	0,428				
		9,05	9,11	4,02	0,444	5,50	0,777	29,58	0,968
		9,05	9,11	4,17	0,461	5,67	0,801	29,42	0,963
		9,05	9,11	4,32	0,477				
		9,05	9,11	4,47	0,494	6,08	0,858	29,40	0,962
		9,05	9,11	4,62	0,510	6,30	0,890	28,92	0,947
		9,05	9,11	4,77	0,527				
		9,05	9,11	4,92	0,544	6,62	0,935	29,03	0,950
		9,05	9,11	5,07	0,560				
		9,05	9,11	5,22	0,577	7,08	1,000	28,38	0,929
(3)/(8)	(8)=	9,2	9,26	3,42	0,372	4,64	0,660	31,47	1,000
		9,2	9,26	3,57	0,388				
		9,2	9,26	3,72	0,404	5,04	0,716	29,88	0,949
		9,2	9,26	3,87	0,421				
		9,2	9,26	4,02	0,437	5,45	0,775	29,81	0,947
		9,2	9,26	4,17	0,453	5,56	0,791	30,22	0,960
		9,2	9,26	4,32	0,470				
		9,2	9,26	4,47	0,486	5,96	0,847	30,10	0,957
		9,2	9,26	4,62	0,502	6,20	0,881	29,69	0,943
		9,2	9,26	4,77	0,518				
		9,2	9,26	4,92	0,535	6,70	0,953	29,70	0,944
		9,2	9,26	5,07	0,551				
		9,2	9,26	5,22	0,567	7,03	1,000	28,83	0,916

Tabella 8 - valori delle simulazioni

È opportuno notare che la tabella 8 non è stata compilata per ogni singolo valore di **L/D**, poiché sono stati selezionati soltanto alcuni valori mirati, scelti in modo strategico per consentire comunque l'individuazione di una **tendenza significativa**.

I risultati mostrano per la stazione cinque una **diminuzione del tonnellaggio con l'aumento del rapporto L/D**, sebbene non così marcata come ci si aspettava. Questo è stato causato dall'influenza di altri parametri che distorcevano i dati. Possiamo infatti osservare l'andamento nel seguente grafico:

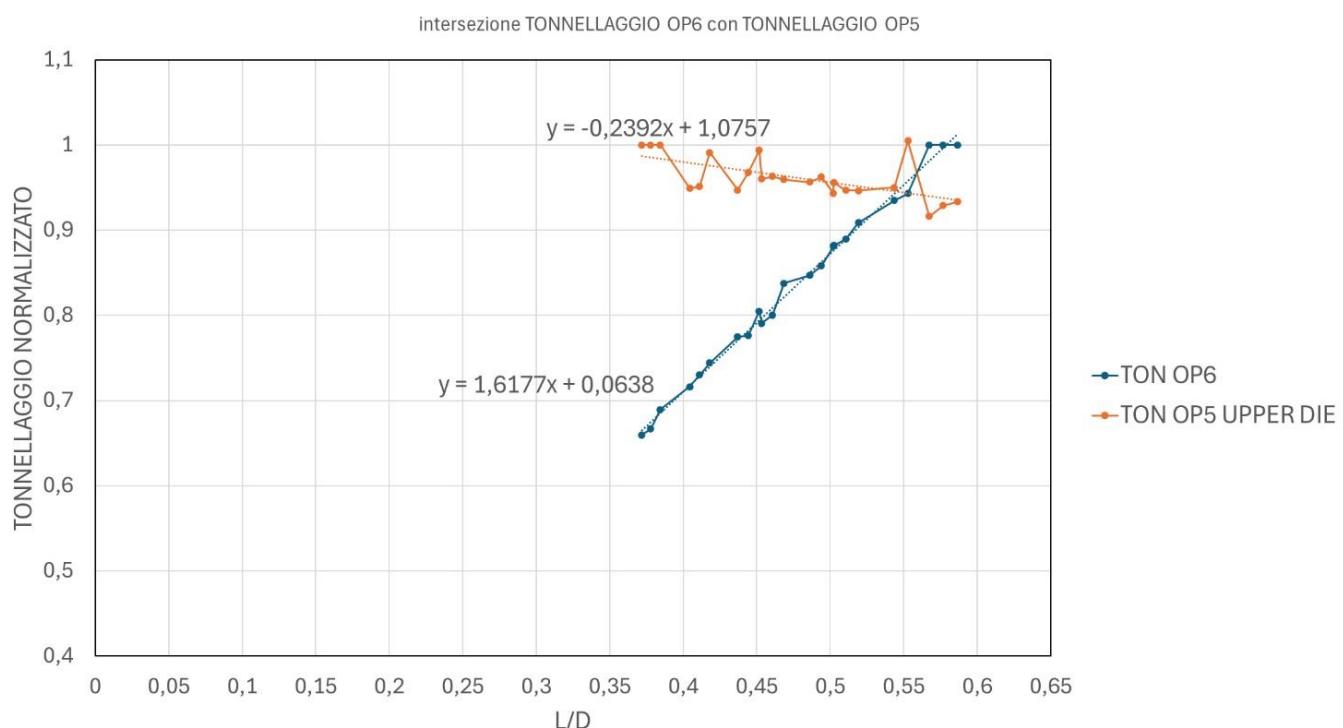


Figura 82 - intersezione tonnellaggio OP5 & OP6

Successivamente, per la **quinta stazione** sono stati considerati i valori di tonnellaggio relativi alla **lower die**, selezionando questa volta non tutti i dati disponibili (come avvenuto nella tabella 8), ma soltanto alcuni valori mirati, scelti in modo da poter ricostruire una nuova tendenza rappresentativa del comportamento reale, i risultati sono riassunti nella seguente tabella:

L/D	TON OP5 LOWER DIE	TON OP5 LOWER DIE NORMALIZZATO
0,372	10,93	1,000
0,411	10,45	0,956
0,437	10,31	0,944
0,461	9,90	0,905
0,502	9,35	0,856
0,544	9,00	0,824
0,567	8,64	0,790
0,587	8,96	0,820

Tabella 9 - valori simulazione

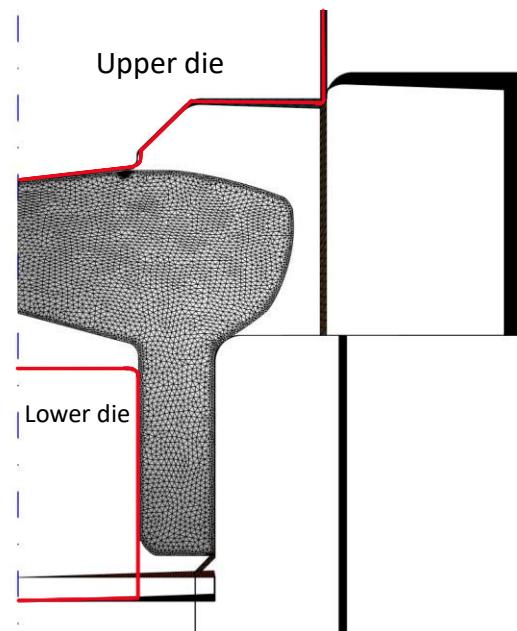


Figura 83 - differenza tra scelta upper die e lower die per individuazione tonnellaggio della quinta stazione

Successivamente, i valori di tonnellaggio relativi a entrambe le stazioni sono stati elaborati e rappresentati in funzione del rapporto L/D, come mostrato nel grafico seguente:

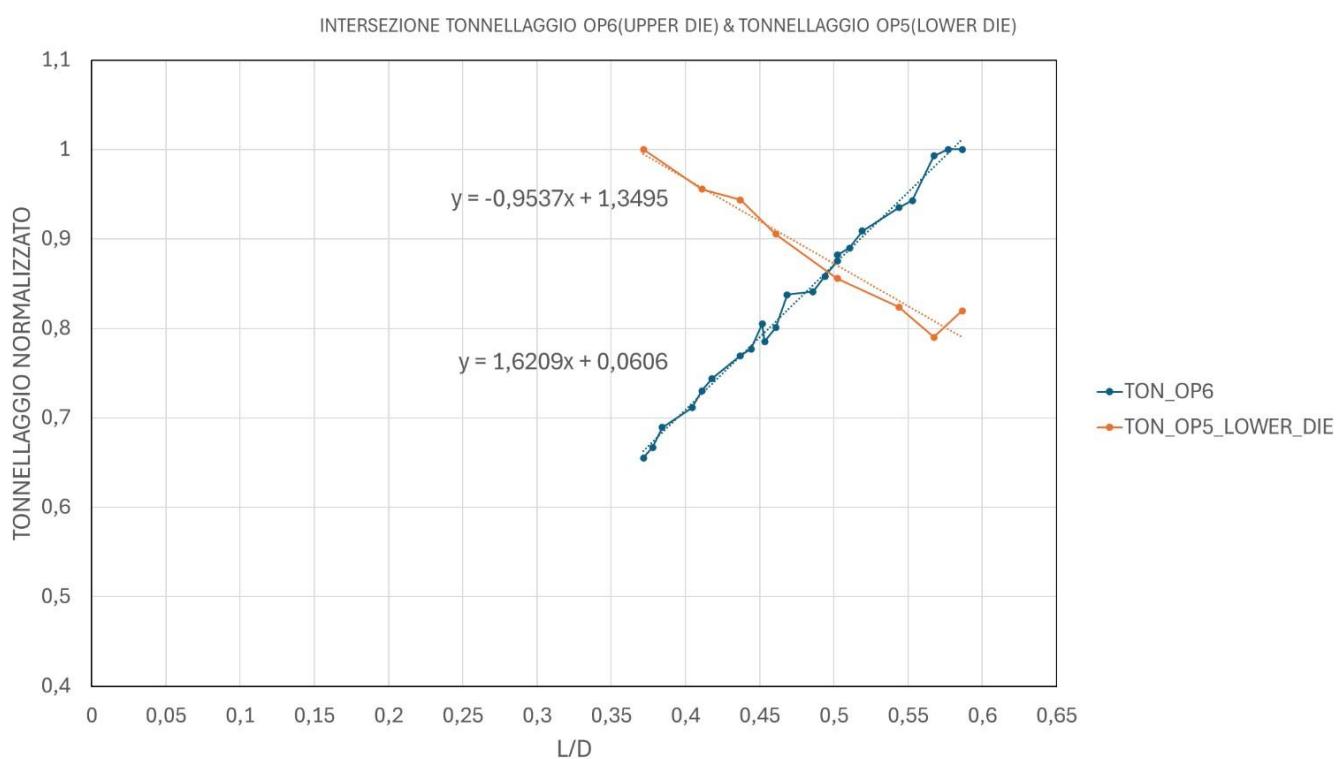


Figura 84 - intersezione tonnellaggio OP5 & OP6

Le due rette possono essere descritte tramite le rispettive equazioni, la cui intersezione si ottiene eguagliandole. Tale **punto di intersezione** rappresenta un parametro fondamentale: il **rapporto**

L/D ottimale il quale equivale quindi a 0.50062, che deriva dal compromesso tra la minimizzazione e l'ottimizzazione del tonnellaggio nelle stazioni cinque e sei.

In altre parole, il rapporto L/D ottimale consente di definire l'altezza della pastiglia a partire dal diametro del foro. Quest'ultimo, tuttavia, non è un parametro liberamente selezionabile, poiché è vincolato dal componente richiesto dal cliente.

In tal modo si definisce una regola di stampaggio utile a determinare l'altezza della pastiglia noto il diametro del foro.

4.4.2 Deformazioni

L'obiettivo è analizzare l'effetto dello strappo della pastiglia sul componente, in particolare sulla **variazione del diametro d_1** del cilindro cavo evidenziato in verde in figura. Lo studio si concentra sul verificare se, a seguito della forza applicata dal punzone, il foro subisca un **restringimento tale da ostacolare il passaggio della pastiglia**.

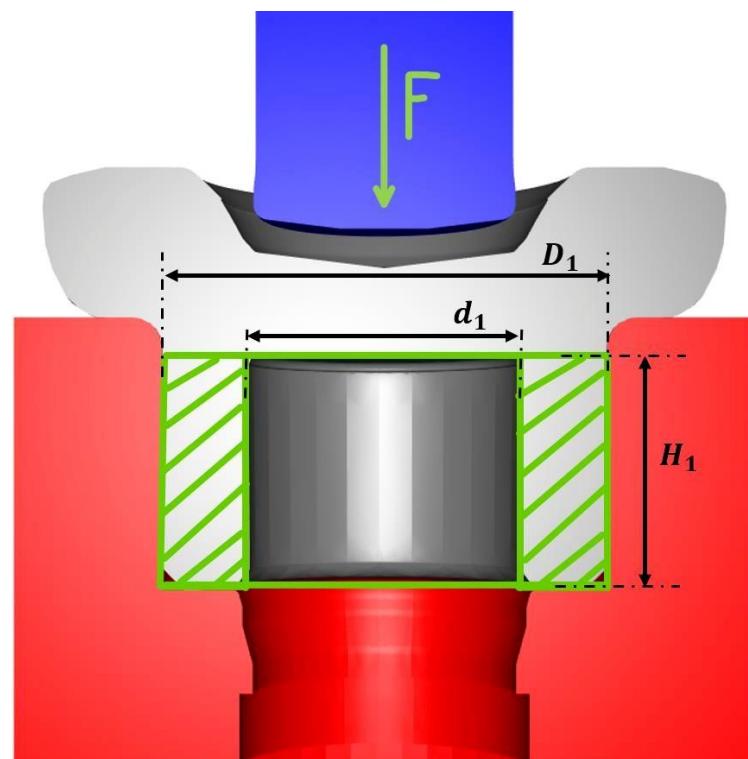


Figura 85 - compressione cilindro cavo prima dello strappo pastiglia (Coldform)

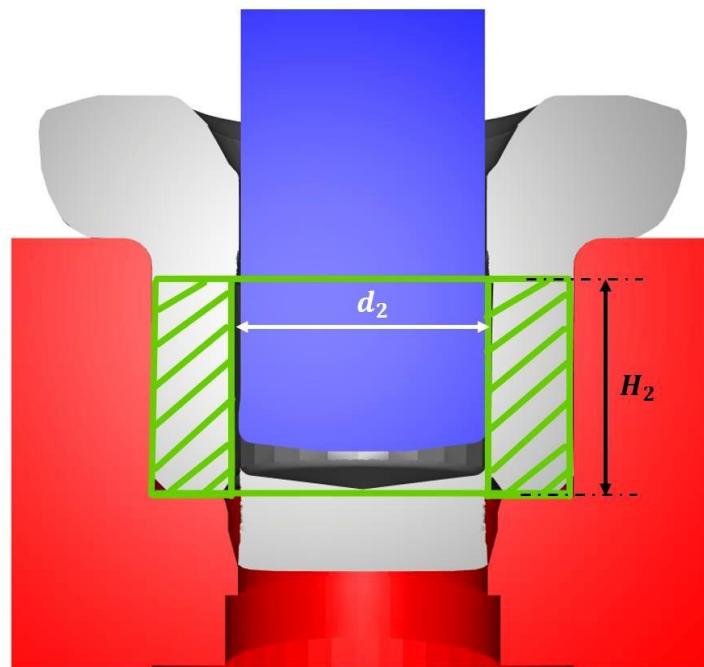
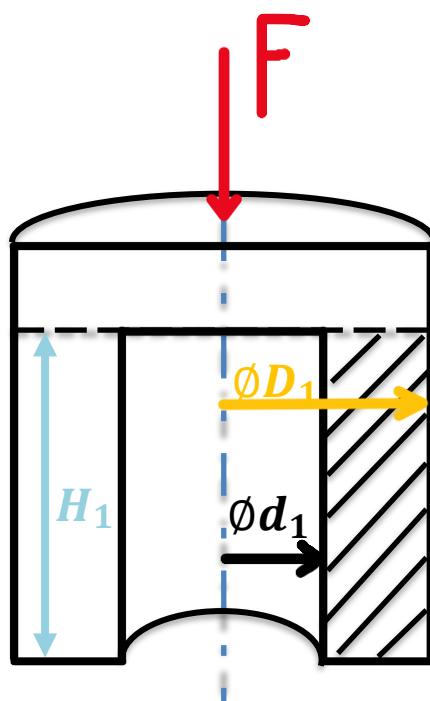


Figura 86 - compressione cilindro cavo dopo lo strappo pastiglia (Coldform)

Schematizzando il cilindro cavo oggetto di studio, si procede al calcolo del suo volume:

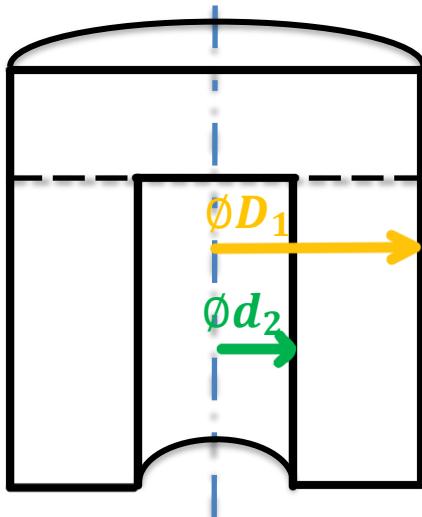
Prima dello strappo della pastiglia:



$$V_1 = (D_1^2 - d_1^2) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot H_1$$

La discesa del punzone provoca una compressione del cilindro cavo in esame; di conseguenza, l'altezza H_2 può essere interpretata come l'altezza iniziale H_1 (ossia prima dello strappo della pastiglia) **ridotta della compressione subita** durante l'operazione.

Dopo lo strappo della pastiglia:



$$V_1 = (D_1^2 - d_1^2) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (H_1 - \text{compressione})$$

Poiché lo stampaggio per deformazione a freddo si basa sul principio di conservazione del volume, è possibile eguagliare i due volumi e ottenere una relazione utile al calcolo del diametro d_2 .

$$d_2 = \sqrt{D_1^2 - \frac{(D_1^2 - d_1^2) \cdot H_1}{H_1 - \text{compressione}}} \quad (1.1)$$

Per il calcolo della compressione bisogna andare a calcolare i seguenti parametri:

$$\text{compressione} = \frac{F(N)}{\text{rigidezza assiale} \left(\frac{N}{mm} \right)}$$

$$\text{rigidezza assiale} = \frac{E \cdot A}{H_1}$$

$$A = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - d_1^2)$$

Dunque sostituendo i valori in tabella 10 nella relazione 1.1 otteniamo: $d_2 = 9.157 \text{ mm}$ con quindi una variazione % rispetto d_1 di -0.1674%.

Per ottenere un secondo valore di riferimento utile al calcolo della variazione del diametro, è stato calcolato d_2 considerando la **deformazione radiale** subita dal foro interno in conseguenza della **forza assiale** generata dalla discesa del punzone.

Lo stato di tensione è mono assiale, quindi tutte le componenti di tensione tranne σ_z sono nulle, di conseguenza:



$$\varepsilon_r = -\nu \cdot \varepsilon_z$$

Con:

$$\varepsilon_z = \frac{F(N)}{\text{rigidezza assiale} \left(\frac{N}{mm} \right)}$$

$$\text{rigidezza assiale} = \frac{E \cdot A}{H_1}$$

Quindi è possibile calcolare il diametro dopo lo strappo come:

$$d_2[\text{mm}] = d_1(1 + \varepsilon_r)$$

Sostituendo i valori in tabella 10 si ottiene $d_2 = 9.166 \text{ mm}$ con quindi una variazione % rispetto d_1 di -0.0664%.

Inoltre, i valori ottenuti saranno confrontati con il **limite di snervamento del materiale**, al fine di valutare se, dopo il passaggio del punzone, il foro **tornerà alla sua dimensione iniziale** (comportamento elastico) oppure se **rimarrà permanentemente deformato**, indicando l'ingresso in campo plastico. Si procede quindi al calcolo della **tensione equivalente** σ secondo la seguente relazione:

$$\sigma[\text{MPa}] = \text{EPSILON ASSIALE} \cdot E$$

$$\text{EPSILON} = \frac{\varepsilon_z}{H_1}$$

La quale verrà successivamente confrontata con la **tensione di snervamento del materiale** per determinare se il cilindro cavo abbia effettivamente raggiunto la condizione di snervamento.

Tutti questi passaggi verranno ripetuti **variando l'altezza della pastiglia** L (come mostrato in figura), in modo da ottenere l'**andamento della deformazione in funzione del rapporto** L/d_1 , analogamente a quanto già osservato in precedenza per gli altri parametri analizzati.

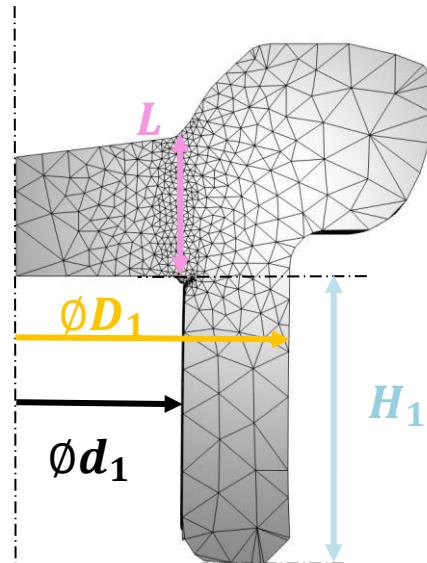


Figura 87 - indicazione variabili su componente (Coldform)

I risultati sono riassunti nelle seguenti tabelle:

PROVA 1	
MATERIALE	20MnB4
MODULO ELASTICITA	210000 N/mm ²
SIGMA_MATERIALE	600 Mpa
L: altezza pastiglia	3,42 mm
AREA	109,586 mm ²
DIAMETRO ESTERNO	14,955 mm
DIAMETRO INTERNO	9,173 mm
ALTEZZA CILINDRO	7,962 mm
MOMENTO D'INERZIA	4216,331 mm ⁴
RIGIDEZZA ASSIALE	2890414,129 N/mm
FORZA TONNELLATE	4,722 ton
FORZA	46324,233 N
COMPRESIONE	0,016 mm
EPSILON ASSIALE	0,002013
EPSILON TRASVERSALE	-0,0006643
SIGMA	422,719 Mpa
nu	0,3
EULERO - CARICO DI PUNTA	43880490,495 N

Tabella 10 - prova 1



PROVA 2		
MATERIALE	20MnB4	
MODULO ELASTICITA	210000	N/mm ²
SIGMA_MATERIALE	600	Mpa
L: altezza pastiglia	3,72	mm
AREA	107,061	mm ²
DIAMETRO ESTERNO	14,944	mm
DIAMETRO INTERNO	9,328	mm
ALTEZZA CILINDRO	7,964	mm
MOMENTO D'INERZIA	4153,228	mm ⁴
RIGIDEZZA ASSIALE	2822900,412	N/mm
FORZA TONNELLATE	5,036	ton
FORZA	49407,084	N
COMPRESIONE	0,018	mm
EPSILON ASSIALE	0,002198	
EPSILON TRASVERSALE	-0,0006593	
SIGMA	461,486	Mpa
nu	0,3	
EULERO - CARICO DI PUNTA	43196305,186	N

Tabella 11 - prova 2

PROVA 3		
MATERIALE	20MnB4	
MODULO ELASTICITA	210000	N/mm ²
SIGMA_MATERIALE	600	Mpa
L: altezza pastiglia	3,72	mm
AREA	109,511	mm ²
DIAMETRO ESTERNO	14,950	mm
DIAMETRO INTERNO	9,170	mm
ALTEZZA CILINDRO	7,961	mm
MOMENTO D'INERZIA	4210,693	mm ⁴
RIGIDEZZA ASSIALE	2888755,068	N/mm
FORZA TONNELLATE	5,171	ton
FORZA	50732,140	N
COMPRESIONE	0,018	mm
EPSILON ASSIALE	0,0022060	
EPSILON TRASVERSALE	-0,0006618	
SIGMA	463,262	Mpa
nu	0,3	
EULERO - CARICO DI PUNTA	43832056,666	N

Tabella 12 - prova 3



PROVA 4	
MATERIALE	20MnB4
MODULO ELASTICITA	210000 N/mm ²
SIGMA_MATERIALE	600 Mpa
L: altezza pastiglia	4,17 mm
AREA	109,315 mm ²
DIAMETRO ESTERNO	14,937 mm
DIAMETRO INTERNO	9,162 mm
ALTEZZA CILINDRO	7,514 mm
MOMENTO D'INERZIA	4195,803 mm ⁴
RIGIDEZZA ASSIALE	3054925,809 N/mm
FORZA TONNELLATE	5,670 ton
FORZA	55618,227 N
COMPRESIONE	0,018 mm
EPSILON ASSIALE	0,002423
EPSILON TRASVERSALE	-0,0007268
SIGMA	508,789 Mpa
nu	0,3
EULERO - CARICO DI PUNTA	49021734,850 N

Tabella 13 - prova 4

PROVA 5	
MATERIALE	20MnB4
MODULO ELASTICITA	210000 N/mm ²
SIGMA_MATERIALE	600 Mpa
L: altezza pastiglia	4,62 mm
AREA	109,581 mm ²
DIAMETRO ESTERNO	14,960 mm
DIAMETRO INTERNO	9,180 mm
ALTEZZA CILINDRO	7,063 mm
MOMENTO D'INERZIA	4219,977 mm ⁴
RIGIDEZZA ASSIALE	3257984,059 N/mm
FORZA TONNELLATE	6,301 ton
FORZA	61808,886 N
COMPRESIONE	0,019 mm
EPSILON ASSIALE	0,0026859
EPSILON TRASVERSALE	-0,0008058
SIGMA	564,046 Mpa
nu	0,3
EULERO - CARICO DI PUNTA	55803974,673 N

Tabella 14 - prova 5



PROVA 6		
MATERIALE	20MnB4	
MODULO ELASTICITA	210000	N/mm ²
SIGMA_MATERIALE	600	Mpa
L: altezza pastiglia	4,92	mm
AREA	109,626	mm ²
DIAMETRO ESTERNO	14,944	mm
DIAMETRO INTERNO	9,151	mm
ALTEZZA CILINDRO	6,764	mm
MOMENTO D'INERZIA	4207,777	mm ⁴
RIGIDEZZA ASSIALE	3403336,341	N/mm
FORZA TONNELLATE	6,621	ton
FORZA	64954,600	N
COMPRESIONE	0,019	mm
EPSILON ASSIALE	0,002821	
EPSILON TRASVERSALE	-0,0008464	
SIGMA	592,514	Mpa
nu	0,3	
EULERO - CARICO DI PUNTA	60669408,516	N

Tabella 15 - prova 6

PROVA 7		
MATERIALE	20MnB4	
MODULO ELASTICITA	210000	N/mm ²
SIGMA_MATERIALE	600	Mpa
L: altezza pastiglia	5,22	mm
AREA	107,571	mm ²
DIAMETRO ESTERNO	14,948	mm
DIAMETRO INTERNO	9,299	mm
ALTEZZA CILINDRO	6,745	mm
MOMENTO D'INERZIA	4166,999	mm ⁴
RIGIDEZZA ASSIALE	3349347,411	N/mm
FORZA TONNELLATE	7,031	ton
FORZA	68975,209	N
COMPRESIONE	0,021	mm
EPSILON ASSIALE	0,003053	
EPSILON TRASVERSALE	-0,0009160	
SIGMA	641,207	Mpa
nu	0,3	
EULERO - CARICO DI PUNTA	60434552,560	N

Tabella 16 - prova 7

PROVA 8	
MATERIALE	20MnB4
MODULO ELASTICITA	210000 N/mm ²
SIGMA_MATERIALE	600 Mpa
L: altezza pastiglia	5,22 mm
AREA	109,530 mm ²
DIAMETRO ESTERNO	14,942 mm
DIAMETRO INTERNO	9,155 mm
ALTEZZA CILINDRO	6,763 mm
MOMENTO D'INERZIA	4204,173 mm ⁴
RIGIDEZZA ASSIALE	3400850,284 N/mm
FORZA TONNELLATE	7,082 ton
FORZA	69477,873 N
COMPRESIONE	0,020 mm
EPSILON ASSIALE	0,003021
EPSILON TRASVERSALE	-0,0009062
SIGMA	634,327 Mpa
nu	0,3
EULERO - CARICO DI PUNTA	60634474,297 N

Tabella 17 - prova 8

I valori ottenuti dai due approcci di calcolo del diametro, volti a quantificare il restringimento del foro, sono riportati di seguito.

	DIAMETRO INTERNO CALCOLATO CON EPSILON TRASVERSALE [mm]	(d ₂ -d ₁)/d ₁ %	DIAMETRO INTERNO CALCOLATO CON CONSERVAZIONE VOLUME [mm]	(d ₂ -d ₁)/d ₁ %
PROVA 1	9,166	-0,0664%	9,157	-0,1674%
PROVA 2	9,322	-0,0659%	9,312	-0,1727%
PROVA 3	9,164	-0,0662%	9,153	-0,1835%
PROVA 4	9,155	-0,0727%	9,143	-0,2016%
PROVA 5	9,173	-0,0806%	9,160	-0,2232%
PROVA 6	9,143	-0,0846%	9,130	-0,2361%
PROVA 7	9,290	-0,0916%	9,276	-0,2429%
PROVA 8	9,146	-0,0906%	9,131	-0,2524%

 Tabella 18 - valori di d₂ per i due ragionamenti con le rispettive restrizioni di foro

È ora possibile osservare l'**andamento della deformazione radiale in funzione del rapporto L/d_1** e confrontarlo con il **limite di snervamento del materiale**, come mostrato nel grafico seguente. È importante notare che, rispetto a quanto mostrato in figura 83, il rapporto L/D considerato è passato da (3)/(8) a (3)/(9).

Tale variazione è giustificata dal fatto che, in questa fase, si analizza direttamente l'influenza della variabile (3) sulla variabile (9); inoltre, come già evidenziato in precedenza, la variabile (9) risulta strettamente correlata alla (8), rendendo il nuovo rapporto altrettanto rappresentativo.

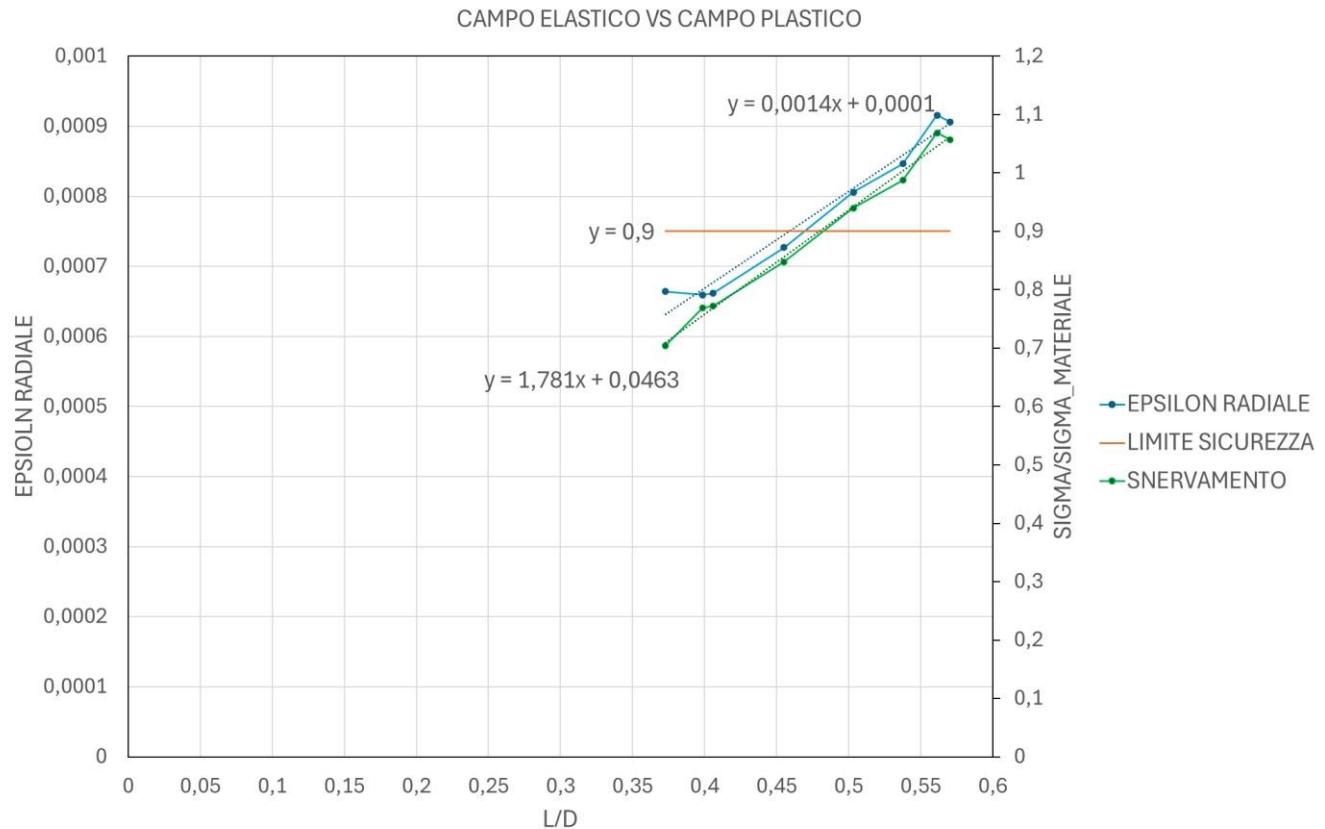


Figura 88 - grafico confronto campo elastico e campo plastico, valori di deformazione radiale espressi in valore assoluto

Imponendo un **limite di snervamento pari a 0,9**, così da mantenere un **margine di sicurezza** rispetto al valore unitario, è possibile individuare i punti oltre i quali il materiale entra in **campo plastico**.

Dalle tendenze lineari ottenute si può quindi determinare con precisione il **rapporto L/D** corrispondente alla soglia di snervamento ovvero 0,479337, nonché la **deformazione radiale critica** oltre la quale il materiale non è più in grado di tornare al suo stato iniziale, ovvero 0,000778.

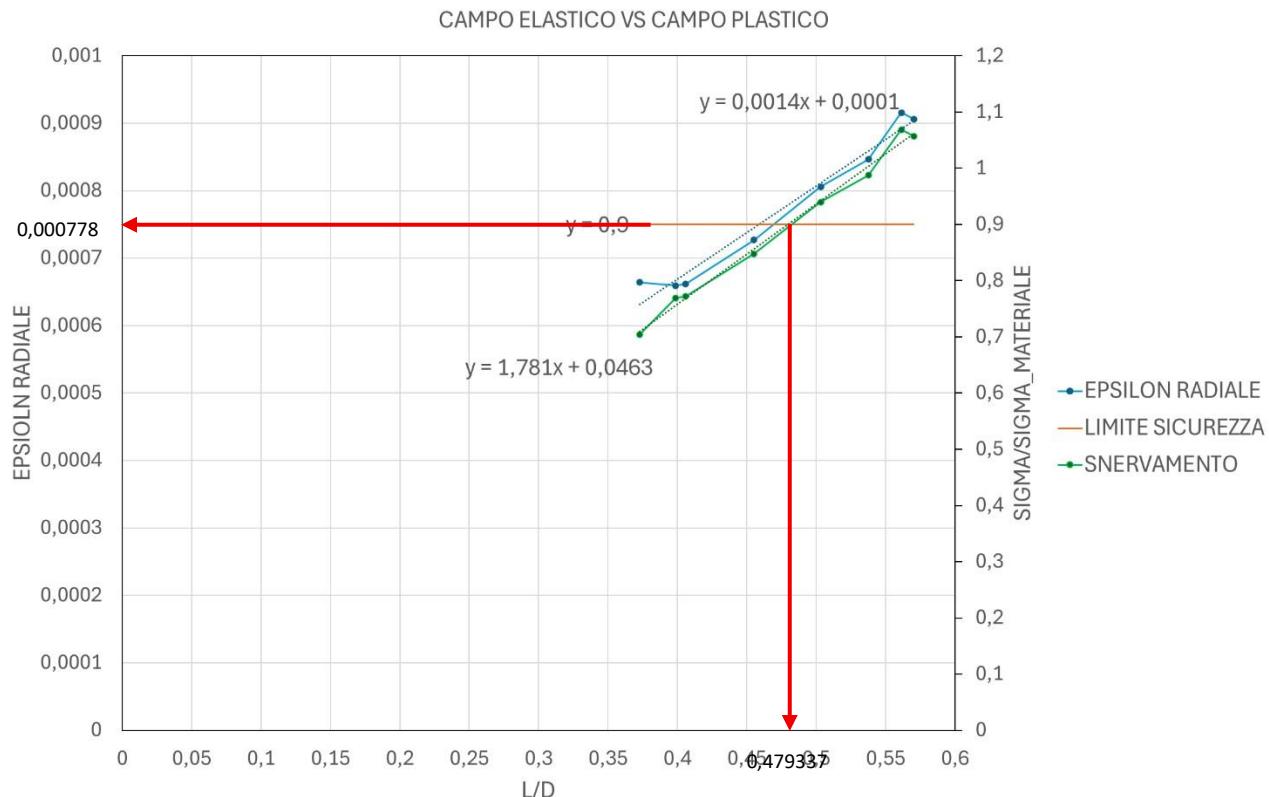


Figura 89 - individuazione limite sicurezza

Una volta accertato di essere in **campo plastico**, è necessario determinare **di quanto il diametro del foro si ridurrà permanentemente**, così da poter **compensare correttamente il diametro a livello progettuale** ed evitare che, una volta stampato il pezzo, il foro finale non corrisponda alle caratteristiche previste dal progetto. Di seguito per la prova 6 è riportato come effettuare questo calcolo:

La **prova 6** presenta un rapporto $L/d_1 = 0.5376$ e una **deformazione radiale**, in valore assoluto, pari a 0.0008464, dunque possiamo affermare che ci troviamo in campo plastico.

Sottraendo da tale valore la **deformazione radiale corrispondente al limite di sicurezza**, si ottiene la **deformazione radiale plastica**, ossia la parte della deformazione che porta il materiale in campo plastico:

$$\varepsilon_{plastica} = 0.0008464 - 0.000778 = 0.000068$$

Si procede quindi al **calcolo del diametro plastico**, ottenuto applicando al diametro iniziale la variazione dovuta alla **deformazione radiale plastica**, come riportato nella relazione seguente:

$$d_{2plastico} = d_1(1 - \varepsilon_{plastica}) = 9.15049 \text{ mm}$$

Infine, è possibile calcolare la **compensazione** da applicare al diametro progettuale sottraendo al valore del diametro iniziale il diametro plastico precedentemente calcolato. In questo modo si ottiene la variazione di diametro (Δd) da considerare in fase di progettazione, così da compensare l'effetto della plasticizzazione e ottenere a stampo il diametro finale desiderato:

$$\text{compensazione} = d_1 - d_{2\text{plastico}} = 9.15112 - 9.15049 = 0.000622 \text{ mm}$$

Dunque, fissato il limite di sicurezza del rapporto $L/d_1 = 0.479337$, è possibile generare una serie di rapporti L/d_1 superiori a tale valore, ottenendo una tendenza — come mostrato in Figura 89 — che evidenzia come **all'aumentare di L cresca anche la compensazione plastica da applicare al diametro iniziale**. Ciò risulta coerente con il fatto che, a maggiori altezze della pastiglia, corrisponde una forza impressa dal punzone più elevata e, di conseguenza, una maggiore deformazione plastica del diametro interno.

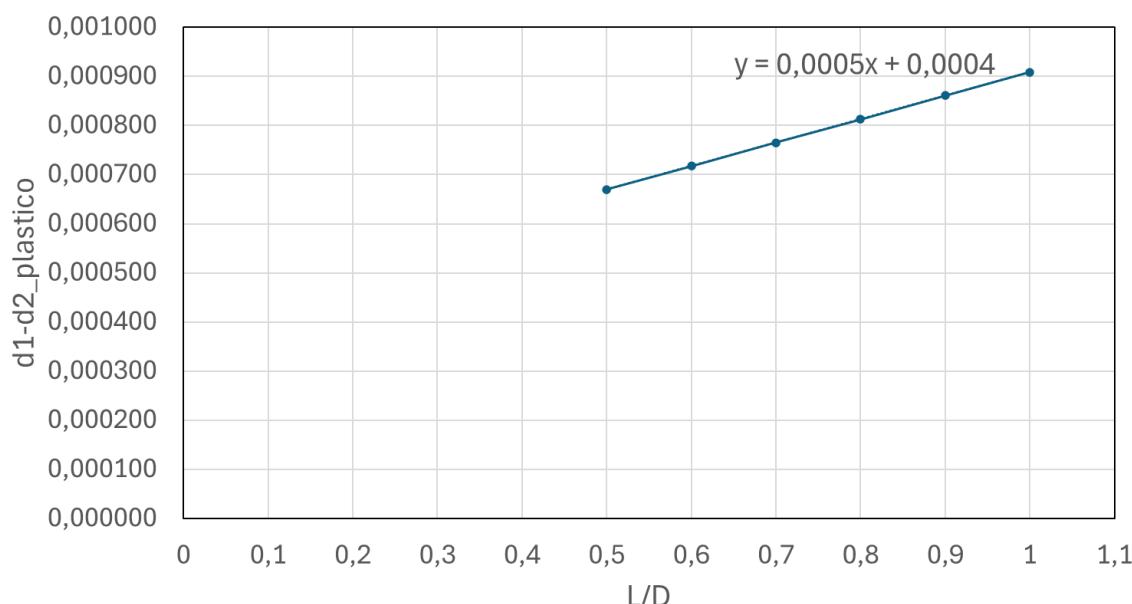


Figura 90 - compensazione

Tutti i calcoli effettuati si basano su **un'ipotesi fondamentale**: il materiale si trova nella parte orizzontale della curva sforzo-deformazione a compressione.

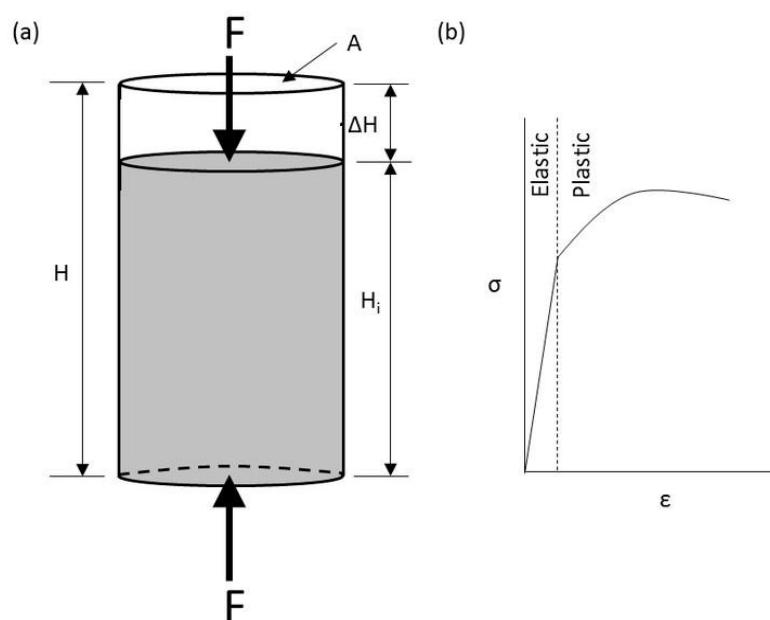


Figura 91 - grafico sforzo-deformazione a compressione



In tale regione, corrispondente al campo plastico, la curva presenta un andamento pressoché **costante**, per cui si può assumere che lo sforzo equivalente rimanga invariato all'aumentare della deformazione plastica.

Poiché lo stato di deformazione locale risulta prevalentemente monodimensionale e governato dalla compressione assiale (in assenza di gradienti significativi o fenomeni di flessione), è possibile stimare in modo attendibile la deformazione plastica assiale indotta dall'azione del punzone. Pertanto, risulta giustificato — come prima approssimazione — l'utilizzo dell'ipotesi di incompressibilità plastica, che consente di ricavare la deformazione plastica circonferenziale e, di conseguenza, la riduzione diametrale residua del foro.



5. Conclusioni

Questa esperienza di tesi in azienda mi ha permesso di comprendere concretamente il funzionamento del mondo del lavoro, evidenziando come le conoscenze acquisite durante il mio percorso di studi in ingegneria meccanica trovino effettiva applicazione in un contesto industriale. In particolare, questi mesi mi hanno consentito di approfondire le mie competenze nell'ambito della **deformazione a freddo**, con un focus specifico sull'operazione di **strappo pastiglia**, migliorando la mia comprensione dei fenomeni di **frattura** che ne sono alla base.

Per concludere, questo progetto di tesi mi ha permesso di comprendere in modo diretto e operativo l'intero processo aziendale, partendo dalla gestione della materia prima fino ad arrivare allo stampaggio nelle presse. Ho imparato a utilizzare un simulatore FEM come **Coldform**, validandone i risultati rispetto a quanto osservato in produzione, così da impiegarlo per l'**ottimizzazione del ciclo di stampaggio** oggetto di studio.

Nel corso di questo lavoro ho potuto apprezzare quanto sia fondamentale la **corretta scelta della mesh** e dei **parametri di frattura**, elementi chiave per ottenere simulazioni attendibili e rappresentative della realtà produttiva.

Inoltre, ho potuto osservare come, a partire da una **richiesta del cliente**, si sviluppi l'intero **studio di fattibilità** per la realizzazione di un componente destinato al settore automotive, comprendendo così il legame tra progettazione, simulazione e produzione.

Infine, attraverso lo studio approfondito del fenomeno di **frattura** e dei parametri che lo governano nell'operazione di **strappo pastiglia**, sono giunto a definire un insieme di **regole di stampaggio** per componenti forati, che potranno rappresentare un utile riferimento operativo anche per l'azienda in futuro.

Il progetto di tesi si conclude quindi con la **realizzazione di una soluzione tecnica proprietaria, consegnata all'azienda**, la quale consentirà di effettuare analisi mirate sull'operazione di strappo pastiglia. In particolare, ogni qualvolta si presenti una richiesta da parte di un cliente per la realizzazione di un componente forato, l'azienda potrà utilizzare un **file Excel dedicato** contenente una serie di grafici e relazioni utili per ottenere rapidamente alcune caratteristiche fondamentali, tra cui:

- l'altezza della pastiglia che garantisce il miglior compromesso di tonnellaggio tra la quinta e la sesta stazione;
- il valore di restrizione del diametro interno dopo l'operazione di strappo;
- la verifica dello stato tensionale del diametro interno (campo elastico o plastico);
- nel caso di plasticizzazione, il valore del diametro plastico e la conseguente compensazione da applicare in fase di progettazione.

Inoltre, prima di questo progetto di tesi, l'azienda impiegava **valori standard** per le simulazioni eseguite con il software Coldform. Ora dispone invece di parametri più accurati, come:

- il **coefficiente di Latham–Cockcroft** che meglio approssima il comportamento reale osservato in produzione;



- la **configurazione ottimale della mesh** nella zona di strappo, in grado di bilanciare correttamente onere computazionale e qualità dei risultati.

I risultati ottenuti rappresentano quindi **valori di riferimento** e linee guida di partenza: sebbene alcuni grafici siano stati normalizzati per ottenere regole di carattere generale, essi restano comunque legati alle specifiche geometriche del componente analizzato nel presente studio. Nel caso di nuovi progetti, l'ufficio tecnico potrà eseguire **simulazioni mirate** variando i parametri elencati nel file Excel e inserendo i dati specifici del componente (diametri, altezze, ecc.). Il file aggiornerà automaticamente le **regressioni e i grafici** corrispondenti, fornendo uno studio adattato al nuovo caso.

In questo modo, l'azienda potrà contare su uno **strumento operativo** che le consente di:

- disporre di valori iniziali di confronto basati sullo studio svolto in questa tesi;
- ottenere previsioni specifiche per nuovi componenti semplicemente inserendo le caratteristiche geometriche;



Riferimenti

- AGRATI-CVB, n. d. (s.d.).
- ASM International. (1996). *ASM Handbook, Volume 14: Forming and Forging*. ASM International.
- Coldform. (s.d.).
- CVB, Tabbia Stefano. (s.d.). foto dell'autore presa da azienda.
- Earth, G. (s.d.). Tratto da Immagine satellitare.
- LLC, N. M. (2016). *Introduzione ai principi dello stampaggio a freddo*. microscopio, C. (s.d.).
- Mori, K. (.-i. (2020). Review of Shearing Processes of High Strength Steel Sheets. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*.
- Stefano, T. (s.d.).
- Suzuki, Y., Shiratori, T., Yang, M., & Murakawa, M. (2019). Elucidation of Shearing Mechanism of Finish-type FB and Extrusion-type FB for Thin Foil of JIS SUS304 by Numerical and EBSD Analyses. *Materials*.
- Torino, P. d. (s.d.).
- Valberg, H. S. (2002). *Applied Metal Forming: Including FEM Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press.