

# **POLITECNICO DI TORINO**

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

## **Approccio numerico-sperimentale per l'analisi del processo di tranciatura di leghe di alluminio di interesse automobilistico**



### **Relatori**

Prof. Gianfranco GENTA

Ing. Roberto CAGLIERO

### **Candidato**

Carmine Palladino

Anno Accademico 2020/2021



# Sommario

1 Introduzione .....	4
1.1 La teoria alla base delle lavorazioni di tranciatura ed imbutitura .....	7
1.1.1 Tranciatura .....	7
1.1.2 Imbutitura.....	14
1.2 Materiali per la formatura .....	22
1.3 Software per la formatura .....	28
2 Materiali e metodi .....	31
2.1 Preparazione Metallografica .....	31
2.1.1 Troncatura .....	32
2.1.2 Inglobamento .....	33
2.1.3 Lucidatura .....	35
2.2 Micro-durometro Vickers .....	36
2.3 COLDFORM .....	39
2.4 GRANTA EDUPACK.....	41
2.5 Metodo di Tekkaya .....	44
2.6 Metodo di Falsafi .....	47

2.7 Anderson-Darling test.....	49
3 Risultati numerico-sperimentali.....	53
3.1 Materiale caratterizzato.....	53
3.2 Mappe di micro-durezza .....	56
3.3 Simulazione del processo di tranciatura .....	60
3.3.1 Definizione della scheda materiale in COLDFORM.....	61
3.3.2 Parametri di processo.....	64
3.3.3 Definizione mesh .....	65
3.3.4 Definizione del Pre-strain .....	67
3.3.5 Risultati della simulazione di tranciatura.....	70
3.4 Simulazione del processo di imbutitura.....	73
4 Discussione dei risultati ottenuti e sviluppo di un metodo numerico-sperimentale per valutare l'incrudimento.....	78
4.1 Correlazione dei risultati sperimentali con quelli numerici.....	78
4.2 Analisi del danno .....	81
5 Conclusioni .....	85
Bibliografia .....	87

Ringraziamenti.....	90
---------------------	----

# 1 Introduzione

La lamiera è uno degli elementi più utilizzati nel quotidiano (basta pensare alle carrozzerie delle autovetture) che prima di vederla come prodotto finito in realtà subisce molteplici lavorazioni. Essa arriva negli stabilimenti per essere sottoposta a diverse lavorazioni, una delle quali è la formatura; giunge sottoforma di “coil”, ovvero un rotolo di lamiera di diverso spessore e lunghezza. Quando si parla di formatura s'intende la combinazione delle operazioni effettuate partendo da un foglio piano di metallo laminato al fine di dare alla lamiera la forma voluta, deformandola in maniera permanente; un esempio pratico possono essere gli sportelli e altri pezzi della carrozzeria delle macchine. Durante la formatura il materiale viene deformato oltre il limite elastico ma non viene spinto oltre il limite di rottura. Con la formatura della lamiera a freddo possono essere generati componenti meccanici di elevata qualità, anche perché ciò non porta a variazioni strutturali del metallo che mantiene le sue caratteristiche resistenziali e meccaniche. Si ricorda che tutte queste operazioni di cui si è parlato non prevedono a priori un trattamento termico ad elevate temperature. Solo in alcuni casi è possibile che le lavorazioni vengono eseguite a caldo, con temperature che, normalmente, raggiungono i due terzi di quella di fusione; ciò accade soprattutto quando i pezzi sono di grande spessore. Tramite l'utilizzo di macchinari ad elevatissima tecnologia quali presse e stampi che hanno la funzione di trasferire lo sforzo di tranciatura e di deformazione sulla lamiera da lavorare vengono svolte tutte le fasi di formatura. Si precisa che, in base alle specifiche e alle singole richieste del cliente, questa tecnica, va eseguita con caratteristiche sempre diverse per servire il settore automobilistico. La formatura può essere realizzata per piccoli

volumi con sistemi manuali o per grandi volumi con linee di stampaggio automatizzate. La lamiera viene mossa rapidamente tramite delle presse meccaniche automatiche (stazioni) disposte in serie; è grazie a quest'ultime che avviene la formatura a freddo dopo lo svolgimento di alcune fasi. L'obiettivo principale di questa lavorazione è trovare il migliore equilibrio tra il definire una corretta sequenza delle operazioni di deformazione per garantire un riempimento corretto senza difetti e piegature, e utilizzare la minima quantità di materiale necessario al fine di evitare sprechi. Si ricorda che, nel momento in cui le macchine non vengono utilizzate in maniera ottimale, oltre l'incremento dei costi di lavorazione si potrebbero portare a comprimere dei pezzi già completamente riempiti sovraccaricando le macchine ed usurando gli stampi. È possibile prevedere se la configurazione di stampaggio ipotizzata è efficace o meno grazie all'uso di software di simulazione che hanno reso efficiente e hanno semplificato la programmazione degli stampi negli ultimi anni. I processi di formatura sono suddivisi in tre macrocategorie: tranciatura, piegatura e imbutitura. Le prime due operazioni vengono solitamente eseguite a freddo, l'ultima invece in determinati casi può avvenire anche a caldo. C'è da dire che ogni operazione, a sua volta, potrebbe essere suddivisa in più fasi e che per realizzare un prodotto finito, di solito, servono tutte le operazioni descritte, non solo una. Inoltre, sia le caratteristiche del materiale utilizzato che le dimensioni finali e la complessità finale del prodotto influenzano il modo in cui verrà svolto il procedimento complessivo. Nel settore automobilistico viene usata molto la tecnica della formatura a freddo in quanto ha molti più pregi rispetto ad altre tecniche utilizzate per medesimi scopi. Grazie ad essa, infatti, si può ottenere un prodotto finito con tempi ciclo ridotti, con una sagomatura pressoché finita (che quindi non comporterà lavorazioni

secondarie), di grande precisione dimensionale, con resistenza a fatica superiore e con un'ottima finitura superficiale. D'altra parte, la tecnica della formatura a freddo oltre che migliorare le caratteristiche meccaniche del prodotto finito, permette di minimizzare lo spreco di materie prime [1]. L'elaborazione di questa tesi è stata condotta in collaborazione con l'azienda AGLA POWER TRANSMISSION s.p.a. ed i laboratori LBN RICERCA s.r.l., che si occupano dello studio di smorzatori di vibrazioni torsionali realizzati mediante lavorazioni per deformazione plastica a freddo. Per garantire l'efficienza del processo produttivo, l'ufficio tecnico dispone di un software di simulazione agli elementi finiti (FEM) per i processi di deformazione a freddo, COLDFORM. Con tale software è possibile simulare a priori un intero ciclo produttivo, azzerando gli scarti di lavorazione, analizzando gli sforzi agenti sui macchinari e prevedendo gli stress e gli eventuali danneggiamenti presenti sul pezzo prodotto. L'obiettivo della tesi è stato quello di studiare il ciclo di produzione di una puleggia per pompa acqua realizzata in lega AlMg3, ed in particolare di confrontare alcune caratteristiche meccaniche ottenute (es. durezza e tensione di snervamento) mediante misure sperimentali con i risultati delle analisi numeriche. Il nucleo centrale del lavoro è costituito essenzialmente da due parti: una prima parte inerente la caratterizzazione delle mappe di micro-durezza sulla puleggia dopo l'operazione di tranciatura ed una seconda parte incentrata sulla simulazione del processo di tranciatura mediante COLDFORM per confrontare, tramite un metodo elaborato in base agli studi svolti da Tekkaya [2] e Falsafi [3], le caratteristiche meccaniche del caso numerico con quello sperimentale, al fine di valutare l'incrudimento della lega. Nello specifico, i capitoli di questa tesi sono strutturati nella seguente maniera:



**Capitolo 1:** illustrazione dei processi fondamentali, dei materiali utilizzati e dei software di simulazione per la formatura a freddo.

**Capitolo 2:** descrizione di materiali e metodi utilizzati per lo svolgimento dell'intero lavoro di tesi.

**Capitolo 3:** risultati numerici e risultati sperimentali ottenuti.

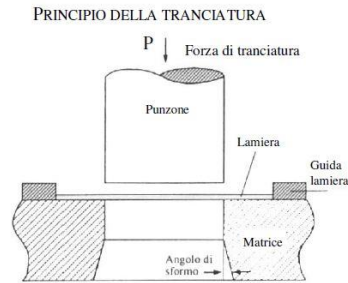
**Capitolo 4:** confronto fra i risultati numerici e sperimentali e sviluppo del metodo proposto.

**Capitolo 5:** conclusioni tratte dal lavoro di tesi.

## **1.1 La teoria alla base delle lavorazioni di tranciatura ed imbutitura**

### **1.1.1 Tranciatura**

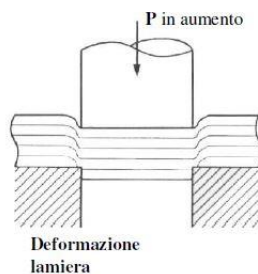
L'obiettivo, nel momento in cui viene realizzata una lavorazione di tranciatura, è quello di ottenere una figura geometrica piana ritagliando una parte di lamiera. Si descrive, di seguito, tutto il processo ricordando che si effettua con stampi montati su presse. Si parte dal punzone che è collegato attraverso una piastra alla slitta della pressa, esso taglia la lamiera penetrando nella matrice dandole una forma che corrisponde alla struttura del punzone e della matrice. Il perimetro del punzone e del foro rappresentano i taglienti all'interno della matrice. Il truciolo finisce in un raccoglitore situato al di sotto dello stampo, grazie all'angolo di sforno della matrice, che assume valori da 3° a 5°.



**Figura 1: Principio della tranciatura [4]**

Mediante un sistema guida lamiera si riesce a fissare in maniera corretta la lamiera al di sopra della matrice. Quando si parla di lamiere sottili si ha a disposizione un prelamiera (non rappresentato in figura 1), per fare in modo che esse non si pieghino durante la tranciatura. Si descrivono di seguito i vari passaggi che portano alla tranciatura della lamiera:

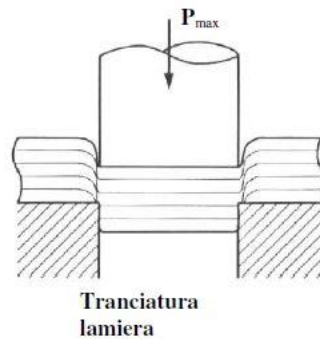
La lamiera inizia a penetrare nella matrice ed il punzone agisce sulla lamiera generando una deformazione plastica nella struttura fibrosa; nelle aree di contatto col punzone e con la matrice si ha una deformazione della lamiera con un arrotondamento dei bordi tranciati.



**Figura 2: Deformazione lamiera [4]**

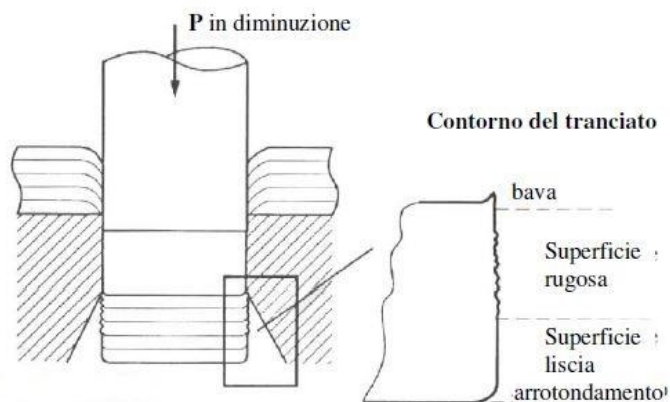
Superato il limite plastico e giunti alla tensione di rottura a taglio del materiale, si

generano delle fratture all'interno della superficie che separano la parte tranciata dal resto della lamiera; durante questo passaggio viene applicata la massima forza sulla lamiera da parte del punzone.



**Figura 3: Tranciatura lamiera [4]**

Dopodiché il punzone continua a spingere la parte tranciata all'interno della matrice finché non cade completamente.



**Figura 4: Scorrimento tranciato [4]**

La zona perimetrale del pezzo tranciato presenta nella parte centrale una superficie liscia generata dallo strisciamento sulle pareti della matrice ed una superficie rugosa in quanto sede della frattura; inoltre presenta in corrispondenza di uno spigolo una bava, mentre sull'altro un arrotondamento. Per scegliere la tipologia di pressa e per la

verifica di resistenza degli elementi dello stampo è bene andare ad analizzare la forza di tranciatura, non ha valore costante durante l'operazione ma varia qualitativamente come rappresentato in figura 5. C'è da dire però che dipende anche dal tipo di utensili che si utilizzano: piatti e paralleli o ad angolo. [4]

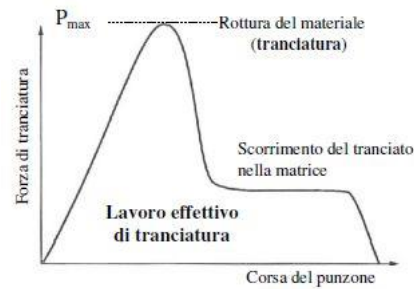


Figura 5: Andamento della forza di tranciatura in funzione della corsa del punzone [4]

Il valore massimo della forza di tranciatura, valido nel caso di utensili piatti e paralleli, può essere valutato con la seguente relazione:

$$P_{max} = \tau_R * l * s * 1,2 \quad (1.1)$$

con:  $\tau_R$  [MPa] carico unitario di rottura a taglio del materiale

$l$  [mm] perimetro del contorno tranciato

$s$  [mm] spessore della lamiera

Bisogna considerare un gioco tra punzone e matrice che ai fini dei risultati della lavorazione risulta molto importante. Dai due taglienti nascono le cricche che portano alla separazione del materiale, queste si propagano fino ad incontrarsi. Esse si incontreranno lungo un'unica traiettoria dando luogo a un bordo tranciato netto se il

gioco è corretto.

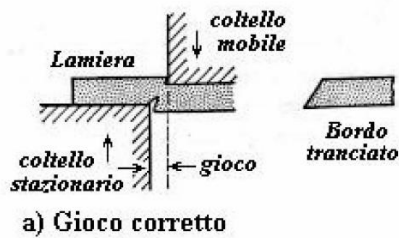


Figura 6: Juego correcto [4]

Se invece risulta troppo piccolo si muoveranno su traiettorie diverse dando luogo a forti dissipazioni energetiche con superfici tranciate molto irregolari con sbavature eccessive.

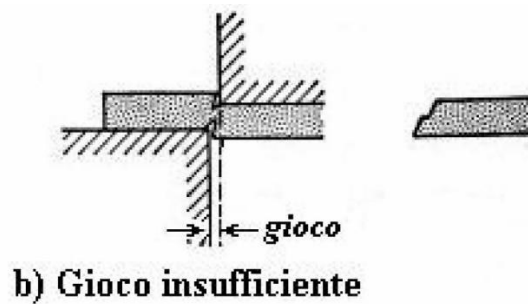


Figura 7: Juego insuficiente [4]

Se il gioco è elevato, si avranno notevoli distorsioni e fenomeni di imbutitura.

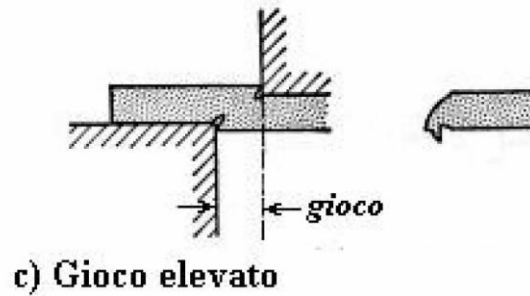


Figura 8: Gioco elevato [4]

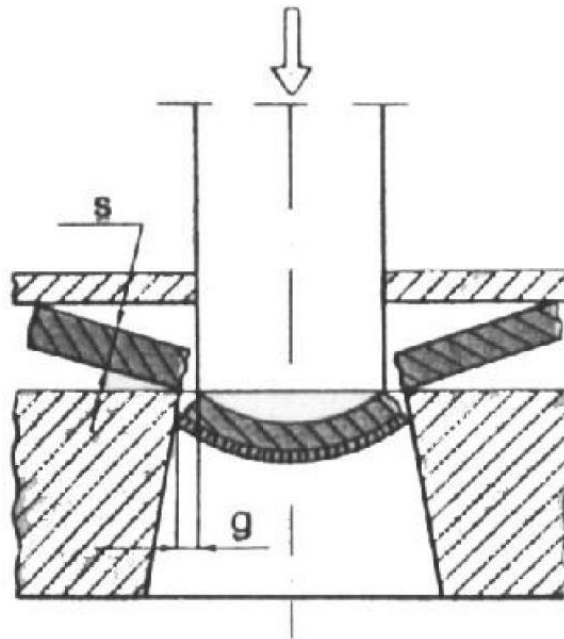
I vantaggi che ci sono nell'utilizzare un gioco appropriato sono molteplici:

- Frattura netta del materiale con piccole irregolarità superficiali e minima conicità lungo il bordo tranciato;
- Massima superficie del bordo tranciato perpendicolare ai piani superiori ed inferiori della lamiera;
- Altezza minima della bavatura;
- Minimo sforzo alla pressa;
- Massima durata dello stampo.

Si può operare con dispositivi diversi ed utilizzando degli stampi con diverse caratteristiche a seconda del tipo di tranciatura che si vuole realizzare: tradizionale o fine. Per quanto riguarda la tranciatura tradizionale:

- La forza agente sul punzone influenza il lavoro di tranciatura.
- Nel caso in cui si ha una lamiera di piccolo spessore, essa tenderà a sollevarsi dalla matrice durante la lavorazione di tranciatura.
- Considerando lo spessore della lamiera, il gioco tra matrice e punzone è circa pari al 5%.

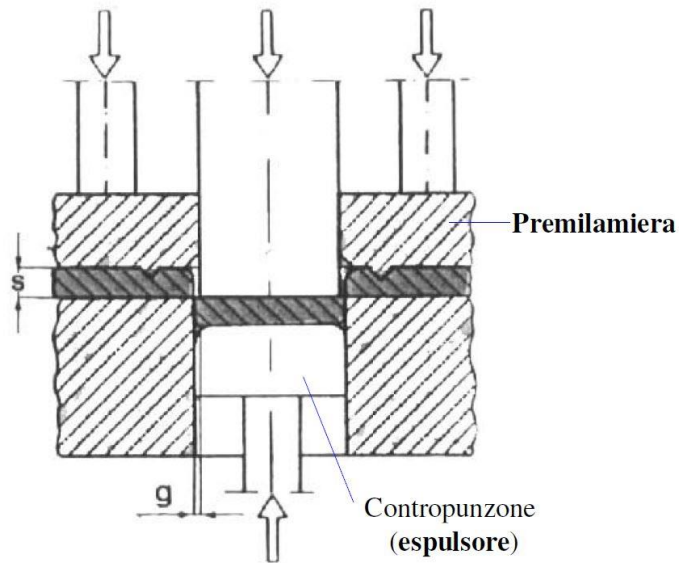
- Considerando la superficie appena tranciata, essa si presenta con bava e scabra.



**Figura 9: Tranciatura tradizionale [4]**

Per quanto riguarda la tranciatura fine:

- Una buona tranciatura dipende dalle forze agenti sul premilamiera, sull'espulsore e dalla forza agente sul punzone.
- Il premilamiera, durante la tranciatura, mantiene compressa la lamiera così da non farla deformare.
- Considerando lo spessore della lamiera, il gioco tra matrice e punzone è circa pari allo 0,2%.
- Gli angoli di spoglia risultano assenti sulla matrice.
- Assenza di bava e, inoltre, la superficie tranciata risulta molto liscia.



**Figura 10: Tranciatura fine [4]**

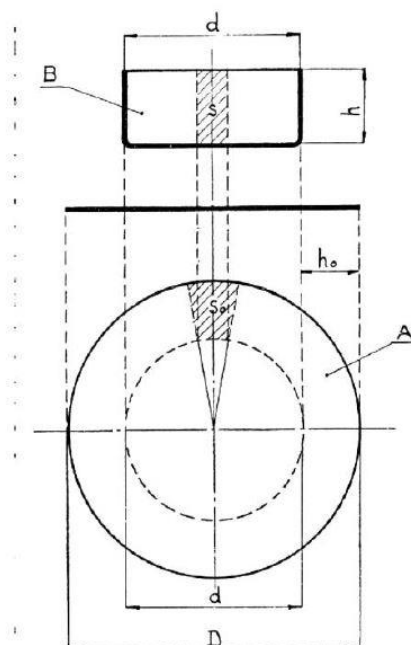
Per garantire una minore usura dello stampo e, quindi, una maggiore durata (20000 a 30000 pezzi) punzone e matrice vengono realizzati con acciai ad alto tenore di carbonio, materiale che ha una grande resistenza all'usura ed elevata durezza; oppure, in alcuni casi, vengono realizzati in metallo duro per tranciare materiali come lamiere di acciaio inossidabile o di acciaio al silicio. Infine, è bene fare uno studio accurato delle dimensioni del rotolo di lamiera di partenza, in base alla forma e alle dimensioni dei pezzi tranciati che si vogliono ottenere al fine di limitare al minimo gli sfridi.

### **1.1.2 Imbutitura**

Si parla di imbutitura nel momento in cui si ottiene un oggetto cavo di geometria più o meno complessa tramite una o più fasi partendo da una lastra piana di materiale metallico laminato. Teoricamente una lavorazione di imbutitura non dovrebbe modificare lo spessore iniziale della lamiera che dovrebbe rimanere identico a quello del rotolo grezzo iniziale, ma in realtà lo spessore viene alterato pesantemente. È



interessante vedere come si comporta il reticolo del materiale durante la lavorazione per capire meglio il vero e proprio processo che verrà descritto di seguito. Si supponga di voler ottenere dal disco di partenza A, di diametro  $D$ , un cilindro cavo B di diametro  $d$  e altezza  $h$ .



**Figura 11: Schema che mostra la deformazione che ha subito il materiale di una scatola circolare imbutita [5]**

Per ipotesi, si immagina che l'imbutitura avvenga a spessore costante. Il disco di fondo del cilindro non ha subito deformazioni mentre la parete cilindrica si è evidentemente deformata in quanto inizialmente componeva la corona circolare piana di larghezza  $h_0$  compresa tra i diametri  $D$  e  $d$  del disco A. Si può quindi osservare che l'elemento  $s_0$  tratteggiato sul disco iniziale ha subito una deformazione durante l'imbutitura, cambiando la forma da trapezoidale a rettangolare  $s$  (tratteggiata sulla parete cilindrica del pezzo); inoltre, nello stesso tempo, l'elemento  $s_0$  si piega di  $90^\circ$ .

A causa di tale cambiamento di forma, si verifica che l'altezza  $h$  del cilindro risulta essere maggiore dell'altezza  $h_0$  dell'elemento trapezoidale piano  $s_0$ . Come risultato si può affermare che durante il processo di imbutitura ogni elemento di materiale è soggetto a sforzi radiali di tensione e a sforzi tangenziali di compressione. L'andamento delle fibre del materiale che si è deformato è assai importante per prevedere possibili eccessivi stiramenti che potrebbero produrre strappi nella lamiera: infatti, prima che fossero introdotti i moderni programmi di simulazione del processo ad elementi finiti, era prassi comune tracciare con una punta da segno un reticolo di linee incrociate sulla lamiera da imbutire. Secondo la deformazione subita dal materiale durante la lavorazione era possibile rilevare gli spostamenti e calcolare le deformazioni subite dal pezzo. Tramite questo semplice artificio era possibile prevedere e motivare le rotture nel materiale dovute ad un eccessivo stiramento delle fibre causato dal cattivo progetto dello stampo o da un'eccessiva pressione esercitata dal premilamiera. Si vuole ora entrare nello specifico del procedimento di imbutitura: tale lavorazione tende a obbligare un disco, o una forma qualsiasi, di lamiera a passare, sotto l'azione di pressione esercitata da un utensile chiamato punzone, attraverso un generico foro di dimensione leggermente maggiore rispetto a quella del punzone, in genere di due volte lo spessore del foglio di lamiera iniziale.

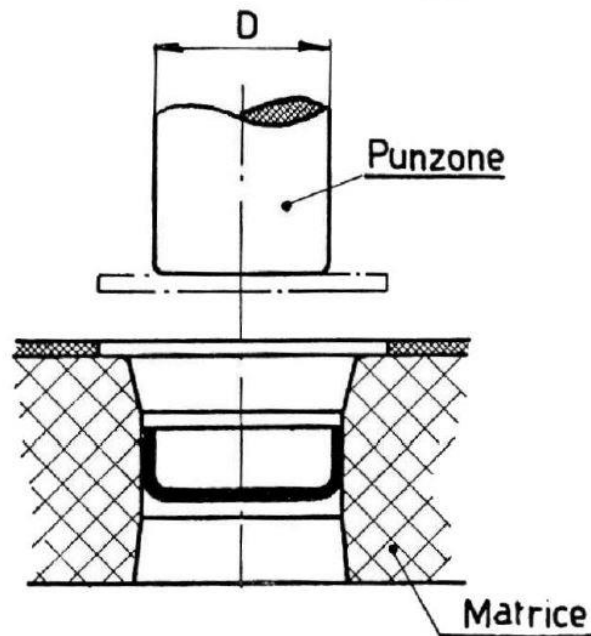
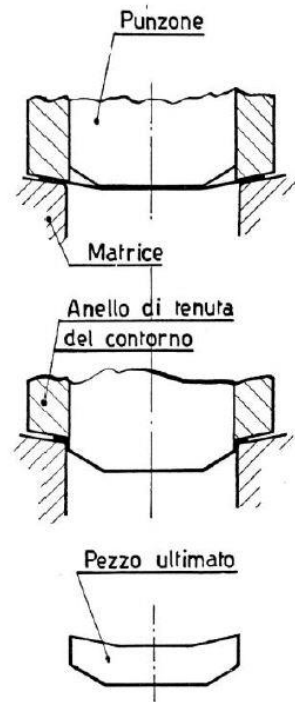


Figura 12: Schema di imbutitura semplice [5]

La parte di materiale che è costretta a passare nella sottile porzione di spazio delimitata internamente dal punzone ed esternamente dalle pareti dello stampo subisce una compressione in modo da impedire la formazione delle grinze che altrimenti sarebbe inevitabile. L'azione di compressione è risentita da tutta la superficie laterale del pezzo mentre la superficie di fondo, che rimane indeformata, deve solamente resistere alla pressione esercitata dal punzone che sta scendendo. Nella maggior parte dei casi, il processo è più complesso: infatti, nel caso ad esempio di componenti di dimensioni elevate e con spessori di materiale piccoli, è necessario tenere sotto controllo il bordo della lastra iniziale. Tale controllo viene effettuato tramite l'inserimento del prelamiera che si può assimilare ad un piano che fissa i bordi della lamiera ed agisce da distensore mentre nella parte centrale dello stampo avviene il vero processo di formatura. In tal modo la lamiera è prima costretta a

distendersi sotto l'azione del premilamiera che la preme moderatamente, poi, vincendo la pressione di distensione, tende a scivolare trascinata dalla discesa del punzone che forma il pezzo finito come mostrato dalla figura sottostante.



**Figura 13: Procedimento di imbutitura con premilamiera [5]**

Naturalmente il materiale subisce anche una certa “stiratura” dovuta alla pressione esercitata dall'organo di tenuta della lamiera stessa. La figura successiva mostra i passaggi fondamentali del processo completo di formatura per imbutitura.

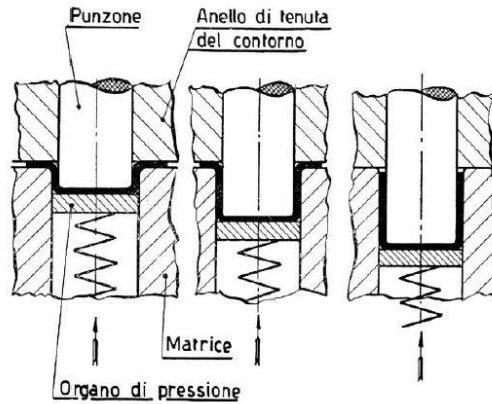
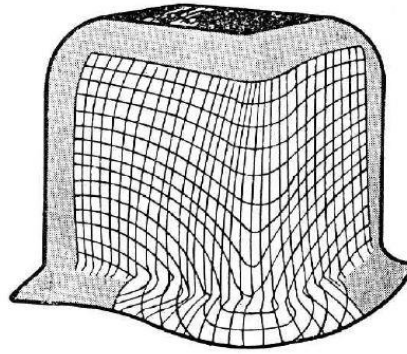


Figura 14: Le fasi del processo di imbutitura [5]

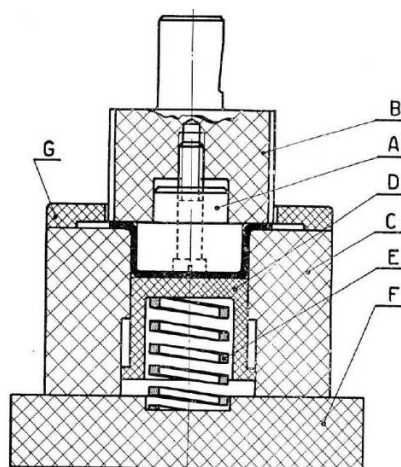
Il primo particolare che si può notare è il continuo slittamento del materiale verso il centro a formare il pezzo finito. La lamiera, al contrario del processo di piegatura dove viene deformata lungo una sola direzione, in questo caso subisce deformazioni su gran parte di tutta la sua superficie e quindi della sua materia. Infatti, come si nota dalla Figura 14, il foglio viene prima piegato poi nuovamente teso; tale operazione può provocare, in certi casi, una forte dilatazione del materiale e cioè si nota un allungamento delle fibre a spese dello spessore iniziale. In conseguenza di ciò si dovrà essere attenti a non superare mai il limite di resistenza del materiale per non provocarne la rottura. Da quanto esposto finora, è possibile stabilire che alla fine della lavorazione la disposizione delle fibre del materiale è completamente cambiata anche se si è tenuto idealmente costante lo spessore della lamiera. Tale cambiamento è tanto più evidente nel caso di formatura di pezzi cubitali o parallelepipedi anche se gli spigoli sono ampiamente raccordati. La Figura 15 mostra graficamente come negli spigoli sia maggiore la distensione delle fibre.



**Figura 15: Dimostrazione grafica della distensione delle fibre sulle pareti di un recipiente imbutito [5]**

È importante sottolineare che se i piani di fissaggio non fossero eseguiti con dovuta precisione, ed in tal caso la lamiera non fosse tesa uniformemente, si verificherebbe uno scorrimento non uniforme del materiale verso il centro dello stampo con la conseguente insorgenza più o meno marcata di grinze. Quindi il premilamiera deve esercitare la massima pressione consentita dai limiti di resistenza del materiale. Inoltre, tanto maggiore è lo spessore della lamiera e tanto minore risulta essere il pericolo di rottura del materiale; quindi per alcuni spessori, in relazione ad una minore profondità di formatura, non è necessario utilizzare il premilamiera: in pratica la maggiore resistenza alla rottura del materiale sta in rapporto con la sezione trasversale dello stesso. Tramite lo schema mostrato in Figura 16 è possibile descrivere tutti gli organi necessari ad un generico processo di imbutitura. Il punzone A dello stampo è rigidamente collegato al portapunzone B. Il gruppo AB viene fissato alla parte mobile della pressa. Il maschio A, durante la discesa verso la lamiera, penetra nella matrice C formando il pezzo. La bussola D, che all'inizio del processo si trova a filo del piano superiore e che durante la lavorazione ha la funzione di non fare accartocciare la lamiera, si abbassa accompagnando il materiale per effetto della

pressione esercitata dal punzone comprimendo contemporaneamente la molla E. Il disco G di tenuta, il premilamiera, garantisce un'imbutitura senza grinze. Il maschio A, al termine della formatura, risale e lascia libera la bussola, la quale sotto l'azione della molla si alza ed espelle il pezzo stampato. La matrice è fissata alla piastra F la quale, a sua volta, è collegata al banco della pressa.



**Figura 16: Schema di uno stampo semplice per imbutire [5]**

Come descritto in precedenza, per trasformare una lastra laminata in un oggetto imbutito è necessario applicare una forza assiale, la quale sollecita, entro i limiti di formatura del materiale, le fibre della lamiera. Il punzone e la matrice devono quindi vincere l'effetto risultante di forze laterali, le quali generano un notevole effetto di attrito tra le pareti. Il materiale è inoltre costretto a distendersi all'interno della stretta luce lasciata tra punzone e matrice. In definitiva si deve cambiare la disposizione delle fibre interne al materiale e per fare ciò è necessario compiere un certo lavoro. Per evitare che si verifichino rotture del materiale e per rendere più agevole l'intera lavorazione, è necessario che siano sufficientemente lubrificate tutte le superfici a contatto della lamiera con lo stampo, in modo tale da prolungare anche la vita dello

stampo stesso. I lubrificanti devono essere scelti a seconda del ciclo di lavorazione applicato e anche dei materiali coinvolti nella lavorazione. [5]

## 1.2 Materiali per la formatura

La buona riuscita della lavorazione dipende in gran parte, oltre che dai parametri di processo stabiliti, anche dalla qualità del materiale scelto e dai trattamenti termici che ha subito. Uno dei materiali più utilizzati è, senza dubbio, l'alluminio; esso ha importanti caratteristiche che lo collocano tra i materiali di maggior interesse industriale; è l'elemento base delle leghe leggere, in cui gli elementi di lega non superano di solito il 5%. I carichi di snervamento e di rottura sono molto bassi nel metallo puro, ma crescono sia per effetto dell'incrudimento che per la presenza di elementi di soluzione solida anche a livello di impurezze (tabella 1); il modulo di Young, invece, subisce solo piccole variazioni.

Tenore Al (% in peso)	99.996	99.5	99.0
Carico di rottura ricotto (MPa)	60	80	90
Idem incrudito	120	150	180
Carico di snervamento ricotto (MPa)	15	35	40
Idem incrudito	100	120	150
Allungamento a rottura ricotto (%)	50	45	40
Idem incrudito	10	8	6
Durezza ricotto (HB)	16	20	25
Idem incrudito	25	40	45
Modulo elastico a trazione E (MPa)	67000	69000	70000

**Tabella 1: Confronto caratteristiche tra campioni di alluminio con diverso grado di purezza [6]**

A differenza degli acciai che si diversificano in base a percentuali di carbonio espresse mediante cifre decimali, l'alluminio, e più in generale gli altri elementi non ferrosi, con titolo del 99% si considera commercialmente puro. La resistenza



meccanica delle leghe di alluminio viene notevolmente accresciuta mediante il trattamento termico di tempra di soluzione (solubilizzazione e tempra) seguito da invecchiamento (naturale o artificiale). Si ricorda che i trattamenti termici sono tutti quei procedimenti che consentono di modificare la struttura o la composizione chimica di metalli e leghe metalliche, e quindi le loro proprietà meccaniche e tecnologiche, mediante l'azione del calore. Le leghe di alluminio hanno un campo di temperature di impiego piuttosto limitato, sia perché permanenze a temperature vicine a quelle di invecchiamento portano alla trasformazione dei precipitati indurenti ed allo scadimento della resistenza meccanica e sia perché il materiale addolcisce se viene raggiunta la temperatura di ricristallizzazione. A questo proposito si riporta in figura 17 il carico massimo e l'allungamento a rottura di campioni di alluminio incruditi in funzione della temperatura di prova. Se questa supera i 250°C il materiale addolcisce, ricristallizzando nel corso della prova stessa.

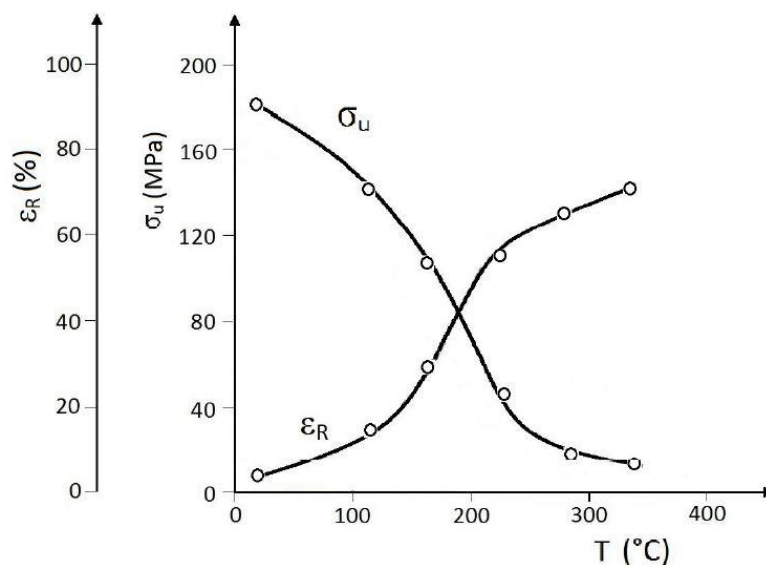


Figura 17: Carico massimo e allungamento a rottura in funzione della temperatura [6]

Per quanto riguarda la resistenza alla corrosione, l'alluminio presenta la capacità di passivarsi, cioè di ricoprirsi di un sottile e aderente strato di ossido. La resistenza alla corrosione può diminuire con l'aumentare del tenore di elementi alliganti. Lo strato di ossido naturale (dello spessore di pochi  $\mu\text{m}$ ) protegge il metallo dai fenomeni corrosivi ed è in grado di rigenerarsi rapidamente se danneggiato a seguito di un graffio. Strati di ossido di maggiore spessore (dell'ordine della decina di  $\mu\text{m}$ ) possono essere ottenuti mediante trattamenti di ossidazione anodica. I più comuni elementi alliganti dell'alluminio sono il rame, il silicio, il magnesio, il manganese e lo zinco. Gli elementi di lega, in genere in tenori modesti, consentono di accrescere il carico di rottura fino a 700 MPa nei semilavorati e 400 MPa nei getti, grazie ad un'ampia gamma di trattamenti termici. Naturalmente, anche il limite di snervamento e la durezza crescono in concomitanza con il carico di rottura, mentre l'allungamento a rottura, e quindi la duttilità, subiscono una diminuzione rispetto al metallo puro. Le leghe di alluminio possono essere suddivise come:

- Leghe per semilavorati da sottoporre a lavorazioni plastiche (wrought alloy)
- Leghe per la produzione di getti (cast alloy)

L'alluminio puro e le leghe per semilavorati sono designati mediante quattro cifre XXXX. La prima cifra identifica la classe, la seconda l'eventuale modificazione della lega originale (0 per originale, da 1 a 9 per la lega modificata). La classe 1XXX riguarda l'alluminio puro. In questo caso le ultime due cifre si riferiscono al tenore minimo di alluminio. Le classi 5XXX contengono magnesio come elemento principale ( $\text{Mg}=1-5\%$ ). Hanno moderate caratteristiche di resistenza meccanica mantenendo una buona duttilità dopo incrudimento a freddo, inoltre hanno buona

saldabilità ed ottima resistenza alla corrosione; sono utilizzate nell'industria automotive e nelle costruzioni per ambienti marini. Invece l'alluminio puro e le leghe di alluminio per getti sono designati con un codice a tre cifre più una quarta cifra decimale XXX.X; la prima cifra riguarda l'elemento di lega principale, la seconda e la terza identificano una specifica lega, mentre la cifra che segue il punto indica se la lega viene fornita come getto (0) o come lingotto (1 o 2). Una lettera può precedere questo gruppo di cifre per indicare una modifica particolare della lega. Vista l'importanza delle condizioni di trattamento termico o di incrudimento sulle proprietà meccaniche, l'Aluminium Association ha sviluppato un sistema di sigle per designare lo stato di fornitura delle leghe di alluminio (tabella 2).

F	Lega nelle condizioni di fabbricazione.
O	Lega ricotta: trattata termicamente per ottenere una bassa resistenza meccanica al fine di migliorare la duttilità.
H	Incrudita: deformata a freddo ed eventualmente trattata termicamente. La lettera H è seguita da una o più cifre che caratterizzano il tipo di trattamento.
W	Solubilizzata e temprata (eventuale invecchiamento naturale)
T	Trattata termicamente per ottimizzare le proprietà meccaniche. La lettera T è seguita da una o più cifre che identificano il trattamento.

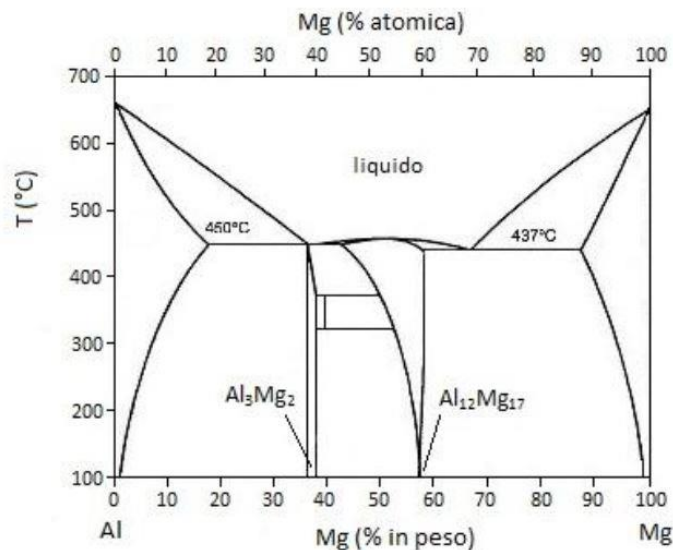
**Tabella 2: sigle per classificare lo stato di una lega di alluminio [6]**

Si riportano, di seguito, le ulteriori specifiche numeriche che identificano le condizioni di incrudimento (H) e di trattamento termico (T):

- H1: Lega incrudita senza ulteriori trattamenti termici;
- H2: Incrudita e parzialmente ricotta;
- H3: Incrudita e stabilizzata mediante riscaldamento a bassa temperatura;
- H4: Incrudita e verniciatura finale del pezzo;
- T1: Formatura a T elevata, raffreddamento ed invecchiamento naturale;

- T2: Formatura a T elevata, raffreddamento, lavorazione plastica a freddo ed invecchiamento naturale;
- T3: Tempra di soluzione, lavorazione plastica a freddo ed invecchiamento naturale;
- T4: Tempra di soluzione ed invecchiamento naturale;
- T5: Formatura a T elevata, raffreddamento ed invecchiamento artificiale;
- T6: Tempra di soluzione ed invecchiamento artificiale;
- T7: Tempra di soluzione e stabilizzazione (sovrainvecchiamento per avere precipitati stabili);
- T8: Tempra di soluzione, lavorazione plastica a freddo ed invecchiamento artificiale;
- T9: Tempra di soluzione, invecchiamento artificiale e lavorazione a freddo;
- T10: Formatura a T elevata, raffreddamento, lavorazione a freddo ed invecchiamento artificiale.

È stato detto che esistono diversi tipi di leghe di alluminio, si riportano, di seguito, le caratteristiche principali delle leghe di alluminio-magnesio. Il diagramma di stato Al-Mg, molto complesso nella parte centrale, presenta un andamento simile a quelli Al-Cu e Al-Si dal lato dell'alluminio. La trasformazione eutettica compare a  $T = 490^{\circ}\text{C}$  per tenori  $\text{Mg} > 14.9\%$  (figura 18).



**Figura 18: Diagramma di stato Al-Mg [6]**

Il magnesio riduce la densità dell'alluminio, inoltre esso è l'unico elemento che ne incrementa il coefficiente di dilatazione termica. Naturalmente il processo di alligazione comporta una riduzione della conducibilità elettrica e termica, mentre le proprietà di resistenza meccanica presentano valori crescenti fino a tenori di  $Mg=15\%$ , corrispondenti alla massima solubilità nell'alluminio. [6] Il magnesio conferisce un'elevata resistenza alla corrosione, che caratterizza queste leghe per tubazioni per oli e per costruzioni in ambiente marino e nell'industria automotive. Uno dei maggiori motivi per il quale nel settore automobilistico di lusso è stato preferito a lungo l'acciaio rispetto all'alluminio è senza dubbio il costo. Se da una parte i progressi sono ancora limitati, dall'altra l'utilizzo dell'alluminio nelle automobili è cresciuto molto negli ultimi decenni. Fino ad ora l'acciaio è stato sostituito dall'alluminio, per la maggior parte, per pezzi derivanti da operazioni di forgiatura e fonderia. I motivi principali per i quali non è favorita la diffusione di questo tipo di leghe sono, in molti casi, i maggiori costi per la produzione dei pannelli

di alluminio oltre l'alto costo delle materie prime e la minore formabilità. In ogni caso, c'è da dire che nel settore automobilistico sono state apportate delle modifiche importanti per far sì che l'alluminio diventasse un'ottima alternativa all'acciaio. Se da una parte le leghe di alluminio risultano costose dall'altra bisogna dire che comportano costi di produzione minori, una maggiore funzionalità ed una migliore resistenza alla corrosione. [7] L'uso dell'alluminio, inoltre, risulta limitato in campo automobilistico perché i suoi requisiti di processo risultano in contrasto con quelli degli acciai solitamente utilizzati. L'alluminio, infatti, è considerato un elemento difficilmente saldabile a causa di: alta conducibilità termica, alto ritiro di solidificazione, formazione di ossido in superficie, elevato coefficiente di dilatazione termica, alta solubilità dell'idrogeno allo stato fuso e intervalli relativamente ampi di solidificazione e temperature che influenzano le saldature. [8]

### **1.3 Software per la formatura**

Prima di produrre ed immettere nel mercato un componente, questo, deve superare diverse fasi: progettazione, produzione dello stampo, scelta dei materiali e prove. Dato che il processo risulta molto lungo, la simulazione riesce a dare un contributo fondamentale riducendo costi e tempi. [9] Quando si parla di simulazione della formatura a freddo di una lamiera s'intende che lo stampaggio della lamiera viene simulato tramite calcolatore grazie all'ausilio di diversi software. Grazie alla simulazione si possono scoprire problemi ed errori, quindi debolezze o rotture dell'elemento; in questo modo si evita di produrre componenti reali utilizzati per

eeguire test pratici risparmiando, in questo modo, dei costi. Per sviluppare e migliorare qualsiasi elemento metallico, nel mondo automobilistico, è consolidato l'utilizzo delle simulazioni di formatura a freddo. Per illustrare il processo dello stampaggio della lamiera, deve esserci un modello del processo reale. Il processo viene poi calcolato con l'aiuto del software usando il metodo degli elementi finiti che si basa su tecniche incrementali implicite o esplicite. Al fine di avere risultati delle simulazioni più coerenti possibili i parametri del modello devono descrivere il processo reale in modo molto accurato. Con la simulazione della formatura a freddo si riesce ad ottenere una simulazione rapida e precisa del processo completo di stampaggio, includendo sia le operazioni principali che le secondarie, così come il ritorno elastico. Si hanno diversi parametri tipici della simulazione come: la forza e la frizione della pressa, le proprietà del materiale, la geometria dell'utensile e dell'elemento. La simulazione calcola non solo le sollecitazioni e le deformazioni durante il processo di formatura, ma anche il danno generato sul componente. In aggiunta si può dire che, le simulazioni permettono l'analisi dei risultati (ad esempio sollecitazioni e assottigliamento del materiale) e l'analisi di errori e problemi (ad esempio cricche e rotture); forniscono anche informazioni sull'effetto delle variabili di processo sullo stampo. Le simulazioni vengono usate per tutto il ciclo di stampaggio della lamiera. Il progettista, grazie alla simulazione, riesce a fare una stima sulla formabilità dell'elemento già durante la fase di progettazione, ciò gli permette di realizzare il prodotto in tempi più rapidi. La simulazione permette di valutare il processo durante la fase di pianificazione e di ottimizzare diverse alternative che mi permettono di ridurre i tempi per la messa a punto dello stampo. Per concludere, riguardo la messa a punto dello stampo, con la simulazione si

riescono ad avere informazioni utili su come uno stampo non del tutto funzionante deve essere modificato. Per garantire risultati ottimali di formatura, è anche possibile vedere come i parametri di processo devono essere cambiati. La simulazione permette anche un enorme risparmio di costi e tempi in quanto dà l'opportunità di migliorare la qualità del componente. Inoltre, con la simulazione del processo di formatura, si riesce a garantire la massima qualità nella progettazione di elementi e utensili ma anche a migliorare l'affidabilità dello sviluppo e della pianificazione e quindi permettere la massima affidabilità nella produzione. I software più utilizzati per la formatura a freddo in ambito internazionale sono:

- Coldform (software della Transvalor)
- Ls-Dyna (software di Ansys)
- Hyperform (software dell'Altair)

Essi risultano molto simili fra di loro in quanto costituiti da una base comune, ciò che li differenzia è il layout.



## **2 Materiali e metodi**

### **2.1 Preparazione Metallografica**

La metallografia consiste nello studio della struttura fisica dei metalli e delle leghe metalliche mediante l'utilizzo di un microscopio. Mediante l'analisi con microscopio ottico si può determinare: la dimensione dei grani di un componente, come questi si distribuiscono all'interno della matrice e la presenza delle diverse fasi; la presenza di cricche e di fenomeni di corrosione, oltre lesioni e porosità. Con un microscopio ottico che lavora in riflessione, ovvero il microscopio metallografico, viene realizzata l'analisi. Per utilizzare questa tecnica però si necessita di provini lucidati e preparati che devono presentare una superficie tale da risultare speculare e piana in quanto l'opacità del metallo non permette l'osservazione in trasparenza del provino. La preparazione metallografica dei campioni consiste di tre fasi:

- Troncatura
- Inglobamento
- Lucidatura

### **2.1.1 Troncatura**

La troncatura di un particolare da esaminare viene effettuata mediante una troncatrice metallografica, che opera attraverso un disco da taglio specifico per il materiale che occorre tagliare. La scelta del disco da taglio è fondamentale per ottenere dei buoni risultati, ed avviene in base alla durezza del materiale da sezionare. Materiali duri o molto duri richiedono l'uso dei dischi "teneri", mentre materiali teneri richiedono l'impiego di dischi "duri". C'è una sostanza abrasiva che viene immessa nel legante che costituisce i dischi da taglio. Il taglio risulta un'operazione molto complicata in quanto bisogna fare in modo di evitare deformazioni, graffiature o fratture nel metallo perché, in caso negativo, renderebbero inutili qualsiasi lavorazione successiva. La qualità del taglio di un disco è determinata dalla grossezza del grano dell'agente abrasivo, dalla sua forma e distribuzione nel legante. Particolare attenzione va posta nell'operazione di taglio che deve avvenire senza che il campione si riscaldi a causa dell'attrito con la mola, per evitare eventuali alterazioni della struttura. Occorre, quindi, raffreddare il provino con acqua contenente olio emulsionabile, o fluido da taglio, durante la suddetta operazione.



**Figura 19: Troncatrice utilizzata in azienda**

### **2.1.2 Inglobamento**

I provini metallici dopo essere ridotti a dimensioni opportune sono di norma inglobati in formelle di resina. Lo scopo principale è di poterli bloccare efficacemente durante l'operazione di lucidatura sia manuale che per mezzo d'apparecchiature automatiche. L'inglobamento avviene ponendo il campione metallico in una pressa inglobatrice (Figura 20) dove, dopo aver aggiunto la resina, inizia il processo per apporto di calore e pressione. Il raffreddamento è eseguito sotto pressione per garantire l'adesione tra resina e campione.



**Figura 20: Pressa inglobatrice utilizzata in azienda**

Per lavori di inglobamento in serie, solitamente, vengono usate resine termoplastiche (Figura 21); esse offrono un'ottima capacità di penetrazione dei pori e delle cricche e presentano tempi di solidificazione bassi e fenomeni di ritiro moderati. Queste resine offrono una buona capacità di penetrazione delle cricche e dei pori. Polimerizzano grazie all'aggiunta di un catalizzatore nella miscela.



**Figura 21: Provino inglobato**

### 2.1.3 Lucidatura

La lucidatura serve ad eliminare la parte del campione che può aver subito deformazioni durante la fase di inglobamento e ad ottenere una superficie piana. I parametri importanti da considerare in questa lavorazione sono:

- Velocità di rotazione dei dischi: non deve essere troppo elevata poiché potrebbe eliminare l'abrasivo dai dischi
- Scelta dell'abrasivo: i più comuni sono le paste diamantate, silice colloidale per lucidatura fine ed il SiC; inoltre deve risultare duro almeno il doppio rispetto al campione.
- Granulometria dell'abrasivo: innanzitutto si ricorda che la granulometria deve essere inferiore rispetto alla risoluzione ottica del microscopio utilizzato, inoltre, risulta fondamentale in quanto i grani non devono lasciare tracce.
- Tipo di lubrificante: mentre per i materiali duttili si ha bisogno di poco abrasivo e di un'elevata quantità di lubrificante, per quelli duri viceversa.
- Forza applicata
- Tempo

In questa lavorazione l'abrasivo è fissato su un disco rotante a 250 giri/min, il che consente l'asportazione di micro-trucioli del campione che viene posto a contatto con quest'ultimo. Inizialmente vengono utilizzati dischi al carburo di silicio (per materiali con durezza limitata, fino a 150 HV) fissati tramite resina o dischi rotanti che possono contenere polvere diamantata (per materiali con durezza dai 150 HV ai 2000 HV). Durante questa fase si elimina anche l'arrotondamento sull'interfaccia tra campione e resina, inoltre, si migliora il grado di planarità del campione tramite il

passaggio con carte abrasive con granulometria sempre più fine (80, 240, 320, 800, 1200). Per la fase finale si usano panni con soluzione diamantata da 3  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$  che hanno lo scopo di realizzare una lucidatura a specchio sul campione, indispensabile per consentirne l'analisi al microscopio. Questo è il processo finale e può presentare il rischio di creare micro-rilievi e per questo si cerca di abbreviare il più possibile la durata del processo.



Figura 22: Lucidatrice utilizzata in azienda

## 2.2 Micro-durometro Vickers

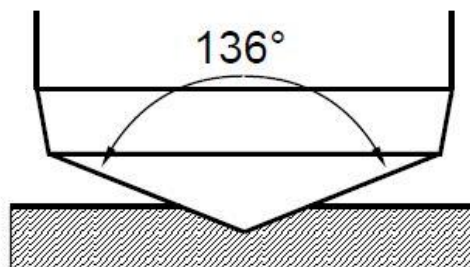
Il micro-durometro è uno strumento da laboratorio in grado di misurare la durezza di quasi tutti i tipi di materiali metallici a partire dai più teneri o di basso spessore ai più duri, inclusi quelli sottoposti a trattamento superficiale. In azienda ho avuto l'opportunità di utilizzare il micro-durometro Vickers (Figura 23).



**Figura 23: Micro-durometro Vickers**

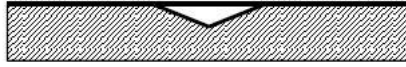
Il penetratore è costituito da un diamante a forma di piramide quadrata con angolo al vertice di  $136^\circ$  e carico di prova  $F$  compreso fra 1.9 N e 980.7 N. La prova di micro-durezza consta di tre fasi principali:

- Applicazione del carico (10 – 15s)



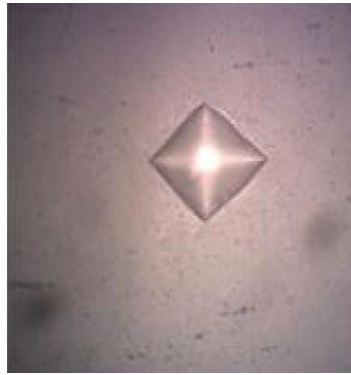
**Figura 24: Applicazione del carico**

- Scarico



**Figura 25: Scarico**

- Esame dell'impronta



**Figura 26: Esame dell'impronta**

Si rilevano col microscopio la lunghezza delle diagonali dell'impronta, dopodiché se ne ricava la media aritmetica  $d$  ed infine si calcola il valore della durezza Vickers HV tramite la formula seguente:

$$HV = \frac{2 * 0.2 * F * \sin\left(\frac{136}{2}\right)}{d^2} \quad (2.1)$$

Il vantaggio principale del procedimento Vickers consiste nel fatto che prevede una sola scala in quanto utilizza un unico tipo di penetratore (a differenza di altre prove, ad esempio quella Brinell); la scala può variare dalle durezza più basse alle più alte e, per questo motivo, è considerato nei laboratori un mezzo fondamentale per la ricerca. È possibile rilevare le caratteristiche strutturali del materiale in base alle possibili

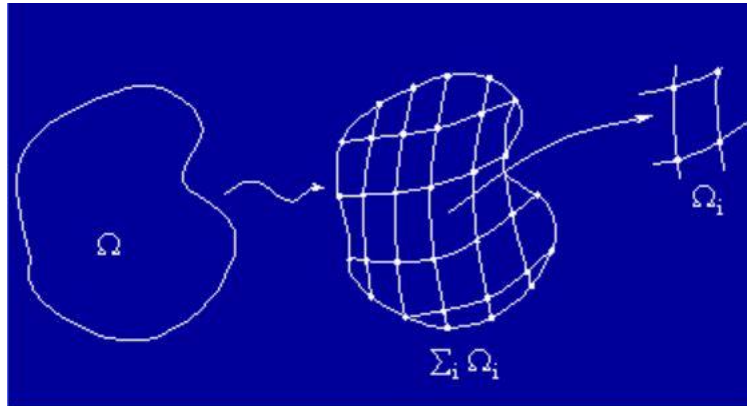


deformazioni dell'impronta. La misurazione dell'impronta, con il metodo Vickers, deve essere sempre eseguita otticamente, questa è una delle limitazioni nel momento in cui si utilizza questa soluzione, in quanto ciò comporta un'inevitabile lentezza nella procedura. È molto importante fare in modo che l'asse del penetratore risulti perfettamente perpendicolare rispetto la superficie destinata all'impronta che, per questo motivo, deve essere preparata con molta cura, poiché una minima inclinazione provocherebbe una irregolarità nella misurazione. In alcuni casi l'impronta risulta difficilmente leggibile a causa di una diversa ripartizione delle deformazioni, che avvengono maggiormente sugli spigoli piuttosto che sulle facce dell'impronta piramidale, ciò fortunatamente però, avviene solamente per alcuni materiali. Tutte queste osservazioni sono riportate nelle norme EN ISO 6507-1 [10] ed EN ISO 6507-2 [11], esse spiegano non solo come eseguire la prova ma anche come verificare la sua validità.

## **2.3 COLDFORM**

Il software COLDFORM, sviluppato dalla Transvalor, è un codice di calcolo che considera le tre dimensioni dello spazio utilizzando la tecnica degli elementi finiti, al fine di discretizzare dei domini solidi di forma qualsiasi. Il metodo degli elementi finiti FEM consente di determinare la soluzione numerica approssimata di un sistema di equazioni differenziali mediante risoluzione di un sistema di equazioni algebriche equivalenti. Mediante l'analisi FEM si riescono ad analizzare qualsiasi tipo di strutture caricate in diverso modo ma anche vincolate in maniera diversa. Viene suddiviso il dominio in un numero finito di sottodomini detti elementi finiti. Ogni sottodominio è costituito da nodi, in questi punti, è possibile calcolare gli spostamenti

incogniti e approssimare tutti gli altri mediante prefissate funzioni di forma o di interpolazione.



**Figura 27: Discretizzazione di un solido in elementi finiti**

COLDFORM permette di effettuare vari tipi di analisi, dalle più semplici di tipo statico in campo elastico-lineare, alle più complesse quali analisi non lineari nel campo plastico. Possiamo suddividere l'analisi in tre fasi:

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

La fase di pre-processing si divide in ulteriori sei fasi:

- Fase 1, relativo alla scelta del tipo di analisi da effettuare (ad esempio analisi statica/dinamica o analisi lineare/non lineare);
- Fase 2, relativo alla scelta degli elementi finiti (se per problemi piani o tridimensionali);
- Fase 3, in cui si definiscono i parametri che caratterizzano il comportamento

costitutivo dei materiali;

- Fase 4, relativo alla definizione del reticolo di nodi del problema discreto;
- Fase 5, fase di costruzione e discretizzazione ad elementi finiti, assegnando per ognuno i nodi a cui essi fanno riferimento;
- Fase 6, relativo alle applicazioni di vincolo e carico;

Infine, la soluzione elaborata nella fase di post-processing è rappresentata sia nelle quantità fondamentali (ad es. temperature, spostamenti) sia nelle quantità da esse derivate (ad es. sollecitazioni, deformazioni) che risultano molto importanti nella fisica del problema analizzato. La fase di pre-processing e post-processing godono della possibilità di un'interfaccia grafica per l'interazione con l'utente.

## **2.4 GRANTA EDUPACK**

Granta Edupack è un software che rappresenta un database per quanto riguarda l'ambito dei materiali. Al suo interno, possiamo trovare qualsiasi caratteristica meccanica e fisica del materiale di nostro interesse. Nella Figura 28 è rappresentata la variazione del carico di rottura in funzione dell'allungamento per qualsiasi tipo di materiale presente all'interno di questa raccolta.

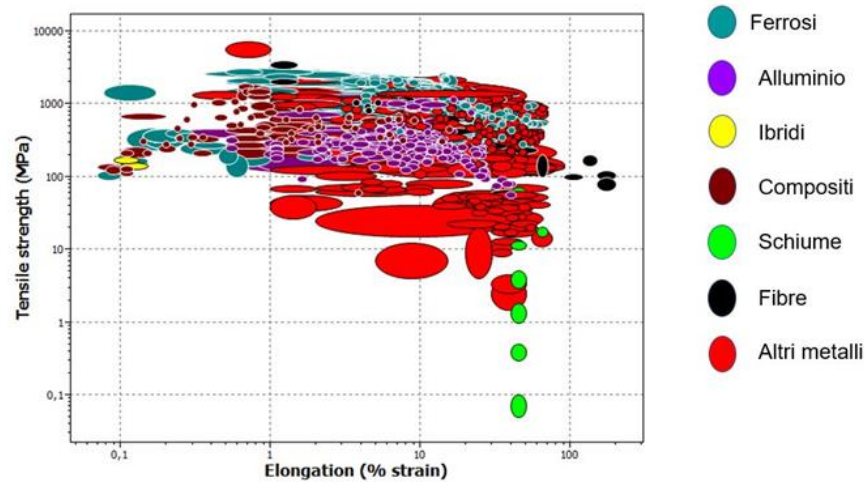


Figura 28: Carico di rottura in funzione dell'allungamento per tutti i materiali del database

È possibile impostare filtri per raffigurare solamente i materiali voluti, nella Figura 29 ho effettuato un confronto fra le leghe di alluminio e di acciaio.

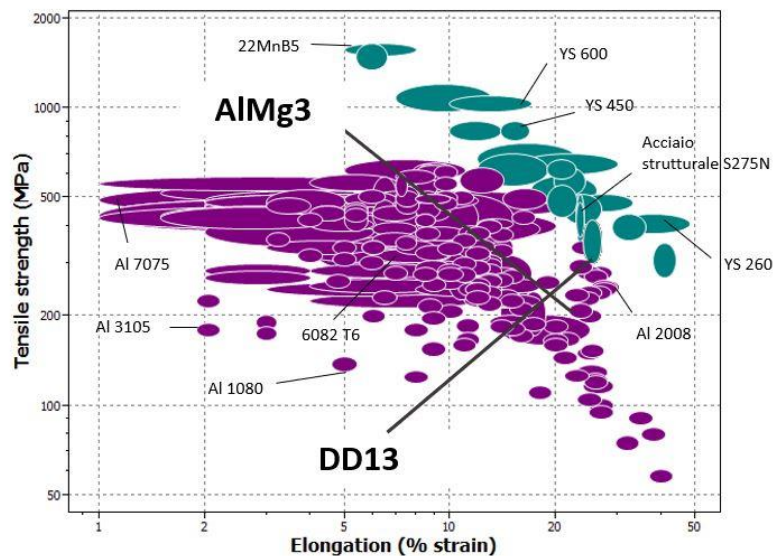
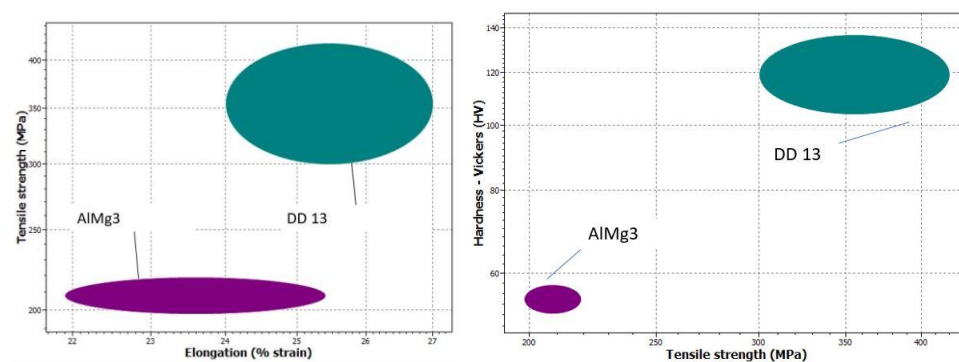


Figura 29: Confronto leghe di alluminio con leghe di acciaio

Le leghe d'alluminio si presentano con un peso ridotto ed un'ottima resistenza alla corrosione rispetto a quelle di acciaio, d'altra parte però, le leghe di acciaio hanno un

limite di fatica definito, un basso costo ed una buona lavorabilità rispetto a quelle di alluminio. Inoltre, quest'ultime risultano più malleabili ed elastiche rispetto quelle di acciaio, questo spiega la loro collocazione all'interno della Figura 29. Infine, nella Figura 30 ho selezionato un ulteriore filtro per rappresentare il confronto fra l'AlMg3 e la lega d'acciaio DD 13. Le leghe di alluminio della serie 5000 sono dette "Peralluman" ed hanno il magnesio come principale elemento di lega. Risultano particolarmente resistenti alla corrosione, hanno una buona resistenza al calore ed un'ottima duttilità e lavorabilità. Essendo più deformabili sono meno soggette a rottura a fatica del materiale. Le leghe d'acciaio DD invece presentano una maggiore resistenza allo snervamento e una maggiore resistenza a trazione, permettono inoltre di ottenere una finitura superficiale migliorata rispetto le leghe di alluminio ed hanno un'ottima resistenza all'usura; avere un buon tenore di carbonio garantisce inoltre indeformabilità al trattamento termico, penetrazione di tempra e capacità di taglio. Si ricorda che le norme di riferimento per le leghe di acciaio DD sono l'EN ISO 10111 [12] mentre per le leghe di alluminio l'EN ISO 573 [13].



**Figura 30: Confronto AlMg3 con DD13**

È possibile ottenere un buon effetto indurente tramite lavorazioni a freddo, si tratta infatti di leghe da incrudimento, le cui caratteristiche meccaniche, possono essere aumentate mediante questo tipo di lavorazioni. L'eccellente resistenza alla corrosione e le altre peculiarità appena descritte rendono queste leghe, in particolare l'AlMg3, ottime per la realizzazione di pulegge per pompa acqua.

## 2.5 Metodo di Tekkaya

Lo scopo di Tekkaya è stato quello di trovare una migliore correlazione tra la durezza Vickers HV e la tensione di snervamento. Egli è partito dall'equazione di Tabor [14]:

$$HV = \alpha * \sigma_y \quad (2.2)$$

Tabor ha proposto un'equazione, valida per materiali indurenti, che lega la durezza Vickers alla tensione di snervamento tramite una costante che ha valore compreso tra 2,5 e 3 ricavata empiricamente. Tekkaya si è accorto che in realtà il rapporto tra durezza Vickers e tensione di snervamento iniziale varia a seconda del valore di deformazione plastica equivalente.

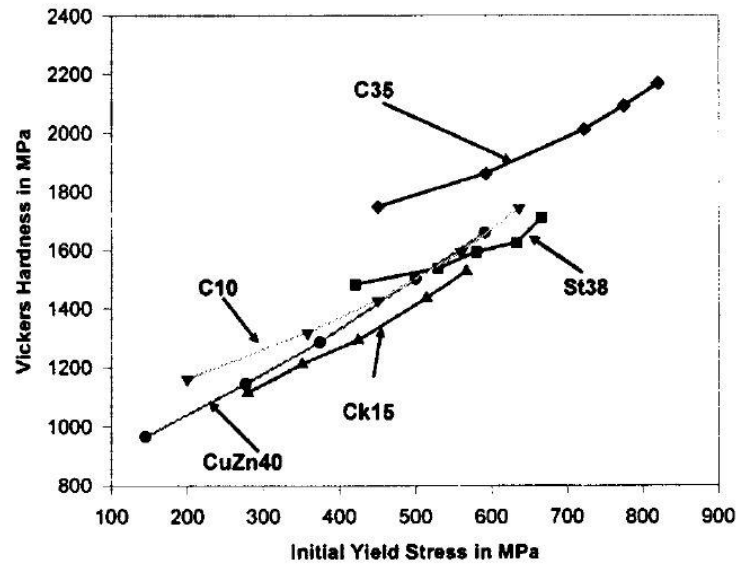


Figura 31: Variazione dei valori di durezza Vickers e tensione di snervamento di alcuni materiali [2]

Allora ha deciso di ricavare, in base al valore di durezza Vickers misurato mediante il calcolo FEM, una tensione di snervamento rappresentativa ad un certo offset (0,112) dalla deformazione plastica effettiva; a questo punto, si è accorto che la correlazione migliorava, riducendo al minimo l'errore (Figura 32).

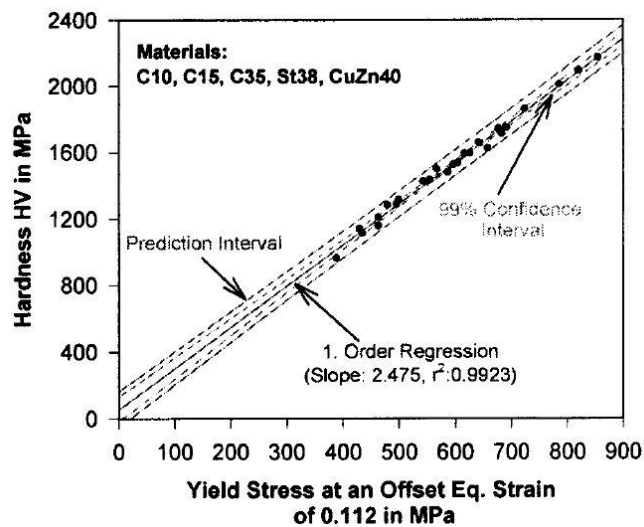


Figura 32: Correlazione tra la durezza Vickers e la tensione di snervamento ad un offset rispetto la deformazione plastica effettiva di 0,112 [2]

Fasi del metodo di Tekkaya:

1. Ottenere la curva di trazione del materiale da lavorare
2. Misurare la durezza Vickers localizzata dopo aver effettuato la formatura a freddo sul componente interessato
3. Calcolare la tensione di snervamento rappresentativa tramite questa formula:

$$Y_{rep} = \frac{9,81}{2,475} * HV \quad (2.3)$$

4. Calcolare la deformazione plastica equivalente di offset  $\varphi^*$  ricordando l'equazione di Hollomon [15] ( $Y = K * \varphi^n$ )
5. Calcolare la deformazione plastica equivalente effettiva tramite una regressione:

$$\varphi = \varphi^* - 0,112 \quad (2.4)$$

6. Calcolare la tensione di snervamento effettiva tramite l'equazione di Hollomon [15].

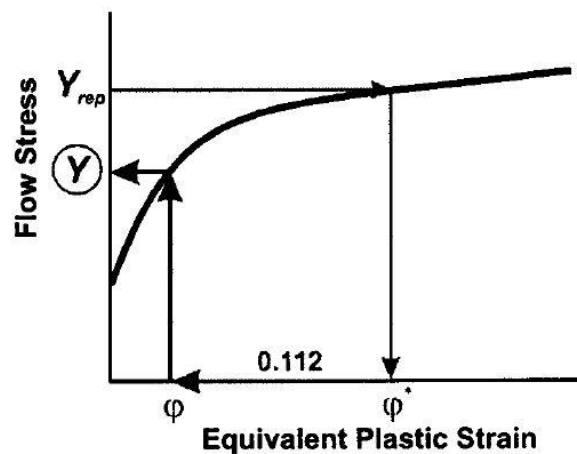


Figura 33: Determinazione della tensione di snervamento effettiva rappresentando la curva di trazione [2]



Per il presente lavoro di tesi ho utilizzato il metodo di Tekkaya per ricavarne le tensioni di snervamento effettive lungo lo spessore della puleggia, partendo dai valori di deformazione plastica equivalente di offset  $\varphi^*$  forniti dal software in seguito al calcolo FEM.

## 2.6 Metodo di Falsafi

Falsafi ha generato un metodo per stimare la durezza di una lamiera d'acciaio in seguito ad un appiattimento. Si parte da una lamiera con una forma particolare (vedi figura 34) che può essere discretizzata tramite FEM con elementi "shell" nelle zone laterali e nella zona centrale con elementi "brick", nello specifico si suddivide la lamiera in 4 zone.

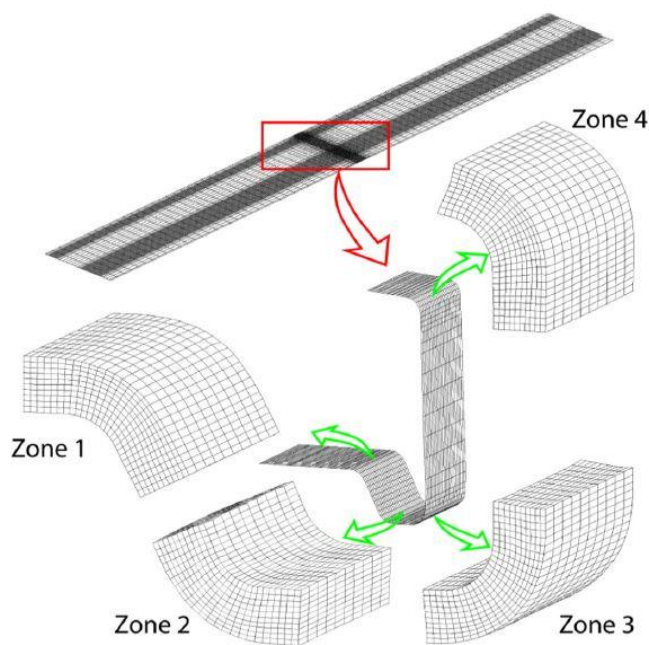
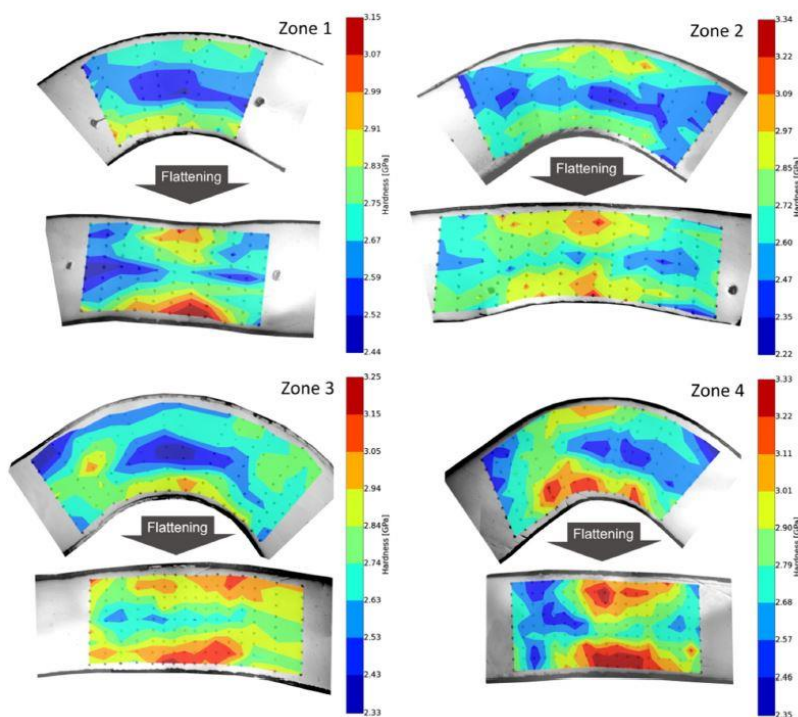


Figura 34: Lamiera discretizzata [3]

Simulare con elementi "shell" risulta più rapido in termini di tempo rispetto

all'utilizzo di elementi "brick", tuttavia gli elementi "shell" forniscono informazioni limitate sul comportamento del materiale. Appiattendolo le quattro zone con una spianatura, si nota lungo la linea media dello spessore una durezza minore rispetto le zone superficiali. Le cause sono da correlare al fatto che i grani sono di dimensioni maggiori lungo la linea media, e inoltre, le zone superficiali sono quelle che risentono maggiormente del contatto in seguito alla spianatura eseguita a freddo.



**Figura 35: Rappresentazione della durezza della lamiera nelle 4 zone pre e post spianatura [3]**

Falsafi ha proposto, ispirandosi agli studi del Tekkaya, l'equazione di Tabor (2.2). Con questa relazione ha potuto valutare il valore numerico della durezza ed in seguito, tramite l'equazione sotto riportata, ha calcolato il danno, inteso come plasticità residua:

$$D = 1 - \frac{H_i}{H_o} \quad (2.5)$$

Dove:  $D$  – danno

$H_i$  – durezza del materiale danneggiato

$H_o$  - durezza del materiale in assenza di danno.

Falsafi ha voluto dimostrare che, in seguito ad un opportuno processo di formatura (es. spianatura), la durezza del materiale di una lamiera varia e questa variazione è apprezzabile nel momento in cui si valuta il danno. Nel presente lavoro di tesi ho utilizzato il metodo di Falsafi per correlare le tensioni di snervamento effettive calcolate lungo lo spessore della puleggia ai valori di durezza.

## 2.7 Anderson-Darling test

Si basa sulla funzione di distribuzione empirica (EDF), nel valutare la normalità dei dati si compara la EDF, che viene stimata utilizzando i dati, con la funzione di distribuzione cumulata (funzione di ripartizione, CDF) di una distribuzione normale per valutare se c'è concordanza tra esse. Si ricorda che i test che utilizzano l'EDF rifiutano l'ipotesi nulla quando c'è troppa discrepanza tra le due funzioni di distribuzione. Il test prende il nome dai suoi autori Theodore Wilbur Anderson e Donald Darling, che lo svilupparono nel 1952 ed è una modifica del test Cramer-Von Mises (CVM) che differisce da esso per il fatto che quest'ultimo dà meno peso alle code della distribuzione. A differenza del CVM che è libero da distribuzioni, il test

AD fa uso di una specifica distribuzione teorica nel calcolo dei valori critici, pertanto è più sensibile del precedente; un inconveniente di questo test è che i valori critici devono essere calcolati per ogni specifica distribuzione. In questo test viene calcolata la distanza tra  $F^*(x)$  e  $F_n(x)$  per mezzo di:

$$n \int_{-\infty}^{\infty} [F_n(x) - F^*(x)]^2 \omega(x) dF^*(x) \quad (2.6)$$

Che è una media della distanza quadratica, ponderata da

$$\omega(x) = [F^*(x) * (1 - F^*(x))]^{-1} \quad (2.7)$$

Si nota che se quest'ultima è pari a 1 ci riduciamo alla statistica  $n\omega^2$  mentre nel caso generale la formula completa è questa

$$n \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{[F_n(x) - F^*(x)]^2}{[F^*(x)(1 - F^*(x))]} dF^*(x) \quad (2.8)$$

Siano  $X(1) \leq X(2) \leq \dots \leq X(n)$  le osservazioni ordinate di un campione di numerosità  $n$ , la statistica  $AD$  viene calcolata come

$$AD = -n - S \quad (2.9)$$

Dove

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{2i-1}{n} [\ln(\Phi(X_i)) + \ln(1 - \Phi(X_{n+1-i}))] \quad (2.10)$$

Il valore di  $AD$  deve essere modificato per piccole dimensioni del campione. Il valore di  $AD$  modificato è dato da

$$AD^* = AD * \left(1 + \frac{0.75}{n} + \frac{2.25}{n^2}\right) \quad (2.11)$$

L'ultimo valore da considerare è il  $p$  value, per calcolarlo ci sono differenti equazioni dipendenti dal valore di  $AD^*$ . Queste sono:

- Se  $AD^* \geq 0.6$  allora  $p = e^{(1.2937-5.709(AD^*)+0.0186(AD^*)^2)}$
- Se  $0.34 < AD^* < 0.6$  allora  $p = e^{(0.9177-4.279(AD^*)-1.38(AD^*)^2)}$
- Se  $0.2 < AD^* < 0.34$  allora  $p = 1 - e^{(-8.318+42.796(AD^*)-59.938(AD^*)^2)}$
- Se  $AD^* \leq 0.2$  allora  $p = 1 - e^{(-13.436+101.14(AD^*)-223.73(AD^*)^2)}$

Se, per esempio, il valore del  $p$  value è basso, quindi minore di 0.05 ed il valore di  $AD^*$  è superiore ad 1 si rifiuta l'ipotesi nulla. Se i dati provengono da una distribuzione normale, i punti dovrebbero cadere all'interno di un range prossimo alla retta; si vede che questo non è il caso della figura 36, ciò conferma che i dati non provengono da una distribuzione normale.

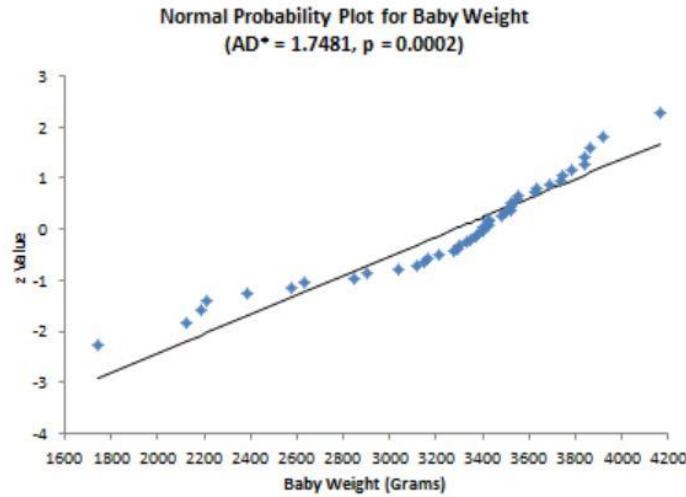


Figura 36: Primo esempio di test di Anderson-Darling [16]

Se, per esempio, il  $p$  value è maggiore di 0.05 ed il valore di  $AD^*$  è minore ad 1 non si può rifiutare l'ipotesi nulla che i dati provengono da una distribuzione normale. Il grafico della probabilità normale mostrato in figura 37 lo conferma.

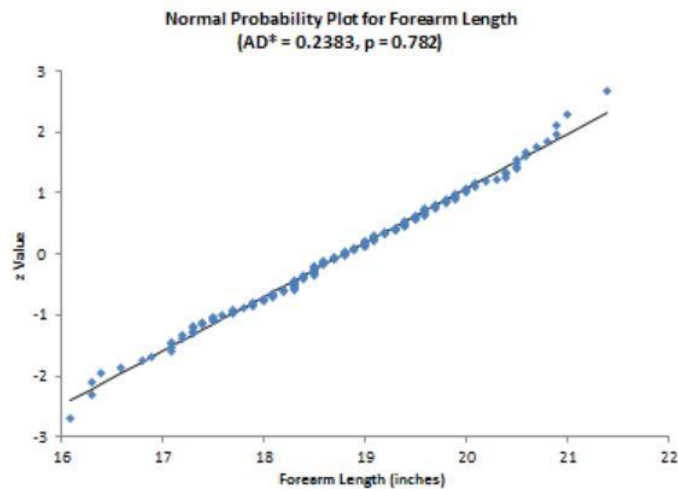


Figura 37: Secondo esempio di test di Anderson-Darling [16]

Per il seguente lavoro di tesi ho utilizzato l'Anderson-Darling test per correlare i risultati numerici a quelli sperimentali per dimostrare che fossero accettabili.

## 3 Risultati numerico-sperimentali

### 3.1 Materiale caratterizzato

L'obiettivo è stato quello di generare una raccolta dati che permettesse di riunire tutte le informazioni riguardanti le proprietà chimiche e meccaniche della lega di alluminio AlMg3 usata per la produzione della puleggia, ciò è stato possibile raccogliendo 47 certificati. Al loro interno, sono riportati i valori delle proprietà per ogni lotto ricevuto. Dopodiché, tramite il boxplot, è stata elaborata una rappresentazione grafica che rappresentasse la distribuzione dei campioni. Si ricorda che più campioni si hanno, più il boxplot risulta efficiente e permette di capire se la distribuzione è asimmetrica o simmetrica; esso viene anche detto “diagramma a scatola e baffi” in quanto è un grafico statistico e permette di individuare outliers e valori anomali. In Figura 38 viene rappresentato un tipico diagramma boxplot generato per questa analisi, con tutti i parametri che lo rappresentano:

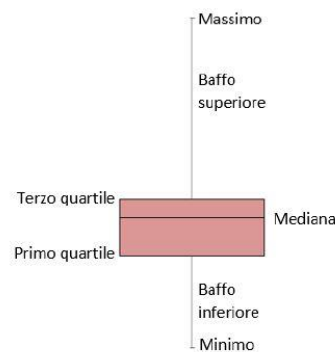


Figura 38: Esempio di boxplot [17]

Si specifica, di seguito, il significato di tali parametri:

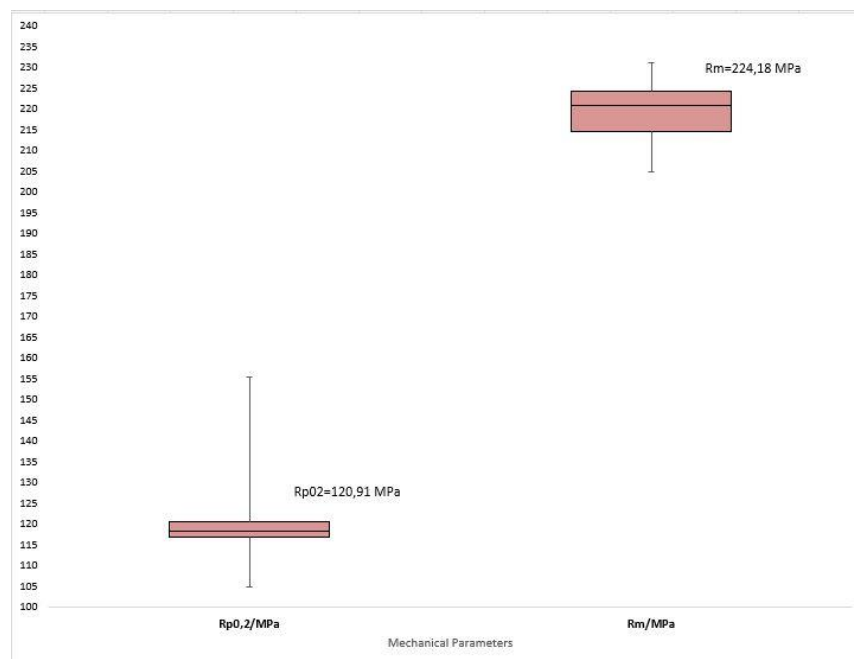
- Minimo e Massimo: considerando l'intervallo di dati, rappresentano rispettivamente il valore minimo e quello massimo.
- Mediana: rappresenta il valore medio della distribuzione
- Primo quartile: rappresenta il limite superiore del range entro il quale sono compresi il 25% dei dati della distribuzione
- Terzo quartile: rappresenta il limite superiore del range entro il quale sono compresi il 75% dei dati della distribuzione

Il boxplot è stato ricavato per i seguenti parametri illustrati:

- Carico di snervamento
- Carico di rottura
- Allungamento percentuale misurato utilizzando un estensimetro da 5 mm
- Allungamento percentuale misurato utilizzando un estensimetro da 50 mm
- Valore percentuale di elementi chimici contenuti nella lega

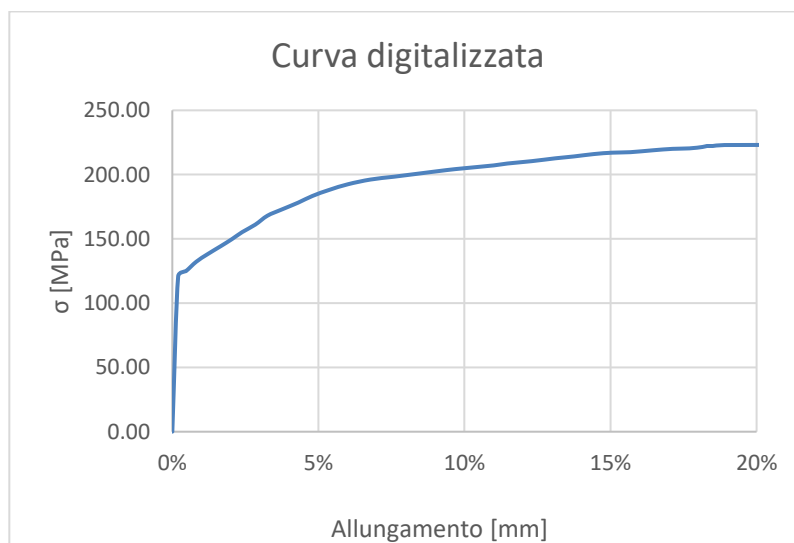
Per queste proprietà appena descritte è stato generato il boxplot per capire all'interno della distribuzione dati dove si posizionasse il lotto utilizzato nelle prove eseguite in laboratorio. In figura 39 viene riportato il boxplot riferito al carico di snervamento e al carico di rottura.





**Figura 39: Boxplot con carico di snervamento e carico di rottura, valori espressi in MPa [17]**

Dopo aver ricavato tutti i boxplot, è stata digitalizzata la curva di trazione visibile nella figura 40.

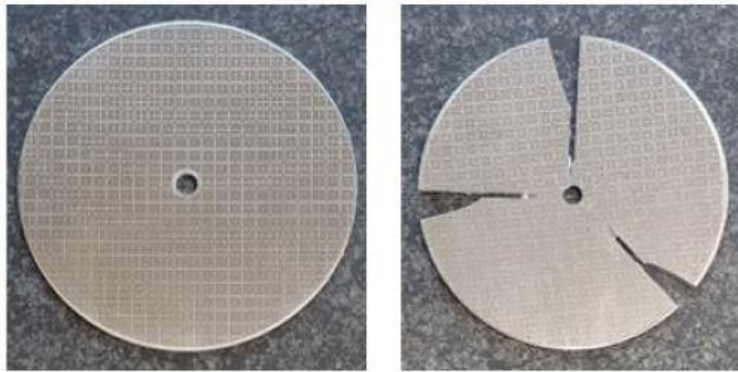


**Figura 40: Curva di trazione digitalizzata**

Questa curva e le caratteristiche meccaniche sono state utilizzate per generare la scheda del materiale della puleggia creata nel software COLDFORM.

### 3.2 Mappe di micro-durezza

In questo paragrafo sono state illustrate le fasi che hanno portato alla creazione delle mappe di micro-durezza. Si è partiti dal disco iniziale e, mediante l'uso della troncattrice, sono stati ottenuti tre elementi del disco come rappresentato in figura 41; infine, sono stati ricavati i provini.



**Figura 41: Disco prima e dopo l'estrazione dei campioni**

Guardando la figura 42, si capisce il motivo per il quale i campioni sono stati ricavati in questo modo; ciò è collegato al fatto che le mappature di micro-durezza devono essere eseguite sulla superficie interna al disco. In particolare, si ricorda che lo studio si vuole eseguire in prossimità della zona di tranciatura, di conseguenza, dato che il diametro esterno del disco è caratterizzato da tale lavorazione (figura 42), sono stati ricavati i provini nei pressi del diametro esterno.



**Figura 42: Indicazione delle superfici**

Prima di poter eseguire le mappature, sono stati ricavati gli elementi necessari; questi sono stati inglobati e lucidati in modo da avere pronte le superfici dei provini da analizzare. In figura 43 viene riportato un campione sul quale è stata eseguita una delle mappe, si evidenziano le note in giallo importanti per comprendere la mappa di micro-durezza che verrà riportata in seguito. Nella figura 43 (a) si nota che il lato situato in alto rispetto al centro del provino è quello in cui è avvenuta la tranciatura; invece, nella figura 43 (b) si notano le quattro zone tipiche del processo di tranciatura citate nel paragrafo 1.1. . [17]

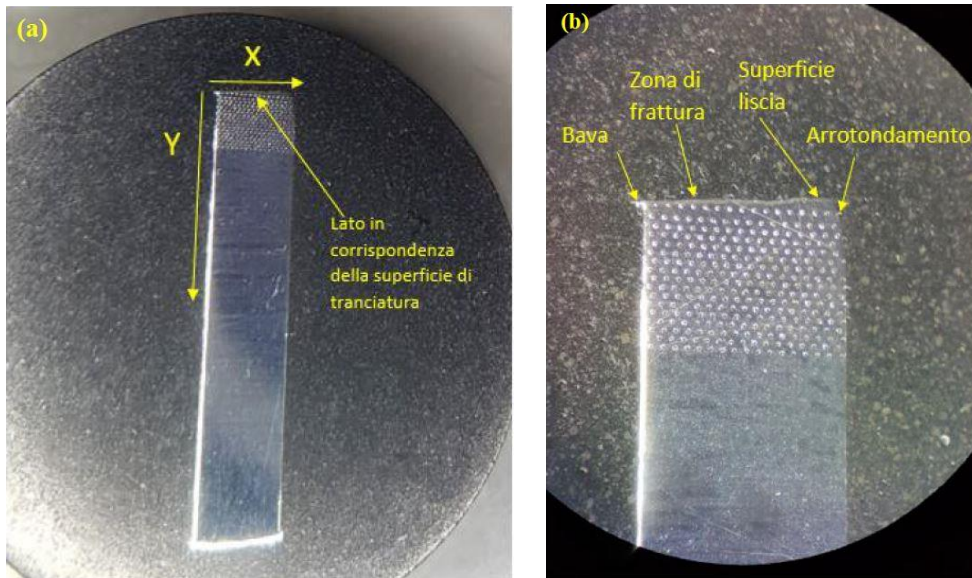


Figura 43: (a) riferimenti; (b) zone caratteristiche del processo di tranciatura [17]

Nella mappa ricavata la distanza tra le impronte è pari a tre volte il valore della diagonale di riferimento, essa è rappresentata nella figura 44.

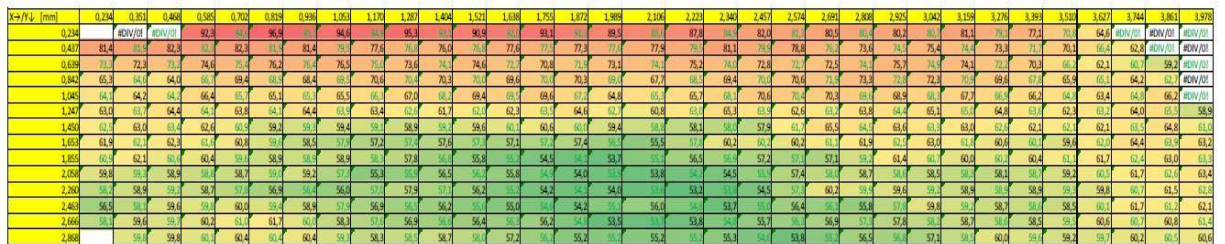
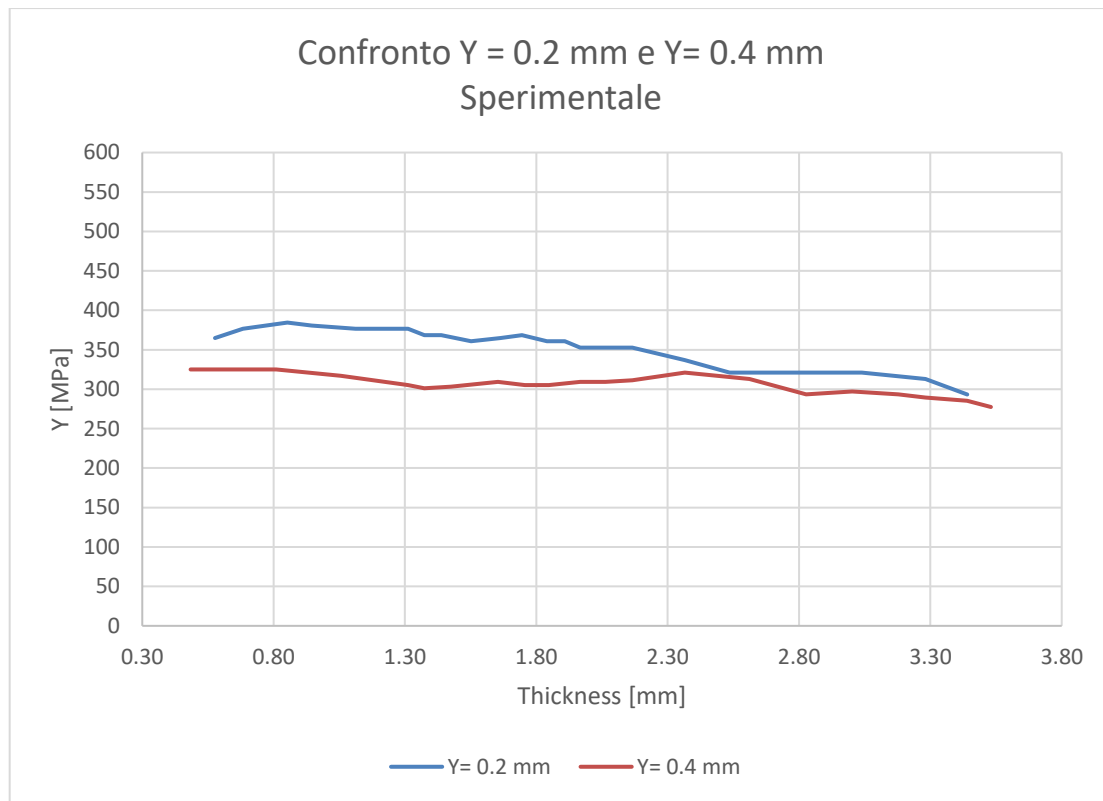


Figura 44: Mappa di micro-durezza, valori di durezza in MPa, X e Y in mm [17]

La mappa di micro-durezza è stata eseguita seguendo la UNI EN ISO 6507-1:2018 [10]. La quantità di superficie analizzata è stata di: 3 mm lungo Y e 4 mm lungo X. Dai risultati rappresentati in figura 44 si evidenzia come una lavorazione di tranciatura influenza maggiormente i valori di durezza prossimi alla superficie tranciata rispetto, invece, i valori ottenuti lungo il verso delle Y crescenti; infatti, si

può notare come in quei punti le misure risultano meno influenzate. Inoltre, nelle zone dove la lavorazione di tranciatura ha minore influenza, si evidenzia un andamento dei valori di durezza ben definito; maggiori in corrispondenza delle superfici del disco e minori al cuore. A questo punto l'obiettivo è stato quello di correlare i valori di durezza calcolati a valori di tensione di snervamento; per farlo, si è fatto riferimento al metodo di Falsafi citato nel capitolo 2. Si ricorda che nel caso delle leghe di alluminio, a differenza degli acciai, non esiste una correlazione tra la tensione di snervamento e valori di durezza grazie a tabelle standard di conversione come quelle riportate nella EN ISO 18265 [18]. Per questo motivo si è fatto riferimento agli studi del Falsafi [3] ed in particolare all'equazione di Tabor [14] (2.2). Avendo tutti i valori di durezza ed avendo la costante  $\alpha$  sono stati calcolati tutti i valori di tensione di snervamento d'interesse utili per effettuare il confronto con i risultati ottenuti dall'analisi FEM. Si riportano nella figura 47 i valori ottenuti ad  $Y=0.2$  mm e  $Y=0.4$  mm al variare di  $X$  che rappresenta lo spessore del disco. Si nota come i valori delle tensioni di snervamento in corrispondenza di  $Y=0.2$  mm risultano più elevati rispetto quelli a  $Y=0.4$  mm in quanto si è più vicini alla superficie tranciata, ciò conferma quanto detto precedentemente con i valori di durezza.



**Figura 45: Confronto valori di snervamento a  $Y = 0.2 \text{ mm}$  e  $Y = 0.4 \text{ mm}$  (caso sperimentale)**

### 3.3 Simulazione del processo di tranciatura

La simulazione di questo processo è stata realizzata mediante il software COLDFORM. Innanzitutto, è stato definito il problema andando a schematizzare i quattro componenti che intervengono nel processo di formatura a freddo: matrice, premilamiera, puleggia e punzone. Essi possono essere creati sul software stesso oppure importati dal software Autocad. Si fa in modo che il punzone ed il premilamiera siano a contatto con il disco e che la matrice sia a contatto con il premilamiera. Si nota nella figura 46 come tutti gli elementi raffigurati siano assialsimmetrici sia per semplificare il problema sia per velocizzare il calcolo

effettuato.

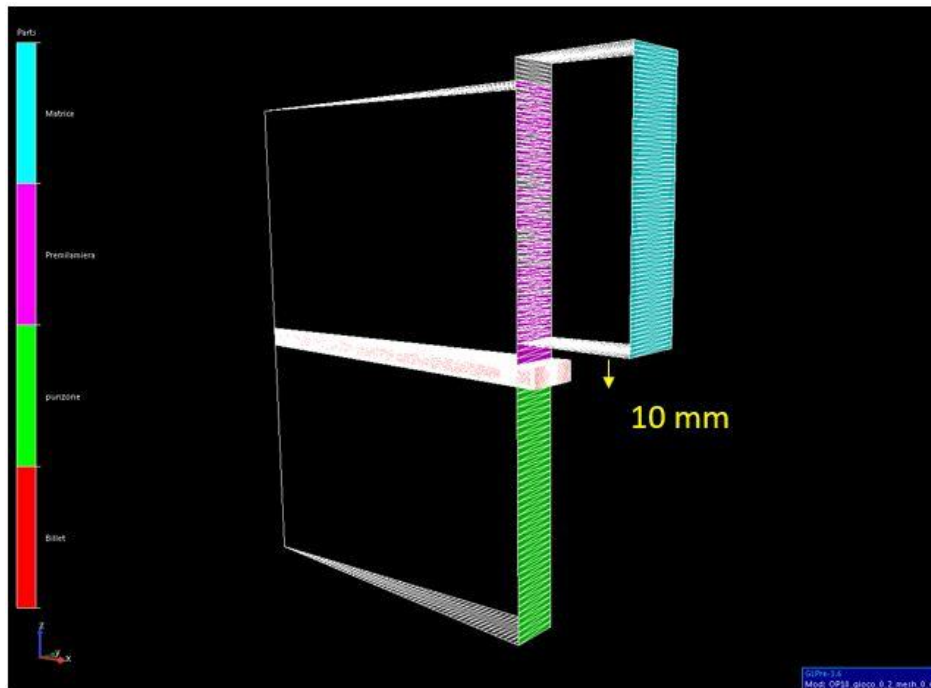


Figura 46: Schematizzazione del problema

Definiamo la corsa della matrice pari a 10 mm. Per avere una buona tranciatura occorre avere un gioco tra punzone e matrice, esso dipende dallo spessore del disco considerato e dalla qualità della lamiera. In questo caso è stato considerato un gioco ottimale pari a 0.2 mm, utilizzando delle norme interne per lo stampaggio. Si ricorda che in base al gioco impostato variano le dimensioni della zona di piegatura, della zona lucida, della zona di frattura e di quella di bava.

### 3.3.1 Definizione della scheda materiale in COLDFORM

È stata creata la scheda materiale in COLDFORM inserendo le caratteristiche meccaniche della puleggia. I dati sono stati ricavati tramite un database dell'azienda in seguito alla creazione dei boxplot. Il materiale considerato è l'AlMg3. In base a

questi parametri in ingresso il software si calcola in automatico la curva di trazione. Calcola non solo la sollecitazione ingegneristica in funzione della deformazione ma anche quella vera. Nella figura 47 è rappresentato l'andamento della curva di trazione vera, in particolare viene rappresentato il tratto plastico.

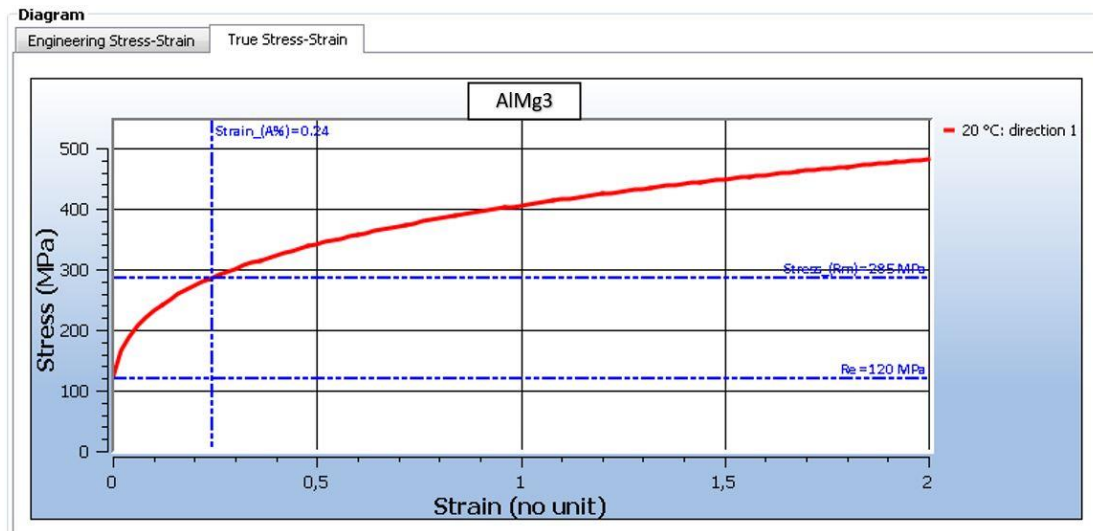


Figura 47: Rappresentazione della curva di trazione vera in funzione della deformazione

In COLDFORM è possibile descrivere il comportamento reologico del materiale attraverso i coefficienti di Hansel-Spittel. Il modello di Hansel-Spittel [19] è descritto attraverso la formula seguente:

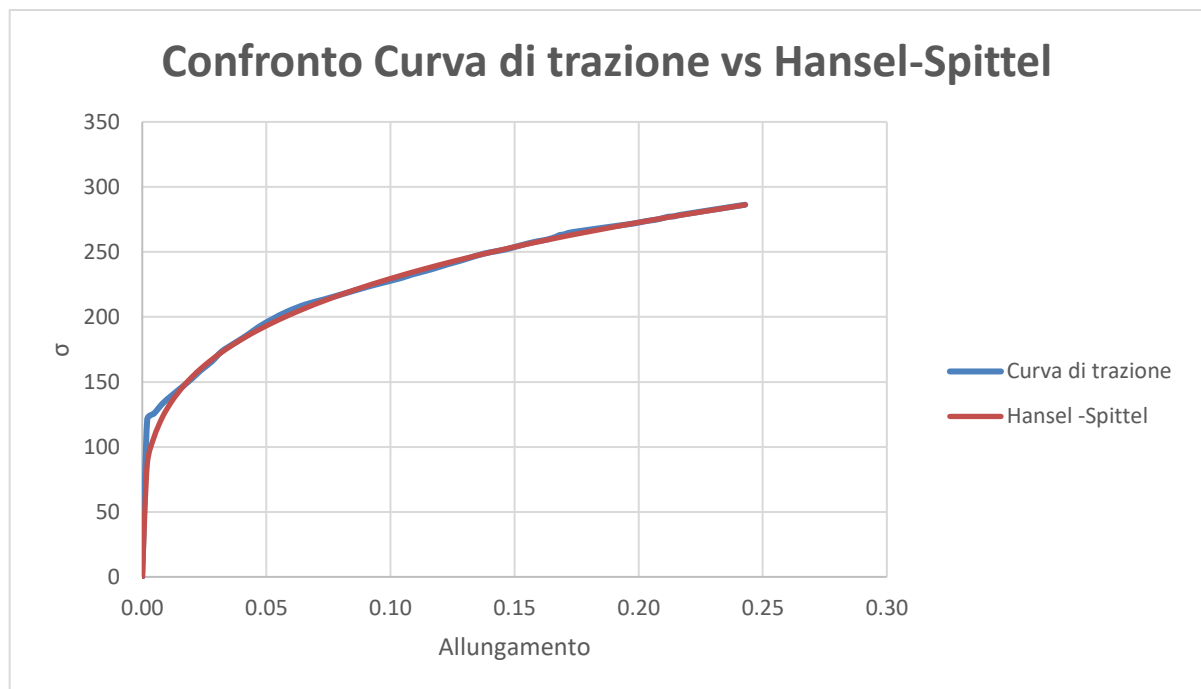
$$\sigma = A * e^{m1T} * \varepsilon^{m2} * \dot{\varepsilon}^{m3} * e^{\frac{m4}{\varepsilon}} * (1 + \varepsilon)^{m5t} * e^{m7\varepsilon} * \dot{\varepsilon}^{m8T} * T^{m9} \quad (3.1)$$

Dove  $\varepsilon$  equivale alla deformazione, mentre  $\dot{\varepsilon}$  è la velocità di deformazione. Trattandosi di prove a freddo, molti coefficienti del modello di Hansel-Spittel si possono omettere, prendendo in considerazione solo A e m2. Il modello si riduce alla seguente espressione, nonché l'equazione di Hollomon [15]:



$$\sigma = A * \varepsilon^{m2} = K * \varepsilon^n \quad (3.2)$$

K ed n sono stati calcolati tramite un foglio di calcolo implementato in Excel, rispettivamente rappresentano il coefficiente di resistenza e quello di incrudimento. Si può notare come attraverso questi due parametri è stato possibile far coincidere la curva di trazione rossa con quella blu (figura 48). Questo passaggio è di fondamentale importanza in quanto lo scopo finale è quello di certificare l'identità del materiale utilizzato per la simulazione con quello usato per la prova di trazione.



**Figura 48: Confronto curva di trazione numerica vs sperimentale**

### 3.3.2 Parametri di processo

Per quanto riguarda i parametri di processo sono stati impostati i seguenti valori:

- Temperatura: è stata impostata a 20°C, in quanto è una lavorazione a freddo, cioè avviene a temperatura ambiente.
- Attrito: il coefficiente di attrito è stato impostato tra matrice e premilamiera, e tra matrice e puleggia; è stato scelto un valore di attrito proposto dalla libreria del software COLDFORM. Per definire l'attrito viene utilizzata la legge di Coulomb:

$$\mu = \tan\Phi = \frac{R_a}{R_n} \quad (3.3)$$

ove  $\mu$  rappresenta l'angolo compreso fra la risultante e la componente normale  $R_n$  (figura 49).

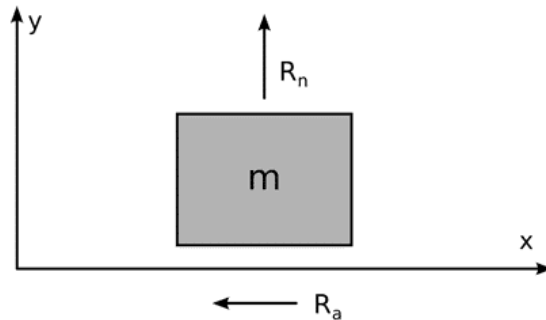


Figura 49: Esempio di massa sulla quale agisce attrito

- Leggi del moto: sono state inserite per definire il movimento della matrice e del premilamiera. La legge del moto della matrice è stata calcolata in base alla pressa utilizzata in azienda, quella del premilamiera, invece, dipende dai cilindri che permettono il contatto di quest'ultimo con la puleggia.

Come criterio di calcolo per il danno è stato utilizzato il criterio di Rice-Tracey [20].

Essi hanno identificato nel processo di nucleazione, crescita e coalescenza di microvuoti il meccanismo attraverso cui la rottura duttile si sviluppa in un metallo. Si riporta di seguito l'equazione:

$$\dot{R}_k = R_0 * [\gamma \dot{\epsilon} + D \dot{p}] \quad (3.3) \quad \text{Legge di crescita del vuoto}$$

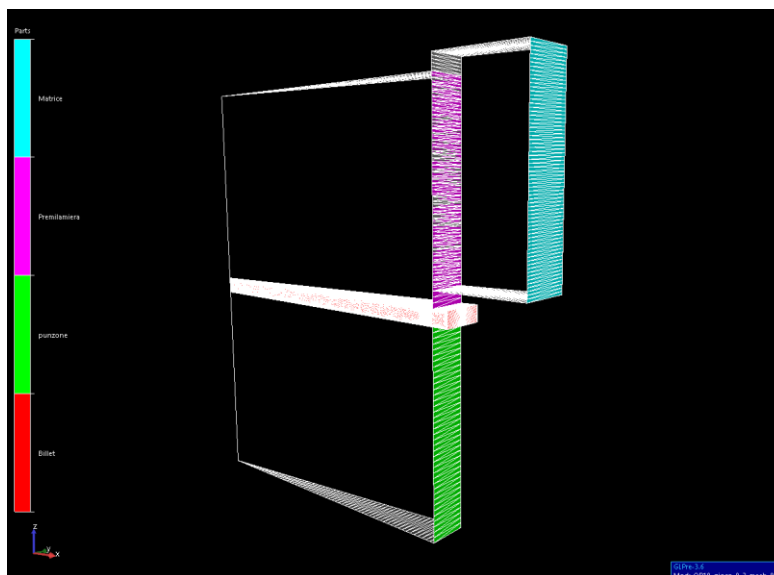
Ove:  $\gamma$  – variazione di forma      $D$  – variazione di volume      $R_0$  – vuoto iniziale

$\dot{p}$  - deformazione plastica equivalente      $\dot{\epsilon}$  - velocità di deformazione

### 3.3.3 Definizione mesh

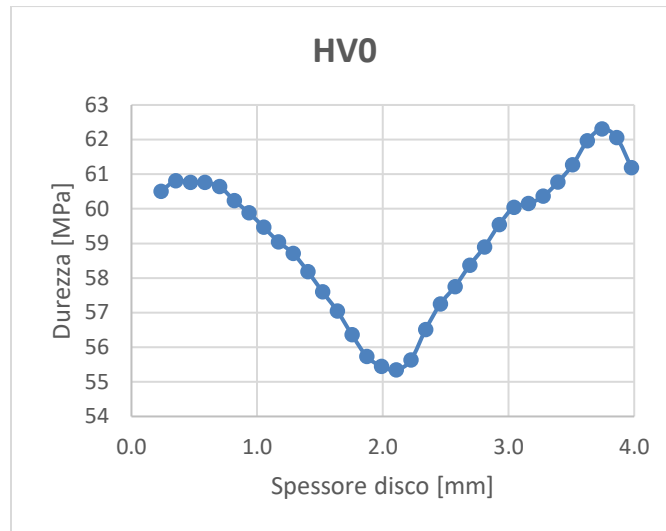
Un parametro fondamentale riguardante la simulazione è sicuramente la definizione della mesh. Il metodo agli elementi finiti si basa su una tecnica di calcolo atta a cercare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali e da derivate parziali, riducendo queste ultime in un sistema descritto da equazioni algebriche. COLDFORM utilizzando questo metodo di calcolo si presta molto bene a risolvere equazioni e derivate parziali quando il dominio ha una forma complessa e variabile. La mesh quindi, è la parte unitaria con cui viene suddiviso il componente da studiare. Su ciascun elemento caratterizzato da questa forma elementare, la soluzione del problema è espressa dalla combinazione lineare di funzioni, dette, funzioni di base o funzioni di forma. In ambiente COLDFORM si è discretizzato creando una mesh di superficie costante per il premilamiera, il punzone e la matrice. Su questi elementi è stata eseguita una mesh di superficie e non di volume perché hanno un'importanza secondaria ai fini della simulazione. L'interesse principale s'incentra soprattutto sulla puleggia; infatti, su di essa, si è discretizzato creando una

mesh di volume di taglia 0.4 mm (Figura 51), in particolare, nella sua zona esterna dove avviene la tranciatura è stato inserito un valore pari a 0.2 mm.



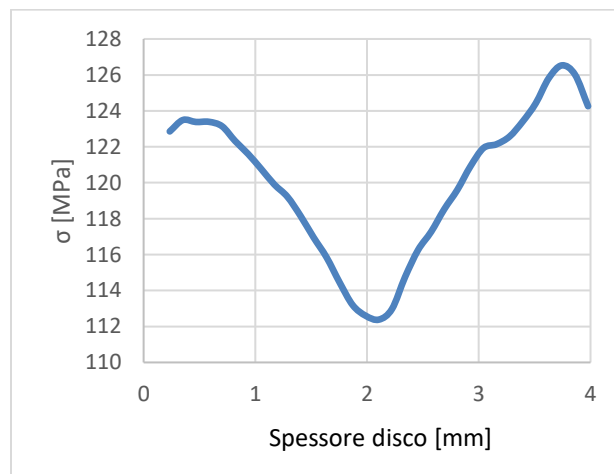
### 3.3.4 Definizione del Pre-strain

La mappa di micro-durezza riportata nel paragrafo 3.2 rappresenta esattamente il valore che la durezza assume nei diversi punti. Questi valori non dipendono solamente dalla lavorazione di tranciatura che viene effettuata sulla puleggia ma anche dalle operazioni realizzate precedentemente. L'obiettivo è quello di analizzare in maniera precisa la sola tranciatura, occorre, quindi, generare un riferimento che tiene in considerazione tutte le lavorazioni precedenti a questa, una volta ottenuto, bisognerà legare le mappe di micro-durezza al riferimento per verificare, infine, come variano i valori di durezza post tranciatura. Il riferimento di cui si è parlato, non è un singolo valore di durezza ma è un intero profilo nella direzione dello spessore. Grazie all'utilizzo di 3 differenti provini, sui quali sono state eseguite in totale 21 righe di impronte, è stato ottenuto il profilo di riferimento. La posizione delle righe risulta distante dalla zona influenzata dalla tranciatura in modo da non compromettere le misurazioni. Come risultati sono stati ottenuti dei valori di durezza minori in corrispondenza del cuore del disco e maggiori in corrispondenza delle due superfici del disco. Ricordando l'equazione di Hall-Petch che afferma che esiste una proporzionalità inversa fra la dimensione dei grani e la tensione di snervamento e ricordando l'equazione di Tabor (2.2) si può affermare che questo risultato è dovuto alla dimensione dei grani, essi risultano di dimensioni maggiori nella zona centrale del disco rispetto le zone superficiali. Dei 21 profili tracciati è stata quindi eseguita una media dei valori di durezza in modo da ottenere un profilo di riferimento robusto che fosse rappresentativo del materiale non alterato dal processo di tranciatura (figura 52).



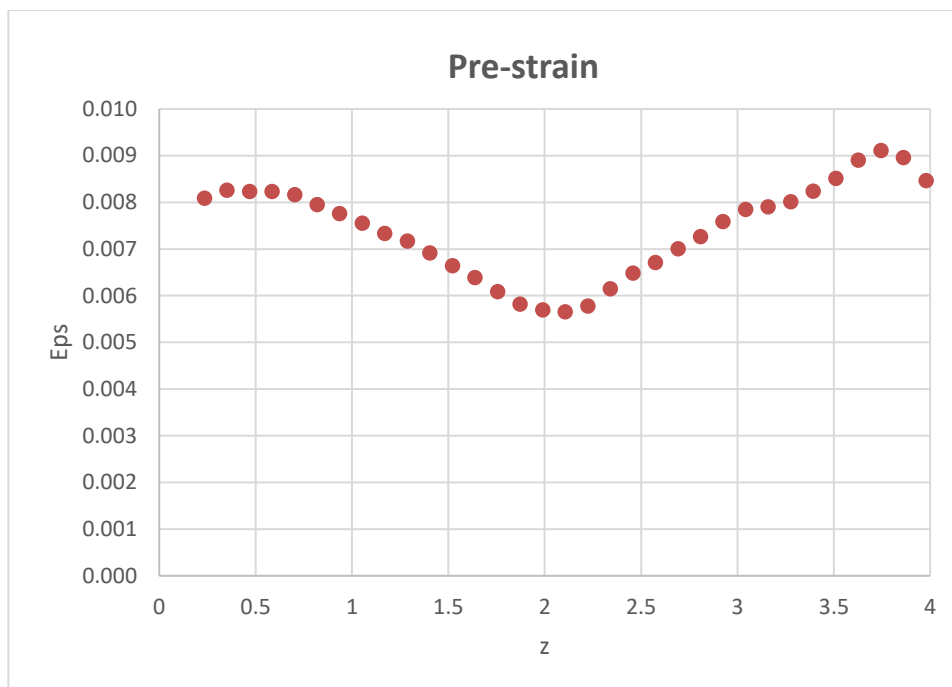
**Figura 52: Valori di durezza HV0 lungo lo spessore del disco pre-tranciatura**

Dopodiché tramite l'equazione di Tabor (2.2) è stato calcolato il valore corrispondente della tensione di snervamento (figura 53).



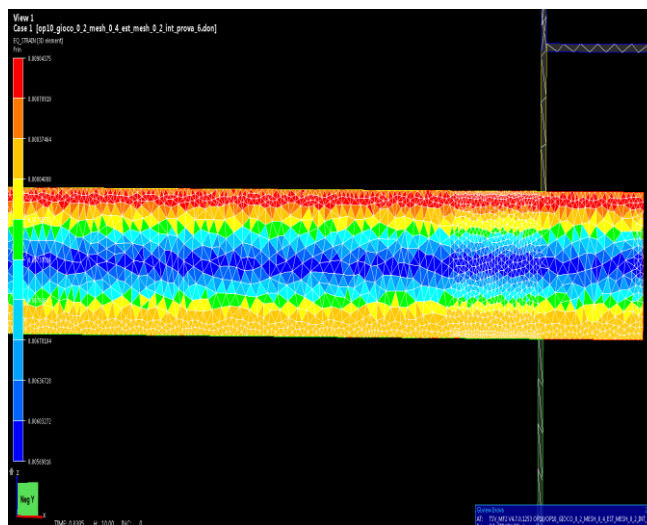
**Figura 53: Valori della tensione di snervamento lungo lo spessore del disco pre-tranciatura**

Ricordando l'equazione di Hollomon (3.2); è stato calcolato, infine, il pre-strain; ovvero la deformazione plastica intrinseca alla puleggia prima di subire la lavorazione di tranciatura (figura 54).



**Figura 54: Valori di deformazione plastica lungo lo spessore del disco pre-tranciatura**

In seguito tramite una funzione del software COLDFORM è stato possibile considerare il pre-strain nella puleggia prima di subire la tranciatura (figura 55).



**Figura 55: Andamento pre-strain nella puleggia**

Si nota dalla figura 55 come i valori minimi di deformazione plastica siano in

corrispondenza della mezzeria del disco; ciò conferma quanto detto precedentemente con la durezza, quindi a valori minimi di durezza corrispondono valori minimi di deformazione plastica e viceversa.

### 3.3.5 Risultati della simulazione di tranciatura

A simulazione ultimata sono stati elaborati i dati ottenuti. Da questi dati è possibile estrapolare i valori delle tensioni secondo Von Mises (figura 56) ma soprattutto i valori di deformazione plastica equivalente (figura 57) che sono stati utilizzati per ricavare i valori di tensione di snervamento numerici.

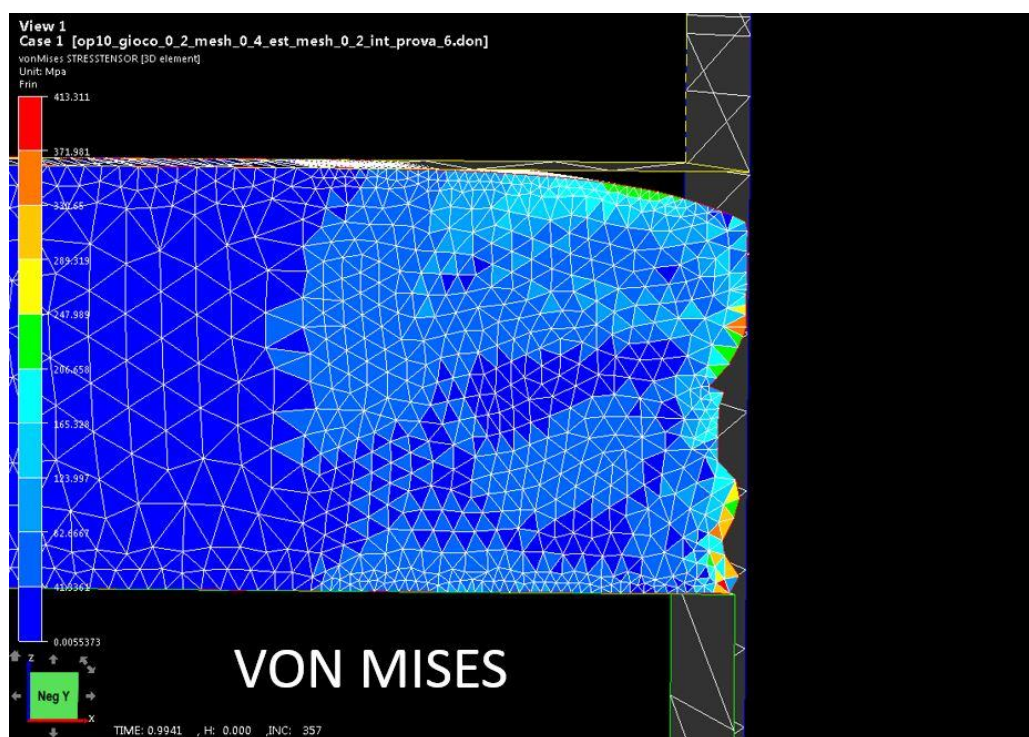
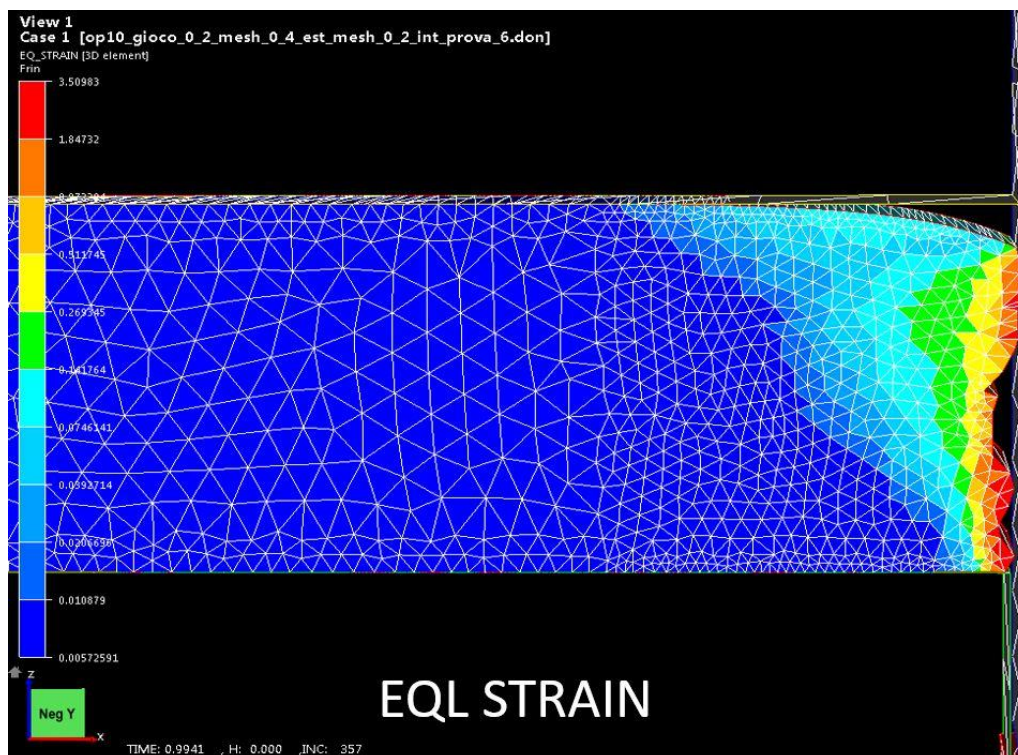


Figura 56: Andamento delle sollecitazioni di Von Mises





**Figura 57: Andamento della deformazione plastica equivalente**

Ricordando il metodo di Tekkaya si possono interpretare i valori di deformazione plastica ricavati come di “offset”, quindi  $\varphi^*$ . Dopodiché applicando la regressione (2.4) e usando l’equazione di Hollomon (3.2), sono stati ottenuti i valori di tensione di snervamento numerici, in particolare quelli ad  $Y=0.2$  mm (figura 58) e  $Y=0.4$  mm (figura 59) dal bordo esterno del disco tranciato.

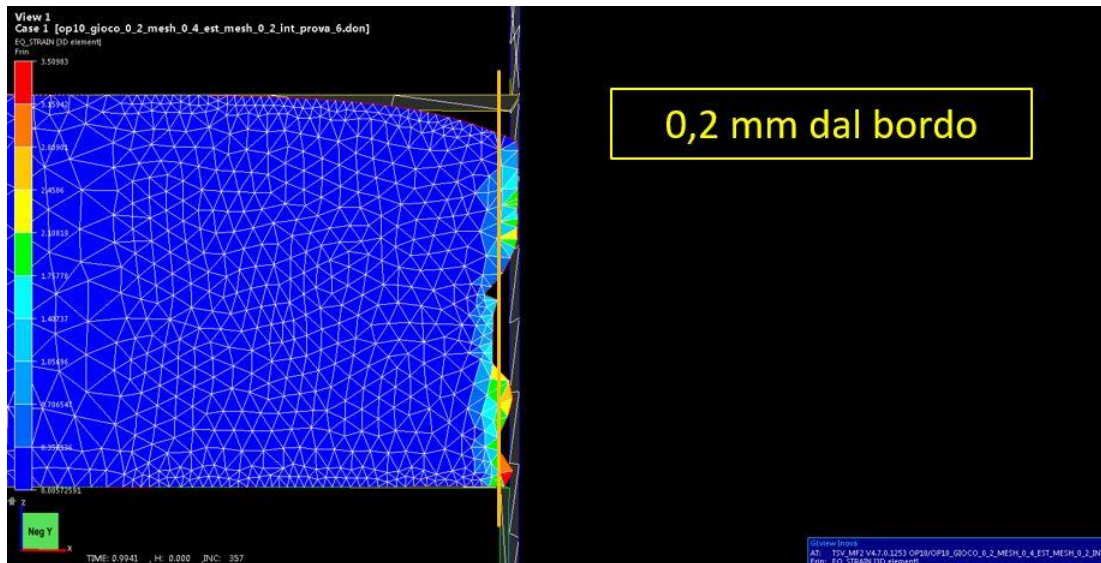


Figura 58: Y= 0.2 mm

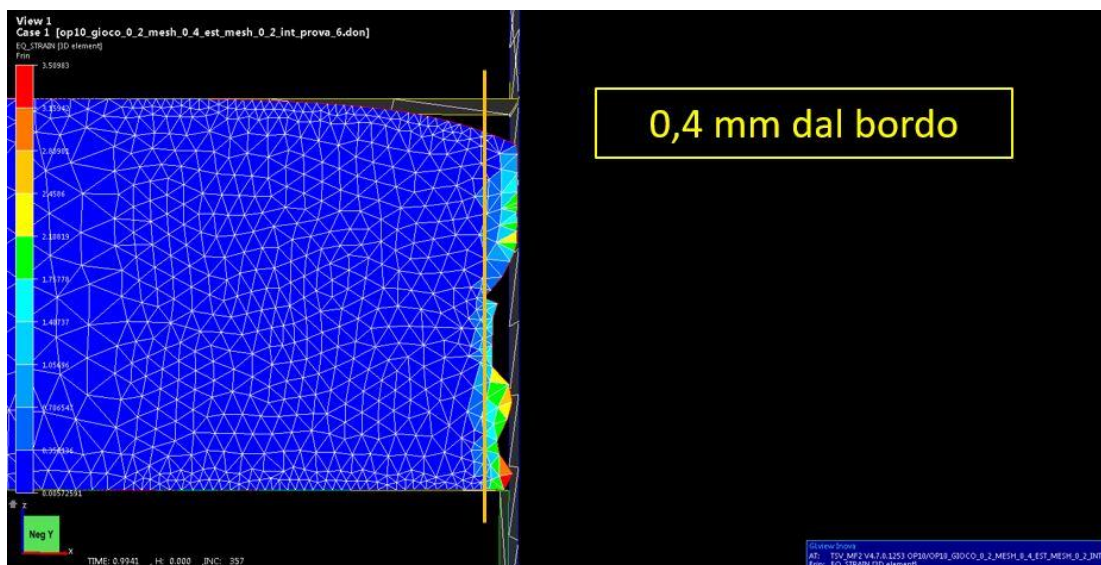
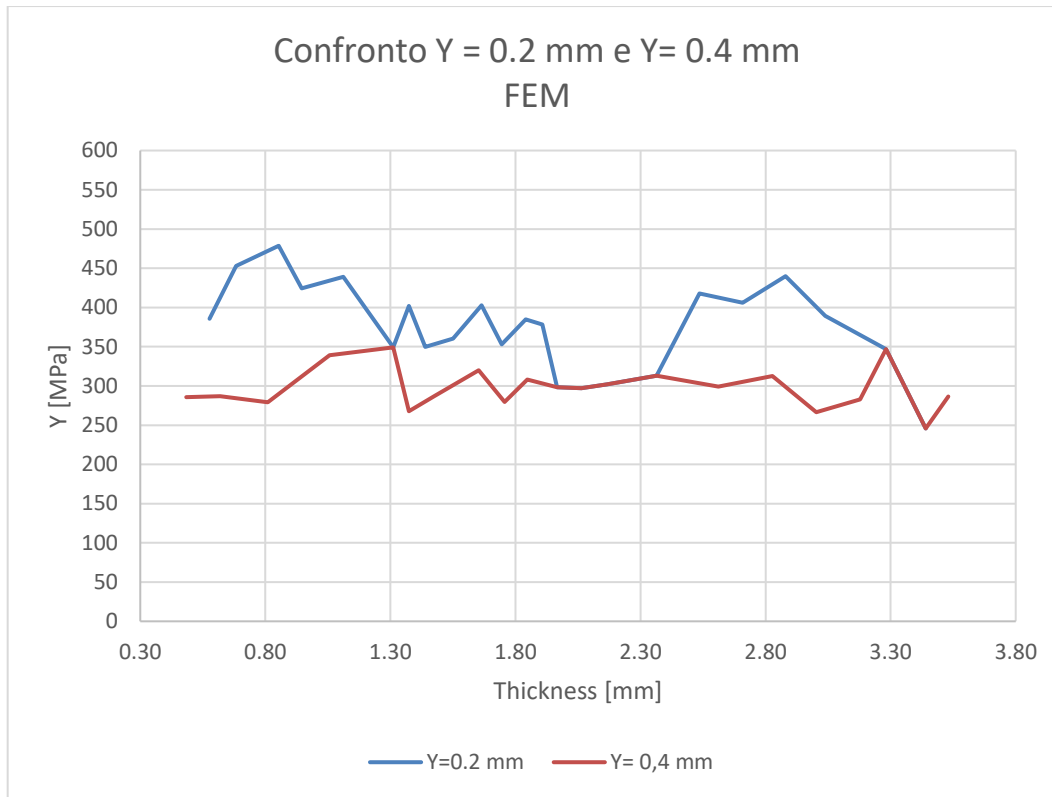


Figura 59: Y= 0.4 mm

Infine, è stato effettuato un confronto fra i valori di tensione di snervamento numerici ottenuti ad  $Y = 0.2 \text{ mm}$  e  $Y = 0.4 \text{ mm}$  per vedere se quelli più vicini al bordo risultassero, in media, più elevati come nel caso sperimentale, dando riscontro positivo (figura 60). Il motivo, ovviamente, è dovuto al fatto che si è più vicini alla superficie tranciata.



**Figura 60: Confronto  $Y=0.2 \text{ mm}$  e  $Y=0.4 \text{ mm}$  nel caso numerico**

### 3.4 Simulazione del processo di imbutitura

La simulazione di questo processo avviene in due fasi, infatti si parla di prima imbutitura e di seconda imbutitura. Esse sono due operazioni svolte in successione dopo la tranciatura e sono realizzate con due tipologie di presse differenti. Per quanto riguarda i parametri di processo sono stati impostati gli stessi valori di temperatura ed attrito scelti per la tranciatura, gli unici parametri differenti riguardano le leggi del moto. Essendo diverse le presse, le leggi del moto per definire il movimento della matrice variano. Sono differenti anche le leggi del moto del premilamiera in quanto i cilindri che permettono il contatto di quest'ultimo con la puleggia cambiano. La mesh

è stata definita come nel caso dell'operazione di tranciatura e, per quanto riguarda il pre-strain, il software COLDFORM tiene conto della tranciatura subita precedentemente dalla puleggia, quindi, l'andamento della deformazione plastica lungo lo spessore è diversa (figura 61).

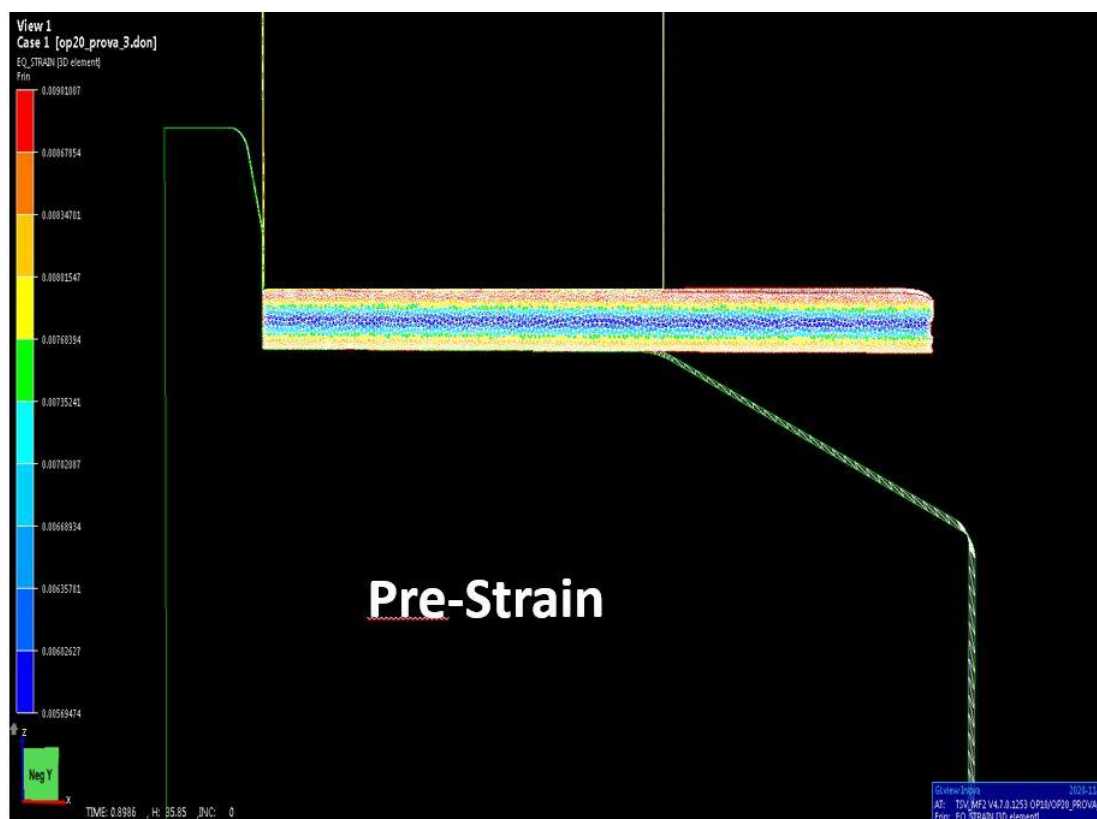
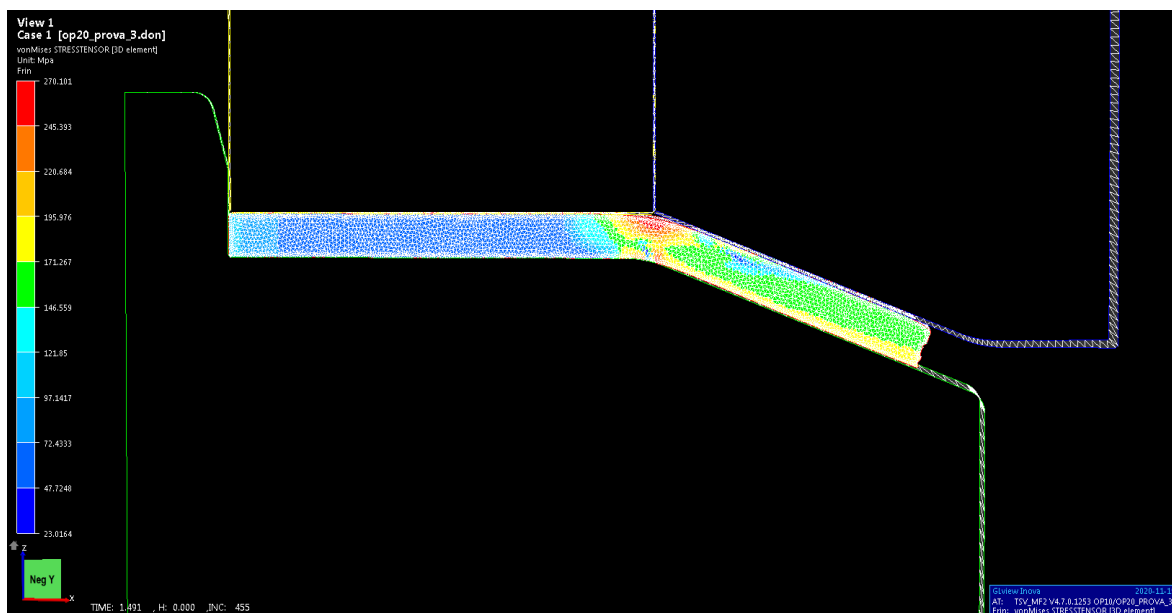
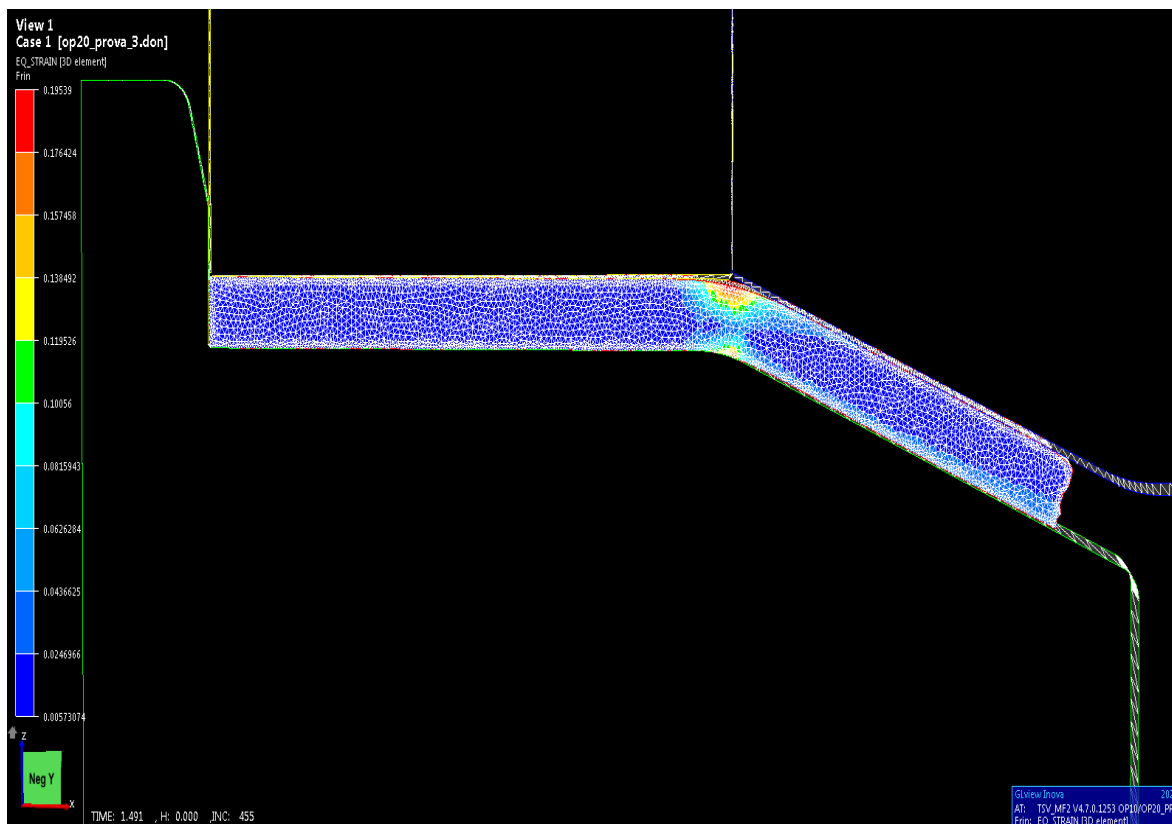


Figura 61: Andamento pre-strain sul processo di prima imbutitura

Si riportano in seguito i risultati della simulazione del processo di prima imbutitura, in particolare, l'andamento delle tensioni secondo Von Mises (figura 62) e della deformazione plastica equivalente (figura 63) lungo il disco.

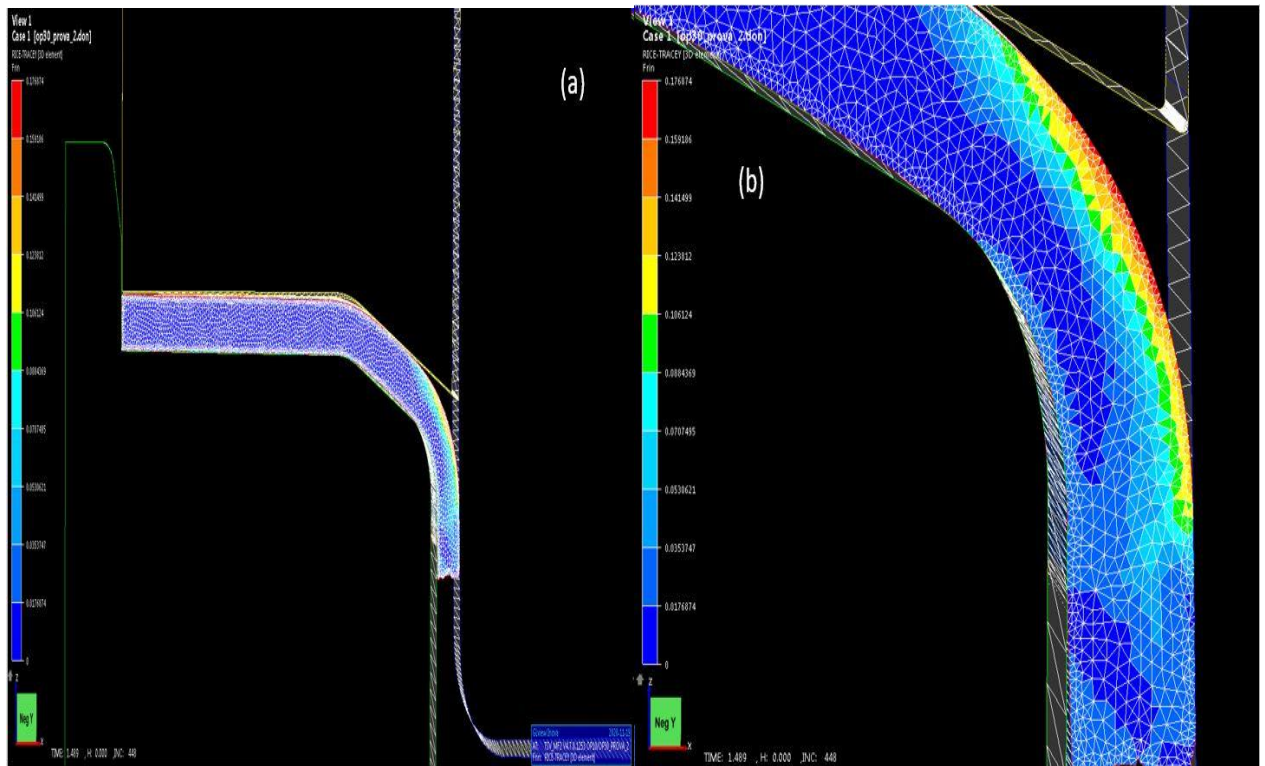


**Figura 62: Andamento delle  $\sigma$  di Von Mises dopo il processo di prima imbutitura**



**Figura 63: Andamento della deformazione plastica equivalente dopo il processo di prima imbutitura**

Dopodiché è stata realizzata la simulazione del processo di seconda imbutitura che risulta l'ultima lavorazione di formatura importante che subisce la puleggia; per questo motivo, in questo caso, è stato calcolato anche il danno secondo il criterio di Rice-Tracey (figura 64 a) oltre l'andamento della tensione secondo Von Mises (figura 65) e quello della deformazione plastica equivalente (figura 66). Il software COLDFORM, quindi, permette di predire qual è la zona del disco più danneggiata e quindi più a rischio per una rottura precoce (figura 64 b).



**Figura 64: Andamento del danno di Rice-Tracey dopo il processo di seconda imbutitura**



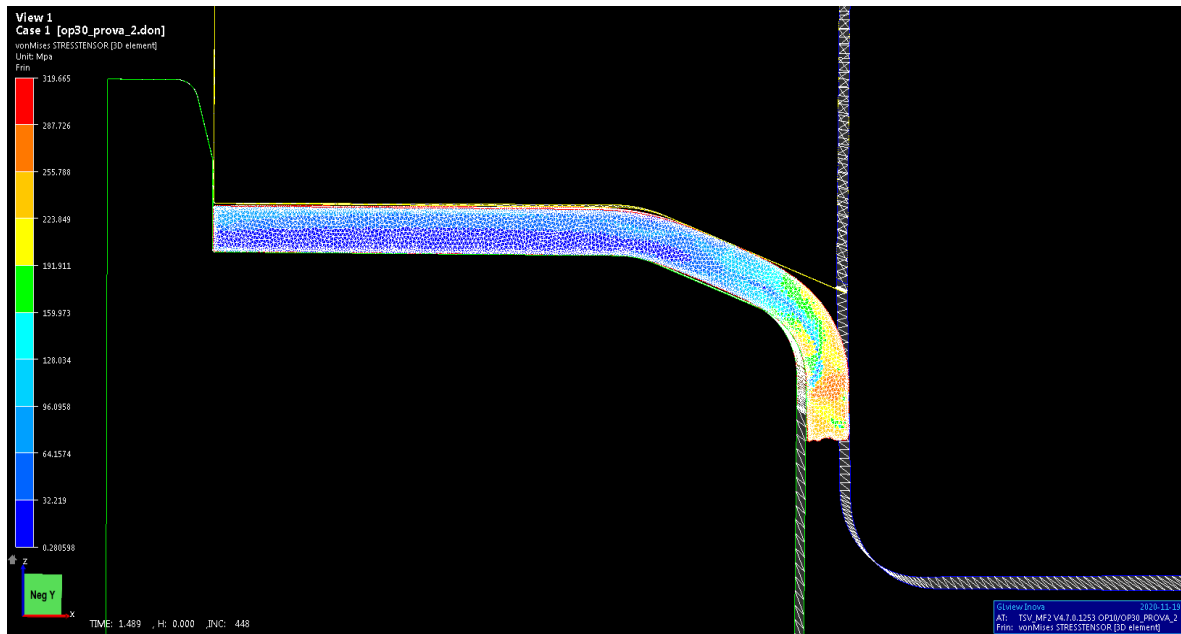


Figura 65: Andamento della  $\sigma$  di Von Mises dopo il processo di seconda imbuitura

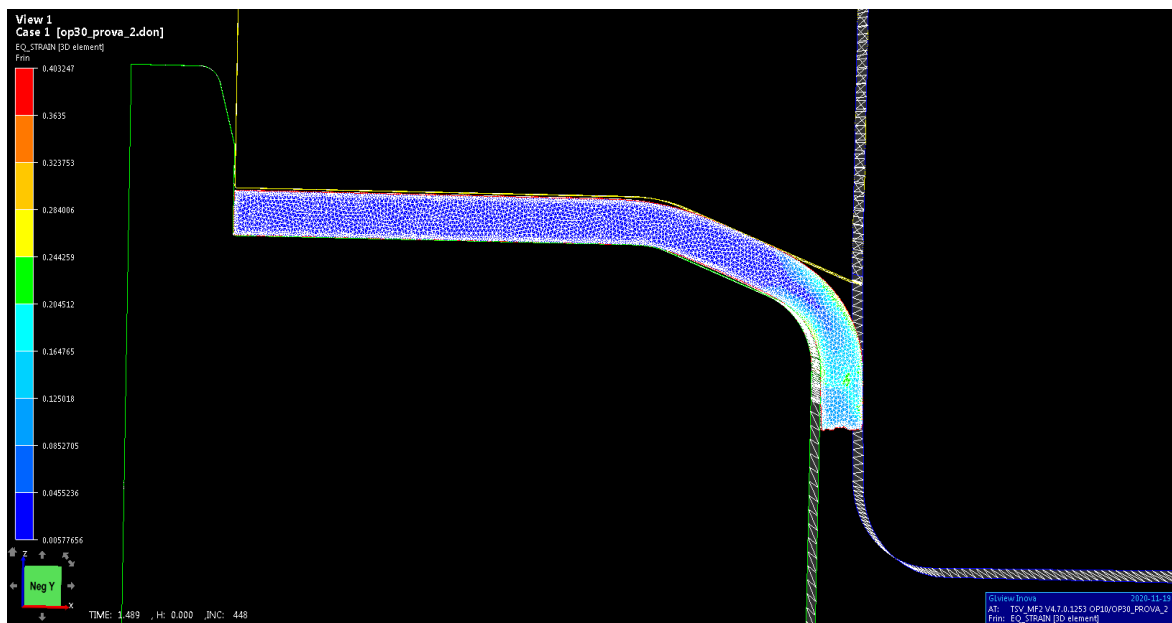


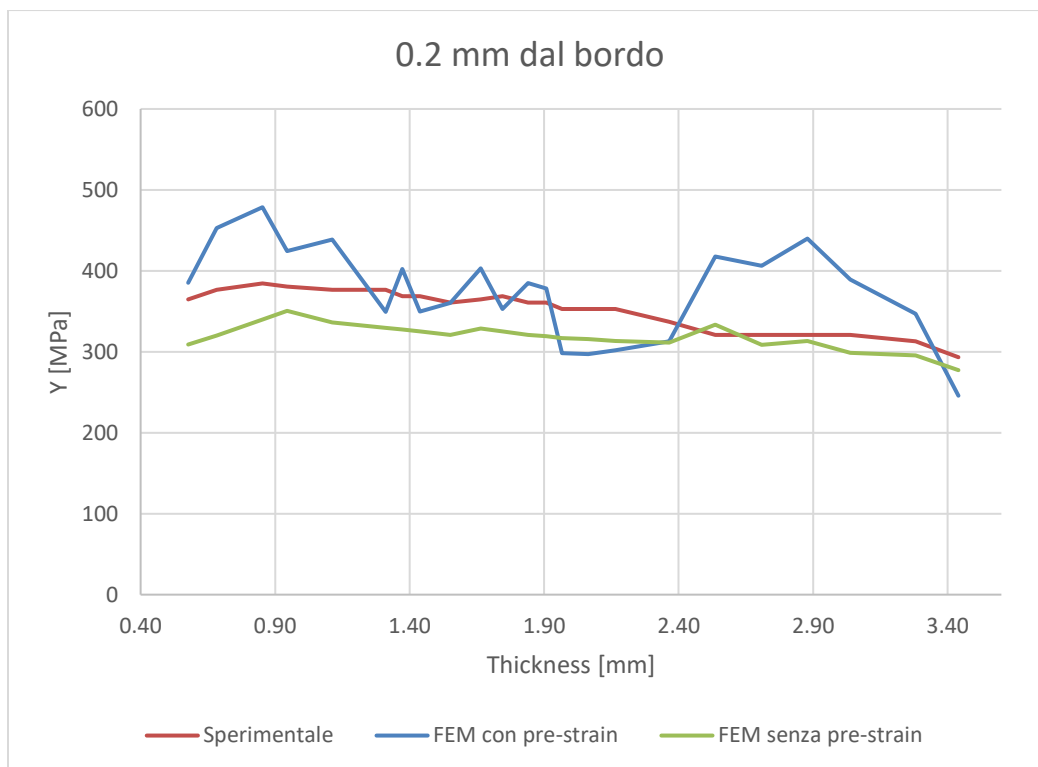
Figura 66: Andamento della deformazione plastica equivalente dopo il processo di seconda imbuitura

## **4 Discussione dei risultati ottenuti e sviluppo di un metodo numerico-sperimentale per valutare l'incrudimento**

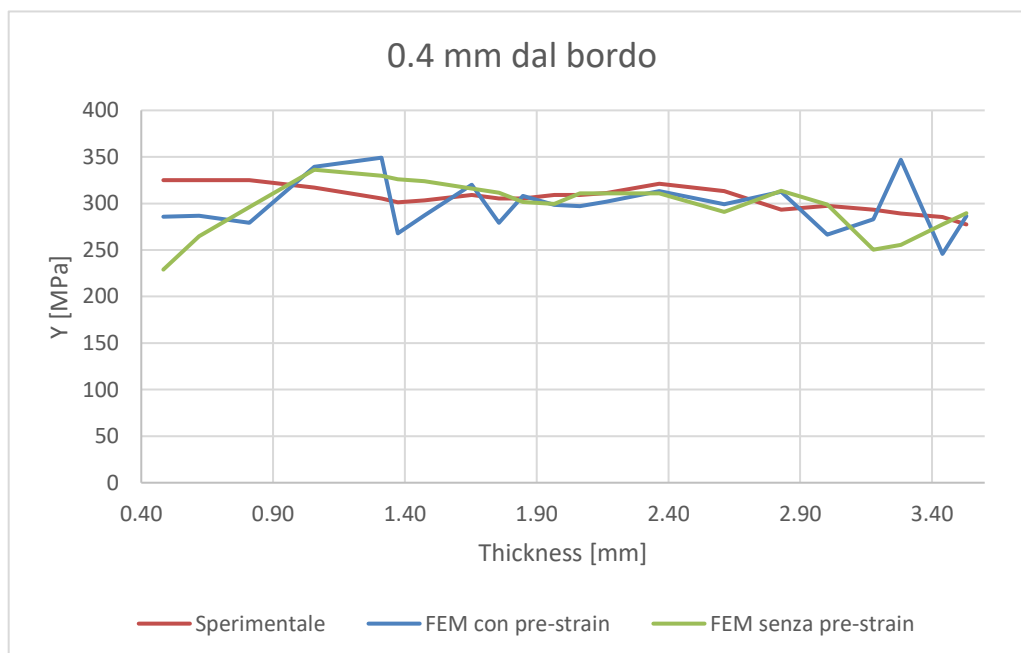
### **4.1 Correlazione dei risultati sperimentali con quelli numerici**

In questo paragrafo sono stati correlati i risultati ottenuti nel caso sperimentale con quelli nel caso numerico, il confronto è stato effettuato a  $Y=0.2$  mm dal bordo e  $Y=0.4$  mm. I risultati sono mostrati nelle figure 67 e 68; le differenze evidenziate, possono essere legate alla diversa definizione fra tensione di snervamento e durezza ma anche attribuite a fattori casuali, inoltre, si nota come tali differenze si riducono muovendosi verso la parte interna della puleggia. Guardando i risultati ottenuti considerando il pre-strain e senza pre-strain si evidenzia come la puleggia subisca un incrudimento; si ricorda che prima della tranciatura sul disco vengono effettuate altre lavorazioni che portano a deformarlo plasticamente con un conseguente innalzamento delle proprietà meccaniche. Dato che il software COLDFORM non può tener conto delle lavorazioni precedenti a quella di tranciatura in maniera automatica, le condizioni iniziali sono state impostate manualmente e poi è stato realizzato il confronto con il caso in assenza di esse. Si nota, inoltre, che i valori a  $Y=0.4$  mm dal bordo rispetto quelli a  $Y=0.2$  mm risultano mediamente più bassi poiché si è più lontani dalla superficie tranciata e quindi la deformazione plastica equivalente in quei punti sarà inferiore.



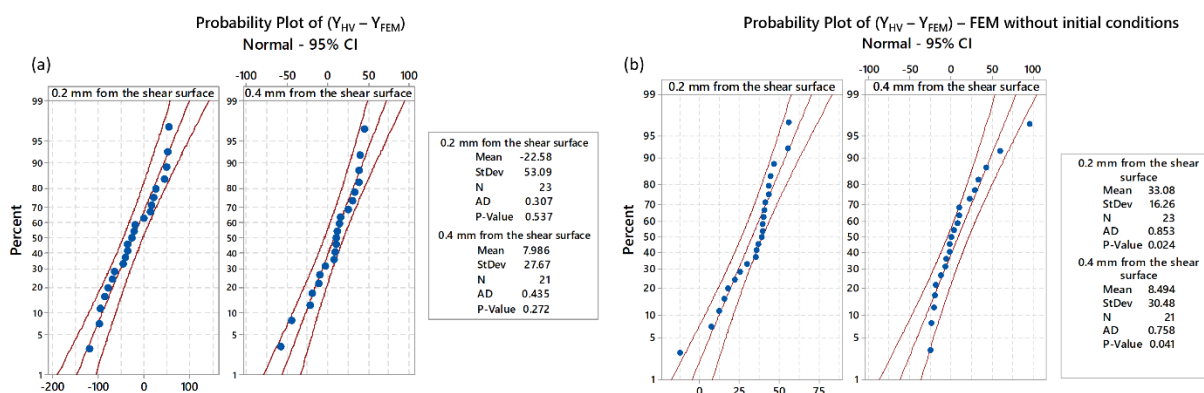


**Figura 67: Confronto ad Y= 0.2 mm dal bordo**



**Figura 68: Confronto ad Y=0.4 mm dal bordo**

Dopodiché è stato elaborato il grafico della probabilità normale nella figura 69, ricavato dal test di Anderson-Darling, ove sono stati confrontati i valori ottenuti nel caso sperimentale con quelli nel caso numerico. Esso dimostra che tali differenze possono essere dovute a fattori casuali con un rischio di errore del 5%. Dato che il p value è maggiore di 0.05 ed il valore di AD è minore di 1 non si può rifiutare l'ipotesi nulla che i dati provengono da una distribuzione normale.



**Figura 69: Risultati del test di Anderson-Darling fra caso sperimentale e numerico**

Infine, sempre tramite il test di Anderson-Darling, sono stati confrontati i casi numerici con e senza pre-strain ad  $Y=0.2$  mm dal bordo e ad  $Y=0.4$  mm (figura 70). Si nota come nei casi senza pre-strain il p value risulta minore di 0.05 ciò evidenzia la differenza sistematica dalla normalità dei residui, quindi le differenze fra i casi senza pre-strain e con pre-strain non sono dovute alla casualità.

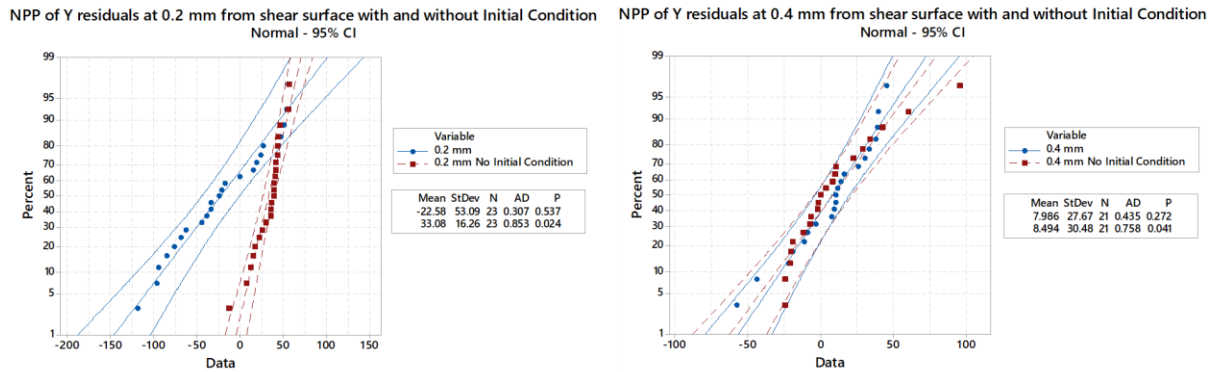
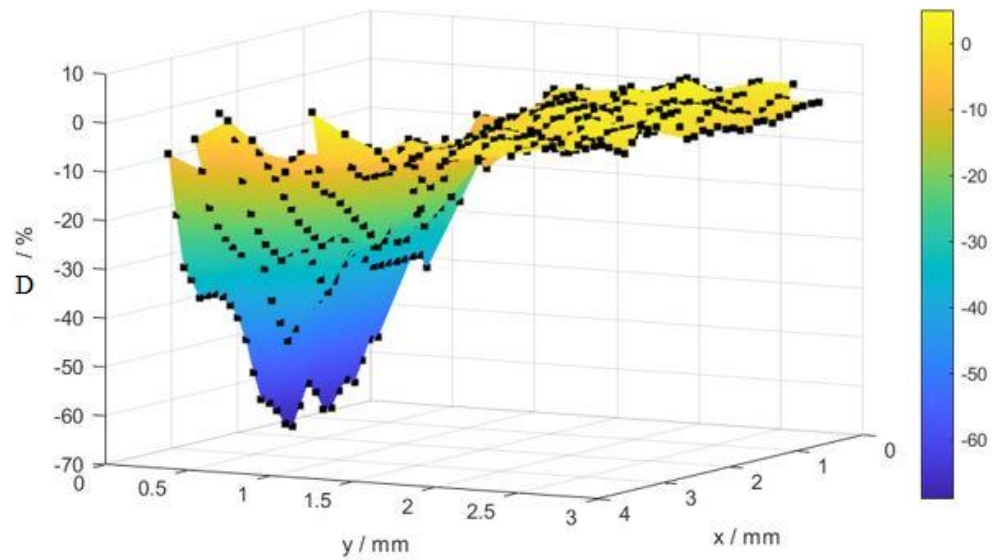


Figura 70: Risultati del test di Anderson-Darling fra casi numerici con e senza pre-strain

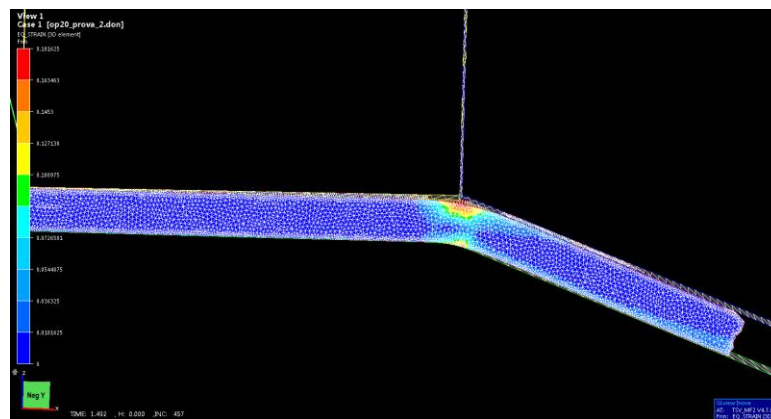
## 4.2 Analisi del danno

In questo paragrafo è stato analizzato il danno subito dal disco per la lavorazione di tranciatura ed è stata effettuata una previsione del danno per le successive lavorazioni di prima imbutitura e seconda imbutitura mediante il software COLDFORM. Questa procedura permette di valutare la plasticità residua del materiale, quindi, risulta necessaria per migliorare le fasi seguenti del processo produttivo. Ispirandosi al metodo del Falsafi, ricordando l'equazione (2.5), l'obiettivo è stato quello di calcolare il danno utilizzando i valori di durezza ottenuti sperimentalmente mediante micro-durometro Vickers. I risultati mostrati in figura 71 hanno evidenziato un decremento significativo della plasticità residua soprattutto nella zona prossima alla superficie tranciata. Ciò significa che, in quell'area, i valori di sollecitazione sono più vicini al carico di rottura e quindi risulta più propensa alla generazione di cricche.

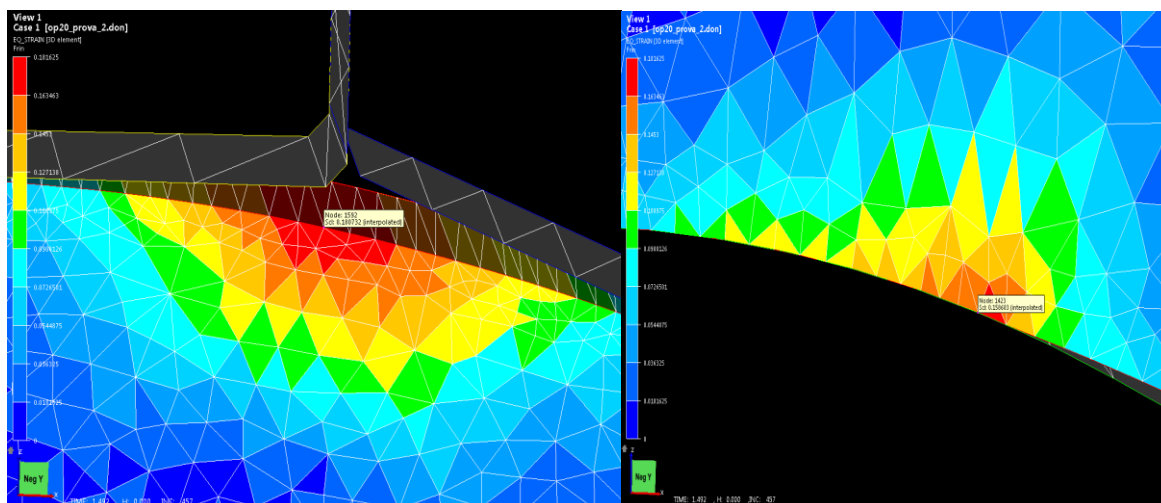


**Figura 71: Andamento del danno dopo il processo di tranciatura**

Per quanto riguarda le operazioni di prima imbutitura e seconda imbutitura non è stato possibile ricavare il valore del danno lungo tutti i punti dello spessore del disco ma, sono state analizzate semplicemente le zone più inclini alla generazione di cricche. Si riportano, di seguito, i risultati della simulazione del processo di prima imbutitura (figura 72 e figura 73).

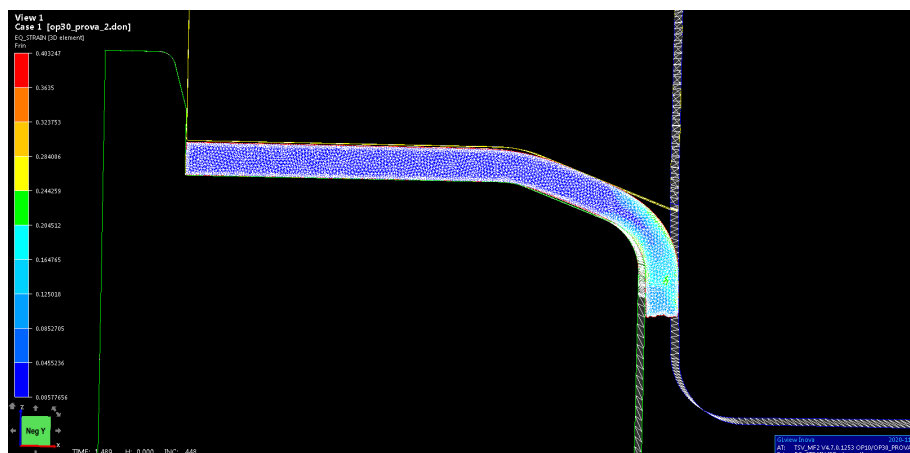


**Figura 72: Andamento della deformazione plastica equivalente dopo il processo di prima imbutitura**

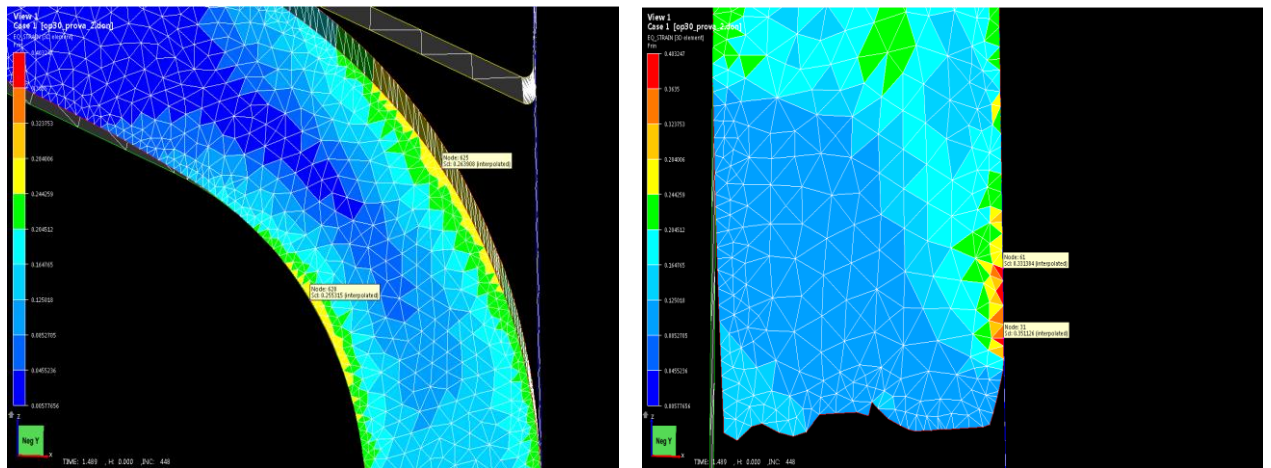


**Figura 73: Particolari del processo di prima imbutitura**

Tra le due zone mostrate nella figura 73, svolgendo gli opportuni calcoli, il valore più elevato è stato ricavato in prossimità dell'area di impatto fra matrice e puleggia. Anche in questo caso risulta un valore attendibile in quanto la zona suddetta resta sollecitata maggiormente rispetto alle altre per tutto il tempo della lavorazione ed inoltre risulta sottoposta al contatto continuo fra matrice e disco. Per quanto riguarda invece il processo di seconda imbutitura si riportano, di seguito, i risultati della simulazione (figura 74 e figura 75).



**Figura 74: Andamento della deformazione plastica equivalente dopo il processo di seconda imbutitura**



**Figura 75: Particolari del processo di seconda imbutitura**

In questo secondo caso si hanno dei risultati più sorprendenti, contrariamente a quanto si potrebbe pensare, la parte del disco che tende ad incurvarsi durante l'intera lavorazione non risulta la zona più esposta al fenomeno del danno, bensì, la zona vicina alla superficie tranciata risulta la più danneggiata; ciò è dovuto al continuo contatto della matrice con la billetta che, in quella zona, esercita una sollecitazione maggiore. Si ricorda, citando la teoria di Rice-Tracey [20], che più il valore del danno aumenta, più la dimensione del vuoto all'interno del reticolo del materiale cresce; il vuoto aumenta in quanto abbiamo una variazione di forma (legata alla singola componente del tensore di deformazione) ed una variazione di volume (legata alla deformazione plastica equivalente). Si deduce, infine che è un bene avere valori del danno limitati in quanto essi si traducono in valori di plasticità residua maggiori in modo da non compromettere la stabilità strutturale della puleggia analizzata.

## 5 Conclusioni

Con il presente lavoro di tesi, utilizzando gli strumenti messi a disposizione da LBN Ricerca ed AGLA PT, è stato elaborato un metodo per analizzare il processo di tranciatura di una lega di alluminio, per confrontare risultati ottenuti a livello sperimentale con quelli ottenuti a livello numerico e per valutare l'effettivo incrudimento della lega. Inizialmente è stata eseguita un'analisi microstrutturale, realizzando una mappa di micro-durezza. La generazione di tale mappa ha permesso di andare ad individuare le proprietà meccaniche del materiale a livello locale, in particolare, i valori di durezza ed i valori delle tensioni calcolati tramite l'equazione di Tabor, notando valori più bassi al cuore del disco rispetto alle zone superficiali. Questa osservazione è stata confermata anche dall'analisi numerica realizzata tramite il software COLDFORM. Infatti, partendo dai risultati della simulazione, basandosi sugli studi svolti da Tekkaya e da Falsafi, sono stati calcolati i valori delle tensioni numeriche per poi andare ad elaborare questo confronto. Dopodiché si è tenuto conto che la puleggia analizzata, prima di subire una lavorazione di tranciatura, subisce altre lavorazioni quindi è stato elaborato un confronto fra i valori di durezza e fra i valori di tensione pre e post tranciatura al fine di valutare l'effettivo incrudimento; inoltre è stato effettuato l'Anderson-Darling test per correlare i risultati numerici a quelli sperimentali, per verificare che le differenze fossero accettabili e dunque frutto della casualità. Infine, è stato analizzato il danno e si è visto che, valori elevati rappresentano valori di plasticità residua inferiori che compromettono la stabilità strutturale della puleggia analizzata (a causa della generazione di vuoti nel reticolo). Questo lavoro di tesi ha proposto una metodologia rapida ed economica (in quanto

realizzabile con qualsiasi tipo di software di simulazione) per validare la simulazione FEM del processo di tranciatura di una lega di alluminio, operazione molto comune nel settore automobilistico. Inoltre, utilizzando gli stessi mezzi, è stato possibile stimare anche la plasticità residua. Questo parametro è essenziale per consentire una progettazione efficace delle fasi successive del processo di produzione. La validazione FEM ottenibile con il metodo proposto consente di ottenere l'ottimizzazione del processo, modificando i parametri di processo e limitando i test sperimentali. Infine, si possono sottolineare molteplici vantaggi di questo metodo rispetto quello elaborato da Falsafi. Innanzitutto, è da sottolineare che la procedura qui ideata è stata validata per una lega di alluminio e non per una lega di acciaio, inoltre, risulta meno limitativa, in quanto è possibile variare i parametri di processo con relativa facilità e vedere come i nuovi risultati possono essere correlati con quelli sperimentali; per concludere anche l'analisi FEM elaborata risulta più completa in quanto oltre ai valori di deformazione plastica equivalente, tensione di snervamento, durezza e danno possono essere valutati anche altri risultati come l'allungamento percentuale o la variazione di temperatura. Si ricorda, invece, che nel metodo elaborato dal Falsafi, l'analisi FEM elabora solo valori di durezza e danno; tutto ciò rende il metodo differente rispetto tutti gli altri presenti in letteratura.



## Bibliografia

- [1] «Lo stampaggio della lamiera a freddo, cos'è e quali vantaggi ha questo processo,» *Libero circuito*, p. 1, 9 Maggio 2016.
- [2] Tekkaya, «An Improved Relationship between Vickers Hardness and Yield Stress for Cold Formed Materials and its Experimental Verification,» *CIRP Annals*, vol. 49, n. 1, pp. 205-208, 2000.
- [3] Falsafi e Demirci, «Micro-indentation based study on steel sheet degradation through forming and flattening: Toward a predictive model to asses cold recyclability,» *Materials & Design*, vol. 109, pp. 456-465, 5 November 2016.
- [4] I. Pesenti, «Lavorazioni delle lamiere - Stampaggio a freddo,» pp. 1-12, 2016.
- [5] M. Rossi, Stampaggio a freddo delle lamiere, Hoepli, 1973.
- [6] A. Sili, Metallurgia, AIM, 2016.
- [7] Tisza e Czinege, «Comparative study of the application of steels and aluminium

in lightweight production of automotive parts,» *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 1, n. 4, pp. 229-238, December 2018.

[8] Doshi, Gohil, Mehta e Vaghasiya, «Challenges in Fusion Welding of Al alloy for Body in White,» *materialstoday*, vol. 5, n. 2, pp. 6370-6375, 2018.

[9] «La simulazione nel processo di stampaggio,» *meccanicanews*, 2020.

[10] BSI, «BN EN ISO 6507-1:2018 Metallic materials - Vickers hardness test,» 2018.

[11] BSI, «BN EN ISO 6507-2:2018 Metallic materials - Vickers hardness test,» 2018.

[12] BSI, «BS EN 10111:2008 Continuously hot rolled low carbon steel sheet and strip for cold forming,» 2008.

[13] BSI, «BS EN 573-3:2019 Aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and form of wrought products,» 2019.

[14] D. Tabor, «A simple theory of static and dynamic hardness,» *Royal Society Publishing*, pp. 247-274, 1948.

- [15] R. K. Nutor, N. K. Adomako e Y. Fang, «Using the Hollomon Model to Predict Strain-Hardening in Metals,» *American Journal of Materials Synthesis and Processing*, vol. 2, pp. 1-4, 2017.
  
- [16] «Anderson-Darling Test for Normality,» *SPC for Excel*, June 2011.
  
- [17] Casavecchia, «Caratterizzazione del processo di tranciatura di leghe di alluminio per il settore automotive mediante mappe di microdurezza,» Torino, 2020.
  
- [18] BSI, «BS EN ISO 18265:2013 Metallic materials - Conversion of hardness values,» 2013.
  
- [19] X. Chen, N. Wang, X. Ma e H. Zhou, «Hot deformation behaviour and Hansel-Spittel constitutive model of Cr5 alloy for heavy backup roll,» *International Journal of Computational Materials Science and Engineering*, pp. 205-217, 2018.
  
- [20] G. L. Rosa, G. Mirone e A. Risitano, «Legge approssimata di variazione di triassalità da necking e suo effetto su un modello di crescita dei vuoti,» pp. 1-10, 2008.

## **Ringraziamenti**

Vorrei ringraziare in primis il prof. Gianfranco Genta ed il dott. Giacomo Maculotti per avermi dato l'opportunità di svolgere questo lavoro di tesi e per l'immensa disponibilità e professionalità offerta. Ringrazio, inoltre, le aziende AGLA PT ed LBN Ricerca per avermi ospitato e, in particolare, per aver messo a disposizione gli strumenti utilizzati per questo lavoro; vorrei soprattutto rendere omaggio alle persone che ho incontrato durante questa meravigliosa esperienza tra cui l'ing. Roberto Cagliero e Domenico Viola con i quali il rapporto è andato oltre quello professionale e che non finirò mai di ringraziare per i preziosi consigli ed insegnamenti. Ringrazio la mia famiglia ed i miei nonni per gli sforzi economici e per il continuo supporto che mi hanno fornito durante i miei anni di studio a Torino, senza di loro tutto questo non si sarebbe mai potuto realizzare. Ringrazio di cuore Dami per essermi stata sempre vicino nei momenti di difficoltà e per avermi insegnato a guardare le cose negative sotto una prospettiva diversa.

