

# POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Corso di Laurea in  
Ingegneria Meccanica



Simulazione numerica di un processo industriale di deformazione a freddo

Relatore: Prof. Ing. Barbara RIVOLTA

Tutor aziendale: Ing. Francesco CORBETTA

Tesi di Laurea di:

Davide FIGINI Matr. 818931

Anno Accademico 2014 - 2015

# Indice

<b>INDICE .....</b>	<b>2</b>
<b>ELENCO DELLE FIGURE.....</b>	<b>6</b>
<b>ELENCO DELLE TABELLE .....</b>	<b>8</b>
<b>SOMMARIO .....</b>	<b>9</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>10</b>
<b>1 INTRODUZIONE .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Introduzione all'azienda .....</b>	<b>11</b>
<b>1.2 Introduzione a Simufact 12.0.3 .....</b>	<b>13</b>
1.2.1 Ottimizzazione di processo come strumento per ottenere le migliori prestazioni e la massima qualità	13
1.2.2 La simulazione di processo: un nuovo approccio progettuale	13
1.2.3 Aspetti che rendono Simufact 12.0.3 lo strumento adatto alla simulazione del processo di stampaggio a freddo dell'acciaio	14
1.2.4 La simulazione dei processi di stampaggio a freddo	14
1.2.5 Ottimizzazione del processo di stampaggio a freddo	16
1.2.6 Il software	16
1.2.7 Pre elaborazione	17
1.2.8 FE	18
1.2.9 FV	18
1.2.10 Mesh	19
1.2.11 Remeshing	19
1.2.12 Post elaborazione	19
<b>1.3 Introduzione e presentazione del progetto.....</b>	<b>21</b>
<b>2 TEORIA DI DEFORMAZIONE A FREDDO DEI METALLI .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1 Deformazione.....</b>	<b>23</b>
2.1.1 Deformazione elastica	23
2.1.2 Deformazione plastica	24
2.1.3 Deformabilità	25

---

2.1.4 Incrudimento del filo	25
<b>2.2 Trattamenti superficiali</b> .....	<b>26</b>
2.2.1 Decapaggio	26
2.2.2 Fosfatazione	27
2.2.3 Lubrificazione del filo	28
<b>2.3 Trafilatura</b> .....	<b>31</b>
2.3.1 Attrito nella trafilatura	32
<b>2.4 Taglio</b> .....	<b>34</b>
2.4.1 Taglio a coltello aperto	34
2.4.2 Taglio a coltello chiuso	35
<b>2.5 Estrusione</b> .....	<b>36</b>
2.5.1 Tipi di estrusione	36
2.5.2 Estrusione diretta	36
2.5.3 Estrusione inversa	37
<b>2.6 Ricalcatura</b> .....	<b>38</b>
<b>2.7 Piegatura</b> .....	<b>39</b>
2.7.1 Piegatura a "V"	39
2.7.2 Piegatura a "U"	39
2.7.3 Sollecitazione del materiale	39
2.7.4 Ritorno elastico	40
<b>3 MODELLAZIONE IN SIMUFACT E RELATIVE ANALISI</b> .....	<b>41</b>
<b>3.1 Inserimento dei dati nel modello</b> .....	<b>41</b>
3.1.1 Inserimento del pezzo	41
3.1.2 Inserimento dell'attrito	42
3.1.3 Inserimento della temperatura di lavorazione	42
3.1.4 Inserimento della velocità di deformazione con la pressa	44
3.1.5 Inserimento delle matrici	44
3.1.6 Inserimento del materiale	45
3.1.7 Inserimento parametri di deformazione e di simulazione	46
<b>3.2 Analisi del processo di trafilatura</b> .....	<b>48</b>
3.2.1 Variazione delle caratteristiche meccaniche in rapporto alla riduzione di sezione	48
<b>3.3 Approccio teorico con Simufact 12.0.3</b> .....	<b>48</b>

---

3.3.1 Analisi trafilatura con diversi diametri di partenza	50
3.3.2 Confronto curve diverso diametro e diverso materiale	51
3.3.3 Considerazioni riguardanti l'approccio teorico	52
<b>3.4 Analisi trafilatura livello 0.....</b>	<b>53</b>
<b>3.5 Creazione dei provini per la prova di trazione.....</b>	<b>57</b>
<b>3.6 Prove di trazione .....</b>	<b>61</b>
3.6.1 Analisi dei dati delle prove di trazione	62
<b>3.7 Analisi trafilatura livello 1.....</b>	<b>64</b>
<b>3.8 Analisi trafilatura livello 2.....</b>	<b>65</b>
<b>3.9 Analisi del processo di taglio .....</b>	<b>70</b>
3.9.1 Metallografia taglio	73
<b>3.10 Analisi estrusione e ricalcatura .....</b>	<b>74</b>
3.10.1 Metallografia estrusione	78
<b>3.11 Analisi piega.....</b>	<b>79</b>
3.11.1 Metallografia piega	79
<b>3.12 Analisi metallografica materiale grezzo .....</b>	<b>81</b>
<b>4 VALUTAZIONE ECONOMICA .....</b>	<b>82</b>
<b>4.1 Sviluppo progettuale senza l'aiuto di Simufact .....</b>	<b>82</b>
<b>4.2 Sviluppo progettuale con l'aiuto di Simufact.....</b>	<b>84</b>
<b>5 CONCLUSIONI .....</b>	<b>87</b>
<b>6 TEORIA SOLUTORE MARC .....</b>	<b>89</b>
<b>6.1. Analisi di base.....</b>	<b>89</b>
<b>6.2 Solutore FEM .....</b>	<b>89</b>
<b>6.3 Cos'è il Marc? Una soluzione avanzata di simulazione non lineare.....</b>	<b>94</b>
6.3.1 Soluzione per l'analisi non-lineare e multi fisica	94
6.3.2 Analisi di contatto	94

6.3.3 Materiali non lineari	95
6.3.4 Rottura	95
6.3.5 Remeshing automatica	95
<b>7 BIBLIOGRAFIA</b>	<b>96</b>
<b>7.1 Bibliografia deformazione a freddo</b>	<b>96</b>
<b>7.2 Bibliografia trafilatura</b>	<b>96</b>
<b>7.3 Bibliografia materiale</b>	<b>96</b>
<b>7.4 Bibliografia FEM</b>	<b>96</b>
<b>7.5 Bibliografia analisi in laboratorio</b>	<b>97</b>

## Elenco delle Figure

Figura 1 - F.Ili Mauri s.r.l. - Sede di Garlate (LC) - Produzione .....	11
Figura 2 - Diagramma di flusso della fasi di un processo generico di deformazione a freddo.....	22
Figura 3 - Prova di trazione, allungamento della barra sotto stress. ....	23
Figura 4 - Processo ideale di scorrimento dei piani atomici. ....	24
Figura 5 - Contenitore di olio posizionato prima dell'operazione di trafilatura. ....	30
Figura 6 - Trafila. ....	32
Figura 7 - Visuale ravvicinata della trafila.....	33
Figura 8 - Estrusione diretta. ....	36
Figura 9 - Principio di estrusione diretta. ....	36
Figura 10 - Estrusione inversa.....	37
Figura 11 - Principio di estrusione inversa. ....	37
Figura 12 - Particolari realizzati mediante ricalcatura. ....	38
Figura 13 - Inserimento del pezzo nel modello di Simufact. ....	41
Figura 14 - Inserimento nel modello di Simufact del coefficiente d'attrito. ....	42
Figura 15 - Inserimento nel modello di Simufact della temperatura delle matrici/utensili.....	43
Figura 16 - Inserimento nel modello di Simufact della temperatura del pezzo. ....	43
Figura 17 - Inserimento nel modello di Simufact della velocità di deformazione in [mm/s]. ....	44
Figura 18 - Libreria dei materiali di Simufact. ....	45
Figura 19 - Albero delle caratteristiche del modello di trafilatura.....	46
Figura 20 - Modello completo, schermata di visualizzazione di Simufact. ....	47
Figura 21 - Approccio teorico sperimentale. Distribuzione del carico ad ogni riduzione di sezione fino ad arrivare alla rottura.....	49
Figura 22 - Rottura del pezzo alla riduzione di $\varnothing 4.20$ . ....	50
Figura 23 - Distribuzione carico di snervamento sulle percentuali di riduzione - $\varnothing 6$ vs $\varnothing 7$ . ....	51
Figura 24 - Confronto risultati diversi diametri con diversi materiali. ....	52
Figura 25 - Tavola trafila $\varnothing 5.58$ . ....	54
Figura 26 - Tavola trafila $\varnothing 4.80$ . ....	55
Figura 27 - Tavola trafila $\varnothing 4.48$ . ....	56
Figura 28 - Risultati trafilatura livello 0.....	57
Figura 29 - Alcune immagini della macchina di trafila durante il montaggio. ....	58
Figura 30 - Trafila in lavorazione. ....	58
Figura 31 - Esempio di trafila ( $\varnothing 5.58$ ).....	59
Figura 32 - Trafila in lavorazione. ....	59
Figura 33 - $\varnothing 4.30$ rotto durante la trafilatura. ....	60
Figura 34 - Immagine con il proiettore dei profili della sezione rotta del diametro $\varnothing 4.30$ .....	60

---

Figura 35 - Trafilatura a $\varnothing 4.48$ . .....	61
Figura 36 - Esempio di grafico prova di trazione. Curva reale e curva ingegneristica. ....	62
Figura 37 - Esempio di provino rotto di una prova di trazione. ....	63
Figura 38 - Inserimento caratteristiche meccaniche modificate del materiale. ....	64
Figura 39 - Risultati trafilatura livello 1. ....	65
Figura 40 - Curva reale da inserire nel software. ....	66
Figura 41 - Inserimento curva reale trovata in laboratorio nel software. ....	66
Figura 42 - Yield stress Livello 2 - $\varnothing 5.58$ . ....	67
Figura 43 - Distribuzione Yield stress Livello 2 - $\varnothing 5.58$ . ....	68
Figura 44 - Vista frontale spezzone tagliato al proiettore di profili. ....	70
Figura 45 - Vista frontale Simufact taglio a coltello chiuso. ....	70
Figura 46 - Vista frontale Simufact taglio a coltello aperto. ....	71
Figura 47 - Vista laterale dello spezzone tagliato con il proiettore di profili. ....	72
Figura 48 - Vista laterale dello spezzone tagliato con Simufact. ....	72
Figura 49 - Metallografia sezione taglio a coltello chiuso. Attacco NITAL 1.4% (25x). ....	73
Figura 50 - Vista frontale e laterale estrusione versione A. ....	75
Figura 51 - Vista frontale e laterale estrusione versione B. ....	75
Figura 52 - Vista frontale asse xy e vista laterale asse zx versione matrici A. ....	76
Figura 53 - Vista frontale asse xy e vista laterale asse zx versione matrici B. ....	76
Figura 54 - Vista frontale asse xy e vista laterale asse zx versione matrici A, cilindro ideale. ....	77
Figura 55 - Vista frontale asse xy e vista laterale asse zx versione matrice B, cilindro ideale. ....	77
Figura 56 - Linee di flusso Simufact estrusione esagonale. ....	78
Figura 57 - Sezione estrusione esagonale. Attacco NITAL 1.4% (25x). ....	78
Figura 58 - Sezione piega. Attacco NITAL 1.4% (25x). ....	79
Figura 59 - Linee di flusso Simufact piega. ....	80
Figura 60 - Metallografia materiale grezzo - Sezione trasversale - Attacco NITAL 1.4% (1000x). ....	81
Figura 61 - Metallografia materiale grezzo - Sezione longitudinale - Attacco NITAL 1.4% (1000x). ....	81
Figura 62 - Diagramma valutazione economica. ....	85
Figura 63 - Diagramma di flusso di analisi. ....	93

## **Elenco delle Tabelle**

Tabella 1 - Diametri di trafilatura presenti in azienda.....	53
Tabella 2 - Diametri di trafilatura scelti per la creazione dei provini. ....	57
Tabella 3 - Risultati analisi trafilatura livello 0.....	61
Tabella 4 - Carichi medi trovati con le prove di trazione. ....	63
Tabella 5 - Caratteristiche meccaniche Ø6. ....	64
Tabella 6 - Risultati analisi trafilatura livello 1.....	64
Tabella 7 - Risultati analisi trafilatura livello 2.....	67
Tabella 8 - Tabella riassuntiva analisi trafilatura. ....	69



## **Sommario**

Questo progetto di tesi si focalizza sulla taratura del software di simulazione Simufact.Forming 12.0.3. Per fare questo si è utilizzato il processo produttivo semplice di deformazione a freddo, come quello di una chiave a brugola, presso l'azienda F.Lli Mauri srl. I parametri e le condizioni al contorno del modello matematico di una simulazione numerica agli elementi finiti sono fondamentali affinché la soluzione fornisca risultati accurati. Per questo verrà testata la risposta del software tramite lo studio della trafilatura e l'inserimento delle caratteristiche del materiale all'interno del programma. A seguito di una campagna sperimentale, attraverso prove di trazione di campioni di filo trafilato nelle diverse riduzioni di sezione, i parametri del materiale sono stati stimati tramite la curva di trazione e la curva di incrudimento. Inoltre sono state eseguite delle prove metallografiche delle fasi del processo per verificare le deformazioni simulate all'interno del software.

**Parole Chiave:** Metodo degli elementi finiti, FEM, deformazione plastica a freddo, trafilatura, incrudimento, caratteristiche meccaniche, prova di trazione, prova metallografica, chiave a brugola.

## **Abstract**

This thesis project focuses on the calibration of the simulation software Simufact.Forming. To do this it used a simple production process of cold forming as an Allen key at the company F.lli Mauri srl. The parameters and the boundary conditions of the mathematical model of a numerical finite elements simulation are fundamental in order that the solution to provide accurate results. To this will be tested the response of the software through the study of wire drawing and the inserting the material characteristics in the software. Following an experimental campaign, through tensile tests of samples of the drawn wire in the different section reductions, the parameters of the material were estimated using the tensile curve and the strain hardening curve. In addition, have been performed metallographic tests of the process steps to verify the simulated strains within the software.

**Keywords:** Finite element method, FEM, cold forming, wire drawing, strain hardening, mechanical properties, tensile test, metallographic test, Allen key.

# 1 Introduzione

## 1.1 Introduzione all'azienda

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

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



Figura 1 - F.lli Mauri s.r.l. - Sede di Garlate (LC) - Produzione

Per questo motivo l'azienda *F.lli Mauri s.r.l.* - da 50 anni uno dei maggiori produttori in Europa di componentistica di viteria speciale per mobili di svariate dimensioni con processi di deformazione a freddo - si sta muovendo verso que-

sta nuova frontiera. Per sviluppare una ricerca che ha come scopo la verifica e l'implementazione di questo strumento presso la loro azienda, F.Ili Mauri s.r.l. ha inserito all'interno del suo ufficio tecnico una postazione di simulazione numerica di processo, dotata del *software Simufact.Forming 12.0.3*, un programma FEM per la simulazione di processi di deformazione metallica a freddo.

Questo progetto comprende:

- modellazione numerica del processo produttivo preso in considerazione
- calibrazione del software tramite analisi sperimentale
- elaborazione ed analisi dei risultati ottenuti e individuazione di eventuali problematiche e/o criticità nel processo produttivo
- test in laboratorio di prove meccaniche e prove metallografiche delle fasi di processo

Il processo produttivo affrontato è un processo di deformazione a freddo di una chiave a brugola a testa esagonale e si compone essenzialmente di queste fasi:

- Trafilatura,
- Taglio,
- Estrusione delle teste esagonali con ricalcatura dello smusso,
- Piegatura,
- Tempra a induzione delle teste a facce esagonali della chiave a brugola e rivestimento elettrolitico di zinco.

La tempra a induzione e il rivestimento elettrolitico di zinco non verranno analizzate.

Questo lavoro di tesi ha come obiettivi:

- Taratura e validazione tramite prove di laboratorio dei risultati provenienti dalla simulazione
- Modellare in ambiente *Simufact.Forming 12.0.3* il processo di realizzazione di una chiave a brugola in tutte le sue fasi.
- Individuare, in base ai risultati ottenuti dalla campagna sperimentale, eventuali problematiche e/o criticità del processo produttivo in questione.

## **1.2 Introduzione a Simufact 12.0.3**

### **1.2.1 Ottimizzazione di processo come strumento per ottenere le migliori prestazioni e la massima qualità**

I processi di lavorazione dei materiali metallici per deformazione plastica sono la chiave per l'ottenimento di componenti meccanici di elevata qualità. Questo tipo di processo non comporta infatti variazioni strutturali del metallo, che mantiene quindi le sue caratteristiche meccaniche e resistenziali.

Lo stampaggio a freddo si ottiene mediante presse automatiche multi stazione, dove il preformato viene trasferito tra una stazione e la successiva mediante sistemi di transfer molto rapidi. Per garantire una maggior resistenza agli elevati livelli di carico dovuti alla deformazione a freddo del metallo gli stampi sono costituiti da più parti di materiali anche differenti, parti montate in sequenza mediante interferenza termica o meccanica. Per garantire un sufficiente riempimento di forme profonde si ricorre talvolta all'utilizzo di stampi flottanti montati su molle o cuscinetti in grado di guidare il materiale in modo più efficace.

Punto critico di queste lavorazioni è sempre trovare il giusto compromesso tra la minima quantità di materiale necessaria per ottenere il componente e l'individuazione della corretta sequenza di deformazione, in modo da garantire un riempimento corretto senza difetti e piegature. Nella pratica produttiva queste operazioni di aggiustamento e calibrazione sono effettuate dalle persone con maggiore esperienza pratica di stampaggio nell'azienda e sono frutto di una lunga serie di prove sul campo.

In altri casi l'utilizzo delle macchine non è ottimale: l'errata distribuzione della deformazione tra le varie stazioni può portare a comprimere dei pezzi già completamente riempiti, sovraccaricando la macchina e deteriorando gli stampi.

Tutte le scelte, riassumendo, sono dettate dall'esperienza: il progettista non ha modo di testare nuove soluzioni per ottimizzare il processo.

### **1.2.2 La simulazione di processo: un nuovo approccio progettuale**

Da alcuni anni è disponibile un approccio nuovo al problema dell'ottenimento di pezzi di qualità per stampaggio a freddo: la simulazione del processo. Mediante software molto sofisticati in grado di effettuare una miriade di calcoli matematici partendo dalle informazioni geometriche e fisiche del processo è possibile prevedere come il materiale andrà a scorrere tra gli stampi per formare il pezzo. In altre parole lo stampatore può finalmente "mettere la testa tra gli stampi" e vedere cosa succede. La simulazione consente di verificare in modo virtuale se la configurazione di stampaggio ipotizzata è efficace o meno, non impegnando quindi tempo e risorse nella costruzione degli stampi. La possibilità di sperimentare nuove soluzioni senza andare in macchina consente quindi al progettista di

migliorare la qualità dei suoi particolari stampati, ottimizzare le condizioni di processo e ridurre i costi di produzione.

### **1.2.3 Aspetti che rendono Simufact 12.0.3 lo strumento adatto alla simulazione del processo di stampaggio a freddo dell'acciaio**

Normalmente le matrici, punzoni e spine hanno una forma anche molto complessa e provengono da CAD anche molto diversi: Simufact 12.0.3 garantisce la massima compatibilità nell'impostazione attraverso i formati .stl o .step ed il rapido ottenimento di superfici adatte alla simulazione attraverso meshatori 2D e 3D rapidi e precisi. Secondo aspetto la conoscenza del materiale in funzione delle temperature e velocità: Simufact 12.0.3 ha un database di leghe ferrose e non dove sono definite le funzioni sforzo deformazioni elasto-plastiche dei materiali alla temperatura di stampaggio.

È possibile inoltre definire i propri materiali partendo dalla proprietà meccaniche quali snervamento e rottura. Per quanto riguarda il contatto pezzo-stampi, in Simufact sono implementate le leggi di attrito e di scambio termico validate mediante confronto con la realtà, con la possibilità di applicare lubrificazioni localizzate degli utensili. Venendo quindi alla definizione della cinematica, è possibile sfruttare un database completo di presse meccaniche.

### **1.2.4 La simulazione dei processi di stampaggio a freddo**

Qui un elenco di operazioni che si fanno nei processi di deformazione a freddo:

- Trafilatura del filo: il processo produttivo parte da una bobina di filo, dove il materiale è stato già trafilato, con una riduzione di sezione che ha comportato un accumulo di deformazione ed un incrudimento superficiale, che deve essere considerato per una corretta previsione degli scorrimenti del materiale nelle successive fasi di deformazione;
- Operazioni di estrusione del gambo e di formatura della testa: solitamente assialsimmetriche, vengono simulate con analisi 2D molto rapide in grado di deformare il materiale fino a riempire le zone più massive;
- Operazioni di sagomatura e finitura: i dettagli quali forma esagonale e l'impronta a taglio, stella, brugola, multilobata si ottengono nelle fasi finali e richiedono una simulazione 3D, eventualmente semplificata con l'applicazione di piani di simmetria. In queste fasi la massima attenzione è rivolta al riempimento dell'impronta ed alla eventuale formazione di ripieghe;
- Tranciatura delle bave: non sempre necessaria, consente di eliminare il materiale in eccesso sulla testa, legato al processo di deformazione applicato. Può essere simulata, per avere evidenza della forza necessaria al-

la tranciatura e le deformazioni conseguenti nel materiale, oppure si può effettuare una rimozione booleana del materiale in bava e generare così la geometria corretta per le successive fasi di calibrazione;

- Rullatura del filetto: operazione finale molto delicata, dove la vite passa attraverso dei rulli zigrinati, in grado di deformare il materiale con la creazione del filetto. In questa fase, complessa da simulare per le molte rotazioni che si ottengono, si punta a valutare la corretta crescita del materiale a formare i denti in rilievo.

Riducendo ulteriormente l'analisi alle operazioni di deformazione, le caratteristiche distintive del processo sono:

- Utilizzo di macchine automatiche multi stazione dove il risultato di ogni operazione è trasferito alla successiva. Simufact prevede introduzione della legge di movimento della pressa meccanica attraverso un semplice modello, ma soprattutto consente l'impostazione di una sequenza di operazioni 2D e o 3D, con il trasferimento automatico di tutti i risultati calcolati da una fase alla successiva. Il tecnico risolve quindi una intera sequenza con una singola operazione. In una analisi più avanzata si può anche tener conto della deflessione della pressa legata ai diversi carichi che devono sopportare le diverse stazioni.
- Necessità di considerare il ritorno elastico all'estrazione del pezzo dalle matrici: Simufact valuta il recupero della parte elastica della deformazione all'apertura degli stampi, trasferendo all'operazione successiva una geometria più grande e con una distribuzione di tensioni inferiore.

Per quanto riguarda l'analisi dei risultati, il progettista normalmente è interessato ai due aspetti:

- Riempimento: il materiale è sufficiente per riempire la geometria tra le matrici, punzoni, spine oppure vi sono delle mancanze legate ad una errata stima del materiale in entrata od ad una distribuzione non corretta dello stesso nelle fasi precedenti? Lo strumento dei contatti consente di colorare in blu le parti a contatto con le matrici ed in rosso le mancanze FIG. Seguire il flusso di materiale mediante dei vettori velocità, assieme alla visualizzazione dei contatti consente di comprendere in dettaglio come il materiale viene deformato, individuando possibili sacche isolate di non contatto, possibili difetti per intrappolamento di lubrificanti;
- Creazioni di ripieghe: la geometria delle matrici obbliga il materiale a ripiegare su se stesso, formando delle ripieghe che possono essere critiche per la qualità del pezzo se rimangono nella zona interna e non eliminate con la successiva tranciatura. Simufact ha un nuovo approccio per la

tracciatura delle ripieghe, evidenziate ora attraverso dei marcatori FIG in grado di seguire il materiale durante lo scorrimento. È quindi possibile non solo individuare la posizione e la profondità di una ripiegatura, ma anche capire se questa rimarrà all'interno del pezzo o sarà localizzata in bava.

Altri risultati che vengono normalmente valutati sono la deformazione equivalente del materiale, utile ad identificare le zone maggiormente stirate, e la distribuzione di temperatura, che evidenzia eventuali surriscaldamenti. Di interesse è anche la valutazione dell'andamento delle fibre del materiale, in grado di garantire una corretta orientazione del materiale, ma anche di evidenziare eventuali ripieghe sottopelle.

### **1.2.5 Ottimizzazione del processo di stampaggio a freddo**

Lo sviluppo del software in questi anni ha avuto come tema principale il rendere il più possibile automatiche le operazioni da effettuare per simulare una sequenza, introducendo strumenti quali il chaining. Il progettista si è però sempre trovato a fare delle scelte in base ai risultati delle simulazioni ed ipotizzare delle configurazioni alternative, valutando quindi gli effetti delle modifiche apportate. Tale lavoro di "trial & error" virtuale non consentiva di individuare la migliore configurazione possibile, ma solamente una migliore della precedente.

La maggiore innovazione nel software è la possibilità di effettuare una procedura di ottimizzazione automatica, in grado di individuare la migliore combinazione dei parametri di processo per ottenere il particolare della migliore qualità possibile. L'utente è chiamato a definire il range di variazione dei parametri di processo, ad esempio le dimensioni e la posizione del filo, le corse di stampaggio, ma anche le geometrie delle matrici, punzoni, stampi e gli obiettivi da raggiungere, quali ad esempio il completo riempimento dell'impronta, il rispetto di alcune tolleranze dimensionali, l'assenza di ripieghe.

### **1.2.6 Il software**

La modellazione numerica generalmente consiste in 3 principali step chiamati, pre-elaborazione, analisi e post-elaborazione.

In fase di pre elaborazione, ci viene chiesto di fornire le informazioni necessarie per il processo di deformazione. Dalle informazioni inserite, l'analisi sarà effettuata dal solutore.

Ci sono due tipi di solutori: Finite Element (FE) solver and the finite volume (FV) solver. L'analisi del solutore è il passaggio più dispendioso in termini di tempo.



Il solutore genererà risultati che possono poi essere rivisti nella fase di post-elaborazione. Molto spesso qualche decisione sarà effettuata sulla base della relazione in post-elaborazione e si inizierà un'altra modellazione fino a che vengono raggiunti risultati soddisfacenti. La fase di analisi e la fase di post-trattamento può avvenire contemporaneamente. Ciò significa che è possibile visualizzare risultati prima che l'analisi sia finita completamente. Questo perché l'analisi viene fatta in modo incrementale e molti risultati intermedi sono generati prima che il solutore completi l'analisi.

### **1.2.7 Pre elaborazione**

La pre elaborazione è il primo step della modellazione. Si richiede di utilizzare la propria conoscenza del processo di deformazione per creare un modello che approssimi il più possibile al reale processo di deformazione. Si può selezionare il tipo di processo.

A questo punto si importeranno dal CAD le geometrie degli utensili, le matrici utilizzate e i pezzi. Si possono anche creare direttamente da Simufact 12.0.3 pezzi se hanno geometrie semplici, come cilindri o cubi.

Si avrà bisogno di definire le caratteristiche delle macchine o delle presse che guideranno il punzone o l'utensile.

Le proprietà del materiale del pezzo e degli utensili sono informazioni importanti per la simulazione. Si ha l'opzione di inserire direttamente le proprietà del materiale o attraverso il database interno di Simufact 12.0.3.

Anche l'ambiente del processo di deformazione è importante ai fini della modellazione. Bisogna specificare le proprietà del calore del pezzo, degli utensili e delle matrici. Tutto questo include il coefficiente di scambio termico e l'emissività dell'area circostante. Poi bisogna definire le proprietà dell'attrito e dell'usura tra il pezzo e gli utensili. Quando all'inizio si definisce il processo di deformazione come a caldo o a freddo, il software è capace di fornire le proprietà del materiale e le proprietà dell'ambiente dal suo database. Questo aiuta il solver per l'analisi.

Lo step di analisi può durare molto in termini di tempo. Per ridurre le tempistiche si può usare la propria conoscenza dovuta dall'esperienza di processi di deformazione per semplificare il modello e velocizzare l'analisi senza compromettere i risultati. Per esempio si può utilizzare un modello 2D invece che il modello 3D, soprattutto se il processo è assialsimmetrico come un cilindro si può ottimizzarlo sufficientemente in questo modo.

Quindi si può definire le matrici e gli utensili come corpi rigidi.

Nella deformazione a freddo, il trasferimento di calore nei corpi rigidi non è importante, quindi si può inoltre semplificare il modello definendo gli utensili e le matrici come corpi rigidi senza trasferimento di calore.

Si può utilizzare inoltre la simmetria nel modello, cioè utilizzare solo un modello di sezione del pezzo. Si può utilizzare inoltre simmetrie cicliche, per esempio si può utilizzare un modello 2D in uno step per poi passare ad un modello 3D nel successivo. Questa procedura di passaggio 2D-3D velocizza significativamente l'analisi. Nella simulazione di una deformazione multi stazione, si possono trasferire i risultati dall'analisi precedente nell'analisi successiva come condizioni iniziali.

Utilizzando la capacità di elaborazione in parallelo nel software è un altro modo per accelerare l'analisi, se i computer sono dotati di più processori. Il metodo di decomposizione del dominio (DDM) nel software permette di fare uso di più processori sul computer. Durante la fase di pre elaborazione si seleziona il numero di processori che si desidera utilizzare per simulare il processo di deformazione. Multi-threading è un altro modo per accelerare l'analisi. Utilizza più processori nel computer per risolvere le equazioni in parallelo.

### **1.2.8 FE**

The finite element method. Metodo ad elementi finiti. Questo significa che il software userà il solutore FE per simulare i modelli.

Il metodo a elementi finiti è uno dei più potenti metodi numerici nel risolvere problemi complessi ingegneristici.

Per l'uso del solutore FE, l'interno della geometria ha bisogno di essere "meshato" che significa che si fa una discretizzazione in piccoli pezzi chiamati elementi.

Una buona mesh è importante per ottenere buoni risultati della simulazione. Durante la simulazione di deformazione, la mesh FE è spesso "remeshed" automaticamente per assicurarsi che le mesh utilizzate nella simulazione sono in buone condizioni.

### **1.2.9 FV**

The finite volume method è il metodo a volumi finiti.

Nel metodo a volumi finiti utilizzato da Simufact.forming, gli interni della geometria sono ricoperti da una mesh regolare. La simulazione del flusso del materiale avviene sulla base di questa mesh fissa, denominata Finite Volume Mesh.

La superficie esterna delle parti è ingranata con sfaccettature triangolari. Pertanto, nel metodo FV c'è solo la necessità di "remeshing" della superficie esterna del pezzo, non le parti interne. Questo rende il FV risolutore particolarmente adatto per il 3D stampaggio a caldo con complessa geometria come dado o altre parti. Poiché non ci sono problemi di distorsione di maglia interna, l'analisi FV è veloce e robusto per questo tipo di processi di formatura, anche quando si verificano concavità o pieghe.

### 1.2.10 Mesh

La mesh si riferisce alla Finite Element Mesh ed è costituita da elementi e nodi. In 2D , consiste in elementi triangolati o quadrilateri. In 3D, invece, può essere di forma tetraedrica o esaedrica.

Esistono diversi tipi mesh, ottimali per diversi tipi di operazioni o deformazioni. Inoltre si differenziano anche se il modello è in 2D o in 3D.

In 3D sono le seguenti:

- siMesh Tetra
- Patran Tetra
- Overlay Hex
- Sheetmesh
- Ringmesh

### 1.2.11 Remeshing

In una analisi FE, la mesh qualche volta diventa distorta a causa delle grandi deformazioni nella simulazione della deformazione a freddo.

Una mesh distorta genera risultati scarsi e qualche volta causa un fermo prematuro delle analisi.

Per evitare questo problema, remeshing è usato di volta in volta per creare una migliore mesh durante l'analisi.

Questo è fatto automaticamente controllato dal criterio di remeshing e dalla grandezza dell'elemento predefinito.

La grandezza dell'elemento in una nuova mesh può variare da un posto ad un altro. Per esempio, nelle aree di contatto o negli angoli normalmente c'è bisogno di creare piccoli elementi.

Si possono creare inoltre box di raffinamento per posizionare piccoli elementi nelle regioni di interesse.

Generalmente, per l'analisi FE, più piccoli sono gli elementi, più sono accurate le analisi e più alto il costo delle computazioni.

Usando piccoli elementi solo nelle posizioni corrette, usando i box di raffinamento, si possono avere risultati con piccoli costi di computazioni.

I box di raffinamento possono essere di superficie, dove si può raffinare il pezzo superficialmente su pochi strati, oppure totale.

### 1.2.12 Post elaborazione

In post elaborazione, si possono analizzare i risultati.

Si possono generare report e prendere decisioni riguardo ai problemi del progetto di processo di deformazione.

Ci sono molti risultati standard, come la temperatura, stress e deformazione. Si possono anche specificare output non standard come per esempio l'usura degli stampi.

Si possono fare in automatico grafici attraverso i risultati e salvare in file immagine, vedere le animazioni con la possibilità di salvarli in file tipo .avi filmato.

Linee di flusso per vedere effettivamente come si deforma effettivamente il materiale. Si impostano in pre elaborazione e si può vedere in post elaborazione come cambia il flusso del materiale all'interno durante il processo per poi compararle con prove metallografiche.

### 1.3 Introduzione e presentazione del progetto

L'obiettivo di questa tesi è la calibrazione del software *Simufact.Forming 12.0.3* tramite lo studio completo del processo di deformazione a freddo di una chiave a brugola a testa esagonale. Quindi ci sarà una validazione e un controllo tramite prove di laboratorio dei risultati provenienti dalla simulazione.

Lo studio comprenderà la modellazione in ambiente *Simufact.Forming 12.0.3* del processo di realizzazione di una chiave a brugola in tutte le sue fasi e quindi l'individuazione in base ai risultati ottenuti dalla campagna sperimentale, eventuali problematiche e/o criticità del processo produttivo in questione.

Fondamentale sarà andare a mettere a confronto i risultati che si ottengono attraverso le simulazioni del software di analisi numerica FEM, che il programma calcola tramite i modelli creati, attraverso prove di laboratorio reali come la prova di trazione e le prove metallografiche.

Per la simulazione si deve creare il modello, simulando quindi la lavorazione inserita. Si stabiliranno tutte le condizioni di lavorazione, che saranno i dati di ingresso: il software andrà a calcolare i dati di uscita.

La creazione del modello e l'inserimento di tutte le condizioni iniziali sono due fasi molto importanti al fine del risultato.

Per questo motivo, lo scopo di questa tesi è quello di fare un'analisi dettagliata di ogni fase di processo, così da analizzare la risposta del software per poi confrontare i risultati reali con quelli del simulatore.

In fase di pre elaborazione, ovvero il primo passaggio della modellazione in analisi numerica, il software chiede all'operatore di utilizzare la propria conoscenza del processo di deformazione a freddo per creare un modello che si avvicini il più possibile a quello reale.

Si presenterà una analisi del materiale tramite prove di trazione.

Con l'aiuto dei risultati ottenuti grazie al software, si farà una analisi dettagliata del materiale tramite la trafilatura.

Si creeranno delle curve di trafilatura ponendo in ascissa le diverse riduzioni di diametro e in ordinata i diversi carichi ottenuti dal software; in laboratorio si procederà, tramite le prove di trazione, ad analizzare i carichi sulle diverse riduzioni di diametro.

Pertanto si farà un confronto dei risultati delle trafilature eseguite con il programma e i risultati ottenuti dalla prove di trazione in laboratorio.

Inoltre, sarà molto importante eseguire una prova di trazione sul materiale di partenza, per verificare le caratteristiche dichiarate dal cliente sulla vergella in esame.

Si creeranno i modelli delle fasi di processo e in questi, il filo metallico di partenza andrà a far parte di più step di lavorazione suddivisi nelle varie stazioni, quindi ogni fase avrà la sua lavorazione e dunque la sua analisi di simulazione.

Dopo aver fatto analizzare al software i modelli, si andrà a studiare e valutare la risposta del programma.

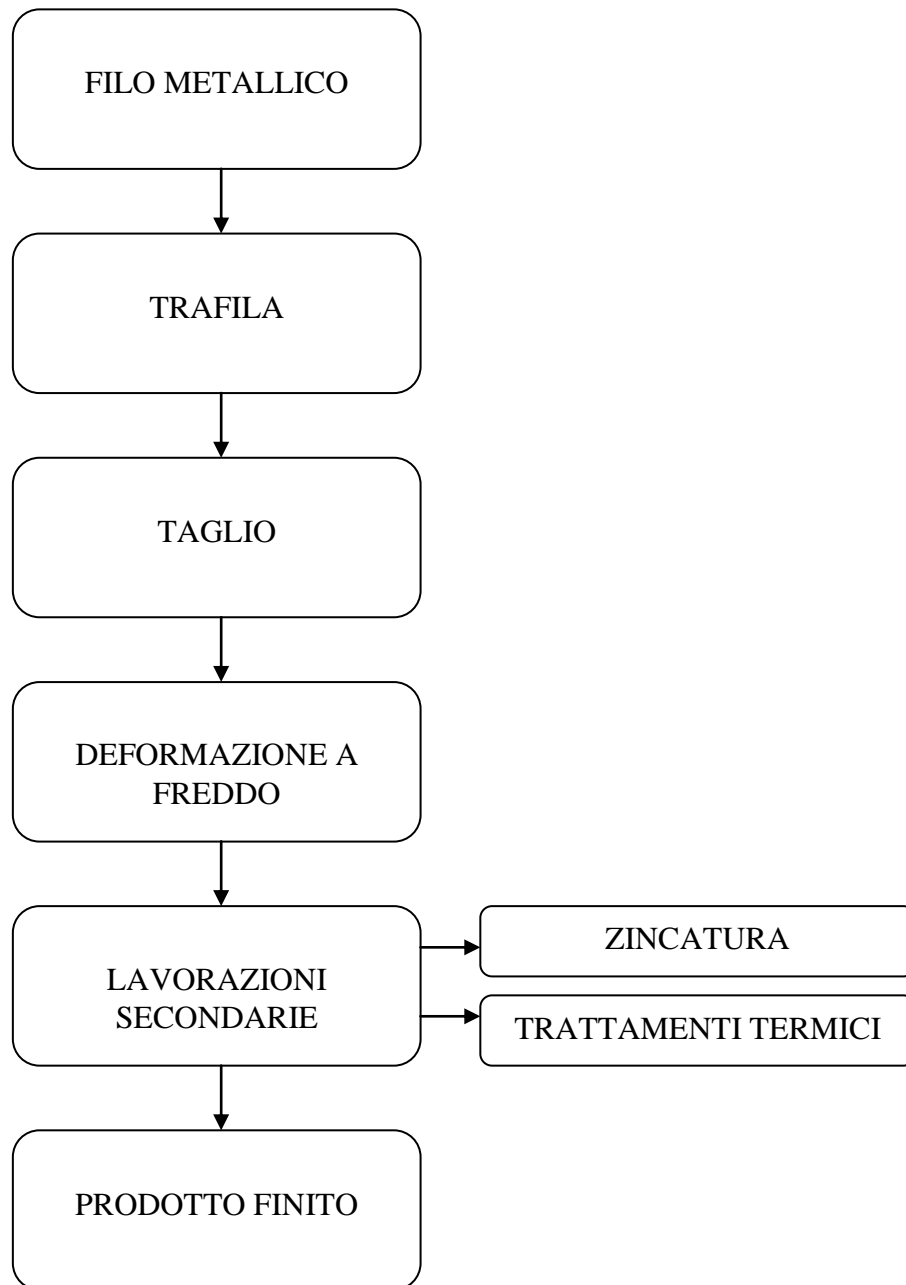


Figura 2 - Diagramma di flusso della fasi di un processo generico di deformazione a freddo.

## 2 Teoria di deformazione a freddo dei metalli

### 2.1 Deformazione

#### 2.1.1 Deformazione elastica

Una barra sollecitata a trazione riprende la lunghezza originale se il carico non supera un determinato valore limite. Le norme sulle prove dei materiali definiscono come limite elastico quella tensione alla quale ha inizio la deformazione permanente ( $R_{p0,2}$  con deformazione permanente pari allo 0,2%). Nel campo elastico vige la legge di Hooke:

$$\sigma = \varepsilon * E$$

Ciò significa che nel campo della legge di Hooke la tensione  $\sigma$  è proporzionale alla deformazione  $\varepsilon$ . Il fattore di proporzionalità è dato dal modulo di elasticità normale.

L'allungamento percentuale è:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0}$$

Dal segno di  $\varepsilon$  si può riconoscere il tipo di sollecitazione (se positivo si tratta di una sollecitazione di compressione, se negativo si tratta di una sollecitazione di trazione). Se si supera il limite elastico, si ha la deformazione plastica.

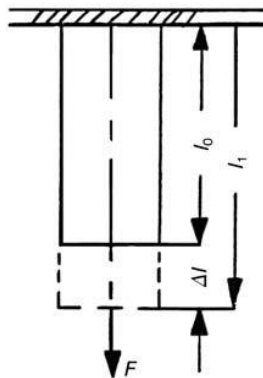


Figura 3 - Prova di trazione, allungamento della barra sotto stress.

### 2.1.2 Deformazione plastica

Come detto precedentemente si instaura una deformazione plastica quando la tensione supera il determinato valore limite  $R_{p0,2}$ .

Interi gruppi di atomi, ad esempio, slittano in determinate direzioni a partire dalla loro posizione iniziale, in presenza di sollecitazioni di taglio. Tali direzioni giacciono in piani particolari, caratteristici della struttura atomica. Questo processo, cioè il meccanismo che origina una deformazione plastica permanente, è rappresentabile nel modo seguente:

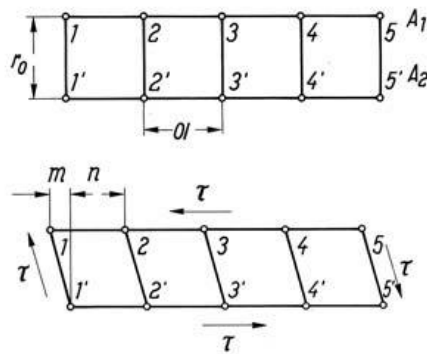


Figura 4 - Processo ideale di scorrimento dei piani atomici.

Gli atomi della riga A1, sollecitati da una tensione tangenziale abbandonano la loro posizione di equilibrio rispetto a quelli della fila A2. L'entità dello spostamento  $m$  è proporzionale alla tensione di taglio  $\tau$ . Se quest'ultima è minore della tensione tangenziale di scorrimento, allora è  $m < a/2$ , per cui al cessare della sollecitazione gli atomi ritornano nella loro posizione primitiva (non sussiste condizione di plasticizzazione, la deformazione è elastica).

Se viene superato il valore della tensione tangenziale di scorrimento, si ha  $m > a/2$  ovvero  $m > n$ , per cui gli atomi cadono nel dominio di attrazione dell'atomo più vicino appartenente alla riga vicina. L'energia di legame fra gli atomi 2 ed 1' è ora maggiore di quella fra gli atomi 1 ed 1', sicché si instaura una nuova situazione di equilibrio fra gli atomi 2 ed 1'.

Se due piani cristallini confinanti si spostano reciprocamente per una distanza maggiore o uguale alla metà della distanza del reticolo cristallino, lo spostamento è permanente, cioè di tipo plastico, e lo si denomina scorrimento.

Il processo reale di scorrimento si svolge però in modo diverso da quello in teoria. Le forze reali necessarie sono infatti essenzialmente minori a fronte di quelle previste dal calcolo energetico dei legami. La causa di ciò risiede in irregolarità del reticolo cristallino, che vengono chiamate dislocazioni.



### **2.1.3 Deformabilità**

La deformabilità è la capacità del materiale di essere deformato. Dipende dalla composizione chimica, dal processo di fusione e dai trattamenti termici. Questi tre fattori determinano la costituzione, la struttura e le proprietà resistenziali dei materiali.

### **2.1.4 Incrudimento del filo**

Le deformazioni plastiche sono generalmente causate, a livello microscopico, da difetti del reticolo chiamati dislocazioni, che facilitano lo scorrimento dei piani cristallini muovendosi attraverso il materiale. A bassa temperatura questi difetti tendono a moltiplicarsi e ad accumularsi quando il materiale viene lavorato (finendo per interferire tra loro, bloccandosi a vicenda, incrementando i difetti puntiformi ed aumentando quindi la resistenza meccanica.

Bisogna poi aggiungere che le dislocazioni in movimento si accumulano contro i bordi di grano (che sono barriere al moto delle dislocazioni), provocandone la rottura.

Il risultato di tale sconvolgimento è la deformazione dei grani cristallini e il loro allungamento nella direzione dello sforzo.

Durante la trafilatura la compressione determina nel materiale un progressivo incrudimento, che modifica esaltando, le sue proprietà meccaniche; questo incrudimento è in relazione diretta, a seconda dei materiali, alla riduzione di sezione subita in uno o più passaggi.

L'incrudimento dovuto alla trafilatura è particolarmente evidente nei fili, i quali più delle barre, subiscono generalmente lunghe serie di passaggi, per essere portati dalla vergella laminata a caldo ai vari diametri finali.

In particolare l'incrudimento causato dalla riduzione di sezione per trafilatura determina nel metallo un aumento del carico unitario alla rottura, un aumento del limite elastico, del limite di snervamento e conseguentemente della durezza.

Quanto più il filo è incrudito e tanto più diminuisce il suo allungamento percentuale; vi è pure una leggera diminuzione della densità e del modulo di elasticità nel senso della lunghezza del filo.

Esaminando al microscopio uno stesso filo, prima e dopo qualche passaggio alla trafila, si osserva una deformazione nella granulazione, che mentre prima della trafilatura si presentava uguale tanto nella sezione trasversale quanto nel senso della lunghezza, dopo una certa riduzione di diametro si modifica diminuendo la sezione trasversale ed allungandosi proporzionalmente nel senso della lunghezza.

Il profilo trafilato passa cioè dalla struttura granulare iniziale, ad una struttura fibrosa costituita da tanti piccoli fusi, e con più la riduzione di sezione viene

spinta, tanto più la loro sezione diminuisce aumentando la lunghezza, sino a divenire un assieme di microscopici aghi, dopo una lunga serie di passaggi alla trafila.

L'incrudimento derivato dalla trafilatura che come si è visto cresce in proporzione diretta all'aumento della riduzione totale di sezione, può venire attenuato o completamente eliminato con i trattamenti termici di addolcimento o di ricottura.

In molti casi specialmente nel caso di ferro ed acciaio, l'incrudimento viene appositamente realizzato per migliorare le caratteristiche meccaniche del metallo; in questi casi è necessario conoscere in precedenza la variazione di queste caratteristiche meccaniche del metallo, a seconda del materiale di partenza, ottenendo dopo una determinata serie di passaggi alla trafila, le caratteristiche richieste.

A questo scopo si deve avere particolare cura nell'adottare una regolare progressione dei passaggi.

## **2.2 Trattamenti superficiali**

Oltre ad avere le fasi principali del processo produttivo, molto importante ai fini dello stampaggio, è la fase di preparazione del filo metallico.

Se le billette venissero semplicemente inserite nello stampo di formatura e poi pressate, lo stampo sarebbe inutilizzabile dopo pochi colpi. Inoltre a causa dell'usura adesiva tra matrice e pezzo si verrebbero a creare delle bave che renderebbero le parti stampate inutilizzabili.

Per questi motivi, le billette devono essere preparate accuratamente prima dello stampaggio. Questa è la fase di preparazione, che non è eseguita all'interno della azienda, ma è una preoccupazione del fornitore.

Il decapaggio e la fosfatazione sono dei trattamenti superficiali garantiti dal fornitore. L'azienda si preoccupa solo di avere durante lo stampaggio una buona lubrificazione. Di seguito si spiegheranno le tre fasi di preparazione della billetta.

### **2.2.1 Decapaggio**

La preparazione della superficie del laminato deve essere ben curata, questa preparazione necessita di una o più operazioni a seconda della qualità del materiale, del sistema di trafilatura (a bagno, a grasso, a polvere di sapone o a stearato) e delle eventuali caratteristiche particolari del filo da ottenere.

Il processo di decapaggio è l'operazione chimica (a mezzo di bagni acidi) che si effettua con la rimozione dei rivestimenti di ossido, come la ruggine, così la superficie della billetta è pulita, pronta per il trattamento superficiale effettivo.

Gli acidi generalmente impiegati nel decapaggio sono: l'acido solforico e l'acido cloridrico.

L'ossido di ferro che si forma durante la laminazione, nel caso del laminato grezzo è poco solubile nell'acido solforico diluito e la sua eliminazione in questo acido è tanto d'ordine meccanico che chimico.

Per questo l'eliminazione della scaglia d'ossido dal laminato a caldo con bagno all'acido solforico, si effettua sempre ad una certa temperatura che può essere di 40-45°C per l'acciaio duro per arrivare a 80-85 °C per l'acciaio dolce.

A queste temperature l'acido solforico è più attivo e scioglie più facilmente l'ossido di ferro, ma la sua azione principale consiste nel penetrare attraverso le screpolature della scaglia d'ossido, intaccando leggermente la superficie metallica e sviluppando per reazione idrogeno, il quale con la sua pressione stacca a scagliette la superficie d'ossido per azione meccanica; le minime particelle d'ossido ancora aderenti vengono disciolte chimicamente.

Nel decapaggio del ferro e dell'acciaio è necessario impiegare acido industrialmente puro poichè l'acido a bassa concentrazione contiene maggiori impurità di arsenico ed antimonio che possono determinare difficoltà specialmente nella trafilatura a bagni; in ogni caso i vapori di arsenico sono nocivi alla salute.

Riassumendo lo scopo del decapaggio è quello di staccare e sciogliere la superficie d'ossido che ricopre il ferro, l'acciaio e gli altri metalli laminati a caldo o trafilati e poi ricotti.

### **2.2.2 Fosfatazione**

Se durante la lavorazione vengono applicati, grasso, olio e sapone ad un metallo pulito, il lubrificante non ha alcun effetto. Il film di lubrificante uscirebbe durante lo stampaggio e avverrebbe l'usura.

Quindi vengono usati i fosfati che permettono un legame stabile con il materiale. La fosfatazione applica un lubrificante saldamente legato con il materiale di base dello spezzone in acciaio, di leghe di zinco e di leghe di alluminio.

Questo sistema è il più moderno e il più efficiente per ancorare il lubrificante e facilitare la trafilatura del filo ferroso, specialmente se acciaio duro, anche con forti velocità di passaggio, sviluppando sulla superficie del filo dei piccolissimi cristalli di fosfati metallici.

Questo risultato è ottenuto immergendo i rotoli di filo slegati in soluzioni acquose d'acido fosforico e sali metallici, generalmente di zinco o di manganese che reagiscono alla superficie del filo d'acciaio da ricoprire.

Facendo variare le proporzioni dei diversi costituenti, ed aggiungendo degli agenti ossidanti, si può modificare lo spessore e la costituzione cristallina del

deposito, entro vasti limiti, e quindi si ha la possibilità di preparare delle soluzioni particolarmente idonee alle differenti applicazioni.

Questo sistema di trattamento è particolarmente conveniente dopo il decapaggio, poichè la superficie del filo è più scabrosa ed i cristalli risultano più grossi. L'influenza della preparazione se in bagno acido (decapaggio) determina parzialmente l'aumento più o meno notevole dei cristalli del rivestimento.

La rapidità della formazione del rivestimento di fosfati, e la dimensione dei cristalli dipende dalla concentrazione del bagno, dal suo grado d'acidità dalla sua temperatura, dallo stato della superficie, come già detto e dalla preparazione su questa di sostanze che possono favorire la formazione dei cristalli.

Si preparano le soluzioni di fosfatazione con i costituenti in determinate proporzioni, in modo che ne risulti un equilibrio; nel caso che la combinazione è a base di zinco il rivestimento sarà un trifosfato di zinco.

Le proporzioni sono in funzione della temperatura di lavoro, che si indicano nei diversi metodi e devono essere rispettate, come pure la temperatura del bagno che può tollerare al massimo uno scarto in più od in meno di 5°C; e cioè in una installazione di fosfatazione regolata ad esempio per 70°C la temperatura non dovrà scendere sotto i 65°C né superare i 75°C. Se la temperatura è inferiore al minimo stabilito si ottiene un rivestimento fosfatico poco omogeneo e poco aderente, se invece è superiore al massimo fissato, si aumenta la formazione di lisce e si consumano svantaggiosamente delle sostanze.

La formazione del rivestimento nel bagno di fosfatazione è preceduta da un leggero attacco dell'acido fosforico sul metallo da rivestire, il potere dissolvente è funzione della concentrazione di acido fosforico libero e della temperatura d'utilizzazione.

Il lubrificante della fosfatazione agisce nei pori, quindi non può più essere rimosso dal materiale. Gli spessori di rivestimento dei fosfati variano dai 5 µm ai 15 µm.

### **2.2.3 Lubrificazione del filo**

La lubrificazione del filo ha con la filiera la massima importanza nella trafilatura, e si può affermare che la qualità del trafilato (regolarità ed uniformità di sezione, superficie liscia) è determinata da questi due fattori.

La forte pressione a cui è sottoposto il materiale durante il passaggio nella filiera consente di usare nella trafilatura solamente lubrificanti molto aderenti e con buon spessore, per questo generalmente gli oli minerali non sono adatti a questo lavoro.

Per ottenere una buona lubrificazione durante la trafilatura, occorre studiare i mezzi più idonei per ridurre al minimo possibile l'attrito di scorrimento.

Il lubrificante ideale dovrebbe ridurre a zero l'energia consumata per attrito nel foro della filiera.

I lubrificanti generalmente usati per la trafilatura dei fili sono: i grassi naturali (grassi animali ed oli vegetali), i saponi ed i suoi sottoprodotti, le farine, i derivati dagli oli minerali, i lubrificanti minerali in polvere.

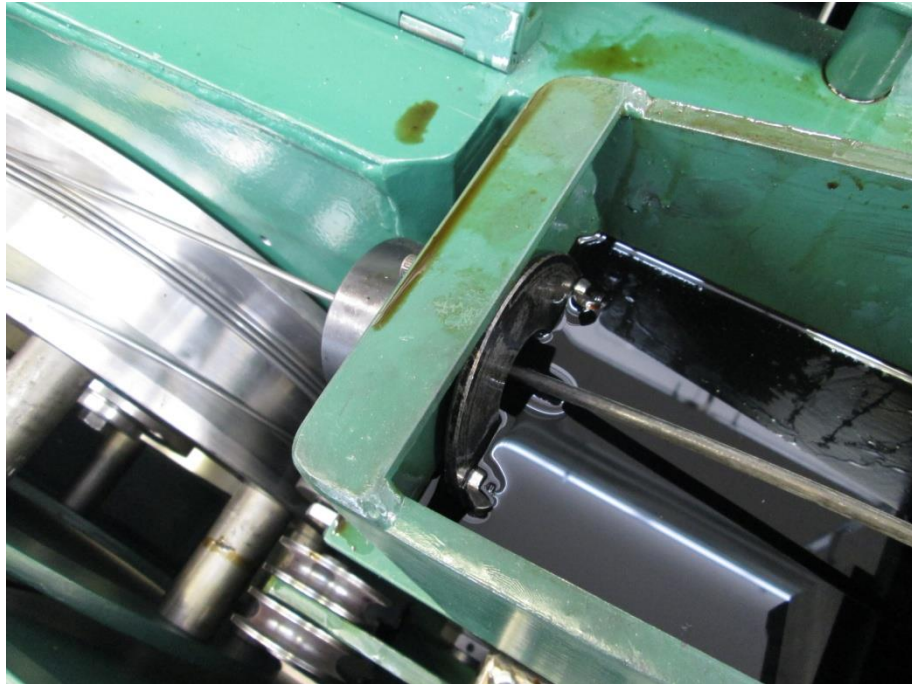
Con lubrificazione si intende:

- prevenire che lo stampo ed il pezzo vengano a stretto contatto tra loro, in modo da rendere impossibile il trasferimento di materiale dallo stampo al pezzo (saldatura a freddo)
- ridurre l'attrito tra le superfici che scorrono tra loro.
- mantenere il calore che si verifica durante la deformazione entro i limiti.

Per la deformazione a freddo, possono essere utilizzati i seguenti lubrificanti:

- Calce: Gli spezzoni sono immersi in una soluzione di acqua con calce all'8% in peso riscaldata a 90°C. La calce può essere utilizzato solo per acciai per piccole deformazioni.
- Sapone: Vengono usati soluzioni di sapone duro con una percentuale di peso del 4-8 % e un tempo di immersione di 2-3 minuti.
- Oli minerali (eventualmente con piccole quantità di grasso supplementare): Questi lubrificanti sono adatti per lubrificazioni elevate, soprattutto nella produzione automatica, assumono anche una funzione di raffreddamento.
- Disolfuro di molibdeno: Questi lubrificanti sono adatti per le più alte esigenze di lubrificazione. Il tempo di immersione varia dai 2 ai 5 minuti ad una temperatura di 80°C.

Nel caso della F.Ili Mauri s.r.l. si utilizza per la lubrificazione di tutte le macchine un buon grado di lubrificazione a olio.



**Figura 5 - Contenitore di olio posizionato prima dell'operazione di trafilatura.**

## 2.3 Trafilatura

Nell'operazione della trafilatura, il materiale è obbligato a passare attraverso il foro di una matrice (filiera) dall'azione di trazione di una forza esterna, la quale è rettilinea nel caso dei banchi a tirare per la trafilatura di barre e tubi, ed il prodotto è pressapoco diritto, oppure il movimento di trazione è rotatorio, ed in questo caso il prodotto si avvolge a spire sull'organo di trazione, costituito da un tamburo.

Nella trafilatura l'utensile o matrice è fisso; esso dà forma e sezione al metallo in lavorazione, che è obbligato a passare attraverso la filiera dallo sforzo di trazione esterno; ne deriva un'azione di stiramento e per conseguenza dell'attrito e della compressione all'interno del foro, un ritardo di avanzamento degli strati esterni rispetto a quelli interni.

La trafilatura consiste dunque nello stirare i metalli a freddo, esso sfrutta le caratteristiche di duttilità che a seconda dei metalli e delle leghe metalliche sono più o meno accentuate.

Altra differenza esistente fra il laminatoio e la trafilatura, è che il metallo laminato a caldo non ha occorrenza di lubrificazione durante la lavorazione mentre nella trafilatura è necessaria una buona lubrificazione, per vincere e rendere minima la resistenza d'attrito, fra la superficie del metallo in lavorazione ed il foro conico di riduzione dell'utensile. Se questa lubrificazione viene a mancare od è insufficiente, il metallo nell'attraversare la filiera si riscalda fortemente attaccandosi parzialmente sul foro d'entrata determinando rigature sul materiale finito che via via si accentuano sino a determinare la rottura.

Il prodotto normalmente ottenuto alla trafilatura, con una discreta lubrificazione, è generalmente ben liscio, di sezione uniforme e precisa che non può essere ottenuta neppure con la laminazione a freddo.

A pari riduzione totale di sezione, i passaggi piuttosto forti alla trafilatura rincuadiscono meno il materiale che una serie di passaggi deboli, questo è naturale se si considera che durante il passaggio forte (intendendo per passaggi forti i passaggi un po' più spinti dei normali passaggi adottati per i diversi metalli) il metallo oltre essere soggetto alla compressione nel foro della filiera, è pure soggetto nello stesso tempo alla trazione, che è tanto maggiore, quanto maggiore è la riduzione di sezione effettuata, e questa seconda sollecitazione attenua le conseguenze di incrudimento della prima.

Nei metalli molto duttili come ferro dolce, rame, alluminio, ecc., il filo trafilato con passaggi molto forti, è pure soggetto ad un ulteriore sensibile allungamento anche nel tratto dalla filiera alla bobina di trazione.

Adottando passaggi deboli (molto inferiori ai passaggi normali) non vi è attenuazione dell'effetto di compressione, poiché lo sforzo di trazione non riesce a contrastare l'effetto della compressione. In altri termini, essendo lo sforzo di tra-

zione esterno all'utensile di riduzione, esso determina se i passaggi sono forti, una sollecitazione contraria a quella dell'utensile.

Nella laminazione a freddo il caso è del tutto differente, perché l'organo di riduzione (coppia di cilindri) è contemporaneamente anche organo di avanzamento solamente per schiacciamento (cioè per compressione) senza nessuna sollecitazione di trazione.

Queste ovvie considerazioni sono suffragate da molte prove effettuate su filo trafilato con passaggi deboli e forti, come pure su filo laminato a freddo.

Una cosa molto importante è che la trafilatura di un filo metallico è limitata eventualmente dal cedimento (micro fessurazioni) in trazione del filo trafilato. Durante un passaggio nella lavorazione metallurgica, così gravosa, il massimo sforzo di trazione sarà più vicino all'uguagliare la sua tensione di snervamento, a causa dell'incrudimento che il filo trafilato ha subito. Così, si uguaglia la tensione di snervamento con la tensione di rottura.

Questo appunto è dovuto al movimento delle inclusioni, alla contemporanea continua deformazione e al continuo aumento della temperatura.



**Figura 6 - Trafila.**

### **2.3.1 Attrito nella trafilatura**

Le forze d'attrito esterne e cioè l'attrito che il filo deve vincere durante il passaggio dalla filiera dipende dalla natura e dallo stato delle superfici in contatto, dall'angolo d'entrata della filiera e dalla natura e quantità del lubrificante impiegato nell'operazione.

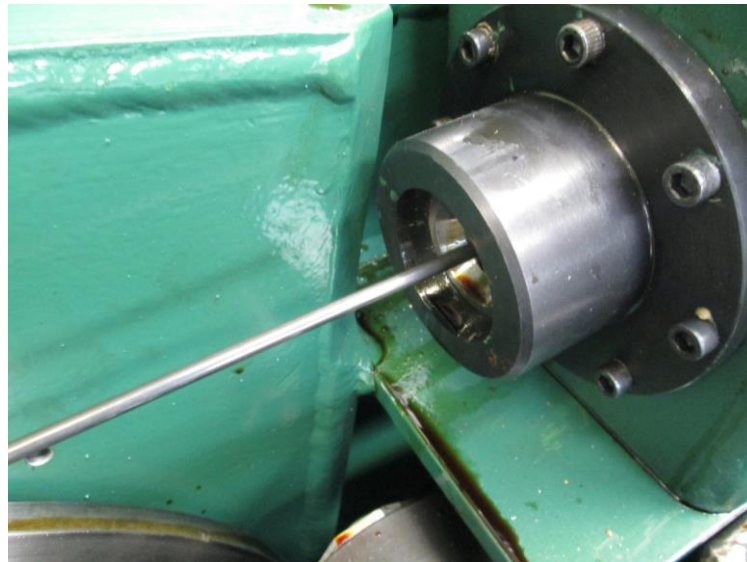


L'attrito che si sviluppa nella filiera durante la trafilatura di filo o di barre è di due specie, attrito di scorrimento esterno, causato dallo sfregamento del materiale contro il foro della filiera, ed attrito interno causato dalla deformazione plastica permanente del metallo nella filiera.

Come è noto i metalli sono costituiti da agglomerati di piccoli granuli, disposti irregolarmente uno vicino all'altro. Per effetto di questa disposizione la deformazione dei metalli durante la trafilatura, non si effettua contemporaneamente in tutti i punti, ma prima nelle zone periferiche, che sono quelle più sollecitate agli sforzi di taglio.

Questi due attriti, di scorrimento esterno fra materiale e filiera, ed interno, dovuto alla deformazione plastica del metallo, determinano nel metallo in lavorazione e nella matrice di riduzione, un notevole aumento di temperatura, che è in funzione del tipo e qualità del materiale da trafilare, dello stato superficiale del foro della filiera, della grandezza della riduzione di sezione, della velocità di trafilatura, della qualità del lubrificante e dell'ampiezza del cono d'entrata della filiera.

La trafilatura permette una riduzione di sezione molto superiore a quanto si potrebbe giudicare dalla prova alla trazione, perchè la trafilatura riduce la sezione progressivamente e lo sforzo di ogni singola riduzione è sempre notevolmente inferiore al carico di rottura totale della sezione ottenuta e precisamente varia generalmente, a seconda dell'entità dei passaggi.



**Figura 7 - Visuale ravvicinata della trafilatura.**

## 2.4 Taglio

Per taglio si intende una separazione del grezzo di parti ottenuta per mezzo di un punzone e di una matrice (punzonatura) ovvero di due lame (taglio).

I dispositivi di taglio sono di due tipi:

- con coltello aperto
- con coltello chiuso

Processo a taglio aperto è quello nel quale la linea di taglio non è chiusa su se stessa ed al quale si fanno risalire varie forme di tranciatura, quali taglio semplice, scanalature, intagli.

Processo a taglio chiuso, nel quale la linea di taglio si chiude su se stessa ed al quale appartengono la tranciatura di sviluppi, la punzonatura, la rifinitura.

### 2.4.1 Taglio a coltello aperto

Il dispositivo di taglio con coltello aperto realizza anche il trasporto perché tale coltello può svincolarsi lateralmente dallo spezzone.

Quello con coltello chiuso richiede un dispositivo di trasporto supplementare perché lo spezzone, completamente avvolto dal coltello, non può svincolarsi lateralmente.

Il dispositivo con coltello aperto è più semplice, però provoca leggere deformazioni del materiale (per altro accettabili nella bulloneria normale) per la possibilità lasciata allo spezzone d'inclinarsi durante il taglio.

Sono stati realizzati vari dispositivi di bloccaggio rigido dello spezzone, ma non sono state raggiunte soluzioni sufficientemente valide.

Poiché il coltello, in funzione di trasportatore, avanza fino al centro della matrice, si rende necessario munirlo di una sicurezza che ne garantisca l'arresto in caso di mancata espulsione del ribattino o di fuoriuscita dalla matrice.

Alcuni costruttori hanno orientato la loro scelta verso soluzioni che prevedono l'inserimento di elementi di sicurezza a rottura per sovraccarico.

Altri, hanno sdoppiato il comando di avanzamento: la prima parte, quella di taglio, è comandata in modo positivo da una camma; la seconda parte da una molla. Questo sistema è senz'altro più valido del precedente, in quanto elimina l'impiego di organi la cui rottura richiede sforzi tali da provocare comunque danno alla pinza, al coltello ecc.

### **2.4.2 Taglio a coltello chiuso**

Il dispositivo di taglio con coltello chiuso esegue tagli privi di deformazione e perfettamente ortogonali all'asse del filo.

Questa sua caratteristica lo rende insostituibile in determinati tipi di presse quali, ad esempio, le presse per la produzione di rivetti semi forati e le presse a stazioni multiple.

In modo schematico possiamo dire che il dispositivo di taglio di una pressa si compone di due elementi: l'uno fisso e l'altro mobile.

Quello fisso è denominato matrice o bussola di taglio, quello mobile: coltello.

## 2.5 Estrusione

Nell'estrusione a freddo il materiale in forma di elementi tranciati o preformati viene portato allo stato plastico a temperatura ambiente per effetto di una pressione elevata. Il pezzo grezzo può trasformarsi, a prezzo di sensibili spostamenti di materiale, in un corpo cavo o di altra forma.

I pezzi prodotti in questo modo sono di scarsa precisione dimensionale e hanno superfici ruvide dovute al ridimensionamento, quindi richiedono una rielaborazione nella maggioranza dei casi.

Con questo processo sono prodotti particolari di vari tipi di forma e di dimensione.

### 2.5.1 Tipi di estrusione

Ci sono due tipi di estrusione, diretta ed inversa che si differenziano in base al movimento del punzone matrice.

### 2.5.2 Estrusione diretta

Il flusso del materiale ed il movimento dal punzone al pezzo obbliga il materiale a fluire nel senso del moto del punzone, così che il pezzo risultante assume la forma interna della matrice.

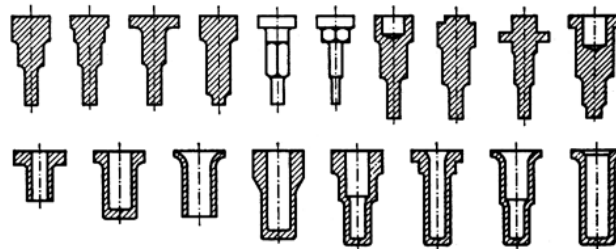


Figura 8 - Estrusione diretta.

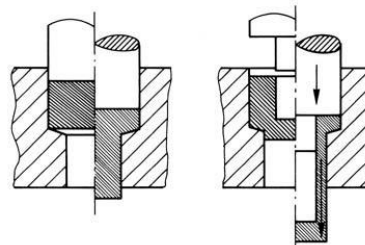


Figura 9 - Principio di estrusione diretta.

### 2.5.3 Estrusione inversa

In questo caso il flusso del materiale è diretto in senso contrario al movimento del punzone. La pressione esercitata dal punzone porta il materiale allo stato plastico; poiché non è possibile alcun sfogo laterale, il materiale trafile nell'apertura di forma anulare fra matrice e punzone, in senso contrario al movimento di quest'ultimo.

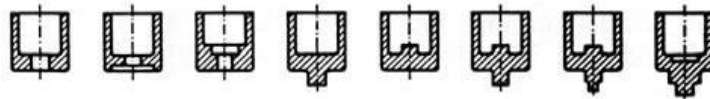


Figura 10 - Estrusione inversa.

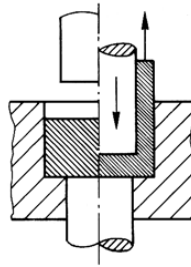
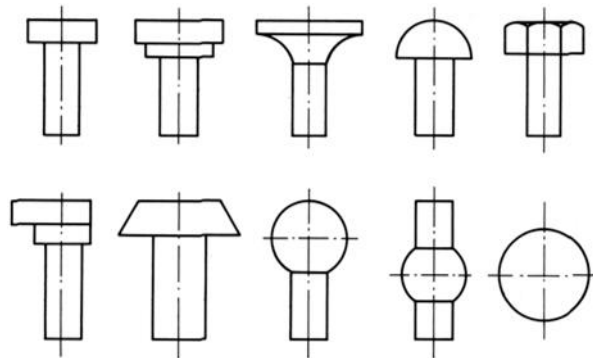


Figura 11 - Principio di estrusione inversa.

## 2.6 Ricalcatura

La ricalcatura (upset forging) è un processo di deformazione, mediante il quale si esercita una forza di compressione lungo l'asse longitudinale del pezzo. È comunemente usato per la produzione in serie di pezzi quali viti, rivetti, bulloni a testa esagonale, aste per valvole ecc ecc.



**Figura 12 - Particolari realizzati mediante ricalcatura.**

Molto importante in questo processo, il rapporto di ricalcatura. Se non si tiene conto o si sceglie una forma errata, il pezzo si ripiega, questo fenomeno può essere facilmente osservato nell'andamento delle fibre.

## **2.7 Piegatura**

La piegatura è un processo di deformazione mediante il quale si ottengono particolari piegati o anulari da sviluppi piani. Si ha piegatura libera quando il pezzo da deformare, giacendo libero su due appoggi, viene deformato da un punzone. Ci sono diversi tipi di piegatura come la piegatura libera, la piegatura in stampo, la piegatura a V e la piegatura ad U.

### **2.7.1 Piegatura a "V"**

Il procedimento serve a produrre pieghe ad angolo. Il particolare indeformato è sistemato nella parte inferiore dell'utensile di piegatura, dopodiché si abbassa il punzone fissato alla slitta della pressa, ed ha inizio la deformazione.

Durante il procedimento il pezzo assume in ciascuna fase curvature diverse. Nella posizione finale del punzone il pezzo è assoggettato ad una pressione per spianarne i lati. Il ritorno elastico del pezzo dipende dall'entità di questa pressione, dalla forma del punzone e dal materiale in deformazione. Si ottengono particolari assai precisi quando la forma definitiva viene impartita attraverso un colpo breve e secco. Per questa ragione si usano volentieri per questo processo presse ad azione d'urto.

### **2.7.2 Piegatura a "U"**

Si tratta di un procedimento analogo alla piegatura a "V", con la differenza che in questo caso lo stampo e il punzone sono sagomati ad "U". In questo tipo di piegatura occorre badare particolarmente al ritorno elastico. A seconda del materiale deformato e delle dimensioni del pezzo, le ali devono essere ripiegate in maggiore o minor misura al di là dell'angolo finale di piegatura. L'operazione si esegue con ganasce a registrazione laterale fine, per cui la piegatura a "U" è eseguibile su qualsiasi pressa.

### **2.7.3 Sollecitazione del materiale**

La sollecitazione varia lungo la sezione dell'elemento piegato.

La fibra interna è compressa lungo la direzione delle ali, è stirata trasversalmente alla direzione della forza.

La fibra esterna è allungata nella direzione delle ali, è compressa trasversalmente alla direzione delle ali.

La fibra neutra non subisce variazioni di lunghezza e si trova a metà della sezione. La posizione reale della fibra neutra è spostata verso la curva di raggio minore, in relazione allo spessore  $s$  della lamiera ed al raggio  $r$  di piegatura.

#### **2.7.4 Ritorno elastico**

L'entità del ritorno elastico dipende da:

- limite di snervamento del materiale
- tipo di piegatura (libera o in stampo)
- raggio di piegatura (quanto minore, tanto maggiore è la zona deformata plasticamente)

La conseguenza di ciò è che gli utensili di piegatura hanno un angolo minore di quello del pezzo finito.



## 3 Modellazione in Simufact e relative analisi

Uno degli obiettivi di questa tesi è quello di andare a modellare in ambiente virtuale di simulazione un processo di deformazione a freddo.

Prendendo volutamente il processo più semplice effettuato all'interno dell'azienda F.lli Mauri s.r.l., cioè il processo di una chiave a brugola, si andrà a valutare la risposta del software tramite lo studio delle fasi di processo della chiave.

Primo step è stato la creazione del modello nell'ambiente di simulazione.

### 3.1 Inserimento dei dati nel modello

Inizialmente si inseriscono i dati del processo nel software.

In seguito si spiegherà la modalità di inserimento dei dati nell'ambiente di simulazione per l'operazione di trafilatura.

#### 3.1.1 Inserimento del pezzo

Prima operazione per l'inserimento dei parametri all'interno del modello è quello di stabilire le dimensioni di partenza del nostro filo metallico virtuale che entrerà all'interno della trafilatura.

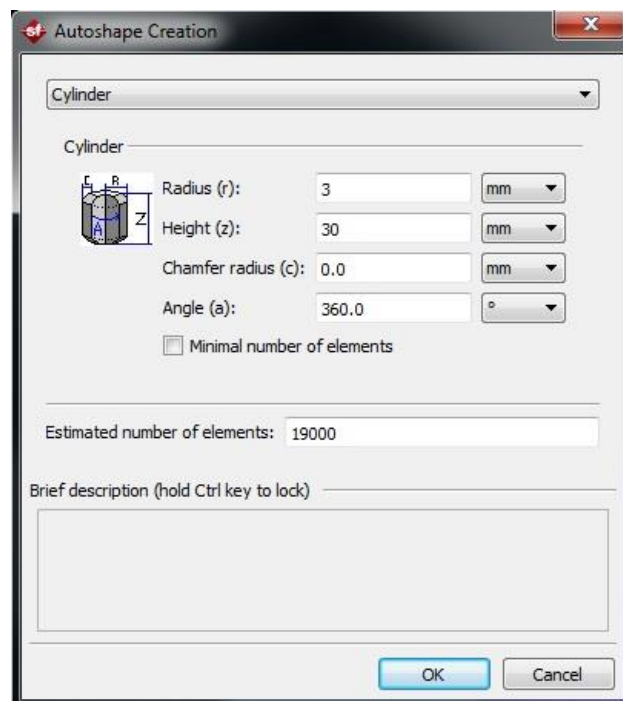


Figura 13 - Inserimento del pezzo nel modello di Simufact.

Il diametro stabilito è il diametro  $\varnothing 6$ . Per quanto riguarda la lunghezza si è scelta una lunghezza minima accettabile per far sì che ci siano meno elementi nella mesh, quando viene calcolata successivamente. Meno elementi, meno tempo di calcolo del solutore, quindi ottenimento dei risultati più veloce.

Come si vede dall'immagine numero 13 si inseriscono le dimensioni nel modello del cilindro pre impostato dal software, che successivamente verrà creato da Simufact e poi inserito nel modello.

### 3.1.2 Inserimento dell'attrito

Per quanto riguarda l'attrito tra il pezzo e l'utensile matrice, dall'esperienza aziendale e dalle caratteristiche dichiarate dal fornitore di olio, si tratta di una buona lubrificazione ad olio, dove per Simufact corrisponde a 0,1.

Come mostrato qui di seguito nell'immagine numero 14 si va a scorrere la barra dei valori dell'attrito finché non si ottiene quello stabilito:

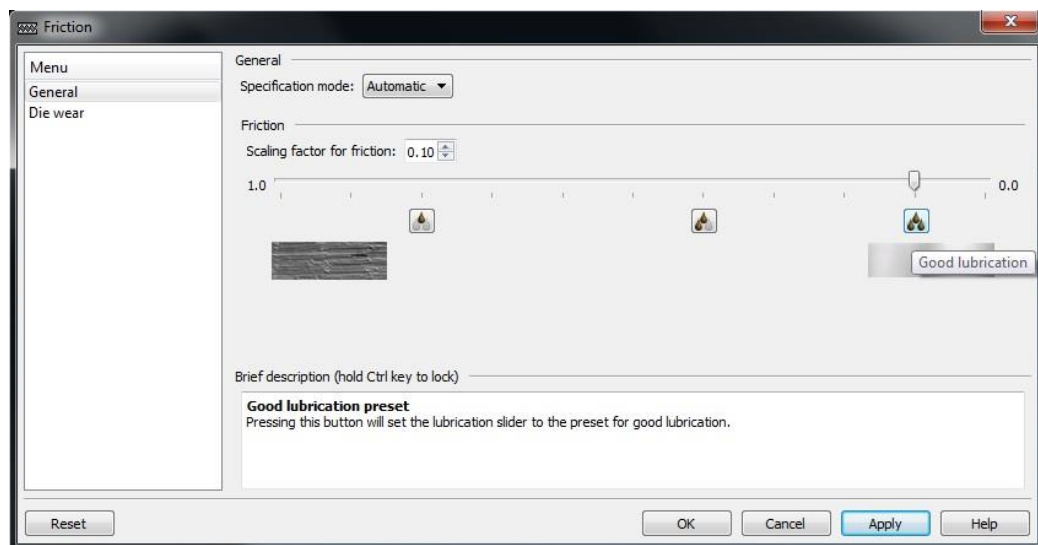


Figura 14 - Inserimento nel modello di Simufact del coefficiente d'attrito.

Ci sono vari modelli all'interno del software per definire l'attrito, ma si è optato per l'inserimento automatico.

### 3.1.3 Inserimento della temperatura di lavorazione

Altro parametro da inserire nel modello di simulazione è quello della temperatura di lavorazione tra il pezzo e gli utensili/matrici.

Si tratta di deformazione a freddo quindi la temperatura sarà quella ambiente, cioè 20°C per entrambi.

La temperatura che si presenta con un simbolo di fuoco azzurro stabilisce la temperatura di partenza delle matrici, quella rappresentata dal fuoco rosso stabilisce invece la temperatura iniziale del pezzo di partenza.

Qui di seguito l'inserimento delle due temperature:

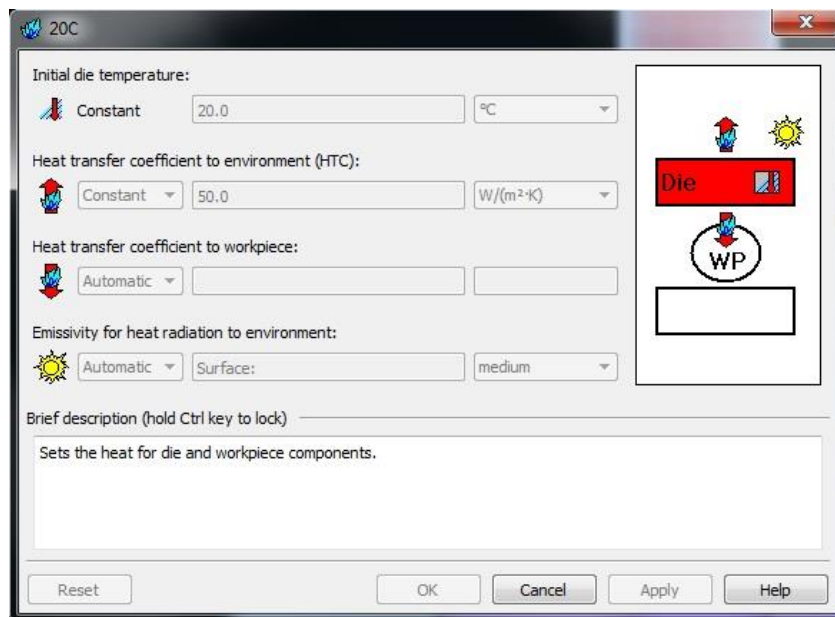


Figura 15 - Inserimento nel modello di Simufact della temperatura delle matrici/utensili.

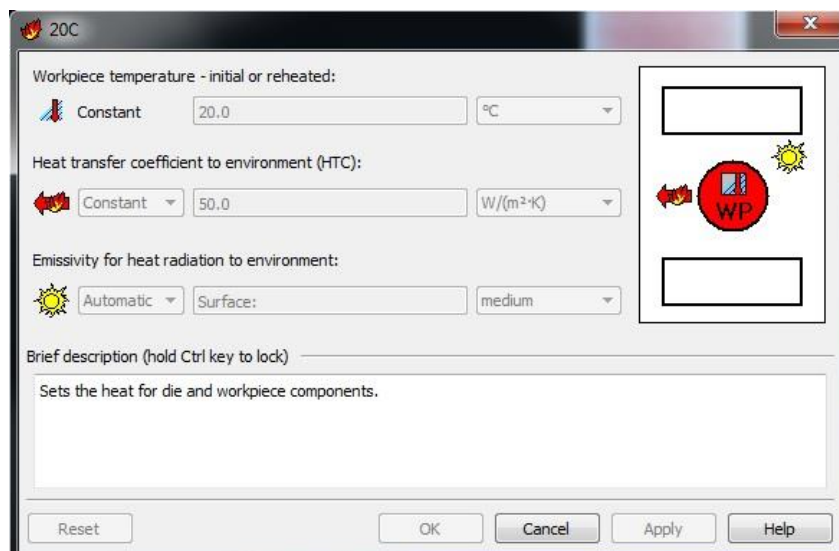


Figura 16 - Inserimento nel modello di Simufact della temperatura del pezzo.

### 3.1.4 Inserimento della velocità di deformazione con la pressa

Successivamente si inserisce la velocità di deformazione tramite la pressa:

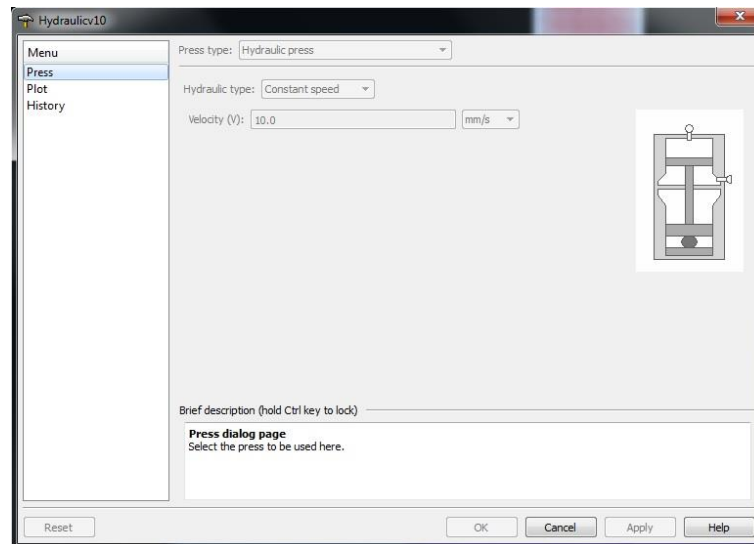


Figura 17 - Inserimento nel modello di Simufact della velocità di deformazione in [mm/s].

Ogni fase di processo avrà la sua velocità di deformazione costante, il valore è dato dalle curve di velocità della pressa fornite dal costruttore.

In base alla fase di processo, può essere che la velocità di deformazione nella simulazione sia data da una spina che si andrà a creare tramite la funzione di autoshape, esattamente come per il pezzo.

La spina darà la forza di trafilatura che in realtà è data dalla pressa, quindi all'interno del modello la spina sarà collegata alla pressa precedentemente creata che fornirà lo spostamento.

Tramite le impostazioni della tabella di contatto, si dirà che la spina non fornisce alcuna deformazione sul pezzo.

### 3.1.5 Inserimento delle matrici

Nel caso della trafilatura, si sono create le trafilature in SolidWorks con i relativi diametri e successivamente inserite all'interno del modello.

Le geometrie delle matrici sono fornite da CAD.

Per ogni diametro di riduzione esisterà un modello di simulazione in Simufact.

### 3.1.6 Inserimento del materiale

Per quanto riguarda l'inserimento del materiale, visto che il materiale in questione è il C30, non presente nella libreria del software, si è deciso di optare per il C35, ovvero il materiale più vicino a quello utilizzato nella realtà.

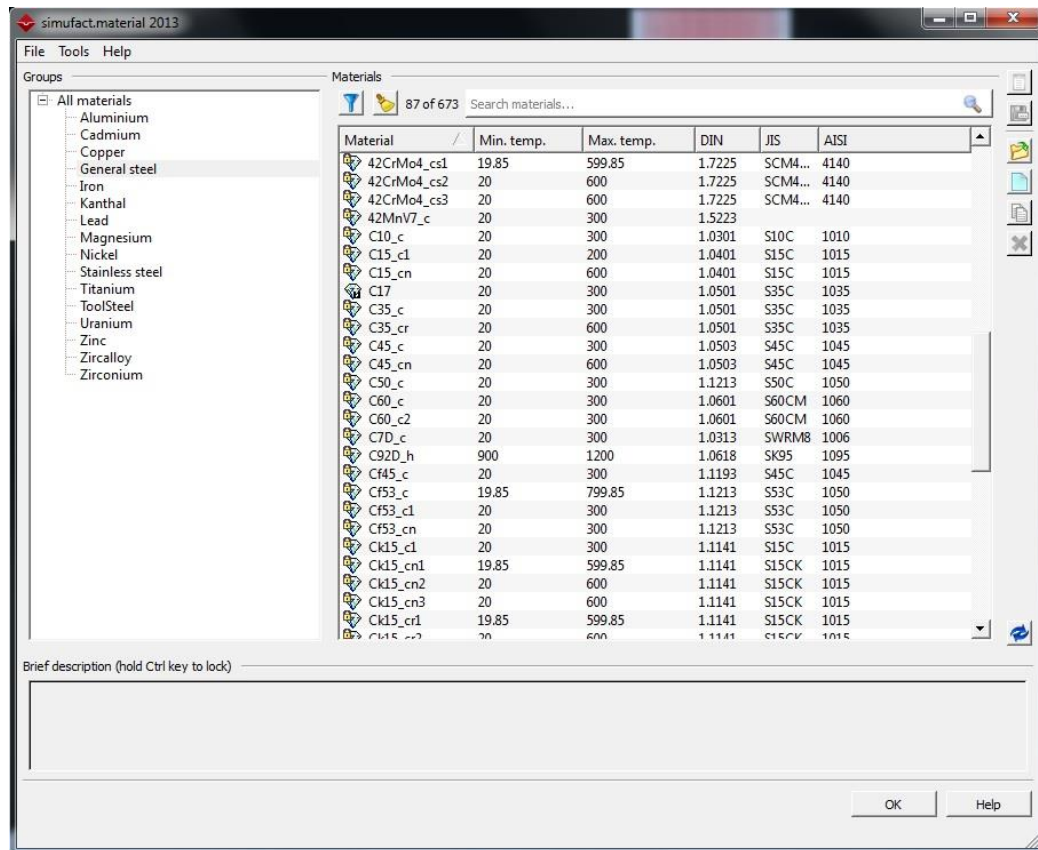


Figura 18 - Libreria dei materiali di Simufact.

### 3.1.7 Inserimento parametri di deformazione e di simulazione

Si stabiliscono le condizioni di deformazione, come la corsa del punzone o la corsa del coltello per il taglio.

Dopo aver importato e posizionato nel modello le matrici create in SolidWorks e stabilito tutti i parametri, si va a creare la mesh più adatta per il pezzo e per la lavorazione.

La mesh che fornisce il software è valida, quindi non c'è bisogno di andare a modificare nessun parametro di essa.

L'albero del modello si presenterà così:

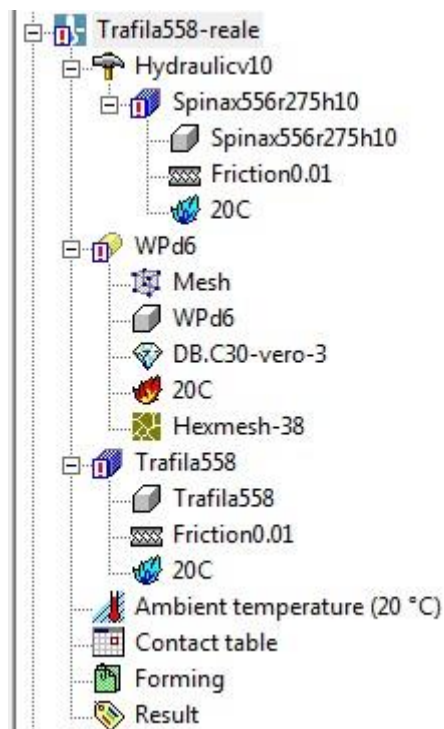
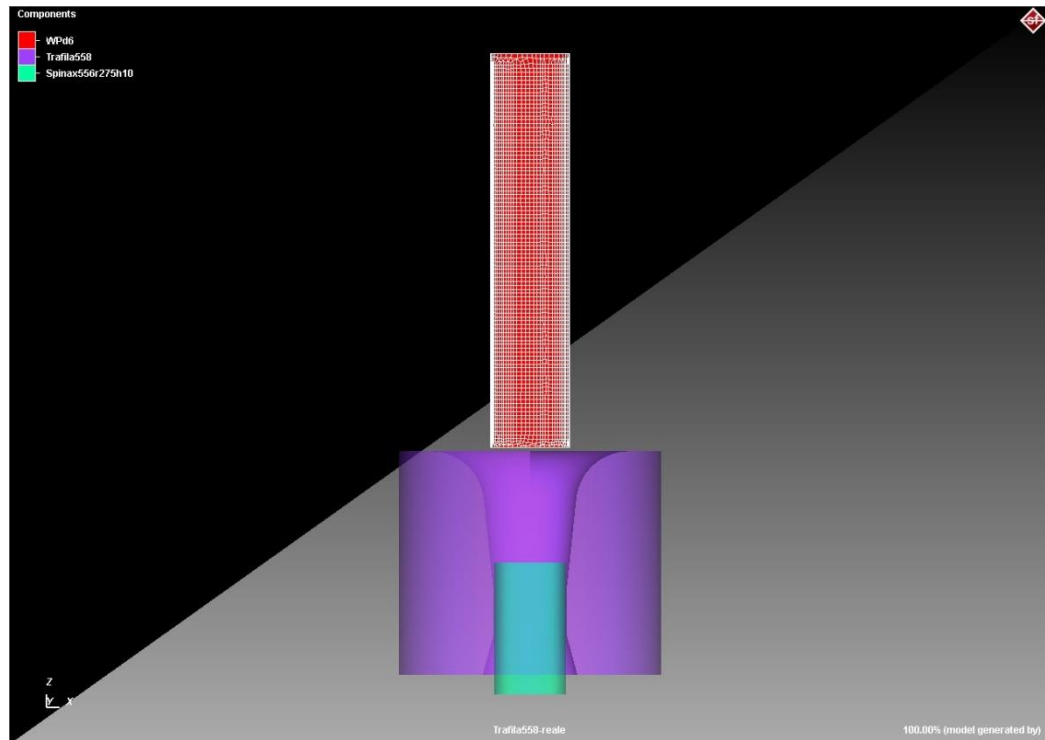


Figura 19 - Albero delle caratteristiche del modello di trafilatura.

Nell'albero delle caratteristiche si vede ogni oggetto caricato nel modello.  
La schermata di visualizzazione si presenterà così:



**Figura 20 - Modello completo, schermata di visualizzazione di Simufact.**

Il cilindro di colore rosso simula il filo metallico che entrerà in trafila, in questa immagine è visualizzato con la mesh adottata.

La trafila è di colore viola e inoltre è stata creata una spina, di colore verde, che simula, come detto precedentemente, il tiro della pressa.

All'interno dei parametri della deformazione, è stato impostato che la spina sarà incollata all'estremità inferiore della porzione di filo, quindi non appena partirà la simulazione, la spina tirerà il cilindro e lo farà passare attraverso la trafila; a quel punto il pezzo si deformerà e il solutore calcolerà la deformazione.

## **3.2 Analisi del processo di trafilatura**

Il primo processo di lavorazione, la trafilatura, è uno dei più importanti per questa tesi, perché grazie a questo processo si può andare a valutare i risultati ottenuti con Simufact.

Tramite la trafilatura si andrà ad analizzare la risposta del programma, perché, come spiegato in teoria, durante questo processo esiste una variazione delle caratteristiche meccaniche in rapporto alla riduzione di sezione.

### **3.2.1 Variazione delle caratteristiche meccaniche in rapporto alla riduzione di sezione**

L'incrudimento del metallo trafilato aumenta proporzionalmente alla riduzione di sezione effettuata.

Più la riduzione di sezione aumenta e più il materiale trafilato incrudisce, variando le sue caratteristiche meccaniche.

Quando un materiale viene trafilato, viene incrudito. L'incrudimento è un fenomeno metallurgico per cui un materiale metallico risulta rafforzato, quindi aumentano le caratteristiche meccaniche, in seguito ad una deformazione plastica a freddo.

## **3.3 Approccio teorico con Simufact 12.0.3**

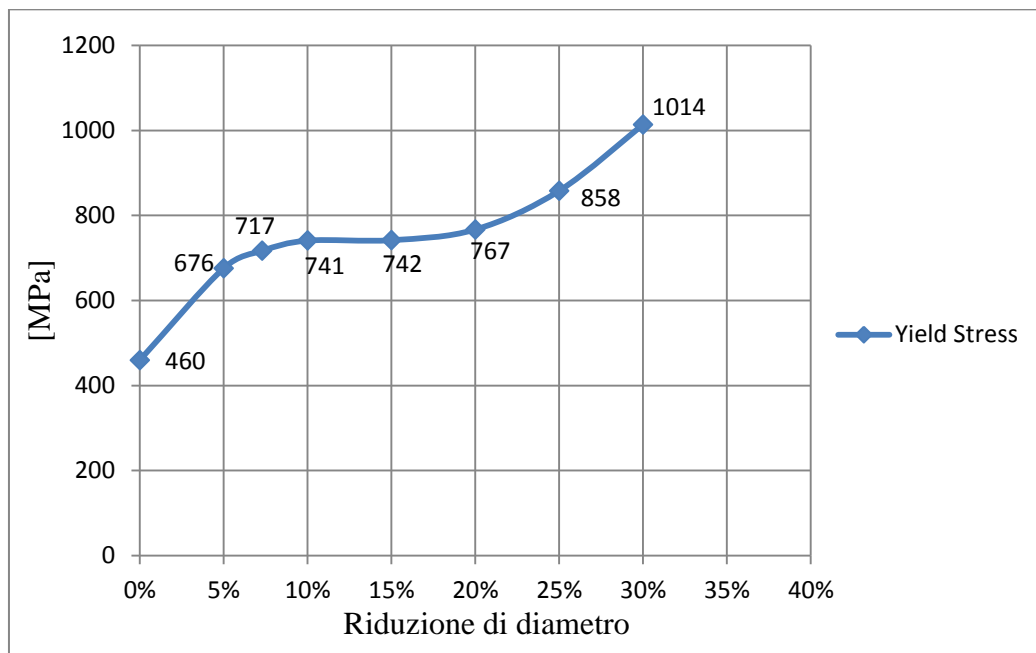
Inizialmente si è svolto un lavoro più teorico con l'utilizzo del software, per assicurarci che il software desse una risposta simile ai grafici teorici trovati in bibliografia.

Partendo dal diametro  $\varnothing 6$ , si sono calcolati i diametri di riduzione di sezione riducendo il diametro di partenza del 5%, 10%, 15% ecc ecc.

Quindi si sono create delle trafile in SolidWorks con i rispettivi diametri di riduzione che poi saranno caricati nei loro rispettivi modelli, come visto precedentemente.

In asse delle ordinate sono presenti i risultati della distribuzione del carico di snervamento trovato in Simufact post trafilatura. In asse delle ascisse è rappresentata la relativa percentuale di riduzione di diametro presa in esame.





**Figura 21 - Approccio teorico sperimentale. Distribuzione del carico ad ogni riduzione di sezione fino ad arrivare alla rottura.**

Osservando la curva con i diversi step delle percentuali di riduzione di diametro, si può notare come lo snervamento rimane più o meno costante durante la riduzione dei diametri e questo è dovuto all'assenza di variazione di volume durante la trafilatura.

Lo scopo della realizzazione del grafico è quello di andare a valutare il risultato (Yield Stress) che fornisce Simufact quando c'è la riduzione di sezione. Quindi per ogni riduzione di sezione del diametro di trafilatura avremo un valore di stress diverso.

Ci si ferma a valutare la curva quando il pezzo si rompe. La rottura avviene perché c'è troppa riduzione di sezione, questo avviene all'incirca tra il 25% e il 30% di percentuale di riduzione di diametro.

Come si può osservare nella simulazione del diametro  $\varnothing 4.20$ , Simufact blocca la simulazione e ci da un risultato di rottura.

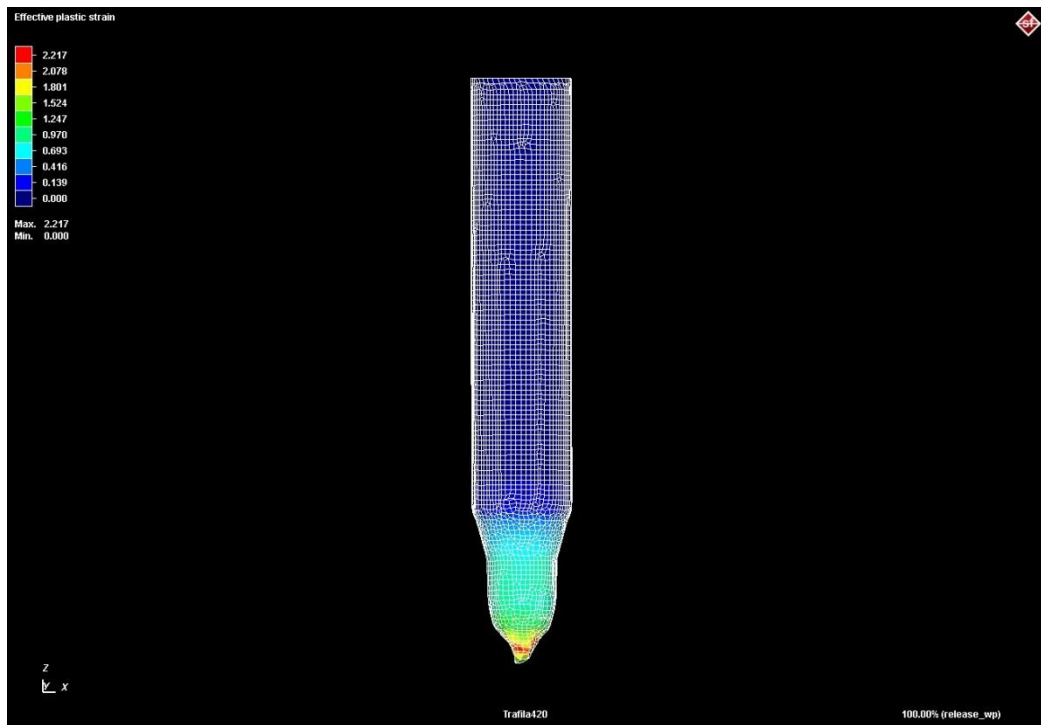
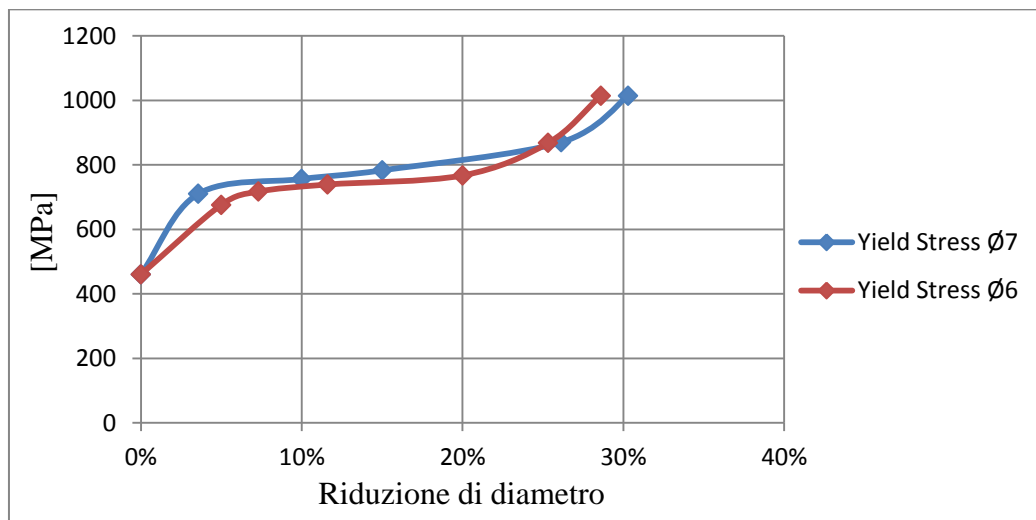


Figura 22 - Rottura del pezzo alla riduzione di  $\text{Ø}4.20$ .

### 3.3.1 Analisi trafilatura con diversi diametri di partenza

Dopo aver fatto l'analisi di trafilatura, si è voluto dimostrare che cambiando il diametro di partenza, ad esempio  $\text{Ø}7$ , con le stesse riduzioni di sezione, si ottengono gli stessi risultati.

Nella figura 23 viene mostrato il grafico trovato con i diversi diametri  $\text{Ø}6$ ,  $\text{Ø}7$  messi a confronto, si dimostra che cambiando il diametro di partenza con la stessa percentuale di riduzione le curve sono sovrapponibili.



**Figura 23 - Distribuzione carico di snervamento sulle percentuali di riduzione - Ø6 vs Ø7.**

Dopo aver eseguito le simulazioni con un filo di partenza di diametro Ø7 con le relative percentuali di riduzione, abbiamo verificato che per qualsiasi diametro di partenza, con le stesse riduzioni di percentuale di diametro, le considerazioni fatte precedentemente erano valide.

Infatti il fenomeno dell'incrudimento è un fenomeno metallurgico che non dipende da fattori dimensionali ma solo metallurgici.

In trafilatura si può assumere il carico di snervamento come valore limite, perché la trafilatura è una lavorazione gravosa che provoca incrudimento del materiale, quindi innalza le proprietà meccaniche del materiale ma allo stesso tempo porta la tensione di rottura vicina alla tensione di snervamento.

Infatti quando si va a simulare di trafilare gli spezzoni con le varie riduzioni di diametro, come si può notare dai grafici, fino al 5 % di riduzione del diametro c'è l'innalzamento della distribuzione della tensione di snervamento, quindi delle caratteristiche meccaniche. Dopo il 5% c'è un mantenimento delle caratteristiche meccaniche pressoché costante e lineare.

Si arriva ad un certo punto di distribuzione di carico di circa 1014 MPa dove la sezione non resiste più e avviene la rottura e questo accade dopo circa 26% di riduzione del diametro.

### 3.3.2 Confronto curve diverso diametro e diverso materiale

Dopo l'analisi con Simufact di diversi diametri di partenza dove abbiamo verificato che le due curve con le stesse percentuali di riduzione di diametro, ma di-

verso diametro di partenza, possono essere sovrapponibili, si è scelto di fare un'altra verifica, quella di cambiare materiale e osservare un confronto con curve con le stesse variazioni di diametro ma con diverso materiale.

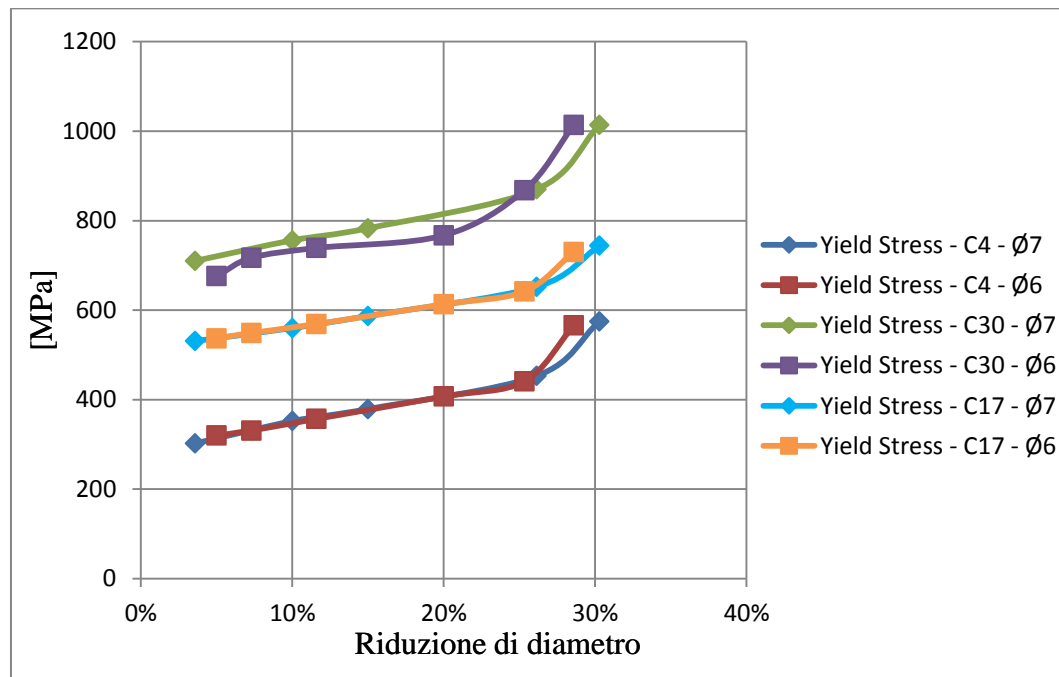


Figura 24 - Confronto risultati diversi diametri con diversi materiali.

Come si può notare dal grafico mostrato in figura numero 24, mettendo a confronto le curve con diverso materiale e diverso diametro di partenza ma con la stessa percentuale di riduzione, le curve sono all'incirca sovrapponibili.

### 3.3.3 Considerazioni riguardanti l'approccio teorico

Valutato l'approccio iniziale, si è pensato di andare ad analizzare la risposta del software del processo di trafilatura e di creare tre livelli di modelli di trafilatura. Il primo, chiamato livello 0, sarà il modello di trafilatura con inserito il materiale trovato nella libreria dei materiali di Simufact, quindi il C35.

Il secondo, chiamato livello 1, sarà il modello di trafilatura con la modifica delle caratteristiche meccaniche di partenza del materiale fornito da Simufact, quindi nei modelli di livello 1 ci sarà un materiale C35 modificato.

Per l'ultimo livello, che sarà chiamato livello 2, ci sarà la creazione da zero del materiale, quindi si importerà la curva reale del materiale con i dati trovati in laboratorio.

### 3.4 Analisi trafilatura livello 0

Verificati i grafici con la simulazione l'approccio teorico, si è andati a creare la stessa curva sempre partendo dal diametro di partenza  $\varnothing 6$  con trafile esistenti in azienda.

Percentuali di riduzione	0%	5%	7.3%	11.60%	20%	25.33%	28.60%
Diametro trafilato [mm]	6	5.70	5.58	5.30	4.80	4.48	4.30

**Tabella 1 - Diametri di trafilatura presenti in azienda.**

Il diametro  $\varnothing 5.58$  corrisponde a una riduzione percentuale di 7.3% ed è il diametro trafilato che viene usato dall'azienda per la produzione della chiave a brugola.

Con queste percentuali di riduzione di sezione reali esistenti in azienda, si è andati a creare in Solidworks le nuove trafile con i diametri esistenti.

Qui di seguito le immagini delle tavole delle parti create in SolidWorks ridisegnate ed ottimizzate per il processo di simulazione, da poter esportare in Simufact.

Le tavole successivamente rappresentate sono quindi le tavole delle trafile con i diametri scelti per i provini delle prove di trazione successive.

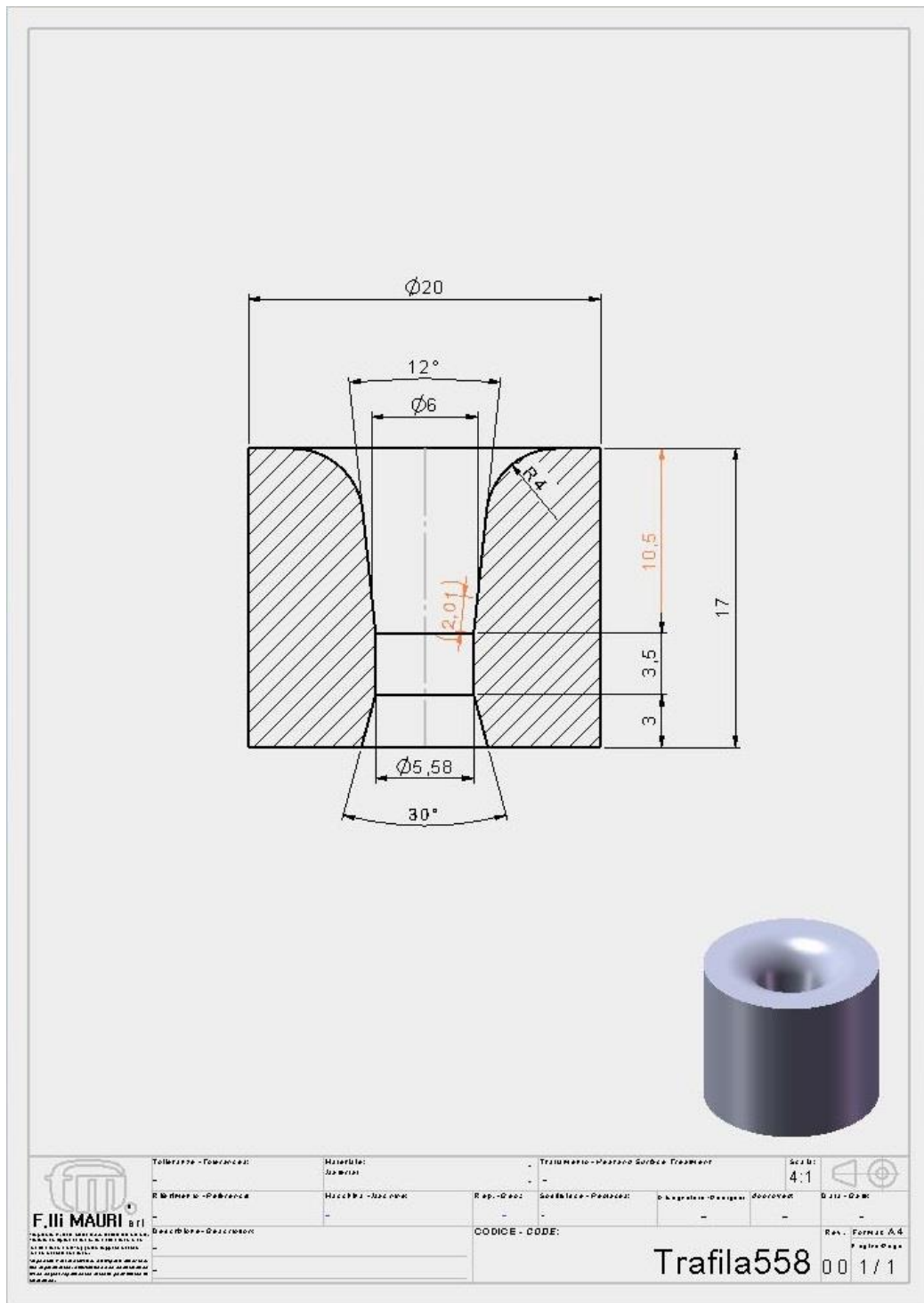


Figura 25 - Tavola trafile Ø5.58.

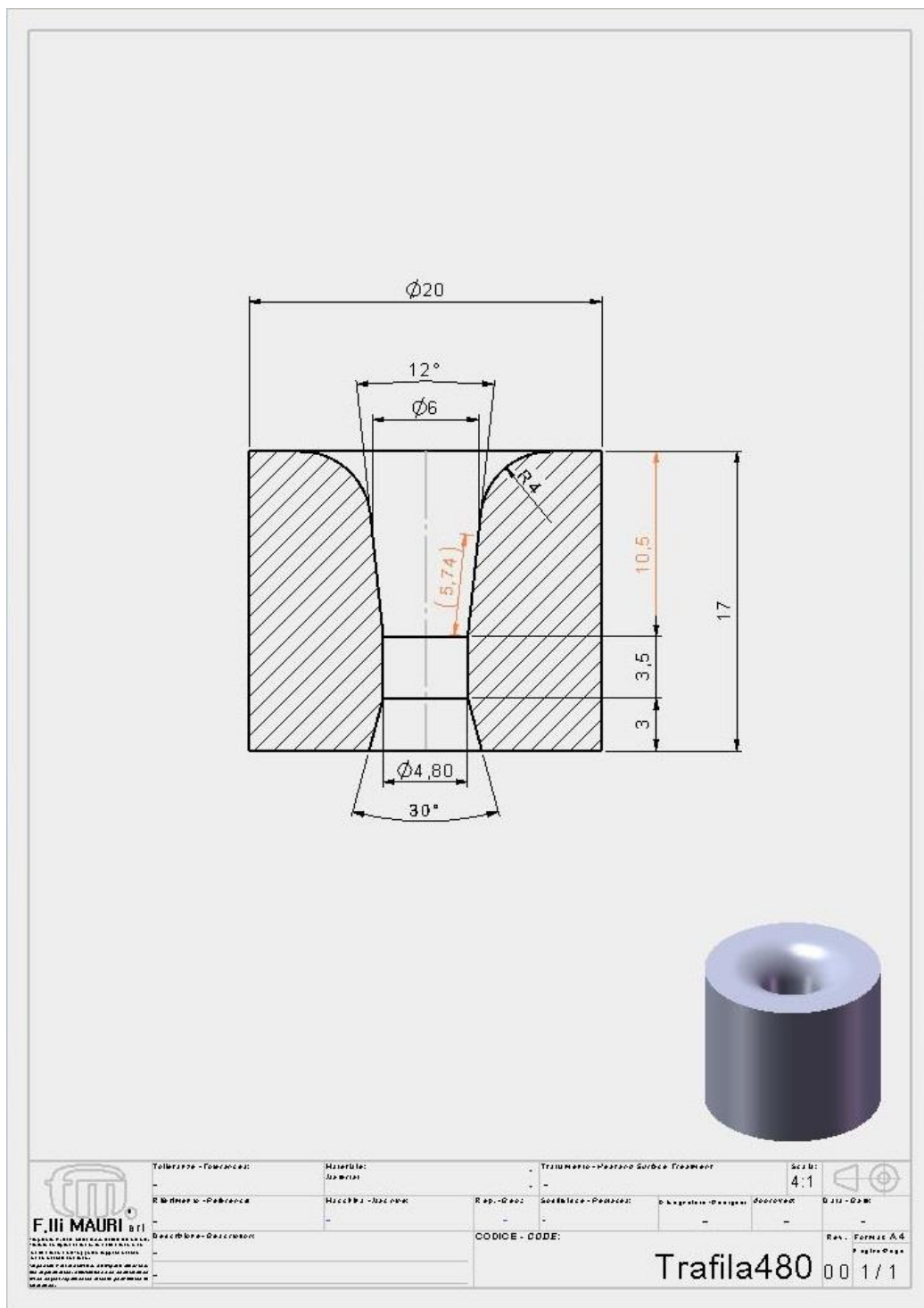


Figura 26 - Tavola trafilata Ø4.80.

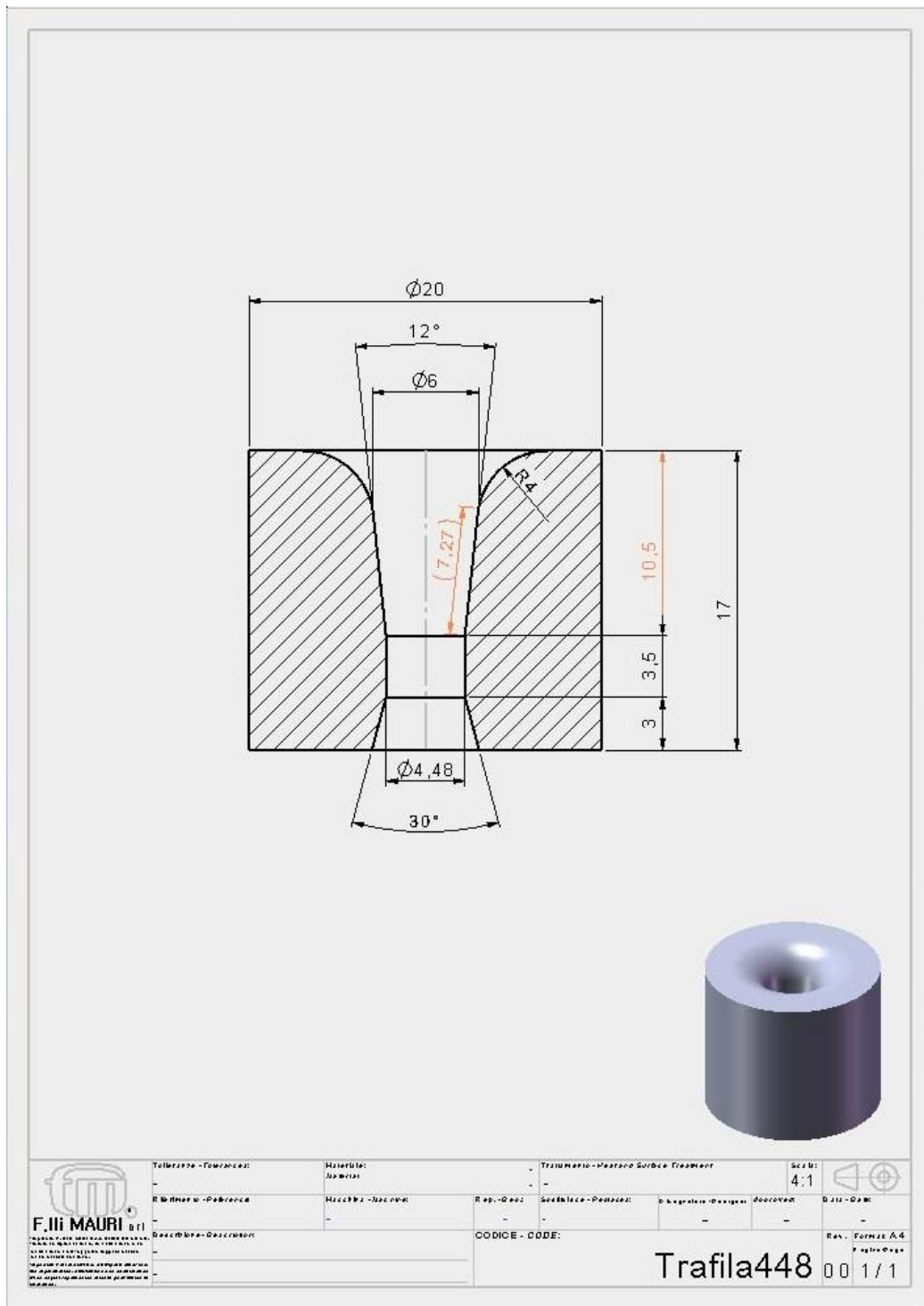
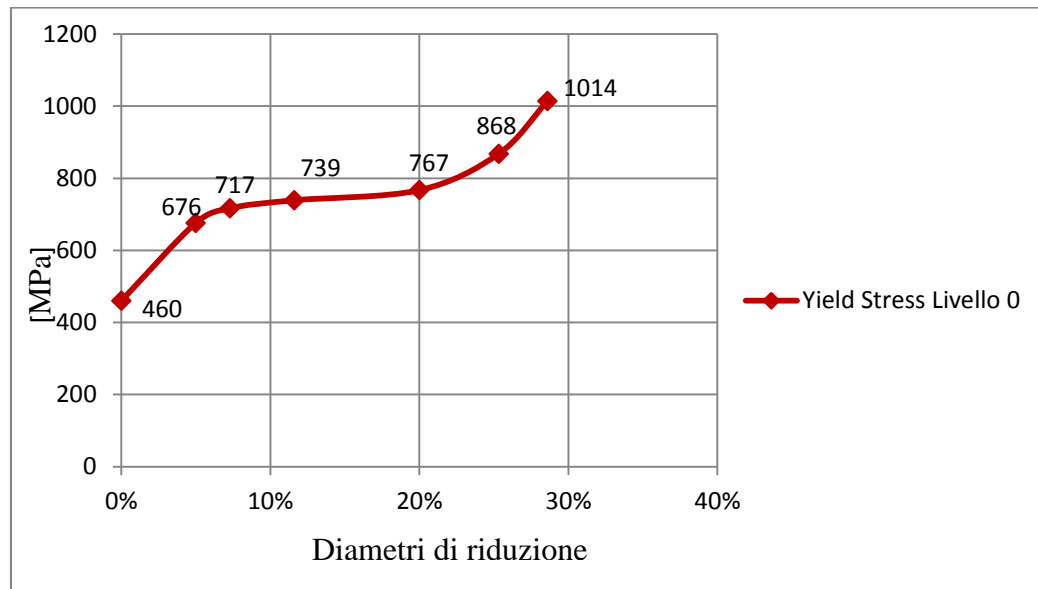


Figura 27 - Tavola trafile Ø4.48.



Con i risultati ottenuti dal software si è ottenuto questo grafico, mostrato in figura 28:



**Figura 28 – Risultati trafilatura livello 0.**

Si nota come la curva dopo le prime percentuali di diametro con relativo aumento delle caratteristiche meccaniche, diventa pressoché costante fino ad arrivare ad un punto di rottura.

Questi risultati derivanti dalla simulazione ricalcano quelli ottenuti nell' approccio teorico.

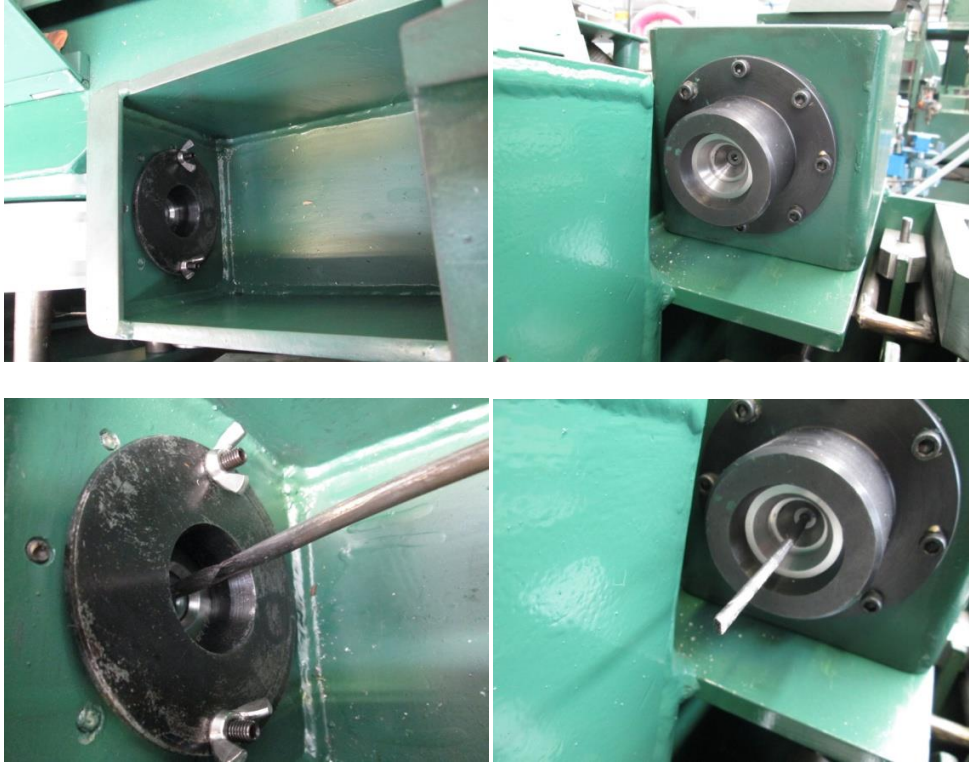
### 3.5 Creazione dei provini per la prova di trazione

Qui di seguito la tabella numero 2 con i diametri scelti con le rispettive percentuali di riduzione per la realizzazione in macchina dei provini per la prova di trazione:

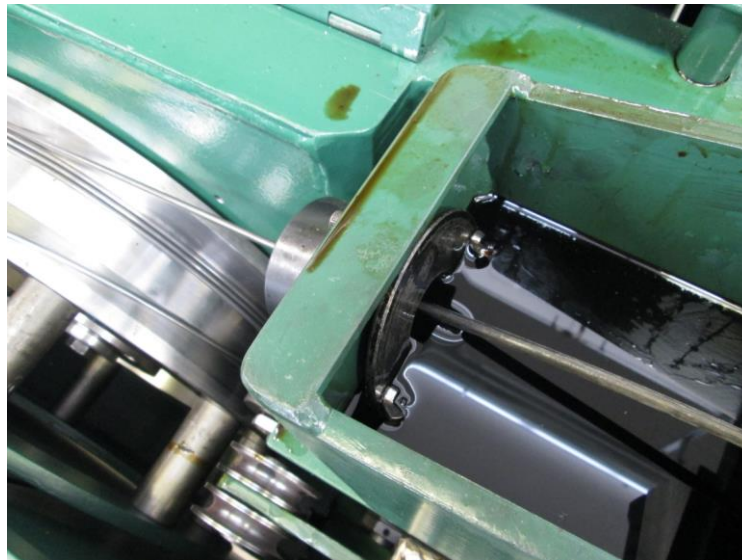
Percentuali di riduzione	0%	7.3%	20%	25.33%	28.60%
Diametro trafilato [mm]	6	5.58	4.80	4.48	4.30

**Tabella 2 - Diametri di trafilatura scelti per la creazione dei provini.**

Qui sotto sono rappresentate delle immagini che mostrano il montaggio del filo metallico in trafilatura. Successivamente è presente un'immagine scattata durante la lavorazione di trafilatura.



**Figura 29 - Alcune immagini della macchina di trafilatura durante il montaggio.**



**Figura 30 - Trafilatura in lavorazione.**

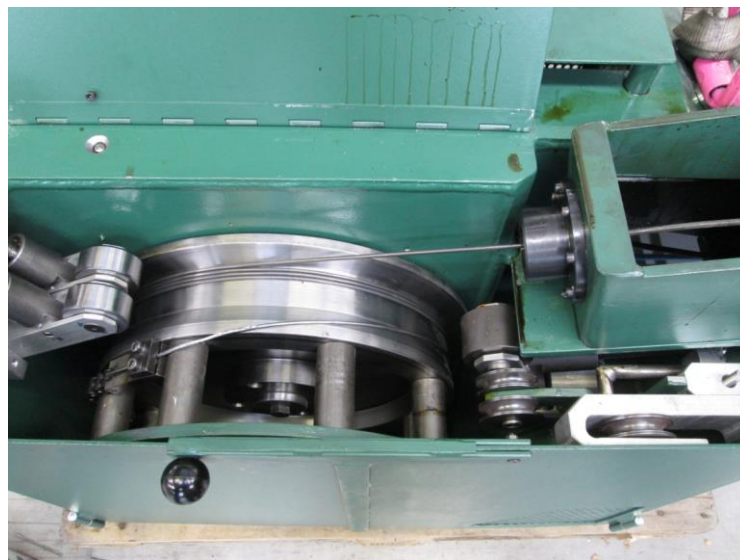
L'obiettivo delle prove di trazione è quello di andare a valutare se c'è congruenza tra la realtà e la simulazione; inoltre in questo modo è stato eseguito un test del materiale di partenza.

Qui di seguito l'immagine 31, che raffigura un esempio di filiera montata in macchina. Si tratta della trafila con diametro di riduzione  $\text{Ø}5.58$ .



**Figura 31 - Esempio di trafila ( $\text{Ø} 5.58$ )**

Le caratteristiche meccaniche trovate in laboratorio saranno poi inserite all'interno del software e si tornerà a simulare il processo e valutare la risposta del programma nei 3 livelli.



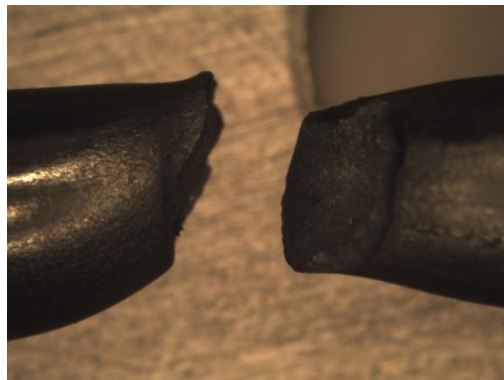
**Figura 32 - Trafila in lavorazione.**

Durante la trafilatura del diametro  $\text{Ø}4.30$  si è rotto il filo metallico alla fine del cono di trafilatura, proprio come aveva previsto Simufact.

Qui di seguito le immagini del filo metallico rotto.  
Durante la trafilatura, il filo viene tirato e la sezione di rottura è una rottura duttile, come si può vedere molto bene dalle immagini riportate.



**Figura 33 - Ø4.30 rotto durante la trafilatura.**



**Figura 34 - Immagine con il proiettore dei profili della sezione rotta del diametro Ø4.30.**

Dopo aver visto la rottura del filo metallico con la trafilatura Ø4.30, si è deciso di utilizzare come terza riduzione di diametro la trafilatura Ø4.48 che corrisponde ad una riduzione di diametro di circa il 25% contro il 28% circa della precedente. In macchina, si è verificato ciò che è contenuto in bibliografia, cioè che si arriva fino al 26% circa come limite massimo di riduzione di diametro partendo dallo stesso diametro iniziale, perchè si è notato anche visivamente durante la trafilatura del diametro Ø4.48 che il filo era al limite di rottura.



**Figura 35 - Trafilatura a Ø4.48.**

Dopo aver eseguito la trafilatura delle tre riduzioni di diametro, si è pronti per andare in laboratorio ad eseguire le prove di trazione su di essi.

Quindi dopo aver scelto i diametri che si andranno a confrontare con quelli della prova di trazione, si mostrano in tabella numero 3 i risultati della trafilatura di livello 0.

Diametri [mm]	Ø6	Ø5.58	Ø4.80	Ø4.48
Yield stress Livello 0 [MPa]	367	686	802	837

**Tabella 3 - Risultati analisi trafilatura livello 0.**

### 3.6 Prove di trazione

Dopo aver creato i provini si effettuano le prove di trazione per per il diametro di partenza e ogni riduzione di diametro.

Ovviamente saranno gli stessi diametri del test di trafilatura, quindi avremo fili con questi diametri:

- Ø 6
- Ø 5.58
- Ø 4.80
- Ø 4.48

Per prima cosa in laboratorio si è andati ad eseguire delle prove di trazione sul materiale di partenza Ø6, poiché l'obiettivo primario è quello di andare a verificare le caratteristiche dichiarate dal fornitore al momento della vendita.

In secondo luogo le caratteristiche meccaniche trovate del materiale di partenza, come detto precedentemente saranno inserite nel modello di simulazione realizzato in Simufact che costituirà il livello 1.

Lo scopo è quello di confrontare i risultati delle simulazioni delle trafilature realizzate in Simufact e le caratteristiche meccaniche trovate tramite la prova di trazione di ogni riduzione di diametro.

### 3.6.1 Analisi dei dati delle prove di trazione

Dopo aver realizzato i provini, eseguito le prove di trazione e analizzato i dati, troviamo le seguenti curve di trazione.

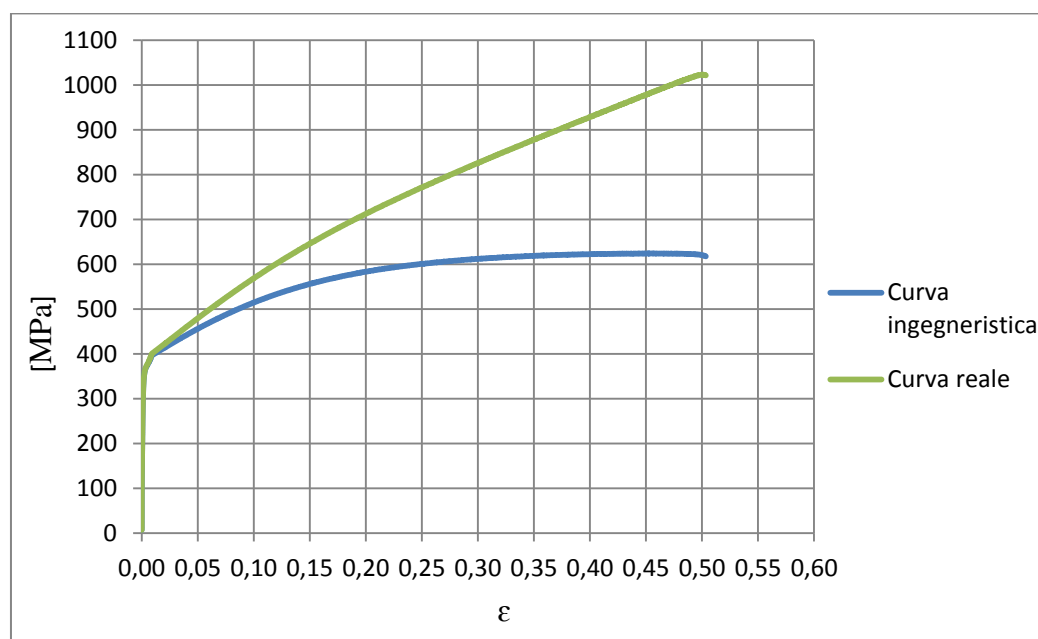


Figura 36 - Esempio di grafico prova di trazione. Curva reale e curva ingegneristica.

Per ogni diametro si sono fatte tre prove così da fare una media dei risultati. Le prove che non sono andate bene o che non hanno fornito risultati soddisfacenti sono state scartate.



**Figura 37 - Esempio di provino rotto di una prova di trazione.**

Il software della macchina della prova di trazione ci fornisce la curva del materiale in esame e le caratteristiche meccaniche.

Sorge un problema, dovuto al fatto che i provini non sono perfettamente dritti, perché sono piegati o ondulati in quanto nella macchina di trafilatura passano su una puleggia.

Il modulo elastico quindi non è corretto, perché l'estensimetro posizionato sul nostro provino durante la prova non misura correttamente, in quanto il filo è ondulato; ne deriva dunque che il software della macchina della prova di trazione fornisce risultati non propriamente corretti.

I dati forniti dal software della macchina della prova di trazione, saranno rielaborati in Excel al fine di costruire la curva esatta.

Dopo aver considerato tutto questo, si fa la media dei valori trovati nelle varie prove e si trovano questi valori:

Diametri [mm]	Ø6	Ø5.58	Ø4.80	Ø4.48
Carico di snervamento [MPa]	367	647	723	776
Carico di rottura [MPa]	635	741	866	932

**Tabella 4 - Carichi medi trovati con le prove di trazione.**

La tabella numero 4 fornisce la media dei carichi reali trovati con la prova di trazione.

Pertanto, i carichi trovati per il diametro Ø6 di partenza serviranno per l'inserimento delle caratteristiche meccaniche corrette del materiale in Simufact nella trafilatura di livello 1 e di livello 2.

Gli altri carichi trovati delle riduzioni di sezione andranno confrontati con quelli che prodotti dalle simulazioni in Simufact.

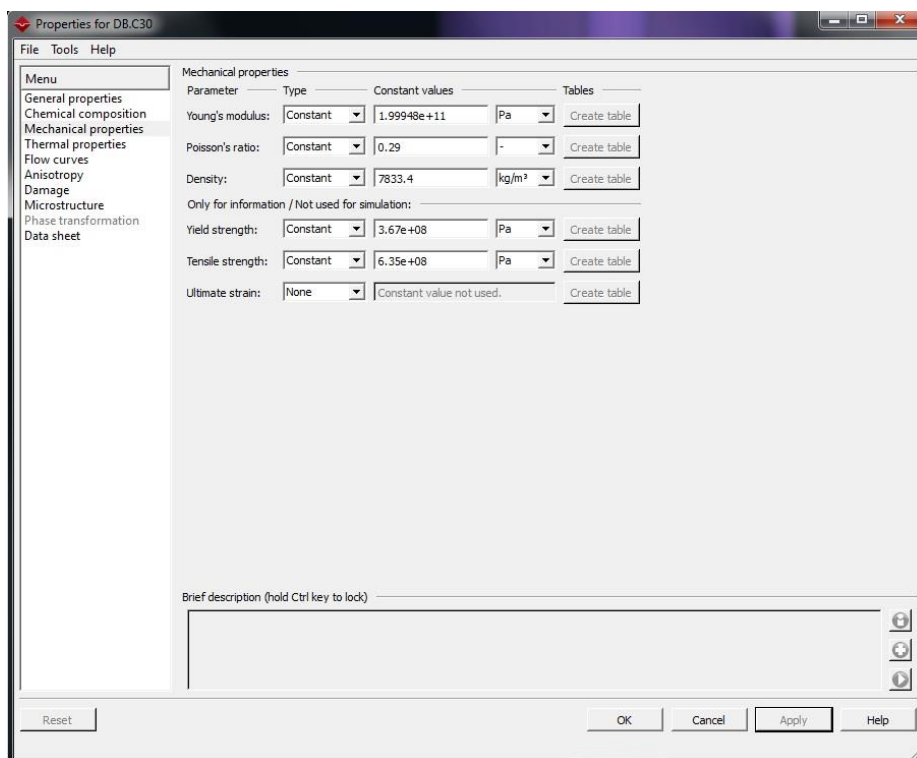


### 3.7 Analisi trafilatura livello 1

Per quanto riguarda la trafilatura di livello 1, si inseriranno all'interno dei modelli le caratteristiche meccaniche trovate durante la prova di trazione del diametro Ø6 grezzo, mantenendo invariate le altre caratteristiche e proprietà del materiale.

Diametri [mm]	Ø6
Carico di snervamento [MPa]	367
Carico di rottura [MPa]	635

**Tabella 5 - Caratteristiche meccaniche Ø6.**



**Figura 38 - Inserimento caratteristiche meccaniche modificate del materiale.**

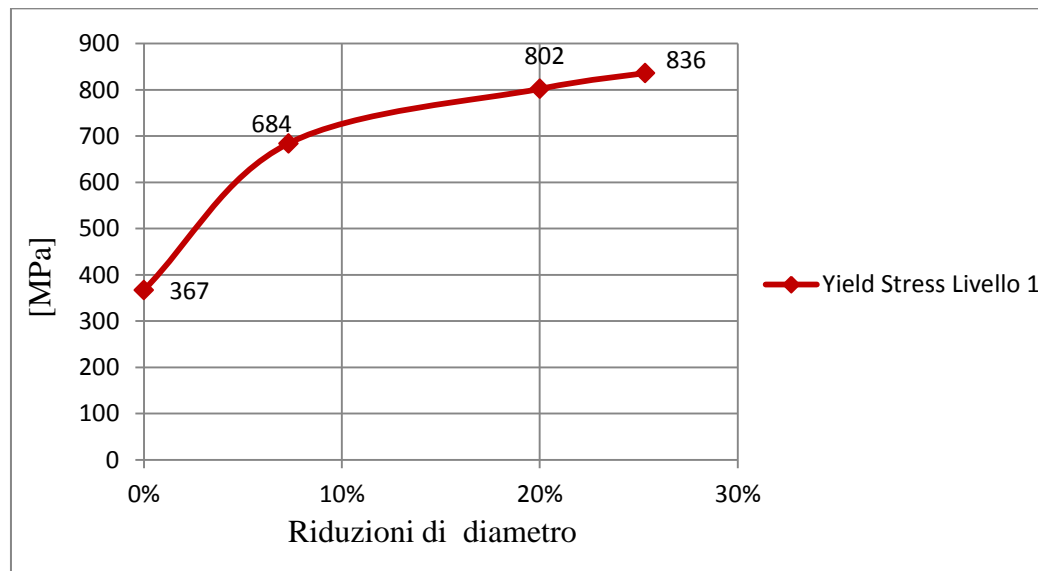
Una volta inserito il materiale corretto all'interno del modello, si eseguiranno tutte le simulazioni con le riduzioni di diametro.

Diametro	Ø6	Ø5.58	Ø4.80	Ø4.48
Yield stress Livello 1 [MPa]	367	684	802	836

**Tabella 6 - Risultati analisi trafilatura livello 1.**



Si nota che modificando soltanto le caratteristiche meccaniche, l'andamento delle caratteristiche meccaniche non cambia poichè si ottengono all'incirca gli stessi valori del livello 0.



**Figura 39 - Risultati trafilatura livello 1.**

### 3.8 Analisi trafilatura livello 2

Dopo aver visto nella trafilatura di livello 1 che i valori dei carichi trovati non cambiano di molto, si va a valutare la trafilatura di livello 2 con la creazione del materiale da zero nel modello con i dati della curva trovata in laboratorio.

Con l'analisi delle prove di trazione sostenute avremo a disposizione tutti i dati e le caratteristiche reali del materiale in esame.

Qui di seguito la curva trovata in Excel e successivamente la curva inserita in Simufact che rispetterà il comportamento reale del materiale.

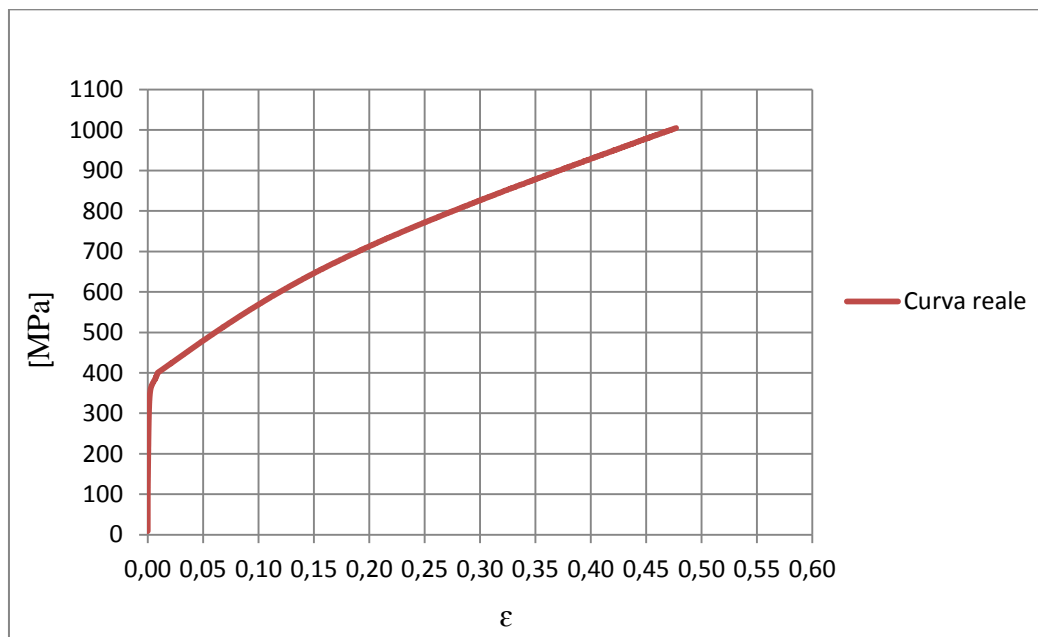


Figura 40 - Curva reale da inserire nel software.

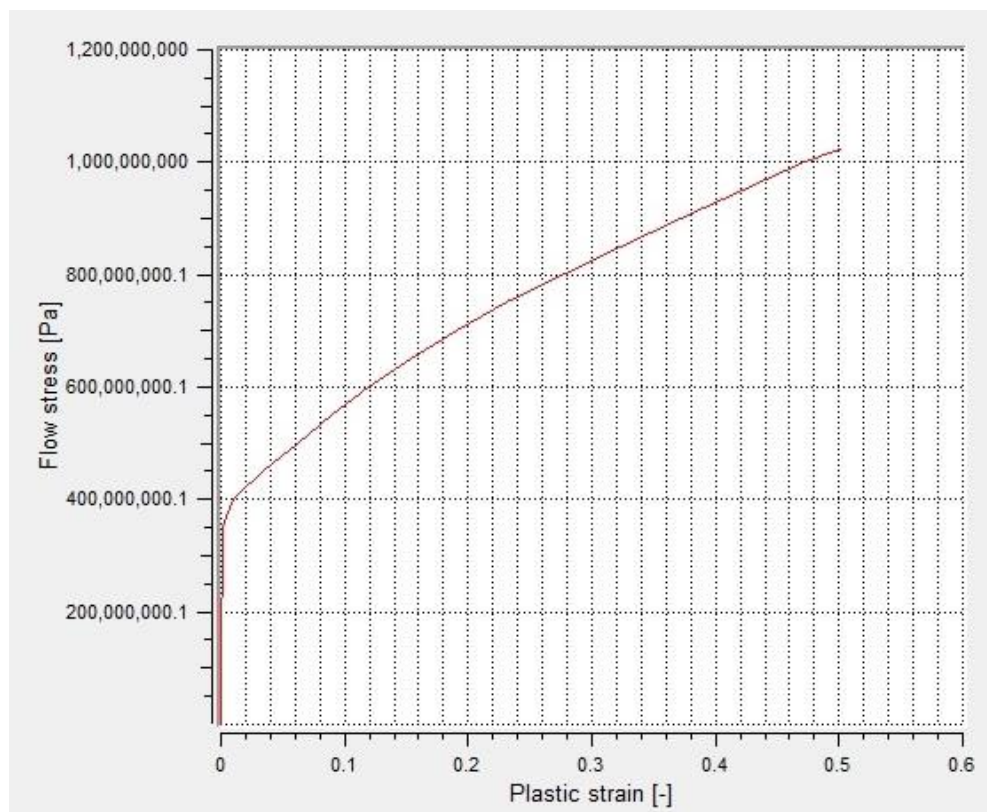


Figura 41 - Inserimento curva reale trovata in laboratorio nel software.

Dopo aver fatto analizzare al software il livello 2 troviamo questi risultati di carico, come mostrato in tabella numero 7.

Diametro	Ø6	Ø5.58	Ø4.80	Ø4.48
Yield stress Livello 2 [MPa]	367	650	924	1022

Tabella 7 - Risultati analisi trafilatura livello 2.

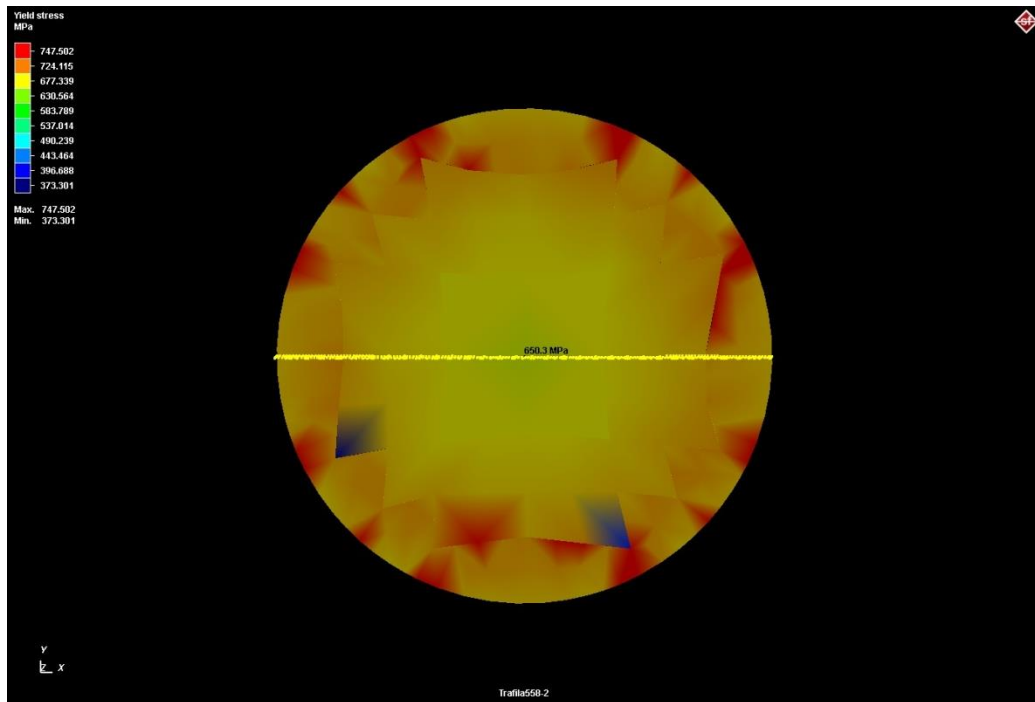
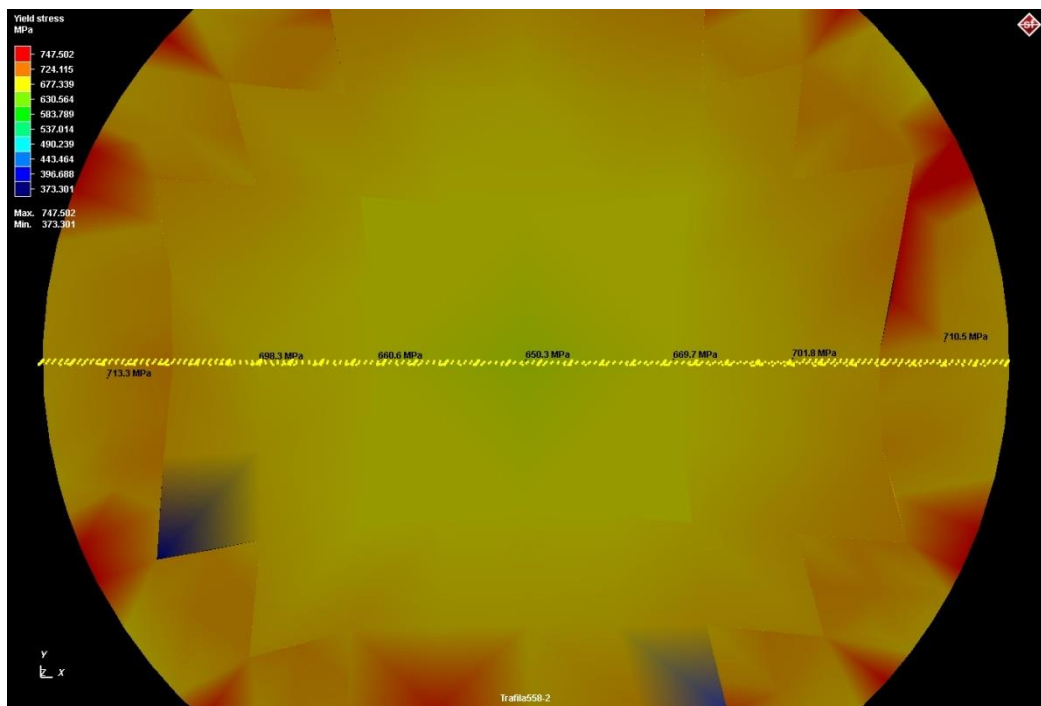


Figura 42 - Yield stress Livello 2 - Ø5.58.



**Figura 43 - Distribuzione Yield stress Livello 2 - Ø5.58.**

Nella figura 43, nel caso del diametro Ø5.58 si può vedere come varia il carico dopo la trafilatura con il materiale creato da zero.

Se utilizziamo la funzione del software di visualizzazione del carico nel punto al centro del provino, come si può vedere nella sezione, il carico di 650 MPa si avvicina notevolmente con quello calcolato dalla media di valori della prova di trazione di 647 MPa.

Nell'immagine numero 43, si è fatta una selezione di valori del carico lungo tutta la sezione, ottenendo come risultato una variazione degli stessi lungo il diametro. A causa della deformazione non omogenea nell'operazione di trafilatura si possono avere sforzi residui.

Questi sforzi sono dovuti al fatto che, durante l'operazione, la sollecitazione sul materiale non è uniassiale ma durante la riduzione di sezione nel cono di trafilatura sono presenti, oltre allo sforzo di tiro nella direzione z, anche sforzi nelle direzioni x e y.

Nella figura numero 43 dunque si vede la variazione dello sforzo sulla sezione. Per quanto riguarda i valori di carico che sono stati trovati per i diametri Ø4.80 e Ø4.48 non si sono registrati risultati significativi, poiché non mi rappresentava una variazione di carico sulla sezione.

---

Diametri [mm]	Ø6	Ø5.58	Ø4.80	Ø4.48
Yield stress Laboratorio [MPa]	367	647	723	776
Yield stress Livello 0 [MPa]	367	686	802	837
Yield stress Livello 1 [MPa]	367	684	802	836
Yield stress Livello 2 [MPa]	367	650	924	1022

**Tabella 8 - Tabella riassuntiva analisi trafilatura.**

Nella tabella numero 8 sono confrontati i risultati dei tre diversi livelli.

Si può notare come se si vanno a modificare all'interno del software soltanto le caratteristiche meccaniche (livello 1), la curva del materiale all'interno del modello non cambia e quindi non ci sono variazioni ai fini del risultato.

Il livello 2, con inserita la curva esatta trovata in laboratorio tramite le prove di trazione, riporta risultati che possono essere considerati reali.

### 3.9 Analisi del processo di taglio

Dopo l'analisi di trafilatura con i tre livelli, si passa alla fase di taglio. Il filo trafilato passa attraverso una parte fissa, denominata bussola di taglio, e un coltello che avvolge completamente il filo e andrà a tagliarlo per creare lo spezzone che poi andrà nella stazione successiva. Come detto precedentemente in teoria, il dispositivo di taglio con coltello chiuso esegue tagli privi di deformazione e perfettamente ortogonali all'asse del filo. Ai fini del calcolo di simulazione per questa fase si deve valutare solo la deformazione avvenuta e se il programma fornisce gli stessi risultati della realtà.

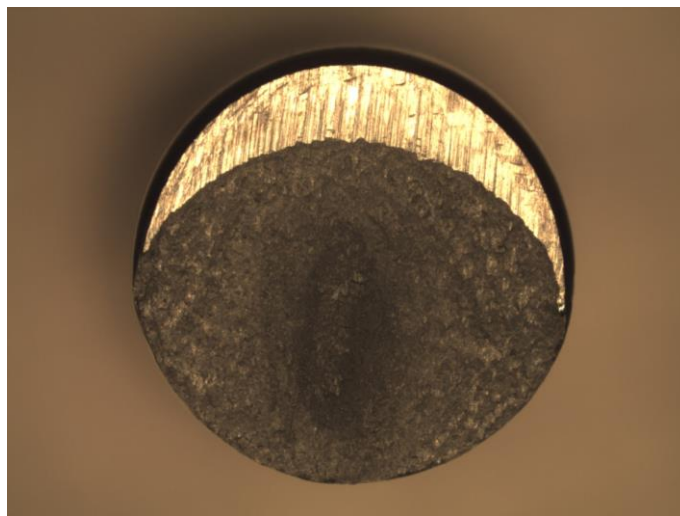


Figura 44 - Vista frontale spezzone tagliato al proiettore di profili.

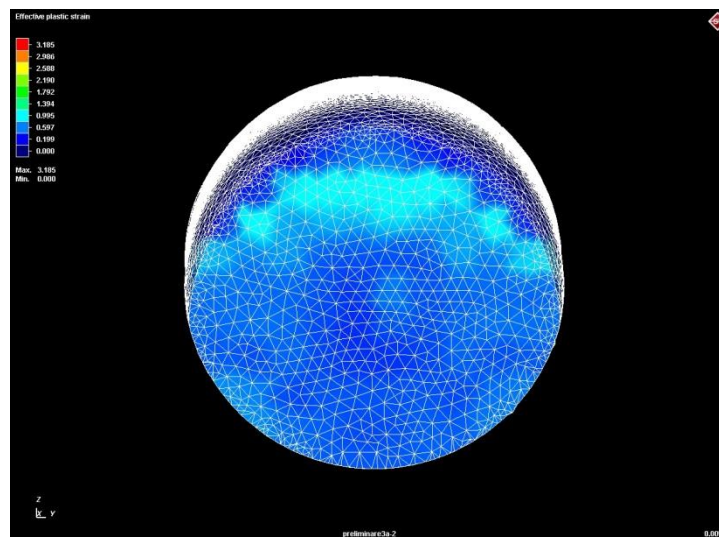


Figura 45 - Vista frontale Simufact taglio a coltello chiuso.

Nella figura numero 44, ottenuta con il proiettore di profili, si può vedere la fase di processo di taglio a coltello chiuso, per poi confrontarla con l'immagine ottenuta da Simufact. Si nota così come il programma fornisca gli stessi risultati di deformazione per questa fase di processo.

Per quanto riguarda il taglio chiuso in simulazione, si è scoperto un errore della versione di Simufact 12.0.3; il solutore andava in sfRemap error, cioè quando avrebbe dovuto dividere lo spezzone dal pezzo che avrebbe dovuto tagliare, il software non era in grado di riconoscere la mesh e non effettuava l'operazione. Non divideva lo spezzone dal pezzo che doveva tagliare.

All'interno della funzione del taglio del programma, infatti, il pezzo che avrebbe dovuto essere tagliato sarebbe dovuto scomparire, invece rimaneva attaccato agli ultimi elementi dello spezzone.

Si è segnalato il problema al consulente, che ha avvisato la casa madre della questione e quindi nella prossima versione del software se ne è garantita la risoluzione.

Per ovviare questo ostacolo, si sono utilizzati due modelli di simulazione per effettuare il taglio a coltello chiuso, che non è la procedura propriamente corretta, in quanto il taglio dovrebbe avvenire in unica fase di processo. Si è inserito, nel secondo modello, il risultato ottenuto con il processo errato e successivamente nel secondo modello si è aggirato il problema con la funzione di trimming, che separa i pezzi senza alcuna deformazione.

Per le fasi successive abbiamo adottato il taglio a coltello aperto, così da evitare la scomposizione della fase di taglio, in quanto si ha la sicurezza del risultato, senza effetti sulla simulazione della fase di processo dell'estrusione e della ricalcatura.

Il taglio a coltello aperto presenta lo stesso risultato con diversa deformazione sulla sezione risultante (mezzaluna).

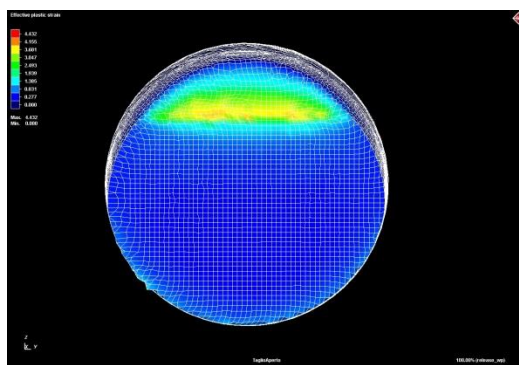
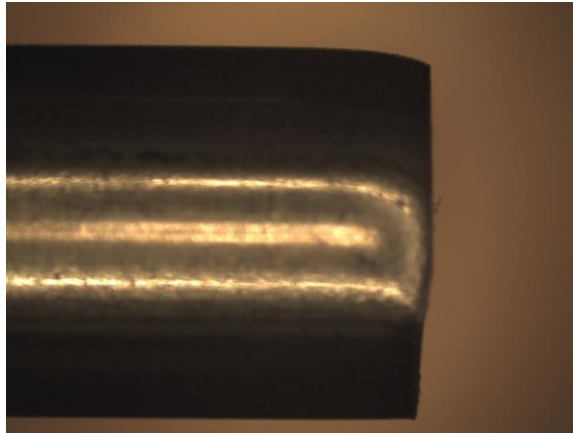
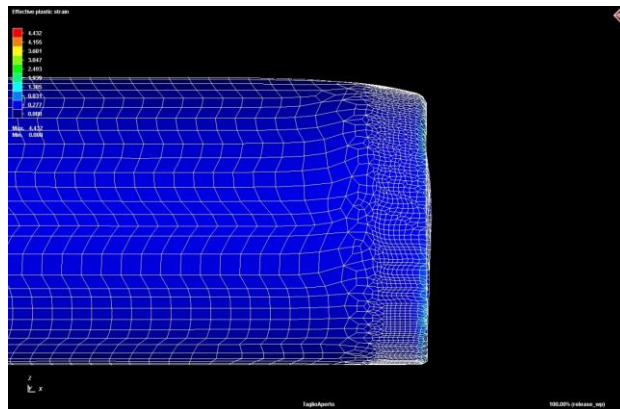


Figura 46 - Vista frontale Simufact taglio a coltello aperto.



**Figura 47 - Vista laterale dello spezzone tagliato con il proiettore di profili.**



**Figura 48 - Vista laterale dello spezzone tagliato con Simufact.**

Come si può osservare inoltre dalle immagini numero 47 e numero 48 della vista laterale, lo spezzone rimane tagliato ma anche deformato sulla parte superiore, dove è presente la mezzaluna. Il taglio porta ad una deformazione iniziale delle fibre superiori verso il basso.

Questo è dovuto ad una deformazione fino a che la sezione resiste. Man mano che il coltello avanza la sezione resistente diventa piccola, fino al punto in cui cede e avviene la separazione.

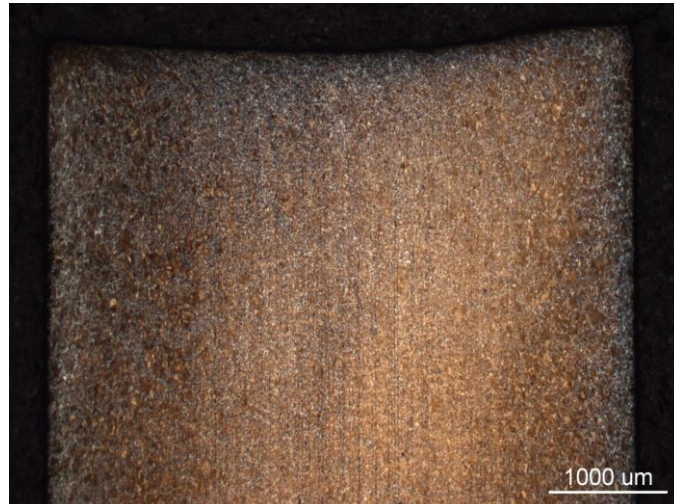
Nelle immagini della sezione laterale dello spezzone tagliato si può notare come la simulazione del taglio rispecchia la realtà.

Questo sarà poi lo spezzone che sarà inserito nella prossima stazione dell'estrusione e della ricalcatura.



### 3.9.1 Metallografia taglio

Qui di seguito la metallografia della sezione di taglio.



**Figura 49 - Metallografia sezione taglio a coltello chiuso. Attacco NITAL 1.4% (25x).**

L'immagine numero 49 fornisce l'andamento delle fibre della sezione durante la fase di processo del taglio. Sulla parte superiore della testa si può vedere come i grani tendono a spostarsi verso sinistra. Questo è dovuto al fatto che il coltello quando taglia lo spezzone deforma le fibre verso la direzione di taglio.

### **3.10 Analisi estrusione e ricalcatura**

Dopo l'analisi di trafilatura e quella di taglio, si passa alla fase di deformazione a freddo del materiale, in particolare dell'estrusione delle teste esagonali e della ricalcatura dello smusso.

Questa fase mantiene il pezzo fermo, le matrici si muovono e danno la forma desiderata alle estremità dello spezzone. Si stabilisce la corsa delle matrici che andrà ad eseguire la deformazione esagonale e a fine corsa eseguirà lo smusso. Dato che si sta parlando di un processo simmetrico per entrambe le estremità, si procederà a considerarne solo una.

Di seguito si fa una valutazione della realizzazione dell'estrusione e soprattutto dello smusso, in quanto è stata una problematica affrontata dall'azienda negli ultimi anni.

Per quanto riguarda questa fase, abbiamo svolto una analisi della deformazione di due versioni di matrici utensili.

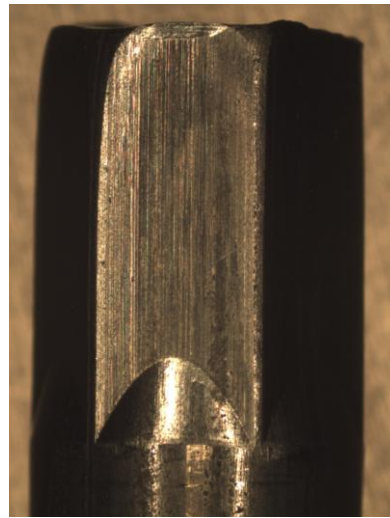
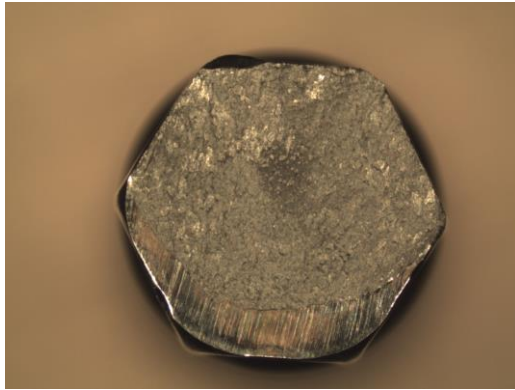
La vecchia versione di matrici, da ora in poi chiamata B, non garantiva al prodotto finito una buona finitura superficiale e il totale riempimento del materiale all'interno delle stesse, per cui non realizzava totalmente lo smusso.

La nuova versione di matrici, chiamata A, è stata sviluppata e migliorata.

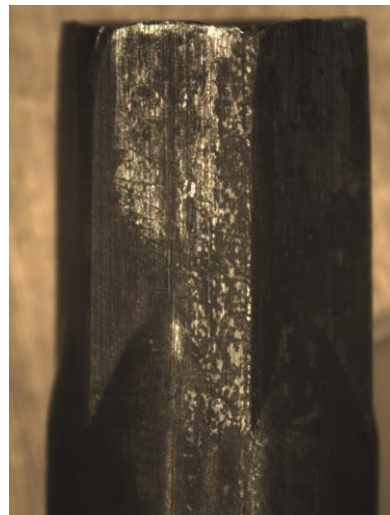
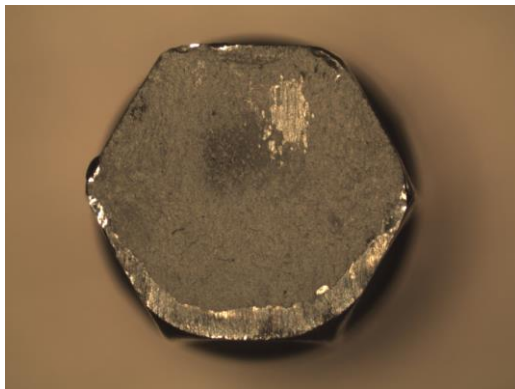
Per questo, si andrà a valutare la risposta del software nella fase di estrusione alle due diverse versioni di matrici.

Si presenta una serie di immagini realizzate con il proiettore di profili del risultato delle due versioni.

Si nota molto bene nelle immagini numero 50 e numero 51, dove si mostrano le viste laterali, che l'estrusione A è migliore in finitura superficiale, nel riempimento del materiale e nella realizzazione dello smusso rispetto alla versione B precedente, dove per esempio non si riscontra alcuno smusso.

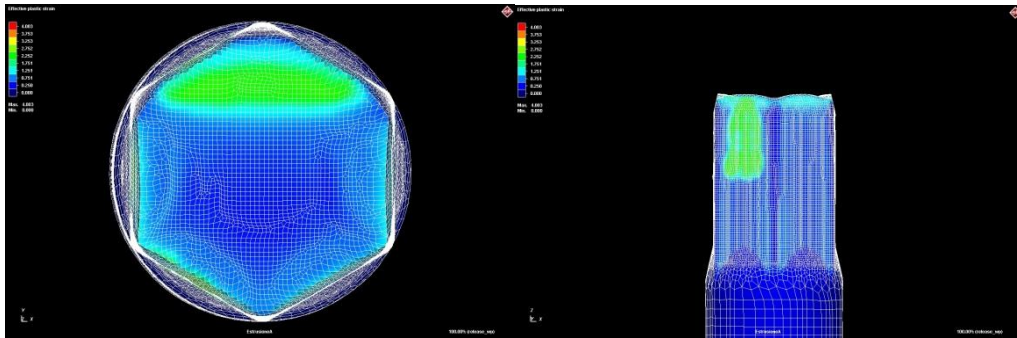


**Figura 50 - Vista frontale e laterale estrusione versione A.**

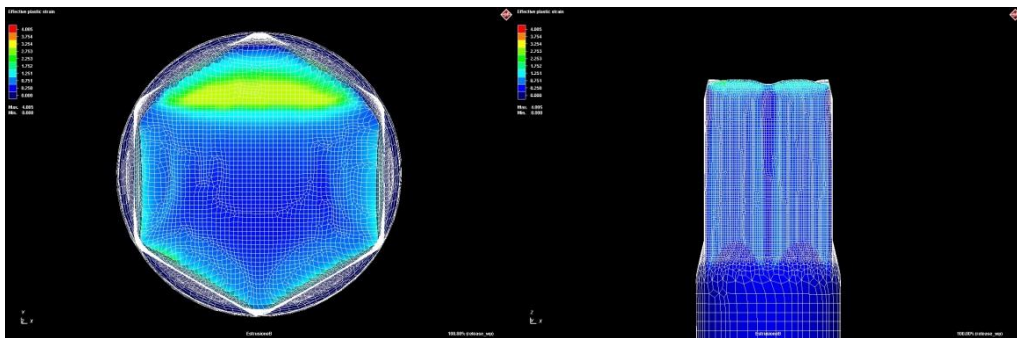


**Figura 51 - Vista frontale e laterale estrusione versione B.**

Dopo aver creato i modelli e fatto partire le simulazioni delle due versioni, abbiamo trovato questi risultati.



**Figura 52 - Vista frontale asse xy e vista laterale asse zx versione matrici A.**



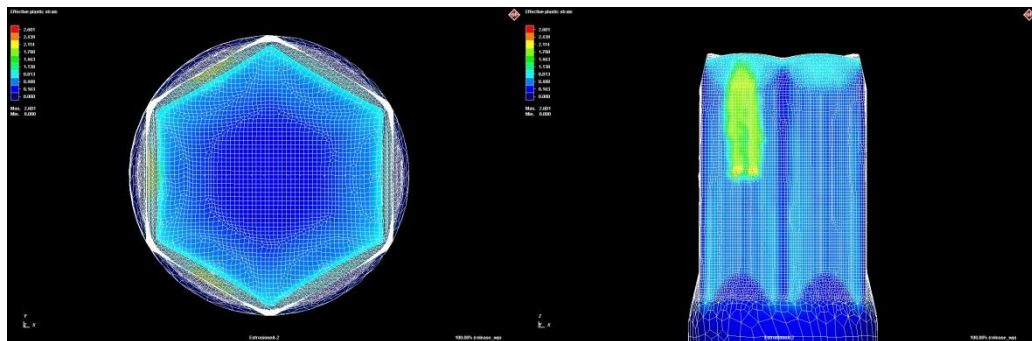
**Figura 53 - Vista frontale asse xy e vista laterale asse zx versione matrici B.**

In post elaborazione di questa fase, si valutano le immagini e i video della simulazione e si nota come non cambia nulla ai fini della deformazione e del riempimento. Le due soluzioni si matrici A e B danno gli stessi risultati, si nota soltanto una deformazione strana su una faccia esagonale della soluzione A.

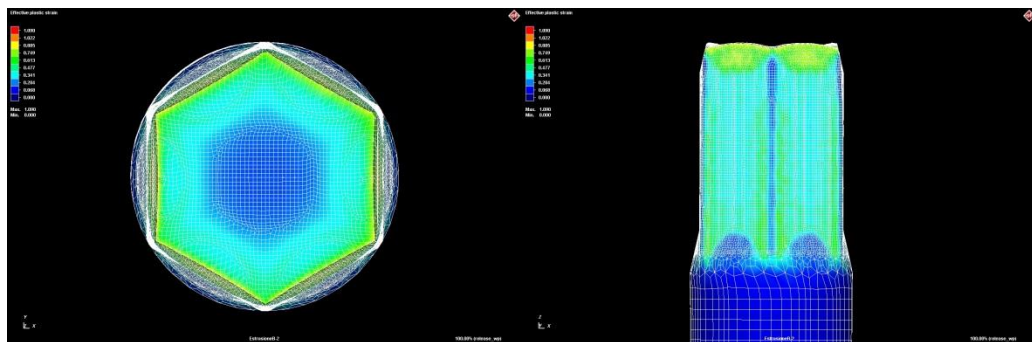
Inizialmente si è pensato fosse un errore dovuto ad una mesh non corretta o a una bava che rimaneva dopo le prime due fasi di trafilatura e taglio, ma dopo una opportuna valutazione del difetto con l'aiuto del consulente di Simufact si è sostenuto che rappresentava un baco all'interno del software.

Questi risultati sono dati dalla fase di processo di estrusione e ricalcatura prendendo in considerazione anche le fasi di trafilatura e di taglio, esattamente come avviene in realtà.

Successivamente, si è voluto valutare la fase di estrusione e ricalcatura senza considerare le fasi precedenti, quindi prendendo uno spezzone non trafilato e tagliato. Si inserirà all'interno del processo con le due soluzioni A e B, un filo metallico perfetto, un cilindro ideale e si valuterà la risposta del programma.



**Figura 54 - Vista frontale asse xy e vista laterale asse zx versione matrici A, cilindro ideale.**



**Figura 55 - Vista frontale asse xy e vista laterale asse zx versione matrice B, cilindro ideale.**

Le immagini numero 54 e numero 55 sopra mostrano i risultati delle simulazioni delle soluzioni A e B. Si vede nell'immagine numero come il baco sulla matrice di tipo A si ripresenta, ma confrontando i due risultati si vede che la deformazione da risultati diversi.

Pertanto, si valuta la forza esercitata che prevede il software sulle matrici e si nota come la soluzione B è più sollecitata di circa 500 N rispetto alla soluzione A.

Di seguito si è andati in laboratorio ad eseguire le metallografie per vedere le linee di deformazione da confrontare con le linee di flusso che prevede Simufact.

### 3.10.1 Metallografia estrusione

Attivate le linee di flusso all'interno della fase di processo, si procede con la metallografia, come mostrato nelle figure 56 e 57.

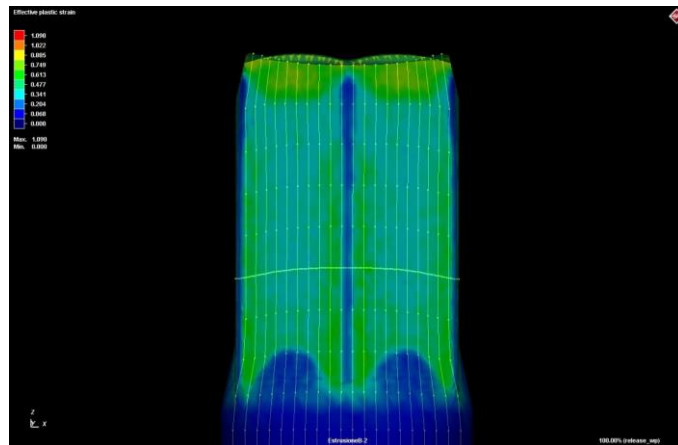


Figura 56 - Linee di flusso Simufact estrusione esagonale.

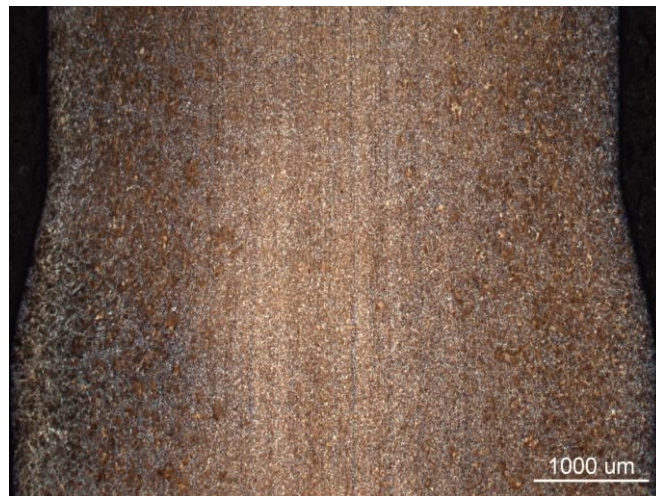


Figura 57 - Sezione estrusione esagonale. Attacco NITAL 1.4% (25x).

Nelle figura numero 56, si può vedere come Simufact rispetta la realtà dell'andamento delle fibre, come mostrato in figura 57. Dove c'è il restringimento della sezione, dovuto all'estrusione, le linee di flusso si allungano.



### 3.11 Analisi piega

Dopo aver analizzato le fasi di processo di trafilatura, taglio e deformazione a freddo, ora si passerà alla fase di piega della chiave a brugola.

Per quanto riguarda questo processo, il pezzo viene tenuto fermo da due creatori, superiore ed inferiore, in modo tale che siano esposte solo le due estremità dello spezzone che verranno sottoposte a piega. Dato che si sta parlando di un processo simmetrico per entrambe le estremità, si procederà a considerarne solo una.

La piega verrà realizzata da un coltello di piega che spingerà l'estremità del pezzo verso il basso.

Molto importante in questa analisi, dopo aver creato il modello nel software, è valutare il ritorno elastico del materiale dopo la spinta del coltello.

Pertanto l'utensile piegherà il materiale oltre i  $90^\circ$ , così da ottenere come risultato finale una piega di  $90^\circ$ , contrastando il fenomeno del ritorno elastico.

#### 3.11.1 Metallografia piega

Di seguito, si mostrano le immagini delle linee di deformazione della metallografia eseguita sulla zona di piega del pezzo e l'immagine delle linee di flusso calcolate con il simulatore.

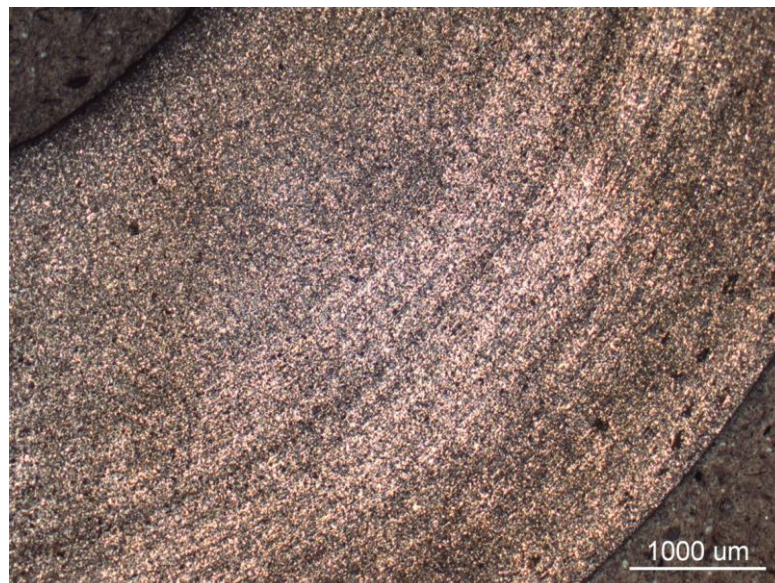


Figura 58 - Sezione piega. Attacco NITAL 1.4% (25x).

Nella figura numero 58, si possono notare le linee di deformazione dovute alla piega. Per linee di deformazione si intende l'allungamento dei grani del materiale, che Simufact prevede esattamente tramite la funzione di linee di flusso come mostrato in figura numero 59.

Oltre a questo, le linee di flusso mostrano molto bene dove il materiale si deforma di più, ovvero la parte inferiore della piega, dove le fibre del materiale si comprimono e quindi le linee di flusso si accorciano, e la parte superiore, dove le fibre si stirano e quindi le linee di flusso si allungano.

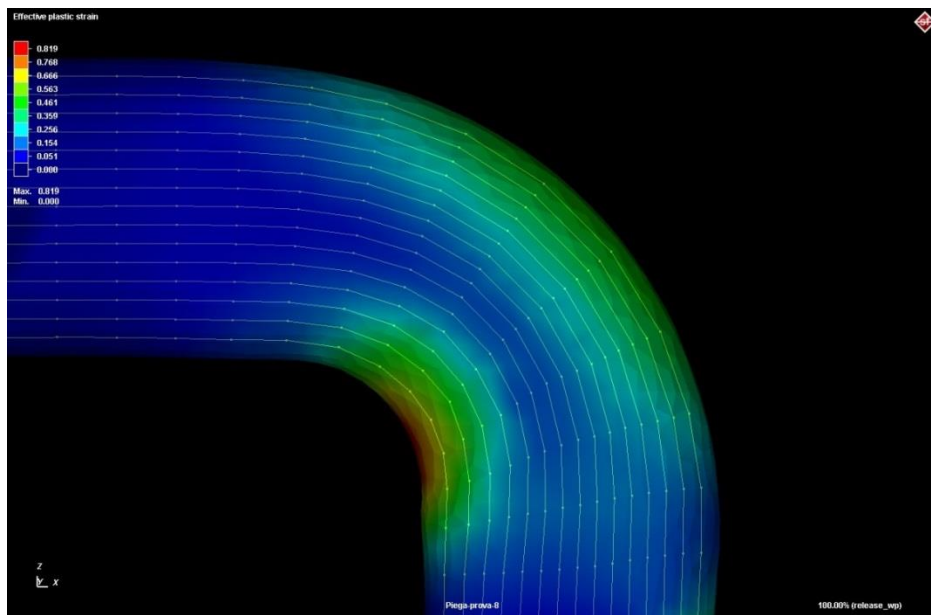


Figura 59 - Linee di flusso Simufact piega.



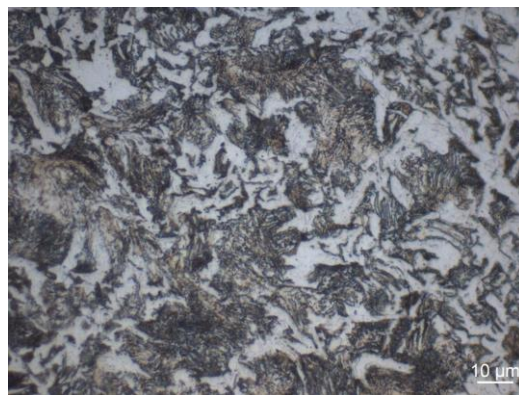
### 3.12 Analisi metallografica materiale grezzo

Qui sotto si mostrano le figure 60 e 61, che rappresentano le metallografie del materiale grezzo di partenza dopo attacco acido NITAL 1,4%.

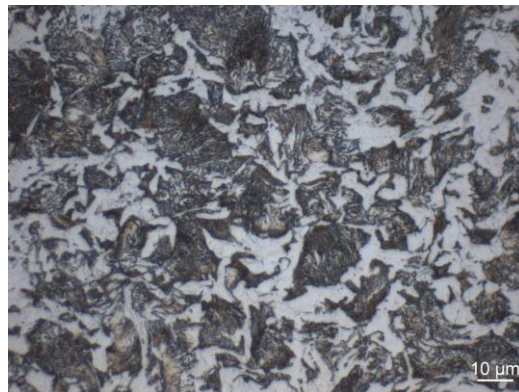
Come si può notare dalle due immagini, l'acciaio C30 presenta una struttura ferritica perlitica.

Le zone bianche sono la ferrite, invece le zone grigie sono la perlite.

Si può notare inoltre come l'andamento della struttura cristallina nelle due diverse sezioni non cambi. Questo è dovuto probabilmente ad una ricottura che elimina le tensioni interne dopo la laminazione a caldo della vergella.



**Figura 60 - Metallografia materiale grezzo - Sezione trasversale - Attacco NITAL 1.4% (1000x).**



**Figura 61 - Metallografia materiale grezzo - Sezione longitudinale - Attacco NITAL 1.4% (1000x).**

## **4 Valutazione economica**

Come conclusione di questa tesi, si presenta una sorta di bilancio economico relativo allo sviluppo del progetto di inserimento di Simufact all'interno dell'ufficio tecnico rispetto all'approccio attuale di progettazione, ovvero senza il software.

Per ogni azienda è molto importante l'aspetto economico, che andrà valutato con una lista di costi e della differenza che apporta l'uno e l'altro approccio.

La valutazione di questa tesi sarà una valutazione base sui costi, senza affrontare tutta la parte economica di ammortamenti e costi dei macchinari.

### **4.1 Sviluppo progettuale senza l'aiuto di Simufact**

Ipotizzando di realizzare un progetto medio aziendale, con dati considerati dall'esperienza aziendale e facendo una media dei dati aziendali disponibili, si ottengono questi dati e questi costi.

All'interno dello sviluppo di un nuovo progetto abbiamo queste attività:

- Progettazione
- Attrezzaggio
- Montaggio

L'attività di progettazione iniziale consiste nel disegnare le matrici e le attrezzature che servono, per essere montate in macchina.

L'attività di attrezzaggio è quella di andare a creare le attrezzature e le matrici da montare in macchina.

L'attività di montaggio consiste nel montare in macchina tutte le matrici e le attrezzature e una serie di settaggi della macchina per la produzione dell'articolo.

In media, su un nuovo progetto di un articolo a tre/quattro colpi, lo stampatore svolge due/tre prove, quindi considerando come prima prova la prova iniziale, la sequenza in serie delle fasi di operazione sarà la seguente:

- Progettazione iniziale
- Attrezzaggio iniziale
- Montaggio iniziale
- Prima modifica di progettazione
- Attrezzaggio della prima modifica
- Montaggio della prima modifica
- Seconda modifica di progettazione

- Attrezzaggio della seconda modifica
- Montaggio della seconda modifica

Dopo aver eseguito le tre prove, l'articolo è in produzione.

In questo modello si cercherà di stabilire dei tempi medi per ogni attività, così poi da trovare i costi per ognuna e infine il costo totale del progetto, da poter confrontare con il costo totale di progetto con l'inserimento di Simufact.

Di seguito, i costi considerati delle varie attività con le relative tempistiche. I tempi sono stati stimati tenendo conto dell'esperienza aziendale.

- Costo Progettazione = 50 [€/h]
- Costo Attrezzaggio = 40 [€/h]
- Costo Montaggio = 30 [€/h]
- Tempo di Progettazione iniziale = 60 [h]
- Tempo di Attrezzaggio iniziale = 60 [h]
- Tempo di Montaggio iniziale = 80 [h]
- Tempo di Modifica di progettazione = 10 [h]
- Tempo di Attrezzaggio modifica = 20 [h]
- Tempo di Montaggio modifica = 20 [h]

Il costo totale dello sviluppo del progetto è dato da:

Costo totale sviluppo progetto = Costo<sub>pi</sub> + Costo<sub>ai</sub> + Costo<sub>mi</sub> + Costo<sub>pm</sub> + Costo<sub>am</sub> + Costo<sub>mm</sub> + Mancato guadagno

Il mancato guadagno è dato dal fermo macchina, cioè quello che guadagnerebbe l'azienda in termini di [€/h] se la macchina stesse producendo.

Il dato è calcolato come segue:

Media pezzi prodotti al minuto = 180 [pz/min]

Media pezzi prodotti all'ora = 10800 [pz/h]

Prezzo di vendita = 10/1000 [€/pz]

Guadagno = 108 [€/h]

Tasso di guadagno = 7%

Mancato guadagno = Guadagno \* tasso di guadagno \* [(tempo montaggio iniziale) + (n° di prove \* tempo montaggio modifiche) + (n° di prove \* tempo attrezzatura modifiche) + (n° di prove \* tempo progettazione modifiche)] = 907 [€]

Costo totale sviluppo progetto senza Simufact = 12507 [€] in 300 ore

## 4.2 Sviluppo progettuale con l'aiuto di Simufact

Per quanto riguarda l'approccio con il software di simulazione Simufact, il processo di operazioni dello sviluppo del progetto sarà diverso, poichè non ci saranno modifiche, in quanto tutte le modifiche che si andranno a fare sul progetto e i tentativi di progetto verranno fatti nell'ambiente di simulazione.

Ipotizzando di conoscere e saper sviluppare il processo produttivo nell'ambiente di simulazione, la sequenza in serie di fasi di operazioni dello sviluppo progettuale sarà la seguente:

- Progettazione
- Simulazione
- Attrezzaggio
- Montaggio

Di seguito i costi considerati delle varie attività con le relative tempistiche.

- Costo Progettazione = 50 [€/h]
- Costo Simulazione = 50 [€/h]
- Costo Attrezzaggio = 40 [€/h]
- Costo Montaggio = 30 [€/h]

- Tempo di Progettazione = 60 [h]
- Tempo di Simulazione = 10 [h]
- Tempo di Attrezzaggio = 60 [h]
- Tempo di Montaggio = 80 [h]

Il costo totale dello sviluppo del progetto con Simufact sarà la somma dei costi orari per le tempistiche, quindi:

Costo totale sviluppo progetto con Simufact = 8300 [€] in 210 ore

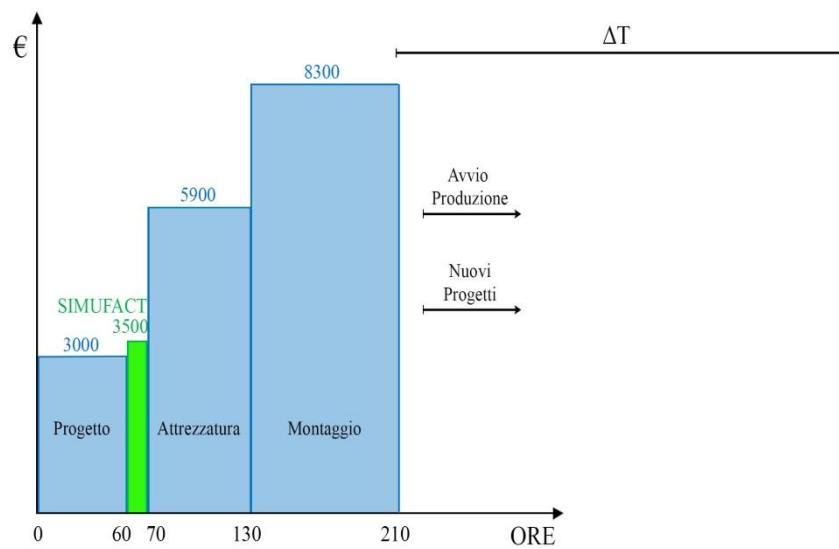
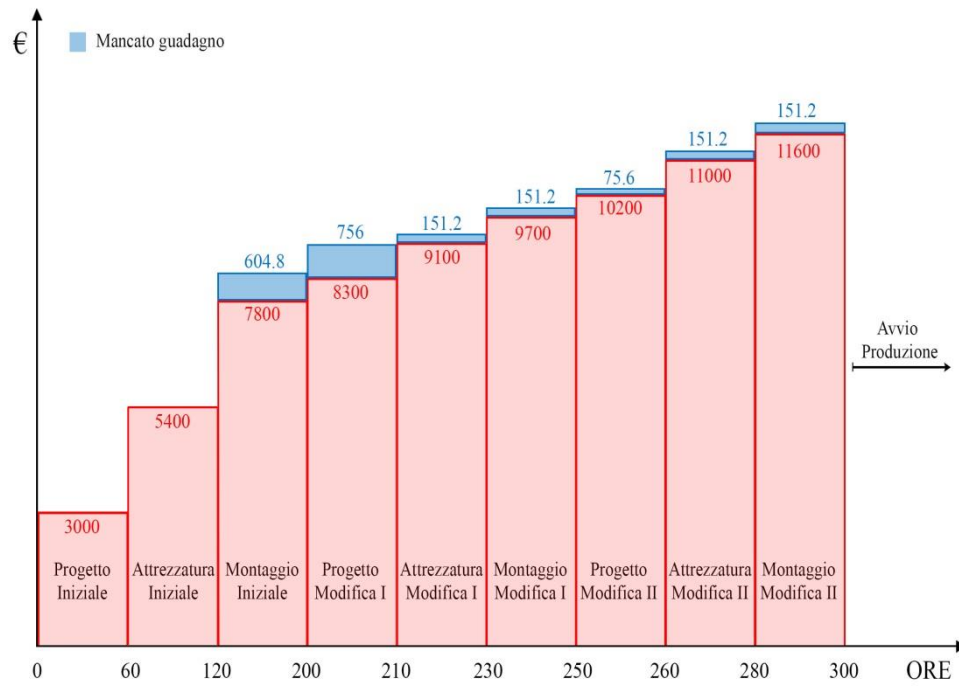


Figura 62 - Diagramma valutazione economica.

Nella figura numero 62 si presenta un diagramma conclusivo finale di tutti i calcoli fatti in precedenza per le operazioni che si eseguono durante il progetto. Si evidenzia una somma cumulativa dei vari costi che avviene in tempistiche diverse, in particolare si nota una riduzione delle tempistiche con l'inserimento del software di simulazione (210 ore vs 300 ore), portano un guadagno a livello di tempo per eventuali nuovi progetti.

Il mancato guadagno presente nel diagramma senza l'aiuto di Simufact è riferito alla singola operazione e non è cumulativo.

I vantaggi che si possono riscontrare con la simulazione di Simufact sono:

- Maggior qualità
- Stabilità della produzione
- Valorizzazione del marchio, innovazione dell'azienda
- Know-how standardizzato e non empirico di produzione
- Grosso ritorno economico da parte dell'azienda per progetti nuovi di media-alta complessità
- Guadagno dei tempi di simulazione con calcoli notturni

## **5 Conclusioni**

La presente panoramica ha evidenziato come oggi sia possibile simulare tutte le operazioni necessarie alla produzione di un particolare in acciaio stampato a freddo.

I principali vantaggi dell'introduzione di Simufact come strumento di riferimento per la progettazione dei processi di stampaggio a freddo sono la possibilità di valutare a priori, a tendere ancora in fase di preventivo la realizzabilità di un particolare, minimizzando il materiale in bava.

Con la simulazione si eliminano quasi completamente gli aggiustamenti necessari quando si mette a punto un nuovo processo, evitando i costi relativi alla lavorazione di stampi prototipo e i fermi macchina necessari per la campionatura. Se le simulazioni sono fatte a posteriori, ogni modifica apportata agli stampi ed il relativo effetto sulla qualità del pezzo sono valutabili senza la necessità di costose prove reali sotto la pressa.

L'introduzione di Simufact in ufficio tecnico consente infatti una profonda comprensione delle dinamiche di flusso del materiale tra gli stampi e delle criticità del proprio processo. Risolvere una problematica attraverso la simulazione consente ai tecnici di acquistare una maggiore sicurezza nell'affrontare famiglie di prodotti simili, ma anche di fare delle valutazioni, ancora in fase di preventivo, delle criticità di nuovi particolari da produrre.

Tutte le esperienze fatte con il software possono infatti essere archiviate e diventano patrimonio dell'azienda, utile anche a far crescere rapidamente nuove figure che andranno via via ad integrare e poi sostituire le figure storiche esperte di stampaggio.

L'acquisto del software, il know-how dell'azienda acquisisce una formazione specifica sono un vantaggio competitivo che ha immediate ricadute concrete sul miglioramento del proprio modo di produrre, consentendo un rapido ammortamento dell'investimento necessario.

Lo scopo iniziale di questo progetto è stato quello di imparare ad utilizzare il programma Simufact.Forming 12.0.3 e quello di sviluppare un modello FEM per la produzione di una chiave a brugola.

Il software Simufact.Forming 12.0.3 è stato un buono strumento di simulazione, grazie alle sue molteplici funzioni ha permesso di eseguire numerose prove, in cui si sono andati a cambiare o settare i parametri principali del progetto, permettendo di comprendere quali fossero i più efficienti.

Con esso è stato possibile modellare tutte le fasi del processo di deformazione a freddo della chiave a brugola e manipolare i risultati per considerazioni e confronti.

Si può pensare che un'applicazione di questo metodo, con le opportune modifiche, possa essere usata in altri processi con gli stessi risultati.

Per questa tesi si è vista la necessità di verificare sperimentalmente alcune fasi del progetto e grazie alla disponibilità del laboratorio di prove meccaniche della sede di Lecco del Politecnico di Milano, è stato possibile verificare i risultati del software. La tesi si è concentrata sull'analisi del materiale fornito e sui parametri che influenzano il primo processo di deformazione, cioè la trafilatura.

Successivamente, in laboratorio, attraverso l'attacco acido di prove metallografiche abbiamo analizzato alcune sezioni delle fasi di processo per controllare le linee di deformazione del materiale, che sono risultate congruenti a quelle elaborate dal software andando a confermare l'efficacia del software.



## 6 Teoria solutore Marc

### 6.1. Analisi di base

La fase di analisi è in gran parte gestita dal computer. Si ha solo bisogno di conoscere alcune nozioni di base circa i solutori.

### 6.2 Solutore FEM

Il solutore ad elementi finiti utilizzato in Simufact.forming è una versione avanzata del solutore MARC da MSC Software Corporation.

Il metodo degli elementi finiti è un metodo numerico che risolve equazioni differenziali in un campo continuo coperto con una mesh di elementi finiti. Una mesh è costituita da numerosi elementi di diverse forme collegate da nodi. MARC è stato sviluppato sulla base del metodo degli spostamenti.

La metodologia della rigidità utilizzata in MARC studia le relazioni forza-spostamento attraverso la rigidità del sistema. Il rapporto forza spostamento per un problema statico lineare può essere espresso come:

$$K * u = f \quad (\text{A-1})$$

Dove K è la matrice rigidità del sistema, u è lo spostamento nodale, ed f è il vettore forza.

Ipotizzando un caso 2D, l'equazione A-1 può essere scritta come

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} \quad (\text{A-2})$$

Dopo aver risolto vettore spostamento u, le deformazioni in ogni elemento possono essere calcolate dalla relazione deformazione-spostamento in termini di elementi spostamenti nodali come:

$$\varepsilon_{el} = \beta * u_{el} \quad (\text{A-3})$$

Le sollecitazioni nell'elemento sono ottenuti dalle relazioni sollecitazione-deformazione come

$$\sigma_{el} = L * \varepsilon_{el} \quad (\text{A-4})$$

dove  $\sigma_{el}$  e  $\varepsilon_{el}$  sono stress e deformazioni negli elementi, ed  $u_{el}$  è il vettore spostamento associato con i punti degli elementi nodali;  $\beta$  e  $L$  sono rispettivamente relazioni deformazione-spostamento e sforzo-deformazione.

Il sistema di elementi finiti è un insieme di tutto il sistema di elemento locale. Ad esempio, la matrice  $K$ , rigidità del sistema, ed è espressa in termini di matrice di rigidità:

$$K = \sum_{i=1}^n K_i^{el} \quad (A-9)$$

Dove  $n$  è il numero di elementi del sistema. La matrice degli elementi di rigidità può essere espressa come:

$$K^{el} = \int_{v^{el}} \beta^T L \beta dv^{el} \quad (A-10)$$

dove  $v^{el}$  è il volume dell'elemento. La matrice di capacità termica può essere espressa come:

$$C^{el} = \int_{v^{el}} N^T \rho c N dv^{el} \quad (A-11)$$

Dove  $N$  è la funzione di forma dell'elemento,  $\rho$  è densità del materiale e  $c$  è il calore specifico.

Il vettore forza nodale  $f$  nell'equazione A-1 include i contributi dei vari tipi di carico.

$$f = f_{point} + f_{surface} + f_{body} + f^* \quad (A-12)$$

dove  $f_{point}$  è il vettore carico puntuale,  $f_{surface}$  è il vettore carico superficiale,  $f_{body}$  è il corpo (volumetrico) carico vettore, e  $f^*$  rappresenta tutti gli altri tipi di vettori di carico (per esempio, sollecitazioni termiche).

Il carico puntuale concentrato è associato ai gradi di libertà nodali e può essere aggiunto direttamente al vettore di forza nodale.

Il vettore forza nodale equivalente deve essere calcolato dal (piano/volumetrico) carico dapprima distribuito e quindi aggiunto il vettore della forza nodale.

In MARC, il calcolo delle forze nodali equivalenti avviene tramite integrazione numerica del carico distribuito sulla superficie del volume a cui è applicato il carico. Questo può essere espresso come

$$f_{surface} = \int N^T p dA \quad (A-13)$$

$$f_{body} = \int N^T p dV \quad (A-14)$$

Dove  $p$  è la pressione,  $A$  è l'area superficiale e  $V$  è il volume. In generale, un processo di deformazione è governato da equazioni non lineari.

I seguenti effetti non lineari sono presi in considerazione in MARC:

- le non linearità dei materiali
- le non linearità geometriche
- le condizioni al contorno non lineari

Con non linearità dei materiali, le proprietà dei materiali possono essere funzione della temperatura, plasticità, grado di deformazione, porosità ecc.

Il materiale può sperimentare deformazione elastica o elasto-plastica.

Le non linearità geometriche sono relative alle grandi deformazioni e alle rotazioni delle parti. Questo avviene nella maggior parte delle applicazioni in deformazione a freddo.

Le condizioni al contorno non lineari consentono di simulare il contatto tra matrice e pezzo, il comportamento dell'attrito e complesso movimento delle attrezzature di deformazione.

Per risolvere il sistema non lineare, MARC fa questo incrementando. Molti incrementi sono necessari in simulazione di un processo di deformazione. L'approccio Lagrangiano è utilizzato in MARC che la deformazione di un pezzo in lavorazione può essere rappresentata dalla distorsione della mesh.

Per il problema accoppiamento termico meccanico, l'equazione A-7 e l'equazione A-8 sono risolte in modo che l'equazione A-8 è risolta prima e poi l'equazione A-7.

Sia l'equazione A-7 che l'equazione A-8 sono equazioni non lineari. Il metodo di Newton-Raphson consente di risolvere queste equazioni non lineari.

Molte iterazioni possono essere necessarie per risolvere le equazioni non lineari fino a quando la soluzione è convergente. Si consideri il seguente sistema di equazioni:

$$I(u) = f \quad (\text{A-15})$$

$$K(u)du = f - I(u) \quad (\text{A-16})$$

dove  $I(u)$  è il vettore carico nodale interno e  $f$  è il vettore carico nodale esterno.

$$I(u) = \int \beta^T \sigma dv \quad (\text{A-17})$$

Supponiamo che l'ultima soluzione approssimata ottenuta viene chiamato  $\delta u(i)$ , dove  $(i)$  indica il numero di iterazioni.

Le equazioni A-15 e A-16 possono quindi essere scritte come:

$$u^{(i+1)} = u^i + \delta u \quad (\text{A-18})$$

Questa equazione è risolta  $\delta u$  e la successiva soluzione appropriata viene ottenuta da:

$$u^{(i+1)} = u^i + \delta u \quad (\text{A-19})$$

La soluzione di questa equazione completa una iterazione. Lo stesso processo può essere ripetuto. La convergenza è misurata da una verifica residua o dal controllo di spostamento. Il criterio di convergenza può essere definito come segue:

- Controllo residuo

$$\frac{\|F_{residual}\|_{\infty}}{\|F_{reaction}\|_{\infty}} < TOL_1 \quad (\text{A-20})$$

$$\|F_{residual}\|_{\infty} < TOL_1 \quad (\text{A-21})$$

dove  $F$  è il vettore forza e  $TOL_1$  è la tolleranza di controllo.  $\|F\|_{\infty}$  indica la componente di  $F$  con il più alto valore assoluto. In alcuni problemi particolari, come la dilatazione termica libera, non vi sono forze di reazione. MARC utilizza il controllo di spostamento.

- Controllo di spostamento

$$\frac{\|\delta u\|_{\infty}}{\|\delta u\|_{\infty}} < TOL_1 \quad (\text{A-20})$$

$$\|\delta u\|_{\infty} < TOL_1 \quad (\text{A-21})$$

Dove  $du$  è il vettore spostamento a incremento,  $\delta u$  è il vettore spostamento d'iterazione.

Con questo metodo, la convergenza è soddisfatta se lo spostamento massimo dell'ultima iterazione è piccolo rispetto alla variazione spostamento reale dell'incremento. Uno svantaggio di questo approccio è che richiede almeno una iterazione, indipendentemente dalla precisione della soluzione.

L'equazione lineare algebrica dell'equazione (A-18) richiede un risolutore d'equazione. MARC fornisce alcune opzioni risolutore.

Essi possono essere raggruppati in entrambi i solutori diretti o iterativi. In generale, i solutori diretti hanno bisogno di più memoria con soluzione esatta mentre i risolutori iterativi richiedono meno memoria, ma con soluzioni approssimate.

Il seguente diagramma di flusso dei dati mostra come viene effettuata l'analisi con MARC:

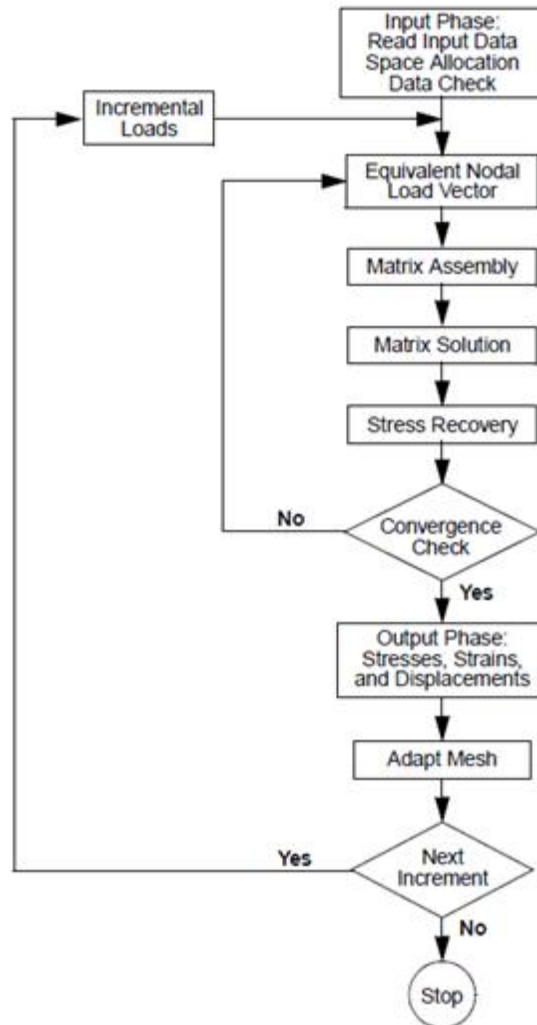


Figura 63 - Diagramma di flusso di analisi.

## **6.3 Cos'è il Marc? Una soluzione avanzata di simulazione non lineare**

Marc è una soluzione per l'analisi non-lineare a elementi finiti, potente e di proposta generale, per simulare accuratamente la risposta dei vostri prodotti in scenari di carichi statici, dinamici e multi fisici. Marc viene utilizzato per affrontare i problemi di produzione e di sviluppo del prodotto in un unico ambiente di modellazione con un solutore.

### **6.3.1 Soluzione per l'analisi non-lineare e multi fisica**

Marc, ottimizzato per l'analisi non-lineare, fornisce metodi di soluzione per risolvere problemi che coprono l'intero ciclo di vita del prodotto, dalla simulazione del processo di produzione, analisi delle prestazioni fino all'analisi del fallimento.

- Analisi non lineare che comprende tutte le forme di non linearità (dovute a materiali, geometria, condizioni al contorno incluso contatto)
- Analisi termica
- Analisi termo meccanica accoppiata
- Elettromagnetismo
- Analisi piezoelettrica
- Analisi elettrica termica meccanica
- Elettrostatica e Magnetostatica accoppiata con risposta strutturale
- Processi manifatturieri come stampaggio della lamiera, idroformatura, estrusione, soffiaggio, saldatura, tempra, polimerizzazione, taglio etc.

### **6.3.2 Analisi di contatto**

Si può indagare l'interazione tra più componenti con la funzione di modellazione di contatto di Marc.

- Impostare un modello di contatto facilmente in 1D, 2D o 3D, analizzare e visualizzare l'interazione dei componenti in continua evoluzione.
- Migliorare l'efficienza della modellazione, evitando la necessità di ulteriori elementi di contatto, coppie di contatto o definizioni slave-master.
- Impostare e indagare l'auto contatto senza ulteriori oneri di modellazione.
- Analizzare gli effetti dell'attrito con semplicità.

### 6.3.3 Materiali non lineari

Si può scegliere da un'estesa libreria di modelli di materiali metallici e non, e da una collezione di più di 200 elementi per eseguire analisi strutturali, termiche, multi fisiche e analisi dei fluidi per modellare accuratamente i materiali utilizzati nei vostri progetti.

- Elasticità isotropa, ortotropa e anisotropa
- Plasticità isotropa e anisotropa
- Iperelasticità (materiali elastomerici)
- Comportamento dipendente e indipendente dal tempo
- Polvere di metallo, suolo, cemento, leghe a memoria di forma
- Saldatura, viscoplasticità, scorrimento
- Compositi
- Piezoelettricità
- Modelli di materiale definiti dall'utente

### 6.3.4 Rottura

Scegliere tra una serie completa di modelli di rottura per studiare la degradazione e la rottura dei metalli, cemento, materiali compositi, ed elastomeri.

- Rottura duttile
- Accumulo del danno negli elastomeri
- Analisi di rottura dei compositi
- Delaminazione
- Meccanica della frattura
- Propagazione della frattura per alti e bassi cicli di carico
- Modelli di rottura definiti dall'utente

### 6.3.5 Remeshing automatica

Si ottengono risultati più accurati con minor sforzo di modellazione grazie agli schemi di remeshing automatico che assicurano l'alta qualità della mesh anche in problemi che includono grandi deformazioni.

- Ri-meshatura automatica per modelli 2D e 3D
- Criteri definiti dall'utente per il controllo della mesh
- Vantaggioso per simulare i processi di produzione e l'analisi di auto-contatto

## 7 Bibliografia

### 7.1 Bibliografia deformazione a freddo

- [1] Heinz Tschatsh, *Manuale lavorazioni per deformazione. Procedimenti-macchine-utensili*, Ottobre 1980, cap. 1, cap. 2, cap.3, cap. 6, cap. 11, cap. 12.
- [2] Angelo Frascio, *Il filo metallico, volume primo: La trafilatura dei metalli*, Hoepli, 1970, cap IV pp. 55-65, cap VII pp 161-162, cap IX pp. 217-218, 243-244.
- [3] Angelo Frascio, *Il filo metallico, volume secondo: La fabbricazione dei derivati*, Hoepli, 1973, cap III.
- [5] Nader Asnafi, *On tool stresses in cold heading of fasteners*, Pergamon, Engineering failure analysis 6, 1999, pp. 321-335.
- [6] Karl Kuzman, *Comments on the cold metal forming processes stability control*, Elsevier, Journal of materials processing technology 185, 2007, pp. 132-138.
- [7] SACMA S.p.a. Limbiate, *Qualche cenno sulla DEFORMAZIONE A FREDDO DEI METALLI*. Corso di formazione sulla deformazione a freddo da parte dell'azienda.

### 7.2 Bibliografia trafilatura

- [8] The wire association, *Steel wire handbook volume 2*, 1968, Chapter 1.
- [9] Henry S. Valberg, *Applied metal forming, including fem analysis*, Cambridge, 2010, chapter 22.
- [10] George E. Dieter, *Mechanical Metallurgy SI metric edition*, McGraw-Hill Book Company, 1988, chapter 19.
- [11] William F. Hosford, Robert M. Caddell, *Metal Forming, Mechanics and Metallurgy 3rd edition*, Cambridge, 2007, chapter 3.

### 7.3 Bibliografia materiale

- [12] Tabelle SigmaTre (fornitore), Laboratorio controllo qualità

### 7.4 Bibliografia FEM

- [13] Tutorial Simufact 12.0.3
- [14] Newsletter-Enginsoft year 8 n°3, *Esperienze di simulazione di stampaggio a freddo di acciaio con presse automatiche multi stazione: L'ottimizzazio-*



*ne di processo come strumento per ottenere le migliori prestazioni e la massima qualità*, pp 26-33.

- [15] Umut Since, *A case study of cold forging simulation in fastener production*, Technology pp. 351-353.
- [16] Carpenter, *Heading Hints: About Cold Heading (part 6)*, June 2005.
- [17] D.Petrescu, S.C.Savage, P.D. Hodgson, *Simulation of the fastener manufacturing process*, Elsevier, Journal of materials process technology 125-126, 2002, pp. 361-368.
- [18] M.S. Joun, S.W. Lee, J.H. Chung, *Element analysis of a multi-stage axisymmetric forging process*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 38, 1998, pp 843-854.

## **7.5 Bibliografia analisi in laboratorio**

- [19] A. Centinarlan, Ali Guzey, *Tensile properties of cold-drawn low carbon steel wires under different process parameters*, Materials and technology, 2012.
- [20] Tae-Wan Ku, Lee-Ho Kim, Beom-Soo Kang, *Multi stage cold forming and experimental investigation for the outer rate of constant velocity joints*, Elsevier, Materials and design 49, 2013, pp. 368-385.
- [21] A. Sabish, J.A. Nemes, *Internal ductile failure mechanisms in steel cold heading process*, Journal of materials processing technology 209, 2009, pp. 4292-4311.