

**POLITECNICO DI MILANO**  
**Scuola di Ingegneria Industriale**  
**Dipartimento di Meccanica**  
**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica**



***STUDIO NUMERICO E SPERIMENTALE DEI  
LIMITI TECNOLOGICI DI UN'OPERAZIONE DI  
TRANCIATURA FINE***

**Relatore:**  
**Prof. Matteo Strano**

**Co-relatore:**  
**Ing. Claudio Malvestiti**

**Tesi di Laurea Magistrale di:**  
**Marco Premoli**  
**Matr. 770789**

**Anno Accademico 2011/2012**

*Alla nonna Rosi*

## Ringraziamenti

Ora che sono giunto al momento conclusivo del mio percorso di studio, è inevitabile rivolgere il pensiero a tutti coloro che mi hanno accompagnato e sostenuto in questi lunghi anni: ad essi sarò sempre riconoscente.

Il mio primo grazie va quindi ai miei genitori che mi hanno permesso di affrontare con serenità anche questo importante periodo di studio e di crescita.

Un tenero e riconoscente pensiero è dedicato a Pai, mia zia, ma in realtà, per me quasi un'altra mamma su cui posso sempre contare. Ancora una volta mi ha manifestato affetto offrendomi ospitalità, così da facilitarmi il raggiungimento dell'azienda presso la quale dovevo sviluppare la mia tesi di laurea. Grazie Pai anche per le deliziose cene con le quali hai fatto sfoggio di tutta la tua arte culinaria.

Grazie inoltre a Rosangela, carissima amica di famiglia, che mi ha spronato e aiutato in vari modi e momenti.

Sono grato anche ai miei Professori universitari per quanto mi hanno insegnato e, in particolar modo, ricorderò sempre con piacere quelli che hanno saputo trasmettermi entusiasmo e passione per gli studi che stavo affrontando.

Voglio poi indirizzare doverosi ringraziamenti alle seguenti persone da cui ho ricevuto aiuti particolari nell'elaborazione della tesi.

Il Professor Strano, che mi ha seguito con grande disponibilità indicandomi la strada da seguire nella risoluzione delle incertezze e dei problemi che si sono andati via via presentando durante lo svolgimento del mio lavoro finale.

L'ingegnere Viale che mi ha assistito nell'implementazione del modello FEM consentendomi l'utilizzo del software da lui promosso.

La ERNESTO MALVESTITI S.P.A. , per avermi messo a disposizione materiali e tecnologie di cui l'azienda è dotata e per avermi affiancato a personale altamente specializzato e collaborativo. Un grande ringraziamento dunque ai titolari ingegnere Gianfranco ed ingegnere Alberto che hanno anche condiviso con me le loro competenze.

In particolare avrò un debito inestinguibile con un altro titolare della MALVESTITI S.P.A. , col quale ho un legame veramente speciale e profondo di affetto, riconoscenza ed ammirazione. Per me egli rappresenta da sempre la figura professionale di riferimento quando penso all'ingegnere che vorrei diventare. Questa persona è mio zio Claudio. Grazie di tutto, Claudio.

E grazie pure, per la sua gentile disponibilità, ad Andrea Malvestiti con il quale ho anche piacevolmente condiviso i momenti di relax.

Un caloroso ringraziamento va ,inoltre, alle seguenti persone, dipendenti della MALVESTITI S.P.A.

Innanzitutto il signor Giuseppe De Lorenzo, meglio conosciuto come Pino", che con grande pazienza ha controllato l'attività sperimentale svolta nel reparto di tranciatura.

Il signor Mario Galimberti, di cui ricordo la precisione e la cura che ha dedicato all'analisi di tutte le fasi di progettazione dello stampo.

Il signor Pietro Vagni, il signor Nevio Luise, il signor Alberto Contiero, il signor Ambrogio Tremolada.

Ed ancora i signori Cosimo Andriani, Valentino Cauduro, Alessandro Costanzo, Omar Toto, Cristian Zenarelli, Federico Fontana e la sig.ra Chiara Tremolada.

Infine voglio ricordare tutti i miei compagni di studio, che, in questi anni, hanno condiviso con me gioie e dolori universitari, rendendo tutto più facile e meno pesante. Sono certo che non dimenticherò mai nessuno di loro e spero che la nostra amicizia possa continuare anche se le nostre strade, inevitabilmente, si divideranno.

## Abstract

### Versione italiana

Questa tesi di laurea magistrale nasce dall'esigenza aziendale della Malvestiti S.P.A. di aggiornare una normativa interna riguardante alcuni criteri di fattibilità di pezzi prodotti mediante tranciatura fine.

Dopo una prima parte di approfondimento riguardante i principi della tranciatura tradizionale e fine, l'attenzione si focalizza sul problema in indagine: cercare il limite tecnologico nella tranciabilità di una parete sottile con materiale di elevato spessore.

Viene definito così un rapporto  $R$  calcolato come larghezza parete sottile ( $a$ ) diviso lo spessore del materiale da tranciare ( $S$ ). Si vuole trovare il limite di questo rapporto avendo fissato come obiettivo la produzione di 10.000 pezzi consecutivamente senza riscontrare problemi sul punzone figura.

Si è proceduto all'analisi di questo problema sia utilizzando una simulazione FEM sia con una prova sperimentale che verificasse la bontà della simulazione.

E' stato quindi definito un pezzo, scelto ad hoc, in cui la parete sottile è spessa 2 mm e gli spessori tranciati variano fino a trovare il limite sopracitato, partendo da uno spessore di 4 mm e aggiungendo di volta in volta un millimetro.

Progettato quindi lo stampo per tranciare questo pezzo sono stati modellati i componenti attivi dello stampo ed utilizzati per la simulazione ad elementi finiti. È stata scelta un modello 2D in quanto ritenuto sufficiente per descrivere lo sforzo sulla parete sottile del punzone con sufficiente precisione.

I risultati delle simulazioni hanno confermato la fattibilità del processo per gli spessori di 4, 5, 6 e 7 mm: lo sforzo di compressione sulla parete sottile del punzone figura aumenta proporzionalmente con l'aumentare dello spessore tranciato, mentre a pari rapporto  $R$  gli sforzi risultanti sulla parete sottile sono pressoché uguali.

Si è poi proceduto realizzando la campagna sperimentale di tranciatura che ha fissato il rapporto limite  $R$  a 0,4 garantendo così 10.000 colpi senza rotture del punzone sia con spessore 4 mm che con spessore 5 mm. Nel caso di spessore tranciato 6 mm (e quindi rapporto  $R$  pari a 0,33) il punzone si è rotto dopo circa 5.000 colpi.

Confrontando infine i dati ricavati dalle simulazioni con quelli misurati sulla pressa possiamo constatare la generale bontà della simulazione FEM per quanto riguarda la stima della forza di tranciatura, l'istante temporale dove questa forza raggiunge il valore massimo e la modellazione del comportamento del materiale che determinerà la geometria finale del pezzo, come ad esempio la caduta di materiale sulla parete sottile.

Si pone infine l'attenzione sulle cause che portano alla rottura del punzone proponendo alcuni accorgimenti per cercare di migliorare il comportamento del punzone figura, quali lucidatura delle superfici di taglio del punzone figura, cambiamento del trattamento termico per trovare il miglior compromesso tra durezza e tenacità (migliorando il comportamento a fatica del punzone) e una modifica alla geometria del punzone mediante un rinforzo della parete sottile in modo da distribuire meglio gli sforzi sulla parete stessa.

## English version

This thesis has been conducted because of need of the Company E. Malvestiti S.P.A. to upgrade their internal feasibility criteria regulations regarding the production of fine blanked pieces. Firstly the basic principles of Traditional and Fine Blanking have been investigated. Later the attention focused on an in-depth research of the technological limit in fine blanking. This has been possible through the try-out of a tool that blanked a thin slice of material on a high thickness metal sheet.

This brought to the definition of the ratio (R) obtained by dividing the width of our slice (a) by the material thickness (S). The purpose of this paper is to find the limit of R by keeping "a" fixed and increasing "S". This limit wants to be found throughout the production of 10.000 consecutive pieces without any sort of problem on the punch.

The analysis has been done by the usage of a FEM simulation system and by a testing experience that helped to confirm or contradict the simulation.

At this point the piece shape was decided. This choice was well thought, giving to the thin part of the shape a 2 mm thickness and keeping it fixed for the entire project. Instead, the material thickness changed, ranging from an initial 4 mm gauge increasing 1mm per experiment.

Having designed the tool, attention moved towards the modelling of the active parts useful for the finite elements analysis. It has been decided to use a 2D model considering it was enough precise to describe the stress applied by the punch on the slice side.

The simulation results confirmed the feasibility of the process for the thicknesses 4, 5,6 and 7 mm. In this cases the compression stress increased proportionally with the thickness blanked while in the case of same "R" the stress was mainly the same.

Beside the FEM analysis the experimental blanking campaign started. The "R" ratio limit was fixed to 0,4 granting 10.000 strokes without any breakages with the 4 and 5 mm thicknesses. In the case of the 6 mm gauge the punch broke after approximately 5.000 strokes with a calculated "R" ratio of 0,33.

Moreover, comparing the data obtained by the simulation with the ones measured by the actual blanking it has been possible to notice the general accuracy, regarding blanking stress, the maximum stress peak and the material behaviour that influences the final piece shape, of the Finite element analysis program. An example of this is surely the material die roll on the inner side of the slice.

Lastly attention was given to the causes that influence punch breakdowns proposing some recommendations to improve the punch behaviour. The suggested proposals could be: punch cutting surface polish, change of heat treatment to find the best compromise between hardness and toughness (improving the punch behaviour fatigue) and a punch geometry modification throughout the strengthening of the inner side slice (this would surely distribute better the forces).

## Sommario

Ringraziamenti.....	3
Abstract .....	4
Versione italiana.....	4
English version.....	5
Indice delle figure .....	9
Indice delle tabelle .....	12
Elenco dei simboli utilizzati .....	13
<b>Capitolo 1</b> Tranciatura tradizionale.....	15
1.1 Introduzione alla tranciatura tradizionale.....	15
1.2 Tipi di stampi e componenti del processo di tranciatura .....	17
1.2.1 Tipi di stampi per tranciatura .....	17
1.2.2 Punzoni per tranciatura, piastra porta-punzoni, piastra guida-punzoni .....	19
1.2.3 Matrici e piastre porta-matrici .....	21
1.2.4 Centratori e baricentro in tranciatura .....	22
1.2.5 Guida nastro, suddivisione del nastro e suo avanzamento.....	25
1.3 Forza di tranciatura, forza di estrazione e forza laterale.....	26
1.4 Problematiche nella tranciatura tradizionale .....	29
1.4.1 Problematiche nei punzoni: saldature fredde e carico di punta .....	29
1.4.2 Usura dell'utensile e usura degli stampi.....	29
1.4.3 Tolleranze raggiungibili.....	30
1.5 Accorgimenti per una corretta progettazione.....	31
1.5.1 Il "gioco".....	32
1.5.2 Geometria dei pezzi tranciati.....	33
<b>Capitolo 2</b> Tranciatura fine.....	35
2.1 Introduzione alla tranciatura fine.....	35
2.2 Basi e componenti del processo, tipi di stampi in uso.....	37
2.2.1 Basi del processo .....	37
2.2.2 Matrice e inserti.....	39
2.2.3 Punzoni per foratura e per profili interni .....	39
2.2.4 Estrattori.....	41
2.2.5 Scopo del bordino a V e sua definizione.....	42
2.2.6 Caratteristiche di massima degli stampi per tranciatura fine .....	43
2.2.7 Punzoni e portapunzoni per stampi a punzone mobile.....	45

2.2.8	Punzoni per stampi a punzone fisso .....	46
2.3	Forze nella tranciatura fine.....	46
2.4	Problematiche nella tranciatura fine .....	50
2.4.1	L'attrito nel processo di tranciatura fine .....	50
2.4.2	Effetti dell'attrito sullo stampo e sul pezzo .....	51
2.4.3	I lubrificanti per tranciatura fine .....	51
2.4.4	Presse per tranciatura fine e relative problematiche.....	52
2.4.5	Materiali degli stampi per tranciatura fine.....	54
2.4.6	Materiali destinati alla tranciatura .....	57
2.4.7	Le tolleranze nella tranciatura fine.....	59
2.5	Accorgimenti per una corretta progettazione .....	61
2.5.1	Calcolo della larghezza della striscia e del passo di avanzamento .....	61
2.5.2	Relazione fra dimensioni dello stampo e dimensioni della pressa.....	61
2.5.3	Dimensionamento degli elementi trancianti.....	62
2.5.4	Gioco punzone-matrice .....	63
2.5.5	Costruzione degli stampi per tranciatura fine .....	64
<b>Capitolo 3</b>	<b>Problema tecnologico e progettazione dello stampo.....</b>	<b>65</b>
3.1	Problema Tecnologico .....	65
3.2	Definizione di una prova sperimentale di tranciatura .....	68
3.3	Progettazione stampo.....	71
3.2.1	Progettazione parte inferiore .....	73
3.2.2	Progettazione parte superiore.....	75
3.2.3	Realizzazione particolari .....	76
<b>Capitolo 4</b>	<b>Realizzazione modello FEM.....</b>	<b>82</b>
4.1	Costruzione del modello .....	82
4.2	Scelta del tipo di analisi .....	84
4.3	Scelta dei parametri del modello.....	86
4.3.1	Caratterizzazione del materiale .....	86
4.3.2	Screening per la scelta del precarico e delle costanti elastiche delle molle, del valore del coefficiente di attrito e del tipo di elemento finito da utilizzare .....	90
4.3.3	Scelta parametri di meshing e remeshing .....	92
4.4	Risultati della simulazione .....	94
4.4.1	Validazione modello aziendale .....	99
4.5	Analisi delle forze sul punzone .....	101
<b>Capitolo 5</b>	<b>Realizzazione sperimentale delle prove, comparazione con la simulazione FEM e conclusioni</b>	<b>102</b>

5.1	Realizzazione prova sperimentale .....	102
5.1.1	Caratterizzazione del materiale del punzone figura .....	102
5.1.2	Campagna produttiva condotta e acquisizione dati sulla caduta di materiale .....	103
5.1.3	Misura delle forze di tranciatura sulla pressa.....	106
5.2	Confronti tra simulazione e prova sperimentale .....	111
5.2.1	Confronto riguardante la caduta di materiale sulla parete del pezzo.....	111
5.2.2	Confronto della forza esercitata sul punzone.....	111
5.2.3	Confronto del momento corrispondente alla massima forza sul punzone .....	113
<b>Capitolo 6</b>	<b>Conclusioni .....</b>	<b>114</b>
6.1	Aggiornamento della normativa .....	114
6.2	Proposta di strategie migliorative per il superamento del nuovo limite di fattibilità trovato .....	116
	Tabella : Z Force sul punzone .....	119
	Bibliografia.....	122



## Indice delle figure

<i>Figura 1 Fasi della tranciatura: I) Impatto del punzone con la lamiera II) Prima penetrazione del punzone e inizio formazione cricca nella parte inferiore della lamiera, sullo spigolo della matrice III) Estensione della cricca e distacco del pezzo tranciato.</i> .....	15
<i>Figura 2 Conformazione della sezione di taglio del pezzo tranciato.</i> .....	16
<i>Figura 3 Schema di stampo semplice per tranciatura. a) Punzone b) matrice c) Premilamiera d) Lamiera.</i> .....	17
<i>Figura 4 Esempio di stampo a blocco.</i> .....	18
<i>Figura 5 Esempio di stampo a passo, a guida fissa.</i> .....	18
<i>Figura 6 Varie esecuzioni della superficie di testa dei punzoni.</i> .....	19
<i>Figura 7 Punzone monolitico e punzone composto.</i> .....	20
<i>Figura 8 Diversi sistemi di attacco dei punzoni. Il punzone a destra dispone di parte tranciante riportata.</i> ..	20
<i>Figura 9 Accorgimenti per evitare due tipici inconvenienti negli stampi: in a) e b) si evita la risalita dello sfrido; in c) e d) si evita l'intasamento dello sfrido.</i> .....	21
<i>Figura 10 Matrice con superficie superiore spogliata.</i> .....	22
<i>Figura 11 Dimensioni dei centratori d'attacco secondo la tabella 1.</i> .....	23
<i>Figura 12 Tipi di fissaggio del codolo alla base superiore dello stampo.</i> .....	24
<i>Figura 13 Centratori semplificati.</i> .....	24
<i>Figura 14 Determinazione grafica del baricentro <math>s</math> del contorno di tranciatura di una matrice.</i> .....	25
<i>Figura 15 Componenti della forza di taglio nella tranciatura.</i> .....	27
<i>Figura 16 Andamento "qualitativo" della forza di taglio in funzione della corsa di tranciatura.</i> .....	28
<i>Figura 17 Grafico per la scelta del gioco <math>u</math> fra matrice e punzone.</i> .....	32
<i>Figura 18 Influenza del gioco <math>u</math> sulla forza e sul lavoro di tranciatura.</i> .....	33
<i>Figura 19 Comparazione della qualità delle superfici tranciate. Sopra vediamo un pezzo tranciato fine con una superficie liscia al 100% e sotto un pezzo realizzato in tranciatura tradizionale con una superficie 30% liscia e 70% strappata.</i> .....	35
<i>Figura 20 Differenza tra tranciatura tradizionale (a) e tranciatura fine (b) La trattazione delle forze in tranciatura fine verrà affrontata successivamente.</i> .....	37
<i>Figura 21 Fasi della tranciatura fine.</i> .....	38
<i>Figura 22 Inserto per una zona critica della matrice.</i> .....	39
<i>Figura 23 Punzoni con diametri differenziati per l'esecuzione di fori con diametro inferiore allo spessore della lamiera.</i> .....	40
<i>Figura 24 Fissaggio di punzoni per profili interni: a) mediante collare alla base; b) mediante vite di fissaggio alla piastra di supporto</i> .....	40
<i>Figura 25 Punzoni per profili interni, fissati contro la rotazione.</i> .....	40
<i>Figura 26 Punzone per profilo interno con tolleranze critiche su foro e cava per linguetta.</i> .....	41
<i>Figura 27 Perni di estrazione: a) canale di sfiato ricavato mediante spianatura del punzone; b) punzone con perno interno a molla per l'estrazione del pezzo; c) punzone con piastra di protezione fissata con vite al perno estrattore.</i> .....	42
<i>Figura 28 Bordino perimetrale presente solo sul premilamiera (a) oppure su premilamiera e matrice (b).</i> ..	43
<i>Figura 29 Stampi per tranciatura fine a punzone fisso o a punzone mobile e confronto con stampi convenzionali: a) stampo per tranciatura convenzionale; b) stampo per tranciatura fine a punzone mobile; c) stampo per tranciatura fine a punzone fisso.</i> .....	44
<i>Figura 30 Punzone trattenuto alla base mediante collare: a) per profili esterni di importanza critica; b) per punzoni rettificati sul profilo e punzoni multipli.</i> .....	46

<i>Figura 31 FS: F di tranciatura, FR : F del premilamiera , FG : F di contropressione 1: Matrice 2: Piastra di guida 3:punzone di tranciatura 4: Estrattore. ....</i>	47
<i>Figura 32 Ingrandimento della figura sopra.....</i>	48
<i>Figura 33 Svolgimento del processo in seno allo stampo di tranciatura fine .....</i>	49
<i>Figura 34 Forze d'attrito nella tranciatura fine. ....</i>	50
<i>Figura 35 PMI:Punto morto inferiore, a: corsa di chiusura rapida, b: controllo sicurezza e coniatura bordino perimetrale, c: corsa di tranciatura, PMS:Punto morto superiore, d:corsa di ritorno rapida, PMI:Punto morto inferiore. ....</i>	52
<i>Figura 36 Dispositivi di sicurezza contro la rottura degli stampi in una pressa meccanica. ....</i>	53
<i>Figura 37 Dispositivi di sicurezza contro la rottura degli stampi in una pressa idraulica.....</i>	54
<i>Figura 38 Disposizione dei pezzi sulla striscia di lamiera: criteri per la determinazione della larghezza. ....</i>	61
<i>Figura 39 Esempio di disegno di un pezzo con indicazione delle tolleranze richieste. ....</i>	62
<i>Figura 40 Dimensione degli elementi trancianti che determinano le dimensioni del pezzo finito (matrice e punzoni per le parti interne). ....</i>	62
<i>Figura 41 Gioco di tranciatura in funzione dello spessore del materiale. ....</i>	63
<i>Figura 42 Generazione mediante fresatura di un bordino a V: la prima operazione si effettua sulla superficie interna, la seconda operazione sulla superficie esterna.....</i>	64
<i>Figura 43 normativa interna Malvestiti riguardante la fattibilità della tranciatura fine di fori circolari di determinato diametro e a determinata distanza dalla parete del pezzo tranciato. ....</i>	65
<i>Figura 44 Normativa interna Malvestiti riguardante la fattibilità della tranciatura fine nel caso di tasche di forma rettangolare dotate di determinate caratteristiche geometriche. ....</i>	66
<i>Figura 45 pezzo realizzato ah hoc per indagare il nuovo limite nella tranciatura di una parete sottile. ....</i>	68
<i>Figura 46 Situazione iniziale del punzone : durante il primo mm di corsa il punzone trancia solo il profilo esterno del pezzo. In Viola sono visualizzati i punti di taglio, dove si generano le forze di compressione sul punzone. ....</i>	69
<i>Figura 47 Situazione del punzone oltre il primo mm di corsa, viene tranciata contemporaneamente sia il profilo interno che quello esterno. Compaiono quindi altri due punti di taglio con relativa forza di compressione sul punzone . ....</i>	70
<i>Figura 48 Stampo chiuso pronto per essere trasferito nella sede di Muggiò dove verrà utilizzato sulla pressa per eseguire la campagna di sperimentazione.....</i>	71
<i>Figura 49 Parte inferiore dello stampo: visibili matrice, estrattore figura, punzone tasca.....</i>	73
<i>Figura 50 Parte superiore dello stampo : è visibile il punzone figura, l'estrattore sfrido e la bussola guida-punzone. ....</i>	75
<i>Figura 51 Disegno del punzone figura. ....</i>	76
<i>Figura 52 Punzone figura.....</i>	76
<i>Figura 53 Disegno dell' estrattore sfrido. ....</i>	77
<i>Figura 54 Estrattore sfrido.....</i>	77
<i>Figura 55 Disegno della bussola guida - punzone. ....</i>	78
<i>Figura 56 Bussola guida - punzone. ....</i>	78
<i>Figura 57 Disegno del punzone tasca. ....</i>	79
<i>Figura 58 Punzone tasca.....</i>	79
<i>Figura 59 Disegno dell'estrattore figura.....</i>	80
<i>Figura 60 Estrattore figura. ....</i>	80
<i>Figura 61 Disegno della matrice. ....</i>	81
<i>Figura 62 Matrice. ....</i>	81
<i>Figura 63 Modello tridimensionale utilizzato in Simufact. ....</i>	82

<i>Figura 64 Sezione creata dal piano scelto per la simulazione 2D.</i>	84
<i>Figura 65 Caratterizzazione chimica del materiale di spessore 4 mm e relativa prova di trazione.</i>	86
<i>Figura 66 Caratterizzazione chimica del materiale di spessore 6 mm e relativa prova di trazione.</i>	87
<i>Figura 67 Caratterizzazione chimica del materiale di spessore 5 mm e relativa prova di trazione.</i>	88
<i>Figura 68 Caratterizzazione chimica del materiale di spessore 7 mm e relativa prova di trazione.</i>	88
<i>Figura 69 Valori rimasti invariati nella caratterizzazione del materiale.</i>	89
<i>Figura 70 Valori modificati per la caratterizzazione del materiale. Con i nuovi valori delle costanti si è tolta la dipendenza del comportamento del materiale dalla temperatura a cui si trova.</i>	89
<i>Figura 71 In rosso i punti in cui lo sfrido non si separa completamente dal pezzo.</i>	91
<i>Figura 72 Andamento della forza in direzione Z (Fz) agente sul punzone ( in kN ) in funzione della corsa del punzone stesso (in mm).</i>	92
<i>Figura 73 Mesh nel caso di simulazione con spessore 6 mm.</i>	94
<i>Figura 74 Pressione di contatto massima nella simulazione 6mm al momento in cui la corsa è di 3mm.</i>	96
<i>Figura 75 Misura della caduta del materiale sul pezzo tranciato (Delta H).</i>	96
<i>Figura 76 Grafico di analisi Z stress (MPa) al variare della larghezza della parete sottile (mm).</i>	99
<i>Figura 77 Dipendenza Z stress (MPa) da R (adimensionale).</i>	100
<i>Figura 78 Il grafico riporta l'andamento del valore della forza (kN) in direzione Z ( verticale ) agente sul punzone durante la corsa di tranciatura (mm). Si nota come questa forza aumenti all'aumentare dello spessore del materiale tranciato.</i>	101
<i>Figura 79 Composizione chimica K890.</i>	102
<i>Figura 80 Curva della durezza in funzione della temperatura di rinvenimento del K890.</i>	102
<i>Figura 81 Proprietà meccaniche K890.</i>	103
<i>Figura 82 Stampo montato su piastre standard e pronto per essere posizionato sulla pressa.</i>	104
<i>Figura 83 Grafico riassuntivo della campagna sperimentale di tranciatura.</i>	106
<i>Figura 84 Ubicazione del cilindro principale e di uno dei cilindri di corsa rapida.</i>	107
<i>Figura 85 Dettaglio dell'immagine soprastante. Cerchiato in rosso il cilindro principale e in verde il cilindro di corsa rapida.</i>	108
<i>Figura 86 Schermata principale del programma Scope usato per la lettura delle forze in gioco durante il processo.</i>	108
<i>Figura 87 In evidenza i picchi di pressione del cilindro principale. In ordinata troviamo la pressione ( in bar), mentre l'ascissa è il tempo (in secondi).</i>	110
<i>Figura 88 In rosso è evidenziata la zona del pezzo di cui viene simulata la tranciatura con Simufact.</i>	112
<i>Figura 89 Normativa interna Malvestiti risalente al 1995.</i>	114
<i>Figura 90 Aggiornamento del grafico presente nella normativa Malvestiti.</i>	115
<i>Figura 91 Ingrandimento della superficie di frattura del punzone utilizzato nella prima campagna.</i>	116
<i>Figura 92 Altro ingrandimento della superficie di frattura del punzone utilizzato nella prima campagna.</i>	116
<i>Figura 93 Ingrandimento della superficie di frattura del punzone utilizzato nella seconda campagna.</i>	117

## Indice delle tabelle

<i>Tabella 1 Dimensione dei codoli di attacco secondo DIN 9859.</i>	23
<i>Tabella 2 Tolleranza in mm nella tranciatura di profili interni.</i>	30
<i>Tabella 3 Tolleranze relative alla tranciatura di profili esterni.</i>	30
<i>Tabella 4 Tolleranze in mm su interassi di finestre o fori.</i>	31
<i>Tabella 5 Effetti della lubrificazione sulle forze di tranciatura e di estrazione.</i>	51
<i>Tabella 6 Criteri di scelta per i materiali degli stampi</i>	55
<i>Tabella 7 Classi ISO per profili esterni.</i>	59
<i>Tabella 8 Classi ISO per profili interni.</i>	60
<i>Tabella 9 Classi ISO per interassi.</i>	60
<i>Tabella 10 simulazioni iniziali appartenenti al piano preliminare di simulazione atto a scoprire l'influenza di ogni fattore sulla forza in direzione z che agisce sul punzone figura. In giallo sono evidenziati i valori dei parametri modificati rispetto alla condizione di partenza. I due riquadri rossi indicano un errore nel calcolo della forza sul punzone.</i>	90
<i>Tabella 11 Ulteriori prove con differenti strategie di remeshing.</i>	93
<i>Tabella 12 Riassunto delle tre strategie di remeshing sperimentate.</i>	93
<i>Tabella 13 Tabella risultati simulazioni.</i>	95
<i>Tabella 14 Valori di Z stress nel punto in cui esso raggiunge il valore massimo.</i>	97
<i>Tabella 15 Valori di Z stress nel momento in cui si registra la massima Contact Pressure.</i>	98
<i>Tabella 16 Confronto tra Z stress sulla parete di spessore 2 mm rispetto a quello sulle pareti di geometria variata a pari rapporto R.</i>	99
<i>Tabella 17 Forze sul punzone.</i>	101
<i>Tabella 18 Tabelle riassuntive delle due campagne sperimentali di tranciatura.</i>	105
<i>Tabella 19 valori di pressione nel cilindro principale e in quelli a corsa rapida.</i>	110
<i>Tabella 20 Valori di forza (in kN) nati dalla conversione dei dati relativi alla pressione. Nell'ultima colonna troviamo la forza di compressione agente sul punzone.</i>	110
<i>Tabella 21 Tabella riassuntiva riguardante la caduta di materiale sulla parete.</i>	111
<i>Tabella 22 Confronto tra Fz simulata e Fz misurata dalla pressa.</i>	112
<i>Tabella 23 Fz simulata e reale a confrontate in funzione dell'istante temporale dove esse raggiungono il loro valore massimo.</i>	113
<i>Tabella 24 Z Forze sul punzone</i>	121

## Elenco dei simboli utilizzati

$x_n$	Coordinata x del baricentro
$y_n$	Coordinata y del baricentro
$V_n, I_s, L$	Perimetro di tranciatura
$F_{Smax}$	Forza di tranciatura
$S, s$	Spessore della lamiera
$k_s, \tau$	Resistenza al taglio del materiale
$a_s$	Sezione della superficie
$F_h$	Forza di tranciatura orizzontale
$F_d$	Forza di tranciatura verticale
$F_v$	Forza verticale
$F'_v$	Forza verticale
$u_s$	Gioco
$c$	Coefficiente per calcolo gioco
$r$	Raggio di raccordo
$D_{min}$	Distanza tra zona di deformazione e perimetro di tranciatura adiacente
$d_p$	Diametro punzone
$F_R$	Forza prelamiera
$F_G$	Forza di contropressione
$F_{RA}$	Forza di strappaggio
$F_{GA}$	Forza di estrazione
$F_s$	Forza di taglio o forza di tranciatura
$F_{TOT}$	Forza totale
$f_1, f_2, f_3$	Coefficienti per calcolo forze
$h$	Altezza bordino cordonatura
$q_G$	Forza di contropressione specifica
$A_s$	Superficie compressa dall'estrattore
$a$	Larghezza parete sottile
$R$	Rapporto a/S
$A$	Area tranciata
$K_{emp}$	Costante empirica
Kel bussola	Costante elastica della molla applicata alla bussola guida-punzone
Kel estrattore	Costante elastica dell'estrattore
$F_z, Z$ forze	Forza di compressione del punzone
CP	Pressione di contatto, contact pressure
L elem	Lunghezza elemento finito
Delta H	Caduta di materiale sul pezzo

Z stress	Componente dello stato di sforzo in direzione Z
$F_z \text{ max}$	Massimo valore della forza di compressione sul punzone
$F_{\text{PUNZONE}}$	Forza di compressione sul punzone
$F_{\text{TRANCIATURA}}$	Forza di tranciatura
$F_{\text{PREMILAMIERA}}$	Forza del premilamiera
$F_{\text{MOVIMENTAZIONE}}$	Forza di movimentazione dello stampo

# CAPITOLO 1

## Tranciatura tradizionale

### 1.1 Introduzione alla tranciatura tradizionale

La tranciatura può essere descritta come l'esecuzione di aperture o fori sagomati in una lamiera mediante un attrezzo detto punzone e un contro-attrezzo detto matrice.

Lo scopo finale può essere l'esecuzione dei predetti fori oppure il ricavare dalla lamiera pezzi corrispondenti.

Il diametro della matrice è sempre leggermente maggiore del diametro del punzone in modo che tra i due vi sia un "gioco".

Le fasi principali della tranciatura possono essere descritte con riferimento alla punzonatura di un foro tondo in una striscia di lamiera. Supponiamo che il diametro del dischetto sia di molto maggiore dello spessore della lamiera. La forza di tranciatura viene applicata alla lamiera dalla superficie frontale del punzone: sotto quest'azione la lamiera si piega leggermente tra punzone e matrice. Al crescere del carico sul punzone questo incide la lamiera. Mediante lo scorrimento del materiale del pezzo nella direzione di taglio e nella direzione a questa ortogonale, sul lato entrata del punzone lo spigolo di quest'ultimo penetra nel materiale mentre dalla parte opposta lo spigolo della matrice entra corrispondentemente nella lamiera. Si creano così due cricche che al crescere della corsa si congiungeranno causando la rottura completa della superficie di frattura (fig. 1).

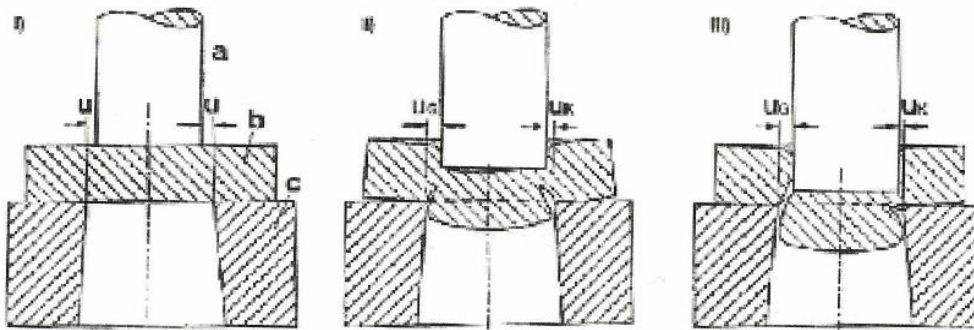
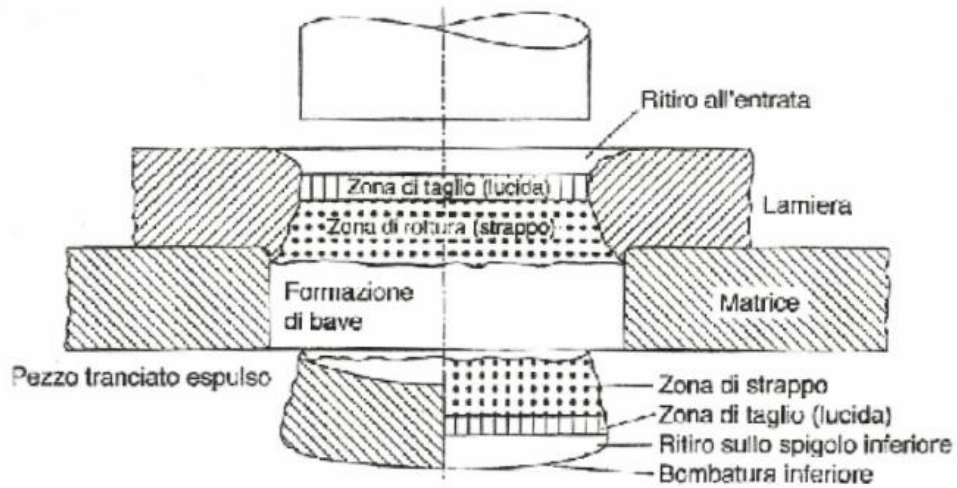


Figura 1 Fasi della tranciatura: I) Impatto del punzone con la lamiera II) Prima penetrazione del punzone e inizio formazione cricca nella parte inferiore della lamiera, sullo spigolo della matrice III) Estensione della cricca e distacco del pezzo tranciato.

L'operazione lascia sui bordi sia della lamiera che della rondella tranciata una tipica struttura superficiale articolata in varie zone (fig. 2).



*Figura 2 Conformazione della sezione di taglio del pezzo tranciato.*

Generalmente possiamo assumere che la superficie di tranciatura è liscia per un terzo dello spessore e strapata per due terzi dello spessore.

Va sottolineato che le matrici hanno lo scarico di tranciatura che consente l'evacuazione del pezzo: di conseguenza si riscontrano differenze di dimensioni dovute alle successive affilature.



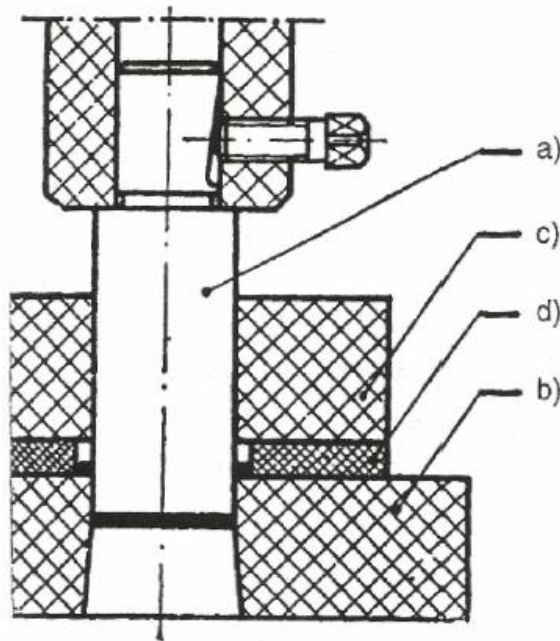
## 1.2 Tipi di stampi e componenti del processo di tranciatura

### 1.2.1 Tipi di stampi per tranciatura

Gli stampi di tranciatura vengono costruiti in una vasta gamma di tipi, ciascuno rispondente a determinate esigenze d'impiego. I più richiesti vengono di seguito descritti.

- Stampo semplice (fig. 3)

Punzone con codolo integrale (ossia in un solo pezzo) e matrice, entrambi fissati direttamente alla pressa. Soluzione valida per piccole serie : poche migliaia di pezzi di forma semplice. A questo tipo di stampo appartengono anche le unità di tranciatura per fori, cave e contornature su presse punzonatrici.



*Figura 3 Schema di stampo semplice per tranciatura. a) Punzone b) matrice c) Premilamiera d) Lamiera.*

- Stampo a blocco (fig. 4)

Punzone, matrice e punzoni per fori o cavi, sono montati su piastre guida con colonne e bussole per tranciare profili esterni di pezzi ed anche fori o cave contemporaneamente. Si ottengono pezzi molto precisi e piani.

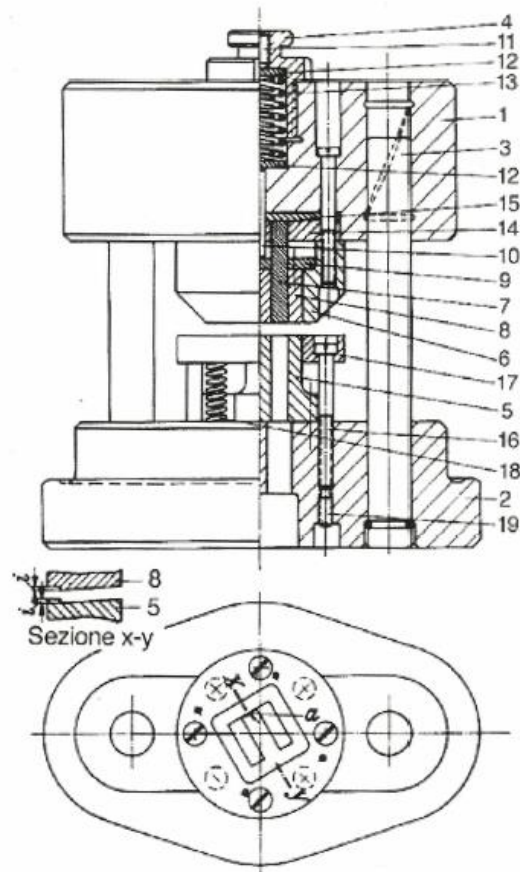


Figura 4 Esempio di stampo a blocco.

- Stampo a passo, a guida fissa (fig. 5)  
Punzoni tenuti da porta punzoni con codolo, piastra guida, matrice e base unite con vite e spine. Tale soluzione è adatta per piccole serie di pezzi con profili esterni e interni.

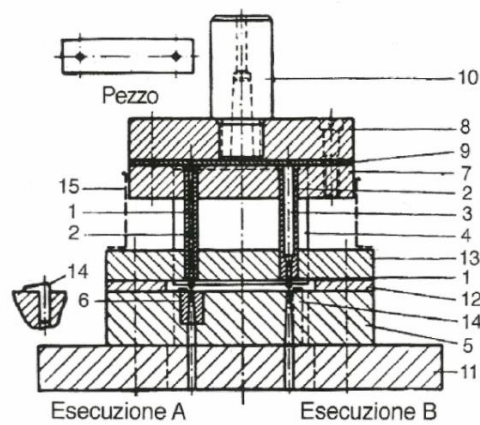


Figura 5 Esempio di stampo a passo, a guida fissa.

- Stampo a passo con punzoni rigidi

Punzoni e matrici sono montati su piastre guida con colonne e bussole; in particolare i punzoni sono installati rigidamente sul portapunzoni. Al posto delle piastre guida è prevista la piastra premilamiera con profilo uguale a quello dei punzoni ma con gioco di 0,2 mm. Questo tipo di stampo è adatto specialmente per alte velocità in quanto i punzoni rigidi non devono più scorrere nella guida con accoppiamento preciso che, ad alte velocità, causa grippaggi. Il montaggio dei punzoni sul portapunzoni deve essere molto stabile in modo da conferire la massima rigidità.

- Stampo a passo con punzoni guidati su piastre con colonne e bussole  
 È il tipo di stampo più usato per manufatti complessi e per grandi produzioni, copre un'ampia gamma di pezzi ottenuti per tranciatura (piani, piegati, imbutiti, assemblati, con filettatura) e offre la possibilità di produrne un numero maggiore per ogni colpo di pressa.

### 1.2.2 Punzoni per tranciatura, piastra porta-punzoni, piastra guida-punzoni

I punzoni vengono costruiti con particolarità geometriche adatte alla funzione che essi svolgono. L'esecuzione più nota è l'affilatura piana ortogonale; è la più economica e viene adottata in modo pressoché esclusivo per la tranciatura di lamiera con spessore fino a 2 mm. Per lamiera di spessore maggiore si usano punzoni provvisti di affilatura concava (l'angolo  $\alpha$  deve essere minore di  $4^\circ$ )(fig. 6).

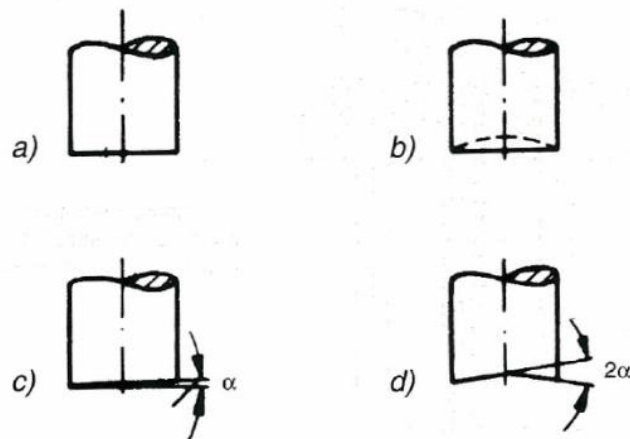


Figura 6 Varie esecuzioni della superficie di testa dei punzoni.

Il punzone c deve offrire sufficiente resistenza alla componente laterale della forza di tranciatura a differenza del punzone d dove questa necessità non si presenta. Per punzoni di piccolo diametro l'affilatura inclinata comporta un certo pericolo di rottura. Il profilo inclinato del piano di taglio offre però il vantaggio di ridurre le sollecitazioni sul punzone e di distribuire la forza di tranciatura. Se lo stampo è caratterizzato da più punzoni, è opportuno che le loro lunghezze siano lievemente differenti in modo che i diversi punzoni non eseguano la tranciatura tutti contemporaneamente. Con questo accorgimento si riducono sia le sollecitazioni sulla piastra matrice sia la forza richiesta alla macchina. I punzoni di forma complessa vengono opportunamente scomposti in più parti per facilitarne la costruzione (fig. 7 parte b) e in caso di scheggiatura di una parte del tagliente si può procedere con la sostituzione della sola parte danneggiata.

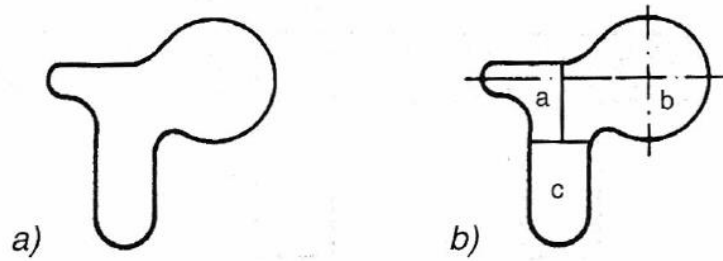


Figura 7 Punzone monolitico e punzone composto.

Se si adotta un punzone composto da elementi singoli si dovrà fare in modo che le divisioni tra i vari elementi cadano fuori dai raggi di raccordo (oppure si dovrà rinunciare ai raccordi). Poiché nella tranciatura il punzone è l'elemento mobile, in fase di progetto è necessario porre speciale attenzione nella scelta della soluzione più adatta tra le molte disponibili.

I piccoli punzoni possono avere una maggiorazione sulle parti non trancianti che conferirà una rigidità superiore. I punzoni di media grandezza possono avere profilo costante sull'intera lunghezza e testa riportata con viti oppure sagomata e poi brasata. I punzoni di maggiore dimensione potranno essere anch'essi a profilo costante sull'intera lunghezza oppure con la parte tranciante riportata su un supporto e fissata con viti e spine (si fissano direttamente sulla piastra base superiore) (fig. 8).

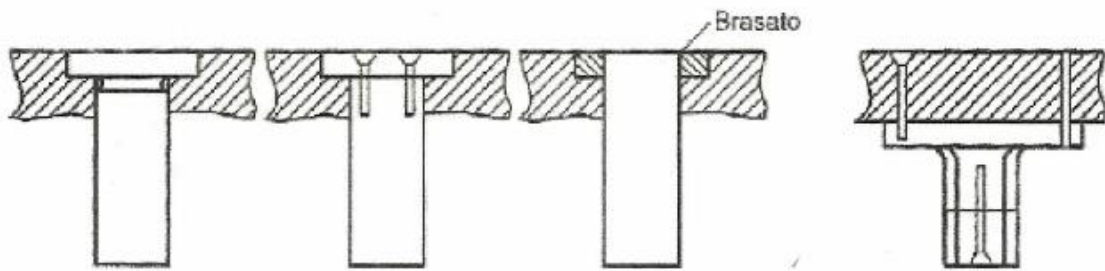
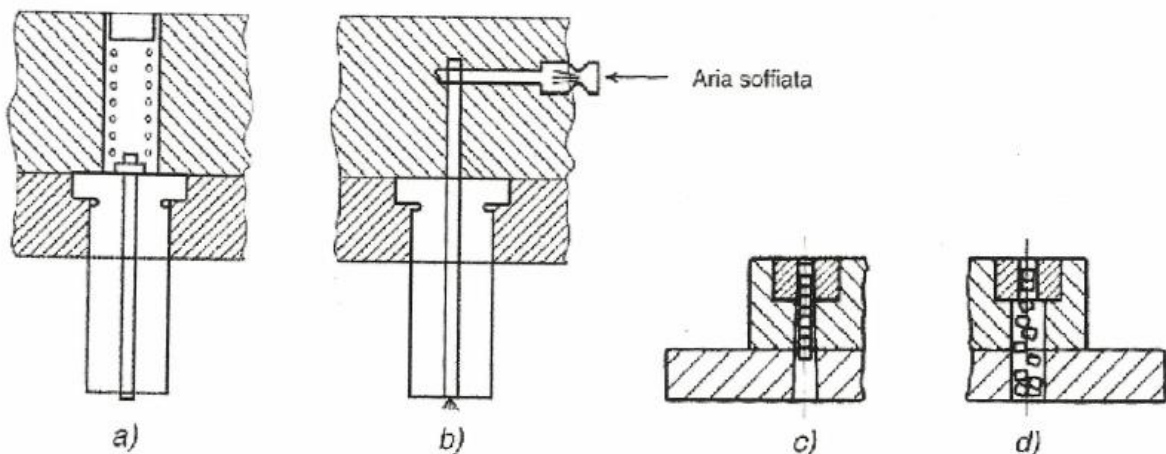


Figura 8 Diversi sistemi di attacco dei punzoni. Il punzone a destra dispone di parte tranciante riportata.

Quando si trancia con lubrificazione gli sfridi tendono a incollarsi sul punzone per poi risalire sul piano della matrice: si rimedia praticando alcuni fori nel punzone e inserendo estrattori a molla oppure soffiando aria compressa in modo da spingere gli sfridi verso il basso (fig. 9).



*Figura 9 Accorgimenti per evitare due tipici inconvenienti negli stampi: in a) e b) si evita la risalita dello sfrido; in c) e d) si evita l'intasamento dello sfrido.*

La parte superiore dello stampo è costituita dalla piastra base superiore e dalla piastra portapunzoni. Tra base superiore e base portapunzoni si dispone una contropiastra in acciaio temprato, per evitare che i punzoni di piccolo diametro vadano con il tempo ad incidere la piastra. Sia la base superiore sia la piastra portapunzoni devono essere di un acciaio di durezza non eccessiva scelto in funzione delle sollecitazioni da sopportare.

La piastra guida punzoni, che negli stampi con guida fissa è disposta sopra la piastra matrice, deve essere dimensionata per garantire una sufficiente robustezza. Per essa si adotta uno spessore di circa 15 mm per piccoli punzoni e fino a 25 mm per quelli maggiori. Quanto meglio il punzone è guidato nella sua piastra guida, tanto più lo stampo viene preservato dall'usura.

Come materiale per queste piastre si usano acciai comuni per basse produzioni e acciai legati per produzioni maggiori.

In ogni caso, grande importanza ha la corretta lubrificazione delle guide. raccomandabile fissare la guida punzoni sulla matrice non solo mediante viti a testa cilindrica, ma anche con spine che ne definiscono esattamente e definitivamente la posizione.

Il passaggio del materiale tra guida e matrice, sempre rispettando la condizione di corretto centraggio con la figura di tranciatura, si ottiene prevedendo un canale avente larghezza pari alla larghezza della lamiera, aumentata di 0,2-0,4 mm, e altezza pari allo spessore della lamiera maggiorato di 1,5 mm e, ancora, maggiorato della sporgenza dal piano matrice dei perni alza-striscia molleggiati atti a superare (se previsto) il tassello d'arresto per il passo. Lo stesso passaggio si può ottenere con l'inserimento di due lardoni collocati fra la guida e la matrice.

Negli stampi con guida a colonne, la piastra mobile dispone di una piastra riportata in acciaio temprato che fa da guida ai punzoni, e farà da premilamiera e da estrattore.

La piastra guida deve accompagnare anche i piloti, elementi generalmente tondi, temprati e rettificati, che opportunamente posizionati rispetto ai fori predisposti determinano la precisione del passo in uno stampo di questo tipo. Negli stampi a guida mobile, gli stessi lardoni sono fissati alla matrice con viti e spine.

### **1.2.3 Matrici e piastre porta-matrici**

Come i punzoni anche le matrici sono temprate e rettificate. Specialmente in stampi di grosse dimensioni, può accadere di dover generare soltanto pochi fori o comunque contorni di ridotto sviluppo per cui le parti di matrice che effettivamente eseguono la tranciatura possono venire disposte separatamente l'una dall'altra su una piastra base sulla quale sono inserite mediante forzamento o fissate sul piano con viti e posizionate con spine.

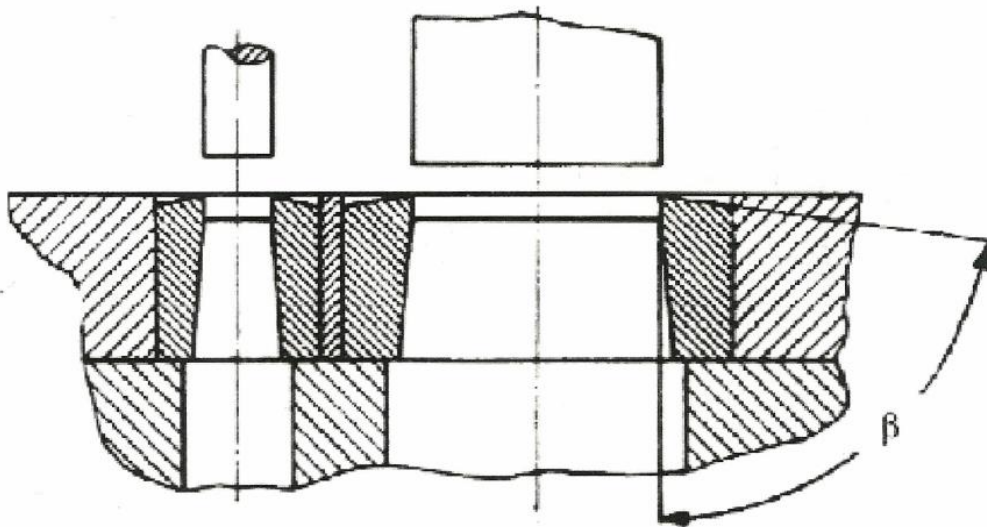
Nella maggior parte dei casi, la superficie superiore della matrice è allineata (cioè alla stessa altezza) alla superficie della piastra portamatrice. Particolarmente in stampi per la tranciatura di lamiera con spessore di oltre 3 mm vengono impiegate matrici la cui superficie superiore è spogliata in modo da formare un angolo minore di 90° con la superficie di spogliatura interna (fig. 10). L'inclinazione del punzone o della matrice non possono però essere effettuate a piacere: nei casi in cui è importante la planarità del pezzo tranciato la superficie inferiore del punzone deve essere piana e l'eventuale inclinazione dei taglienti va effettuata sulla matrice. Se viceversa il pezzo da utilizzare è la parte circostante residua (a quella asportata dal punzone) vale il criterio inverso (il punzone potrà essere inclinato o bombato).

Talvolta anziché matrici realizzate in un sol pezzo si utilizzano matrici composte. Le matrici devono essere disposte una accanto all'altra facendo coincidere le linee di separazione con il lato di maggiore lunghezza

dell'apertura. I singoli elementi di matrice vengono poi bloccati nel telaio dello stampo mediante listelli o cunei.

I vantaggi di questa soluzione si possono così sintetizzare:

- minore sfrido nella costruzione e ridotte deformazioni da tempra
- costruzione più economica specialmente nel caso di forme complicate
- possibilità di costruire separatamente singole parti complicate dello stampo e di inserirle più agevolmente nello stampo stesso



*Figura 10 Matrice con superficie superiore spogliata.*

Lo spessore della piastra portamatrice dipende dalle sollecitazioni di taglio e dalla forma del contorno da trancire. Una matrice con contorno circolare comporta una piastra di spessore inferiore a quello richiesto da una matrice con contorno poligonale, irregolare e con angoli acuti, poiché questi ultimi determinano effetti di intaglio.

Lo spessore della piastra è anche legato alle dimensioni della stessa e anche allo spessore della lamiera da trancire: per esempio, con lamiere sottili (spessore fino a 2,5 mm) e per una dimensione del pezzo di 60×80 mm è sufficiente uno spessore di piastra di 20mm, mentre a parità di spessore della lamiera, con una dimensione del pezzo di 200×250 mm sarà necessario uno spessore di piastra di 30 mm.

#### **1.2.4 Centratori e baricentro in tranciatura**

I centratori (o codoli di attacco) sono unificati in sede DIN. La tabella 1, con riferimento a detta norma e alla fig. 11, riporta le dimensioni di accoppiamento degli stessi.



Codolo (senza collare)	$d_1$	20	25	32	40	50	65
	$d_3$	M16 × 1,5	M16 × 1,5 M20 × 1,5	M20 × 1,5 M24 × 1,5	M24 × 1,5 M30 × 2	M30 × 2 M36 × 2	M42 × 3
	$l_1$	40	45	56	70	80	100
	$l_2$ $l_3$	3 58	4 68	4 79	5 93	6 108	8 128
Superficie di chiave	$h$	6	6	8	10	12	16
	$s$	17 <sup>-0,2</sup>	19 <sup>-0,25</sup>	27 <sup>-0,25</sup>	32 <sup>-0,25</sup>	41 <sup>-0,22</sup>	55 <sup>-0,4</sup>
Tacca o gola	$d_2$	15	20	25	32	42	53
	$l_3$	12	16	16	26	26	26
	$r_1$	2,5	2,5	2,5	4	4	4
Codolo con battuta	$d_5$	28	34	42	52	62	–
	$i$	5	5	6	8	8	–
	$l_5$	61	70	86	108	118	–
Spessore minimo base superiore	$k$	18	23	23	23	28	28
Foro per codolo	$l_6$	45	50	62	76	87	108
	$l_7$	20	22	22	36	36	36
	$d_9$	M12 × 1	M12 × 1	M12 × 1	M16 × 1,5	M16 × 1,5	M16 × 1,5

Tabella 1 Dimensione dei codoli di attacco secondo DIN 9859.

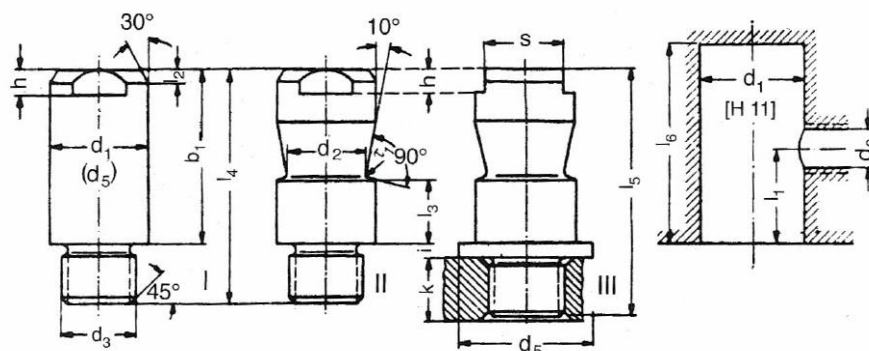


Figura 11 Dimensioni dei centratori d'attacco secondo la tabella 1.

I più diffusi sono i perni con diametro di diametro 32 e 40 mm. Di rado vengono utilizzati centratori lisci, ossia privi di scanalatura o gola.

I centratori a norma DIN prevedono vari tipi di attacco, rappresentati in fig. 12.

Il primo tipo di collegamento fra codolo e base superiore (tipo a) prevede la ricalcatura: questa soluzione si presta in generale solo per piccoli stampi con centratori di diametro fino a 25 mm.

La soluzione migliore è la b della fig. 12: in tale caso il bloccaggio del codolo filettato avviene mediante forzamento di una spina conica nel foro, corrispondentemente conico, previsto nel centro del codolo stesso. Sorprendentemente, si realizza così un sufficiente forzamento dei due elementi senza che sia necessario eseguire scanalature sul codolo filettato. L'estrazione della spina conica avviene agendo dalla parte superiore del codolo che sarà forato assialmente.

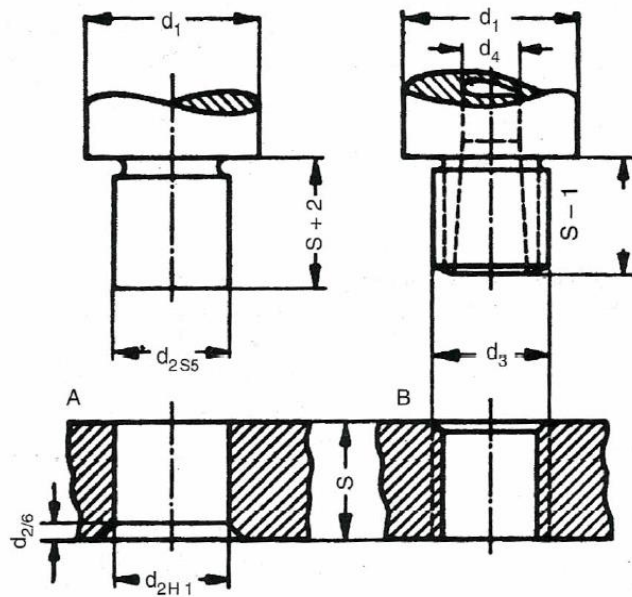


Figura 12 Tipi di fissaggio del codolo alla base superiore dello stampo.

Per facilitare il montaggio, le misure raccomandate per  $d_4$  sono leggermente superiori a quelle date nella norma DIN 9859. Questo tipo di fissaggio è economico e completamente sicuro.

Date le caratteristiche costruttive delle presse, specie di quelle a struttura chiusa, il fissaggio della parte superiore dello stampo avviene tramite viti direttamente sulla parte mobile della pressa, o con staffe laterali. Al posto del tradizionale codolo utilizzato come posizionatore dello stampo rispetto al bari centro della forza di tranciatura e come fissaggio dello stesso, alla pressa vengono applicati centratori fissati sul piano superiore, in numero minimo di due, di forma semplificata (fig. 13). La posizione ottimale dello stampo rispetto al centro pressa è quella più vicina al baricentro delle forze richieste.

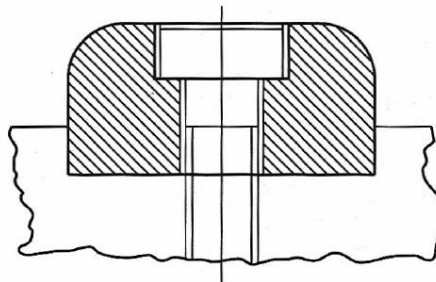


Figura 13 Centratori semplificati.

Per la determinazione del baricentro delle forze non è importante il baricentro di una o più superfici di pezzi da tranciare dal materiale di partenza, quanto quello del contorno di tranciatura. Nel caso di tranciatura con diversi punzoni, vanno determinati anzitutto i baricentri dei singoli contorni di taglio e successivamente il baricentro dell'insieme dei vari contorni. A questo scopo, in un punto scelto a piacere, si fissa un sistema di coordinate ortogonali x-y nel quale si riportano orizzontalmente (cioè in direzione parallela all'asse x) le distanze  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  dei singoli baricentri per precisare poi (ortogonalmente a queste) le distanze  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$  (come mostrato in fig. 14). Quindi si moltiplicano le singole superfici (o i perimetri) per le corrispondenti ascisse x, si sommano i vari prodotti e si divide il risultato per la somma delle superfici (o dei perimetri)  $V_1, V_2, V_3$  secondo la formula:



$$x_s = \frac{x_1 \cdot V_1 + x_2 \cdot V_2 + x_3 \cdot V_3 + x_4 \cdot V_4 + x_5 \cdot V_5}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5}$$

Lo stesso si fa con le ordinate  $y$ , in questo caso senza che sia necessario rispettare sempre la sequenza  $V_1, V_2, V_3$  dato che è importante unicamente la linea corrispondente alla singola ordinata  $y$ :

$$y_s = \frac{y_1 \cdot V_1 + y_2 \cdot V_2 + y_3 \cdot V_3 + y_4 \cdot V_4 + y_5 \cdot V_5}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5}$$

Con le due coordinate  $x_s$  e  $y_s$  il baricentro  $s$  è determinato.

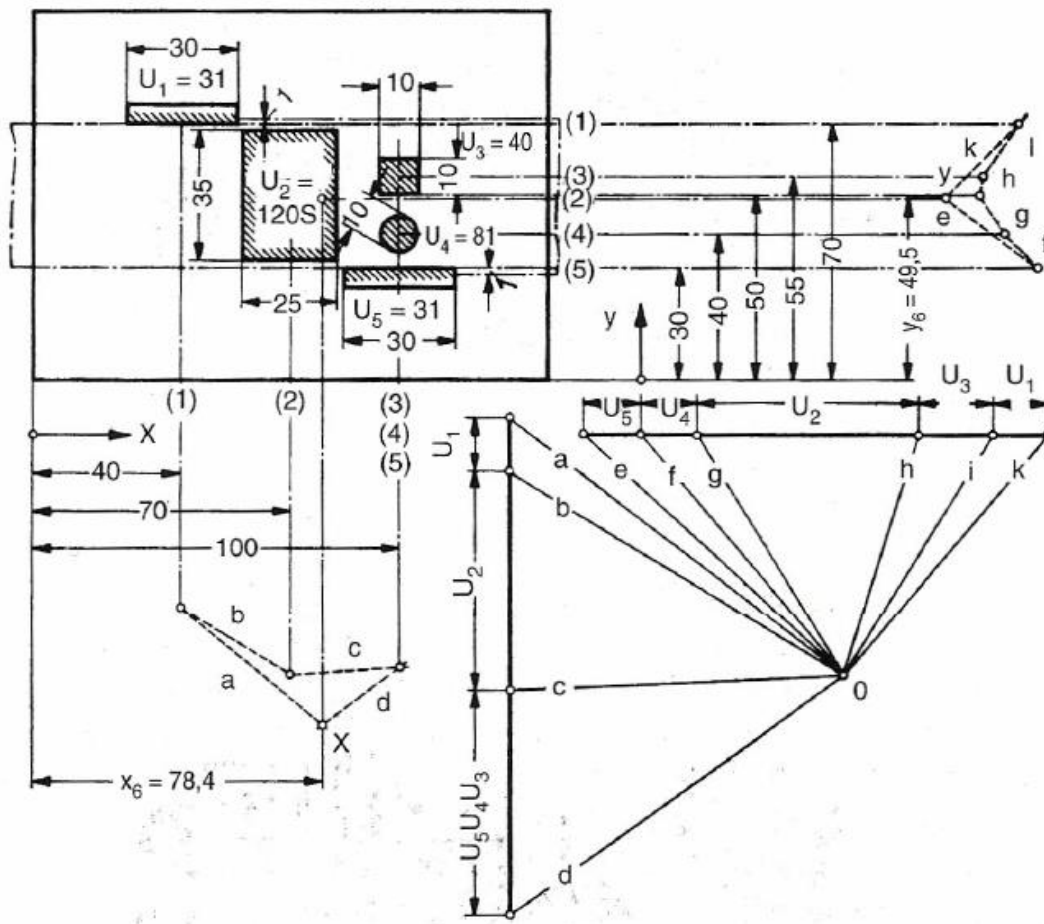


Figura 14 Determinazione grafica del baricentro  $s$  del contorno di tranciatura di una matrice.

## 1.2.5 Guida nastro, suddivisione del nastro e suo avanzamento

Per agevolare l'imbocco del materiale nello stampo, si deve creare un supporto con la piastra di appoggio fissata ai lardoni allungati dalla parte di entrata.

Data la necessità di ispezionare la zona di tranciatura, una soluzione molto utilizzata è quella di guidare il materiale con perni tondi provvisti di una cava circolare e inseriti fissi oppure mobili nella piastra matrice. Questa soluzione permette di tenere il piano di tranciatura pulito da sfridi e scorie provenienti dal nastro.

La suddivisione del nastro va fatta in modo da ridurre il più possibile la quantità di sfrido garantendo però che fra due pezzi successivi vi sia un ponticello sufficientemente adeguato da evitare che nella tranciatura si risenta della porzione di materiale incrudita dalla tranciatura precedente. Inoltre se il ponticello ha larghezza troppo piccola si può ribaltare e il materiale che lo costituisce può essere trascinato nella matrice con conseguente schiacciamento e sovrastimolazione degli spigoli dei taglienti. La larghezza dei ponticelli deve rispettare determinati rapporti rispetto allo spessore del materiale e alla lunghezza degli stessi ponticelli.

L'avanzamento del nastro all'interno della pressa dipende dalla tipologia di pressa e dalla velocità di avanzamento : per presse ad alte prestazioni con stampi in metallo duro e avanzamento fino a 80m/min è ottenuto tramite l'azionamento dei cilindri tramite alberi cardanici collegati all'albero motore, senza giunti, senza ruote libere e con correzione automatica sul passo .

Nelle applicazioni con medie prestazioni, l'azionamento avviene tramite una biella collegata con l'albero motore della macchina attraverso un disco eccentrico che impartisce un movimento di andata e ritorno (nei dispositivi a cilindri questo movimento è la rotazione dei cilindri stessi mentre in quelli a pinze è quello che determina lo spostamento delle pinze e la loro apertura/chiusura).

Per produzione di pezzi tranciati di medie dimensioni e basse quantità vengono utilizzati alimentatori pneumatici in linea con lo stesso stampo e comandati dal movimento verticale della macchina.

### **1.3 Forza di tranciatura, forza di estrazione e forza laterale**

Le forze che si generano nelle operazioni di tranciatura devono essere ricavate per il corretto dimensionamento della pressa necessaria e per la scelta degli utensili da impiegare.

Una formula semplificata che fornisce il valore della forza di tranciatura  $F_{Smax}$  è :

$$F_{Smax} = s \cdot l_s \cdot k_s$$

dove  $s$  è lo spessore della lamiera,  $l_s$  è il perimetro di tranciatura e  $k_s$  la resistenza al taglio del materiale. Quest'ultima grandezza può essere definita come quoziente fra forza massima di tranciatura e superficie in sezione  $a_s$ :

$$k_s = F_{Smax}/a_s$$

Con buona approssimazione la stessa  $K_s$  può essere fatta coincidere con la già citata resistenza al taglio  $\tau$ . In ogni caso fra punzone e striscia di lamiera agiscono anche pressioni radiali di compressione che determinano forze di attrito da vincere nella corsa di ritorno del punzone.

Queste forze possono assumere valori dall'1% al 40% della forza di tranciatura, in funzione delle condizioni di attrito, di lubrificazione, della finitura superficiale del punzone e delle tensioni radiali.

In fig. 15 si vede la scomposizione della forza di tranciatura orizzontale  $F_h$  in una verticale  $F_d$ .

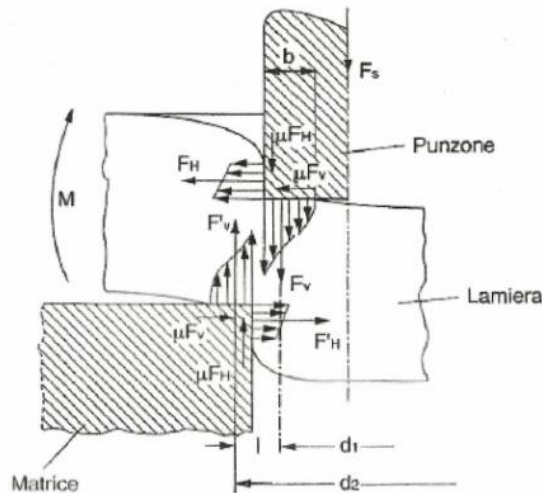


Figura 15 Componenti della forza di taglio nella tranciatura.

La forza verticale induce tensioni di compressione che durante la tranciatura si sviluppano nell'ambito di una limitata zona di superficie frontale del punzone e della matrice.

Poichè il materiale scorre in una certa misura in queste zone, ne risultano attriti dipendenti dal coefficiente di attrito e dalle forze verticali  $F_v$  e  $F'_v$ .

Condizionato dalla distanza "l" delle forze verticali, si sviluppa un momento che sta in equilibrio con le tensioni di flessione della lamiera (effetto di bombatura) e con le forze orizzontali  $F_h$ .

In fig. 16 è rappresentato l'andamento della forza di tranciatura in funzione della corsa. All'inizio delle operazioni la lamiera è deformata elasticamente; al superamento del limite elastico la forza di taglio cresce raggiungendo il valore massimo a circa il 30-50% della corsa per poi diminuire a causa del propagarsi della cricca di rottura.

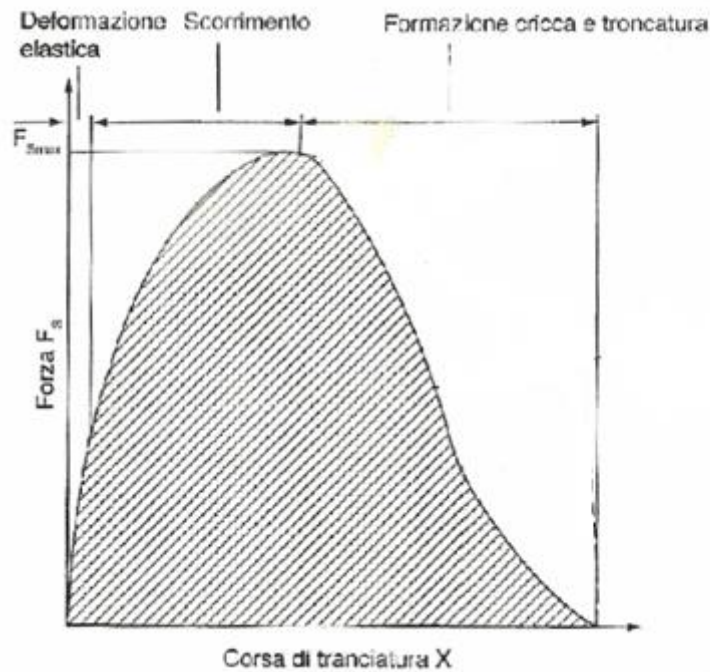


Figura 16 Andamento "qualitativo" della forza di taglio in funzione della corsa di tranciatura.

Per ottenere minori valori della forza di tranciatura si deve agire sulla conformazione degli elementi taglienti oppure con un' inclinazione assegnata alla superficie di testa del punzone (conseguenza negativa è l'aumento della corsa necessaria alla tranciatura).

Un'analisi più accurata della forza di tranciatura mette in evidenza come essa possa subire l'influenza di alcuni fattori :

- resistenza  $\tau$  al taglio della lamiera
- spessore  $s$  della stessa
- perimetro di taglio  $l_s$
- gioco  $u_s$
- geometria del perimetro di taglio
- condizioni di usura dell'utensile/ punzone e matrice
- finitura superficiale dell'utensile
- condizioni di lubrificazione.

Le forze necessarie all'estrazione dei punzoni sono in genere sottovalutate: possono raggiungere anche il 50% della forza di tranciatura. E' diffusa l'erronea opinione secondo la quale un punzone con superficie esterna rettificata a bassa rugosità richiede una minore forza di estrazione; al contrario, in questo senso risultano più favorevoli le superfici rugose.

Le forze laterali agenti sui punzoni durante la tranciatura dipendono dalla durezza e dallo spessore della lamiera nonché dal gioco tra punzone e matrice. Questo gioco è in realtà determinante perché se è troppo limitato le forze laterali risultano di considerevole entità, specialmente per lamiere di elevato spessore (si arriva facilmente al 55% della forza di tranciatura). Nella tranciatura con matrice a contorno chiuso le forze laterali non hanno però alcun effetto deviante poiché si equilibrano vicendevolmente.

## 1.4 Problematiche nella tranciatura tradizionale

### 1.4.1 Problematiche nei punzoni: saldature fredde e carico di punta

Sui punzoni per tranciatura, sia sulla loro parte esterna inferiore sia su quella frontale, si verificano spesso le cosiddette "saldature fredde", cioè parti di materiale tranciato rimangono "incollate" sul punzone alterandone il profilo di taglio. Di conseguenza possono causare la scheggiatura del punzone o il danneggiamento della matrice. Le cause di questo fenomeno non sono ancora del tutto chiare.

Si suppone che notevoli riscaldamenti (intorno a 550°C), un gioco troppo ridotto fra punzone e matrice, un elevato incrudimento durante la tranciatura e la presenza di determinati componenti di lega nella lamiera e nel punzone creino le premesse adatte. Le lamiere di acciai inossidabili austenitici danno spesso luogo a questo fenomeno, analogo a quello dei taglienti di riporto nella lavorazione ad asportazione di truciolo.

Possibili aiuti per risolvere questo problema sono:

- l'aumento del gioco fra punzone e matrice
- la minore lunghezza del punzone (per ottenere una migliore evacuazione del calore)
- l'insufflazione di aria fredda per il raffreddamento
- speciali arresti per scongiurare la penetrazione del punzone nella matrice,
- una parte cilindrica esterna del punzone non rettificata e tornita con forte rugosità (specialmente per gli acciai austenitici)
- un'adatta lubrificazione con olio additivato con zolfo o con bisolfuro di molibdeno.

Utensili correttamente temprati e con spigoli taglienti ben affilati assicurano non soltanto una tranciatura perfetta ma anche minori sollecitazioni rispetto a utensili con taglienti ottusi per i quali la pressione richiesta sul punzone può aumentare anche del 50%. Nel caso di punzoni non guidati è consigliabile adottare la soluzione costruttiva dello stampo con colonnette di guida. Tuttavia, anche in quel caso e anche nella tranciatura con piastra guida, la lunghezza massima accettabile per il punzone è limitata, cosa che vale in particolare per i punzoni di piccolo diametro operanti su lamiere di spessore relativamente consistente.

E' opportuno che il diametro del punzone non sia mai inferiore allo spessore della lamiera.

La presenza sul punzone di zone con diametri diversi senza corretti e possibilmente abbondanti raggi di raccordo tra le stesse può determinare cricche e successive rotture a seguito dell'effetto d'intaglio. Per evitare questo pericolo i raggi di raccordo devono essere i massimi possibile.

### 1.4.2 Usura dell'utensile e usura degli stampi

A seguito delle sollecitazioni di lavoro, punzone e matrice sono soggetti ad usura che si ripercuote negativamente sulla qualità dei pezzi finiti e sulla forza richiesta alla pressa.

Quando si conosce l'entità dell'usura che si manifesta in determinate condizioni di produzione si possono prevedere in partenza il numero di pezzi-limite oltre il quale è necessario effettuare nuovamente una ripassatura dello stampo.

L'usura dei taglienti ha un andamento progressivo approssimativamente di tipo lineare. Questo permette di prevedere con buona approssimazione il limite di utilizzo dell'attrezzo e di provvedere alla sua manutenzione programmata o alla sua sostituzione.

Lo sforzo di tranciatura, che deve vincere la resistenza del materiale, fa ripercuotere i suoi effetti sugli spigoli di taglio i quali, dopo un certo quantitativo di pezzi prodotti, perdono il loro filo iniziale. Ne consegue che gli oggetti stessi presentano un contorno poco preciso e ricco di bave. Per necessità di carattere economico e pratico si riabilita lo stampo, vale a dire: al punzone ed alla matrice, allo stato temperato, si spiana con la mola la faccia di taglio fino ad ottenere gli spigoli ancora vivi. Le perdite di materiale oltre a

quelle provocate dagli sforzi dinamici di tranciatura, possono anche essere dovute a fatti accidentali come scheggiature, sgranature e piccole incrinature, che si producono specialmente in corrispondenza agli spigoli dei punzoni e delle matrici.

Le cause che possono dar luogo a questi inconvenienti sono molteplici:

- materiale difettoso costituente lo stampo
- tecnica costruttiva insufficiente
- cattivo montaggio dello stampo
- giochi non appropriati di accoppiamento fra punzone e matrice
- cattivo uso dello stampo e suo piazzamento errato
- manutenzione poco accurata
- materiale da tranciare di qualità scadente od avente superfici non decapate e con scorie incorporate
- presenza di grani induriti nel materiale
- caduta di corpi estranei fra i fili taglienti durante la tranciatura.

Nei suddetti casi la perdita del materiale per la riabilitazione dello stampo è notevole (fino ad 1 mm), tenendo presente che la quota totale di materiale da affilare varia da 6 a 8 mm.

Considerando uno stampo normale è necessario togliere, con una rettifica, da 0,1 a 0,2 mm di spessore del materiale. Poiché la parte cilindrica della matrice è di circa 6 mm si possono fare circa 40 ripassature (6mm / 0,15 mm) il che significa che nel complesso lo stampo può lavorare per più di un milione di colpi.

### 1.4.3 Tolleranze raggiungibili

Poiché la precisione dimensionale e geometrica dei pezzi tranciati è determinata dalla qualità degli attrezzi, questi ultimi devono essere di almeno due classi ISO di qualità superiore a quella richiesta per i pezzi finali.

In generale, nell'esecuzione di fori o finestre (tranciatura interna), si ottengono precisioni superiori rispetto alla tranciatura di profili che determinano un pezzo (tranciatura esterna).

Nelle tabelle sottostanti sono riportati i valori delle tolleranze in mm per profili esterni, interni ed interassi.

Spessore lamiera s (mm)	Fino a 10	Da 11 a 30	Da 31 a 50	Da 51 a 100
da 0,3 a 1,0	0,05	0,07	0,08	0,12
da 1 a 3	0,06	0,08	0,10	0,14
da 2 a 4	0,08	0,10	0,12	0,15

*Tabella 2 Tolleranza in mm nella tranciatura di profili interni.*

Spessore lamiera s (mm)	Fino a 10	Da 11 a 30	Da 31 a 50	Da 51 a 100	Da 101 a 200
da 0,3 a 1,0	0,10	0,14	0,16	0,20	0,25
da 1 a 3	0,18	0,20	0,22	0,28	0,40
da 2 a 4	0,24	0,26	0,28	0,34	0,60

*Tabella 3 Tolleranze relative alla tranciatura di profili esterni.*

<b>Spessore lamiera s (mm)</b>	<b>Fino a 50</b>	<b>Da 51 a 100</b>	<b>Da 101 a 200</b>
da 0,3 a 1,0	$\pm 0,1$	$\pm 0,15$	$\pm 0,20$
da 1 a 3	$\pm 0,12$	$\pm 0,20$	$\pm 0,25$
da 2 a 4	$\pm 0,15$	$\pm 0,25$	$\pm 0,30$

*Tabella 4 Tolleranze in mm su interassi di finestre o fori.*

## 1.5 Accorgimenti per una corretta progettazione



### 1.5.1 Il "gioco"

Per la durata utile di uno stampo per tranciatura è di grande importanza il gioco  $U_s$  fra punzone e matrice.

In primo luogo detto gioco deve essere uniforme, ossia uguale in tutti i punti dello sviluppo; la sua entità dipende principalmente dallo spessore del materiale da tranciare e dalle caratteristiche meccaniche. La scelta del gioco è molto importante per la qualità e la quantità dei pezzi prodotti tra un'affilatura e l'altra, oltre che per valutare lo sforzo di tranciatura e le conseguenti sollecitazioni sullo stampo e sulla pressa.

Per scegliere il gioco ottimale si possono utilizzare grafici come quello in fig. 17.

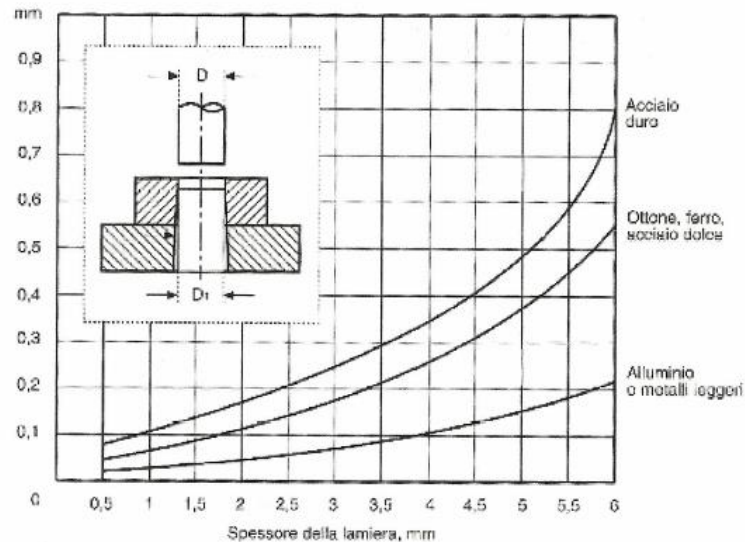


Figura 17 Grafico per la scelta del gioco  $u$  fra matrice e punzone.

Poiché la matrice si usura e deve venire periodicamente riaffilata, per pezzi da tranciare caratterizzati da elevate esigenze di precisione, il foro della matrice (a partire dal tagliente della stessa verso il basso) viene realizzato senza spoglia per un'altezza pari a tre volte lo spessore della lamiera ma non superiore a 2 mm. Solo a partire da questa profondità può essere realizzata la spoglia con un angolo fino a circa  $2^\circ$ .

Sebbene una spogliatura che parta già dallo spigolo tagliente della matrice stessa determini una forza di taglio inferiore a quella richiesta dal tagliente con angolo di  $90^\circ$ , un tratto cilindrico iniziale della cava della matrice consente di mantenere costante il profilo di tranciatura anche dopo varie riaffilature. Inoltre garantisce il mantenimento dell'effetto di forzamento tra pezzo tranciato e pareti della cava matrice: tale effetto è gradito perché impedisce la risalita degli sfridi. Quanto minore è il gioco, tanto minore è il pericolo della risalita degli sfridi.

La precisione dei pezzi tranciati migliora se si adotta un gioco limitato ma contemporaneamente cresce la deformazione del materiale nella zona di taglio con conseguente incrudimento del materiale (e di conseguenza superiori forze di tranciatura, come evidenziato in fig. 18).



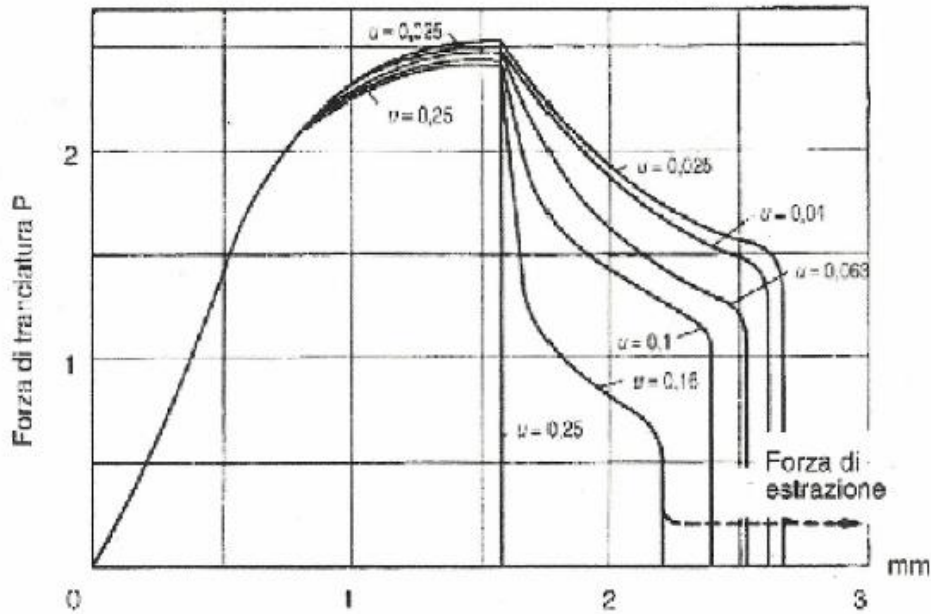


Figura 18 Influenza del gioco  $u$  sulla forza e sul lavoro di tranciatura.

La determinazione del gioco consente di ridurre anche del 15% la forza di tranciatura e del 40% il lavoro necessario. Il valore del gioco  $u_s$  va rapportato allo spessore  $s$  della lamiera ed indicativamente vale:

$$u_s = 5\% - 13\% s$$

Nel caso di perimetri di tranciatura chiusi su se stessi con lamiera di spessore fino a 3 mm il gioco può essere anche:

$$u_s = c \times s \times \sqrt{\tau}$$

Il fattore  $c$  è uguale a 0,005 se si vuole ottenere la migliore qualità delle superfici tranciate; è invece uguale a 0,035 se si punta alla riduzione della forza di tranciatura.

Per una più corretta determinazione del coefficiente correttivo  $c$  si dovrebbe tener conto anche del perimetro di tranciatura, della qualità del solco e dello spessore della lamiera.

La grandezza  $\tau$  è la resistenza al taglio e orientativamente vale 0,8-0,9 volte la resistenza a trazione del materiale ( $R_m$ ).

## 1.5.2 Geometria dei pezzi tranciati

Poiché le sollecitazioni sui taglienti, in particolare su quelli del punzone, crescono fortemente quando si riduce il rapporto fra sezione di tranciatura e lunghezza del perimetro di taglio, vanno evitati pezzi con cave lunghe e strette così come geometrie con punte o spigoli vivi.

Gli spigoli devono essere sempre arrotondati ( $r \geq 0,5s$ ). Nella punzonatura per generare fori occorre limitare il diametro minimo del punzone che non deve scendere sotto 1,2 volte lo spessore della lamiera per evitare cedimenti da "carico di punta" del punzone stesso.

Nonostante la convenienza e la necessità di risparmiare materiale i "ponticelli" tra una figura e l'altra non devono essere sottodimensionati per evitare influenze reciproche negative delle varie figure.

Ogni tranciatura determina infatti un certo incrudimento del materiale in prossimità del perimetro di taglio. se a distanza troppo piccola si effettua un'altra tranciatura questa avverrà sul materiale incrudito (più duro e più resistente) con evidenti conseguenze negative in termini di forza necessaria e di sollecitazioni su punzone e matrice usurando maggiormente i taglienti.

la distanza tra la zona di deformazione e il perimetro di tranciatura immediatamente adiacente deve rispondere al seguente criterio empirico:

$$D_{\min} = d_p / 2 + 2s$$

dove  $d_p$  è il diametro del punzone e  $s$  lo spessore della lamiera.

# CAPITOLO 2

---

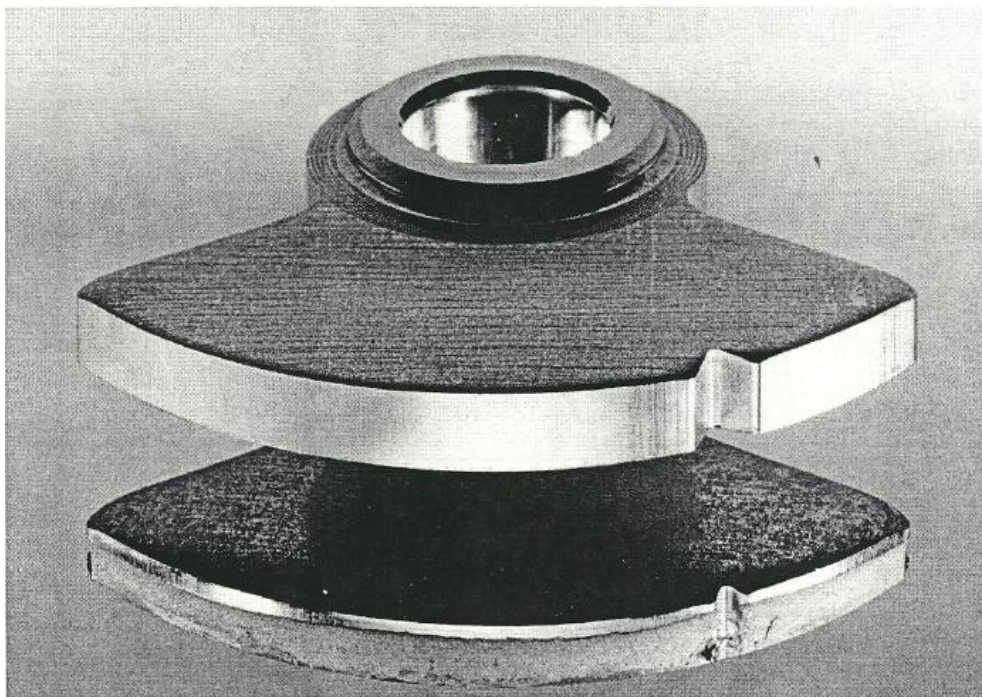
## Tranciatura fine

### 2.1 Introduzione alla tranciatura fine

Il processo di tranciatura fine fu brevettato in Germania nel 1923, sotto la denominazione di "feinstanz"; come sistema di tranciatura progredito comportante il bloccaggio del materiale durante il taglio e l'uso di un gioco ridotto tra punzone e matrice. L'impiego pratico di questa tecnica rimase tuttavia inibito per lungo tempo, a causa dell'impossibilità di raggiungere una durata economica degli elementi attivi degli stampi in sede di produzione di serie. Gli acciai per utensili dell'epoca, i materiali da tranciare, le presse e i lubrificanti costituivano un insieme troppo debole in riferimento alla gravosità del processo.

Un terzo di secolo più tardi, verso la fine degli anni '50, alcuni specialisti svizzeri si cimentarono nell'impresa di procedere allo sfruttamento industriale del processo, e ben presto comparvero sul mercato i primi stampi e le prime presse per tranciatura fine atti alla produzione di piccoli pezzi destinati prevalentemente, ma non solo, all'industria delle macchine per ufficio, che all'epoca erano elettromeccaniche.

Il processo di "tranciatura fine" permette di ottenere in un solo colpo e con un solo stampo, dei particolari tranciati molto precisi, calibrati, senza alcuna deformazione, con un profilo definito e senza strappi.



*Figura 19 Comparazione della qualità delle superfici tranciate. Sopra vediamo un pezzo tranciato fine con una superficie liscia al 100% e sotto un pezzo realizzato in tranciatura tradizionale con una superficie 30% liscia e 70% strappata.*

Con la tranciatura fine si genera inoltre un'elevata planarità, grazie alla presenza nella matrice di un elemento a funzionamento idraulico, antagonista al punzone, che controlla la penetrazione del pezzo in matrice e ne evita l'imbarcamento.

Mentre con la tranciatura tradizionale si ottiene una superficie liscia solo su una piccola porzione dello spessore del pezzo (circa un terzo) e strappata per la restante parte, con la tranciatura fine si possono produrre pezzi di spessore sino a 16 mm con superfici perfettamente finite, caratterizzate da una rugosità sino a 0,5 Ra. Appare subito evidente l'enorme vantaggio di questa tecnologia rispetto alla tranciatura tradizionale dove i suddetti elementi dovrebbero essere sottoposti ad operazioni successive di finitura su altre macchine utensili.

È opportuno precisare, tuttavia, che una piccola parte dello spessore del pezzo è interessata da un arrotondamento dovuto al cedimento che avviene sul materiale all'inizio della sua penetrazione nella matrice. Inoltre, per quanto riguarda la bava sui pezzi tranciati fini, va detto che essa esiste esattamente come nella tranciatura classica, e che deve essere quindi asportata mediante una successiva operazione di sbavatura.

Nell'arco di cinque anni il procedimento di tranciatura fine fu applicato a numerosi altri settori dell'industria meccanica.

## 2.2 Basi e componenti del processo, tipi di stampi in uso

### 2.2.1 Basi del processo

La tranciatura fine è caratterizzata da alcuni elementi basilari, ossia:

- stampi speciali, specificamente studiati;
- gioco di tranciatura ridotto, con valori intorno allo 0,5% dello spessore del pezzo da tranciare;
- bordino perimetrale che insegue il profilo del pezzo, presente sul premilamiera e qualche volta anche sulla matrice;
- particolari presse a triplice effetto, di speciale precisione e con velocità di tranciatura controllata, solitamente non oltre i 50 mm/s;
- adeguata lubrificazione, senza la quale il processo è inattuabile.

Durante la tranciatura fine, il punzone si appoggia a bassa velocità sul materiale da tranciare. Quest'ultimo è bloccato all'esterno del perimetro di taglio dal premilamiera e dalla matrice e, all'interno della linea di taglio stessa, dal punzone e dall'estrattore.

Fondamentale è l'azione del bordino perimetrale: per lamiere di spessore fino a 4,5 mm la tranciatura fine richiede il bordino unicamente sul premilamiera, mentre per spessori superiori è richiesto un secondo bordino sulla matrice.

Nella tranciatura tradizionale il gioco fra punzone e matrice ha un valore intorno al 10% dello spessore del materiale. In quella fine, invece, il gioco viene ridotto di circa 10 volte.

Con 4 mm di spessore lamiera si ha infatti un gioco di 0,04 mm, contro uno di 0,4 mm nella tranciatura tradizionale. Se la superficie di taglio non è richiesta liscia al 100%, il gioco può però essere leggermente aumentato, a vantaggio dei maggiori intervalli di riaffilatura.

In figura 20 viene evidenziata la differenza tra tranciatura tradizionale e tranciatura fine.

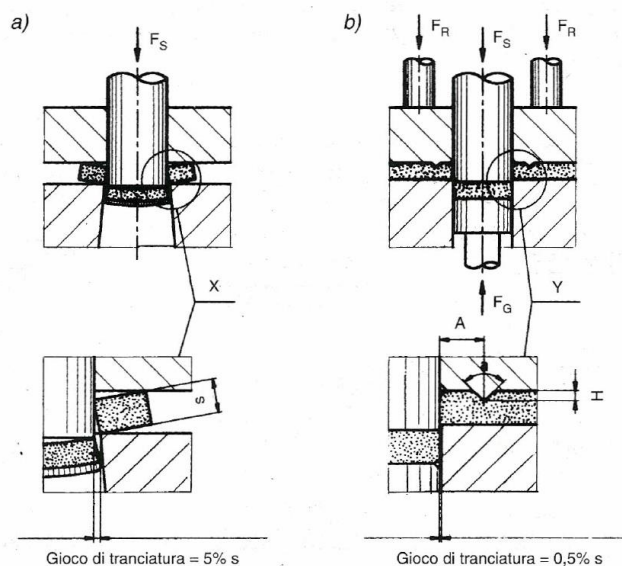


Figura 20 Differenza tra tranciatura tradizionale (a) e tranciatura fine (b) La trattazione delle forze in tranciatura fine verrà affrontata successivamente.

Il processo può essere così descritto (fig. 21):

- lo stampo si apre e vi viene introdotta la lamiera;
- lo stampo si chiude e vengono attivate la forza del premilamiera e la forza di contropressione ( $F_R + F_G$ );
- inizia la tranciatura;
- la tranciatura viene completata;
- lo stampo si riapre;
- lo sfrido viene estratto dalla forma interna e ha luogo lo strappaggio del nastro dal punzone (nasce  $F_{RA}$ );
- si estrae il pezzo tranciato (nasce  $F_{GA}$ ) e si ha l'avanzamento del materiale;
- il pezzo e gli sfridi vengono espulsi.

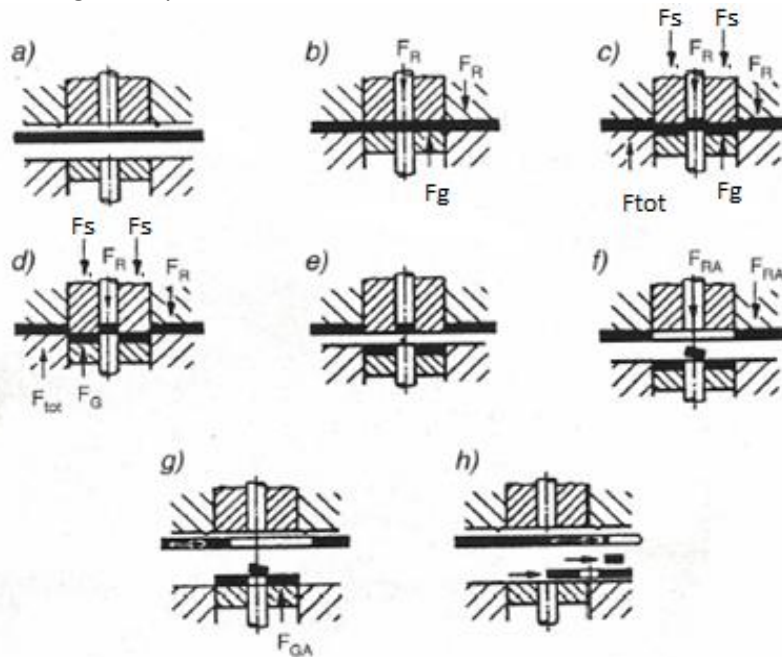


Figura 21 Fasi della tranciatura fine.

Il processo esige presse speciali, per esso specificamente studiate: la forza di tranciatura viene generata con sistema meccanico a ginocchiera per macchine con forza totale fino a circa 2.500 N e con sistema idraulico per macchine di forza superiore. Contropressione e carico al premilamiera sono invece sempre generati idraulicamente.

Il carico totale sviluppato sul pistone nella tranciatura deve comprendere non solo la forza di taglio, bensì anche quella esercitata dal premilamiera e dalla contropressione quindi

$$F_{TOT} = F_S + F_R + F_G \text{ (N)}$$

Nelle moderne presse per tranciatura fine viene attuato un recupero parziale della forza al premilamiera dopo che questo ha inciso la lamiera con il proprio bordino, ma prima che la tranciatura abbia inizio. Si può così aumentare la forza disponibile per la tranciatura a parità di forza totale.

A fine tranciatura si ha l'estrazione degli sfridi dalla forma interna ed esterna e, successivamente, del pezzo tranciato.

Il ridotto gioco di tranciatura e l'alta precisione richiesta ai pezzi da produrre impongono una grande rigidità della struttura della pressa e una guida molto precisa dello slittone.

In una pressa idraulica per tranciatura fine il movimento della slitta dal punto morto inferiore viene scomposto come segue:

- chiusura rapida
- controllo di sicurezza e coniatore bordino perimetrale
- corsa di tranciatura

- corsa di ritorno rapido.

È fondamentale che nella zona di tranciatura lo scorrimento sia lento e a velocità costante; le corse a vuoto devono invece essere il più veloci possibili.

## 2.2.2 Matrice e inserti

A causa delle grandi forze in gioco, in generale, le matrici di tranciatura fine vengono blindate tramite un anello esterno. Questo anello viene progettato in modo tale da avere un'interferenza tale per cui il suo diametro è ridotto del 3 ‰ rispetto al diametro della matrice che deve essere blindata (creando così una precompressione della matrice).

La matrice da blindare viene prima sottoposta a tutti i cicli tecnologici che la riguardano (fresatura, elettroerosione, ecc.). L'anello esterno viene quindi scaldato e montato attorno alla matrice, dopo si procede con le operazioni di finitura che riguardano la figura della matrice, cioè la sua parte interna.

Per facilitare la manutenzione sono sempre più utilizzate matrici insertate, sotto le quali vengono posti spessori variabili in funzione delle diverse affilature.

In caso di zone critiche è buona regola prevedere un inserto (fig. 22). Inserti di questo tipo possono essere facilmente supportati sulla piastra portapunzone. Poiché simili zone sono solitamente critiche, è opportuno predisporre fin dall'inizio un esemplare di ricambio dell'inserto allo scopo di consentirne la sostituzione rapida in caso di rottura, evitando interruzioni di produzione. La base dell'inserto va dimensionata in modo abbastanza ampio da permettere la filettatura per una vite di ritenuta di sufficiente diametro e resistenza.

Gli inserti per le piastre di pressione possono essere realizzati facilmente a partire da perni rotondi o pezzi profilati, dovendo essi provvedere soltanto allo strappaggio della parte di striscia che li circonda.

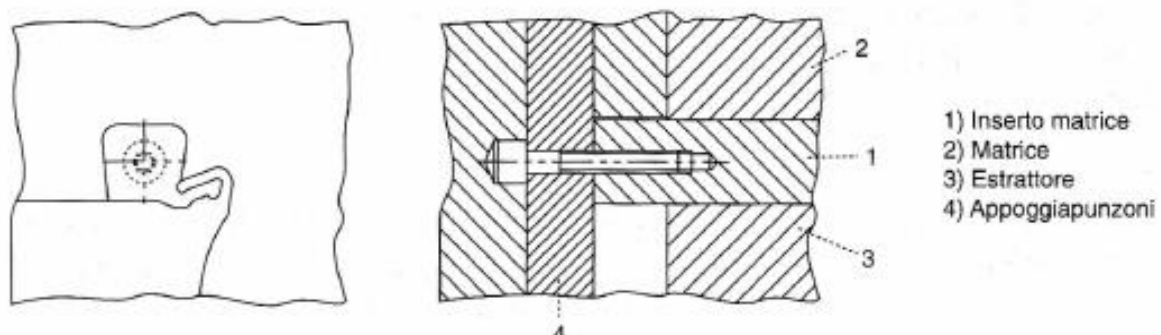


Figura 22 Inserto per una zona critica della matrice.

## 2.2.3 Punzoni per foratura e per profili interni

Per fori circolari con diametro superiore allo spessore della lamiera, vengono utilizzati punzoni standard in acciaio super rapido. Nel caso di fori di diametro inferiore allo spessore, vengono impiegati punzoni con corpo rinforzato. Soltanto l'estremità tranciante dei punzoni viene rettificata alla misura richiesta, così da avere uno stelo di maggiore sezione e resistenza.

Piccoli punzoni per profili interni possono essere ottenuti da punzoni circolari. Quelli per profili interni di maggiori dimensioni vengono invece costruiti mediante lavorazione di barre di acciaio per utensili. Punzoni per interni con dimensioni sufficienti ad accogliere un foro filettato vengono fissati con una vite direttamente sulla piastra portapunzoni.

Quando punzoni con profilo di importanza critica debbono conservare la propria posizione angolare (non devono poter ruotare), si utilizza una linguetta inserita nell'alloggiamento della testa. Nella generazione di profili interni con tolleranze particolarmente strette e con parti di profilo sporgenti, è opportuno utilizzare punzoni circolari nei



quali vengono montati inserti così da realizzare il profilo finale desiderato.

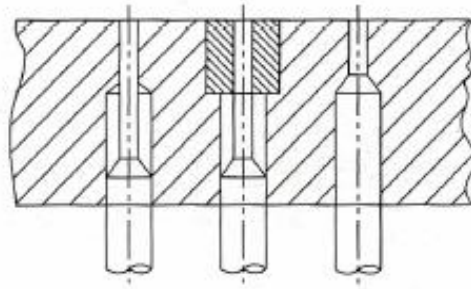


Figura 23 Punzoni con diametri differenziati per l'esecuzione di fori con diametro inferiore allo spessore della lamiera.

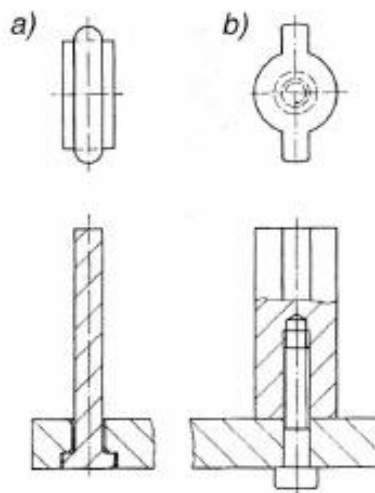


Figura 24 Fissaggio di punzoni per profili interni: a) mediante collare alla base; b) mediante vite di fissaggio alla piastra di supporto .

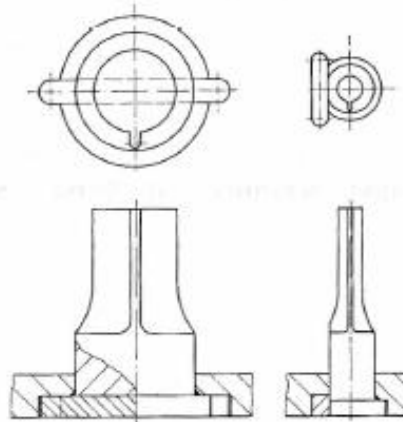
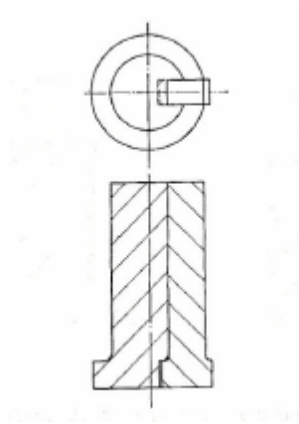


Figura 25 Punzoni per profili interni, fissati contro la rotazione.





*Figura 26 Punzone per profilo interno con tolleranze critiche su foro e cava per linguetta.*

## 2.2.4 Estrattori

La funzione degli estrattori è l'espulsione del materiale dal punzone dopo la tranciatura.

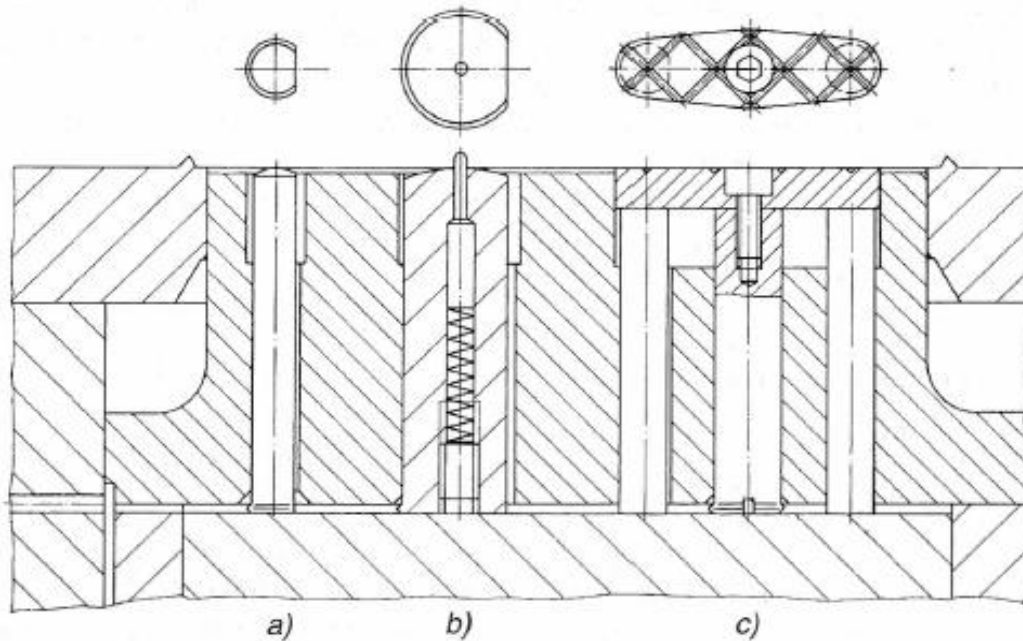
La parte interna che resta nel punzone è completamente "sigillata", per questa ragione è necessario prevedere un canale di scarico dell'aria (fig. 27 parte a) oppure un foro così da permettere all'aria di fuoriuscire.

Quando fra profilo interno e profilo esterno vi sono sezioni molto sottili nelle quali potrebbe crearsi un accumulo di calore a causa dell' attrito durante la tranciatura, si può prevedere una connessione per soffiaggio permanente di aria. Questo raffreddamento consente spesso un notevole aumento del numero di pezzi prodotti tra una riaffilatura e l'altra.

Per impedire che sfridi di ampia dimensione restino sull'estrattore, quest'ultimo viene spesso leggermente bombato in testa e può essere anche dotato di un perno centrale a molla (fig. 27 parte b) che collabori al distacco.

Se vi è il pericolo che sfridi di piccole dimensioni possano cadere in aperture più ampie presenti nel punzone, sugli estrattori, in corrispondenza di dette aperture, va disposta una piastra (fig. 27 parte c). Se gli estrattori possono essere realizzati con dimensioni sufficienti, è vantaggioso fissare direttamente la piastra agli stessi mediante viti. Piccole cave incrociate ricavate sulla piastra fanno sì che lo sfrido venga soffiato via facilmente.

Quando vengono usati stampi a punzone fisso e le dimensioni del profilo interno da generare sono 10 o più volte superiori allo spessore di lamiera, anche sugli estrattori viene previsto un bordino a V.



*Figura 27 Perti di estrazione: a) canale di sfiato ricavato mediante spianatura del punzone; b) punzone con perno interno a molla per l'estrazione del pezzo; c) punzone con piastra di protezione fissata con vite al perno estrattore.*

L'estrattore ha tre funzioni base:

- bloccare saldamente il materiale contro il punzone durante la tranciatura
- assicurare la guida positiva per il punzone preposto alla tranciatura del profilo interno
- espellere il pezzo tranciato dalla matrice dopo la tranciatura.

L'estrattore può inoltre essere utilizzato per operazioni di coniazione e di marcatura sui pezzi e per fare piegature prima della tranciatura.

Se possibile, una spina a molla di espulsione va prevista nell'estrattore allo scopo di sollevare leggermente il pezzo e assicurare che esso venga soffiato via dalla zona dello stampo mediante un getto d'aria. Per impedire disallineamenti fra punzone e punzone per profilo interno nei casi in cui si abbiano pezzi di forma circolare con profilo interno eccentrico, il movimento angolare dell'estrattore viene impedito mediante una sorta di chiavetta.

Dato che la piastra di pressione è fissata con viti all'estrattore, quest'ultimo non può fuoriuscire dallo stampo. Stampi senza piastra di pressione sull'estrattore richiedono che la testa dell'estrattore stesso sia leggermente allargata per impedirne la caduta.

## 2.2.5 Scopo del bordino a V e sua definizione

Il bordino a V appare come una sorta di nervatura in rilievo che, sul premilamiera, corre lungo tutto il perimetro del profilo da tranciare, esternamente a esso e a una certa distanza dalla linea di taglio. La funzione del bordino è di trattenere il materiale fuori della linea stessa e di impedirne lo scorrimento durante l'operazione di taglio. Nel caso di forme interne di piccole dimensioni, questo flusso di materiale tendente ad allontanarsi dalla zona di taglio non si verifica, per cui il bordino di solito non è necessario.

Per forme interne di maggiori dimensioni (diametro oltre 30-40 mm) è spesso consigliabile prevedere un bordino analogo anche sull'estrattore. Nel caso di stampi a punzone mobile ciò si fa solo quando è assolutamente indispensabile, poiché la sezione resistente dello stampo deve essere aumentata al massimo allo scopo di consentire la trasmissione delle forze richieste.

Quando la lamiera da tranciare ha spessore oltre 4-5 mm oppure è in materiale di alta resistenza, si utilizzano di solito due bordini, uno sul premilamiera e l'altro sulla matrice.

In questo caso la riaffilatura non può essere effettuata su una rettificatrice in piano, bensì richiede una più complessa fresatura o elettroerosione. Le dimensioni e la distanza dei bordini sono determinate dallo spessore del materiale.

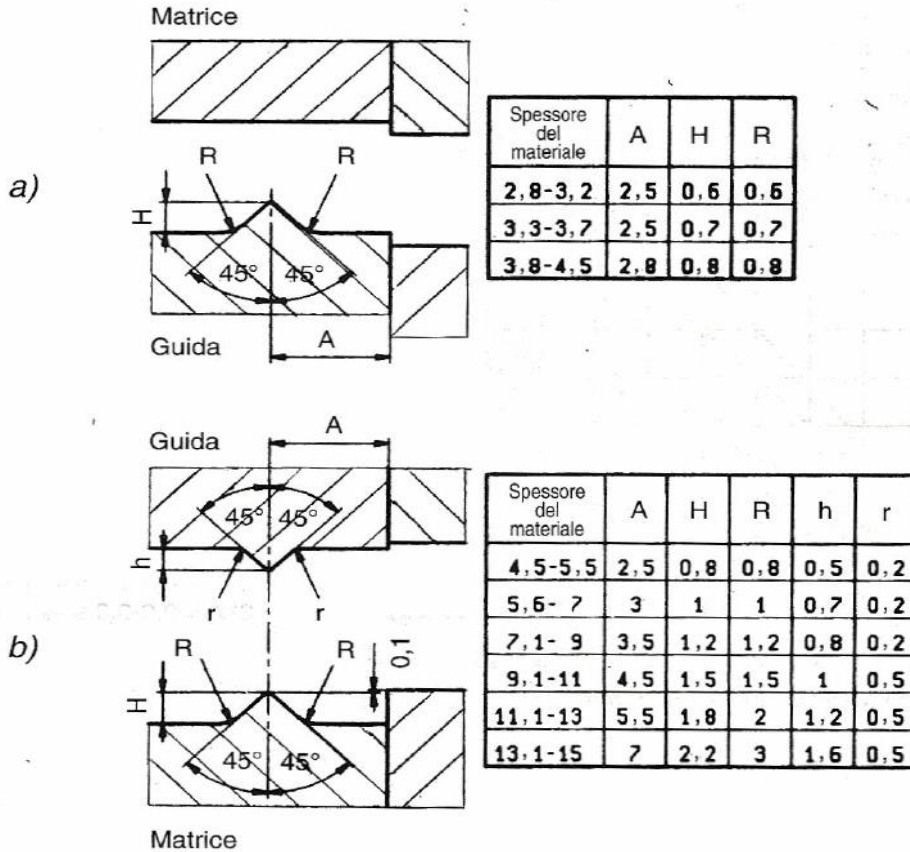


Figura 28 Bordino perimetrale presente solo sul premilamiera (a) oppure su premilamiera e matrice (b).

## 2.2.6 Caratteristiche di massima degli stampi per tranciatura fine

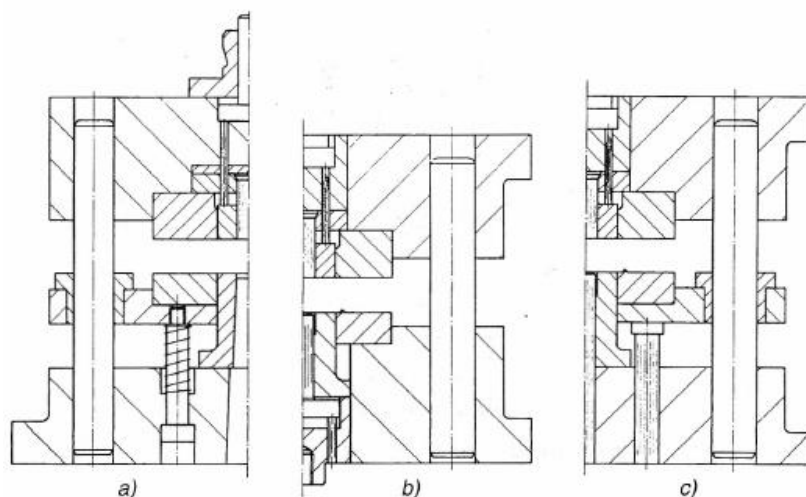
In linea di massima, progetto e costruzione di uno stampo per tranciatura fine sono simili a quelli per tranciatura convenzionale. Tuttavia, i ridottissimi giochi impongono una rigidità assai maggiore e determinano una serie di altre differenze, principalmente:

- non sono necessari gli elementi elastici per lo strappaggio della lamiera e per l'espulsione dei pezzi tranciati. Queste forze vengono applicate dall'estrattore azionato direttamente da un sistema idraulico;
- il gioco, come detto, è nell'ordine dell'1% o anche dello 0,5% dello spessore della lamiera. Nelle presse convenzionali il gioco è 10-20 volte superiore (5-10%);
- i ridottissimi giochi impongono una precisione di guida e di centraggio molto superiore tra punzone e matrice;
- il bordino a V che, come detto, insegue all'esterno il profilo del pezzo, morde la lamiera sotto azione idraulica. Esso trattiene il materiale impedendone lo scorrimento ed evitando il caratteristico "strappo" che si rileva nella tranciatura normale sulla superficie tagliata;

- il punzone principale per la forma esterna del pezzo costituisce contemporaneamente la matrice per la forma interna. Quest'ultima viene espulsa dal sistema idraulico della macchina dopo che la tranciatura è completata. Questo punzone interno non si muove per l'intera corsa, il che migliora la rigidità del sistema. Grazie a tale rigidità si possono tranciare anche pezzi di forma complessa e disposti l'uno vicino all'altro, senza pericolo di rotture dei punzoni.

Nella tranciatura fine vengono utilizzati fondamentalmente tre tipi di stampi:

- stampi a punzone mobile: In questo tipo di stampo sia la matrice sia il premilamiera sono fissi. Si tratta di una soluzione caratterizzata da un'alta precisione di guida del punzone e da una costruzione generale relativamente economica. Il punzone è guidato in un foro nella base e sul premilamiera. La corsa del punzone è sempre uguale allo spessore del materiale da tranciare. Questo sistema è utilizzato principalmente per pezzi di piccole e medie dimensioni ma è comunque di uso molto meno frequente del tipo a punzone fisso.
- stampi a punzone fisso: per pezzi di alto spessore o di grandi dimensioni, tali quindi da richiedere elevate forze di tranciatura, si impiegano quasi esclusivamente stampi a punzone fisso. In questo caso il punzone è fissato al cappello dello stampo e guidato attraverso il premilamiera, a sua volta incolonnato. Questa soluzione si presta in particolare per pezzi grandi, lunghi e stretti, asimmetrici con pericolo di spinte laterali o con forme interne complicate; inoltre è usata nel caso di pezzi di elevato spessore che richiedono grande stabilità allo stampo. In quest'ultimo caso viene impiegato uno speciale anello adattatore per assicurare un supporto supplementare alla matrice e quindi anche al punzone. Gli stampi a punzone mobile vengono centrati automaticamente sulla pressa attraverso la base punzone; quelli a punzone fisso vanno invece centrati mediante il citato anello adattatore. Questo tipo di soluzione comporta però maggiore impegno per la messa a punto e la manutenzione. A differenza di quanto avviene nel tipo a punzone mobile, dove questo resta sempre nel semistampo inferiore, il punzone fisso può essere posto anche nel semistampo superiore. La matrice è allora collocata nel semistampo inferiore e il pezzo tranciato viene espulso dal basso. Questo sistema è utilizzato in generale quando viene impiegato un braccio di estrazione (per pezzi grandi e pesanti oppure per stampi a funzioni multiple) e anche per stampi progressivi.



*Figura 29 Stampi per tranciatura fine a punzone fisso o a punzone mobile e confronto con stampi convenzionali: a) stampo per tranciatura convenzionale; b) stampo per tranciatura fine a punzone mobile; c) stampo per tranciatura fine a punzone fisso.*

- stampi progressivi: pezzi che presentano piegature o forme complesse richiedono spesso più operazioni. Se si tratta di piccole serie, può convenire eseguire le singole operazioni in stampi-diversi. Questa soluzione comporta però costi di produzione relativamente elevati e soprattutto lunghi periodi di transito in officina, a causa dei tempi di attesa fra un'operazione e l'altra e delle operazioni di carico/scarico manuale dei pezzi. Nel caso invece di forti produzioni, conviene impiegare uno stampo progressivo, nel quale le varie operazioni vengono eseguite in sequenza nelle differenti stazioni dello stampo stesso. Le piastre di questi stampi sono spesso scomposte e assemblate. La notevole lunghezza di tali attrezzi, dovuta alle numerose stazioni richieste, comporta spesso che il punto di applicazione della forza di tranciatura da parte dello slittone della pressa non coincida esattamente con quello conseguente alle varie stazioni. La precisa guida può quindi essere garantita soltanto con un esatto centraggio dello slittone e con l'assenza di gioco. La pressa per tranciatura fine si presta bene all'impiego di stampi progressivi. La pratica ha dimostrato che stampi di questo genere, utilizzati su quel tipo di presse, assicurano una produzione più elevata fra due ripassature successive dello stampo, risultato che è permesso appunto dalla maggiore rigidità e dalla precisa guida dello slittone. Il progetto di uno stampo progressivo per tranciatura fine è simile a quello degli stampi progressivi per tranciatura convenzionale a punzone fisso. Le forze per il serraggio della lamiera e quelle per l'espulsione dei pezzi sono fornite dall'impianto idraulico della macchina; esse vengono trasmesse attraverso spine e senza le molle normalmente richieste nella tranciatura convenzionale. Gli elementi di taglio non presentano spoglia, cosa che migliora ulteriormente la stabilità degli elementi trancianti e garantisce anche esattamente le stesse dimensioni del pezzo nel corso di tutta la vita dello stampo.

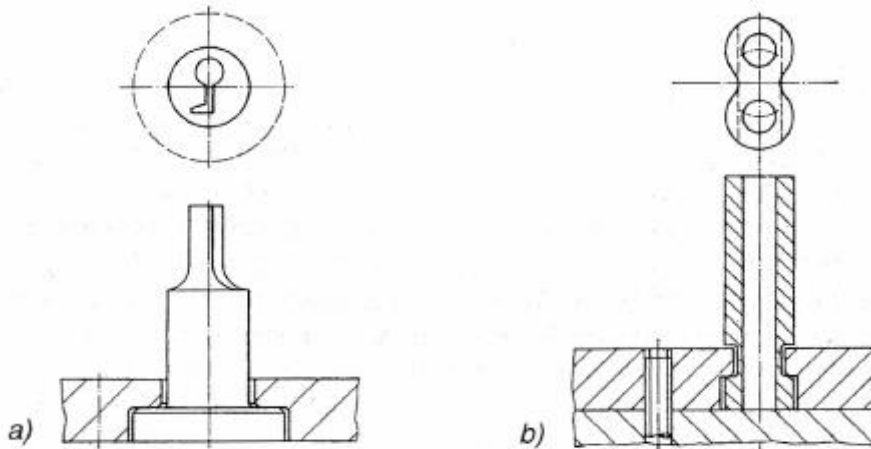
### 2.2.7 Punzoni e portapunzoni per stampi a punzone mobile

Questa soluzione richiede di realizzare punzone e piastra portapunzone come pezzi separati (come mostrato in fig. 30) Tale scelta è motivata da tre ragioni:

- gli estrattori per profili interni possono di rado essere supportati direttamente dalla tavola della pressa e richiedono generalmente un "ponte". Separando punzone e piastra portapunzone si ha la possibilità di fresare qualunque alloggiamento richiesto per il ponte nella piastra predetta. Quando sono richieste grandi forze di tranciatura, e di conseguenza ampie sezioni del ponte, può accadere che il ponte stesso debba essere scomposto per garantire il massimo supporto al punzone;
- punzone e piastra portapunzone variano notevolmente nelle loro dimensioni in sezione. Le deformazioni che il punzone subisce nella tempra possono essere tollerate più facilmente se separate dalla grande massa della piastra base. Inoltre, il volume della piastra stessa aumenta leggermente durante il rinvenimento che segue la tempra fornendo materiale per una precisa ripassatura di rettifica;
- soltanto la base del punzone è guidata nel foro della piastra. La testa del punzone viene prevista con un diametro inferiore di circa 0,1 mm, in modo che il punzone stesso venga guidato soltanto attraverso la piastra guida (premilamiera). Piccole imprecisioni di allineamento (fino a 0,03 mm) fra punzone e matrice possono così essere corrette mediante ri-centraggio del premilamiera e riposizionamento del punzone sulla piastra base.

Negli stampi a punzone mobile vengono utilizzati con successo punzoni con base tonda. Il movimento radiale può essere così facilmente impedito con l'introduzione di una spina che risieda per due terzi del suo diametro nella piastra base e per un terzo nella base del punzone(fig.30 parte a). Se il punzone è guidato dal premilamiera soltanto nella direzione di tranciatura, una chiavetta inserita nella piastra base elimina ogni possibilità di rotazione (fig. 30 parte b).

Per componenti di grande lunghezza e piccolo spessore si utilizzano anche basi punzone di forma rettangolare. Spesso questo sistema è richiesto per ottenere un corretto allineamento, anche se risulta più costoso.



*Figura 30 Punzone trattenuto alla base mediante collare: a) per profili esterni di importanza critica; b) per punzoni rettificati sul profilo e punzoni multipli.*

## 2.2.8 Punzoni per stampi a punzone fisso

Non è indispensabile alloggiare la base di punzoni fissi entro la piastra portapunzoni. In molti casi è sufficiente che il punzone venga fissato con viti e spinato alla piastra base. Quando si trancia una lamiera di elevato spessore con punzoni di base relativamente piccola, tra piastra base e punzoni viene inserita una piastra temprata allo scopo di impedire che i punzoni ricalchino il materiale della piastra che è meno resistente.

## 2.3 Forze nella tranciatura fine



Lo stampo di tranciatura tradizionale consiste essenzialmente negli elementi punzone di tranciatura, matrice e piastra spogliatrice o di guida. Il pezzo tranciato cade verso il basso attraverso l'apertura conica nella matrice, fuori dalla zona di montaggio dello stampo. Sulla lamiera non agisce che la forza di tranciatura  $F_s$ , la quale viene trasmessa dal punzone di tranciatura. Dopo una corsa minima di tranciatura propriamente detta, il pezzo viene strappato dalla bandella di materiale e si produce simultaneamente una caduta brusca della forza, la quale si manifesta in un cosiddetto colpo (urto) di taglio. S'intende che questa zona di rottura non può essere utilizzata per compiere delle funzioni precise.

In quanto allo stampo di tranciatura fine troviamo nello stesso anche gli elementi punzone di tranciatura, matrice, piastra di guida, e in più, quale elemento principale, l'estrattore.

Caratteristico in questa relazione è tuttavia l'interazione di questi citati elementi durante il processo di tranciatura. La piastra di guida effettua in questo caso la funzione di premilamiera per tenere piana la bandella di materiale e trasmette durante il ciclo di tranciatura, di solito attraverso un bordino di cordonatura, le sollecitazioni di compressione nella zona di tranciatura. La forza necessaria è chiamata forza del premilamiera o forza di cordonatura. All'interno degli spigoli di tranciatura avviene anche un serraggio del pezzo da tranciare attraverso l'estrattore azionato per mezzo della contropressione.

In fig. 31 sono visualizzate le diverse forze che concorrono nel processo, messe a confronto con quelle della tranciatura tradizionale.

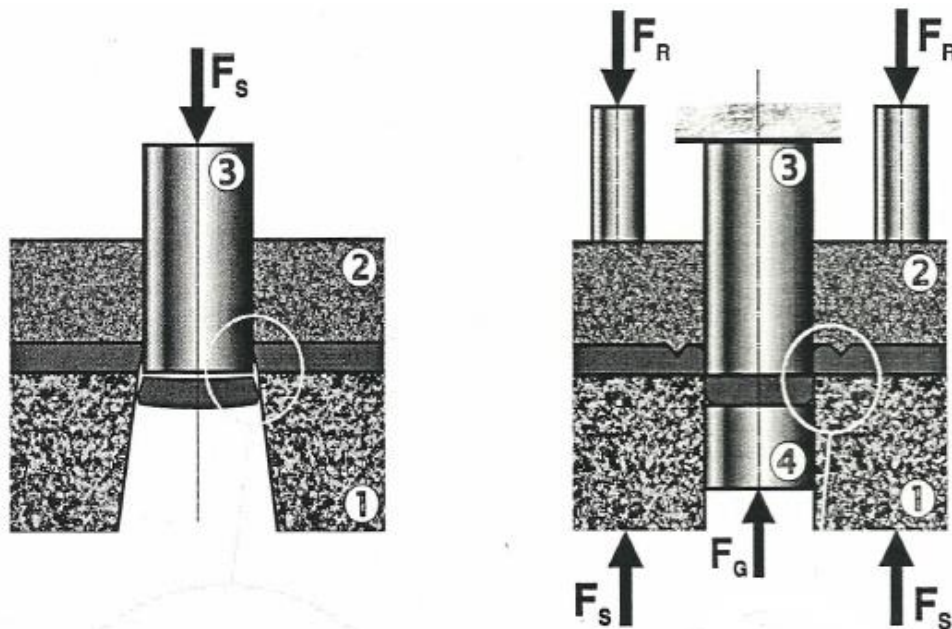


Figura 31  $F_s$ :  $F$  di tranciatura,  $F_R$ :  $F$  del premilamiera,  $F_G$ :  $F$  di contropressione 1: Matrice 2: Piastra di guida 3: punzone di tranciatura 4: Estrattore.

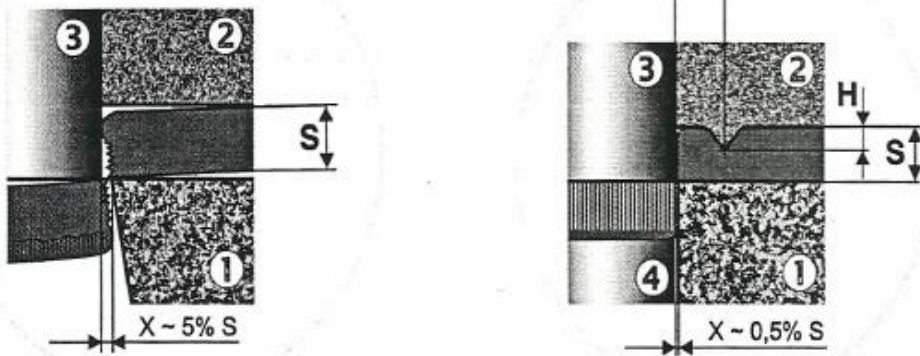


Figura 32 Ingrandimento della figura sopra

$F_S$ : Forza di tranciatura (N), cioè la forza impiegata dalla pressa per tranciare tutto il profilo del pezzo. Di fatto tutta la forza impiegata serve a portare a rottura il materiale.

$$F_S = L \cdot s \cdot R_m \cdot f_1$$

L: Lunghezza totale della linea di tranciatura da intendersi come forma interna + forma esterna (mm)

s: Spessore del materiale da tranciare (spessore nominale + tolleranze di spessore) (mm)

$R_m$ : Resistenza massima alla trazione del materiale ( $N/mm^2$ )

$f_1$ : Fattore empirico 0,9. Mentre in tranciatura tradizionale si utilizza 1, in fine tale valore è portato a 0,9. Di fatto vuole rappresentare la resistenza al taglio del materiale. Anche con 0,9 si è comunque molto conservativi in quanto la resistenza al taglio è sicuramente minore di  $0,9 R_m$

$F_R$ : forza del premilamiera (N). Tale forza è necessaria per premere la lamiera in modo tale da impedire scorrimenti del materiale che andrebbero a peggiorare la qualità del prodotto finale. Va ricordato che tale funzione è resa possibile soprattutto grazie al bordino a V.

$$F_R = L \cdot h \cdot R_m \cdot f_2$$

L: lunghezza totale del bordino di cordonatura (mm)

h: Altezza bordino cordonatura, se ci sono due bordini considerare l'altezza massima (mm)

$f_2$ : Fattore empirico 4, a forma predeterminata del bordino di cordonatura. In base al materiale più o meno duttile tale fattore può subire leggere oscillazioni (se duttile può essere diminuito a 3,5 altrimenti può arrivare anche a 5).

$F_G$ : Forza di contropressione (N). Questa forza è indispensabile per garantire un buon livello di planarità del pezzo tranciato.

$$F_G = A_s \cdot q_G$$

$A_s$ : Superficie compressa dall'estrattore (mm<sup>2</sup>);

$q_G$ : Forza di contropressione specifica ( $N/mm^2$ ); supposta  $70 N/mm^2$  (limite superiore) nel caso di pezzi di grande superficie e di forte spessore e  $20 N/mm^2$  (limite inferiore) nel caso di pezzi piccoli e sottili.

$F_{TOT}$ : Forza totale (N) esercitata dalla pressa tramite i cilindri di corsa rapida (bassa pressione) e il cilindro principale (alta pressione)

$$F_{TOT} = F_S + F_R + F_G$$

$F_{RA}$ : Forza spogliatrice (N), necessaria per vincere lo strappaggio del materiale sul punzone (sia dello sfrido che della lamiera compresa tra il pezzo tranciato e il premilamiera).

$F_{GA}$ : Forza di estrazione (N), serve a vincere la resistenza all'estrazione del pezzo contenuto nella matrice.

$$F_{RA} = F_{GA} = F_S \cdot f_3$$

$f_3$ : Fattore empirico compreso tra 0,1 e 0,2 a seconda del recupero elastico del materiale tranciato.



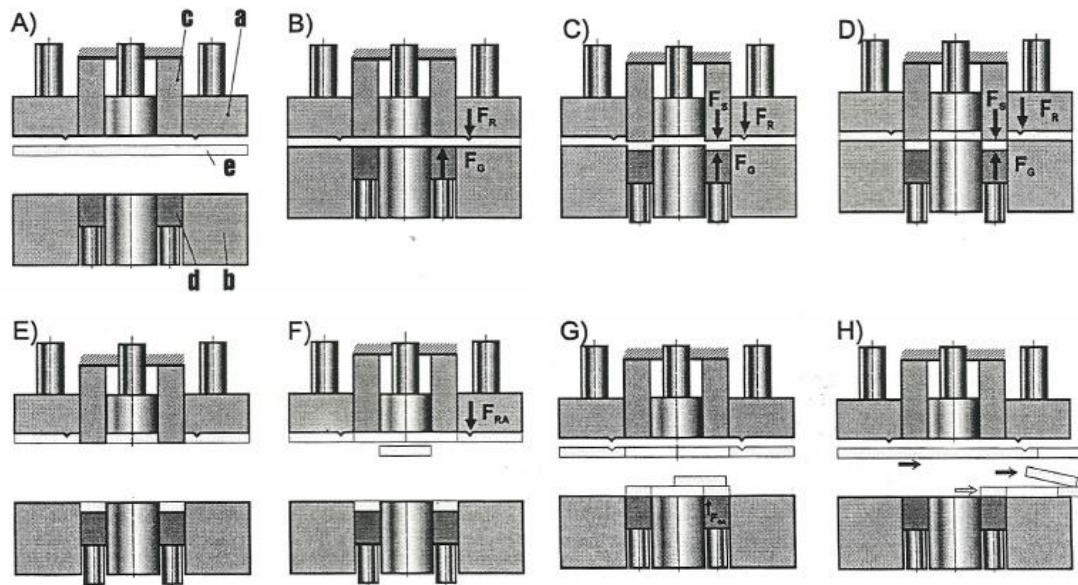


Figura 33 Svolgimento del processo in seno allo stampo di tranciatura fine

Con lo stampo aperto, la bandella di materiale (e) è introdotta rispettivamente avanzata fra le due metà dello stampo (a: parte superiore, b: parte inferiore) e posizionata lateralmente e in altezza attraverso delle guide per le bandelle. Con velocità di chiusura stampo, la slitta si avvicina dal basso al nastro di materiale.

Nel caso di utilizzare degli stampi progressivi, avviene in quel momento lì la penetrazione dei perni di guida (pilotti) per il posizionamento esatto del passo di avanzamento (A).

Un dispositivo di sicurezza e di protezione contro la rottura degli stampi impedisce il danneggiamento degli elementi dello stampo e delle bandelle di materiale provocato da pezzi o sfridi eventualmente non evacuati. A velocità ridotta, questo dispositivo di protezione stampo palpa l'intera zona di montaggio dello stampo e ferma immediatamente il movimento della slitta nel caso di una qualsiasi perturbazione. L'aderenza indisturbata avviene con la penetrazione del bordino di cordonatura nella bandella di materiale e con il serraggio del materiale tramite le forze  $F_R$  e  $F_G$  (8) generate idraulicamente.

Con la velocità di lavoro regolata avviene l'intaglio del pezzo nella matrice e delle forme interne nel punzone di tranciatura (c). Adesso, tutte le tre forze sono contemporaneamente efficaci. Quando il ciclo di tranciatura si è terminato in una posizione di altezza esattamente limitata (D), le forze sono staccate e la tavola inferiore della pressa effettua di nuovo il suo movimento discendente (E).

Caricando il pistone spostato del premilamiera, anche la piastra di guida e gli espulsori delle forme interne (d) sono nuovamente mossi nella loro posizione iniziale e spogliano lo scheletro della bandella dal punzone di tranciatura ed espellono gli sfridi delle forme interne fuori dalle cavità del punzone (F).

La carica del pistone di contropressione provoca l'estrazione del pezzo finito fuori dalla matrice (G). Adesso, i pezzi tranciati e gli sfridi possono essere soffiati o evacuati fuori dallo stampo aperto. Anche l'avanzamento della bandella o del nastro di materiale viene effettuato in quel momento lì (H).

Per ridurre il tempo di un ciclo di pressa, il movimento di ritorno della slitta si effettua ad una velocità notevolmente più alta di quella del processo di tranciatura propriamente detto.

I tempi di ciclo del processo di tranciatura variano tra 0,4 e 5 secondi a seconda del materiale, della dimensione e dello spessore del pezzo e del suo "handling".

## 2.4 Problematiche nella tranciatura fine

### 2.4.1 L'attrito nel processo di tranciatura fine

Uno degli elementi più significativi del processo di tranciatura fine è costituito dalle straordinarie condizioni di usura a cui sono sottoposti gli elementi attivi dello stampo. Essi sono assoggettati a pressioni e a un attrito che rendono indispensabile l'adozione di metodi per evitare che queste sollecitazioni si traducano in una durata antieconomica degli stampi.

Nel processo, l'attrito è generato dalle due forze  $F_{fp}$  e  $F_{fd}$ , visualizzate nella figura sottostante.

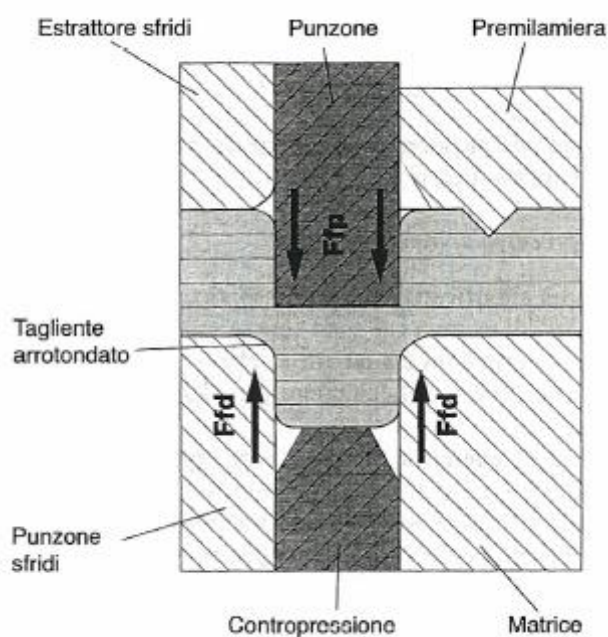


Figura 34 Forze d'attrito nella tranciatura fine.

La prima attiene all'attrito generato dallo scorrimento della superficie esterna del punzone sul materiale di tranciatura; la seconda riguarda l'attrito tra le superfici verticali della matrice e le nuove superfici del pezzo che sta per essere tranciato fine. Altre forze di attrito si sviluppano tra le facce principali della lamiera e le superfici frontali del punzone, del contropunzone (estrattore), della matrice e del prelamiera. Queste ultime svolgono un ruolo attivo solo nei casi di operazioni complementari quali imbutiture o coniare.

Nella tranciatura fine gli spigoli trancianti della matrice e dei punzoni per i profili interni vengono arrotondati affinché il materiale possa scorrere su di essi senza che si determinino "strappi". Ciò sviluppa una significativa forza normale che, moltiplicata per il coefficiente di attrito, determina la forza di attrito  $F_{fd}$ .

A differenza di quanto avviene nella tranciatura tradizionale, che genera superfici tagliate soltanto su un terzo circa dello spessore del pezzo, nella tranciatura fine una superficie perfettamente liscia rimane a contatto con la matrice per tutto lo spessore del pezzo, con la conseguente generazione di una forza normale di entità molto maggiore. Lo spigolo tagliente del punzone del pezzo, vivo a stampo affilato, genera una forza normale inizialmente ridotta.

Questa forza aumenta poi progressivamente sia per il progredire dell'usura del punzone, sia per effetto dell'azione del cordone perimetrale.

## 2.4.2 Effetti dell'attrito sullo stampo e sul pezzo

In una operazione di tranciatura fine, con riferimento alla condizione di compressione del materiale tra punzone e contropunzone (estrattore), e tra matrice e premilamiera, si può affermare che l'entità della forza di attrito orizzontale sarà funzione del valore del carico idraulico applicato al cordone perimetrale e all'estrattore, e del valore del coefficiente d'attrito.

La forza di attrito orizzontale sul pezzo deve essere sufficientemente elevata per impedire lo scorrimento orizzontale del pezzo stesso mentre entra progressivamente in matrice.

Tuttavia occorre osservare che l'attrito relativamente elevato che caratterizza le condizioni di lavoro degli elementi attivi gioca un ruolo negativo ai fini della loro progressiva usura.

Si devono quindi adottare contromisure limitative di questi effetti, sia in sede di progettazione dello stampo, sia nella scelta dei criteri lubrificativi. Per lo stampo è importante che si raggiunga il delta massimo tra la durezza degli elementi attivi e quella del materiale di tranciatura.

Inoltre gli spigoli trancianti e le superfici attive devono essere sempre in buono stato senza "aree deboli" sugli elementi attivi per effetto di una cattiva elettroerosione. Giocano un ruolo importante anche i bassi valori di rugosità delle superfici attive dello stampo.

## 2.4.3 I lubrificanti per tranciatura fine

Il lubrificante ha lo scopo fondamentale di impedire l'attrito intermetallico tra stampo e materiale di tranciatura. Questa funzione sarebbe svolta senza problemi se fosse possibile generare un film ininterrotto di lubrificante tra le superfici dello stampo e del materiale.

Tuttavia, poiché questa condizione ideale è generalmente non realizzabile, si deve accettare una condizione di attrito combinato con zone di contatto intermetallico tra stampo e materiale.

Un'altra funzione che spetta al lubrificante è quella di impedire che si verifichino fenomeni di saldatura a freddo. Ciò può essere ottenuto mantenendo un'efficace condizione lubrificativa su tutte le superfici metalliche dopo il completamento dell'operazione di tranciatura fine (estrazione del pezzo, degli sfridi interni, del punzone dalla striscia tranciata).

Le prestazioni richieste ai lubrificanti variano sensibilmente a seconda delle condizioni specifiche di impiego. Le case produttrici di oli per tranciatura offrono una varietà di prodotti, ognuno dei quali copre una determinata gamma di difficoltà di deformazione. Spetta agli utilizzatori individuare nella pratica applicativa il lubrificante più idoneo per una data lavorazione. Oggi sono disponibili sul mercato prodotti con differenti caratteristiche E.P. (attitudine del film lubrificante a sopportare le estreme pressioni) e differenti gradi di viscosità. In generale, quanto più impegnativa è l'operazione di tranciatura fine da eseguire, tanto più elevato è il valore di viscosità e di attitudine E.P. richiesti al lubrificante.

Lubrificazione	Forza di tranciatura (%)	Forza di estrazione (%)	Lavoro totale di tranciatura (%)
Molykote	87	58	77
Olio da taglio MB 29	80	70	79
Olio da taglio Pella Y 929	68	65	67
Olio per macchine	72	58	69
Petrolio	90	97	92
Olio per foratura	87	56	80

Tabella 5 Effetti della lubrificazione sulle forze di tranciatura e di estrazione.

## 2.4.4 Presse per tranciatura fine e relative problematiche

Le presse di tranciatura fine si definiscono a triplice effetto in quanto sono presenti una forza di tranciatura, una forza premilamiera (per imprimere il cordone perimetrale) e una forza di contropressione (necessaria per la planarità del pezzo e per l'estrazione).

Altre caratteristiche sono :

- velocità di tranciatura controllata, in modo da consentire durante la tranciatura, lo scorrimento delle fibre del materiale senza portarle a rottura per strappo. Per ottenere una produttività economica, la legge di moto della slitta prevede fasi di accelerazione e decelerazione.

Il grafico in fig. 35 mostra l'andamento cinematico di un ciclo di tranciatura fine.

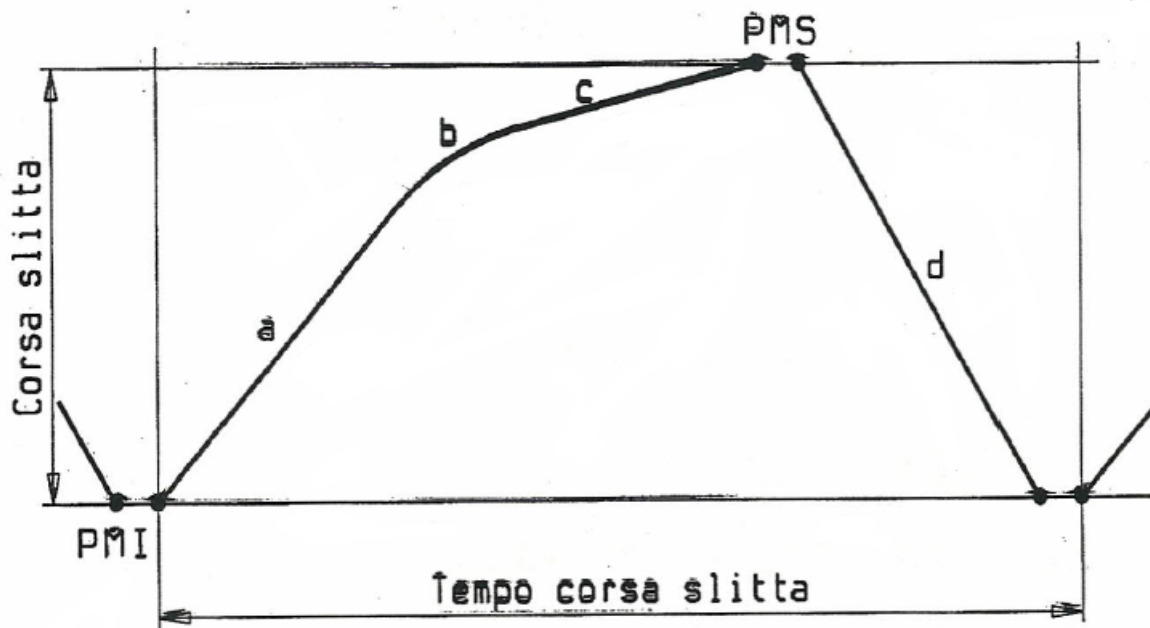


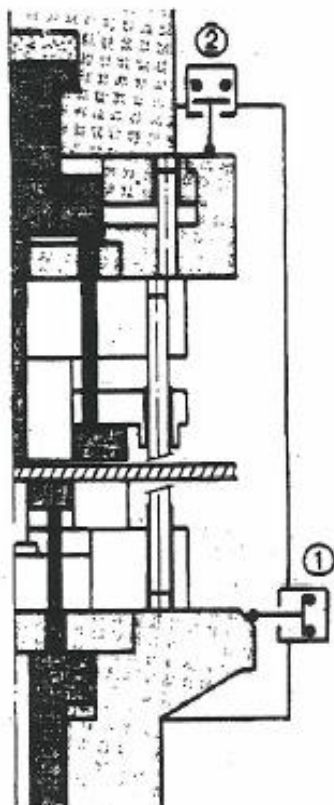
Figura 35 PMI:Punto morto inferiore, a: corsa di chiusura rapida, b: controllo sicurezza e coniatura bordino perimetrale, c: corsa di tranciatura, PMS:Punto morto superiore, PMI:Punto morto inferiore.

La "corsa di palpazione" ha luogo in un tratto di corsa durante il quale la pressa controlla che nello stampo sia presente il solo spessore del materiale (esecuzione della tranciatura fine solo se nello stampo non si trovino sfridi o pezzi inespulsi).

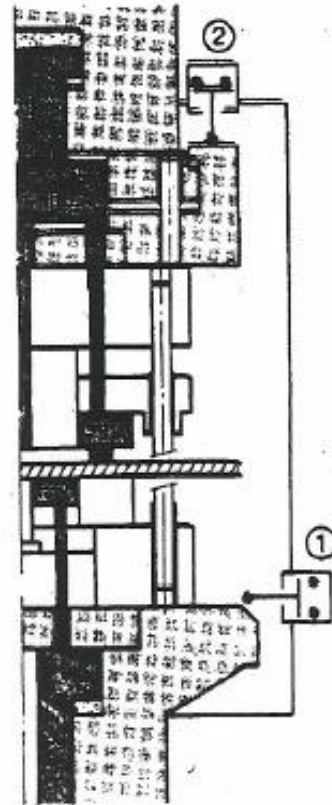
- costanza del punto morto superiore: contrariamente a quanto avviene nella tranciatura tradizionale in cui il punzone penetra nella matrice, nella tranciatura fine l'inversione della corsa deve avvenire nell'istante in cui il pezzo viene tranciato senza permettere una penetrazione del punzone nella matrice.
- guida della slitta senza gioco: il ridotto gioco tra punzone e matrice esige una guida precisa della slitta, che ne impedisca qualsiasi movimento orizzontale. Se questa esigenza non fosse soddisfatta o lo fosse in modo incompleto, ne risulterebbero pezzi di cattiva qualità ed una ridotta vita dello stampo .
- rigidità della struttura: la sempre maggiore complessità degli stampi di tranciatura non consente sempre di far coincidere il centro degli sforzi con il centro della pressa. Con gli stampi a matrice mobile, poi, il baricentro degli sforzi si modifica mentre la matrice mobile fa la sua corsa, generando così forze eccentriche rispetto all'asse pressa. Per questa ragione la rigidità della struttura della pressa assume una importanza sempre più rilevante.

- sicurezza contro la rottura dello stampo: poiché, a differenza della tranciatura tradizionale, gli sfridi ed i pezzi non vengono evacuati attraverso la matrice, ma ritornano sul piano matrice mediante la contropressione, le presse di tranciatura fine sono dotate di un sistema di sicurezza stampo che arresta la pressa nel caso in cui uno sfrido o un pezzo non sia stato evacuato correttamente e sia rimasto nell'area dello stampo.

- 1 Microinterruttore «spessore striscia»
- 2 Microinterruttore «corsa di palpazione»



Il processo di tranciatura fine è consentito



Il dispositivo di protezione ha reagito, il processo di tranciatura fine viene inibito

*Figura 36 Dispositivi di sicurezza contro la rottura degli stampi in una pressa meccanica.*

La fig. 36 illustra il funzionamento del dispositivo in una pressa meccanica. Il sistema si basa sulla sequenza di due micro. Sulla sinistra ne vediamo il funzionamento senza la presenza di alcun sfrido: il micro 1 dà il proprio consenso prima del micro 2. Sulla destra invece uno sfrido non è stato evacuato correttamente ed è rimasto nell'area dello stampo, il micro 2 viene attivato prima del micro 1 e la pressa "sente" così la presenza dello sfrido arrestandosi.

La fig. 37 illustra l'analogo funzionamento del dispositivo per una pressa idraulica. Il pressostato 2 viene tarato per un valore appena superiore alla forza necessaria a far muovere la slitta e la parte inferiore dello stampo; il micro (o camma elettronica) dà poi il proprio consenso al passaggio

dalla bassa alla alta pressione. Sulla destra vediamo invece che uno sfrido è rimasto nell'area dello stampo provocando così un aumento della pressione prima che il micro 2 consenta il passaggio alla alta pressione e provocando l'eccitazione delle valvole con scarico dell'olio idraulico nel serbatoio.



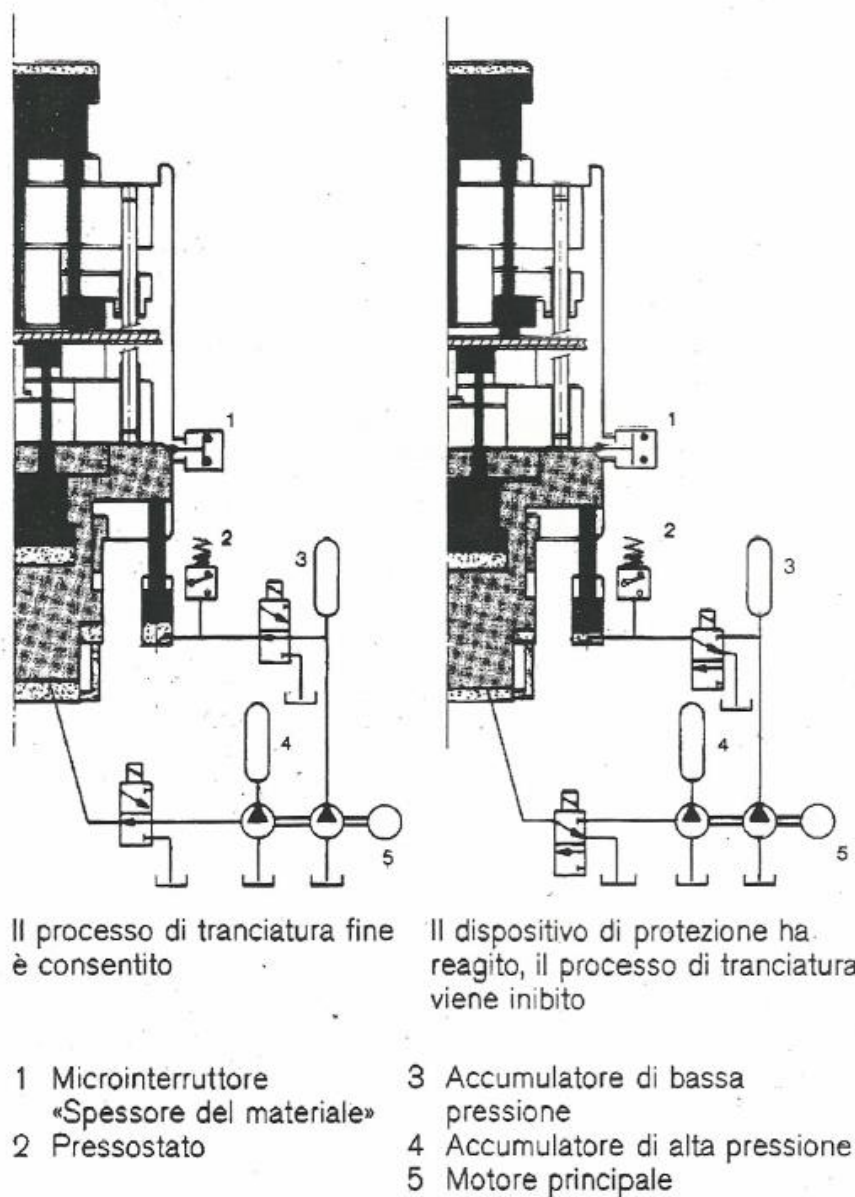


Figura 37 Dispositivi di sicurezza contro la rottura degli stampi in una pressa idraulica.

### 2.4.5 Materiali degli stampi per tranciatura fine

Per contrastare efficacemente le cause che possono dare origine ad un possibile decadimento dello stampo e per poter garantire alti rendimenti in produzione, occorre scegliere acciai per stampi contraddistinti da significative caratteristiche in termini di alta durezza, tenacità, resistenza alla compressione ed usura.

Il costruttore degli stampi, inoltre, deve poter trovare in questi acciai altre proprietà, non meno importanti: buona lavorabilità, elettroerodibilità, bassa variazione dimensionale e sicurezza nel trattamento termico.

Questi acciai, con strutture molto fini e ricche di carburi, sono ottenuti con la metallurgia secondaria di rifusione ( ESR) o con la metallurgia delle polveri.

Essi rappresentano quel gruppo di acciai che, se impiegati in modo corretto, possono permettere alti rendimenti nelle lavorazioni di tranciatura e nella formatura a freddo.

Le principali cause del decadimento prematuro di uno stampo o di un utensile per le lavorazioni a freddo sono:

- l'usura
- la scheggiatura del tagliente
- il tagliente di riporto (incollatura)
- la deformazione plastica.

Nella tranciatura, il rendimento degli utensili è migliorabile mediante adeguati accorgimenti come indicato in tabella.

DIFETTO	ACCORGIMENTO	SOLUZIONE
1 Cricatura Scheggiatura	Aumento della tenacità	Ottimizzazione del trattamento termico. Impiego di un acciaio più tenace.
2 Usura del tagliente	Aumento della resistenza all'usura	Impiego di un acciaio più legato. Rivestimento Superficiale.
3 Deformazione plastica del tagliente	Aumento della resistenza alla compressione	Aumento della durezza di lavoro Impiego di un acciaio più legato

*Tabella 6 Criteri di scelta per i materiali degli stampi*

La scelta di un acciaio per utensili per una particolare applicazione deve essere basata sulla considerazione della relativa importanza delle singole proprietà degli acciai indicate precedentemente.

Tuttavia è molto difficile che un dato acciaio soddisfi completamente tutte le caratteristiche desiderate e perciò quasi sempre sono necessarie soluzioni di compromesso.

Infatti, gli acciai ledeburitici nella tecnica di tranciatura, hanno trovato fino ad oggi largo impiego per le loro caratteristiche di resistenza ed alta tenuta del filo tagliente, mentre la caratteristica di alta tenacità, che non si combina con l'alto tenore dei carburi e degli elementi di lega disciolti nella matrice, è stata la caratteristica prioritaria degli acciai convenzionali mediamente legati.

Inoltre l'alto rischio di rotture nella lavorazione con elettroerosione dei grandi stampi realizzati con acciai ledeburitici al 13% di cromo, dovute a una grossolana struttura dei carburi, richiede l'impiego di acciai con una configurazione dei carburi la più omogenea possibile tra quelle ottenibili con i processi metallurgici convenzionali.

Attualmente esistono sul mercato due grosse famiglie di materiali:

- Acciai rifusi sotto scoria elettroconduttrice. Le caratteristiche di elevata tenacità, stabilità al rinvenimento, alla resistenza all'usura, ottime caratteristiche meccaniche e contenute variazioni

dimensionale degli acciai di nuova generazione sono ottenibili con il processo di rifusione sotto scoria elettroconduttrice – ESR , che è in grado di controllare l'esatto tenore di Al e Nb presenti nell'analisi chimica di questi acciai e di conferire le idonee caratteristiche di omogeneità e purezza. Grazie alla presenza di elementi di lega quali l'alluminio ed il niobio, gli acciai prodotti mediante la tecnica ESR presentano caratteristiche di elevata stabilità al rinvenimento, alta resistenza alla compressione, ottima tenacità, contenute variazioni dimensionali, alta resistenza all'usura abrasiva ed adesiva, ottima erodibilità, nitrurabilità e rivestibilità. In particolare all'alluminio si deve l'affinamento dei carburi, l'aumento della stabilità al rinvenimento e il miglioramento della nitrurabilità e al niobio l'affinamento del grano, la capacità di formare carburi di elevata durezza e quindi generare un aumento della resistenza all'usura. Uno dei primi requisiti a cui deve rispondere il materiale con cui è realizzato l'utensile è la durezza, la quale sarà definita in relazione all'applicazione. La durezza e la stabilità di forma sono in stretta correlazione fra loro. Aumentando la durezza si può anche migliorare la resistenza alla compressione e la stabilità dimensionale. Con il trattamento termico si può conferire all'acciaio quelle caratteristiche in grado di soddisfare le esigenze di impiego.

- Acciai prodotti con metallurgia delle polveri. Il continuo incremento delle sollecitazioni cui sono sottoposti gli utensili richiede per la loro fabbricazione l'impiego di acciai ad elevatissima resistenza. Conseguentemente, in tutte quelle applicazioni dove gli acciai rapidi e da utensili prodotti con i processi metallurgici convenzionali sono al limite della loro prestazione, ha inizio il campo d'impiego degli acciai prodotti con la metallurgia delle polveri. La vita e il rendimento degli utensili speciali per applicazioni specifiche nelle lavorazioni a freddo, quali per esempio la trancitura e trancitura fine, sono direttamente proporzionali alle migliori proprietà di resistenza all'usura e resistenza alla compressione, possedute dall'acciaio da utensile con cui vengono costruiti. L'integrazione ottimale tra queste caratteristiche si ottiene con l'impiego degli acciai per utensili per lavorazioni a freddo e rapidi altamente legati prodotti con la metallurgia delle polveri. Questi acciai offrono i seguenti vantaggi:

- Elevata durezza
- Elevata resistenza all'usura
- Elevata resistenza alla compressione
- Elevata resistenza tenacità
- Caratteristiche meccaniche uniformi
- Buona lavorabilità
- Ottima rettificabilità
- Migliorata elettroerodibilità
- Contenute variazioni dimensionali nel trattamento termico
- Sicurezza nel trattamento termico.

Questi si traducono nella possibilità di realizzare componenti di elevatissima precisione, caratterizzati da lunga durata, in grado di assicurare l'aumento della produttività e la conseguente riduzione dei costi unitari di prodotto. Resistenza alla compressione, resistenza all'usura e tenacità sono le caratteristiche che devono essere elevate al massimo per rispondere alle sempre più gravose sollecitazioni a cui sono sottoposti gli utensili. Con l'impiego degli acciai prodotti con la metallurgia delle polveri è possibile esaltare le caratteristiche di resistenza all'usura e resistenza alla compressione, ottenibili con l'aumento del contenuto di carburi nella struttura, senza dover sacrificare la caratteristica di elevata tenacità. Essi inoltre hanno caratteristiche praticamente isotropiche dovute alla omogeneità ed alla assenza di segregazioni.

L'assenza di bande di carburi nella struttura consente l'incremento dei valori percentuali degli elementi di lega e, conseguentemente, l'aumento di caratteristiche quali la durezza e la tenacità che, negli acciai prodotti con processi convenzionali, sono quasi sempre in antitesi tra loro. Gli acciai da polvere sono quindi caratterizzati da una conformazione strutturale molto fine e



possono essere impiegati a durezza superiori di quelle degli acciai tradizionali trattati allo stesso modo. Le principali caratteristiche che contraddistinguono gli acciai da polvere rispetto ai materiali convenzionali sono:

- L'uniforme distribuzione dei carburi
- I carburi fini
- L'uniforme composizione chimica su tutta la sezione e sull'intera lunghezza delle barre
- Le caratteristiche meccaniche uniformi
- Le proprietà praticamente isotrope dovute all'omogeneità ed all'assenza di segregazioni

Rispetto all'acciaio prodotto con i metodi convenzionali (ad esempio l'acciaio ledeburitico al 12% di Cr), un acciaio ottenuto mediante il processo della metallurgia delle polveri presenta una migliore e più regolare distribuzione dei carburi ed una grandezza di carburi relativamente più uniforme. Inoltre, non si verifica alcun orientamento delle fibre, come invece è inevitabile per i lingotti prodotti con il metodo tradizionale. I valori meccanici rimangono praticamente invariati e, nonostante l'alto tenore totale di elementi leganti, si ottengono valori meccanici ottimali in senso longitudinale e trasversale nonché una variazione dimensionale ridotta e non dipendente dall'orientamento.

## 2.4.6 Materiali destinati alla tranciatura

Per realizzare un "determinato pezzo" ci vuole sempre "il materiale di base più appropriato". Il materiale non deve essere né troppo vantaggioso né troppo costoso. Ciò che importa soprattutto è la scrupolosa osservanza dei criteri inerenti al pezzo da realizzare e alla sua fabbricazione. Un vasto assortimento di materiali idonei è offerto oggi dai fornitori. Può in un caso essere un nastro laminato a caldo non ricotto o in un altro caso magari un nastro laminato a freddo ottimale. La scelta del materiale appropriato deve farsi a seconda di determinati criteri di selezione. Le caratteristiche di questo materiale iniziale idoneo devono essere stipulate dapprima in conformità con la ditta fornitrice tramite specifiche tecniche d'acquisto, poi verificate ed infine rilasciate. Queste specifiche tecniche d'acquisto non sono statiche, ma devono adattarsi a seconda delle esigenze alla qualità e alla fabbricazione.

Il materiale non deve però essere né troppo costoso né troppo vantaggioso. Molte volte, un materiale acquisito ad un prezzo modesto aumenta inutilmente il costo della produzione e rende vana l'economia realizzata a livello degli acquisti. La redditività di una produzione può d'altronde anche essere pregiudicata da un materiale di qualità inutilmente elevata senza che si possa sfruttare completamente le sue proprietà. Parliamo in questo caso di un "over engineering".

L'importanza dei materiali destinati alla tranciatura può essere riassunta chiaramente tramite i seguenti punti:

- **fattore di costo:** la tranciatura fine ha uno sfruttamento del materiale compreso tra il 30% e il 70 %. Lo "scheletro" della bandella di materiale non è nient'altro che sfrido, ma viene recuperato e riutilizzato al 100 %. Inoltre va ricordato che una disposizione ottimale dei pezzi negli stampi migliora il coefficiente di utilizzo della bandella.
- **qualità dei pezzi tranciati,** in quanto il materiale influisce direttamente sulla qualità delle superfici tranciate (spaccature) sulle misure e le tolleranze dimensionali e sulla planarità
- **durata degli stampi,** infatti il materiale da tranciare influisce direttamente sul numero di pezzi tra due riaffilature degli elementi trancianti, sulla durata complessiva dello stampo e sul pericolo di rottura per il medesimo .

- sicurezza del processo: il materiale utilizzato per tranciare è corresponsabile per lo svolgimento della produzione senza guasti, per le forniture in ottica "just in time" e per la ridotta scorta a magazzino.

- redditività della fabbricazione

Sul mercato si trovano numerosi tipi di materiali. Essi possono essere suddivisi nelle seguenti categorie:

- nastro laminato a caldo o a freddo: questi materiali sono caratterizzati da valori esatti di analisi con deboli dispersioni, bassi valori di fosforo, bassi contenuti di zolfo, bassi contenuti di gas (ossigeno, azoto, idrogeno).

Con il procedimento di laminazione a caldo si ottiene un aumento del limite di snervamento e della resistenza alla trazione a deboli contenuti di carbonio, ottima tenacità alla rottura, eccellente saldabilità e buona idoneità alla deformazione a freddo e alla tranciatura fine. I nastri laminati a caldo (W) possono essere di diverso tipo:

- nastro laminato a caldo e decapato (W, b). Questo è il materiale di base più vantaggioso per quanto riguarda il costo.
- nastro laminato a caldo, decapato e schimpassato (W,be). Con una leggera laminazione a freddo si può ottenere un miglioramento della tolleranza di spessore, della planarità e della finitura superficiale.
- nastro laminato a caldo, decapato e ricotto (W, bg). La ricottura contribuisce ad un miglioramento della struttura. Si raggiunge un grado di globulizzazione circa del 90% per gli acciai al carbonio.
- nastro laminato a caldo, decapato, ricotto e schimpassato (W,bge oppure W,beg). Questo materiale di base è caratterizzato da un sensibile miglioramento delle tolleranze, delle qualità superficiali e della struttura. Le caratteristiche sono praticamente simili a quelle di un nastro laminato a freddo. Questo prodotto è sovente denominato semi-nastro laminato a freddo.

Con la laminazione a freddo seguita dalla ricottura invece si ottengono migliori tolleranze sullo spessore, migliori valori di planarità, finiture superficiali desiderate delle bandelle, globulizzazione della cementite e dei carburi, struttura della cementite e dei carburi, distribuzione dei cristalli di cementite rispettivamente del carburo, grossezza del grano della matrice e regolazione più accurata dei valori di  $R_{p0,2}$ ,  $R_m$ .

I nastri laminati a freddo possono essere così suddivisi:

- nastro laminato a freddo e ricotto (K,g). La norma prevede per lo stato ricotto (g) una ricottura di coalescenza con una globulizzazione circa al 90 %
- nastro laminato a freddo e ricotto su cementite globulare (K,GZK). Qui abbiamo una struttura con una sferoidizzazione praticamente al 100 % della cementite e dei carburi
- nastro laminato a freddo e ricotto su cementite globulare, extra-dolce (K, GKZ-EW). Questa è l'esecuzione ottimale però anche più costosa dei materiali di base. Lo stato extra-dolce viene raggiunto mediante una sferoidizzazione al 100 % della cementite e dei carburi, una restrizione della composizione chimica e tramite una particolare tecnologia di laminazione a freddo.
- Tutti i materiali sopracitati possono poi venire leggermente rilaminati a freddo allo scopo di migliorarne la planarità (tale operazione avverrà una volta terminata la ricottura del nastro). Nascono così altri tipi di materiali come: (K; G, LG), (K; GZK, LG), (K;GZK-EW, LG).

- Acciaio laminato piatto: principalmente si deve distinguere fra acciaio piatto laminato a caldo e acciaio piatto trafilato a freddo.

Dovuto al campo di spessore fino a 20 mm nel caso del nastro laminato a caldo, l'acciaio laminato piatto non gioca più un ruolo importante come materiale di base per la nostra tecnologia nei paesi dell'Europa occidentale, negli Stati Uniti e nel Giappone. Ha invece sempre una certa importanza per l'Europa orientale e per altri paesi.

- Profilati: in certi casi, i profilati sono utilizzati come materiali di base (ad esempio nella fabbricazione di cerniere). Con riguardo allo stato di fornitura (non ricotta, ricotta etc.) si dovrà decidere da un caso all'altro.

- Semilavorati: in questo caso, dei pezzi vengono inseriti manualmente e poi lavorati parzialmente mediante la tranciatura fine. Anche in questo caso si deve tenere conto delle influenze del materiale.

Le aziende dovranno poi selezionare il materiale più appropriato in base al pezzo da fabbricare tramite diversi criteri:

- grado di difficoltà della forma geometrica del pezzo
- grado di difficoltà della deformazione a freddo (piegatura, imbutitura, coniatura)
- tolleranze dimensionali (e tolleranze sullo spessore del nastro)
- planarità ( può comportare la scelta di servirsi di rotoli (coil) o di bandelle (strisce)
- qualità superficiale del pezzo (decapato, lucido, esente da crepature e pori, rugosità  $R_a$  definita)
- numero di pezzi (maggiore è il numero di pezzi da produrre maggiore sarà l'impatto di una scorretta scelta del materiale).

### 2.4.7 Le tolleranze nella tranciatura fine

Nella tranciatura fine si possono ottenere tolleranze notevolmente più strette rispetto alla tranciatura normale. Esse dipendono, però, da vari fattori che elenchiamo di seguito.

Profili esterni: le tolleranze ammissibili dipendono da:

- precisione della matrice;
- rigidità della matrice;
- abrasività della matrice;
- spessore del materiale;
- resistenza alla rottura del materiale.

#### Valori pratici (Classi ISO)

Resist. a traz. del materiale (N/mm <sup>2</sup> )	< 400	400 – 630	> 630
Spessore materiale (mm)			
< 1,6	7	8	8
1,6...2,5	7	8	8
2,5...4,0	8	8	9
4,0...6,3	9	9	9
6,3...10,0	9	9	10
> 10,0	10	10	11

Tabella 7 Classi ISO per profili esterni.

Profili interni: le tolleranze ammissibili dipendono da:

- precisione dei punzoni dei profili interni;
- rigidità dei punzoni dei profili interni;
- abrasività dei punzoni dei profili interni;
- spessore del materiale;
- resistenza alla rottura del materiale.

**Valori pratici (Classi ISO)**

Resist. a traz. del materiale (N/mm <sup>2</sup> )	< 400	400 – 630	> 630
Spessore materiale (mm)			
< 1,6	7	7	7
1,6...2,5	7	8	8
2,5...4,0	7	8	8
4,0...6,3	8	8	9
6,3...10,0	9	9	10
> 10,0	9	10	11

*Tabella 8 Classi ISO per profili interni.*

Interassi: le tolleranze ottenibili sugli interassi dei profili interni dipendono da:

- precisione del punzone, estrattore, punzoni dei profili interni;
- gioco tra: punzone - premiamiera, punzoni dei profili interni - estrattore, estrattore - matrice;
- posizione del semistampo superiore e inferiore;
- spessore del materiale;
- resistenza alla rottura del materiale.

**Valori pratici (Classi ISO)**

Resist. a traz. del materiale (N/mm <sup>2</sup> )	< 400	400 – 630	> 630
Spessore materiale (mm)			
< 1,6	7	7	7
1,6...2,5	7	8	8
2,5...4,0	7	8	8
4,0...6,3	8	8	9
6,3...10,0	8	9	10
> 10,0	8	9	10

*Tabella 9 Classi ISO per interassi.*

Va sottolineato che il trattamento termico peggiora la precisione dimensionale di circa un punto sui profili esterni, su quelli interni e sugli interassi.

## 2.5 Accorgimenti per una corretta progettazione

### 2.5.1 Calcolo della larghezza della striscia e del passo di avanzamento

Quando non è necessario che l'orientamento dei grani del materiale sia correlato alla funzione del pezzo da tranciare, la disposizione del pezzo stesso sulla striscia viene effettuata con il criterio di ridurre al minimo lo sfrido. I dettagli più complicati del pezzo, ad esempio dentature o zone che richiedono maggiori precisioni, vanno orientati contro la direzione di avanzamento.

La larghezza di striscia va calcolata con la regola empirica: "Larghezza del pezzo da tranciare misurata in direzione ortogonale alla direzione di avanzamento più 2,5-3 volte lo spessore del materiale".

Il passo di avanzamento deriva dalla dimensione trasversale del pezzo (misurata cioè in direzione dell'avanzamento) maggiorata di 1,5-2 volte lo spessore del materiale.

La distanza tra profilo del pezzo e limite del materiale e quella fra due pezzi contigui vanno tenute pari rispettivamente a 1,25-1,5 s e 1,5-2 s (s= spessore materiale).

Il valore minimo fra pezzo e spigolo esterno della striscia non deve comunque mai essere inferiore a 1mm.

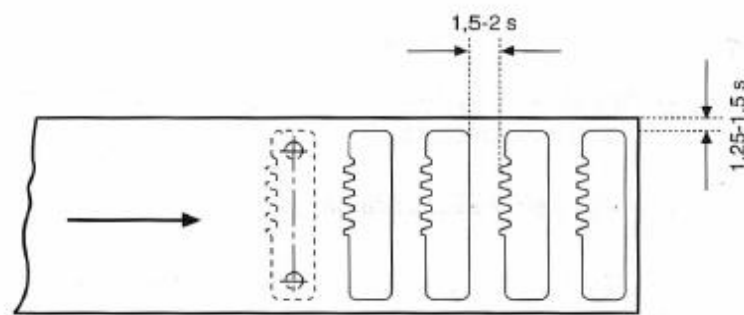


Figura 38 Disposizione dei pezzi sulla striscia di lamiera: criteri per la determinazione della larghezza.

### 2.5.2 Relazione fra dimensioni dello stampo e dimensioni della pressa

Quando si utilizzano stampi standardizzati, le dimensioni sono predeterminate e vanno solo raffrontate a quelle della pressa. Nel caso di stampi non standard, non solo va controllato l'anello adattatore, ma deve anche essere posta attenzione all'altezza massima, da confrontarsi con quella disponibile sulla pressa.

L'esperienza indica che la sola forza effettiva richiesta per la trancitura non è sufficiente a determinare con sicurezza il tipo di pressa. In qualche caso, le dimensioni fisiche dello stampo possono essere un fattore determinante. Può accadere infatti che, nonostante la forza disponibile su una pressa di piccole dimensioni sia teoricamente sufficiente per l'operazione prevista, le dimensioni dello stampo non possano trovare accoglienza su quella macchina e ne richiedano una di dimensioni maggiori.

Per offrire il massimo supporto agli stampi (sia per piccoli sia per grossi pezzi) vengono utilizzati anelli adattatori di acciaio sul piano macchina superiore e inferiore della pressa.

Nel progetto dello stampo, le dimensioni delle piastre base e, nel caso di stampi a punzone mobile, della piastra base punzone vanno scelte in modo da corrispondere agli anelli adattatori sulla pressa.

La filettatura sulla base punzone deve essere sufficiente a resistere alla pressione di stripping.

### 2.5.3 Dimensionamento degli elementi trancianti

Quando l'estrattore e il punzone che genera la forma interna sono rimossi dalla matrice, il pezzo può in generale essere spinto nell'apertura della matrice con una determinata pressione.

Ciò indica che il profilo esterno del pezzo tende a risultare leggermente superiore alla dimensione della matrice stessa.

Dopo la tranciatura, le forme interne tendono a ritirarsi leggermente, ossia a divenire un po' più piccole rispetto ai punzoni delle forme interne. Data questa tendenza, matrici e punzoni per forme interne devono avere dimensioni di circa 0,005-0,01 mm superiori a quelle della forma finale desiderata.

Nel caso di matrice per forme esterne l'esperienza mostra che è vantaggioso ricavare le dimensioni della matrice nel terzo inferiore della banda di tolleranza concessa per il pezzo. Il vantaggio di questo criterio è che se i pezzi campione (cioè tranciati per prova) risultano sotto misura, la matrice può essere leggermente allargata. Inoltre, le dimensioni reali della matrice, e quindi quelle dei pezzi tranciati, tendono a crescere lievemente nel corso della produzione (a causa dell'usura).

Quando invece le dimensioni dei pezzi tranciati per prova risultano un poco più piccole di quelle nominali, il processo si inverte e la matrice va prevista inizialmente con dimensioni che cadono nel terzo superiore della banda di tolleranza.

Se sono richieste forme interne circolari oppure con sezioni sporgenti, le dimensioni del punzone vengono impostate nella fascia superiore della banda di tolleranza.

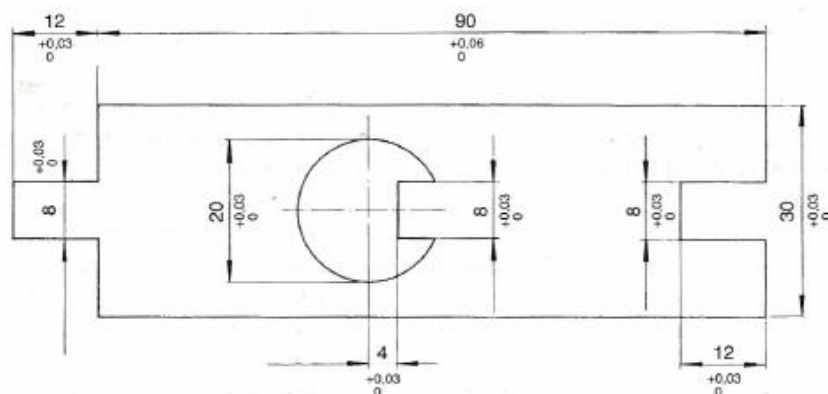


Figura 39 Esempio di disegno di un pezzo con indicazione delle tolleranze richieste.

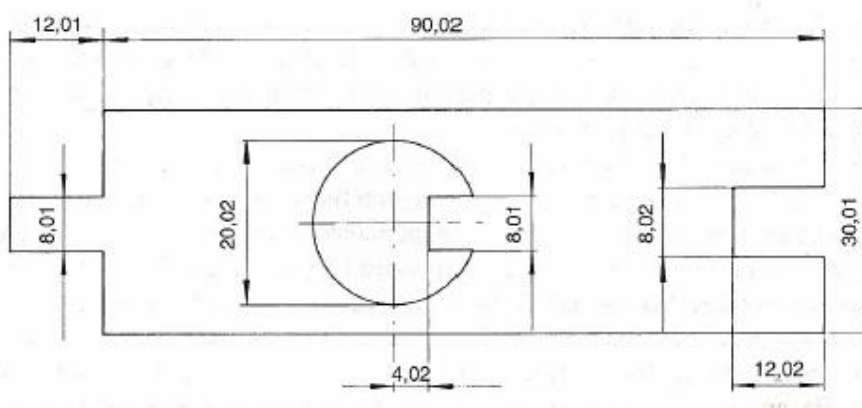


Figura 40 Dimensione degli elementi trancianti che determinano le dimensioni del pezzo finito (matrice e punzoni per le parti interne).

## 2.5.4 Gioco punzone-matrice

Per "gioco" fra punzone e matrice si intende la differenza di dimensione fra il profilo della matrice e il profilo del punzone, sempre intesa come misura diametricale (non sul raggio).

Pertanto, la distanza tra parete del punzone e parete della matrice in una qualunque posizione del profilo è pari alla metà del gioco.

Il gioco è di circa l' 1% dello spessore della lamiera ma bisogna distinguere fra gioco sui profili interni e gioco sui profili esterni.

Per profili esterni il gioco punzone-matrice è calcolato in genere intorno all' 1 % dello spessore della lamiera.

Nel caso di dentature, il gioco in corrispondenza della sommità dei denti e della radice degli stessi va raddoppiato. Ciò vale anche per profili che tendono a rientrare nel profilo nominale.

Cave o profili analoghi che tendono a rientrare in pezzi dove il bordino non segue il profilo esterno di tranciatura vanno trattati come profili interni.

Per profili interni bisogna considerare diametro, lunghezza e larghezza del singolo profilo, insieme naturalmente allo spessore del materiale.

Va inoltre sottolineato che i valori e i dati qui esposti vanno considerati come orientamenti puramente indicativi (fig. 41).

In qualche caso, per ragioni tuttora sconosciute, risultati migliori si possono ottenere con valori diversi. Ciò, in particolare, quando si lavorano materiali tenaci con caratteristiche strutturali non corrispondenti a quelle ottimali per la tranciatura fine. In generale, i materiali caratterizzati da una limitata deformabilità richiedono giochi inferiori rispetto a quelli con deformabilità elevata. Il numero di pezzi producibili fra due riaffilature successive varia in modo direttamente proporzionale al valore del gioco: con giochi maggiori si realizzano produzioni superiori. Per questa ragione conviene utilizzare il gioco maggiore possibile, compatibilmente con la qualità richiesta per i pezzi.

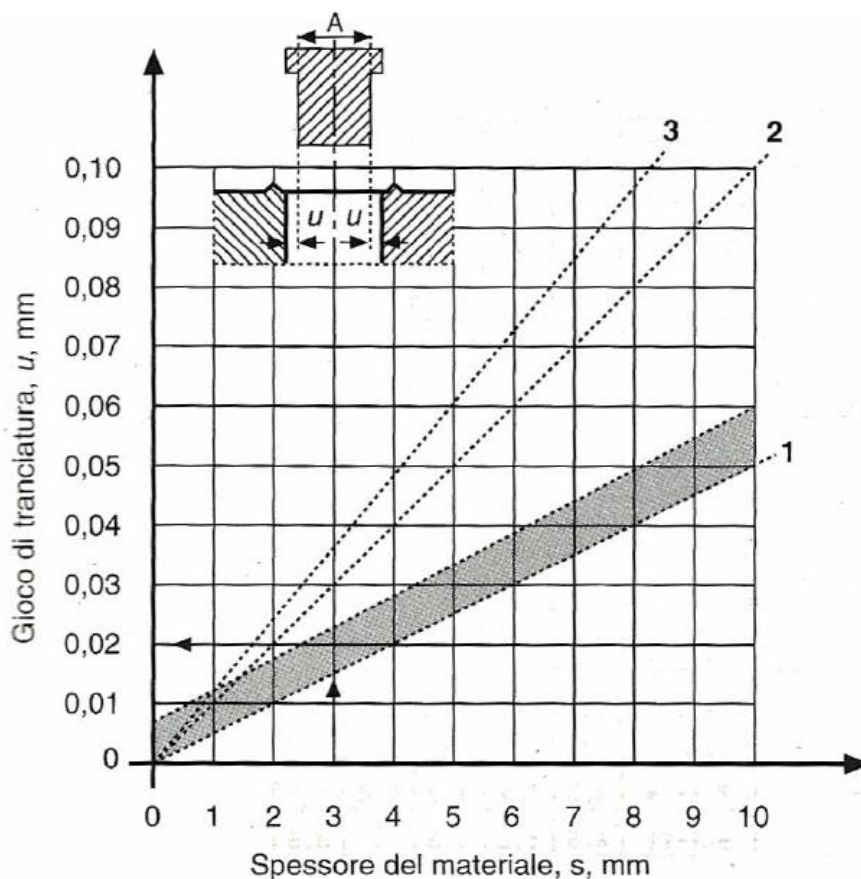


Figura 41 Gioco di tranciatura in funzione dello spessore del materiale.



Se però il gioco è eccessivo, sulla sezione tagliata si nota una zona strappata sul lato punzone, zona che cresce di estensione al crescere del gioco. In certi pezzi, una piccola zona di "strappo" (su pezzi di piccolo spessore una parte appena visibile e su pezzi di spessore maggiore fino a un massimo del 10% dello spessore) può essere accettata allo scopo di consentire un numero superiore di pezzi per ogni riaffilatura. Per pezzi che non richiedono una tranciatura fine sull'intero perimetro, si potrà adottare un gioco superiore nelle zone con minori esigenze di precisione. In questo caso va notato che il punzone deve restare guidato al 100%. Quest'esigenza può essere soddisfatta nel modo migliore riducendo le dimensioni del punzone soltanto alla sua sommità. Fino a quale profondità rispetto a detta sommità il punzone possa essere ridotto dipende dallo spessore del materiale da tranciare e dalla lunghezza effettiva della guida. Detta profondità comunque non deve essere inferiore a 1,5 volte lo spessore della lamiera.

## 2.5.5 Costruzione degli stampi per tranciatura fine

In linea di massima i criteri di fabbricazione di questi stampi sono gli stessi degli stampi per tranciatura convenzionale di ottima qualità. Tuttavia, come detto, i giochi in tranciatura fine sono da 10 a 20 volte inferiori, le precisioni devono quindi essere corrispondentemente superiori e le esigenze di guida delle parti in movimento relativo molto più severe.

A parte queste fondamentali differenze concettuali, vi è però una distinzione peculiare che caratterizza gli stampi per tranciatura fine: la presenza del bordino a V sul premilamiera e, nel caso di lamiere di considerevole spessore, anche sulla matrice.

Il bordino può essere realizzato mediante rettifica, fresatura oppure elettroerosione. La rettifica in tondo si impiega soltanto quando il bordino ha forma circolare. Se invece, data la forma e le esigenze del pezzo il bordino è limitato a dette zone e ha andamento rettilineo, la rettifica può avvenire in piano.

Nel caso più frequente di pezzi con profilo geometricamente complesso, il bordino viene generato mediante fresatura ad alta velocità, preferibile alla realizzazione tramite elettroerosione. È opportuno che la fresa sia in metallo duro.

La generazione del bordino mediante elettroerosione è utilizzata meno frequentemente poiché presenta problemi di deformazione della struttura dell'acciaio anche se viene effettuata in tre fasi: sgrossatura, prefinitura e finitura. Nell'operazione ha grande importanza l'efficiente lavaggio, determinante per evitare danni al materiale.

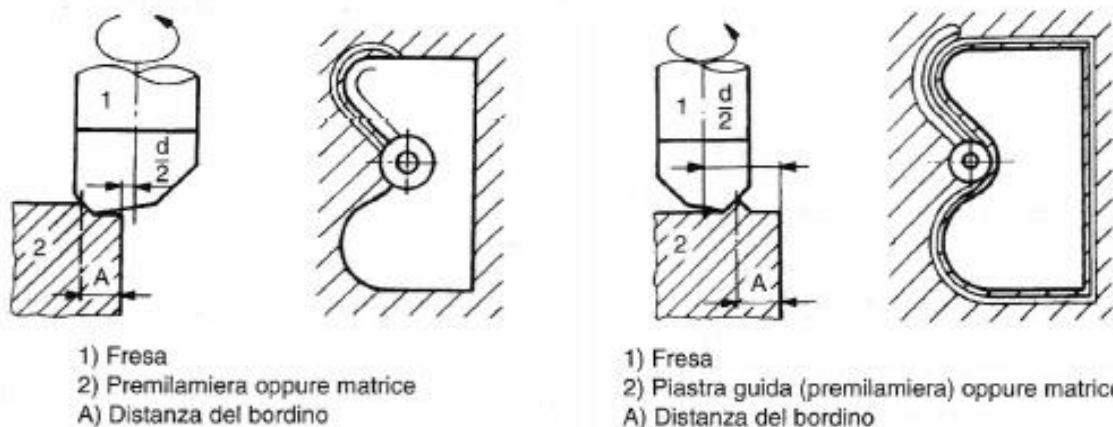


Figura 42 Generazione mediante fresatura di un bordino a V: la prima operazione si effettua sulla superficie interna, la seconda operazione sulla superficie esterna.



# CAPITOLO 3

## Problema tecnologico e progettazione dello stampo

### 3.1 Problema Tecnologico

Il problema tecnologico che si vuole analizzare in questa tesi di laurea nasce dall'esigenza aziendale dell'Ernesto Malvestiti s.p.a. di rinnovare una normativa interna risalente al 1995 riguardante un particolare criterio di fattibilità dell'operazione di trancitura fine su pezzi dotati di particolari caratteristiche geometriche, come mostrato nelle figure sottostanti.

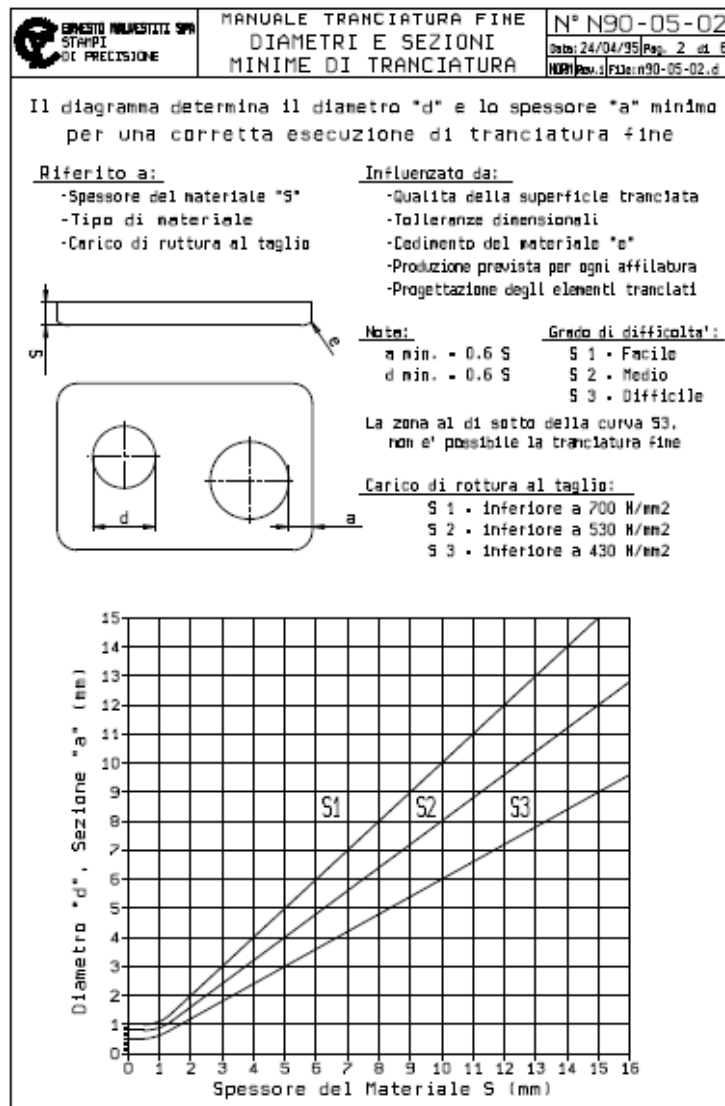


Figura 43 normativa interna Malvestiti riguardante la fattibilità della trancitura fine di fori circolari di determinato diametro e a determinata distanza dalla parete del pezzo tranciato.

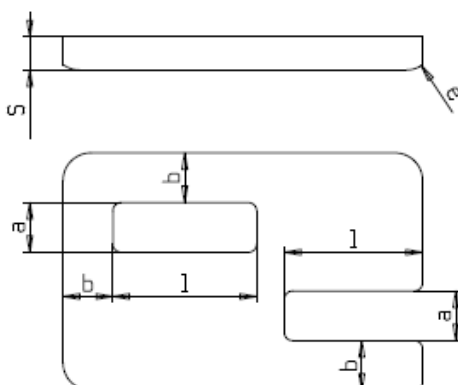
Il diagramma determina lo spessore "a" e "b" minimo per una corretta esecuzione di tranciatura fine

Riferito a:

- Spessore del materiale "S"
- Tipo di materiale
- Carico di rottura al taglio

Influenzato da:

- Qualità della superficie tranciata
- Tolleranze dimensionali
- Cedimento del materiale "e"
- Produzione prevista per ogni affilatura
- Progettazione degli elementi tranciati



Nota:

- a min. = 0.6 S
- b min. = 0.6 S
- l max. = ~15 a

Grado di difficoltà:

- S 1 = Facile
- S 2 = Medio
- S 3 = Difficile

La zona al di sotto della curva S3, non e' possibile la tranciatura fine

Carico di rottura al taglio:

- S 1 - inferiore a 700 N/mm2
- S 2 - inferiore a 530 N/mm2
- S 3 - inferiore a 430 N/mm2

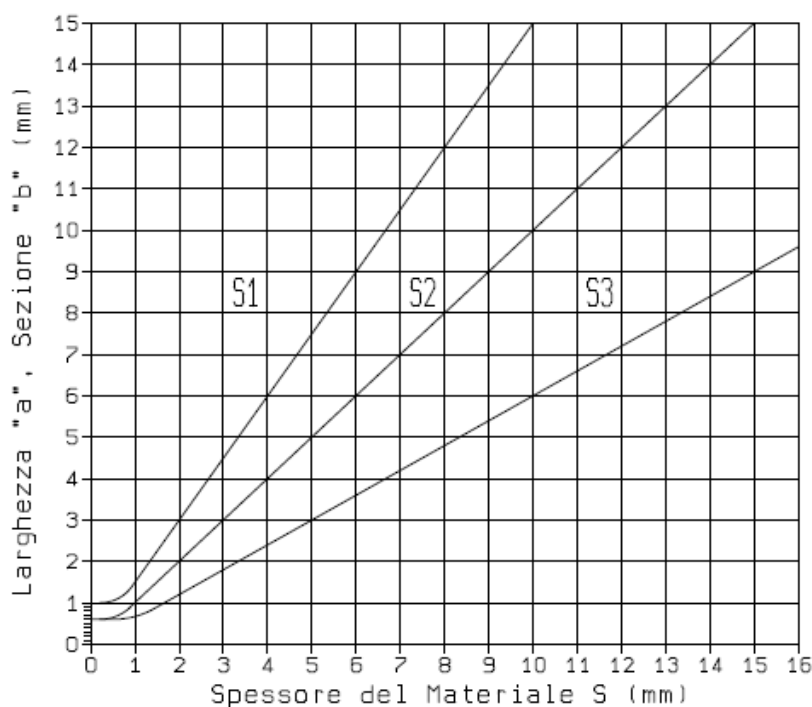


Figura 44 Normativa interna Malvestiti riguardante la fattibilità della tranciatura fine nel caso di tasche di forma rettangolare dotate di determinate caratteristiche geometriche.

Le due immagini relative alle normative interne della Malvestiti pongono attenzione sui parametri specifici fondamentali per una corretta selezione delle operazioni possibili e di quelle impossibili nella tranciatura fine. Come osservabile nella prima immagine, in base alla resistenza al taglio del materiale (e quindi al grado di difficoltà del materiale) esistono tre leggi sperimentali che indicano il diametro minimo

realizzabile per un determinato spessore di materiale tranciato. Sembra quindi essere presente una proporzionalità diretta semplice tra diametro minimo del foro realizzabile tramite tranciatura e spessore del materiale tale per cui, in base al grado di difficoltà S, il diametro minimo del foro da tranciare è tanto maggiore quanto più alto è il grado di difficoltà del materiale. Discorso analogo può essere fatto sia per la distanza minima consentita del foro circolare dalla parete del pezzo. Anche nella seconda immagine viene riproposto il limite di fattibilità che è stato appena illustrato : la quota "b", indicante la distanza della parete dal bordo del pezzo tranciato e la quota "a" relativa alla profondità della tasca, vengono anch'esse legate tramite una proporzionalità (visibile tramite le rette nella parte inferiore della fig. 44) allo spessore del materiale del pezzo.

Sono inoltre presenti anche altre indicazioni come la lunghezza massima ammissibile "l" della tasca (pari a 15 volte la profondità "a" della tasca) che però non sono di particolare interesse per l'attività su cui si focalizzerà questa tesi.

Il problema principale che accumuna le normative sopra descritte è la rottura del punzone dovuta all'eccessivo stato di sforzo cui è sottoposta una parte o la totalità del punzone.

Per esempio, nel caso di fori circolari da tranciare, minore è il diametro del foro maggiore sarà lo sforzo risultante sul punzone a pari materiale e spessore tranciato.

Nel caso della tasca rettangolare, descritta nella seconda immagine relativa alle normative, vi sarà ancora un problema di eccessivo sforzo ma solo sulla parte del punzone adibita al taglio del profilo esterno ed interno della parete sottile.

Una trattazione più approfondita riguardo le cause e il tipo di rotture che possono verificarsi nella tranciatura di una parete sottile è riportata nel paragrafo seguente.

### 3.2 Definizione di una prova sperimentale di tranciatura

Le normative descritte nel paragrafo precedente sono state realizzate nel 1995 allo scopo di stabilire i limiti realizzativi della tranciatura fine nella realizzazione dei pezzi. Essendo però passati quasi trent'anni è necessario aggiornare tali valori per renderli allineati con ciò che il progresso della tecnica e dei materiali per tranciatura ha reso possibile.

In particolare si è deciso di concentrarci sulla normativa in figura 44 allo scopo di ricostruire una nuova proporzionalità che legghi la distanza minima dal bordo del pezzo di una tasca rettangolare.

Tale distanza, indicata nella normativa con la lettera "b" è stata chiamata nella trattazione seguente "a".

Si è deciso quindi di realizzare un pezzo (fig. 45) dove la distanza della tasca rettangolare dalla parete sia 2 mm che dovrà essere tranciato utilizzando vari spessori in modo che il rapporto (che indichiamo con "R") tra la distanza della tasca dal bordo esterno del pezzo e lo spessore della lamiera assuma valori via via decrescenti. Quindi, riassumendo:

$$R = a / S$$

Dove "a" è la distanza della tasca dalla parete esterna e "S" è lo spessore della lamiera.

Lo scopo della sperimentazione è trovare il valore limite del rapporto R, cioè il coefficiente della retta utilizzata nel descrivere il legame tra "a" ed "S" nella normativa.

Questo rapporto limite deve garantire una vita del punzone tra due affilature successive di almeno 10.000 pezzi.

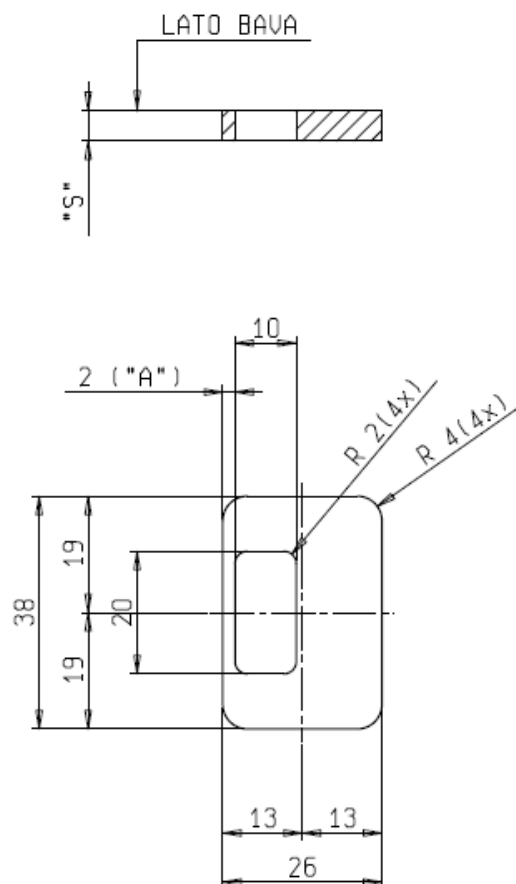


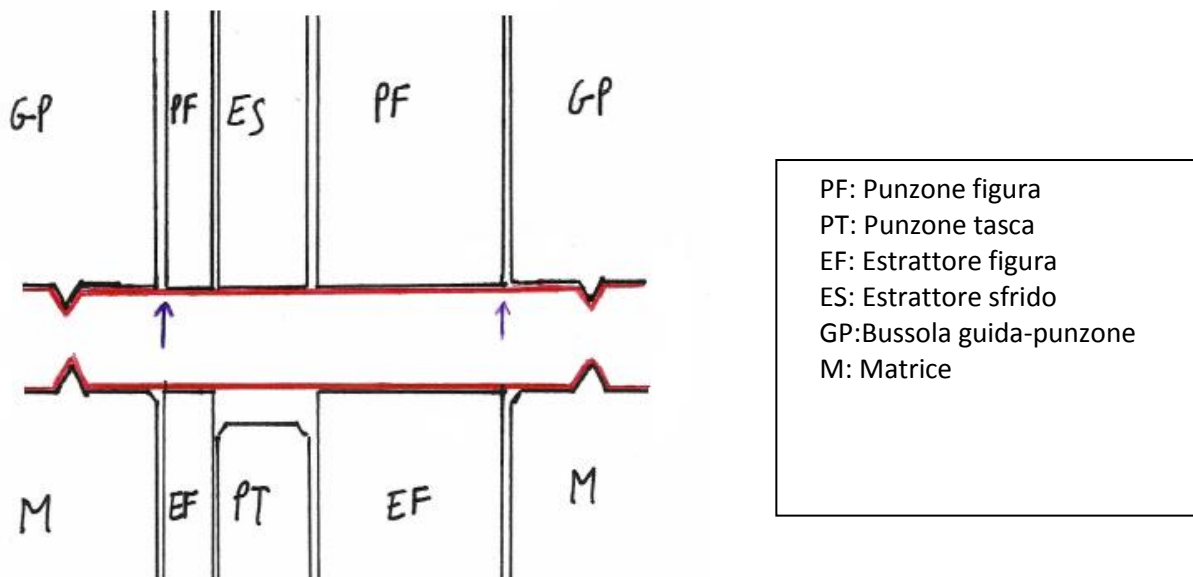
Figura 45 pezzo realizzato ah hoc per indagare il nuovo limite nella tranciatura di una parete sottile.

La finalità di questa tesi di laurea è quindi individuare tutti i parametri necessari per una corretta progettazione degli elementi che concorrono nella tranciatura del pezzo, specialmente per quanto riguarda gli elementi attivi dello stampo (i responsabili del taglio del materiale).

L'attenzione principale è rivolta al punzone figura, il componente che compie l'operazione di taglio del profilo esterno del pezzo e che funge da "matrice" per il punzone tasca che trancia invece il profilo interno.

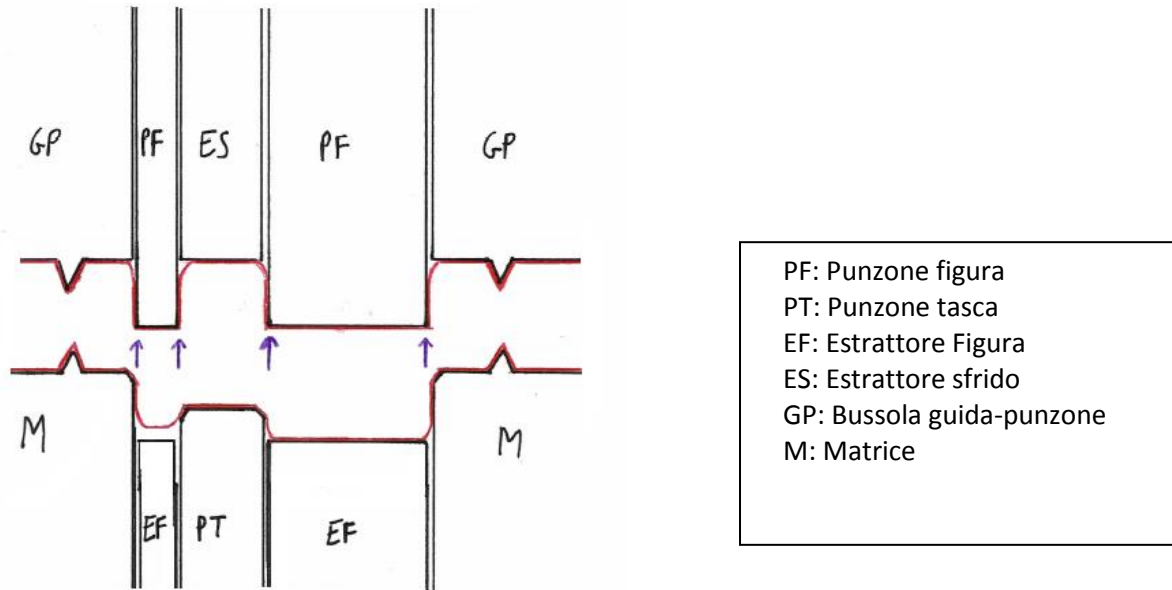
Il punzone infatti sarà soggetto al momento della tranciatura a molteplici forze che lo rendono il componente più sollecitato del processo.

Quando il punzone penetra nel materiale per tranciare il profilo esterno è sottoposto ad una forza di compressione dovuta alla resistenza del materiale (fig. 46).



*Figura 46 Situazione iniziale del punzone : durante il primo mm di corsa il punzone trancia solo il profilo esterno del pezzo. In Viola sono visualizzati i punti di taglio, dove si generano le forze di compressione sul punzone.*

Quando poi il punzone della tasca trancia il profilo interno, sul punzone figura si genera un'altra forza di compressione che si somma a quella precedente (fig. 47), creando quindi un pericoloso incremento della risultante finale che può comportare rotture localizzate sulla testa del punzone (come ad esempio scheggiature), rotture nella sede di posizionamento del punzone all'interno dello stampo o rotture che interessano una considerevole parte della parete sottile del punzone.



*Figura 47 Situazione del punzone oltre il primo mm di corsa, viene tranciata contemporaneamente sia il profilo interno che quello esterno. Compaiono quindi altri due punti di taglio con relativa forza di compressione sul punzone .*

Essendo la parete del punzone molto sottile (2 mm) quando il punzone va a compressione tale parete si deforma sollecitando di conseguenza l'estrattore al suo interno e il guida punzone all'esterno.

Va ricordato inoltre che oltre ai problemi di natura statica legati agli sforzi sui componenti il problema principale riguarda la vita a fatica del punzone , in quanto è sottoposto a elevati sforzi di natura ciclica.

Consci di tutte queste problematiche si è deciso di condurre una campagna sperimentale facendo variare lo spessore del materiale tranciato in modo da indagare il comportamento del sistema per diversi valori del rapporto R con la finalità di trovare il rapporto limite che consente la tranciatura di 10.000 pezzi consecutivamente.

Gli spessori utilizzati nella campagna sperimentale sono : 4mm, 5mm, 6mm e 7mm.

Come ulteriore elemento di confronto si è deciso di confrontare i risultati ottenuti sperimentalmente con quelli provenienti da un'analisi FEM utilizzando il programma Simufact.

Per eseguire un'analisi utilizzando gli elementi finiti il software necessita di modelli 3D di ogni parte attiva dello stampo, cioè di ogni parte che è a contatto con la lamiera.

Risulta quindi necessario progettare prima lo stampo per realizzare poi i modelli tridimensionali da impiegare.

### 3.3 Progettazione stampo



*Figura 48 Stampo chiuso pronto per essere trasferito nella sede di Muggiò dove verrà utilizzato sulla pressa per eseguire la campagna di sperimentazione.*

La progettazione dello stampo per l'esecuzione delle prove è stata condotta modificando uno stampo già costruito e non più utilizzato presente in azienda, per limitare al minimo i costi di produzione.

Analogamente i materiali da tranciare sono stati scelti tra quelli rimasti in giacenza a magazzino e non più utilizzati oppure scartati dal controllo qualità in quanto non conformi ai parametri minimi di accettazione (esempio nastro sciabolato o rigato).

Dovendo modificare uno stampo già esistente sono state operate scelte tecnicamente non perfette che comunque non dovrebbero incidere in alcun modo sui risultati che ci si è proposti di ottenere.

Di seguito riporto la sequenza di operazioni effettuate per progettare lo stampo:

- Disegno del pezzo finale da ottenere con eventuali tolleranze
- Definire la forza di tranciatura e il baricentro di tranciatura. Nel nostro caso assumiamo come ipotesi di lavoro uno spessore della lamiera di 5 mm e una resistenza del materiale ( $R_m$ ) di 500 MPa. Lo sforzo di tranciatura che ne consegue è

$$F_s = L \cdot s \cdot R_m \cdot f_1 = 178 \cdot 5 \cdot 500 \cdot 1 = 445 \text{ kN}, \text{ arrotondato a } 450 \text{ kN.}$$

$$\text{Perimetro di tranciatura } L = 178 \text{ mm}$$

$$\text{Area pezzo} = 778 \text{ mm}^2$$

L'area  $A$  tranciata è di  $778 \text{ mm}^2$ , di conseguenza lo sforzo risultante è :

$$\text{Sforzo} = F_s / A = 578 \text{ MPa.}$$

Assicurarsi poi che il baricentro di tranciatura sia il più concentrato possibile rispetto all'asse delle piastre della pressa.

- Disegno della striscia , cioè definizione del passo (distanza tra due pezzi consecutivi) e larghezza della striscia. Nel caso in esame la striscia è larga 52 mm e il passo scelto è di 32 mm in quanto adeguato per spessori fino a 7 mm. Va ricordato che in quasi tutti gli stampi di tranciatura fine l'alimentazione del materiale è da sinistra verso destra.
- Definizione del coefficiente di utilizzo del materiale:  
Area totale = larghezza nastro · passo = 1664 mm<sup>2</sup>  
Coefficiente di utilizzo del materiale = Area totale / Area pezzo =  $52 \cdot 32 / 778 = 46,7 \%$
- Scelta del tipo di pressa : definita la forza di tranciatura si sceglie la pressa più adatta. La scelta nel nostro caso ricade sulla pressa idraulica 4500 Plus HFA in quanto dotata di dispositivi di rilevamento delle forze nei vari componenti del processo.
- Scelta del bordino : è stato dimensionato il bordino per uno spessore di lamiera di 5 mm .  
Spessore bordino su matrice: 0,7 mm con raggi di raccordo di 0,7 mm  
Spessore del bordino su guida punzone: 0,45 mm con raggi di raccordo di 0,3 mm.
- Calcolo dei valori di cordonatura (forza sul premilamiera) , di contropressione (relativi quindi al controstampo) .  
Per correttezza questi valori andrebbero ogni volta calcolati in base allo spessore di lamiera da tranciare.  
Forza cordonatura = lunghezza bordino · altezza bordino · Rm = 200 kN.  
Forza di estrazione = 10% - 20% forza tranciatura = 45kN.  
Forza di contropressione = area tranciata · K<sub>emp</sub> = 40 kN. (K<sub>emp</sub>=5)  
La costante empirica assume valori bassi per pezzi semplici in cui non interessa la planarità, alti in caso contrario.  
Per esigenze legate alla tipologia di pressa la contropressione minima impostabile sulla pressa è di 100 kN mentre per il valore di cordonatura è di 200 kN.
- Bilancio dei momenti: per decidere la posizione del pezzo all'interno della pressa si verifica se il momento generato dalla non perfetta concentricità del baricentro di tranciatura con le piastre della pressa superi o meno un valore limite che il costruttore della pressa consente. Nel nostro caso non incorriamo in questo genere di problema.
- Dimensionamento della matrice ed inserimento della guida per il punzone : entrambi questi componenti sono montati con viti e riferiti con spine cilindriche. Dal momento che siamo partiti da uno stampo già esistente è stato necessario riprogettare la piastra portamatrice e la piastra guida punzone. Tale piastra è dotata di colonne ausiliarie montate con viti a colletto che determinano una corsa massima ammissibile.



### 3.2.1 Progettazione parte inferiore

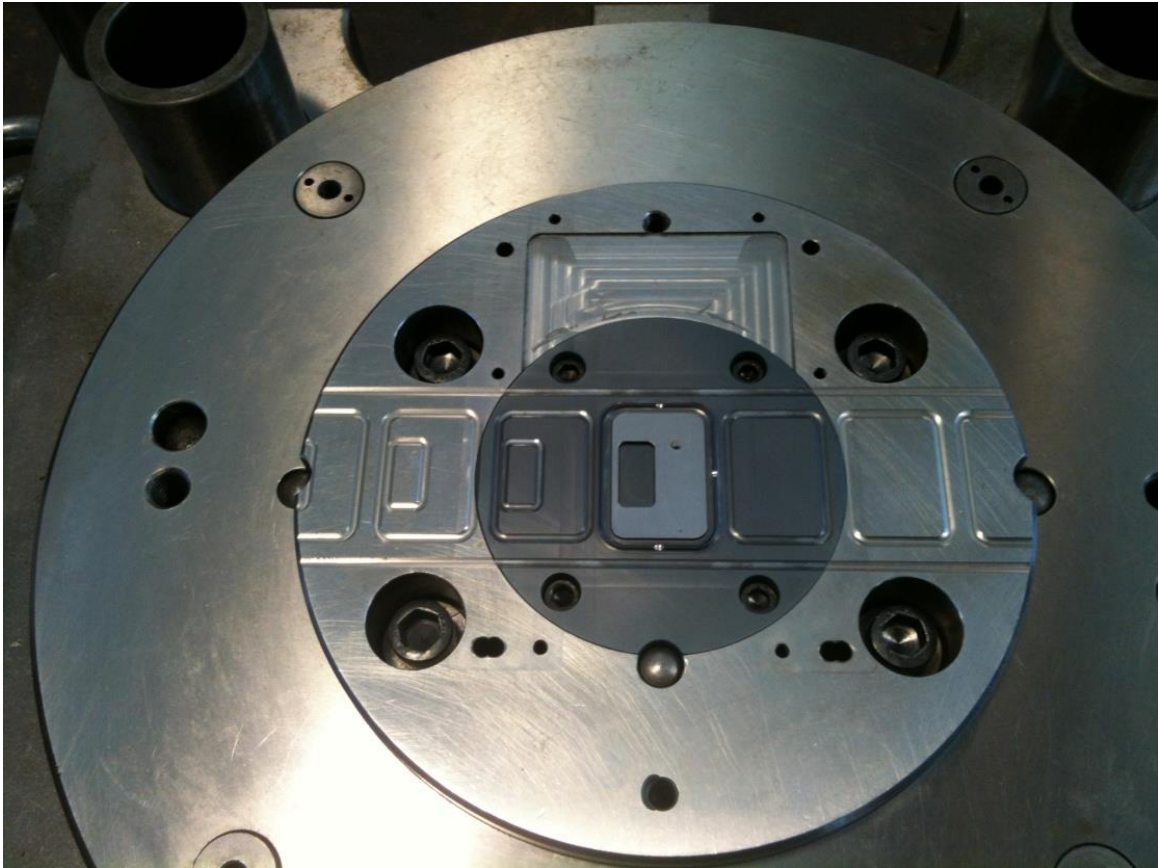


Figura 49 Parte inferiore dello stampo: visibili matrice, estrattore figura, punzone tasca.

- Posizionamento del pezzo nella matrice : va ora definita la posizione delle spine di estrazione (che agiscono grazie all'idraulica della macchina sull'estrattore figura) che in chiusura garantiscono contropressione mentre in apertura fungono da estrattori.
- Calcolo forze tranciatura figura interna (tasca) e dimensionamento punzone tasca :  
Area =  $196,5 \text{ mm}^2$   
Perimetro =  $56,5 \text{ mm}$   
Forza tranciatura = perimetro · Spessore ·  $R_m$  ·  $K = 170 \text{ kN}$   
Forza di estrazione = 10-20% Forza tranciatura =  $17 \text{ kN}$   
 $K$  è un fattore empirico compreso tra 0,8 e 0,9. Scegliamo 0,9.  
Nota la forza di estrazione si calcola il numero di viti del punzone tasca dello stampo : si scelgono due viti M6 (  $K_s = 865 \text{ MPa}$  ,  $R_m = 2420 \text{ MPa}$  ) normate UNI5931 DIN 912 e ISO 4762. Il Valore utilizzato nel dimensionamento è  $K_s$ , che corrisponde ad un valore ammissibile a fatica ad alto numero di cicli. Infatti il dimensionamento del punzone tasca deve tener conto sia della fase di tranciatura dove il punzone è in uno stato di compressione sia della fase di evacuazione del pezzo dove sul punzone agisce la forza di estrazione che sottopone il punzone ad uno stato di trazione.  
Area =  $130 \text{ mm}^2$   
Pressione =  $1.300 \text{ MPa}$  è troppo elevata ! Devo quindi allargare la base del punzone aumentando l'area resistente.  
Area nuova =  $328 \text{ mm}^2$

Pressione nuova = 517 Mpa. Come valore di riferimento interno si considera accettabile un valore massimo di pressione pari a 660 MPa, calcolata come un terzo del valore massimo ammissibile a compressione per un generico acciaio, pari a 2000 Mpa . Accettiamo quindi il valore di pressione trovata.

Raggio di raccordo scelto = 6 mm

- Dimensionamento spine di estrazione : scelgo spine di estrazione di diametro 6 mm . Da normativa una spina di 6 mm è garantita per 14.100 N , quindi per garantire la minima contropressione di 10 kN necessito di 7 spine circa .

Avendo posizionato le spine devo rifare il calcolo dell'area di appoggio del punzone tasca: l'area nuova è di 296mm<sup>2</sup> mentre la pressione nuova agente su quell'area è di 573 MPa , valore comunque ammissibile.

Altezza spina di estrazione = 93,3 mm

Per alloggiare la spina devo evitare che l'estrattore esca dalla matrice : questo è reso possibile da una testina creata ad hoc sull'estrattore figura. Inoltre tale testina deve essere separata dalla matrice lasciando tra i due uno strato d'aria.

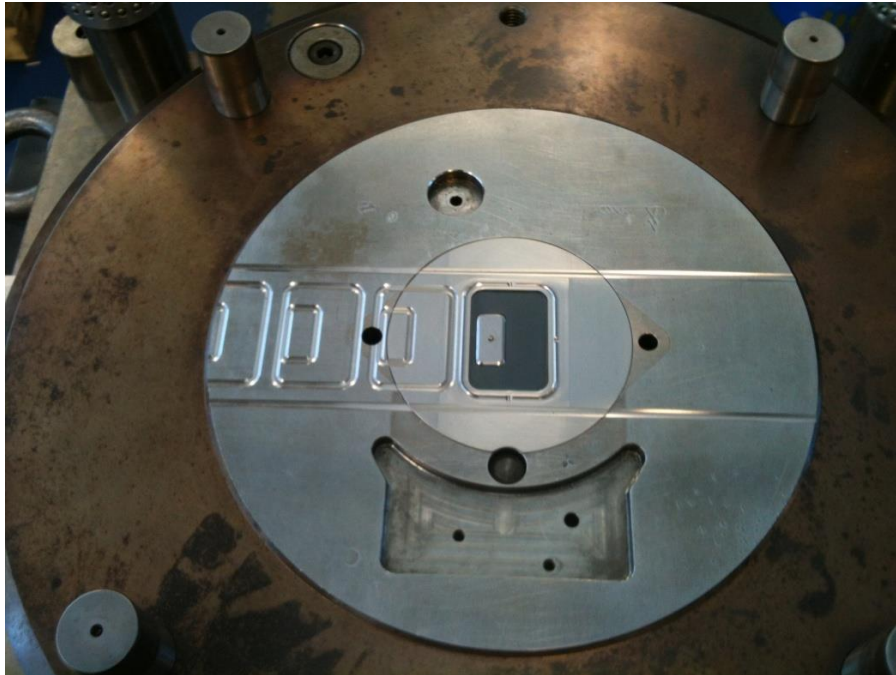
Altezza vite su cui è fissato il punzone = 60 mm

- Dimensionamento estrattore figura:  
La forza di tranciatura agente sul profilo esterno del pezzo è calcolata come  
 $F_{\text{profilo esterno}} = 450 \text{ kN} - 170 \text{ kN} = 280 \text{ kN}$   
 $F_{\text{estrazione}} = 28 \text{ kN}$

Scelgo 4 viti da 6 mm che mi garantiscono la tenuta fino a 32 kN circa.

- Definizione smusso sulla matrice : lo smusso sulla matrice vuole evitare scheggiature della matrice stessa e migliorare la qualità della superficie del pezzo.  
Generalmente si mette un'altezza di smusso di un decimo di mm per ogni mm di spessore della lamiera. Nel nostro caso quindi l'altezza complessiva sarà di 0,5 mm.

### 3.2.2 Progettazione parte superiore



*Figura 50 Parte superiore dello stampo : è visibile il punzone figura, l'estrattore sfrido e la bussola guida-punzone.*

- In primo luogo va deciso il gioco esistente tra punzone figura e matrice : scegliamo un gioco radiale di 0,02 mm pari a 0,04% dello spessore della lamiera. Successivamente decido le viti che dovranno garantire la tenuta a fronte della forza di estrazione per il punzone figura : posso mettere 6 viti M6 o 3 viti M8 in quanto sono già presenti all'interno dello stampo da modificare.
- Estrattore : viene posizionata una spina da 18 mm che fungerà da estrattore su cui viene posizionata un'altra spina da 8 mm.
- Spine di estrazione: posiziono 4 spine di estrazione da 20mm
- Spine di posizionamento: realizzate con materiale diverso dalle spine di estrazione e sottoposte ad un ciclo di tempra diverso (temprate fino al cuore) garantiscono un corretto allineamento della parte superiore dello stampo con quella inferiore.
- Calcolo della corsa del guida punzone:  $\text{Corsa} = \text{spessore lamiera} + 0,5 \text{ mm di smusso matrice} + 0,5 \text{ penetrazione punzone nella matrice} + 0,3 \text{ mm (arretramento punzone rispetto bussola guida)} + 1 \text{ mm (arretramento punzone tasca)} = 8,3 \text{ mm (con spessore lamiera di 6 mm)}$ .
- Posizionamento piccoli estrattori a molla per evitare di far incollare il pezzo o lo sfrido ai relativi estrattori. La mancanza di queste pompette creerebbe problemi all'evacuazione per soffiaggio del pezzo e dello sfrido. Per posizionare gli estrattori sono stati realizzati un foro da 2,6mm nell'estrattore figura e foro da 1,7mm per estrarre lo sfrido che si crea nel punzone figura dovuto alla tranciatura della tasca interna.
- Posizionamento guidanastri: la scelta ricade su due guide standard, una di entrata e una di uscita, dotate di traversa per sorreggere il nastro. Mediante due viti è possibile far scorrere i supporti per la lamiera (staffe) in modo da adattare la guida a larghezze diverse del nastro. Le guide sono installate sullo stampo mediante viti e spine.  
Una volta conclusi tutti questi passaggi si prova a chiudere virtualmente lo stampo in modo da far emergere eventuali incongruenze o errori di qualsiasi tipo .

### 3.2.3 Realizzazione particolari

Infine si disegnano tutti i particolari dello stampo, cioè ingrandimenti del disegno originale utili per definire tutte le dimensioni con le relative tolleranze dei componenti.

Nelle immagini sottostanti verranno mostrati i disegni dei particolari attivi dello stampo, di cui verranno fatti i relativi modelli 3D mediante il software SolidWorks:

- punzone figura

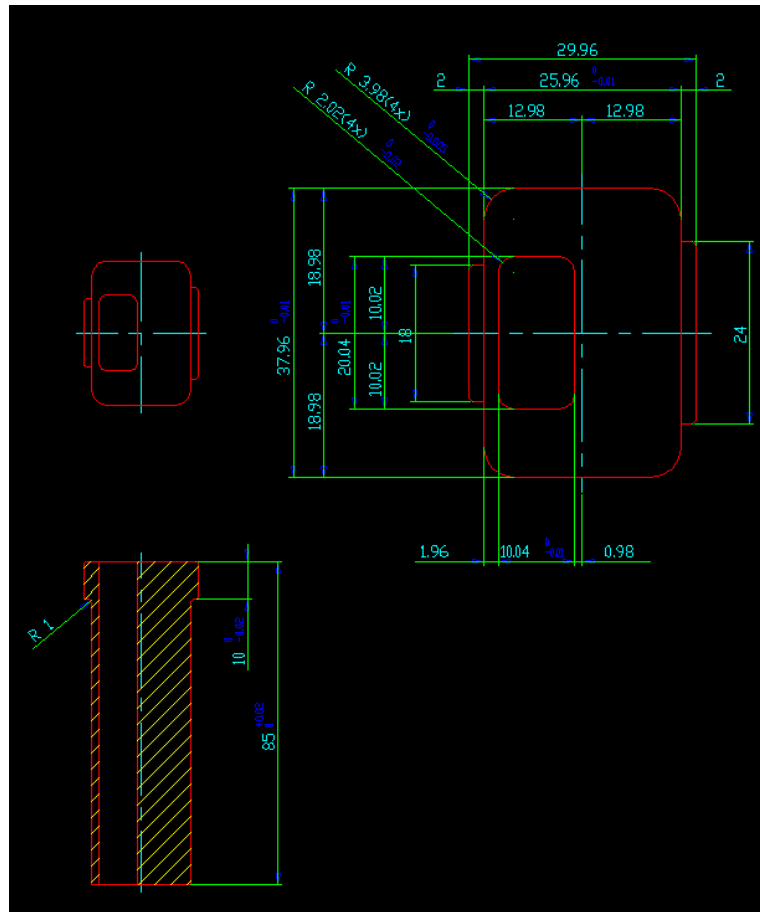


Figura 51 Disegno del punzone figura.



Figura 52 Punzone figura.

- estrattore sfrido

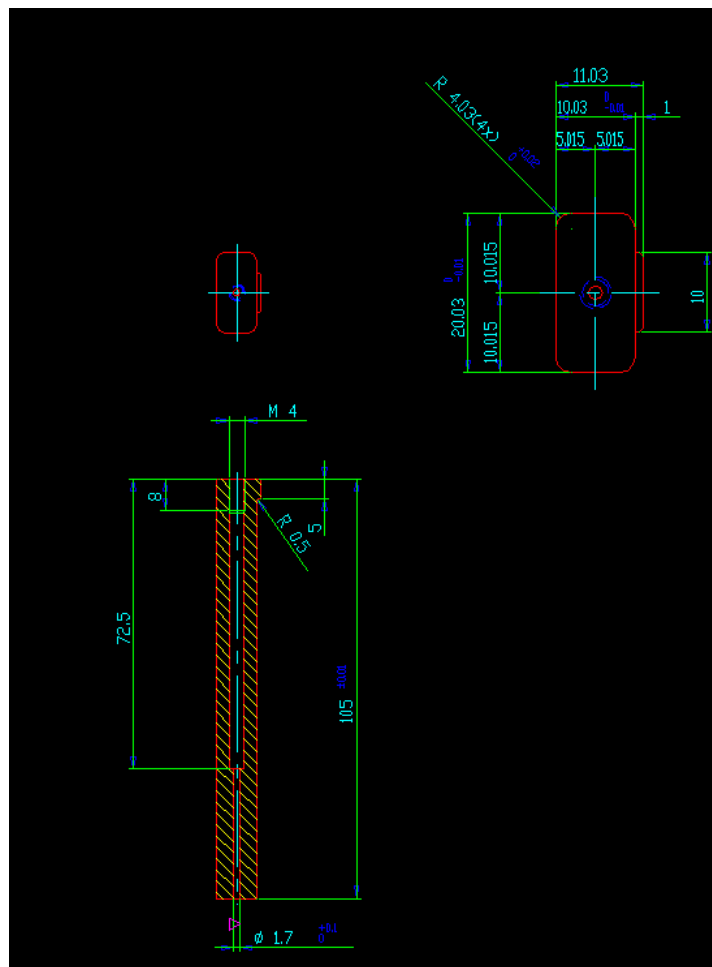


Figura 53 Disegno dell' estrattore sfrido.



Figura 54 Estrattore sfrido.

- bussola guida - punzone

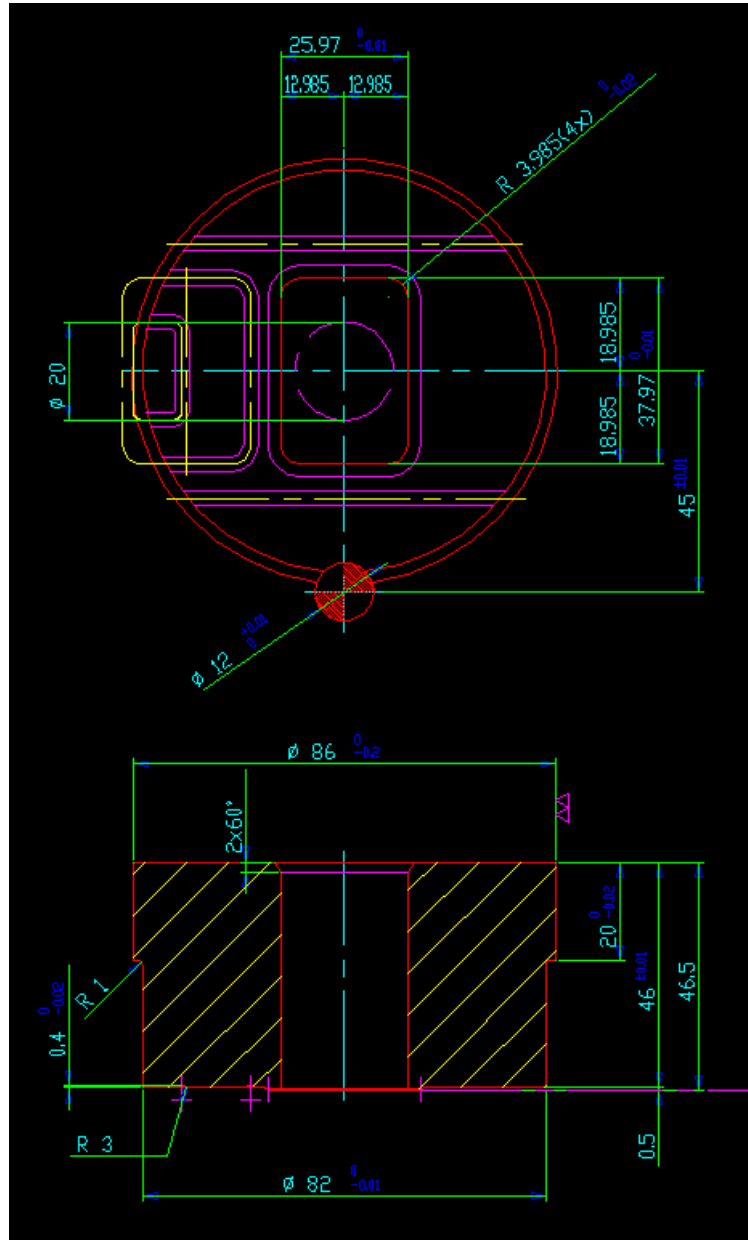


Figura 55 Disegno della bussola guida - punzone.



Figura 56 Bussola guida - punzone.

- punzone tasca

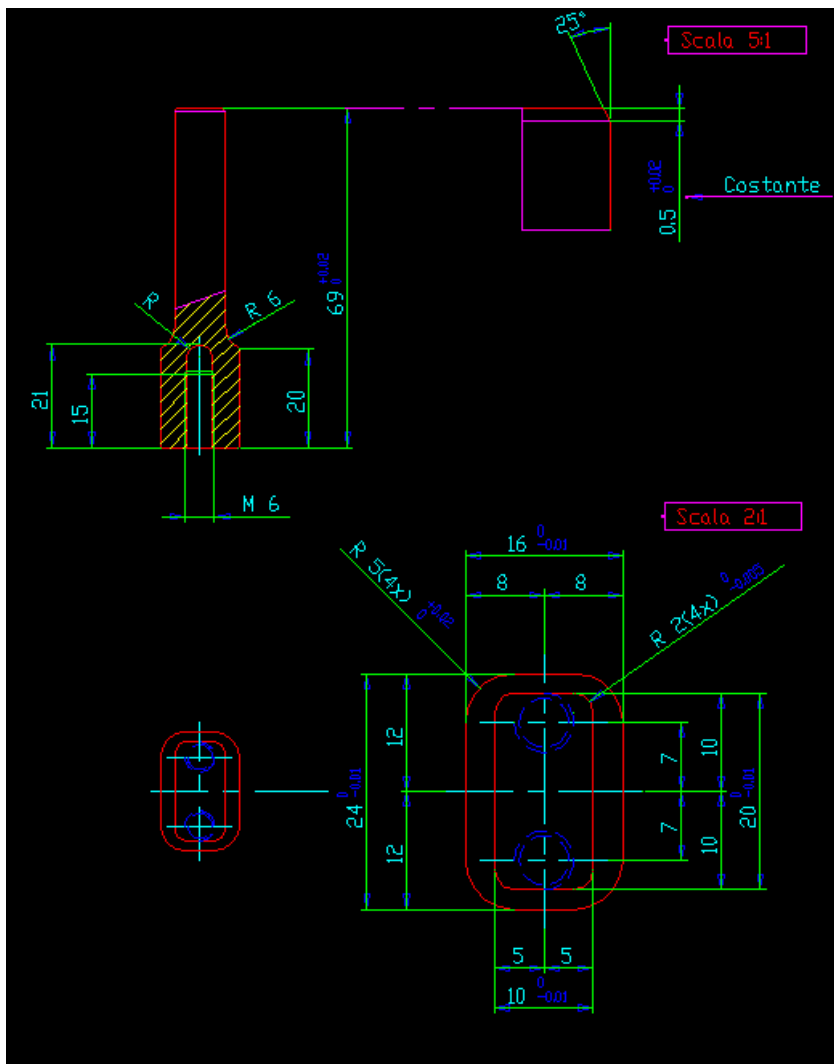


Figura 57 Disegno del punzone tasca.



Figura 58 Punzone tasca.

- estrattore figura



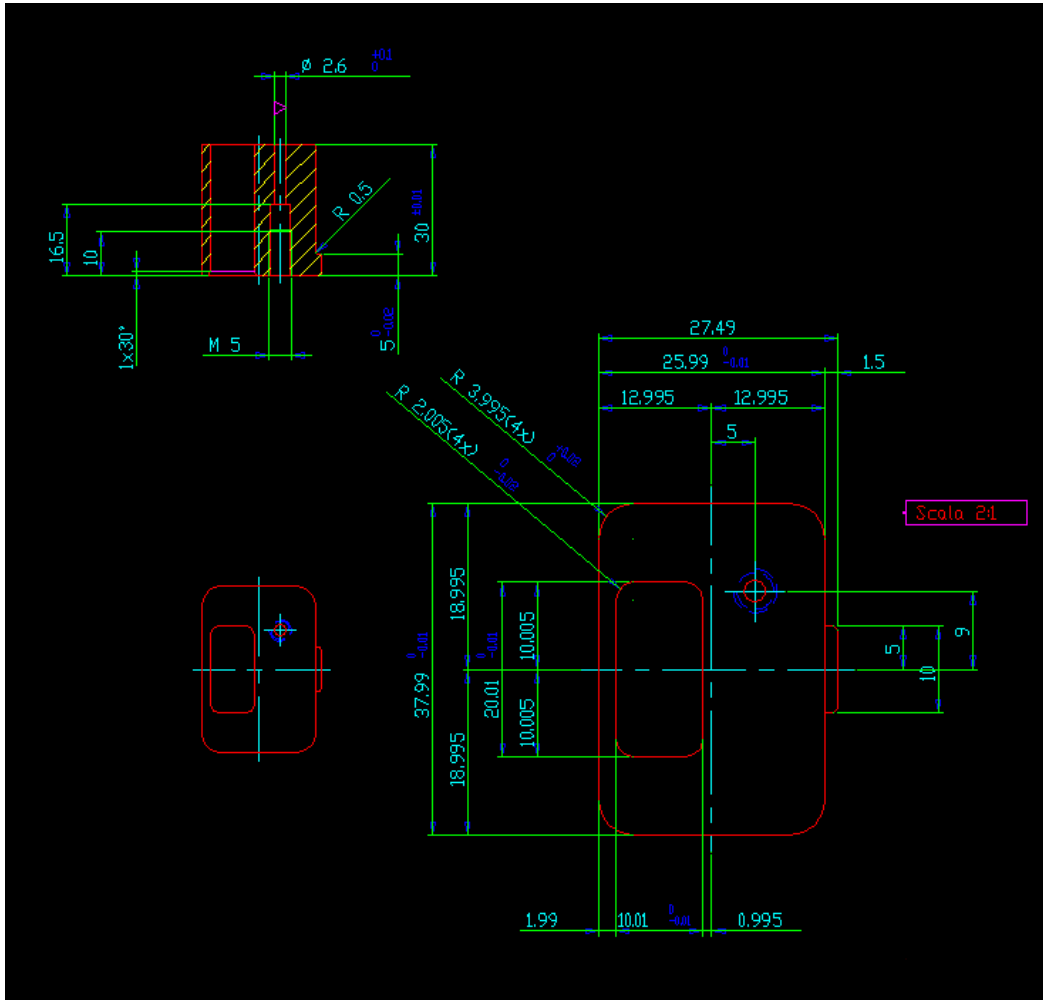


Figura 59 Disegno dell'estrattore figura.



Figura 60 Estrattore figura.

- matrice

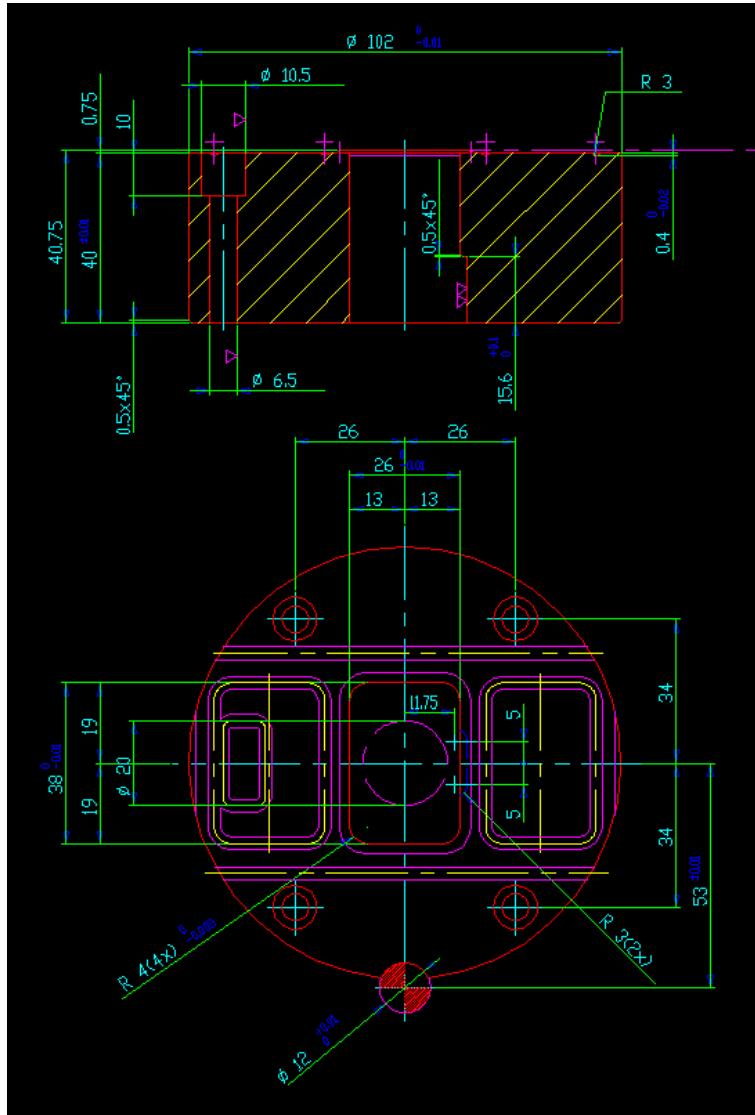


Figura 61 Disegno della matrice.



Figura 62 Matrice.

# CAPITOLO 4

## Realizzazione modello FEM

### 4.1 Costruzione del modello

Una volta importati tutti i componenti necessari al modello, essi devono essere correttamente allineati per ricreare la stessa situazione che si trova nello stampo (come mostrato in fig. 63).



*Figura 63 Modello tridimensionale utilizzato in Simufact.*

Dopo averli disposti correttamente, il passo successivo prevede l'attribuzione ad ogni elemento di tutte le sue caratteristiche indispensabili per l'analisi :

- materiale di composizione del componente (in generale se distinguono due macrocategorie: rigido e deformabile)
- temperatura e conducibilità termica del materiale (20°C per tutte le parti con conducibilità di 50 W/m<sup>2</sup>·K)
- coefficiente d'attrito
- costanti elastiche e precarico delle molle
- tipo di elemento finito utilizzato

- parametri per il remeshing
- cinematica dei componenti in movimento (nel nostro caso il punzone)

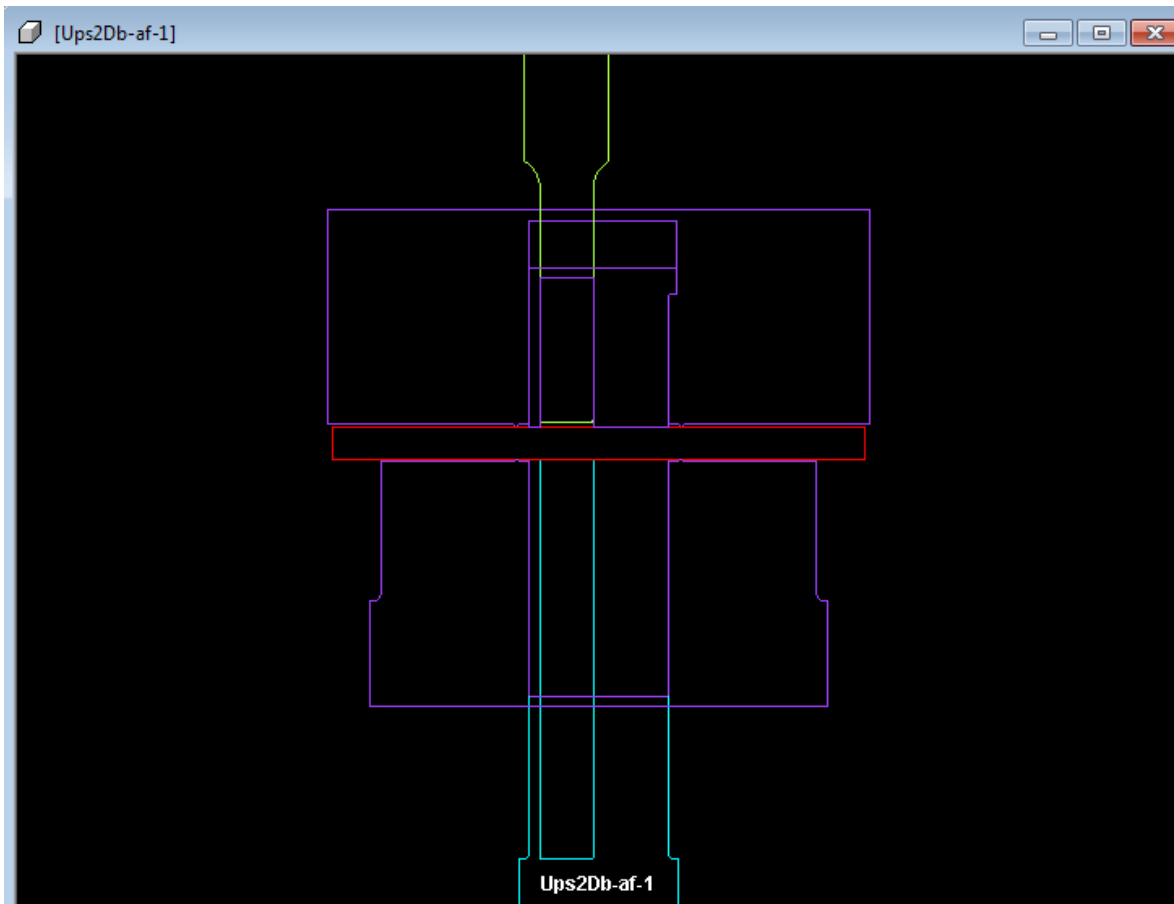
Una volta terminata l'attribuzione delle varie caratteristiche bisogna occuparsi dell'aspetto cinematico del modello, andando a caratterizzare i componenti che durante il processo si trovano in movimento.

Per questo motivo è stata implementata una pressa di tipo idraulico che imprimeva un movimento al punzone figura con velocità 50mm/s, una molla fittizia, posizionata sulla bussola guida-punzone che imprime la forza in modo da premere la lamiera, un'altra molla fittizia posizionata sull'estrattore figura in modo da garantire una forza di contropressione durante il processo di tranciatura.

## 4.2 Scelta del tipo di analisi

Una volta messa a punto la dinamica del modello bisogna stabilire se la modellazione FEM dovrà essere bidimensionale o tridimensionale. Per ragioni di tempo e di potenzialità del calcolatore a disposizione, si è scelto di eseguire un modello piano, in quanto un modello tridimensionale con meshatura opportuna avrebbe richiesto circa 60 ore per essere processato. Si è quindi imposto che il piano di analisi bidimensionale passasse per il centro del modello costruito in modo quindi che dividesse il pezzo in due parti uguali.

La sezione del modello così creata è visibile nella figura sottostante.



*Figura 64 Sezione creata dal piano scelto per la simulazione 2D.*

Il modello è costruito sotto l'ipotesi di stato di deformazione piana e gli elementi finiti utilizzati sono di tipo quadrangolare.

Il software richiede di stabilire la profondità del modello 2D perciò è stato deciso di impostare tale valore a 18mm (la parete sottile è lunga 16mm e sono presenti due raggi di raccordo di 2 mm l'uno, quindi si è scelta la media tra 16mm e 20 mm).

Questa scelta è nata dalla volontà di valutare la forza di taglio agente su tutta la lunghezza della parete sottile anche se questo risultato è semplicemente frutto di un'integrazione dei valori calcolati sul piano scelto per la simulazione (quello di simmetria del pezzo).

Un ulteriore problema nato dal passaggio della modellazione da tridimensionale a bidimensionale si è rivelato essere il riconoscimento, da parte del programma, dei componenti che fisicamente concorrono alla tranciatura.

Infatti quei componenti che hanno cavità in corrispondenza delle quali passa il piano scelto per la simulazione vengono interpretati correttamente (come “corpi rigidi”) in simulazioni tridimensionali, mentre in simulazioni piane vengono visti in sezione come due profili chiusi e separati generando così un errore di interpretazione da parte del software.

Per questo motivo i modelli 3D di partenza sono stati modificati chiudendo i vari fori passanti nella zona dove il componente non entra a contatto con il materiale da tranciare (fig. 64).

Come si può notare dalla figura 64 i componenti in viola (bussola guida in basso e matrice in alto) e il componente in azzurro (punzone figura) sono stati chiusi in modo da permettere al programma di considerarli un corpo unico.

## 4.3 Scelta dei parametri del modello

### 4.3.1 Caratterizzazione del materiale

Di seguito vengono riportate le analisi chimiche e le prove di trazione effettuate sui materiali destinati alla tranciatura dei pezzi.

C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Nb	Sn	Pb	B	Fe.
0,404	0,189	0,613	0,006	0,005	0,149	0,025	0,176	0,031	0,128	0,000	0,002	0,000	0,010	0,00	0,000	98,26

	Codice Provino	ord.laminaz.	Data della	Spessore (a)	Larghezza (b)	Sezione (S)	Rm	Rp xx	At	Ag	Rs/Rm
			Prova	(mm)	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	@0.20%	(%)	(%)	
								(N/mm <sup>2</sup> )			
1	BARCATTÀ	RP13695 4	20-11-2012	3.984	20.000	79.680	498.00	336.72	23.79	14.30	0.68

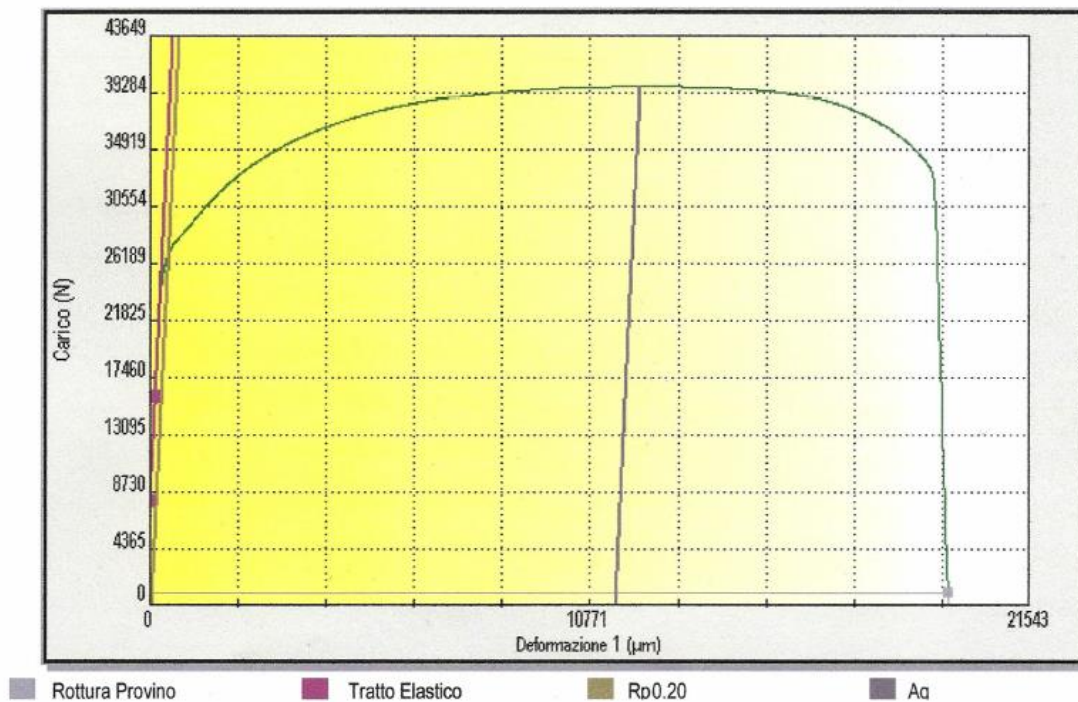


Figura 65 Caratterizzazione chimica del materiale di spessore 4 mm e relativa prova di trazione.



C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Nb	Sn	Pb	B	Fe.
0,403	0,222	0,673	0,008	0,006	0,147	0,029	0,185	0,026	0,080	0,000	0,004	0,000	0,009	0,00	0,000	98,20

	Codice Provino	ord.laminaz.	Data della	Spessore (a)	Larghezza (b)	Sezione (S)	Rm	Rp xx @0.20%	At	Ag	Rs/Rm
				(mm)	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)	(%)	
1	BARCATA	RP21295 6	20-11-2012	5.991	20.000	119.820	505.77	356.63	22.26	13.62	0.71

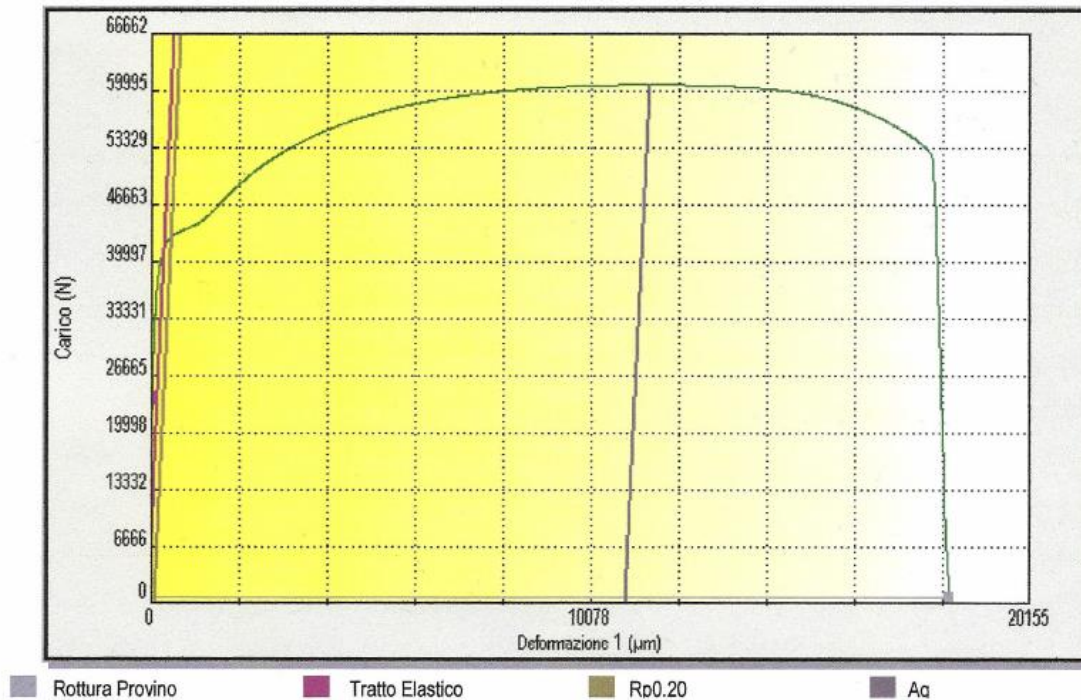


Figura 66 Caratterizzazione chimica del materiale di spessore 6 mm e relativa prova di trazione.

Il materiale di spessore 4mm era stato scartato dal controllo dei materiali in ingresso dell'azienda in quanto erano presenti rigature sulla superficie del rotolo, mentre il materiale di spessore 6mm era stato scartato in quanto era sciabolato, cioè vi erano tensioni residue che si scaricano piegando il nastro una volta che questo veniva raddrizzato.

Il materiale di spessore 5 mm, un C16B, non era stato scartato dal controllo delle materie prime in ingresso ma era destinato ad una produzione ormai terminata da anni. Questo materiale ha caratteristiche molto simili al C45 degli altri due spessori come si può notare dall'immagine sottostante (fig. 67).

L'ultimo materiale da caratterizzare è quello di spessore 7mm. Essendo un materiale molto vecchio non è stato possibile recuperare informazioni circa la sua classificazione: osservando l'analisi chimica e la prova di trazione si pensa possa essere un Fe510 (S35JR).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Nb	Sn	Pb	B	Fe	Ceq
0,167	0,248	0,754	0,010	0,008	0,123	0,036	0,108	0,036	0,072	0,000	0,031	0,001	0,010	0,00	0,004	98,39	0,33

	Codice Provino	ord.Laminaz.	Data della	Spessore (a)	Larghezza (b)	Sezione (S)	Rm	Rp xx @0.20%	At	Ag	Ra/Rm
				(mm)	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)	(%)	
1	BARCATT	RP21295 3	20-11-2012	5.005	20.000	100.100	446.84	340.07	25.84	13.63	0.76

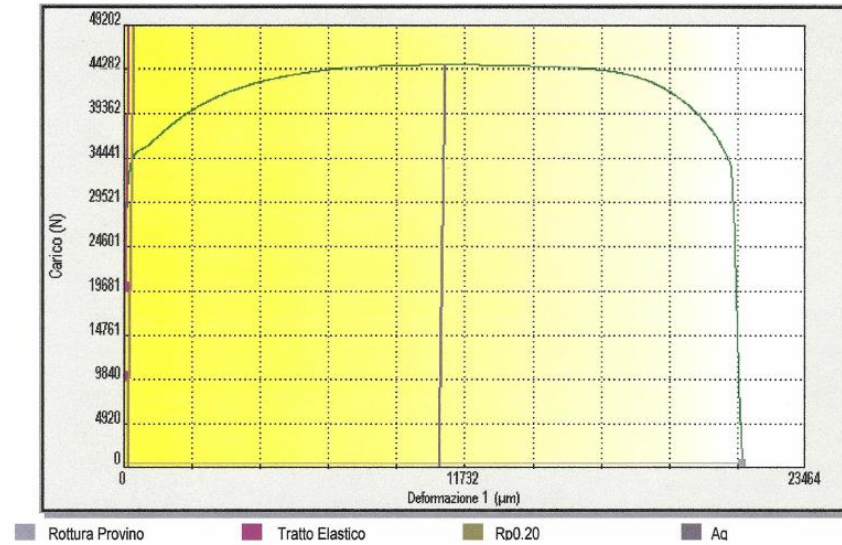


Figura 67 Caratterizzazione chimica del materiale di spessore 5 mm e relativa prova di trazione.

C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Nb	Sn	Pb	B	Fe	Ceq
0,038	0,331	0,867	0,006	0,006	0,216	0,033	0,043	0,044	0,132	0,000	0,002	0,031	0,009	0,01	0,000	98,24	0,22

	Codice Provino	ord.Laminaz.	Data della	Spessore (a)	Larghezza (b)	Sezione (S)	Rm	Rp xx @0.20%	At	Ag	Rs/Rm
				(mm)	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)	(%)	
1	BARCATT	BARCATT	20-11-2012	7.144	20.000	142.880	517.20	432.79	21.56	9.89	0.84

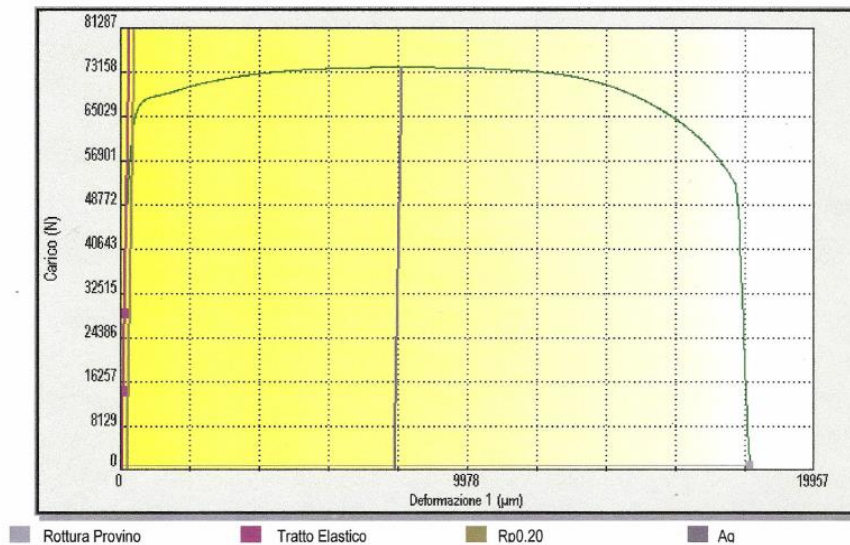


Figura 68 Caratterizzazione chimica del materiale di spessore 7 mm e relativa prova di trazione.

Una volta entrato in possesso delle informazioni riguardanti quali materiali erano effettivamente a disposizione per tranciare i pezzi è stato scelto di utilizzare il C45 per tutte le simulazioni, in quanto sarebbe stato il materiale utilizzato sia per lo spessore 4mm che per lo spessore 6mm .

La libreria dei materiali di Simufact è provvista di una caratterizzazione per il materiale C45 che però non corrisponde totalmente al materiale che andremo a tranciare.

Per questo motivo di è deciso di modificare tale caratterizzazione per renderla più simile a quella in nostro possesso. I parametri del materiale modificato sono visibili nelle figure sottostanti.

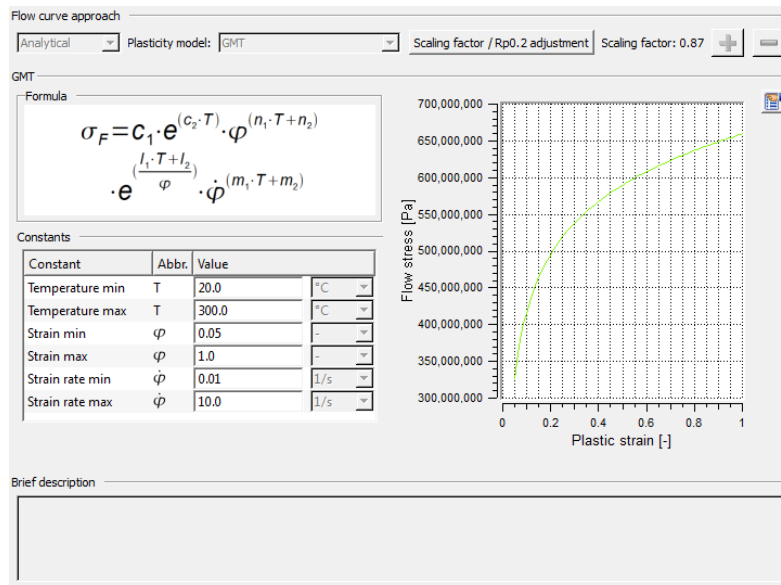


Figura 69 Valori rimasti invariati nella caratterizzazione del materiale.

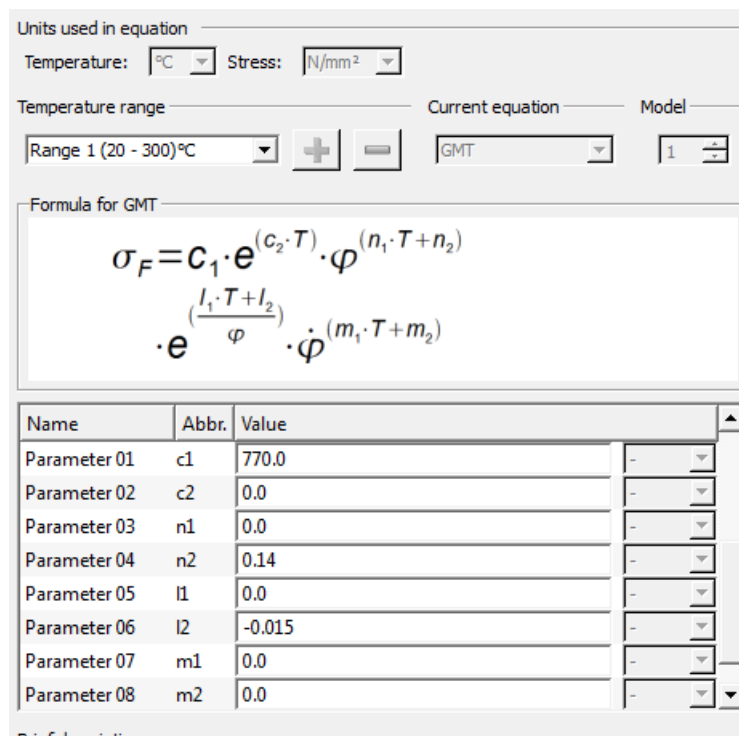


Figura 70 Valori modificati per la caratterizzazione del materiale. Con i nuovi valori delle costanti si è tolta la dipendenza del comportamento del materiale dalla temperatura a cui si trova.

### 4.3.2 Screening per la scelta del precarico e delle costanti elastiche delle molle, del valore del coefficiente di attrito e del tipo di elemento finito da utilizzare

Ciò che rimane da definire per rendere il modello funzionante sono una molteplicità di parametri quali :

- costanti elastiche delle molle
- precarico delle molle
- valore del coefficiente di attrito
- tipo dell'elemento finito di partenza
- parametri di meshing e remeshing

Per questa ragione è stato deciso di eseguire piano preliminare di simulazione facendo variare un parametro alla volta come mostrato nella tabella sottostante.

Strategia di Meshing	Attrito	Carico Bussola [KN]	Kel Bussola [N/mm]	Carico Estrattore [KN]	Kel Estrattore [N/mm]	Z Force Punzone [KN]
AdvFrontQuad	0,05	36	3600	18	1800	-160
Quadtree	0,05	36	3600	18	1800	-160
AdvFrontQuad	0,5	36	3600	18	1800	-180
Quadtree	0,5	36	3600	18	1800	-170
AdvFrontQuad	0,05	200	3600	18	1800	-180
Quadtree	0,05	200	3600	18	1800	-160
AdvFrontQuad	0,05	36	3,6E+06	18	1800	-160
Quadtree	0,05	36	3,6E+06	18	1800	-160
AdvFrontQuad	0,05	36	3600	100	1800	-250
Quadtree	0,05	36	3600	100	1800	-250
AdvFrontQuad	0,05	36	3600	18	1,80E+06	-450
Quadtree	0,05	36	3600	18	1,80E+06	-410

Tabella 10 simulazioni iniziali appartenenti al piano preliminare di simulazione atto a scoprire l'influenza di ogni fattore sulla forza in direzione z che agisce sul punzone figura. In giallo sono evidenziati i valori dei parametri modificati rispetto alla condizione di partenza. I due riquadri rossi indicano un errore nel calcolo della forza sul punzone.

I parametri di partenza sono stati assegnati al modello dal rappresentante del software, l'Ing. Viale, in base alla sua esperienza maturata negli anni.

Nel caso delle costanti elastiche della molla, risulta molto difficile calcolarne il valore reale, in quanto vi sono una molteplicità di fattori che concorrono a definirne il valore (ad esempio rigidità della struttura della pressa, coefficiente di comprimibilità dell'olio) rendendo di fatto impossibile la stima del suo valore.

Le prime due righe della tabella riguardano la prima prova, condotta sul modello di partenza, dove però sono stati impostati valori casuali per ogni parametro ad esclusione della costante elastica delle molle e del valore del coefficiente di attrito. Tutte le prove seguenti sono state condotte cambiando un parametro per

volta al fine di valutarne l'influenza sull'output finale. Tale output, visibile nell'ultima colonna della tabella, è la forza in direzione verticale agente sul punzone (chiamata Z Force), unico elemento che potrà essere confrontato con i valori misurati sulla pressa al momento della tranciatura del pezzo. La seconda prova è stata condotta cambiando coefficiente di attrito, mentre per la terza prova è stata impostato il vero valore di forza che la pressa applicherà alla lamiera, cioè 200 kN.

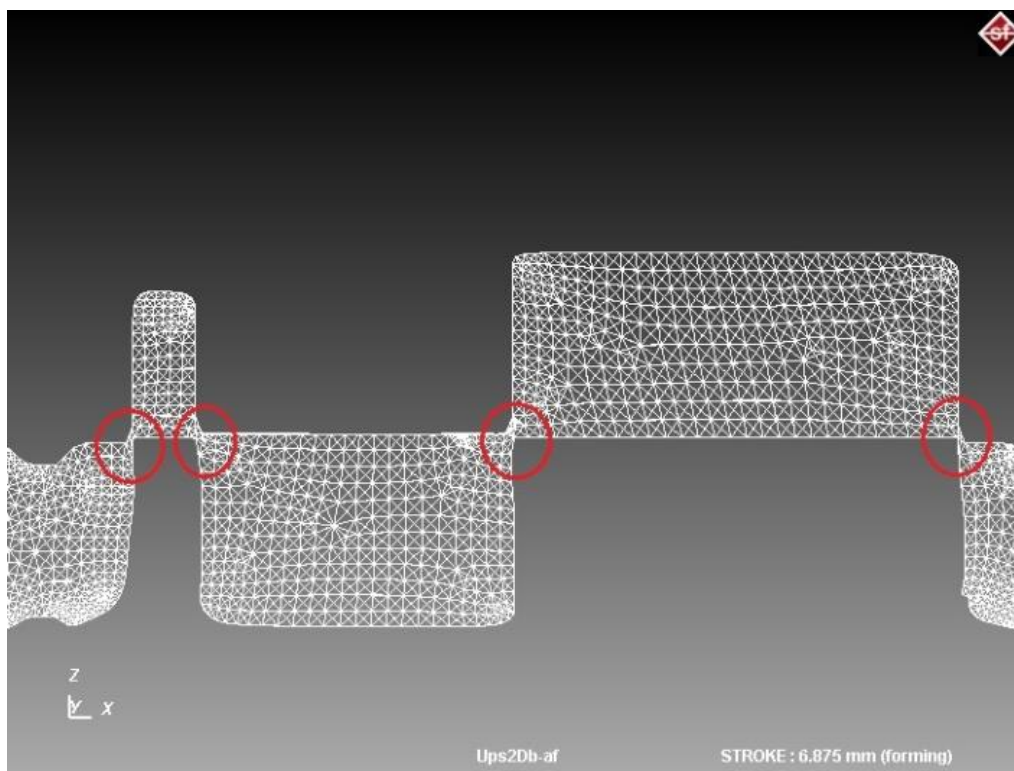
Mentre il cambio del coefficiente di attrito ha generato un piccolo cambiamento della forza sul punzone, la forza sul premilamiera, come ci si aspettava, non influisce in alcun modo sulla nostra variabile osservata.

Si è poi pensato di variare la costante elastica della molla che agisce sul premilamiera; infine si è applicata la forza di contropressione reale esercitata dalla pressa sul pezzo (100 KN). Come ultima prova invece, si è aumentata la costante elastica della molla riguardante l'estrattore figura ( quella cioè che garantisce la contropressione).

Analizzando la nostra variabile di risposta notiamo che, nel caso dell'aumento della costante elastica della bussola premilamiera non si hanno incrementi della Z Force sul punzone , mentre aumentando la contropressione tale valore si incrementa della stessa quantità di forza aggiunta alla contropressione.

Se invece viene aumentata di 1.000 volte la costante elastica dell'estrattore, esso non arretrerà più durante la tranciatura e il pezzo anziché penetrare in matrice si ricalcherà sul punzone figura e sull'estrattore stesso andando quindi ad incrementare a dismisura la forza di compressione agente sul punzone. Addirittura in questo caso il processo non giunge nemmeno a completamento e il software fornisce un avviso di errore, dopo aver processato circa il 20% del totale.

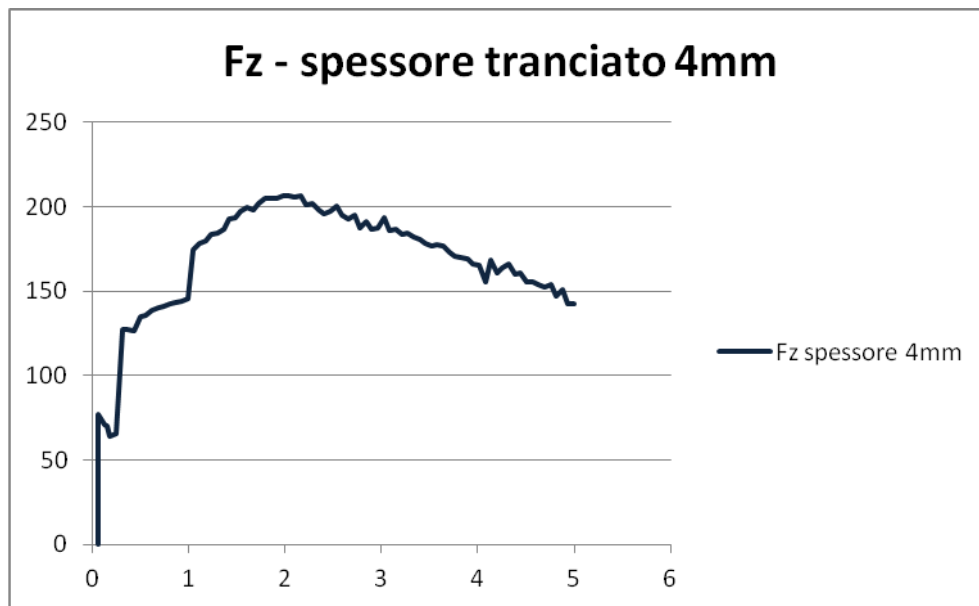
In alcune simulazioni proposte in questa tesi non si è giunti al totale completamento della corsa del punzone in quanto l'algorithmo interno di remeshing non consente alla lamiera di essere totalmente spezzata in due parti: infatti, al momento della separazione finale tra pezzo e sfrido (fig. 71), si creano delle deformazioni della mesh così elevate da generare un errore di remeshing (non è più possibile creare una mesh appropriata in quanto i nuovi elementi generati non rispettano i parametri di remeshing impostati).



*Figura 71 In rosso i punti in cui lo sfrido non si separa completamente dal pezzo.*

Questo problema tuttavia è di interesse secondario rispetto al nostro obiettivo principale, ovvero la stima della forza e dello stato di sforzo sul punzone, in quanto la forza massima si esercita ben prima dell'arrivo del punzone a fine corsa, come visibile dal grafico sottostante (fig. 72).





*Figura 72 Andamento della forza in direzione Z (Fz) agente sul punzone ( in kN ) in funzione della corsa del punzone stesso (in mm).*

Risulta pertanto inutile per gli scopi che ci siamo prefissati perfezionare il modello consentendo la separazione dello sfrido dal pezzo tranciato.

Qualora si volesse invece portare a separazione lo sfrido si sarebbe dovuto migliorare il meshing iniziale (probabilmente diminuendo la dimensione dell'elemento finito) e scegliere parametri più rigidi per il remeshing.

Dopo queste valutazioni iniziali si è scelto di proseguire con i valori di costanti delle molle inizialmente suggeriti mentre sono stati reimpostati i valori della forza premilamiera e di contropressione allineandoli ai valori reali.

### 4.3.3 Scelta parametri di meshing e remeshing

Una volta decisi tutti i parametri bisogna decidere la strategia di meshing e i parametri di remeshing più appropriati.

Di fondamentale importanza per la buona riuscita della simulazione è la scelta del tipo di meshing e della lunghezza dell'elemento finito di partenza. Tale lunghezza deve essere scelta in modo da garantire il giusto compromesso tra qualità della soluzione ottenuta (in termini di errore rispetto alla realtà) e tempi di esecuzione del modello da parte del calcolatore. Purtroppo un processo di indagine dell'errore commesso al variare della dimensione dell'elemento finito di partenza non è possibile in quanto i risultati sperimentali erano disponibili solo tre mesi dopo l'implementazione del modello.

Per la scelta della dimensione dell'elemento di partenza è stato quindi necessario avvalersi nuovamente della consulenza dell'ing. Viale il quale, occupandosi di analisi FEM da tempo, ha assicurato che una dimensione accettabile dell'elemento finito di partenza in una simulazione 2D sarebbe stata 0,5 mm.

Per questo motivo tutte le simulazioni eseguite sono state realizzate con dimensione dell'elemento finito di partenza pari a 0,5 mm.

Prima di procedere con ulteriori simulazioni è stato scelto di accantonare la modalità di meshing di tipo "quadtree" a favore della modalità "advancing front quads" in quanto quest'ultima forniva percentuali di

completamento del modello leggermente superiori a quelle fornite dal metodo "quadtree" durante la fase di screening iniziale.

Sono state quindi condotte altre tre prove chiamate "modif1", "modif2" e "modif3" dove si sono cambiati alcuni parametri relativi al remeshing (come visibile in tabella 11): la penetrazione ammessa dall'utensile nel pezzo, la deviazione angolare massima consentita dal software ad un elemento della mesh e lo "strain change", cioè il cambiamento della deformazione: se posto al 40% significa che il software è costretto a meshare nuovamente la lamiera se il lato dell'elemento finito aumenta o diminuisce la sua lunghezza si un valore superiore al 40%.

Strategia di Meshing	Remeshing	Attrito	Carico Bussola [kN]	Kel Bussola [N/mm]	Carico Estrattore [kN]	Kel Estrattore [N/mm]	Z Force Punzone [kN]
AdvFrontQuad	std	0,05	200	3600	100	3600	-232
AdvFrontQuad	modif1	0,05	200	3600	100	3600	errore
AdvFrontQuad	modif2	0,05	200	3600	100	3600	-235
AdvFrontQuad	modif3	0,05	200	3600	100	3600	-232

Tabella 11 Ulteriori prove con differenti strategie di remeshing.

Remeshing	Tool Penetration	Angle Deviation	Strain Change
modif1	attivo	40	disattivo
modif2	disattivo	40	0.4
modif3	disattivo	35	0.4

Tabella 12 Riassunto delle tre strategie di remeshing sperimentate.

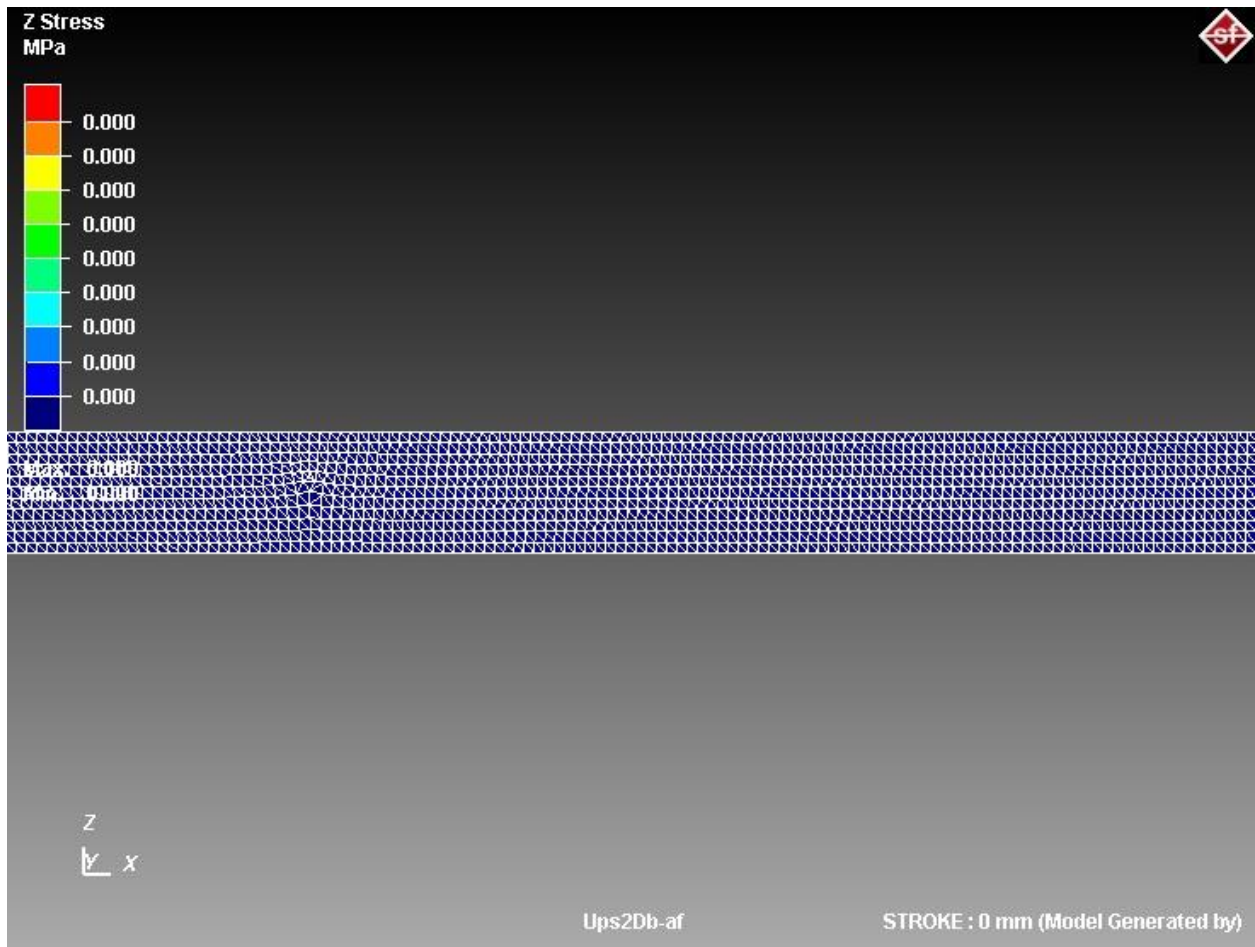
La prima simulazione ha generato errori in quanto il software con la meshatura e i parametri impostati non riusciva a garantire una "tool penetration" di 0 mm (questo significa che la mesh non può penetrare in alcun modo nel punzone e negli altri componenti a contatto con il pezzo).

Disattivata quindi la tool penetration è stato impostato, per cercare di non deformare eccessivamente gli elementi finiti, un valore di strain change di 0.4. Dato l'esito positivo della seconda simulazione si è voluto poi impostare un ulteriore vincolo di remeshing, consentendo una variazione angolare massima degli angoli dell'elemento finito di 35° anziché i 40° di default.

Come ulteriore perfezionamento è stata impostato lo spostamento massimo consentito alla bussola guidapunzone: dovendo il bordino a V penetrare nel materiale, sia dal lato matrice che dal lato del punzone, si è stabilito che al massimo tale spostamento fosse uguale alla somma dell'altezze dei due bordini, cioè 1,2 mm.

Anche in questo caso il modello è giunto al 100% della corsa impostata senza generare errori, quindi è stata scelta la versione "modif3" come modello da utilizzare per le simulazioni.





*Figura 73 Mesh nel caso di simulazione con spessore 6 mm.*

#### 4.4 Risultati della simulazione

Per provare a confermare quanto scritto nella normativa, si è deciso di eseguire non solo le simulazioni con spessore di materiale 4,5,6 e 7 mm con larghezza della parete sottile di 2 mm ma anche altre quattro simulazioni in cui è stata fatta variare sia la geometria del pezzo tranciato (cioè la larghezza della parete sottile del pezzo, indicata nella tabella con "a") sia l'altezza del materiale da tranciare in modo però da mantenere il rapporto R (a/S) uguale a ciascuna delle prime quattro simulazioni.

Ci si aspetterà quindi che a pari rapporto R le simulazioni diano i medesimi valori di pressione di contatto a prescindere dalla geometria del pezzo o dall'altezza del materiale tranciato.

I risultati delle simulazioni sono raccolti nella tabella 12.

S [mm]	a [mm]	R	Nodo SX CP [Mpa]	Nodo DX CP [Mpa]	Media CP [Mpa]	Corsa CP Max [mm]	L Elem [mm]	Delta H [mm]
4	2,00	0,50	2897	637	1767	2,65	0,29	0,25
5	2,00	0,40	2867	1237	2052	2,75	0,29	0,74
6	2,00	0,33	3600	1553	2577	3	0,29	1,19
7	2,00	0,29	3581	1304	2443	2,25	0,29	2,08
3	1,50	0,50	5133	0	2567	2,25	0,10	0,34
6	2,40	0,40	7037	0	3519	3,5	0,10	0,86
4	1,33	0,33	4008	1037	2523	2,91	0,32	1
8	2,29	0,29	5910	931	3421	4,29	0,11	2,32

*Tabella 13 Tabella risultati simulazioni.*

Le prime tre colonne riguardano lo spessore della lamiera da tranciare (S), la larghezza della parete del pezzo tranciato (a) e il loro rapporto R (a/S). Le colonne azzurre riguardano invece il valore massimo di pressione di contatto (CP) assunto da due nodi significativi posizionati sulla porzione di materiale interessata dalla parete sottile del punzone e il momento temporale (in termini di corsa) dove questo valore veniva a generarsi.

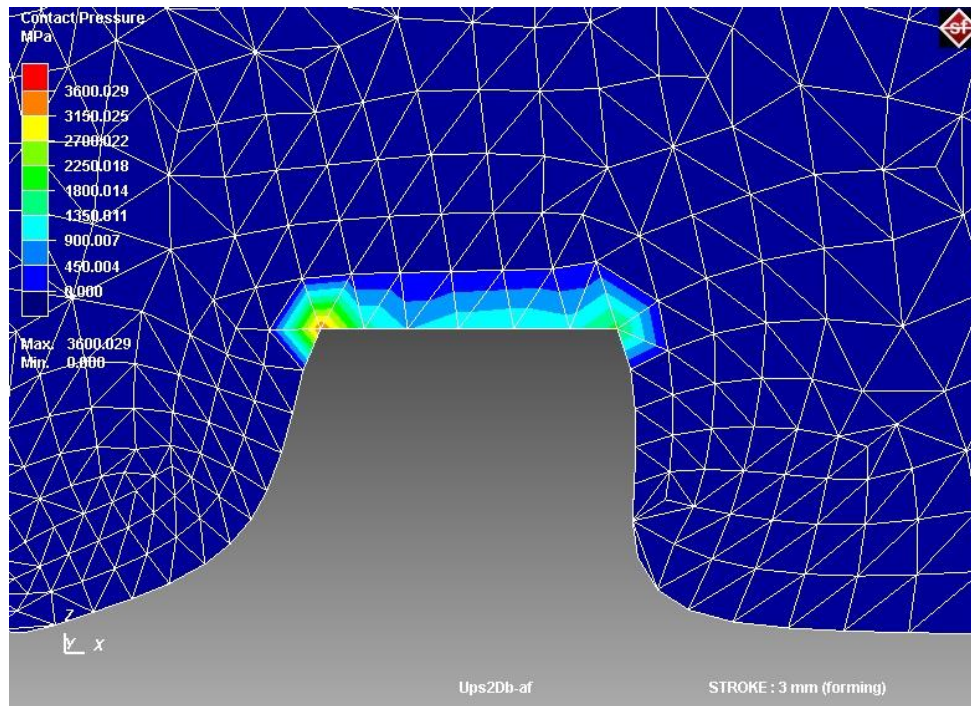


Figura 74 Pressione di contatto massima nella simulazione 6mm al momento in cui la corsa è di 3mm.

Le ultime due colonne riguardano invece due parametri di controllo: la prima indica la distanza tra i due nodi dove è stato misurato il valore di contact pressure, la seconda raccogli i valori di caduta del materiale sulla parete sottile tranciata (fig. 75), che potrà essere oggetto di confronto con la misura sperimentale sul pezzo una volta effettivamente tranciato (confronto effettuabile solo nei primi 4 casi).

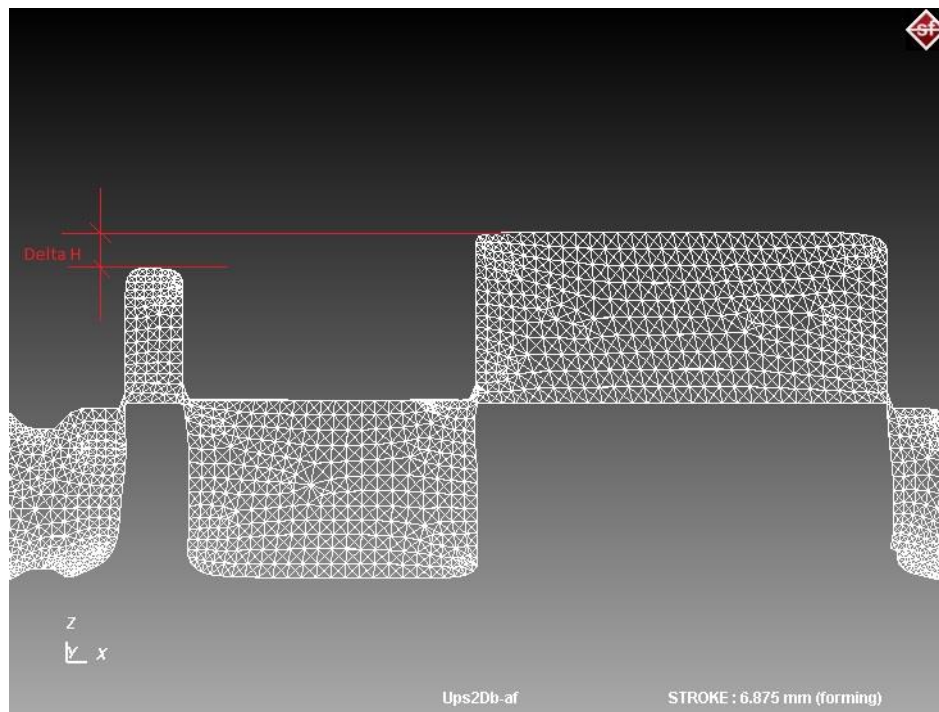


Figura 75 Misura della caduta del materiale sul pezzo tranciato (Delta H).

Analizzando i risultati delle simulazioni viene spontaneo chiedersi perché il software ha fornito un valore di contact pressure in un nodo pari a 0. Dati i parametri di remeshing impostati, la distanza tra due nodi può

variare anche sensibilmente; di conseguenza quando si va a mediare il valore di CP dei due nodi si rischia di mediarli su una distanza tra nodi differente. Mentre nelle prime quattro simulazioni e nella settima la distanza tra i nodi si è mantenuta circa costante, nelle rimanenti tre simulazioni il remeshing ha causato una forte distorsione del reticolo nella zona oggetto delle misure a tal punto che la distanza tra i due nodi adiacenti è diventata un quinto di quella originale . Questo ha comportato , come si può vedere dalla quarta e dalla quinta simulazione una forte diversità tra il valore della pressione di contatto tra i due nodi, tanto da portare questo valore a 0 sul nodo vicino.

Inoltre, come si può notare dalla tabella 12 , osservando i dati riguardanti la pressione di contatto, si potrebbe affermare che la fattibilità dell'operazione di tranciatura è garantita fino al valore di rapporto  $R = 0,4$ . Infatti per  $R=0,33$  troviamo una pressione di contatto di 2577 MPa, maggiore dell' $R_{C_{0,2}}$  del K890 temprato di cui è costituito il punzone figura. Seguendo rigorosamente questi dati dovremmo affermare che sperimentalmente il punzone si dovrebbe rompere al primo colpo di tranciatura dello spessore 6 mm . Va fatta inoltre una considerazione sul valore di CP nella simulazione con 7mm di spessore: esso infatti risulta più basso dei 2577 MPa trovati nella simulazione con 6 mm di spessore, nonostante la forza agente sul punzone sia maggiore del caso a spessore 6 mm , come facilmente osservabile nel grafico a pagina 101.

Bisogna quindi riflettere criticamente sui valori numerici trovati e provare ad estendere l'analisi considerando non più solo i valori di CP ma anche quelli di sforzo in direzione Z ovvero lo " Z Stress". Questo è reso ancor più evidente dalle successive quattro simulazioni dove il valore di CP fa pensare che mantenendo il rapporto R invariato ma cambiando spessore del materiale e/o spessore della parete (quota "a") si generi comunque una condizione di infattibilità (concetto che si scontra palesemente con l'esperienza aziendale a riguardo).

Inoltre per avere un valore ancor più stabile si è deciso di mediare i valori di Z stress appartenenti a quattro nodi consecutivi. I valori così ottenuti sono raccolti nelle tabelle seguenti.

S [mm]	a [mm]	R	Fila Nodi	Nodo 1 [Mpa]	Nodo 2 [Mpa]	Nodo 3 [Mpa]	Nodo 4 [Mpa]	Z Stress Medio [Mpa]	Corsa Z Stress Max [mm]
4	2,00	0,50	interna	1095	1290	1250	1355	1248	2,28
4	2,00	0,50	esterna	1270	1313	1278	1277	1285	2,28
5	2,00	0,40	interna	1499	1454	1500	1468	1480	2,25
5	2,00	0,40	esterna	1671	1483	1445	1492	1523	2,25
6	2,00	0,33	interna	1691	1650	1639	1550	1633	2,5
6	2,00	0,33	esterna	1703	1607	1554	1606	1618	2,5
7	2,00	0,29	interna	1541	1645	1783	1672	1660	3,25
7	2,00	0,29	esterna	1724	1692	1736	1746	1725	3,25
3	1,50	0,50	interna	1235	1503	1493	1138	1342	2
3	1,50	0,50	esterna	916	1527	1547	345	1084	2
6	2,40	0,40	interna	1726	1510	1514	1568	1580	3
6	2,40	0,40	esterna	1680	1524	1456	1456	1529	3
4	1,33	0,33	interna	1964	1476	2006	1329	1694	1,56
4	1,33	0,33	esterna	695	1788	1693	1317	1373	1,56
8	2,29	0,29	interna	1877	1583	1749	1784	1748	3,2
8	2,29	0,29	esterna	1709	1724	1694	1638	1691	3,2

*Tabella 14 Valori di Z stress nel punto in cui esso raggiunge il valore massimo.*

S [mm]	a [mm]	R	Fila Nodi	Nodo 1 [Mpa]	Nodo 2 [Mpa]	Nodo 3 [Mpa]	Nodo 4 [Mpa]	Z Stress Medio [Mpa]	Corsa CP Max [mm]
4	2,00	0,50	interna	659	762	995	975	848	2,65
4	2,00	0,50	esterna	803	757	924	773	814	2,65
5	2,00	0,40	interna	1234	1281	1391	1189	1274	2,75
5	2,00	0,40	esterna	1334	1366	1380	1126	1302	2,75
6	2,00	0,33	interna	2935	959	1257	1395	1637	3
6	2,00	0,33	esterna	2495	1166	1242	1328	1558	3
7	2,00	0,29	interna	1803	882	1236	1473	1349	2,25
7	2,00	0,29	esterna	2195	1156	1342	1325	1505	2,25
3	1,50	0,50	interna	264	625	1326	1370	896	2,25
3	1,50	0,50	esterna	137	328	1132	1391	747	2,25
6	2,40	0,40	interna	775	980	1299	1507	1140	3,5
6	2,40	0,40	esterna	285	1106	1248	1459	1025	3,5
4	1,33	0,33	interna	1092	1077	1272	1188	1157	2,91
4	1,33	0,33	esterna	1579	1233	1365	1348	1381	2,91
8	2,29	0,29	interna	400	1181	1388	1413	1096	4,29
8	2,29	0,29	esterna	1012	948	1296	1360	1154	4,29

*Tabella 15 Valori di Z stress nel momento in cui si registra la massima Contact Pressure.*

Come si può notare le due tabelle si riferiscono allo Z Stress misurato in due momenti differenti: la prima riguarda il momento in cui esso raggiunge il valore massimo, l'altra invece riguarda i valori di Z Stress nel momento in cui si era registrato il valore massimo di pressione di contatto ( Contact Pressure – CP ).

La dicitura interna/esterna riguarda invece la fila di nodi utilizzati nella lettura dei valori: esterna è la fila di nodi a contatto con il punzone, interna la fila adiacente.

Analizzando i valori di Z Stress ci accorgiamo subito che sono sensibilmente minori di quelli relativi alla pressione di contatto e non oltrepassano mai la soglia di resistenza a compressione del K890, sia per quanto riguarda i valori registrati a "contatto" del punzone (prima fila di nodi, chiamata in tabella "esterni") sia per quelli sottostanti (seconda fila di nodi, in tabella "interni").

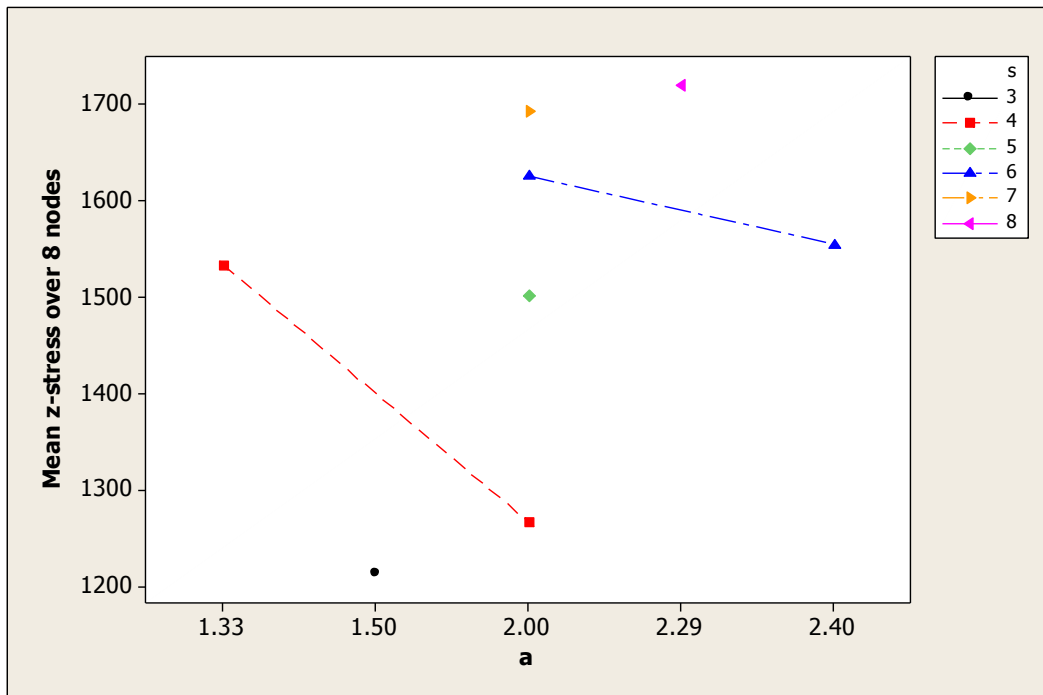


Figura 76 Grafico di analisi Z stress (MPa) al variare della larghezza della parete sottile (mm).

Inoltre, come visibile dal grafico in figura 76, si nota che i valori di Z stress (presi dalla prima tabella) indicano, come la logica fa pensare, una proporzionalità inversa rispetto alla larghezza della parete sottile del pezzo (linea rossa e linea blu).

Solo un confronto con i dati sperimentali potrà dare qualche informazione aggiuntiva utile a capire quale valore generato dall'analisi FEM sia più fedele alla realtà.

Da notare infine che, contrariamente a quanto suggerisce la logica, i valori massimi di pressione di contatto e di Z stress si hanno in momenti temporali differenti.

#### 4.4.1 Validazione modello aziendale

Possiamo ora confrontare a coppie le otto prove simulate, considerando i valori di Z stress riportati nella prima tabella e mediati tra loro (media eseguita sui quattro nodi "esterni" e in quattro nodi "interni") a pari rapporto R.

Secondo la regola aziendale a pari rapporto si ha la stessa problematica di fattibilità sul punzone, legata appunto allo sforzo che si esercita sulla parete. Come visibile dal grafico, tale regola può considerarsi validata dal simulatore in quanto i valori di sforzo a R fissato si mantengono pressoché costanti.

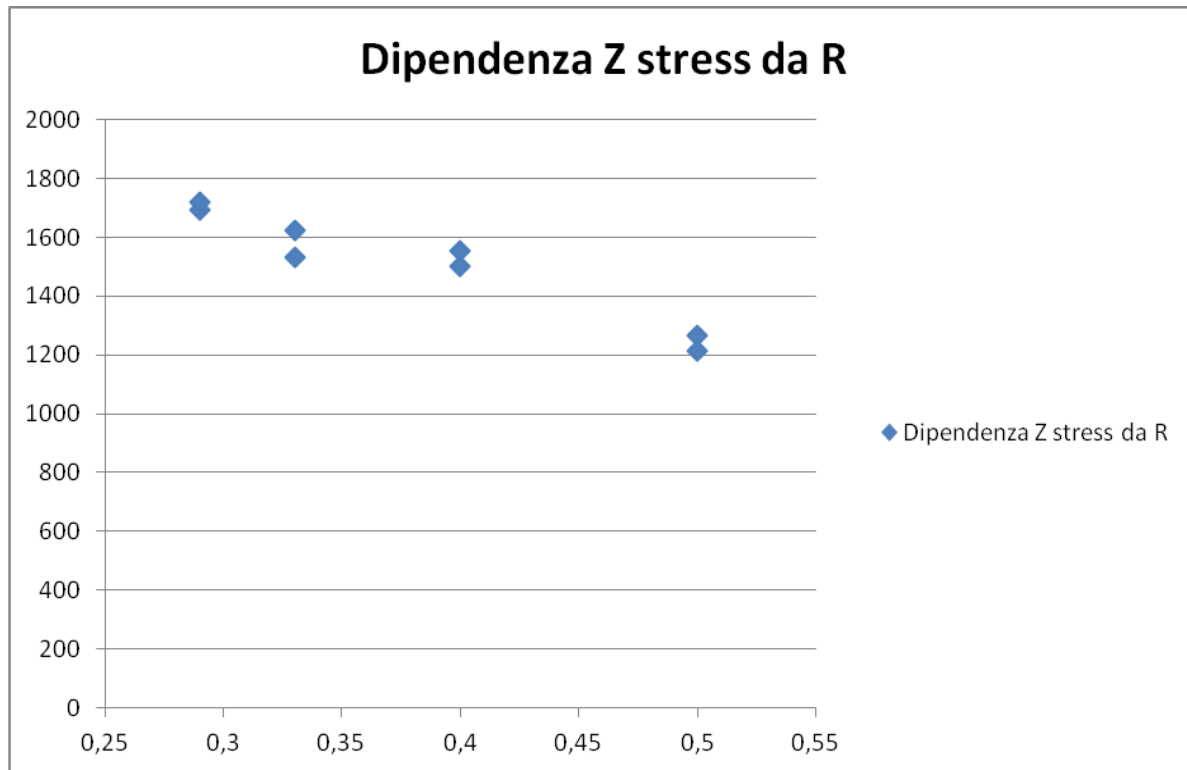
R	Z Stress 2 mm [Mpa]	Z Stress Geom Variata [Mpa]
0,5	1267	1213
0,4	1502	1555
0,33	1626	1534
0,29	1693	1720

Tabella 16 Confronto tra Z stress sulla parete di spessore 2 mm rispetto a quello sulle pareti di geometria variata a pari rapporto R.

Effettivamente i valori di Z stress sembrano essere sostanzialmente identici a pari rapporto R, confermando così la regola aziendale esposta nella normativa.

Possiamo visualizzare la dipendenza dei valori di Z stress da R tramite il grafico sottostante.

Si nota sia la sostanziale uguaglianza dei valori di sforzo calcolati a pari R sia la proporzionalità decrescente di tali valori all'aumentare di R.



*Figura 77 Dipendenza Z stress (MPa) da R (adimensionale).*



## 4.5 Analisi delle forze sul punzone

Al fine di poter effettuare un confronto tra la forza di compressione presente sul punzone secondo la simulazione FEM e la medesima forza misurata in fase di tranciatura è necessario raccogliere ed ordinare i dati raccolti nelle prime quattro simulazioni.

Di seguito viene quindi riportata una tabella riassuntiva riguardante la massima forza esercitata dal punzone e il punto (in termini di corsa del punzone) dove tale forza viene a realizzarsi.

S [mm]	a [mm]	R	Fz Max FEM [kN]	Corsa Fz Max FEM [mm]
4	2,00	0,50	207	2
5	2,00	0,40	223	2,5
6	2,00	0,33	236	3,1
7	2,00	0,29	251	3,4

Tabella 17 Forze sul punzone.

I dati riportati indicano chiaramente una dipendenza della forza massima di compressione sul punzone dallo spessore di materiale tranciato.

Esportando i valori di Z Force dalle simulazioni (consultabili nella tabella a pag. 111) è possibile realizzare un grafico per osservare l'andamento di tale valore nel tempo, convertito per semplificare l'analisi in corsa eseguita dal punzone (ricordiamo che la velocità di avanzamento è 50 mm/s).

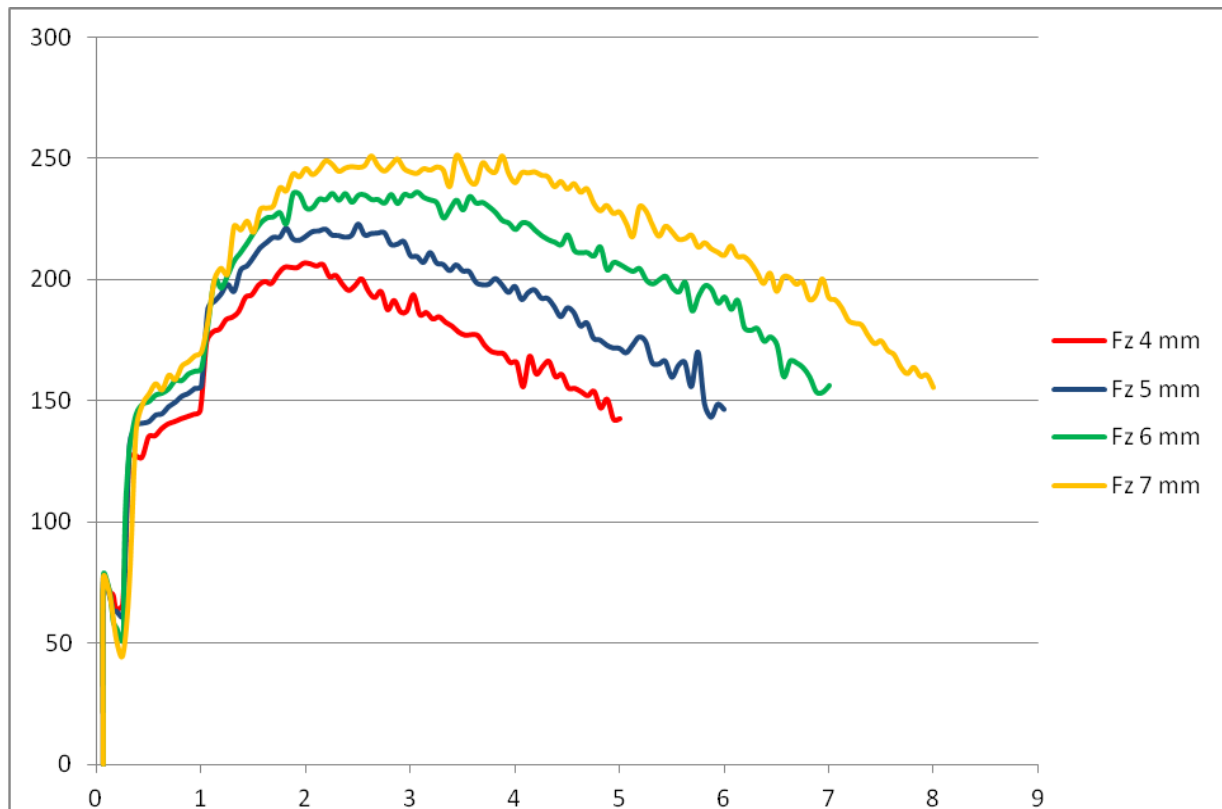


Figura 78 Il grafico riporta l'andamento del valore della forza (kN) in direzione Z (verticale) agente sul punzone durante la corsa di tranciatura (mm). Si nota come questa forza aumenti all'aumentare dello spessore del materiale tranciato.

# CAPITOLO 5

## Realizzazione sperimentale delle prove, comparazione con la simulazione FEM e conclusioni

### 5.1 Realizzazione prova sperimentale

#### 5.1.1 Caratterizzazione del materiale del punzone figura

Prima di procedere con la trattazione riguardante la campagna sperimentale è opportuno caratterizzare i vari componenti attivi del processo al fine di disporre di altre informazioni utili per individuare le possibili strategie di miglioramento.

I componenti che non contribuiscono al taglio del materiale sono realizzati in K340, acciaio di medie proprietà prodotto dalla Bohler.

I componenti attivi, invece, sono realizzati in K890, di cui riporto la composizione chimica nell'immagine sottostante.

Steel grade	C	Cr	Mo	V	W	Co	Mn	Si
BOHLER K890 MICROCLEAN	0,85	4,35	2,80	2,10	2,55	4,50	0,40	0,55

Figura 79 Composizione chimica K890.

La dicitura "microclean" indica il tipo di tecnologia con cui è stato prodotto il materiale: il K 890 è un materiale nato per sinterizzazione da polvere.

Esistono due tipologie di trattamento termico che si distinguono in base alla temperatura di rinvenimento dopo la tempra (a temperatura di 1100°C). Sostanzialmente si possono ottenere in base alla temperatura di rinvenimento scelte durezze comprese tra 59 e 61 HRC in un caso e tra 62 e 64 HRC nell'altro caso. In entrambi i casi il rinvenimento deve essere eseguito tre volte per una durata di 2 ore ciascuna.

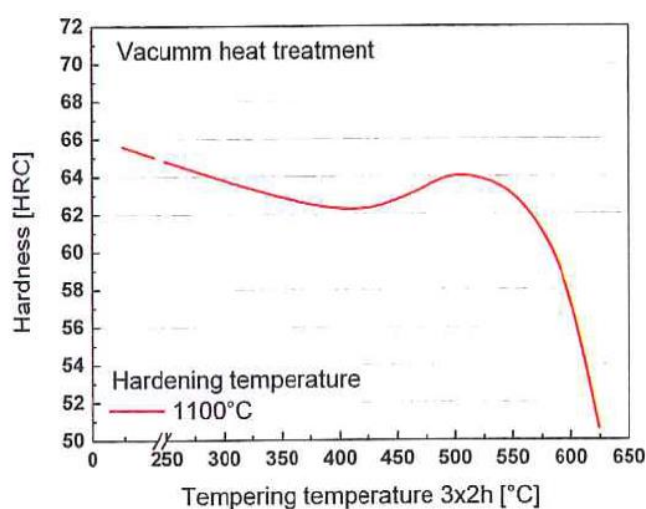
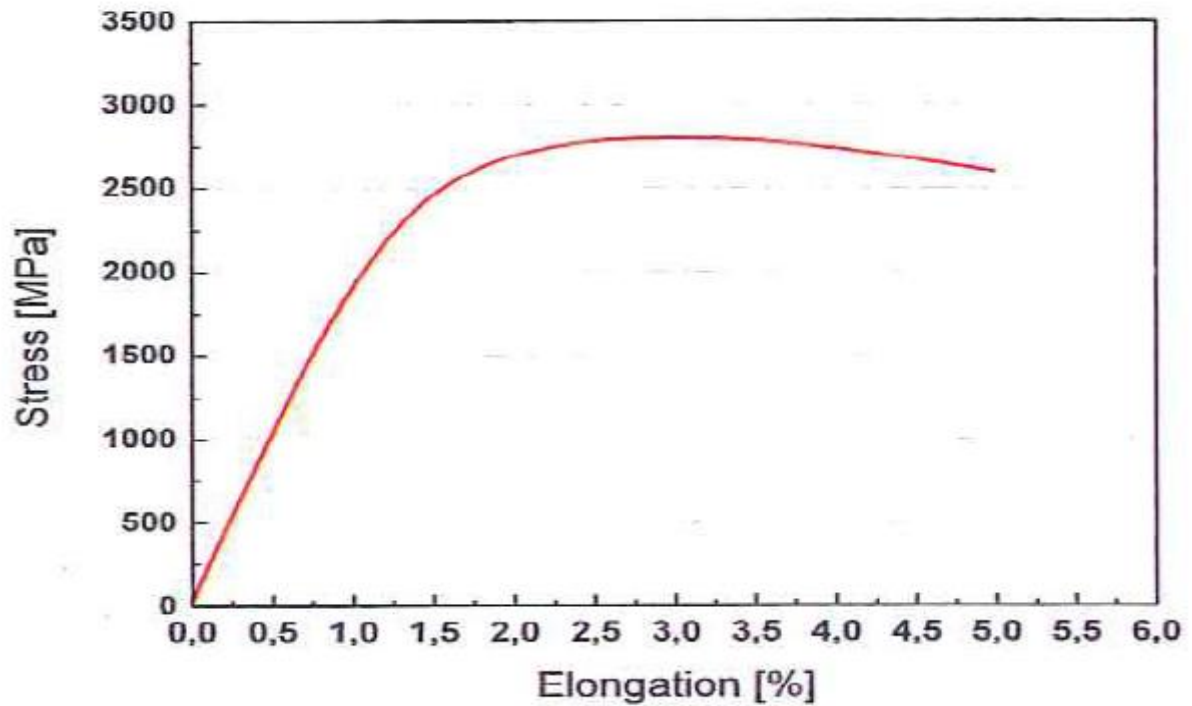


Figura 80 Curva della durezza in funzione della temperatura di rinvenimento del K890.

Il punzone figura è stato trattato termicamente in modo da ottenere una durezza pari a 62 HRC con  $K_{IC}$  di  $15,6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ . Di seguito vediamo una tabella riassuntiva riguardante le proprietà del K890 alle nostre condizioni operative con un grafico relativo alle sue proprietà meccaniche.

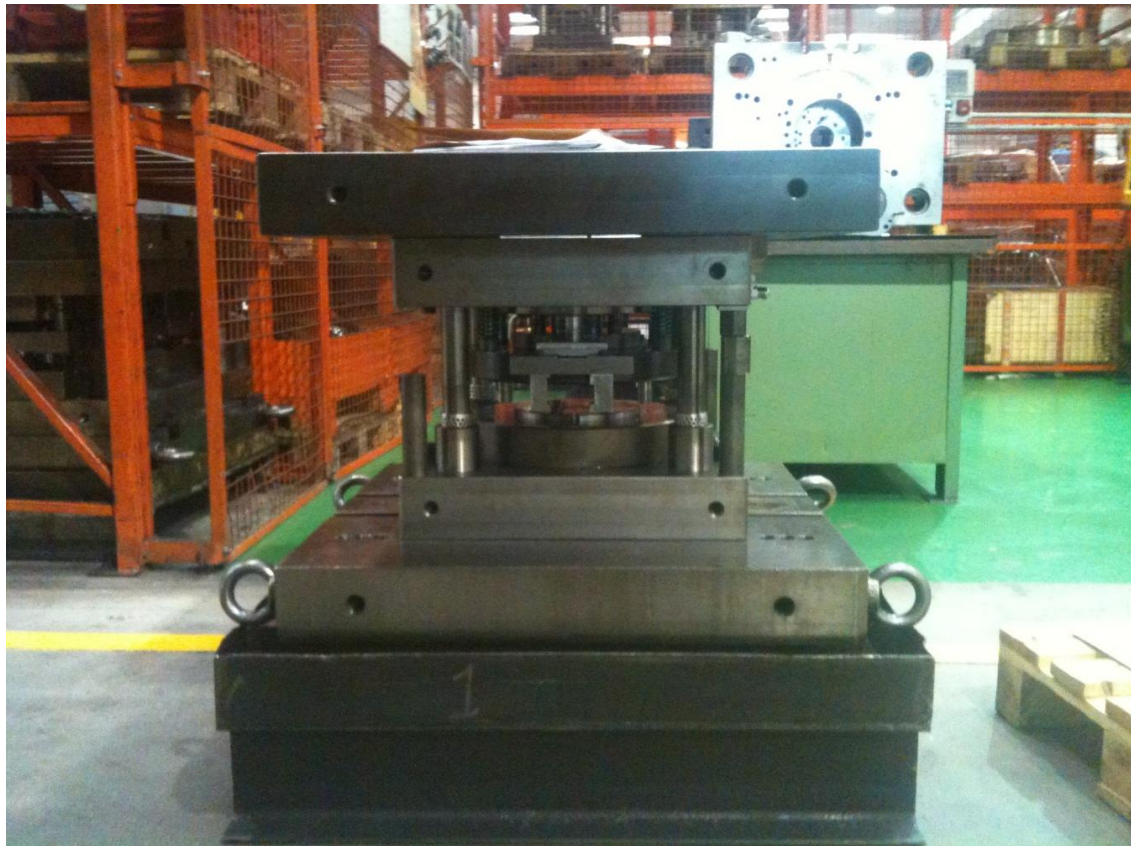
Yield strength $R_{p0,2}$ [MPa]	Tensile strength $R_m$ [MPa]	Elongation at fracture [%]
2435	2800	5,0



*Figura 81 Proprietà meccaniche K890.*

### 5.1.2 Campagna produttiva condotta e acquisizione dati sulla caduta di materiale

Una volta ultimate le simulazioni FEM si procede con la validazione sperimentale dei risultati trovati. Innanzitutto lo stampo deve essere montato sulle piastre standard con cui viene fissato sui dischi delle presse (come visibile in fig. 82).



*Figura 82 Stampo montato su piastre standard e pronto per essere posizionato sulla pressa.*

Sebbene le prove dovessero essere condotte utilizzando una velocità di avanzamento del punzone di 50 mm/s, come simulato dal FEM, si è deciso di utilizzare una velocità di 20 mm/s in quanto lo scopo primario non è un'elevata produttività ma una vita a fatica più longeva del punzone.

Questo cambiamento comunque non inficia i risultati della simulazione FEM in quanto gli sforzi sul punzone rimangono i medesimi, al più il cambiamento riguarderà il tipo di sollecitazione ciclica cui è sottoposto il punzone durante il processo. La prima prova è stata condotta utilizzando uno spessore del materiale di 4 mm . Ogni 500 colpi la macchina si fermava per consentire all'operatore di prelevare il pezzo da usare come campione per il " controllo qualità" .

Data la scarsa esperienza riguardante la tranciatura, si è deciso di rilevare le misure di spessore relative al pezzo nella sua parte centrale e sulla parete sottile tranciata al fine di verificare il valore della caduta di materiale sulla parete e l'andamento di tale valore nel tempo. Inoltre la misura di tale caduta nel primo pezzo tranciato (cioè a stampo freddo) può essere confrontata con i valori forniti dall'analisi FEM.

Il nastro di spessore 4 mm è terminato dopo aver tranciato 7500 colpi senza che il punzone si rompesse.

Non avendo più a disposizione uno il materiale di 4 mm si è deciso di passare allo spessore 5 mm mantenendo lo stesso punzone che aveva già tranciato il nastro di 4 mm.

Con questo nastro sono stati realizzati altri 5500 colpi senza che il punzone si danneggiasse.

Finito anche questo rotolo si è passati allo spessore 6 mm tranciando altri 4500 colpi circa (suddivisi su due nastri differenti ma di uguale materiale) prima di arrivare alla rottura del punzone.

Rotto il punzone si è provveduto alla sua sostituzione per poi procedere con una nuova campagna di pezzi tranciati di spessore 6 mm . La rottura del punzone è avvenuta a 5400 colpi circa.

I dati relativi alla sperimentazione sono raccolti nelle tabelle sottostanti.

4 mm			
n° pezzo	H materiale	H parete	Delta H
1	4,09	3,81	0,28
500	4,11	3,94	0,17
1000	4,01	3,84	0,17
1500	3,98	3,79	0,19
2000	4,01	3,85	0,16
2500	4	3,82	0,18
3000	3,99	3,79	0,2
3500	4	3,8	0,2
4000	3,96	3,75	0,21
4500	3,97	3,77	0,2
5000	3,97	3,77	0,2
5500	3,99	3,81	0,18
6000	3,97	3,8	0,17
6500	4,01	3,84	0,17
7000	4,05	3,91	0,14
7500	4	3,82	0,18
fine campagna a 7800			

5 mm			
n° pezzo	H materiale	H parete	Delta H
1	5,04	4,26	0,78
500	5,01	4,33	0,68
1000	5,01	4,31	0,7
1500	5,01	4,31	0,7
2000	5	4,31	0,69
2500	5,02	4,31	0,71
3000	5,01	4,32	0,69
3500	5,01	4,3	0,71
4000	5	4,3	0,7
4500	5,01	4,31	0,7
5000	5,01	4,3	0,71
5500	5	4,29	0,71
fine campagna a 5700 --> totale: 13500			

6 mm - 1			
n° pezzo	H materiale	H parete	Delta H
1	6,1	5,02	1,08
500	6,01	5,03	0,98
1000	5,99	5,01	0,98
1500	6	5,02	0,98
2000	6,02	5,03	0,99
2500	6,01	5,03	0,98
fine campagna a 2700 -->16200			
1	5,95	5,05	0,9
500	5,97	5,01	0,96
1000	5,96	4,96	1
1500	5,97	4,97	1
2000	rottura a 1900 circa		
fine campagna a 1800 --> totale: 18000			

6 mm - 2			
n° pezzo	H materiale	H parete	Delta H
1	5,97	5,05	0,92
500	5,97	4,95	1,02
1000	5,95	4,95	1
1500	5,97	4,94	1,03
2000	5,95	4,93	1,02
2500	5,96	4,94	1,02
3000	5,99	4,95	1,04
3500	5,95	4,95	1
4000	5,95	4,96	0,99
4500	5,96	4,95	1,01
5000	5,96	4,96	1
5500	rottura a 5400 circa		
fine campagna a 5400			

Tabella 18 Tabelle riassuntive delle due campagne sperimentali di tranciatura.

Possiamo schematizzare la campagna produttiva con il grafico seguente.

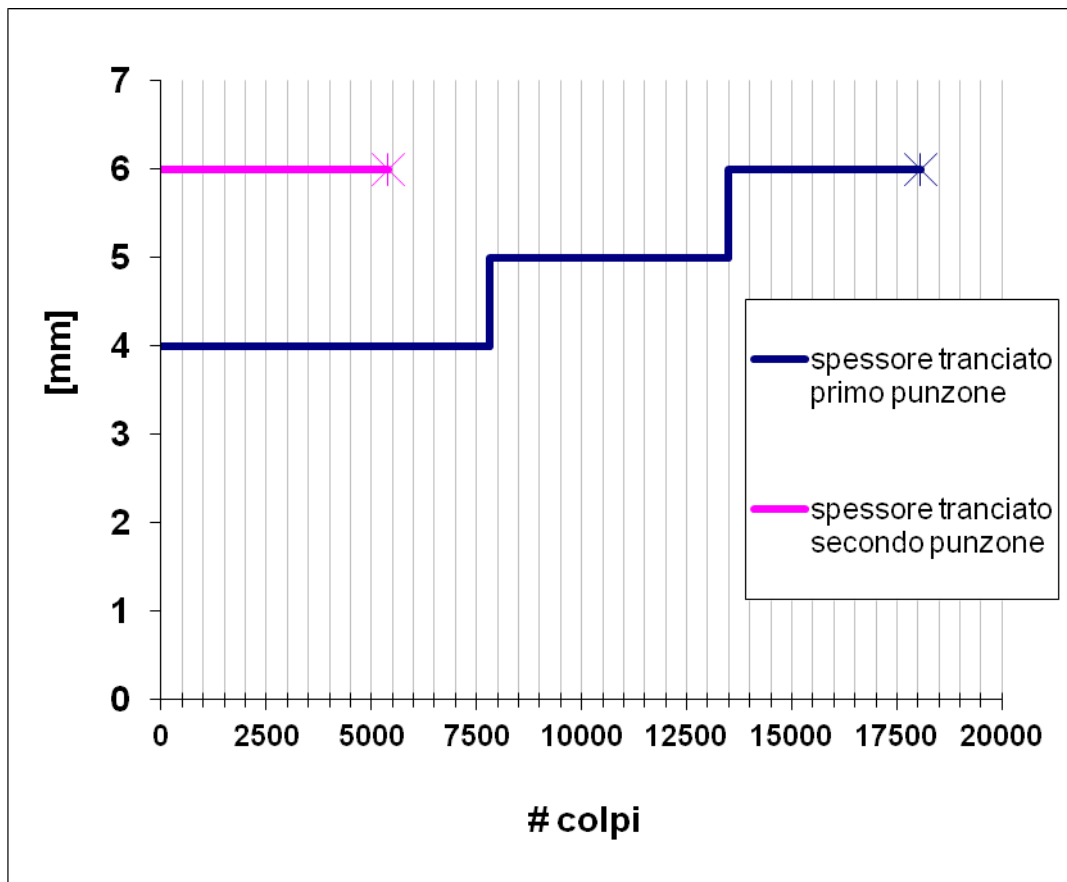


Figura 83 Grafico riassuntivo della campagna sperimentale di tranciatura.

### 5.1.3 Misura delle forze di tranciatura sulla pressa

Di fondamentale importanza per il confronto tra simulazione FEM e realtà è l'acquisizione delle forze esercitate dalla pressa durante il processo di tranciatura.

Prima di procedere analizzando i dati numerici raccolti è utile approfondire il funzionamento della pressa per comprendere appieno come verranno poi ottenuti i valori numerici relativi alle varie forze.

In generale possiamo affermare che per tutte le presse idrauliche destinate alla tranciatura fine vale il principio del triplice effetto (vedi capitolo 2). Di conseguenza sulla pressa dovranno essere presenti componenti idraulici al fine di garantire la presenza di tutte le forze richieste dal processo; le più importanti sono la forza di tranciatura, la forza del premilamiera e quella di contropressione.

Ognuna di queste tre forze viene trasmessa allo stampo grazie a tre differenti impianti: la forza di tranciatura viene generata dal cilindro principale mentre le altre due forze sono generate dai rispettivi cilindri dedicati.

Esiste però un'altra forza, nata per rendere più veloce l'operazione di tranciatura fine (e quindi per aumentare la produttività del processo) e per ridurre il dispendio energetico della pressa.

Tale forza è generata dai cilindri di corsa rapida, che lavorando a bassa pressione (convenzionalmente minore di 110bar) in fase di palpazione e di movimentazione della slitta su cui è posizionato lo stampo, della coniazione del bordino a V e del ritorno della slitta nella posizione iniziale.

I cilindri di corsa rapida di cui è dotata una pressa possono essere due o quattro a seconda del tonnellaggio per cui la pressa è stata progettata. Maggiore è il tonnellaggio tranciabile (e quindi



verosimilmente anche la dimensione e il peso degli stampi) maggiori sarà il numero di cilindri di corsa rapida da impiegare per la movimentazione.

Nella figura sottostante si può notare la posizione dell'idraulica rispetto alla slitta e nell'ingrandimento seguente le posizioni del cilindro di corsa principale (in rosso) e di uno dei due cilindri di corsa rapida (in verde) di cui è dotata la pressa utilizzata per la nostra sperimentazione.



*Figura 84 Ubicazione del cilindro principale e di uno dei cilindri di corsa rapida.*





Figura 85 Dettaglio dell'immagine soprastante. Cerchiato in rosso il cilindro principale e in verde il cilindro di corsa rapida.

La pressa utilizzata per la campagna di trancitura è dotata del programma "Scope", in grado di rilevare i valori di pressione e quindi di forza di ogni componente attivo del processo di trancitura.

Vediamo ora come interpretare ed analizzare i dati provenienti dal programma.

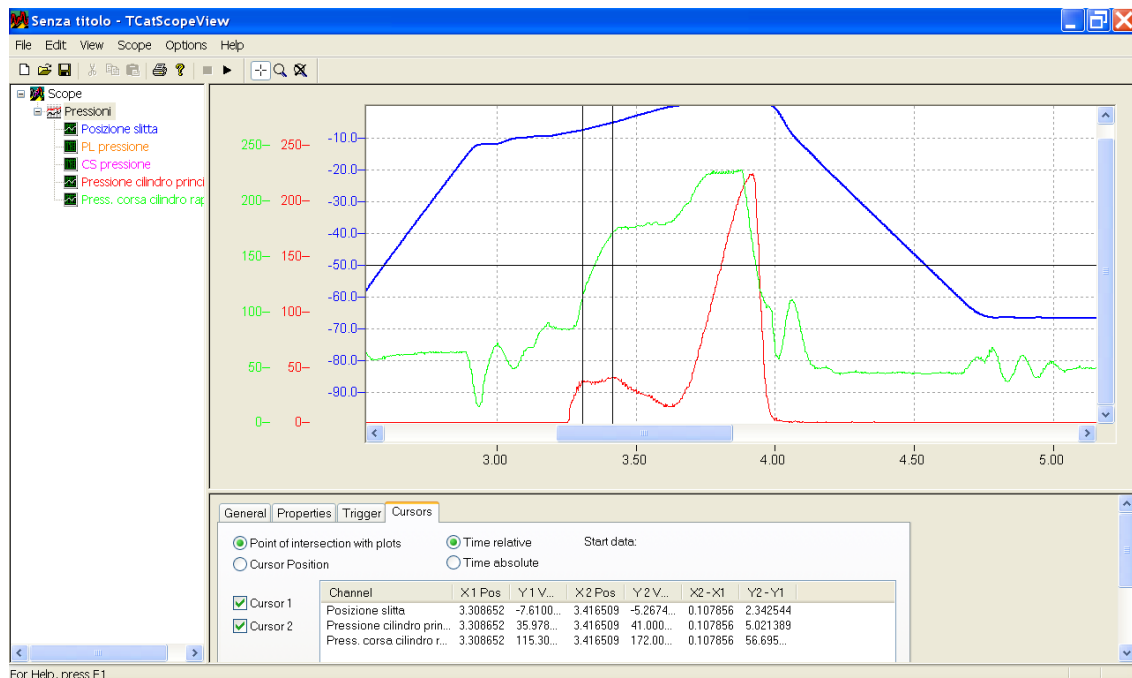


Figura 86 Schermata principale del programma Scope usato per la lettura delle forze in gioco durante il processo.

Come si può notare dall'immagine della fig. 86 il software fornisce informazioni riguardanti cinque componenti del processo:

- posizione della slitta (in blu)

- pressione nel premilamiera (in arancione)
- pressione relativa alla contropressione (in fucsia)
- pressione nel cilindro principale (in rosso)
- pressione nei cilindri di corsa rapida (in verde)
- Nell'immagine utilizzata per illustrare il funzionamento del programma non sono visualizzate la traccia arancione e quella fucsia in quanto costanti per tutto l'intervallo di tranciatura.

Il programma della pressa trasforma poi i valori di pressione in forza automaticamente, ma se si volesse procedere analiticamente nel calcolo della forza basterebbe conoscere i diametri dei vari cilindri per effettuare la conversione. Per quanto ci riguarda i diametri di nostro interesse sono quello del cilindro principale, pari a 470 mm e quello dei due cilindri di corsa rapida, pari a 63 mm.

Riporto di seguito la sequenza logica che porta alla determinazione della forza in tranciatura, contestualizzata con i valori relativi allo spessore tranciato di 6 mm:

- misurare i valori utilizzati per far penetrare il bordino a V nella lamiera. Se i cilindri di corsa rapida saranno sufficienti il cilindro principale rimarrà a pressione 0 bar, altrimenti la coniazione del bordino verrà eseguita sia dal cilindro principale sia da quelli di corsa rapida. Si misura una pressione dei cilindri di corsa rapida di 92 bar, di cui 57 impiegati per la sola movimentazione della slitta dello stampo. Conseguentemente la differenza risulta 35 bar che corrispondono a 22 kN. Il cilindro principale non è entrato in pressione.
- misurare la pressione relativa a cilindri di corsa rapida e cilindro principale nel momento in cui il punzone giunge a contatto con il pezzo (primo picco della fig. 85). Nel nostro caso il cilindro principale si trovava a 38 bar mentre i cilindri di corsa rapida a 111 bar. Trasformando le pressioni in forze si ottiene una forza iniziale di tranciatura pari a 753 kN.
- misurare la pressione relativa a cilindri di corsa rapida e cilindro principale nel momento in cui si registra un secondo picco di pressione del cilindro principale (secondo picco della fig. 85): questo è il momento in cui si ha la massima forza di tranciatura esercitata dalla pressa sulla lamiera. Nel nostro caso il cilindro principale si trovava a 41 bar mentre quelli di corsa rapida a 172 bar.
- La massima forza di tranciatura risulta essere di 845 kN.
- Dall'equazione delle forze in gioco ricavare la sola forza sul punzone.

$$F_{\text{PUNZONE}} = F_{\text{TRANCIATURA}} - F_{\text{PREMILAMIERA}} - F_{\text{MOVIMENTAZIONE}}$$

$F_{\text{PUNZONE}}$  è la forza esercitata sul punzone

$F_{\text{TRANCIATURA}}$  è la forza di tranciatura proveniente dal cilindro principale e da quelli di corsa rapida

$F_{\text{PREMILAMIERA}}$  è la forza esercitata dal premilamiera

$F_{\text{MOVIMENTAZIONE}}$  è la parte della forza esercitata dai cilindri di bassa pressione destinata alla sola movimentazione della slitta della pressa.

Diamo ora un'interpretazione fisica alla formula: quando i cilindri di corsa rapida non riescono ad esercitare sufficiente forza sulla lamiera, subentra il contributo del cilindro principale per proseguire nella tranciatura e terminare così la corsa di tranciatura impostata sulla pressa.

Soffermiamoci sulla forza necessaria per eseguire la tranciatura: la forza esercitata dal cilindro principale e da quelli di corsa rapida viene utilizzata per :

- permettere alla parte inferiore dello stampo di far indietreggiare la bussola guida punzoni (vincendo così la forza premilamiera)
- permettere al punzone di penetrare nel nastro per tranciare il pezzo
- permettere al punzone di vincere la resistenza all'avanzamento nel materiale dovuta alla contropressione

- permettere alla slitta e allo stampo di muoversi (questa parte di forza + nota e pari, come detto sopra a 57 bar, cioè 36kN)

Appare evidente che  $F_{PUNZONE}$  è quindi la forza di compressione agente sul punzone data dalla forza necessaria alla penetrazione nel materiale e dalla forza utilizzata per vincere la resistenza della contropressione esercitata dall'estrattore figura sul pezzo.

Nel nostro esempio  $F_{PUNZONE} = 845 - 200 - 36 = 609$  kN.

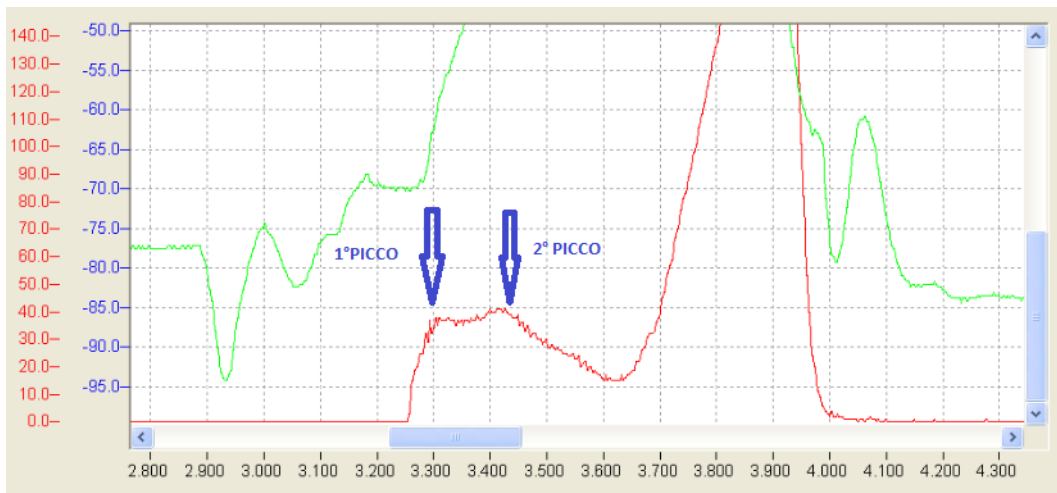


Figura 87 In evidenza i picchi di pressione del cilindro principale. In ordinata troviamo la pressione (in bar), mentre l'ascissa è il tempo (in secondi).

I dati relativi ai vari spessori tranciati sono riportati nella tabella seguente.

S [mm]	Pressione 1° Picco Cil. Prin. [Mpa]	Pressione 1° Picco Cil.Cor. Rap. [Mpa]	Pressione 2° Picco Cil. Prin. [Mpa]	Pressione 2° Picco Cil.Cor. Rap. [Mpa]
4	33,5	146	32	198
5	35	118	35,5	173
6	38	111	41	172

Tabella 19 valori di pressione nel cilindro principale e in quelli a corsa rapida.

S [mm]	Forza 1° Picco Cil. Prin. [kN]	Forza 1° Picco Cil.Cor. Rap. [kN]	Forza 2° Picco Cil. Prin. [kN]	Forza 2° Picco Cil.Cor. Rap. [kN]	Forza Totale 1° Picco [kN]	Forza Totale 2° Picco [kN]	Forza Punzone [kN]
4	602	92	575	124	694	700	464
5	629	74	638	109	703	747	511
6	683	70	737	108	753	845	609

Tabella 20 Valori di forza (in kN) nati dalla conversione dei dati relativi alla pressione. Nell'ultima colonna troviamo la forza di compressione agente sul punzone.

Va sottolineato che per la conversione da bar a kN si è scelto di utilizzare la proporzione desunta dalla pressa, e non l'area calcolata utilizzando i valori di diametro dei cilindri.

## 5.2 Confronti tra simulazione e prova sperimentale

### 5.2.1 Confronto riguardante la caduta di materiale sulla parete del pezzo

Un primo elemento di confronto tra risultati della simulazione FEM e quelli raccolti sperimentalmente è la caduta di parete sul materiale. Confrontando questi dati ci è possibile avere un primo riscontro per stabilire l'affidabilità delle simulazioni in termini di deformazione del materiale.

Prima di procedere nell'analisi è necessario puntualizzare un aspetto di rilevanza fondamentale: essendo la simulazione eseguita con temperatura iniziale degli utensili pari a 20°C, gli unici dati confrontabili con quelli provenienti dal software sono quelli relativi alla caduta di materiale misurata nei primi pezzi della serie, cioè quando lo stampo era freddo. Tutti gli altri valori, sebbene attestino che tale caduta è da ritenersi costante per tutta la durata della produzione, non sono di alcuna utilità per il nostro confronto.

I valori numerici oggetto del confronto sono raccolti nella tabella sottostante.

S [mm]	a [mm]	Delta H FEM [mm]	Delta H Prova [mm]	Differenza %
4	2,00	0,25	0,28	12
5	2,00	0,74	0,78	5,4
6	2,00	1,19	0,97	-18,5

*Tabella 21 Tabella riassuntiva riguardante la caduta di materiale sulla parete.*

Il valore 0,97 mm relativo allo spessore 6mm è stato ottenuto mediando i tre valori relativi al primo pezzo tranciato a stampo freddo, al primo pezzo dopo aver posizionato il nuovo nastro di materiale e al primo pezzo della seconda campagna con spessore 6 mm (quindi dopo che era stato montato un nuovo punzone figura e affilato il punzone tasca).

Come si può notare dalla colonna relativa alla differenza percentuale, esistono sensibili differenze tra la stima della caduta secondo la simulazione FEM e quella realmente presente sul pezzo. Nei primi due casi la caduta di materiale viene sottostimata dal software, mentre per lo spessore di 6 mm viene supposta maggiore. In conclusione mentre le prime due prove sono stimate abbastanza correttamente, la simulazione con spessore tranciato di 6 mm non ha dato una stima corretta della caduta di materiale, con un errore abbastanza importante.

Se si considera inoltre che il remeshing utilizzato nel modello utilizzava una configurazione standard e che la mesh non era stata infittita localmente in alcun punto ci si può ritenere abbastanza soddisfatti.

### 5.2.2 Confronto della forza esercitata sul punzone

Un confronto molto più significativo del precedente consiste nel verificare che la forza di tranciatura rilevata dalla pressa corrisponda a quella calcolata dalla simulazione.

Per fare questo tipo di confronto è utile ricordare come è stato costruito il modello 2D della simulazione.

Tale modello aveva come principale obiettivo quello di trovare lo stato di sforzo agente sulla parete sottile del punzone, cioè nel punto dove si ha la massima criticità nel processo di tranciatura. Per avere un modello il più somigliante alla realtà si era scelto, una volta selezionato il piano di simmetria del pezzo, di estendere l'analisi per una lunghezza di 18 mm, corrispondente alla lunghezza della parete sottile a cui viene aggiunta la metà del valore dei due raggi di raccordo (16mm + 2mm).

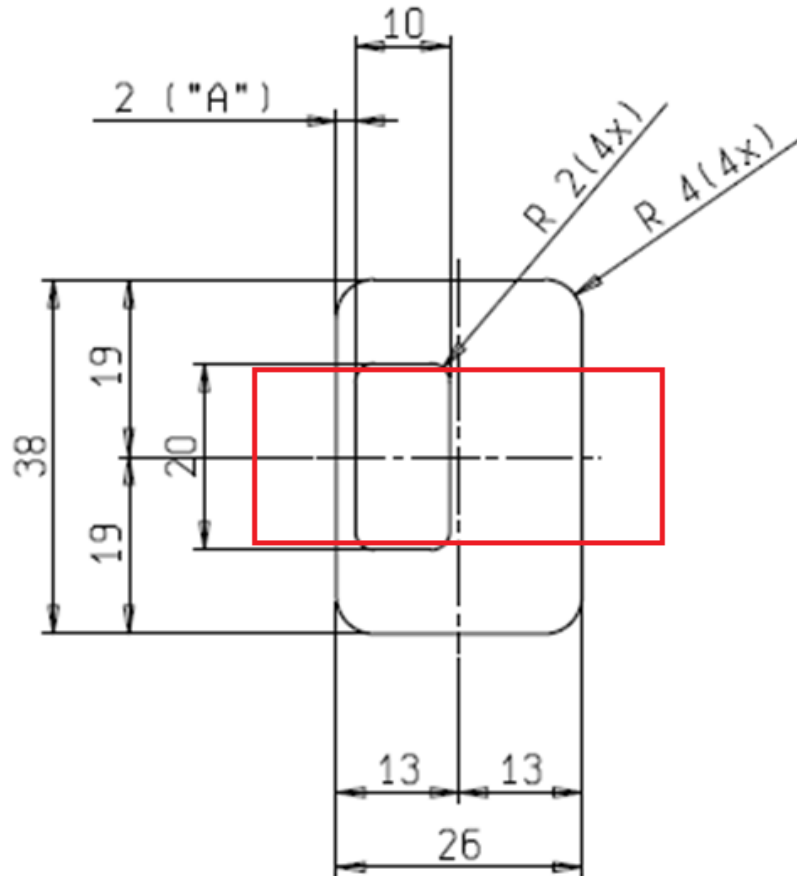


Figura 88 In rosso è evidenziata la zona del pezzo di cui viene simulata la tranciatura con Simufact.

Il software FEM calcola la forza sul punzone derivante dalla tranciatura di quattro lati di 18 mm l'uno e quindi non considera la tranciatura dell'interno perimetro del pezzo, pari a 178mm.

Conseguentemente, per trasformare i valori di  $F_{PUNZONE}$  dati dal software in quelli da confrontare con i valori rilevati dalla pressa è necessario moltiplicare i primi per un coefficiente pari a 178/72.

Ora si può finalmente effettuare il confronto, riassunto nella tabella sottostante.

S [mm]	a [mm]	R	Fz Max FEM [kN]	Fz Max FEM Corretta [kN]	Fz Max Pressa [kN]	Differenza %
4	2,00	0,50	207	512	464	10
5	2,00	0,40	223	551	511	8
6	2,00	0,33	236	583	609	-4

Tabella 22 Confronto tra Fz simulata e Fz misurata dalla pressa.

Come si può notare la simulazione tende a soprastimare la forza sul punzone nei primi due casi e a sottostimarla nel caso con spessore 6mm. La differenza % comunque risulta abbastanza soddisfacente evidenziando un buon allineamento tra risultati sperimentali e risultati della simulazione ad elementi finiti.

### 5.2.3 Confronto del momento corrispondente alla massima forza sul punzone

Sia il calcolatore che il programma della pressa, danno come output anche l'istante (in termini temporali, facilmente poi convertibili in posizione del punzone nello stampo) in cui si ha la massima forza impiegata nella tranciatura.

Nella tabella sottostante si riportano i valori dove si ha la massima forza in direzione Z sul punzone durante la simulazione e durante la prova sperimentale, con le relative forze.

S [mm]	Fz Max FEM Corretta [kN]	Corsa Fz Max FEM	Fz Max Pressa [kN]	Corsa Fz Max Pressa
4	512	2	464	1,8
5	551	2,5	511	2,3
6	583	3,1	609	1,8

*Tabella 23 Fz simulata e reale a confrontate in funzione dell'istante temporale dove esse raggiungono il loro valore massimo.*

Come si può notare i valori di corsa dove si ha la massima forza sul punzone, riportati rispetto a come è stato costruito il modello FEM, sono simili nei casi con spessore 4 e 5 mm.

Molto diverso è invece il valore nel caso 6mm dove sembra esserci una netta differenza tra simulazione e realtà. Considerando però il valore di forza massima sul punzone nella simulazione FEM quando la corsa è 1,8 mm troviamo una forza sul punzone di 551 kN, mentre a 1,87 mm si hanno 581 kN, praticamente lo stesso valore della forza a 3,1mm. Tale confronto è visibile dai grafici riportati di seguito.

# CAPITOLO 6

## Conclusioni

Ora, constatata la bontà delle simulazioni FEM e completata la verifica basata sui risultati della campagna di tranciatura, siamo in grado di procedere aggiornando la normativa oggetto di questo studio e proponendo alcune soluzioni che possano estendere il limite tecnologico attuale.

### 6.1 Aggiornamento della normativa

Nell'immagine sottostante viene riproposta la normativa del 1995 da cui è nata questa tesi.

Va ricordato che la "fattibilità" cui si riferisce la normativa è rappresentata dalla tranciatura di almeno 10.000 pezzi senza la rottura del punzone figura.

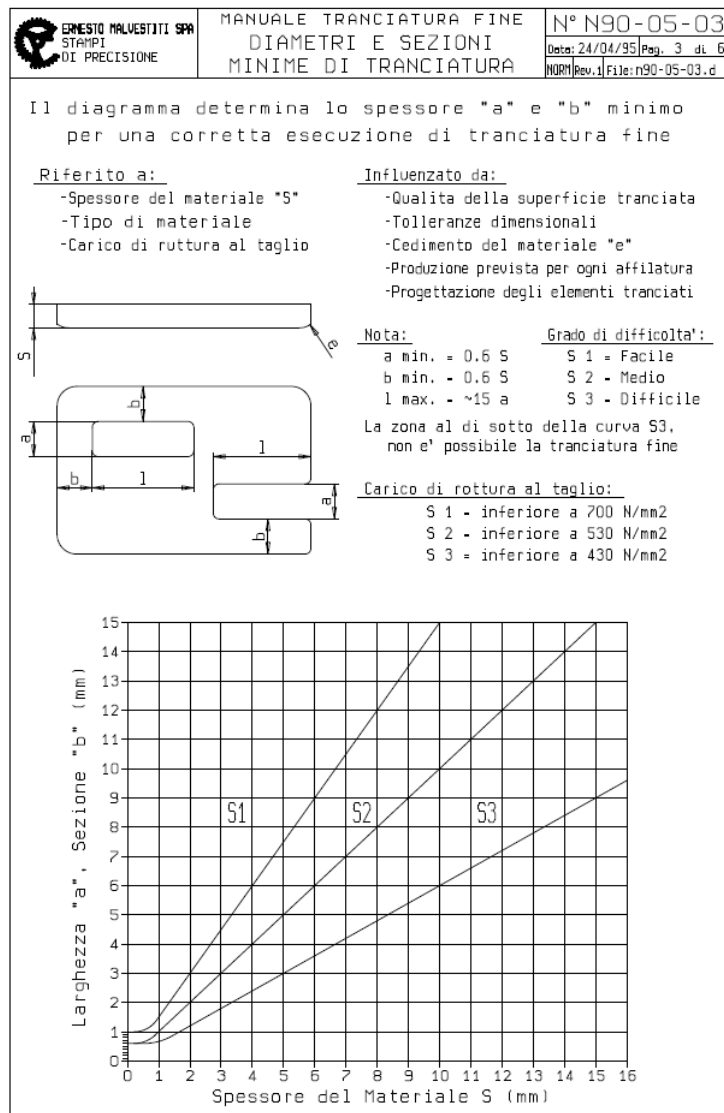


Figura 89 Normativa interna Malvestiti risalente al 1995.



La sperimentazione da noi condotta ha confermato che i limiti fissati dalla normativa non corrispondono più alla realtà produttiva dei nostri giorni. Infatti essendo stati tranciati 7800 pezzi con spessore 4 mm e in seguito altri 5700 pezzi con spessore 5 mm si è garantita la resistenza al punzone per almeno 10.000 pezzi a spessore 4mm. Questo tipo di ragionamento è del tutto lecito in quanto passare da uno spessore tranciato di 4mm ad uno di 5 mm intensifica lo sforzo risultante sulla parete del punzone, quindi il numero di pezzi tranciati di 5 mm può essere considerato come un proseguimento nella tranciatura dello spessore 4mm. Riassumendo nella prima campagna abbiamo dimostrato che il punzone garantisce almeno 18.000 colpi tranciando uno spessore di 4mm, 10.300 colpi se trancia uno spessore di 5 mm e 4.600 colpi circa per uno spessore tranciato di 6mm. Non avendo garantito i 10.000 colpi di obiettivo per lo spessore di 6 mm è stata condotta una seconda campagna, utilizzando un nuovo punzone. Quest'ultimo si è rotto dopo soli 5.400 colpi, fissando così un nuovo limite per la normativa.

Di seguito propongo quindi una versione aggiornata della normativa .

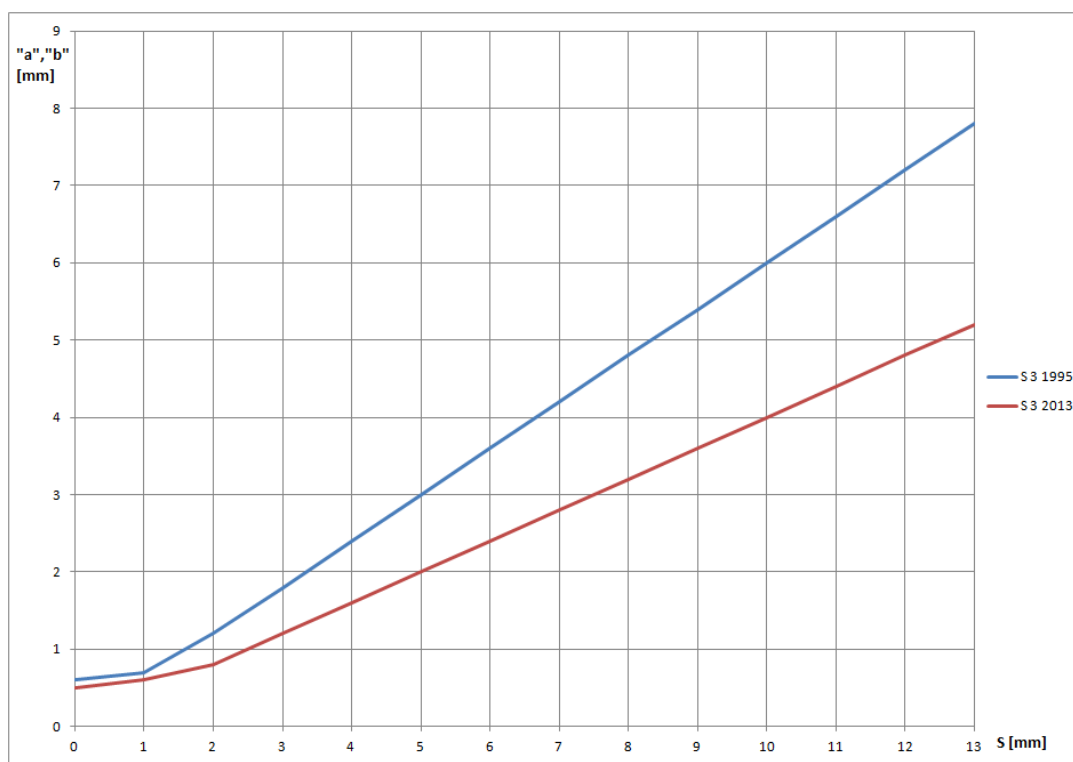


Figura 90 Aggiornamento del grafico presente nella normativa Malvestiti.

Il C45 ha un  $R_m$  di circa 500 MPa e resistenza al taglio pari per convenzione a  $0,9 R_m$  cioè 450 MPa. Esso appartiene quindi alla fascia di difficoltà S2 , anche se molto vicino al limite superiore della fascia S3.

Possiamo quindi affermare che tutti i materiali di fascia S3 , avendo resistenza al taglio minore, rispetteranno la soglia imposta dalla nuova normativa.

Posizionandoci sull'ascissa in corrispondenza dello spessore 5 mm, troviamo quindi un nuovo punto intersecando l'ordinata in corrispondenza di 2 mm, spessore della parete del nostro pezzo.

Avendo simulato la distribuzione di sforzi sulla parete del punzone facendo variare la larghezza della parete sottile e lo spessore del materiale in modo però da mantenere costante il rapporto R, ed avendo trovato una sostanziale corrispondenza di sforzo di compressione sulla parete a R costante, è possibile collegare i due punti sperimentali con una retta senza commettere alcun errore concettuale.

Come si può notare dal grafico, le due rette hanno diverso coefficiente angolare, rappresentato dal rapporto R ( $b/S$  secondo la normativa). Infatti mentre prima si usava come coefficiente angolare 0,6 ora tale coefficiente risulta essere 0,4.

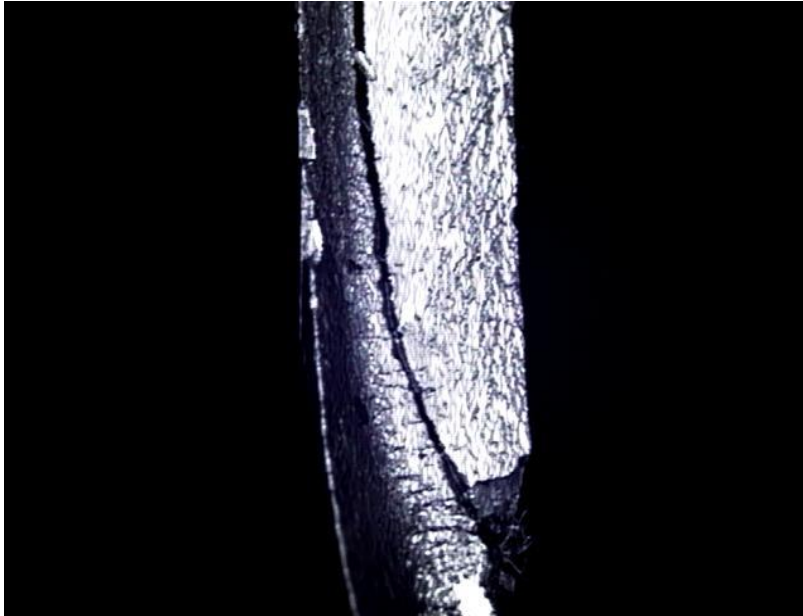
Questo ci permette di affermare che si possono tranciare almeno 10.000 pezzi senza rottura del punzone a patto che la larghezza della parete sottile sia almeno pari a 0,4 volte lo spessore del materiale.

## 6.2 Proposta di strategie migliorative per il superamento del nuovo limite di fattibilità trovato

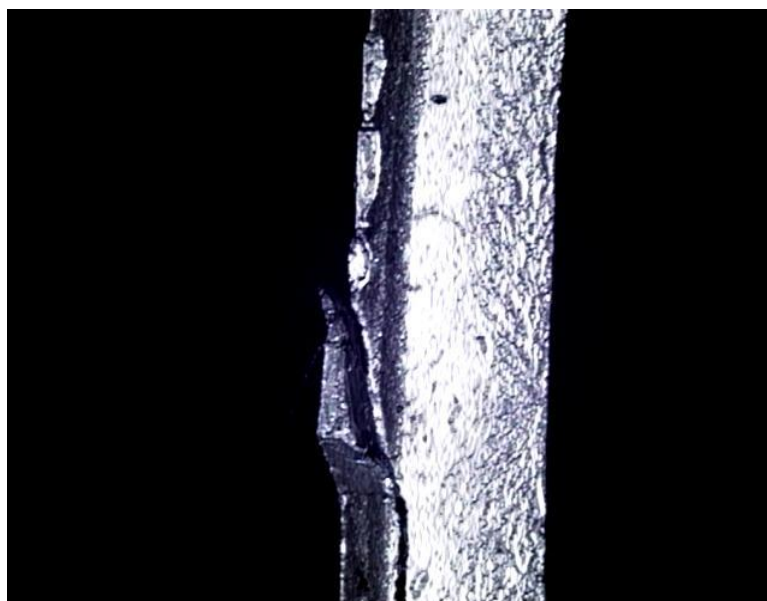
Come ultimo obiettivo ci proponiamo di trovare alcune strategie per tentare di raggiungere l'obiettivo di 10.000 colpi anche per lo spessore 6 mm .

Per far questo dobbiamo però fare alcune considerazioni riguardo il tipo di sollecitazione cui è sottoposto il punzone figura e il tipo di rottura che lo interessa.

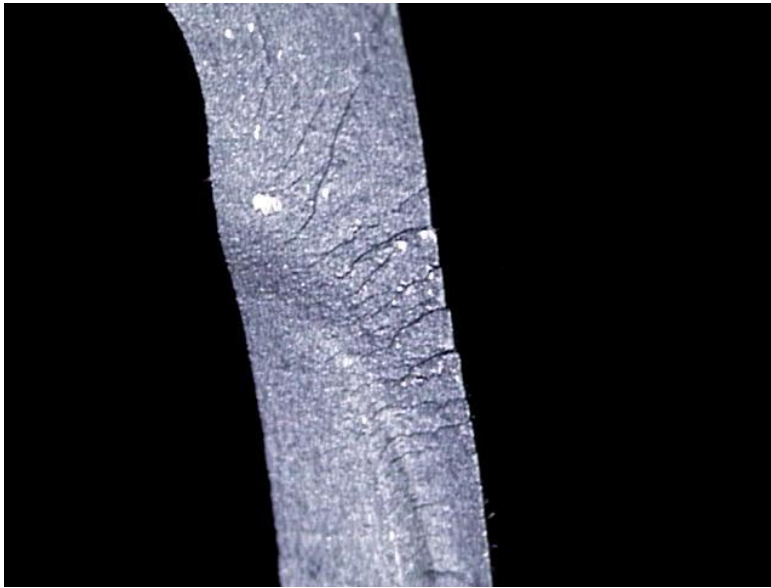
Nelle immagini seguenti sono proposti degli ingrandimenti riguardanti la rottura dei due punzoni usati nella sperimentazione.



*Figura 91 Ingrandimento della superficie di frattura del punzone utilizzato nella prima campagna.*



*Figura 92 Altro ingrandimento della superficie di frattura del punzone utilizzato nella prima campagna.*



*Figura 93 Ingrandimento della superficie di frattura del punzone utilizzato nella seconda campagna.*

Cercare di capire dalle superfici di fratture il tipo di rottura subita dal punzone risulta molto difficile in quanto le superfici di frattura vengono alterate dall'operazione di tranciatura che prosegue anche a punzone rotto fino al raggiungimento del pezzo di controllo. Nel nostro caso infatti il primo punzone ha continuato a tranciare altri 100 colpi, e altrettanti colpi sono stati fatti dal punzone della seconda campagna. Purtroppo il materiale del nastro va a impattare sulla superficie di frattura alterandone così le caratteristiche.

Per tale motivazione si può solo affermare che la rottura che ha interessato il secondo punzone è definibile macroscopicamente fragile. I segni visibili in fig. 92 possono ricordare quelli caratteristici dello shevron pattern, anche se più probabilmente sono stati generati dai pezzi tranciati con punzone ormai rotto.

Per quanto riguarda il primo punzone si può notare invece dalle immagini la presenza di un piano di frattura che ha attraversato trasversalmente lo spessore della parete, e che probabilmente si è originata sul bordo esterno del punzone al centro della parete sottile. Potrebbe trattarsi di una cricca originatasi nel centro della parete e poi rapidamente propagata fino a portare a rottura il punzone.

In generale da una prima analisi delle superfici di frattura si può attribuire la rottura del punzone ad un problema definibile "da carico di punta". In sostanza un elevato carico concentrato sulla parete sottile del punzone potrebbe causare un'inflessione della parete stessa ad ogni colpo pressa. Tale inflessione è comunque limitata dallo spazio che ha a disposizione il punzone: nel nostro caso 1 centesimo di millimetro (0,5 centesimi di gioco punzone-bussola guida punzone e 0,5 centesimi tra punzone ed estrattore).

La rottura in questo caso può anche quindi essere considerata per fatica.

In conclusione vengono proposte tre strategie migliorative:

- aumentare la sezione resistente del punzone allargando la parete sottile : questa strategia permetterebbe di diminuire gli sforzi in quella sezione, ostacolando quindi il problema riguardante l'eccessivo carico a compressione della parete.
- essendo la sollecitazione del punzone di natura ciclica (prevalentemente con sforzi di compressione ma in fase di estrazione sfrido con sforzi anche di trazione) si può cercare di ottimizzare la superficie del componente rendendola il più possibile priva di intagli. Per far ciò una soluzione può essere una

lucidatura "a specchio " da eseguire sia prima che dopo il rivestimento del punzone. Così facendo eliminerebbero molti inneschi per cricche aumentando la vita a fatica del punzone. Inoltre essendo le pareti più lisce, lo sforzo di strisciamento del materiale sul punzone, sia in fase di tranciatura che in estrazione, risulterebbe leggermente minore (la bibliografia a riguardo parla di una diminuzione della forza di estrazione di circa il 10%)

- cambiare la durezza e la tenacità del materiale: modificando il tipo di trattamento termico si può optare per un aumento della durezza, arrivando a 63-64 HRC in modo da aumentare la resistenza a compressione del materiale ma perdendo in tenacità, oppure ad un aumento della tenacità (tramite un rinvenimento a temperatura leggermente superiore) al fine di ottenere una tenacità più alta che consentirebbe al punzone di sopportare meglio la deformazione derivante dal processo.

Probabilmente la soluzione ottimale è ottenibile tramite un trade off tra queste differenti strategie; questo è possibile però solo con un'ulteriore campagna sperimentale.

A livello economico invece, consiglieri un trade off escludendo la lucidatura in quanto a pari sforzo economico darà sicuramente benefici meno evidenti delle altre proposte.

**Tabella : Z Force sul punzone**

Corsa 4mm [mm]	Fz 4mm [kN]	Corsa 5 mm [mm]	Fz 5 mm [kN]	Corsa 6 mm [mm]	Fz 6 mm [kN]	Corsa 7 mm [mm]	Fz 7 mm [kN]
0,0617284	0	0,0625	0	0,0625	0	0,0625	0
0,0617284	76,882	0,0625	75,4552	0,0625	78,0861	0,0625	77,0361
0,123457	71,0113	0,125	69,015	0,125	70,5637	0,125	69,4014
0,154321	69,8953	0,15625	63,1868	0,15625	58,9391	0,1875	51,3011
0,185185	63,8192	0,1875	63,2475	0,1875	56,2985	0,25	45,173
0,246914	65,9533	0,25	61,2016	0,25	51,4132	0,3125	75,7625
0,308642	126,921	0,3125	132,312	0,257812	73,2141	0,375	137,719
0,37037	127,161	0,375	139,87	0,273438	105,224	0,4375	148,611
0,432099	126,709	0,4375	140,916	0,304688	127,753	0,5	152,88
0,493827	135,055	0,5	141,63	0,3125	131,171	0,5625	157,007
0,555556	135,46	0,5625	144,229	0,375	144,516	0,625	154,506
0,617284	138,394	0,625	144,86	0,4375	148,613	0,6875	160,505
0,679012	140,364	0,6875	147,785	0,5	149,795	0,75	158,748
0,740741	141,298	0,75	149,54	0,5625	152,393	0,8125	164,25
0,802469	142,485	0,8125	152,033	0,625	153,236	0,875	166,079
0,864198	143,401	0,875	153,216	0,6875	155,029	0,9375	168,566
0,925926	144,35	0,9375	155,306	0,75	158,452	1	170,117
0,987654	145,813	1	156,344	0,8125	158,39	1,0625	182,851
1,04938	174,401	1,0625	188,323	0,875	161,118	1,125	199,988
1,11111	178,384	1,125	191,271	0,9375	162,25	1,1875	204,696
1,17284	179,528	1,1875	194,213	1	163,416	1,25	202,304
1,23457	183,386	1,25	198,291	1,0625	181,679	1,3125	221,964
1,2963	184,481	1,3125	195,426	1,125	199,935	1,375	220,471
1,35802	186,915	1,375	204,155	1,1875	196,563	1,4375	224,096
1,41975	192,576	1,4375	205,967	1,25	201,798	1,5	219,511
1,48148	193,641	1,5	209,561	1,3125	207,795	1,5625	228,938
1,54321	197,529	1,5625	213,379	1,375	211,279	1,625	229,5
1,60494	199,154	1,625	215,62	1,4375	215,171	1,6875	230,385
1,66667	198,251	1,6875	217,73	1,5	219,419	1,75	237,835
1,7284	202,131	1,75	217,801	1,5625	223,265	1,8125	236,656
1,79012	204,902	1,8125	221,468	1,625	225,545	1,875	243,497
1,85185	204,94	1,875	217,089	1,6875	225,989	1,9375	242,435
1,91358	204,83	1,9375	216,525	1,75	227,671	2	245,779
1,97531	206,653	2	218,16	1,8125	223,143	2,0625	243,306
2,03704	206,427	2,0625	220,04	1,875	235,517	2,125	245,528
2,09877	205,522	2,125	220,353	1,9375	235,231	2,1875	249,008
2,16049	206,112	2,1875	221,088	2	229,615	2,25	247,531
2,22222	201,137	2,25	218,62	2,0625	229,787	2,3125	244,675
2,28395	201,568	2,3125	218,439	2,125	233,305	2,375	245,991
2,34568	197,977	2,375	217,756	2,1875	233,012	2,4375	246,635

2,40741	195,446	2,4375	218,563	2,25	235,628	2,5	246,29
2,46914	197,545	2,5	223,167	2,3125	232,85	2,5625	247,066
2,53086	200,203	2,5625	218,651	2,375	235,546	2,625	250,976
2,59259	195,243	2,625	219,259	2,4375	232,023	2,6875	246,983
2,65432	192,432	2,6875	219,474	2,5	234,938	2,75	244,774
2,71605	194,961	2,75	219,615	2,5625	234,976	2,8125	247,163
2,77778	187,455	2,8125	214,82	2,625	233,11	2,875	249,723
2,83951	191,274	2,875	214,895	2,6875	233,097	2,9375	245,803
2,90123	186,633	2,9375	215,906	2,75	231,633	3	244,342
2,96296	186,966	3	210,114	2,8125	235,183	3,0625	243,863
3,02469	193,682	3,0625	209,774	2,875	231,496	3,125	245,742
3,08642	185,452	3,125	207,349	2,9375	235,229	3,1875	245,147
3,14815	186,28	3,1875	211,405	3	234,515	3,25	246,397
3,20988	183,659	3,25	207,101	3,0625	236,215	3,3125	245,209
3,2716	184,549	3,3125	206,499	3,125	233,957	3,375	238,413
3,33333	182,265	3,375	203,951	3,1875	232,948	3,4375	251,122
3,39506	180,664	3,4375	206,327	3,25	231,756	3,5	247,042
3,45679	178,269	3,5	203,825	3,3125	225,517	3,5625	240,972
3,51852	176,997	3,5625	203,56	3,375	229,133	3,625	239,808
3,58025	177,19	3,625	199,174	3,4375	232,888	3,6875	248,106
3,64198	176,757	3,6875	198,109	3,5	228,847	3,75	245,281
3,7037	172,928	3,75	198,344	3,5625	234,365	3,8125	244,444
3,76543	170,383	3,8125	200,663	3,625	231,643	3,875	251,014
3,82716	169,641	3,875	198,069	3,6875	231,872	3,9375	243,761
3,88889	169,258	3,9375	194,937	3,75	230,066	4	240,014
3,95062	165,664	4	197,428	3,8125	227,686	4,0625	244,075
4,01235	165,619	4,0625	192,05	3,875	224,491	4,125	243,983
4,07407	155,702	4,125	194,866	3,9375	223,401	4,1875	244,417
4,1358	168,316	4,1875	196,024	4	220,741	4,25	243,069
4,19753	161,034	4,25	192,585	4,0625	223,48	4,3125	242,43
4,25926	163,962	4,3125	192,456	4,125	223,121	4,375	238,384
4,32099	166,141	4,375	189,044	4,1875	220,499	4,4375	240,473
4,38272	159,893	4,4375	184,938	4,25	218,224	4,5	237,356
4,44444	160,718	4,5	188,552	4,3125	216,572	4,5625	239,57
4,50617	155,205	4,5625	186,617	4,375	215,521	4,625	236,083
4,5679	155,03	4,625	181,115	4,4375	214,446	4,6875	237,444
4,62963	153,631	4,6875	182,345	4,5	218,552	4,75	231,599
4,69136	152,006	4,75	176,006	4,5625	212,094	4,8125	228,403
4,75309	153,783	4,8125	175,272	4,625	211,143	4,875	230,583
4,81481	146,898	4,875	173,19	4,6875	211,238	4,9375	227,342
4,87654	150,592	4,9375	171,993	4,75	209,753	5	227,782
4,93827	142,261	5	171,813	4,8125	213,556	5,0625	223,217
5	142,546	5,0625	169,999	4,875	204,157	5,125	217,775
		5,125	173,229	4,9375	207,122	5,1875	229,962
		5,1875	176,564	5	206,305	5,25	228,405

		5,25	174,589	5,0625	204,658	5,3125	222,539
		5,3125	165,908	5,125	203,486	5,375	217,884
		5,375	165,361	5,1875	204,6	5,4375	222,045
		5,4375	166,518	5,25	199,887	5,5	219,725
		5,5	159,94	5,3125	198,309	5,5625	216,65
		5,5625	164,76	5,375	200,018	5,625	216,903
		5,625	166,021	5,4375	201,431	5,6875	218,314
		5,6875	156,045	5,5	196,801	5,75	213,417
		5,75	170,318	5,5625	194,977	5,8125	215,176
		5,8125	148,99	5,625	198,83	5,875	212,739
		5,875	143,422	5,6875	187,196	5,9375	211,273
		5,9375	148,673	5,75	193,278	6	209,977
		6	146,638	5,8125	197,561	6,0625	213,851
				5,875	195,993	6,125	209,555
				5,9375	190,374	6,1875	209,481
				6	192,839	6,25	207,077
				6,0625	187,787	6,3125	202,957
				6,125	191,465	6,375	198,402
				6,1875	180,241	6,4375	202,65
				6,25	179,114	6,5	195,161
				6,3125	179,845	6,5625	201,002
				6,375	174,633	6,625	200,831
				6,4375	176,437	6,6875	198,105
				6,5	173,063	6,75	198,851
				6,5625	159,998	6,8125	191,81
				6,625	166,396	6,875	193,506
				6,6875	165,658	6,9375	200,303
				6,75	163,657	7	192,489
				6,8125	159,818	7,0625	191,597
				6,875	153,689	7,125	188,191
				6,9375	153,578	7,1875	183,085
				7	156,361	7,25	181,958
						7,3125	181,286
						7,375	176,931
						7,4375	173,575
						7,5	174,699
						7,5625	170,758
						7,625	168,939
						7,6875	163,898
						7,75	161,188
						7,8125	163,785
						7,875	160,1
						7,9375	160,595
						8	155,487

Tabella 24 Z Force sul punzone.



## Bibliografia

- [1] Heinz Tschatsch, *Manuale lavorazioni per deformazione, procedimenti- macchine-utensili*, edit. Tecniche Nuove, 1980. Traduzione e revisione a cura del Dr.Ing. Giuseppe Murari
- [2] R.Suzzani (curatore), *Manuale di lavorazione della lamiera*, edit. Tecniche Nuove, 2009
- [3] Mario Rossi , *Stampaggio a freddo delle lamiere,Stampi- matrici-punzoni-presse e macchine*, ed. Ulrico Hoepli, nona edizione 1973.
- [4] R. Suzzani (curatore), *Manuale dello stampista*, ed. Tecniche Nuove, seconda edizione, 2002
- [5] Dott. Ing. Claudio Malvestiti, *Tecnologia della tranciatura fine*, Corso d'istruzione: tranciatura fine (2 ottobre 1997)
- [6] A.Rivolta, *Gli acciai Bohler per lavorazioni a freddo ad elevato rendimento*, Milano (7 febbraio 2012)
- [7] Catalogo prodotti Bohler, Cold work tool steel 2013
- [8] Catalogo M.Z.F. (ZAPP, ERASTEEL)
- [9] Dipl. ing. Willi Greem, *Tranciatura fine e deformazione a freddo*, Corso d'istruzione : tranciatura fine (2 ottobre 1997)
- [10] Prof. F. Birzer, *I materiali destinati alla tranciatura, un importante fattore di costo e di qualità nella deformazione a freddo e nella tranciatura fine*, Corso d'istruzione: tranciatura fine( 2 ottobre 1997)
- [11] Tutorial Simufact Forming 11.0 english version.