

# **POLITECNICO**

## **MILANO 1863**

---

FACOLTÀ DI INGEGNERIA INDUSTRIALE  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

### **La deformabilità a freddo degli acciai inossidabili mediante prove Erichsen ed analisi ad elementi finiti**

Candidati:  
**Matteo CASTI**

**Enrico Alberto CERIANI**

Relatore:  
**Prof. Marco V. BONIARDI**

Correlatore:  
**Ing. Andrea CASAROLI**

---

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>I Parte teorica</b>	<b>5</b>
<b>1 Gli acciai inossidabili</b>	<b>7</b>
1.1 Generalità . . . . .	7
1.2 Classificazione . . . . .	8
1.3 Normativa . . . . .	11
1.4 Acciai inossidabili austenitici . . . . .	12
1.5 Acciai inossidabili ferritici . . . . .	14
1.6 Mercato . . . . .	16
<b>2 Stati di deformazione nei processi di formatura</b>	<b>19</b>
2.1 Modalità . . . . .	19
2.1.1 Stretching . . . . .	19
2.1.2 Drawing . . . . .	20
2.2 Rappresentazione delle deformazioni . . . . .	20
2.3 Distribuzione degli sforzi . . . . .	22
2.3.1 Rapporto di deformazione plastica $r$ . . . . .	23
2.3.2 Coefficiente di incrudimento $n$ . . . . .	24
2.3.3 Coefficiente $m$ . . . . .	26
2.4 Curve limite di formabilità . . . . .	27
<b>3 Profondo Stampaggio</b>	<b>31</b>

---

3.1	Stampabilità . . . . .	33
3.2	Lubrificazione . . . . .	33
3.3	Difetti . . . . .	36
<b>II Parte sperimentale</b>		<b>39</b>
4	<b>Obiettivi</b>	<b>41</b>
5	<b>Materiale e macchinari</b>	<b>43</b>
5.1	Acciai . . . . .	43
5.1.1	Analisi chimiche . . . . .	45
5.2	Prova di Trazione . . . . .	46
5.3	Macchina di prova Erichsen . . . . .	46
5.4	Lubrificanti . . . . .	49
5.5	Stampa UV e Serigrafia . . . . .	51
5.6	Microscopio ottico e stereomicroscopio . . . . .	54
5.7	Stativo Macro . . . . .	55
6	<b>Prove di trazione</b>	<b>59</b>
6.1	Progettazione e preparazione dei provini . . . . .	61
6.2	Risultati delle prove di trazione . . . . .	64
6.3	Calcolo di sforzi e deformazioni reali . . . . .	68
6.4	Calcolo del rapporto di deformazione plastica $r$ . . . . .	71
6.4.1	Calcolo dell'anisotropia dei materiali . . . . .	73
6.5	Calcolo del coefficiente di incrudimento $n$ . . . . .	74
7	<b>Prove Erichsen</b>	<b>77</b>
7.1	Progettazione del piano sperimentale . . . . .	78
7.2	Preparazione dei materiali . . . . .	80
7.2.1	Stampa del pattern di cerchi . . . . .	80
7.2.2	Applicazione dei lubrificanti ed esecuzione della prova . . . . .	82
7.3	Analisi dei dati . . . . .	84

---

7.3.1	Scatterplot . . . . .	84
7.3.2	Main effects plot ed interaction plot . . . . .	87
7.3.3	Analisi ANOVA . . . . .	89
7.3.4	Comparazione dei livelli . . . . .	92
7.4	Analisi delle deformazioni . . . . .	100
7.4.1	Modalità di misura . . . . .	101
7.4.2	Risultati . . . . .	104
7.5	Analisi metallografiche . . . . .	116
7.5.1	Analisi metallografiche AISI 304 . . . . .	117
7.5.2	Analisi metallografiche AISI 430 . . . . .	118
7.6	Prove di microdurezza . . . . .	118
<b>8</b>	<b>Analisi agli elementi finiti</b>	<b>127</b>
8.1	Caratterizzazione dei materiali . . . . .	128
8.2	Modellazione dell'esperimento . . . . .	130
8.3	Analisi e confronto delle prove Erichsen . . . . .	134
8.4	Risultati . . . . .	137
<b>9</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>159</b>
9.1	Prove di Trazione . . . . .	159
9.2	Prove Erichsen . . . . .	161
9.3	Simulazioni numeriche FEM . . . . .	163
<b>III</b>	<b>Appendice</b>	<b>165</b>
<b>A</b>	<b>Prove di trazione</b>	<b>167</b>
A.1	Curve sforzo-deformazione . . . . .	167
A.2	Rapporto di deformazione plastica $r$ . . . . .	168
A.3	Coefficiente di incrudimento $n$ . . . . .	169
<b>B</b>	<b>Prove Erichsen</b>	<b>181</b>
B.1	Analisi ANOVA . . . . .	181

## Indice

---

B.2	Provini Analizzati . . . . .	183
B.3	Analisi delle deformazioni . . . . .	183
<b>C</b>	<b>Micrografie</b>	<b>189</b>
<b>D</b>	<b>Analisi FEM</b>	<b>219</b>
<b>E</b>	<b>Tabelle dati</b>	<b>225</b>
	<b>Ringraziamenti</b>	<b>231</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>235</b>

# Sommario

Il seguente lavoro di tesi si prefigge l'obiettivo di studiare e classificare diversi tipi di acciai inossidabili in base a differenti condizioni di lavorazione per stampaggio, fornendo una visione di più ampio respiro sul mondo della deformazione plastica a freddo relativa a questa tipologia di acciai e sui relativi parametri di processo. In tale modo si vogliono fornire delle linee guida valide sia in fase di progettazione del prodotto sia di progettazione del processo. Suggerimenti che risulteranno utili a migliorare quest'ultimo nel caso di operazioni di stampaggio a freddo che presentano delle criticità, quali rotture o difetti di altra natura presenti nel prodotto finito.

Nello specifico si analizzerà il comportamento plastico di due principali categorie di acciai inossidabili, la serie AISI 300 (acciai inossidabili austenitici) e la serie AISI 400 (acciai inossidabili ferritici) che rappresentano di gran lunga gli acciai inossidabili più utilizzati industrialmente per quanto riguarda la categoria dei prodotti piani stampati a freddo.

Si porrà particolare attenzione allo studio delle condizioni di deformazione che si manifestano all'interno dei componenti, in particolare in aree critiche, e alla loro modificazione in funzione delle condizioni sperimentali.

Questo studio farà ampio ricorso delle prove di deformazione plastica Erichsen, descritte in maniera dettagliata nel corso della trattazione, nonché delle più tradizionali prove di trazione per provini piani. Si completerà poi l'analisi effettuando microdurezze e micrografie sulle sezioni dei provini deformati.

Per concludere si analizzeranno e confronteranno i risultati ottenuti per via sperimentale con simulazioni numeriche ad elementi finiti per ottenere informazioni utili, convalidare il modello ottenuto e per ricavare considerazioni aggiuntive sugli stati di sforzo e deformazione.

**Parole chiave:** Acciai inossidabili, Erichsen, Stampaggio, Prove di trazione, Microdurezze, FEM.

**Keywords:** Stainless, Erichsen cupping test, Drawing, Strain test, Microhardness, FEM.

# Introduzione

Per quanto riguarda gli acciai inossidabili, il processo di profondo stampaggio delle lamiere è una tecnologia notevolmente diffusa in ambito industriale. I prodotti ottenibili sono infatti svariati: lavelli delle cucine, pentole, componenti per applicazioni a bassa temperatura o per uso alimentare, prodotti per la nautica, oggetti di design, ecc.

Il processo, all'apparenza abbastanza semplice, nasconde però delle insidie soprattutto quando si cercano di ottenere geometrie complesse con raggi di raccordo ridotti, come mostrato dall'esempio in figura 1. La conoscenza, in ambito industriale, di quello che realmente accade in queste situazioni è spesso sommaria se non del tutto assente. Si finisce quindi molto spesso a procedere per tentativi o giungendo a compromessi, investendo tempo e denaro che potrebbe essere in parte risparmiato acquisendo una conoscenza più dettagliata di ciò che avviene durante il processo.

Risulta quindi molto utile capire gli sforzi e le deformazioni in gioco nel processo, e come reagisce il materiale alle sollecitazioni imposte. Solo a seguito di una attenta analisi di questo tipo è possibile prevedere il risultato del processo ed apporre i giusti correttivi sia in fase di progetto della parte, sia in fase di progetto e set-up del processo.





**Figura 1:** Esempio di rottura su un componente sottoposto a profondo stampaggio.

## Outline

Il seguente lavoro di tesi si divide in due parti principali, la prima teorica e la seconda sperimentale.

Nella **prima parte**, teorica, si affronta la tematica della deformazione plastica degli acciai inossidabili analizzando, tramite il supporto della letteratura, le attuali conoscenze in merito a questo argomento. Viene quindi dapprima fornita una panoramica sul tema degli acciai inossidabili, delle tipologie presenti sul mercato e delle loro caratteristiche, analizzando in modo più dettagliato le due tipologie utilizzate nel corso della tesi (acciai inossidabili austenitici e ferritici). In seguito sono descritti i processi di formatura prescindendo dal tipo di materiale lavorato, partendo dagli stati di deformazione che questi processi generano sul materiale stesso, illustrando le principali metodologie e i coefficienti utili a fornire una valutazione delle deformazioni. Sempre nella prima parte viene descritto nello specifico il processo di profondo stampaggio (in inglese *deep drawing*) correlato dai principali difetti che questo genera sul prodotto finito.

La **seconda parte** presenta invece il lavoro sperimentale svolto al fine di raccogliere dati utili necessari ad analizzare e proporre soluzioni pratiche circa i problemi

presenti nei processi di stampaggio degli acciai inossidabili, in particolare alle rotture che si manifestano in zone particolarmente critiche. Sono inizialmente mostrati i materiali e i macchinari utilizzati per le sperimentazioni, molti di questi messi a disposizione dai laboratori del Politecnico di Milano, mentre altri, come la macchina Erichsen, dai laboratori dell'azienda Novelis Italia S.p.A. della sede di Pieve Emanuele. Vengono dunque mostrate le modalità di sperimentazione ed i risultati ottenuti, correlati da commenti critici sulla base di quanto osservato con il supporto di quanto appreso in teoria. Si procede infine a confermare i risultati analizzando il problema tramite modellazione software ad elementi finiti supportando i risultati ottenuti nella pratica.

Nelle **appendici** vengono riportati i risultati della campagna sperimentale, comunque utili, ma non riportati durante la trattazione, al fine di rendere più chiaro l'argomento esposto e non appesantire la lettura. Vengono inoltre riportate le micrografie svolte sulle superfici interessate dalle analisi ed i risultati numerici delle prove Erichsen.

## Capitolo 2

# Stati di deformazione nei processi di formatura

Le varie operazioni che implicano processi di formatura di prodotti piani coinvolgono un'ampia gamma di deformazioni e stati di sforzo. Risulta quindi fondamentale la conoscenza delle proprietà del materiale e l'attenta analisi dei vari tipi di deformazione che vengono coinvolti nella formatura di un prodotto per ottimizzare al meglio il processo e garantirne un sufficiente controllo.

### 2.1 Modalità

Le fondamentali modalità di deformazione che si riscontrano durante il processo sono *stretching* e *drawing* analizzate di seguito. In realtà questi sono casi estremi, nella maggior parte dei processi si assiste ad uno stato intermedio con caratteristiche più o meno vicine ad uno di questi due stati fondamentali.

#### 2.1.1 Stretching

Lo stato di stretching è causato da uno stato di trazione biassiale, generato da forze applicate in direzione perpendicolare tra loro e giacenti nel piano della lamiera.

Se queste forze dovessero risultare uguali allora il fenomeno prende il nome di tensione biassiale bilanciata. Con questo stato di sforzo possono essere ottenuti dei livelli di deformazione molto più elevati rispetto alle modalità di stretching non bilanciate.

Nella maggior parte delle operazioni di deformazione plastica, almeno una zona del prodotto è sottoposta a fenomeni di stretching; a titolo di esempio sono formati attraverso stretching i pannelli per il settore automotive, parti che contengono geometrie emisferiche, nervature e rilievi.

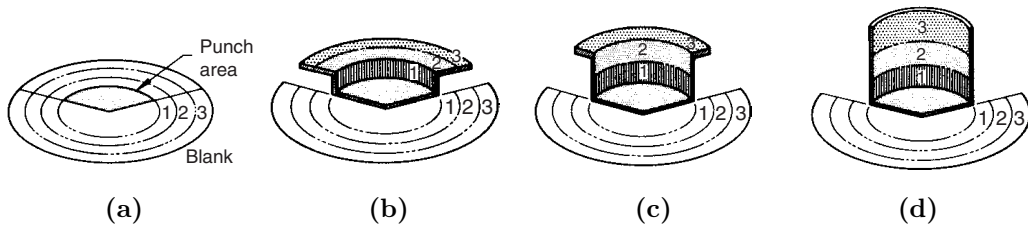
### 2.1.2 Drawing

Il termine inglese *drawing* può essere tradotto in italiano come imbutitura; nel seguito della trattazione il termine italiano imbutitura (o profondo stampaggio) verrà riferito al processo mentre invece il termine inglese *drawing* indicherà lo stato sforzo-deformazione ad esso associato.

Lo stato di drawing di una lamiera è causato dall'allungamento del materiale in una direzione e dalla compressione nella direzione ad essa perpendicolare. Il più semplice esempio di questa tipologia di deformazione è dato dalla piegatura di un prodotto cilindrico con base piana: in questo processo un disco è tenuto in posizione da un premilamiera di forma circolare e forzato con un punzone situato all'interno di esso; il punzone forza i bordi del disco a diventare le pareti dell'oggetto cilindrico. Il metallo è deformato radialmente dalle forze prodotte dal punzone, ma è compresso circonferenzialmente dato che il suo diametro diminuisce (figura 2.1).

## 2.2 Rappresentazione delle deformazioni

Il metodo più comune e veloce per la rappresentazione delle deformazioni è detto metodo ingegneristico: si calcola la deformazione ingegneristica ( $e$ ) definita come il rapporto tra la variazione della lunghezza  $\Delta L$  e la lunghezza originale  $L_0$ :



**Figura 2.1:** Avanzamento del materiale in un processo di imbutitura [7].

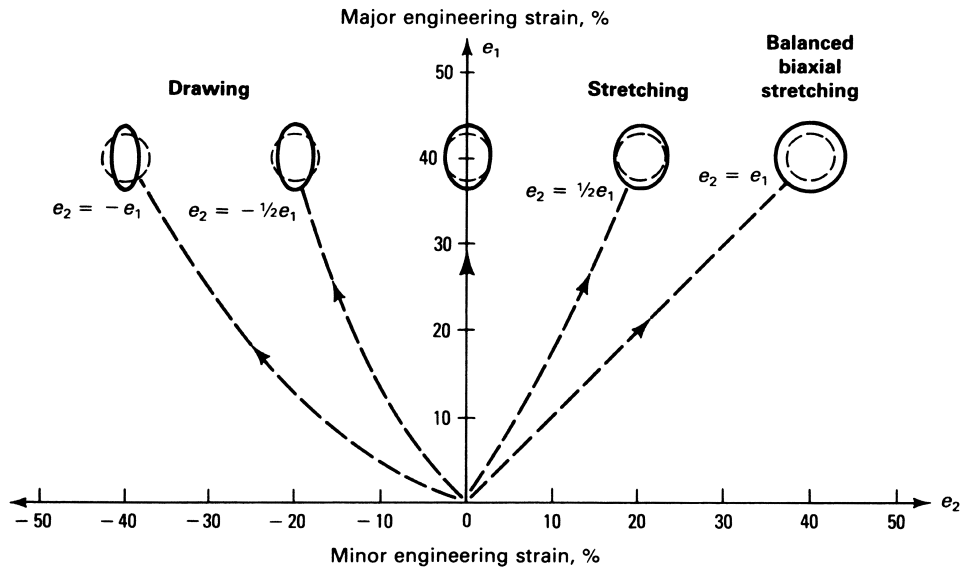
$$e = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1 \quad (2.1)$$

Un secondo metodo, definito come metodo degli allungamenti reali, misura invece gli incrementi infinitesimi della lunghezza  $dL$  in rapporto alla lunghezza misurata in quel determinato istante  $L$ :

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \left( \frac{L}{L_0} \right) = \ln(1 + e) \quad (2.2)$$

Il metodo ingegneristico è molto più semplice da calcolare ed è più che sufficiente per la maggior parte delle applicazioni. Gli allungamenti reali invece si prestano maggiormente all'uso nel campo delle analisi teoriche e degli studi riguardanti la deformazione plastica. Gli allungamenti reali hanno inoltre il vantaggio di poter essere sommati per ottenere l'allungamento totale.

Lo stato di deformazione in un prodotto piano può essere rappresentato graficamente ponendo l'allungamento massimo  $e_1$  sull'asse verticale, e l'allungamento minimo  $e_2$ , che può essere sia positivo che negativo, sull'asse orizzontale. In figura 2.2 vengono mostrati cinque diversi percorsi che portano tutti ad un allungamento  $e_1$  del 40% ma con un allungamento minore  $e_2$  che varia da -40 al 40%. Se sulla lamiera da deformare si andasse a porre un cerchio, allora la deformazione subita dal materiale porterebbe il cerchio a deformarsi in modo diverso in funzione della modalità di allungamento subita.



**Figura 2.2:** Possibili combinazioni delle deformazioni massime e minime che si possono ottenere in formatura [7].

Con riferimento al grafico in figura 2.2, nel quadrante destro, i cerchi vengono trasformati in ellissi che risultano dilatate in entrambe le direzioni. Questa è la zona dello stretching, in cui la situazione limite è rappresentata dalla retta a 45° che indica uno stato di deformazione biassiale bilanciata: in questa situazione i cerchi mantengono la forma aumentando il diametro.

Nel quadrante sinistro, i cerchi vengono trasformati in ellissi che risultano dilatate in una direzione, e compresse nella direzione perpendicolare: questa regione rappresenta il drawing. Nel caso limite, ossia in cui  $e_2 = 0$ , l'ellisse cambia dimensione solo in una direzione.

### 2.3 Distribuzione degli sforzi

Nell'operazione di formatura sono fondamentali tre proprietà del materiale:

- il rapporto di deformazione plastica,  $r$ ;

- il coefficiente di incrudimento,  $n$ ;
- la sensibilità alla velocità di applicazione del carico,  $m$ .

La capacità di raggiungere alti livelli di deformazione dipende da molti fattori come ad esempio il materiale, elementi di lega, grado di rinvenimento, parametri fisici (valori  $r$ ,  $m$  ed  $n$ ), spessore, uniformità del materiale e la presenza di eventuali difetti e inclusioni. I valori  $n$  ed  $m$  influenzano inoltre la capacità di distribuire in egual misura le deformazioni.

### 2.3.1 Rapporto di deformazione plastica $r$

Il rapporto di deformazione plastica di un materiale è definito nel modo seguente:

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (2.3)$$

Dove  $\varepsilon_w$  è la deformazione reale nella larghezza, mentre  $\varepsilon_t$  è la deformazione reale nella direzione dello spessore di un prodotto piano.

Dal momento che durante una prova di trazione è più semplice e preciso misurare le variazioni della larghezza piuttosto che quelle dello spessore, viene utilizzata la seguente relazione che si basa sulla legge della conservazione del volume [8].

$$r = \frac{\ln\left(\frac{b}{b_0}\right)}{\ln\left(\frac{L_0 \cdot b_0}{L \cdot b}\right)} \quad (2.4)$$

Dove:

- $b$  è la larghezza del provino dopo la deformazione ad una specifica elongazione, misurata in mm;
- $b_0$  è la larghezza iniziale del provino, in mm;
- $L_0$  è la lunghezza iniziale del tratto calibrato del provino, in mm;

- $L$  è la lunghezza del provino dopo la deformazione ad una specifica elongazione, misurata in mm.

Dato che però le lamiere possono avere una spiccata anisotropia, le proprietà del materiale possono essere differenti a seconda della direzione, questo significa che è necessaria l'adozione di un  $r$  medio ( $\bar{r}$ ), che tiene conto del rapporto misurato parallelamente ( $r_0$ ), trasversalmente ( $r_{90}$ ) e a  $45^\circ$  ( $r_{45}$ ) rispetto alla direzione di laminazione, questo nuovo parametro è definito nel seguente modo:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4} \quad (2.5)$$

Si rivela utile anche il seguente indice che misura il grado di anisotropia del materiale:

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2} \quad (2.6)$$

Un materiale completamente isotropo avrà un  $\bar{r} = 1$  e  $\Delta r = 0$ .

### 2.3.2 Coefficiente di incrudimento $n$

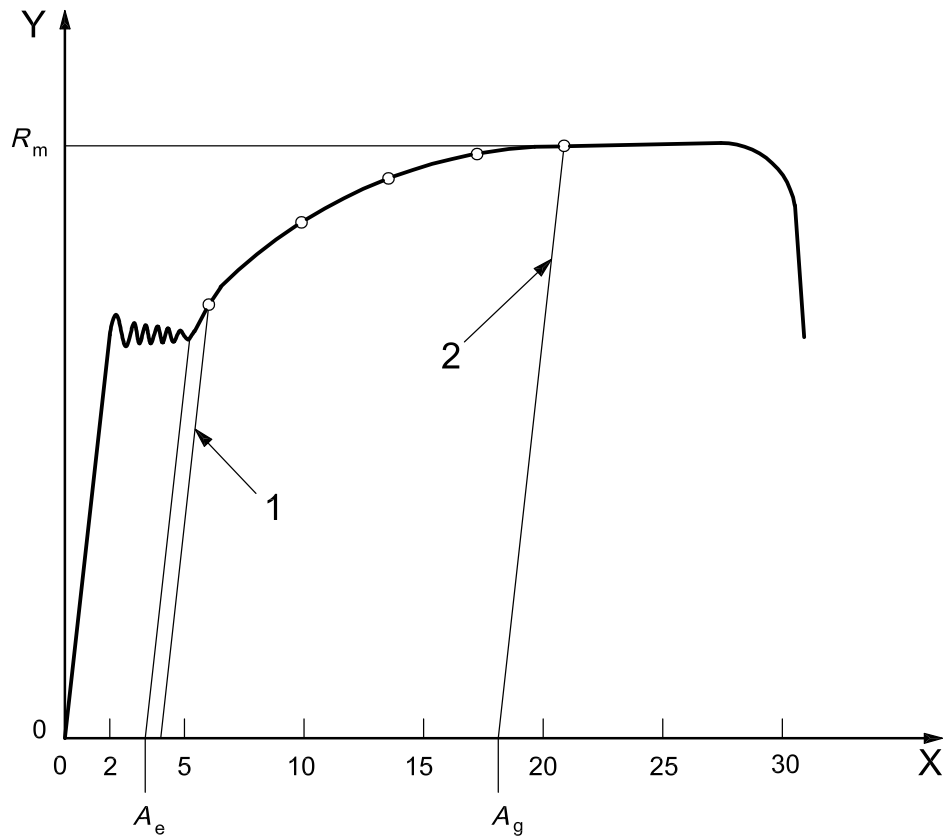
L'incrudimento è il fenomeno che si manifesta in campo plastico, per cui un materiale, all'aumentare del carico applicato, aumenta anche la sua resistenza meccanica, questo a causa del movimento delle dislocazioni che tendono ad ostacolarsi tra loro.

Il coefficiente di incrudimento  $n$  è definito come l'esponente della deformazione plastica reale presente nell'equazione matematica che descrive il tratto plastico della curva sforzo-deformazione (figura 2.3), ottenuta dalla prova di trazione.

Nei materiali con alti valori di  $n$  lo sforzo necessario a continuare la deformazione aumenta rapidamente al crescere della deformazione stessa. Quindi un materiale



con alto indice  $n$  fa sì che le deformazioni vengano distribuite nelle zone che non sono ancora state interessate dall'incrudimento, preservando da rottura le zone più deformate. Un alto valore  $n$  è quindi indice di buona formabilità in condizioni di stretching.



**Figura 2.3:** Prova di trazione generica per il calcolo del coefficiente  $n$ ; i riferimenti 1 e 2 indicano l'inizio e la fine del tratto d'interesse [9].

L'indice  $n$  è ricavato dall'espressione analitica di una generica curva sforzo-deformazione in campo plastico. Tale equazione è espressa nel seguente modo:

$$\sigma^* = C \cdot \varepsilon^{*n} \quad (2.7)$$

Dove:

- $\sigma^*$  è lo sforzo reale misurato in MPa;

- $C$  è il coefficiente di resistenza in MPa;
- $\varepsilon^*$  è l'allungamento plastico reale (numero puro).

L'equazione 2.7 può essere riscritta, sfruttando le proprietà dei logaritmi, come segue:

$$\ln \sigma^* = \ln C + n \cdot \ln \varepsilon^* \quad (2.8)$$

In questo modo il coefficiente di incrudimento risulta essere il coefficiente angolare della retta che interpola il tratto plastico della curva di trazione trasformata in scala bi-logaritmica. [9]

### 2.3.3 Coefficiente $m$

Il coefficiente  $m$  viene chiamato anche coefficiente di sensibilità alla velocità di applicazione del carico. Parimenti al coefficiente di incrudimento  $n$ , il coefficiente  $m$  è definito come l'esponente della velocità di applicazione del carico nell'equazione matematica che descrive il tratto plastico della curva sforzo-deformazione nel caso si consideri tra le variabili anche  $\dot{\varepsilon}$  (derivata temporale dell'allungamento):

$$\sigma_t = k \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \quad (2.9)$$

Ne consegue la definizione matematica:

$$m = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \dot{\varepsilon}} \quad (2.10)$$

Un valore di  $m$  positivo indica che il carico necessario per proseguire la deformazione del materiale aumenta all'aumentare della velocità di deformazione. Una prima conseguenza di ciò è che risulta necessaria una forza maggiore per deformare il

materiale ad alte velocità. Inoltre, data una velocità di deformazione, il materiale risulta più resistente alle successive deformazioni nelle regioni che sono state deformate più velocemente.

Il bisogno di maggiori forze non è in genere una delle principali caratteristiche da tenere in considerazione nelle operazioni di formatura. E' tuttavia cruciale la capacità del materiale di distribuire le deformazioni omogeneamente su tutta la superficie (alto indice  $n$ ).

Valori elevati dei coefficienti  $n$  ed  $m$  garantiscono una buona formabilità del materiale nelle operazioni di stretching ma hanno un effetto più blando per quanto riguarda le operazioni di profondo stampaggio in cui la deformazione avviene principalmente per drawing.

Dato che nelle operazioni di profondo stampaggio<sup>1</sup> il materiale deve essere deformato mediante drawing senza causare rotture, alti valori di  $n$  e  $m$  aumentano la resistenza della parete, il che è benefico, ma contemporaneamente aumentano la resistenza della flangia rendendone meno agevole la deformazione, effetto assolutamente negativo.

## 2.4 Curve limite di formabilità

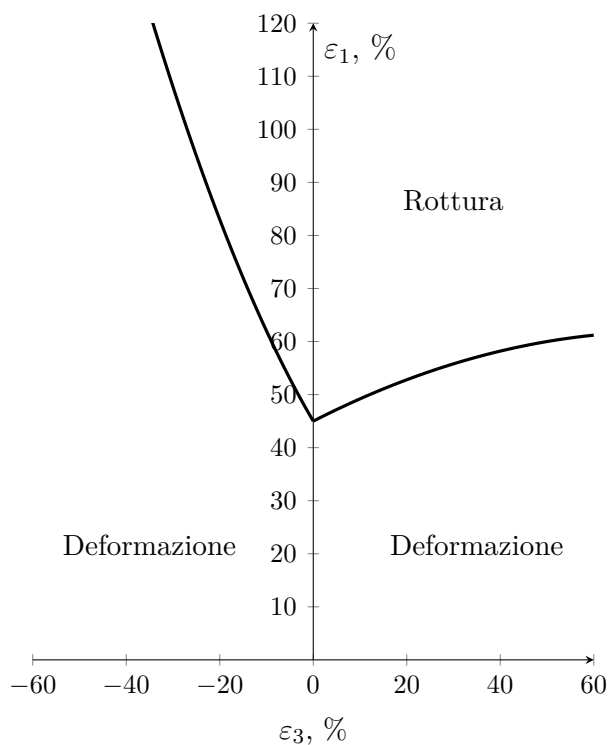
Le curve limite di formabilità sono strumenti indispensabili per la corretta progettazione di qualsiasi lavorazione che implichi la deformazione di lamiera.

Il grafico in figura 2.4 mostra una curva limite per un generico acciaio in cui l'ordinata riporta la deformazione maggiore mentre l'ascissa la deformazione minore.

E' possibile suddividere il piano in due regioni in funzione della conformità del prodotto finito:

---

<sup>1</sup>Fare riferimento al capitolo 3 in cui è descritta in modo approfondito l'operazione di profondo stampaggio.



**Figura 2.4:** Tipica curva limite di formabilità per un generico acciaio.

- al di sotto della curva limite si ottengono con buona probabilità pezzi privi di difetti;
- al di sopra della curva limite si ottengono con buona probabilità pezzi che presentano rotture o altri difetti.

Si pone attenzione al fatto che, come riportato nel paragrafo 2.2 e in figura 2.2, il quadrante di sinistra si riferisce alla modalità di deformazione di drawing, mentre quello di destra di stretching.

Per quanto riguarda l'influenza dei parametri di processo sull'andamento della curva, si fa notare in particolare come un aumento dello spessore del materiale faccia traslare la curva verso l'alto, come anche l'uso di lubrificanti.

La curva limite per quanto riguarda gli acciai mostra il tipico andamento riportato in figura 2.4, da cui si ricava come la sollecitazione di stretching sia in genere più gravosa e difficile da sopportare rispetto ad una condizione di drawing. Da notare

inoltre che il punto più basso della curva, per gli acciai, è sempre posizionato sull'asse delle ordinate, ossia riferito ad una deformazione unidirezionale.

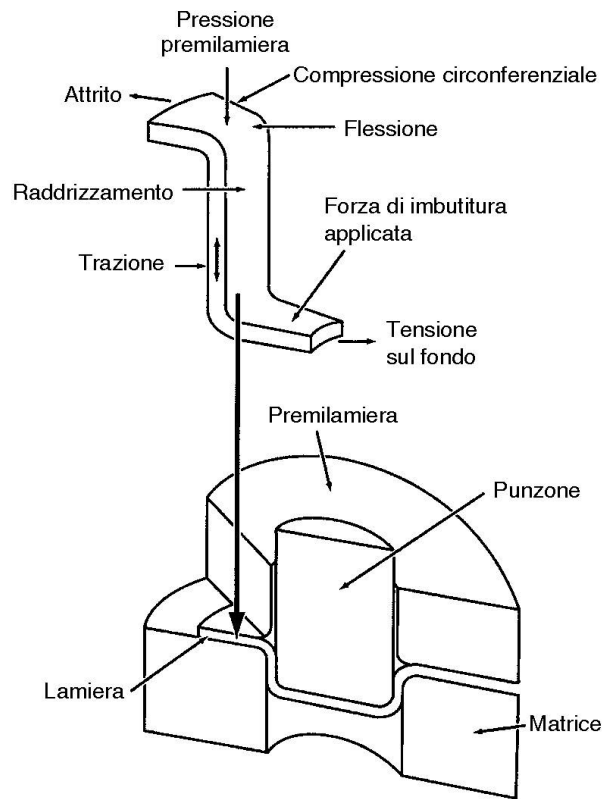
## Capitolo 3

# Profondo Stampaggio

Il profondo stampaggio (in inglese *Deep Drawing*) è un processo di deformazione plastica di lamiere metalliche, avente lo scopo di plasmare il materiale nella forma desiderata senza causare grinze o rotture. Il processo e le attrezzature vengono sinteticamente mostrati in figura 3.1; la lamiera, inizialmente piana, è vincolata verticalmente nella parte esterna da un premilamiera, mentre viene forzata a scorrere in una matrice nella parte centrale mediante un punzone.

Il profondo stampaggio coinvolge molti tipi di forze e modalità di deformazione; sempre in figura 3.1 vengono descritte le sollecitazioni che la lamiera subisce in questo processo, tra cui: tensione nella parete e nel fondo, compressione ed attrito nella zona del premilamiera, flessione nel raccordo d'ingresso e successivo raddrizzamento nella parete della matrice. Inoltre, il metallo, scorrendo dalla zona del premilamiera verso l'interno della matrice è soggetto a tensioni radiali e, contemporaneamente, a compressioni circonferenziali.

Il termine *profondo stampaggio* implica che la lamiera sia libera in qualsiasi punto di scorrere, in particolar modo al di sotto del premilamiera, e quindi esista un apporto continuo di materiale dalla zona del premilamiera verso la zona di deformazione. Ne consegue che la parte formata risulta più "profonda" di quanto potrebbe essere ottenuto dal semplice allungamento (*stretching*) del materiale. Il premilamiera riveste quindi una funzione di fondamentale importanza, esso



**Figura 3.1:** Esempio di profondo stampaggio di un prodotto cilindrico [7].

deve mantenere la lamiera adesa alla matrice prevenendo quindi la formazione di grinze nel prodotto finale, ma al contempo deve consentire al materiale di scorrere al di sotto di esso per garantire un continuo apporto di materiale all'area di deformazione, prevenendo assottigliamenti troppo accentuati o lacerazioni. E' quindi indispensabile un corretto set-up di questo componente sia in termini di forze che di lubrificazione.

Le proprietà più importanti da considerare nella progettazione del processo sono elencate di seguito:

- composizione chimica e proprietà meccaniche del materiale soggetto a profondo stampaggio;
- dimensione e geometria della matrice, del punzone e del prelamiera;
- velocità e forza applicate al punzone;

- tipologia del lubrificante utilizzato;
- forza esercitata dal premilamiera.

Occorre evidenziare che, in un processo di stampaggio eseguito correttamente, la lamiera non subisce una variazione apprezzabile dello spessore, per cui la superficie iniziale della lamiera sarà paragonabile a quella del prodotto finito.

### 3.1 Stampabilità

In un'operazione di formatura ideale, in cui l'unico processo di deformazione è l'imbutitura (*drawing*), la forza che agisce sul premilamiera deve essere appena sufficiente per permettere alla lamiera di scorrere radialmente nella cavità della matrice senza che si formino grinze. Le deformazioni hanno luogo nella zona del premilamiera e sul bordo d'ingresso della matrice. Non avviene invece alcuna deformazione sul naso del punzone.

La stampabilità del materiale è notevolmente influenzata dalla sua capacità di resistere a deformazioni nella direzione dello spessore. Questa capacità è misurata dal rapporto di deformazione plastica  $r$ , analizzato nel capitolo 2; è quindi preferibile utilizzare un materiale che presenti un valore elevato di tale parametro.

### 3.2 Lubrificazione

Al fine di ridurre attrito, usura e fenomeni di danneggiamento dovuti a microsaldatura tra prodotto ed attrezzatura, è essenziale una corretta lubrificazione della parti che devono subire profondo stampaggio. Le forze di attrito presenti nella zona del premilamiera giocano un ruolo fondamentale nella buona riuscita dell'operazione, ossia l'assenza di assottigliamenti o fratture nel pezzo dovute ad una insufficiente adduzione di materiale.



E' importante far notare che, data la geometria del prodotto, le condizioni di processo diventano più severe all'aumentare dello spessore della lamiera.

La funzione primaria della lubrificazione durante il processo di formatura è quella di prevenire fenomeni di danneggiamento dell'attrezzatura e della lamiera favorendone lo scorrimento relativo. Il lubrificante infatti, creando un meato che separa le superfici, riduce l'attrito e l'usura della matrice, del punzone e della stessa lamiera, che sarebbe causata dal contatto diretto metallo su metallo.

Di seguito viene analizzata la lubrificazione in funzione delle diverse modalità di deformazione.

### **Stretching**

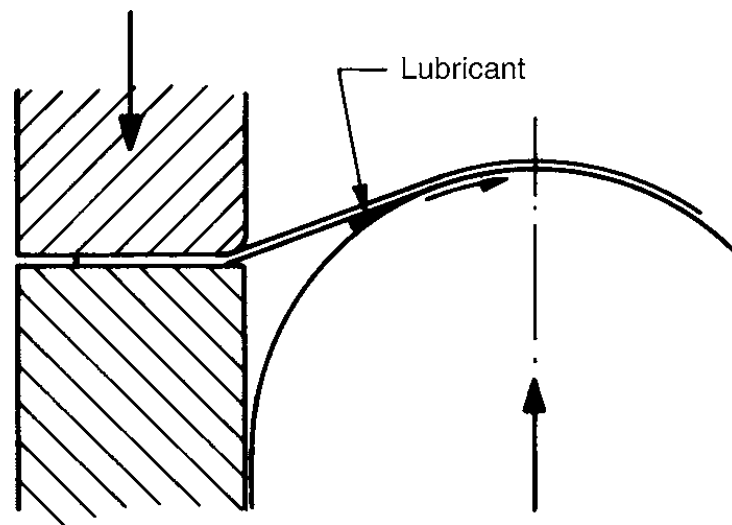
Nella modalità di deformazione per stretching la lamiera è bloccata lungo tutta la circonferenza della flangia e la deformazione avviene a spese dello spessore della lamiera stessa. La profondità dell'operazione prima della frattura e la posizione di quest'ultima sono funzione dell'attrito e delle proprietà del materiale.

L'assottigliamento di spessore ha luogo nelle aree in cui l'attrito punzone lamiera è più basso, consentendo a quest'ultima di deformarsi. Nel caso di assenza di attrito, una condizione ottenibile tramite idroformatura, la lamiera viene deformata gradualmente fino all'apice dove si manifesta la frattura secondo uno stato di trazione biassiale bilanciata. In presenza di attrito le deformazioni risultano ostacolate e si localizzano nella zona compresa fra il punzone e la matrice, dove il materiale è libero di deformarsi. La profondità ottenibile prima che avvenga la frattura diminuisce. Un coefficiente  $n$  maggiore genera lo stesso effetto di una diminuzione di attrito, mentre invece un parametro  $r$  maggiore genera l'effetto opposto<sup>1</sup>.

Come evidenziato in figura 3.2 durante l'avanzamento del punzone il lubrificante tende ad essere espulso verso i lati. E' quindi consigliato l'utilizzo di un lubrificante viscoso o solido in sostituzione di quelli liquidi.

---

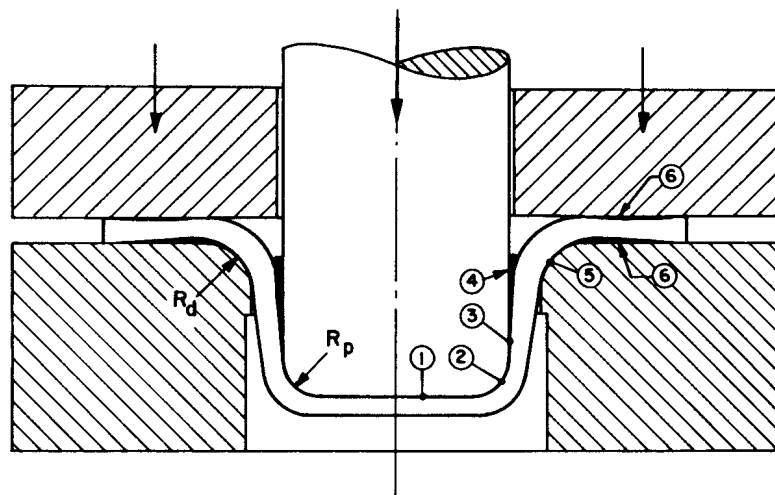
<sup>1</sup>Fare riferimento al paragrafo 2.3.



**Figura 3.2:** Lubrificazione in caso di stretching [7].

### Drawing

Durante il processo di profondo stampaggio si manifestano svariate condizioni tribologiche, come mostrato in figura 3.3.



**Figura 3.3:** Zone di differente lubrificazione nel profondo stampaggio [7].

Le condizioni sul fondo del punzone (zona 1) sono le stesse dello stretching, eccetto per il fatto che l'attrito attorno al raggio (zona 2) limiti la trasmissione dello

sforzo. In zona 2 gli sforzi sono maggiori e possono avvenire alcuni slittamenti relativi che assottigliano il meato di lubrificante.

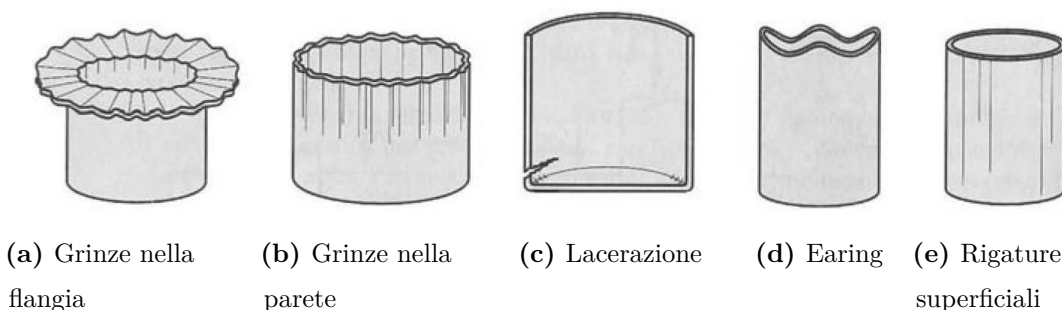
In zona 3 il lubrificante è intrappolato tra il fianco del punzone e la lamiera appena deformata. La pressione è molto bassa e può facilmente diventare nulla se avviene un ritorno elastico oppure se lo spazio tra il materiale e la matrice è largo abbastanza da permettere al prodotto di separarsi dal punzone. La rugosità delle superfici e la presenza di lubrificante hanno, in questo caso, un effetto blando.

All'ingresso del raccordo della matrice (zona 5) la pressione è relativamente elevata e sono presenti severe condizioni di slittamento. La velocità di scorrimento della lamiera è uguale alla velocità di imbutitura e la superficie, deformata da compressione circonferenziale, piegamento e raddrizzamento, diventa progressivamente più rugosa. Se non si utilizzasse lubrificante esisterebbe il rischio di usurare precocemente l'utensile e rovinare la superficie del prodotto.

Nella zona del premilamiera (zona 6) la pressione è relativamente bassa e il lubrificante deve agevolare lo scorrimento della lamiera.

### 3.3 Difetti

I prodotti soggetti a profondo stampaggio possono presentare diversi difetti, tipici di questo processo; essi sono illustrati in figura 3.4 e vengono descritti in seguito.



**Figura 3.4:** Possibili difetti nell'operazione di profondo stampaggio di un prodotto cilindrico [7].

### **Grinze nella flangia**

Consistono in una serie di creste che si formano radialmente nella flangia, ovvero nella zona del premilamiera, a causa degli sforzi di compressione circonferenziali causati dal flusso di materiale all'interno della matrice.

E' possibile intervenire su questo difetto agendo oculatamente sulla forza del premilamiera.

### **Grinze nella parete**

Le grinze nella parete hanno origine dall'omologo difetto che avviene nella flangia. Queste ondulazioni, una volta formatesi nella zona del premilamiera, come descritto prima, vengono trascinate dal punzone all'interno della matrice generando il difetto sulla parete del prodotto.

### **Lacerazione**

Le lacerazioni avvengono in prossimità della base del componente e sono il risultato di una forte deformazione nella parete. Questo sforzo causa un assottigliamento della parete maggiore di quello sopportabile dal materiale, con conseguente superamento del carico di rottura del materiale in quella zona.

Si può ovviare al problema intervenendo sia sulla geometria del prodotto che sulla capacità di scorrimento della lamiera nella zona del premilamiera, modificando lubrificazione e pressione di quest'ultimo.

### **Earing**

Il termine inglese *Earing* può essere tradotto in italiano come "orecchiatura"; consistono infatti in ondulazioni (orecchie) nel bordo superiore del prodotto finito.

Sono causate dall'anisotropia del materiale generalmente prodotta dalla laminazione: a causa dell'anisotropia planare, la lamiera può presentare maggiore

resistenza in una direzione piuttosto che nelle altre. Questo causa la formazione di ondulazioni nel lato superiore del pezzo, dannose nel caso di prodotti il cui ciclo produttivo non preveda la presenza di sfridi.

Un ulteriore problema legato all'earring avviene quando si imbutiscono lamiere pre-litografate; il disegno voluto risulterà deformato se è presente anisotropia nel materiale.

E' possibile risolvere il problema prevedendo opportuni sfridi o trattando preventivamente il materiale con un ciclo termico atto a rimuovere l'incrudimento dato dalla laminazione.

### **Rigature superficiali**

Si presentano sotto forma di graffiature sulla parete esterna del prodotto. Sono imputabili ad una superficie della matrice non perfettamente liscia o ad una non corretta lubrificazione.

# Capitolo 4

## Obiettivi

Il lavoro sperimentale presentato in seguito ha come obiettivo quello di studiare e classificare diversi tipi di materiale e di condizioni di lavorazione, in modo tale da fornire delle linee guida valide per ottenere dei pezzi conformi nelle operazioni di stampaggio che presentano criticità, con particolare attenzione allo studio delle condizioni di sforzo che si manifestano all'interno dei pezzi e alla loro modificazione in funzione delle condizioni sperimentali.

Si presenteranno in questa parte tutte le prove effettuate, espressamente ideate per ottenere risultati facilmente confrontabili e ripetibili.

In particolare le prove di trazione e le prove Erichsen rappresentano le prove principali che è possibile effettuare in campo meccanico. La prima consente una caratterizzazione del materiale per quanto riguarda le sue proprietà meccaniche, mentre la seconda caratterizza il materiale per la sua attitudine a sopportare condizioni critiche di stampaggio, ovvero condizioni di stretching.

Queste due semplici prove, unite allo studio di diverse condizioni sperimentali, permetteranno di avere un'idea piuttosto precisa di quali fattori conviene modificare in caso di operazioni di stampaggio particolarmente critiche e che quindi richiedono una progettazione più attenta e ponderata.

Si analizzeranno e confronteranno poi i risultati ottenuti per via pratica con simulazioni numeriche a elementi finiti.

# Capitolo 7

## Prove Erichsen

La prova Erichsen è un test distruttivo che consente di determinare la capacità da parte di laminati metallici di sopportare deformazioni in modalità di stretching.

La prova ricrea di fatto una condizione di trazione biassiale sul materiale da testare, che come già ampiamente spiegato nei capitoli introduttivi, è la condizione peggiore che possa subire un materiale durante lo stampaggio a freddo. Si ottiene quindi in output un parametro, espresso in mm, chiamato *indice Erichsen* (abbreviato *IE*), che corrisponde all'avanzamento del punzone della macchina prima che il provino vada incontro a rottura. Questo indice è necessario, nonché molto utile nella pratica industriale, per poter confrontare vari materiali in base alla loro attitudine a sopportare condizioni di deformazione critiche.

In un processo di stampaggio tali condizioni possono verificarsi per numerose cause, quali, ad esempio, errori di progettazione, scarsa lubrificazione, difetti del materiale o della matrice, oppure semplicemente la presenza di spigoli a basso raggio di raccordo previsti in fase di progetto.



## 7.1 Progettazione del piano sperimentale

Per la procedura sperimentale, dopo qualche prova per orientarsi e fare una prima selezione dei possibili fattori, basati su tutte le considerazioni fatte nei capitoli precedenti, si è cercato di tenere in conto un numero di termini adeguati compatibilmente con il materiale a disposizione; questo ha portato alla definizione dei seguenti fattori:

- materiale;
- lubrificazione;
- velocità di applicazione del carico;
- forza del premilamiera.

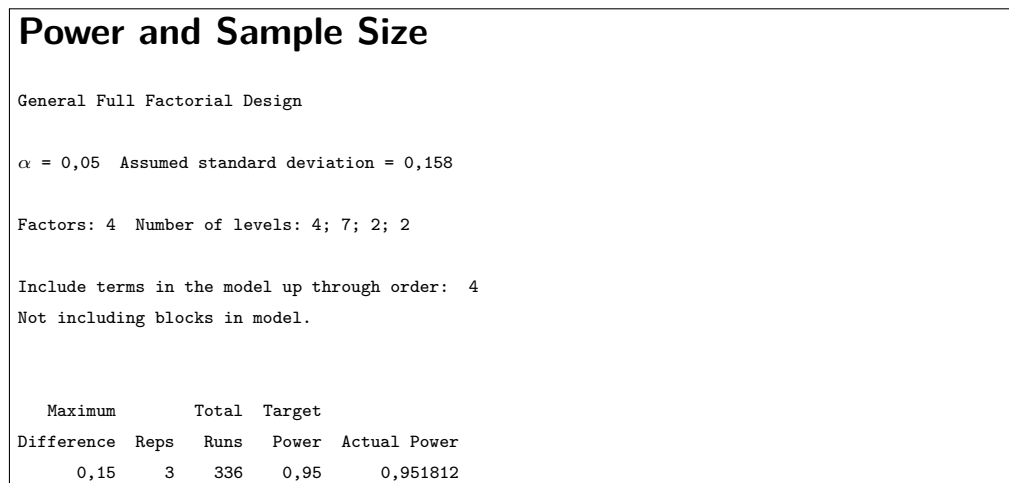
Per ogni fattore si sono successivamente scelti i livelli, dettati, in questo caso, da parametri di processo reali o da limiti tecnici dei macchinari utilizzati. I fattori e i relativi livelli sono riportati nella tabella 7.1. Come regola generale si è tentato di mantenere i livelli il più distante possibile tra loro, in modo che eventuali differenze fossero ben evidenziate e riconoscibili dal test ANOVA che sarà svolto nel paragrafo 7.3.3

Per quanto concerne la scelta del numero di repliche occorre riferirsi alla potenza del test, cioè la probabilità di rifiutare l'ipotesi nulla quando effettivamente quest'ultima è falsa, posta pari almeno al 95%. Grazie a prove precedenti su materiali analoghi è stato possibile stimare la deviazione standard del test, pari a  $\sigma = 0,158$  mm; è inoltre nota l'accuratezza della macchina di prova (0,15 mm). Con questi due dati, tramite tabelle statistiche oppure l'ausilio del software Minitab<sup>®</sup> è possibile ricavare un numero minimo di repliche da effettuare.

Nel caso in esame sono necessarie almeno tre repliche, per un totale di 336 esperimenti, ottenendo in questo modo una potenza del 95,2%. In figura 7.1 è riportato l'output di Minitab<sup>®</sup>.

Fattore	Livelli	ID
Materiale	304	
	304P	
	430	
	441	
Lubrificazione	Assente	S
	Petrolato	V
	Petrolato (solo punzone)	VP
	Petrolato (solo premilamiera)	VH
	PVC	P
	PVC (solo punzone)	PP
	PVC (solo premilamiera)	PH
Velocità	4,3 mm min <sup>-1</sup>	B
	120 mm min <sup>-1</sup>	A
Pressione premilamiera (Forza)	6,57 MPa (10 kN)	B
	59,2 MPa (90 kN)	A

**Tabella 7.1:** Fattori e relativi livelli sperimentali indagati tramite prova Erichsen.



**Figura 7.1:** Output del software Minitab® per il calcolo del numero di repliche.

Gli esperimenti sono stati condotti con un piano *CRD* (*Complete Randomized Design*), ossia con una casualizzazione dell'ordine degli esperimenti, che permette di limitare gli errori sistematici che potrebbero presentarsi altrimenti. Infatti,

in questo modo, eventuali fattori di disturbo vengono distribuiti su condizioni sperimentali differenti, andando quindi ad influire in modo limitato sugli esiti dell'esperimento.

## 7.2 Preparazione dei materiali

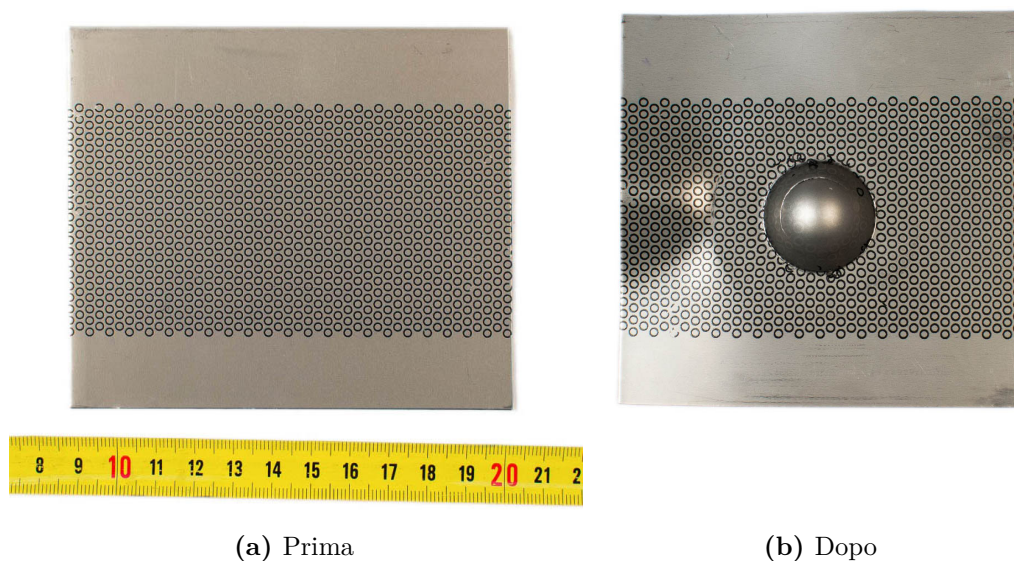
In questa sezione si riportano tutte le operazioni preliminari effettuate a monte della sperimentazione, le eventuali difficoltà incontrate e come sono state risolte.

### 7.2.1 Stampa del pattern di cerchi

La stampa del pattern di cerchi è necessaria per poter valutare in maniera analitica le deformazioni subite dal materiale durante la prova, infatti, deformandosi unitamente al materiale sarà sufficiente misurare di quanto si sono modificati i riferimenti circolari nelle due direzioni, per poter risalire allo stato di sforzo a cui era soggetto il materiale durante la prova.

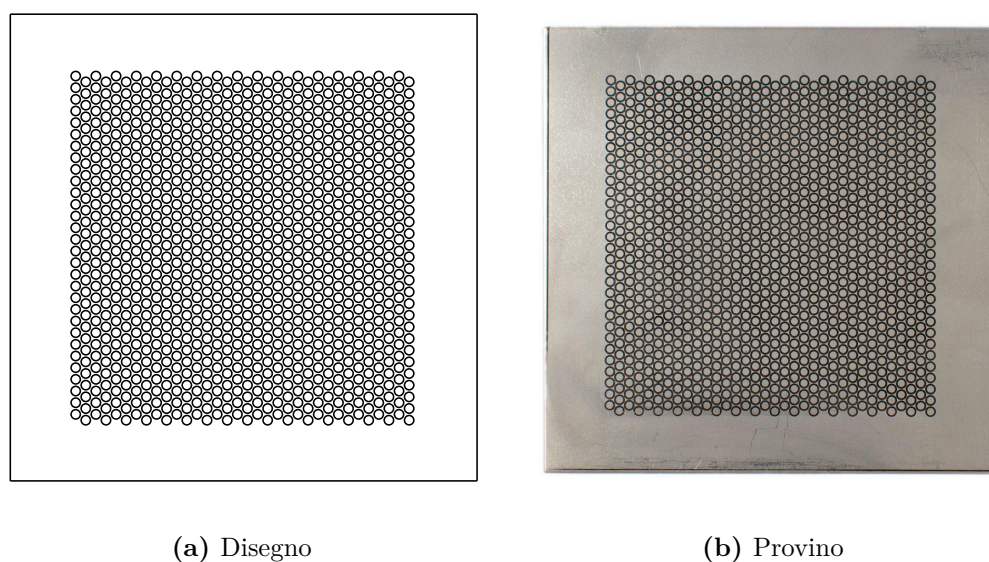
Come prima opzione si è scelto di testare la stampa UV, data la sua estrema flessibilità e la possibilità di stampare in volumi ridotti. Il pattern presentava una discreta precisione ed era in leggero rilievo; inoltre era completamente inerte nei confronti dei lubrificanti utilizzati. Purtroppo durante la deformazione l'adesione tra substrato e inchiostro non è risultata sufficiente e il pattern di cerchi si è completamente distaccato rendendo inutilizzabile questa tecnica di stampa (figura 7.2).

Si è quindi ricorsi alla stampa serigrafica, il processo è molto più rigido e si adatta maggiormente a grandi volumi, la precisione ottenuta è analoga alla stampa UV, mentre non si percepisce nessun rilievo sulla superficie, anche in questo caso il comportamento a contatto con i lubrificanti è ottimo. L'adesione al substrato è nettamente migliore rispetto alla stampa UV, infatti durante la prova il disegno segue fedelmente la deformazione del materiale sottostante consentendo una valutazione più che soddisfacente degli stati di sforzo.



**Figura 7.2:** Effetto della deformazione sul pattern marcato tramite stampa UV, si noti il completo distacco dell'inchiostro dal substrato nella zona maggiormente deformata.

In figura 7.3 è riportato il pattern definitivo adottato per i provini erichsen, e la sua realizzazione mediante stampa serigrafica.



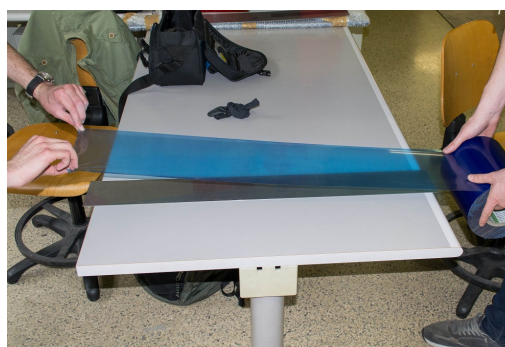
**Figura 7.3:** Disegno e realizzazione serigrafica del pattern di cerchi utilizzato per la valutazione delle deformazioni su provini Erichsen.

## 7.2.2 Applicazione dei lubrificanti ed esecuzione della prova

La stesura del lubrificante solido avviene in più fasi come mostrato in figura 7.4. Si inizia con una pulitura accurata delle superfici da ricoprire tramite un solvente in modo da eliminare tutte le tracce di oli e polvere, permettendo alla pellicola di aderire al metallo in maniera ottimale. Successivamente si svolge il nastro in modo che ricopra l'intera lastra e lo si adagia sulla superficie, si passa poi, con l'ausilio di una spatola, a rimuovere le bolle d'aria rimaste intrappolate sotto la superficie della pellicola, in questa fase si è ricorso all'utilizzo di una pistola termica per ammorbidire la pellicola ed evitare così eventuali strappi.



(a) Pulitura



(b) Prima stesura



(c) Rifilatura



(d) Stesura definitiva

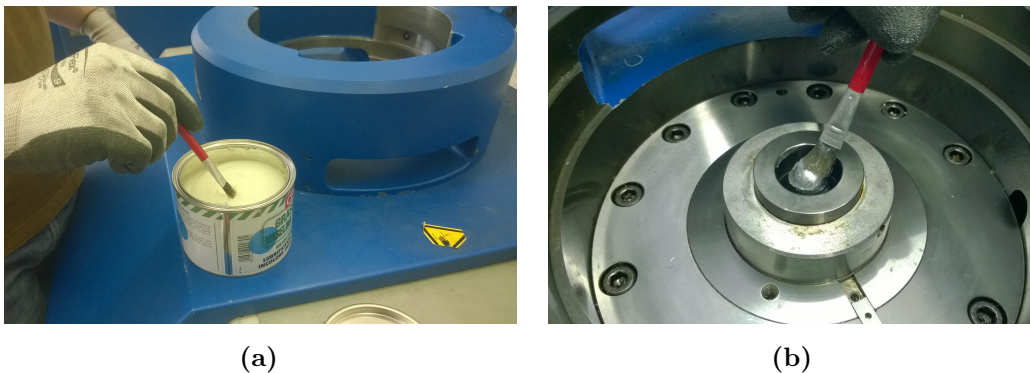
**Figura 7.4:** Fasi di stesura della pellicola plastica lubrificante su una lastra di acciaio inossidabile.

Prima di effettuare la campagna sperimentale vera e propria le lastre sono state

tranciate in quadri di 100 mm di lato, questo per evitare che l'influenza degli effetti di bordo<sup>1</sup> fosse differente per ogni provino, andando a modificare la corretta geometria dello stesso ed aumentando quindi la ripetibilità della prova.

Per le condizioni sperimentali che richiedono la lubrificazione del solo punzone o del solo premilamiera si è provveduto successivamente a rifilare la pellicola rimuovendo la parte in eccesso dalla lastra. Per il corretto posizionamento in macchina di queste prove è stata costruita una maschera di cartone che permetteva un posizionamento sufficientemente preciso, vista l'impossibilità di vedere la parte interessata, e quindi di capire la posizione relativa del premilamiera rispetto alla zona priva di pellicola.

L'applicazione del petrolato è stata invece effettuata direttamente sulle componenti della macchina (punzone e premilamiera) in modo da annullare eventuali errori di centraggio del provino, come mostrato in figura 7.5.



**Figura 7.5:** Fase di applicazione del petrolato direttamente sul punzone della macchina Erichsen.

Tra una condizione sperimentale e l'altra si è resa necessaria una pulizia delle parti della macchina Erichsen per consentire un'esecuzione della prova nella maniera più ripetibile possibile, in particolar modo dopo aver effettuato le prove che prevedevano l'uso del petrolato.

<sup>1</sup>Dalle prove esplorative si è notato come, quando il livello del premilamiera fosse impostato sul livello basso, sorgessero delle grinze e delle deformazioni proprio sul bordo esterno

## 7.3 Analisi dei dati

Una volta conclusa la campagna sperimentale comprensiva delle varie repliche si è reso necessario analizzare i dati ottenuti, sempre grazie all'ausilio del software statistico Minitab®. In particolar modo, nel seguito, sono riportati i grafici e le tabelle ottenute, con le relative considerazioni effettuate.

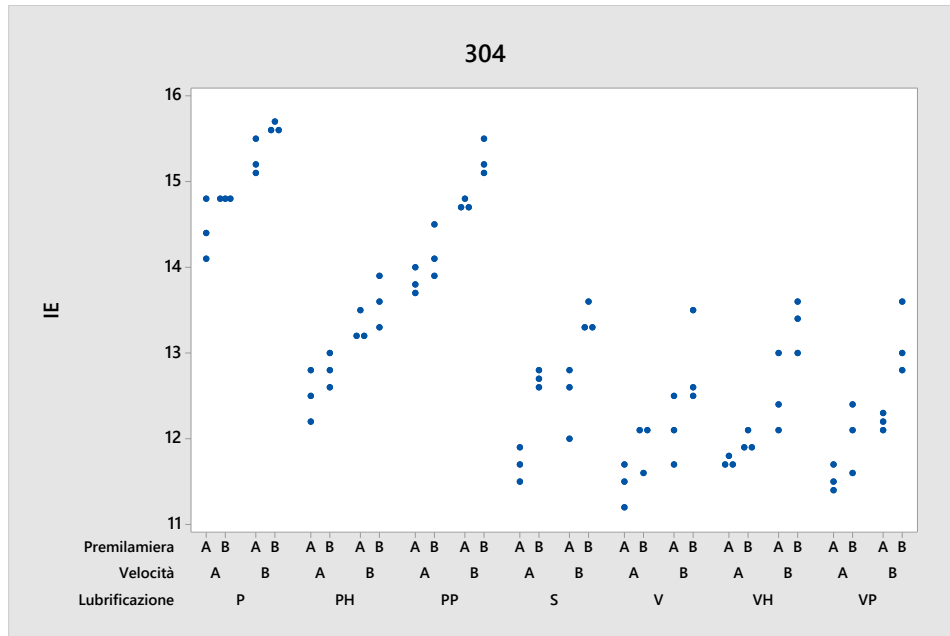
### 7.3.1 Scatterplot

In prima analisi è possibile visualizzare i dati tramite un grafico di dispersione (in inglese *scatterplot*): ogni dato viene rappresentato da un punto in un grafico cartesiano che riporta sulle ascisse le condizioni sperimentali e sulle ordinate l'output della prova, nel nostro caso l'indice Erichsen (IE). Questo tipo di grafico è utile per farsi un'idea di massima sui risultati dell'esperimento, in particolare per comprendere il tipo di correlazione che occorre tra le condizioni sperimentali ed i risultati, visualizzare la dispersione dei dati ed identificare eventuali valori anomali (*outliers*).

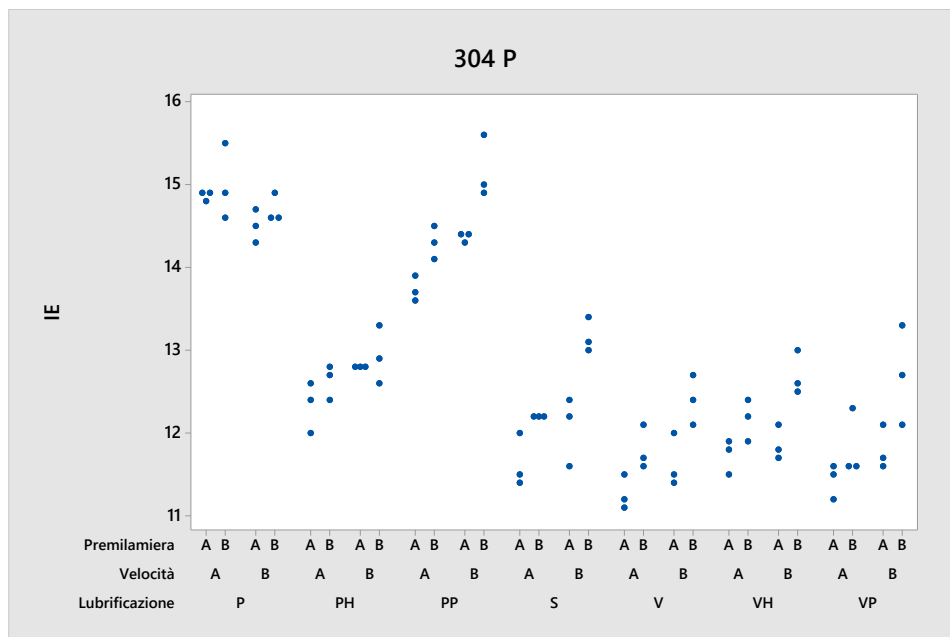
Tuttavia, data la notevole quantità di condizioni sperimentali investigate, risulta molto scomodo e poco efficace visualizzare tutti i dati in un unico grafico. Vengono quindi riportati, nelle figure 7.6 e 7.7, i grafici di dispersione dei dati, divisi per materiale.

Si nota immediatamente come la famiglia di materiali abbia un'influenza predominante sul risultato; i provini realizzati con acciaio di tipo austenitico riescono a sopportare meglio la deformazione imposta, ottenendo in qualsiasi condizione valori di IE maggiori di qualunque provino realizzato in materiale ferritico. Anche la lubrificazione gioca un ruolo di primaria importanza, in particolare tramite il film plastico si riescono ad ottenere deformazioni più spinte, e questo effetto è accentuato nel caso di materiali austenitici.

In ogni caso queste considerazioni iniziali saranno confermate dall'analisi ANOVA riportata nel paragrafo 7.3.3.



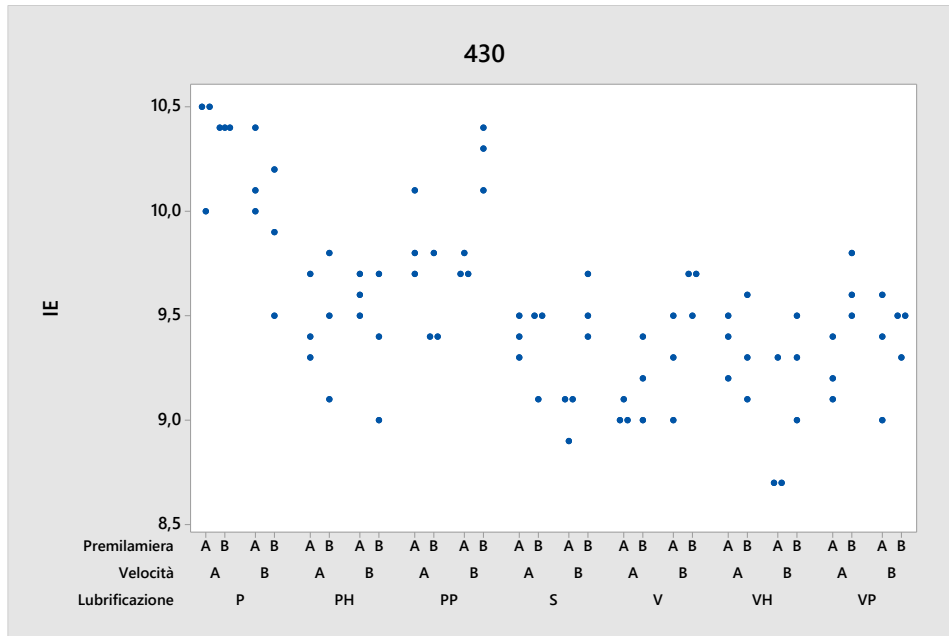
(a) AISI 304



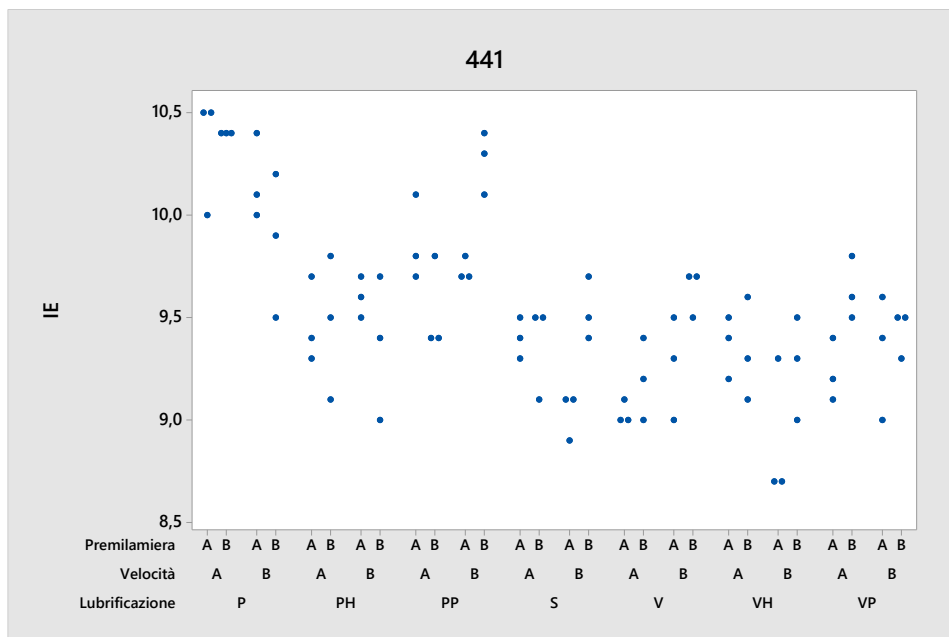
(b) AISI 304 P

**Figura 7.6:** Grafico di dispersione per acciai austenitici. Riferirsi alla colonna "ID" della tabella 7.1 per i codici delle condizioni sperimentali.





(a) AISI 430



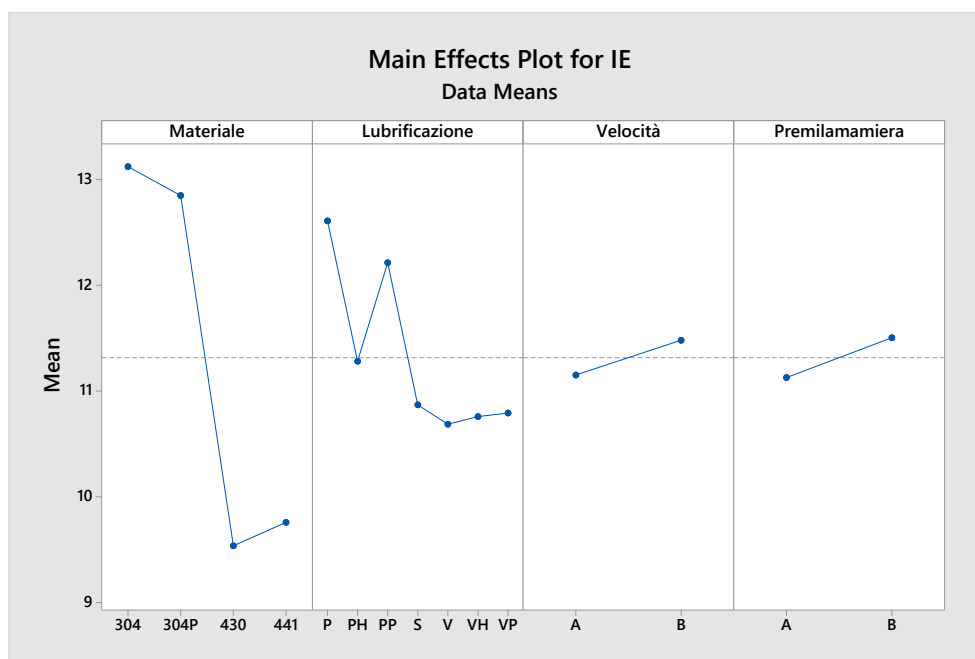
(b) AISI 441

**Figura 7.7:** Grafico di dispersione per acciai ferritici. Riferirsi alla colonna "ID" della tabella 7.1 per i codici delle condizioni sperimentali.

Sempre dai grafici di dispersione si può inoltre notare come, anche grazie alla perizia riposta nell'eseguire l'esperimento, non si evidenziano valori anomali.

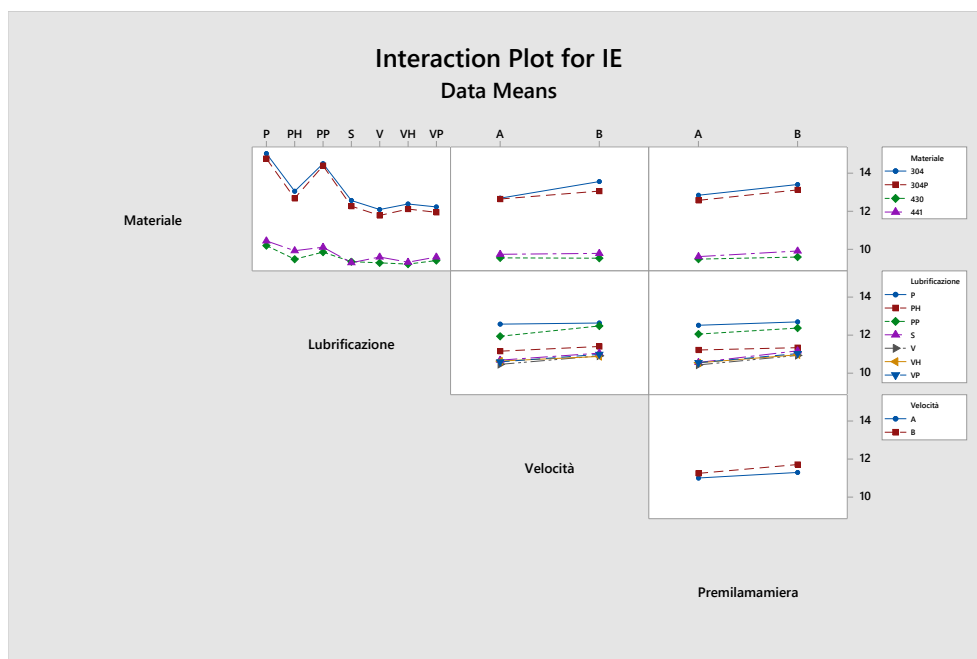
### 7.3.2 Main effects plot ed interaction plot

Per comprendere ancora meglio i dati è comodo riferirsi al grafico degli effetti principali (*main effects plot*) ed al grafico delle interazioni (*interaction plot*). Il primo mostra, per ogni fattore, l'influenza di ciascun livello trascurando l'influenza degli altri fattori; tale grafico è molto comodo per visualizzare l'effetto principale di ogni fattore sulla variabile di risposta. Il grafico delle interazioni, invece, mostra una matrice di grafici in cui vengono riportati gli effetti delle interazioni doppie sempre sulla variabile di risposta. Main effects plot e Interaction plot per la variabile di risposta IE sono mostrati rispettivamente in figura 7.8 ed in figura 7.9



**Figura 7.8:** Main effects plot per la variabile di risposta IE.

Dal main effect plot si può notare come il fattore materiale ed il fattore lubrificazione siano predominanti rispetto al fattore velocità ed al fattore premilamiera. Per il fattore materiale si nota inoltre come, in generale, i materiali austenitici



**Figura 7.9:** Interaction plot per la variabile di risposta IE.

si deformino maggiormente rispetto ai materiali ferritici. Viene pure evidenziato come il lubrificante più efficace sia il PVC, mentre invece il petroliato non apporta miglioramenti in termini di aumento dell'indice Erichsen rispetto alla condizione di totale assenza di lubrificante.

L'interaction plot evidenzia un'interazione tra il fattore materiale ed il fattore lubrificante, come si può notare dal differente andamento del grafico in alto a sinistra della figura 7.9. In particolare la lubrificazione tramite PVC apporta un effetto migliorativo decisamente maggiore quando applicato su materiali austenitici rispetto a pari condizioni con materiali ferritici.

Come detto precedentemente, queste considerazioni iniziali verranno comunque confermate dall'analisi ANOVA riportata nel paragrafo 7.3.3.

### 7.3.3 Analisi ANOVA

L'ANOVA, acronimo di *Analysis of Variance*, è una tecnica di analisi statistica dei dati che permette di verificare ipotesi relative a differenze tra le medie di due o più popolazioni. Essa consente, tra le varie cose, di determinare quanti e quali fattori dell'esperimento siano significativi e quali no. Indica inoltre la significatività delle interazioni che sussistono tra i vari fattori, ovvero eventuali influenze combinate di due o più fattori sulla variabile di risposta.

Per poter essere applicata l'analisi ANOVA richiede che vengano soddisfatte le seguenti ipotesi:

- la variabile deve essere distribuita normalmente all'interno di tutte le popolazioni corrispondenti alle varie condizioni sperimentali;
- la varianza dei dati all'interno di ogni condizione sperimentale non deve statisticamente differire dalla varianza delle altre condizioni sperimentali;
- i campioni analizzati devono essere rappresentativi della popolazione sotto indagine;
- i residui ottenuti dal modello restituito dall'ANOVA devono distribuirsi secondo una normale.

L'ipotesi nulla dell'ANOVA ( $H_0$ ) è l'uguaglianza delle medie delle condizioni sperimentali considerate. Quindi, dato un valore di soglia per l'accettazione dell'ipotesi nulla ( $\alpha$ ) pari al 5%, un fattore che presenti P-Value minore di tale valore di soglia è da considerarsi significativo ai fini dell'esperimento.

Si è quindi scelto di eseguire un'analisi ANOVA multi fattore attraverso il software statistico Minitab®. Sono stati inclusi nel modello tutti i fattori e le interazioni fino al terzo ordine. Il risultato ottenuto è riportato in figura 7.10.

Prima di trarre qualsiasi conclusione, è necessario verificare le ipotesi del modello.

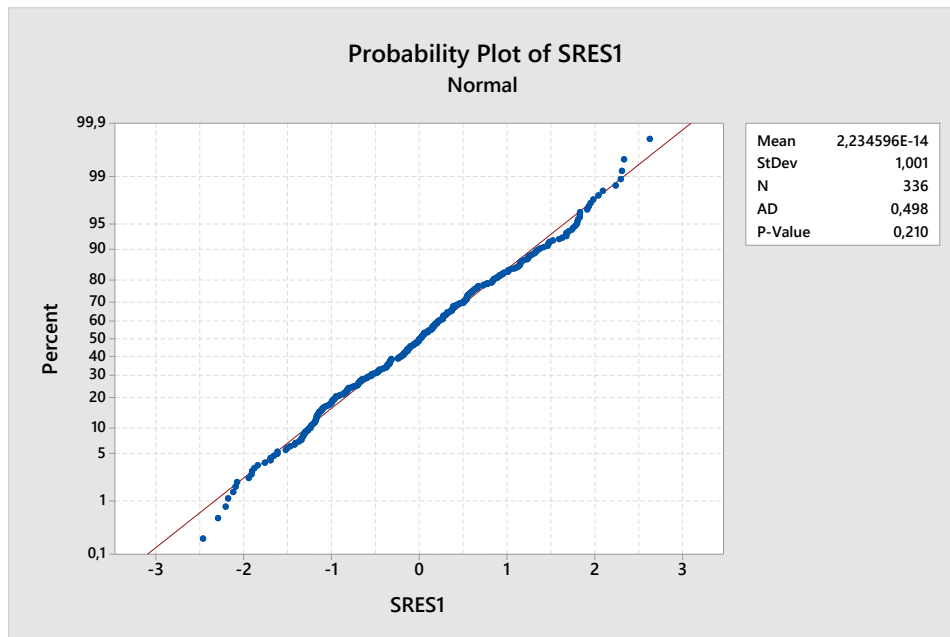
Sono quindi analizzati nelle figure 7.11 e 7.12 i residui standardizzati ottenuti dal modello stesso. L'ipotesi di normalità dei residui non può essere rifiutata con un

General Linear Model: IE versus Materiale; Lubrificazione; Velocità; Premilamiera						
Factor Information						
Factor	Type	Levels	Values			
Materiale	Fixed	4	304; 304P; 430; 441			
Lubrificazione	Fixed	7	P; PH; PP; S; V; VH; VP			
Velocità	Fixed	2	A; B			
Premilamiera	Fixed	2	A; B			
Analysis of Variance						
Source		DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Materiale		3	938,81	312,936	5422,10	0,000
Lubrificazione		6	176,54	29,424	509,81	0,000
Velocità		1	8,84	8,840	153,17	0,000
Premilamiera		1	11,63	11,626	201,43	0,000
Materiale*Lubrificazione		18	53,54	2,975	51,54	0,000
Materiale*Velocità		3	10,33	3,442	59,64	0,000
Materiale*Premilamiera		3	2,84	0,947	16,40	0,000
Lubrificazione*Velocità		6	1,77	0,295	5,12	0,000
Lubrificazione*Premilamiera		6	2,25	0,376	6,51	0,000
Velocità*Premilamiera		1	0,58	0,575	9,96	0,002
Materiale*Lubrificazione*Velocità		18	2,59	0,144	2,49	0,001
Materiale*Lubrificazione*Premilamiera		18	0,78	0,043	0,75	0,761
Materiale*Velocità*Premilamiera		3	0,07	0,024	0,42	0,737
Lubrificazione*Velocità*Premilamiera		6	1,16	0,193	3,35	0,003
Error		242	13,97	0,058		
Lack-of-Fit		18	1,03	0,057	0,99	0,475
Pure Error		224	12,94	0,058		
Total		335	1225,69			
Model Summary						
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
	0,240239	98,86%	98,42%	97,80%		

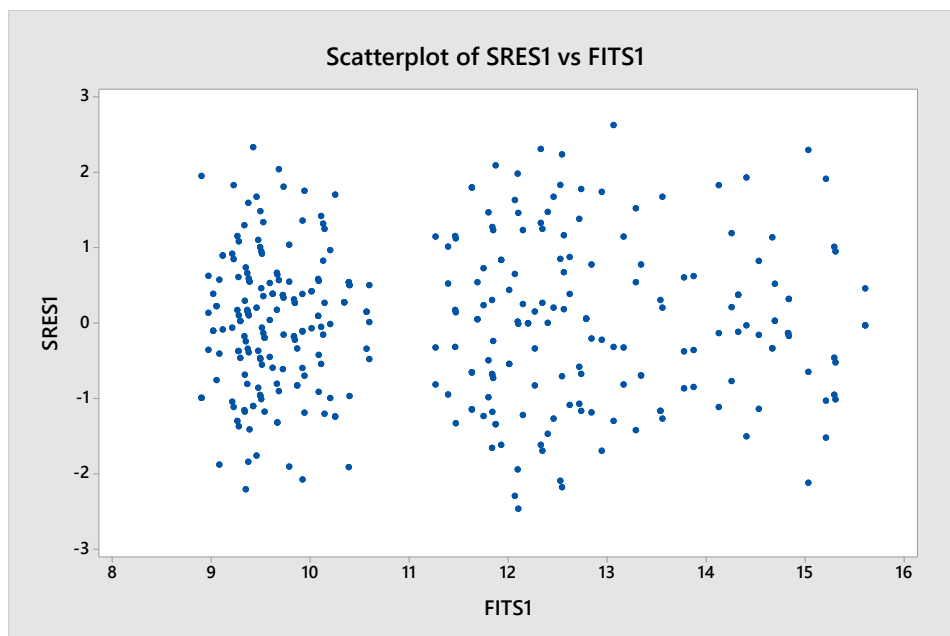
**Figura 7.10:** Tavola ANOVA restituita dal software Minitab® per l'analisi dei dati della prova Erichsen.

P-Value pari allo 0,210: infatti l'ipotesi nulla di tale test è la normalità dei dati analizzati. Per quanto riguarda la distribuzione dei residui standardizzati, essi sono distribuiti omogeneamente nel piano e non superano i livelli critici +3 e -3.

Allo stesso modo anche il test dell'omogeneità in varianza, effettuato con il metodo di Bartlett, non può essere rifiutato con un P-Value dello 0,703, come mostrato in



**Figura 7.11:** Verifica dell'ipotesi di normalità del test ANOVA.



**Figura 7.12:** Verifica della distribuzione dei residui del test ANOVA.

figura 7.13.

Test for Equal Variances: SRES1 versus Materiale; Lubrificazione; Velocità; Premilamiera		
Method		
Null hypothesis	All variances are equal	
Alternative hypothesis	At least one variance is different	
Significance level	$\alpha = 0,05$	
Bartlett's method is used. This method is accurate for normal data only.		
Tests		
	Test	
Method	Statistic	P-Value
Bartlett	98,77	0,703

**Figura 7.13:** Test di omogeneità della varianza dei residui. Il test, effettuato tramite metodo di Bartlett, è superato con P-Value pari a 0,703.

Dato che tutte le ipotesi del modello sono soddisfatte si possono ritenere attendibili i risultati in figura 7.10. Si nota immediatamente come tutti i fattori principali risultino essere significativi. Risultano significative anche tutte le interazioni doppie e alcune interazioni triple; nello specifico quella tra materiale, lubrificazione e velocità e quella tra lubrificazione, velocità e premilamiera. Il Lack-of-Fit inoltre non evidenzia la necessità di includere interazioni di ordine superiore nel modello. Un'ulteriore conferma della bontà del modello è fornita dall'elevato valore di  $R\text{-sq}^2$ .

### 7.3.4 Comparazione dei livelli

Si passa dunque ad analizzare l'influenza di ogni livello all'interno dei fattori significativi e delle interazioni tra i fattori.

Per fare questo ci si avvale della funzione *Comparisons* fornita dal software Minitab® utilizzando il metodo di Tukey. In output viene fornito un elenco dei

---

<sup>2</sup>L'indice R-sq (R-squared) è una misura statistica di quanto i dati sono prossimi alla curva di regressione restituita dall'ANOVA; più il valore è alto più la regressione è significativa.

livelli del fattore (o dell'interazione); a ciascun livello viene assegnato un gruppo tramite una lettera: livelli che condividono tra loro la stessa lettera sono da considerarsi statisticamente uguali, quindi l'eventuale differenza tra i livelli è da imputare alla varianza che caratterizza l'esperimento, e viceversa livelli con lettere diverse sono da considerarsi statisticamente differenti. I livelli vengono ordinati in ordine decrescente in base alla media delle repliche del livello stesso.

Sono analizzate in seguito le influenze di ogni fattore significativo e delle interazioni doppie maggiormente rilevanti dal punto di vista industriale.

## Materiale

In figura 7.14 è riportata, partendo dal più alto al più basso, la situazione per quanto riguarda il solo fattore materiale.

<b>Tukey Pairwise Comparisons: Response = IE, Term = Materiale</b>			
Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence			
Materiale	N	Mean	Grouping
304	84	13,1167	A
304P	84	12,8429	B
441	84	9,7548	C
430	84	9,5369	D

Means that do not share a letter are significantly different.

**Figura 7.14:** Comparazione dei livelli per il fattore materiale.

Come si può notare non ci sono livelli che condividono la stessa lettera, quindi l'effetto apportato da ciascun materiale è significativamente differente dagli altri. Il materiale migliore risulta essere l'AISI 304, ma osservando le medie di livello si evince una marcata differenza tra acciai inossidabili austenitici e ferritici; mentre all'interno di ciascuna famiglia le differenze, comunque presenti, sono di lieve entità.

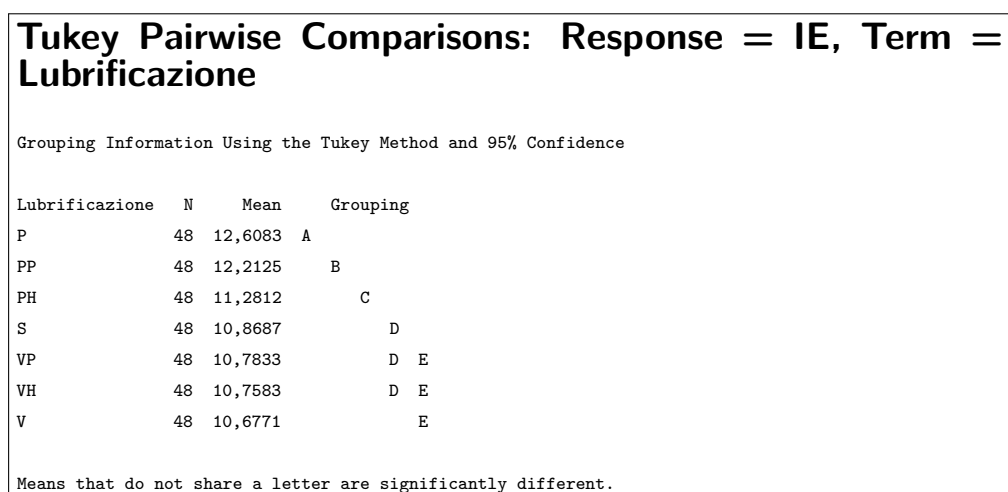
E' curioso evidenziare come il materiale AISI 304P, nato come variante a profondo stampaggio dell'AISI 304 standard, non presenta alcun vantaggio, ma anzi ha una



media di livello inferiore. Questo può essere interpretato analizzando lo stato di sforzo che si viene a creare durante la prova, infatti qui lo stato tensionale predominante è quello di stretching; i risultati potrebbero essere differenti analizzando il comportamento di tale materiale in uno stato di sforzo di drawing (si faccia riferimento al paragrafo 2.1).

## Lubrificazione

Si passa ora ad analizzare l'effetto della lubrificazione, che l'analisi ANOVA, tramite il valore di *adjusted mean of squares*, identifica come secondo in termini di importanza dopo il fattore materiale.



**Figura 7.15:** Comparazione dei livelli per il fattore lubrificazione.

La comparazione, riportata in figura 7.15, mostra come il lubrificante solido in PVC fornisca un contributo notevole all'incremento dell'indice Erichsen, se comparato con le prove effettuate in assenza di lubrificazione. Si scopre invece come il petrolato, lubrificante di natura viscosa, non contribuisca affatto al miglioramento delle prestazioni del processo; eventualmente potrebbe contribuire ad una minore usura delle componenti della macchina. Una possibile spiegazione di tale ininfluenza può essere data analizzando nel dettaglio il processo: sia nella fase di bloccaggio della lamiera ad opera del premilamiera, sia nella fase di contatto tra punzone e provino, le elevate pressioni che si vengono a formare fanno sì che il

lubrificante di natura viscosa venga espulso dalle zone interessate dal contatto e non possa quindi svolgere la sua funzione di riduzione del coefficiente di attrito.

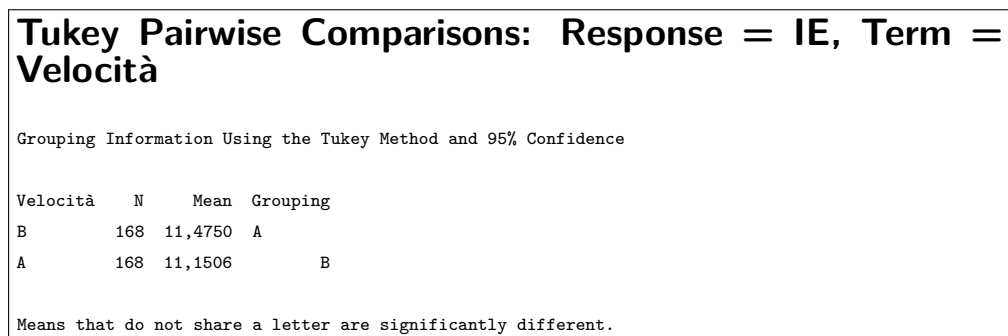
Per quanto riguarda il PVC si può notare come la zona interessata dalla lubrificazione influisca sul risultato. In particolare risulta senza dubbio migliore una lubrificazione completa, seguita dalla lubrificazione del solo punzone e quindi del solo premilamiera. Una lubrificazione completa permette sia il completo scorrimento del materiale nella zona punzonata sia un minimo apporto di materiale dalla zona del premilamiera. Come si evince lo scorrimento del materiale sul punzone riveste un'importanza maggiore in questa particolare prova, in cui il premilamiera ha il compito di bloccare completamente il materiale anche per pressioni di bloccaggio minime, consentendo perciò solo ad una minima parte di materiale di affluire nella zona di lavorazione.

Nelle operazioni di drawing effettuate nella realtà industriale invece, la lubrificazione del premilamiera è di fondamentale importanza perché consente lo scorrimento del materiale anche per pressioni di bloccaggio elevate, garantendo l'assenza di difetti di lavorazione, quali grinze o ondulature, sul prodotto finito. Ma la prova effettuata simula le condizioni di sforzo di stretching presenti in un'operazione di profondo stampaggio in alcuni punti particolarmente critici, quali geometrie aventi raggi di raccordo particolarmente ridotti; in questo caso le condizioni di scorrimento tra materiale e stampo sono di fondamentale importanza per la buona riuscita del processo, andando quindi a consigliare una lubrificazione completa della lamiera o dello stampo, con particolare attenzione ai punti critici appena menzionati.

## **Velocità**

La velocità è anch'essa un fattore significativo, anche se, come già notato dal Main effects e dall'ANOVA, assume un ruolo meno importante rispetto al materiale e alla lubrificazione. In questo caso (figura 7.16) la differenza di velocità tra termine alto e basso non è sufficiente ad evidenziare in maniera ottimale le differenze tra i

due livelli, anche se la comparazione indica come situazione migliore la velocità bassa.



**Figura 7.16:** Comparazione dei livelli per il fattore velocità.

La velocità di deformazione ha un'influenza sulla resistenza del materiale a causa del movimento delle dislocazioni. Se le dislocazioni hanno tempo di riorganizzarsi all'interno del materiale, questo sopporta meglio il carico imposto; il che avviene quando la velocità di deformazione è paragonabile alla velocità del moto delle dislocazioni all'interno del materiale stesso. Quando le dislocazioni invece sono costrette a muoversi ad una velocità troppo elevata e non riescono a riorganizzarsi, il materiale tende a fratturarsi al posto di deformarsi.

Ovviamente in ambito industriale le velocità usuali dei processi possono essere molto elevate, dato il bassissimo tempo ciclo che li caratterizza, quindi rimane sicuramente un fattore da tenere in considerazione quando si presentano problemi di rotture ed è possibile valutare di diminuire la produzione oraria.

## Premilamiera

Come già osservato per il fattore velocità, la forza del premilamiera risulta significativa, ma assume un ruolo di secondaria importanza; la comparazione tra i livelli di questo fattore è riportata in figura 7.17.

In questo caso risulta leggermente migliore l'utilizzo di una forza più bassa, che permette ad una parte del materiale interessata dal premilamiera di scorrere ed

<b>Tukey Pairwise Comparisons: Response = IE, Term = Premilamiera</b>			
Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence			
Premilamiera	N	Mean	Grouping
B	168	11,4988	A
A	168	11,1268	B
Means that do not share a letter are significantly different.			

**Figura 7.17:** Comparazione dei livelli per il fattore pressione del premilamiera.

alimentare la zona di deformazione, consentendo di distribuire la deformazione su più materiale.

Da notare come la forza massima applicabile dalla macchina di prova è molto inferiore alle forze usuali che vengono utilizzate in ambito industriale, però in questo caso conta la pressione che poi si viene a creare, infatti basti pensare che per lo stampaggio di una pentola partendo da lamiera di spessore di 1,2 mm vengono usate forze nell'ordine delle 100 tonnellate che si traducono poi, data l'area piuttosto importante, in pressioni intorno ai 10 MPa corrispondenti quindi al livello basso adottato in questa sperimentazione.

### Interazioni doppie

Si passa ora a studiare l'effetto combinato di più fattori sulla variabile di risposta IE. Non saranno analizzate tutte le interazione risultate significative dall'ANOVA ma solo quelle che si ritengono più interessanti in ambito industriale.

La comparazione dei livelli relativi all'interazione tra i fattori materiale e lubrificazione è riportata in figura 7.18.

Il grafico mette in evidenza come gli acciai inossidabili ferritici ottengano sempre prestazioni inferiori rispetto agli acciai inossidabili austenitici indipendentemente dalla condizione di lubrificazione. La comparazione dei livelli dell'interazione riprende quanto già osservato per i fattori materiale e lubrificazione presi in

**Tukey Pairwise Comparisons: Response = IE, Term = Materiale\*Lubrificazione**

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Materiale*Lubrificazione	N	Mean	Grouping
304 P	12	15,0333	A
304P P	12	14,7667	A B
304 PP	12	14,5000	B C
304P PP	12	14,3917	C
304 PH	12	13,0500	D
304P PH	12	12,6750	E
304 S	12	12,5667	E F
304 VH	12	12,3833	E F G
304P S	12	12,2667	F G H
304 VP	12	12,2250	F G H
304P VH	12	12,1167	G H I
304 V	12	12,0583	G H I
304P VP	12	11,9083	H I
304P V	12	11,7750	I
441 P	12	10,4417	J
430 P	12	10,1917	J K
441 PP	12	10,1083	J K
441 PH	12	9,9250	K L
430 PP	12	9,8500	K L
441 VP	12	9,5917	L M
441 V	12	9,5917	L M
430 PH	12	9,4750	M N
430 VP	12	9,4083	M N
430 S	12	9,3333	M N
441 VH	12	9,3167	M N
441 S	12	9,3083	M N
430 V	12	9,2833	M N
430 VH	12	9,2167	N

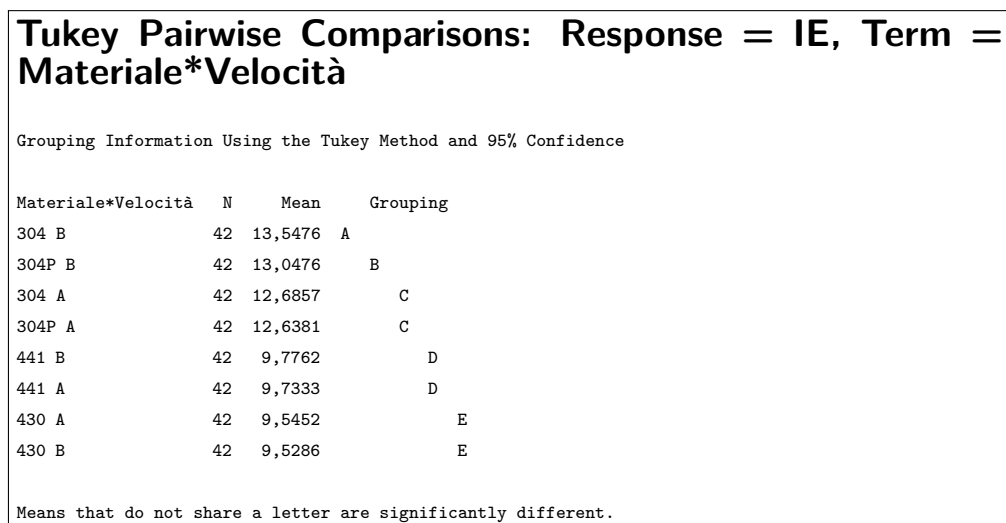
Means that do not share a letter are significantly different.

**Figura 7.18:** Comparazione dei livelli per l'interazione tra materiale e lubrificazione.

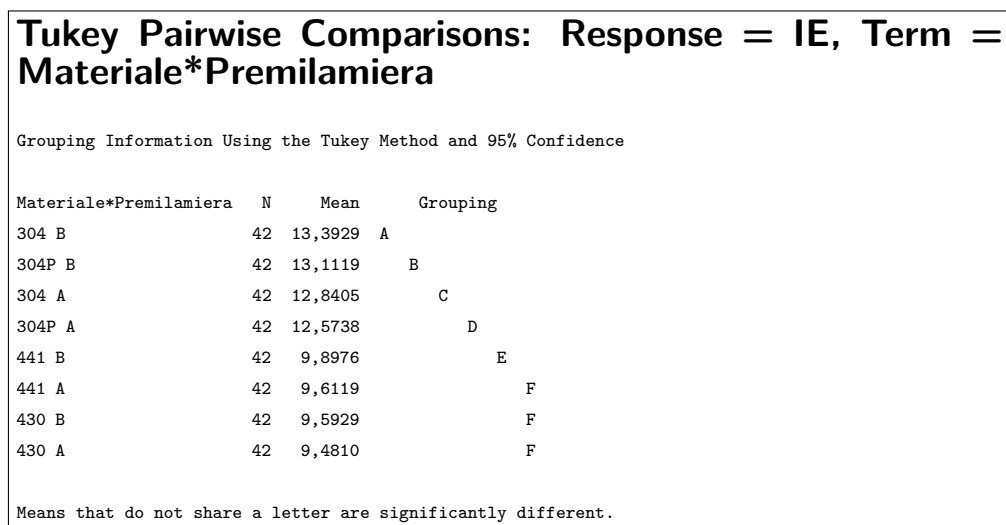
considerazione separatamente. Si può però notare come, tendenzialmente, gli acciai inossidabili ferritici siano meno sensibili alla lubrificazione di quanto non lo siano quelli austenitici. E' infatti evidente come gli acciai inossidabili austenitici siano categorizzati attraverso un maggior numero di lettere rispetto a quanto accade ai ferritici, a riprova di quanto appena detto.

Per quanto riguarda invece l'interazione tra fattore materiale con i fattori velocità e premilamiera, riportati rispettivamente in figura 7.19 e in figura 7.20, si possono

trarre delle conclusioni simili.



**Figura 7.19:** Comparazione dei livelli per l'interazione tra materiale e velocità.



**Figura 7.20:** Comparazione dei livelli per l'interazione tra materiale e premilamiera.

Si nota come, in generale, gli acciai inossidabili ferritici siano meno sensibili sia alla velocità sia alla forza del premilamiera di quanto non lo siano i loro corrispettivi austenitici. Infatti per entrambe le interazioni, per quanto riguarda i materiali austenitici, il fattore materiale viene messo in secondo piano rispetto al secondo fattore (premilamiera); viceversa accade per i materiali ferritici.

Il motivo per cui l'indice Erichsen relativo agli acciai inossidabili austenitici risulta più influenzato dagli altri fattori rispetto a quello relativo agli acciai inossidabili ferritici è da ricercare nelle loro proprietà meccaniche. Infatti proprio la capacità degli acciai inossidabili austenitici di deformarsi di più rispetto a quelli ferritici, esalta il contributo dei fattori che facilitano lo scorrimento tra la superficie del punzone e quella della lamiera e quindi la sua deformazione, a cui si deve un maggiore incremento dell'indice Erichsen (IE).

Per completezza vengono riportate in appendice B (pagina 181) le comparazioni di tutte le interazioni non analizzate ma comunque risultate significative dall'analisi ANOVA.

## 7.4 Analisi delle deformazioni

Con l'obiettivo di analizzare quantitativamente le deformazioni ottenute sui provini Erichsen, sono stati misurati i riferimenti circolari precedentemente serigrafati (si veda paragrafo 7.2.1). Per quanto riguarda invece la misura dello spessore dei provini, questi sono stati tagliati in sezione, inglobati e fotografati tramite stereomicroscopio; si è quindi provveduto a misurarne il profilo per via ottica.

Dato l'elevato numero di prove effettuate e considerati i risultati ottenuti nel paragrafo 7.3.3, si è deciso di selezionare i provini relativi alle condizioni sperimentali maggiormente significative. La scelta è stata effettuata in modo da massimizzare la differenza di caratteristiche in termine di indice Erichsen raggiunto tra materiali ferritici e materiali austenitici. In particolare sono stati scelti quattro provini, due di materiale austenitico e due di materiale ferritico, nelle condizioni lubrificata e a secco; nello specifico:

- AISI 304 (austenitico) privo di lubrificazione;
- AISI 304 (austenitico) lubrificato completamente tramite pellicola in PVC;
- AISI 430 (ferritico) privo di lubrificazione;

- AISI 430 (ferritico) lubrificato completamente tramite pellicola in PVC.

Tutti e quattro i provini sono stati sottoposti alle medesime condizioni sperimentali relative ai restanti fattori, ovvero:

- velocità  $5 \text{ mm min}^{-1}$  (livello basso);
- pressione del premilamiera  $6,57 \text{ MPa}$  (livello basso).

### 7.4.1 Modalità di misura

#### Pattern

L'operazione di misura è stata condotta utilizzando come riferimento metrico strisce di carta su cui è stata riportata tramite stampa laser una scala graduata (figura 7.21). Il ricorso ad un supporto flessibile si è reso necessario per poter seguire al meglio l'andamento del provino deformato, sul quale le strisce sono state incollate in modo da poter misurare una singola fila di cerchi. Essendo le tacche della scala graduata distanti tra loro  $200 \mu\text{m}$ , esse sono difficilmente distinguibili ad occhio nudo, è quindi stato necessario utilizzare un stereomicroscopio per poter effettuare correttamente le misure.

I riferimenti circolari scelti per la misura sono stati selezionati in modo che un riferimento fosse interessato dalla cricca, e, partendo da quello si sono misurati gli altri fino ad arrivare al di fuori dall'area del premilamiera, misurando quindi tutti i cerchi indicati dalla linea rossa riportata in figura 7.22. Ogni cerchio è stato misurato sia in direzione della linea rossa di figura 7.22 sia nella direzione perpendicolare ad essa, in modo da ottenere informazioni utili sugli stati di deformazione e di sforzo del materiale.

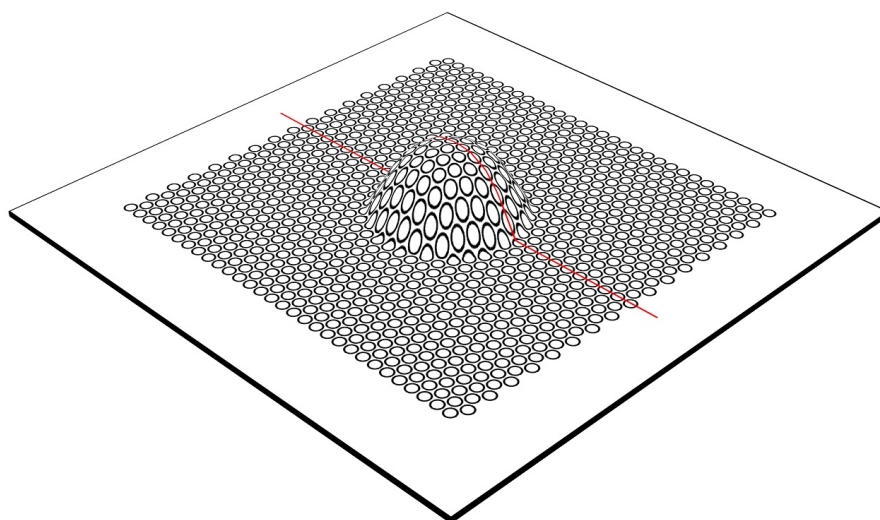
#### Spessore

La misura degli spessori dei provini deformati è stata eseguita sui medesimi provini di cui è stato analizzato il pattern serigrafato.





**Figura 7.21:** Operazione di misura dei riferimenti tramite striscia di carta graduata.



**Figura 7.22:** Riferimenti misurati sul provino deformato tramite prova Erichsen.

I provini sono stati divisi in due parti seguendo la linea rossa di figura 7.22, sono quindi stati tagliati ulteriormente per poter essere inseriti nella macchina inglobatrice. Infatti, tale macchina, ingloba i provini in un cilindro di resina polimerica di diametro 30 mm, non sufficiente a contenere completamente la zona deformata e la parte del provino al di sotto del premilamiera. E' quindi stato

scelto, data la simmetria del provino, di analizzare il profilo solo fino all'apice della zona deformata. I provini sono stati quindi tagliati come mostrato in figura 7.23, in cui la linea rossa mostra il lato analizzato.

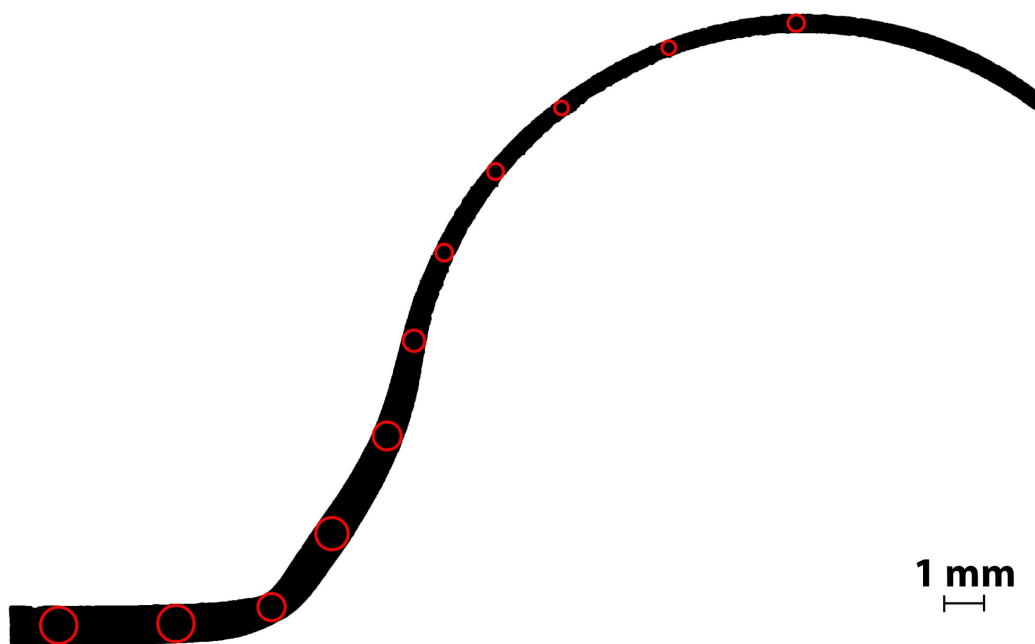


**Figura 7.23:** Provini tagliati in sezione di cui verrà analizzato lo spessore prima dell'inglobatura.

Successivamente all'inglobatura dei provini, questi sono stati lucidati alle carte abrasive prima, ai panni poi, fino al panno da 1  $\mu\text{m}$ .

A questo punto i provini sono stati fotografati tramite stereomicroscopio ad un ingrandimento di 8x ed è stato isolato il profilo tramite un software per l'analisi delle immagini. Il profilo è stato quindi misurato sovrapponendo all'immagine appena elaborata delle circonferenze e misurando il diametro di queste in pixel

(figura 7.24). Conoscendo il rapporto che sussiste tra il numero di pixels e la distanza in  $\mu\text{m}$  all'ingrandimento di 8x, ovvero 182 px/mm, è stato possibile risalire allo spessore effettivo in mm.

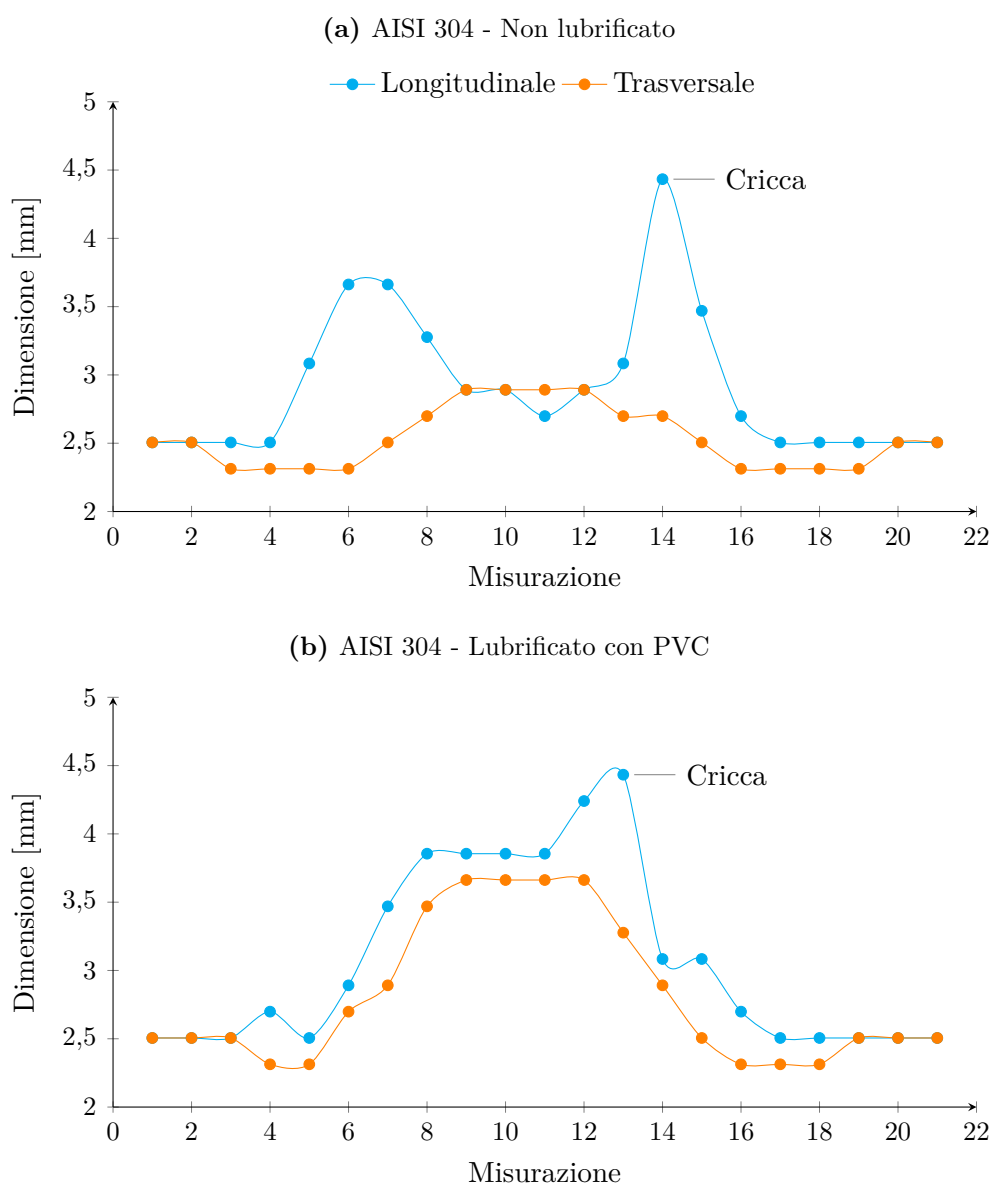


**Figura 7.24:** Operazione di misura dello spessore tramite conteggio dei pixel.

## 7.4.2 Risultati

Una volta rilevate tutte le misure dei quattro provini, per comprendere al meglio i dati numerici si è provveduto a diagrammarli.

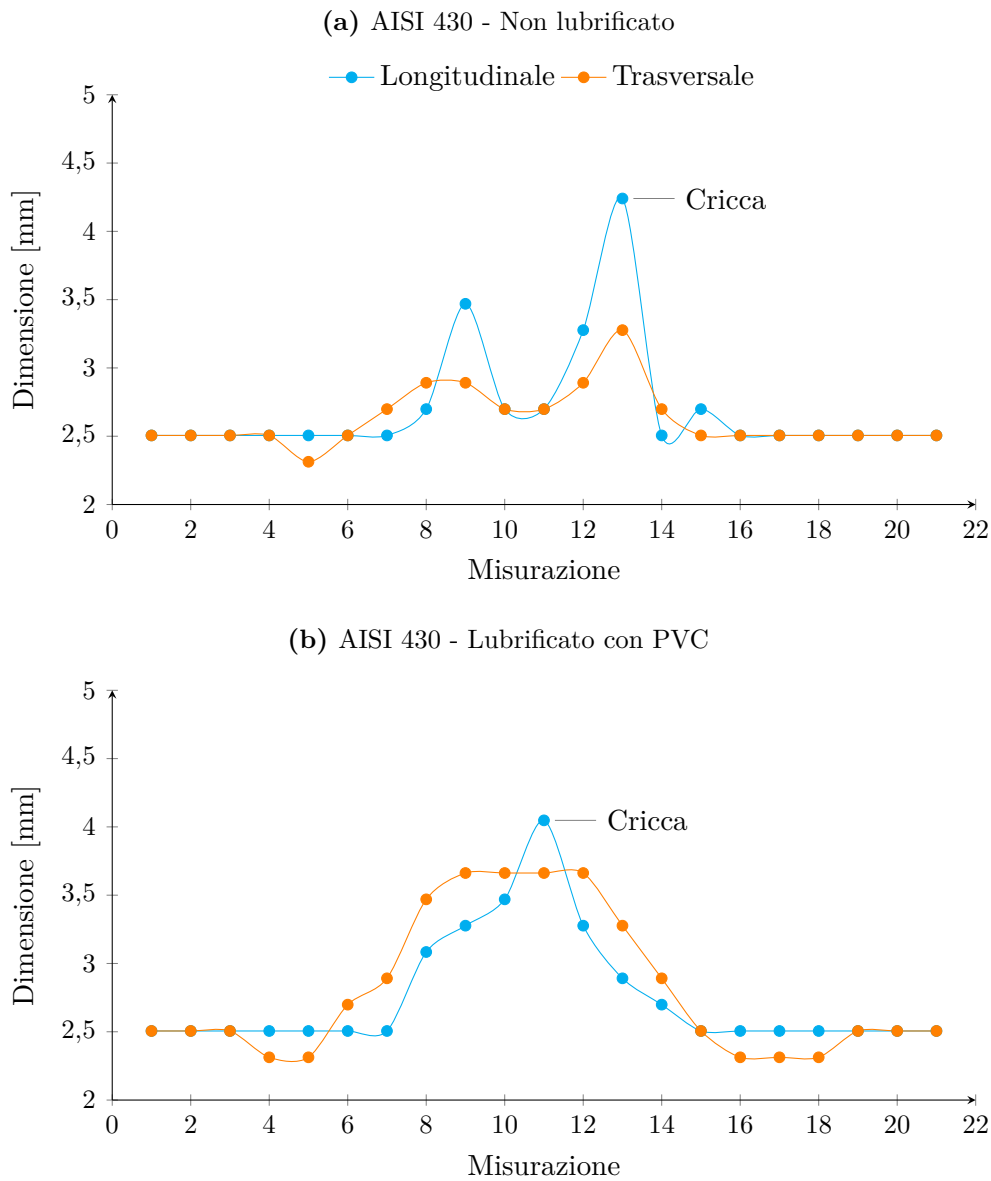
Si cominciano ad analizzare le misure effettuate sul pattern di cerchi serigrafato. Nelle figure 7.25 e 7.26 vengono riportati i diametri longitudinali e trasversali dei riferimenti misurati rispettivamente sui provini in acciaio austenitico e quelli in acciaio ferritico. Su ogni grafico è riportato in blu il valore del diametro rilevato in direzione della linea rossa di figura 7.22, indicato come longitudinale e in arancione il diametro misurato perpendicolarmente, indicato come trasversale.



**Figura 7.25:** Misurazione del pattern sui provini deformati in acciaio austenitico (AISI 304).

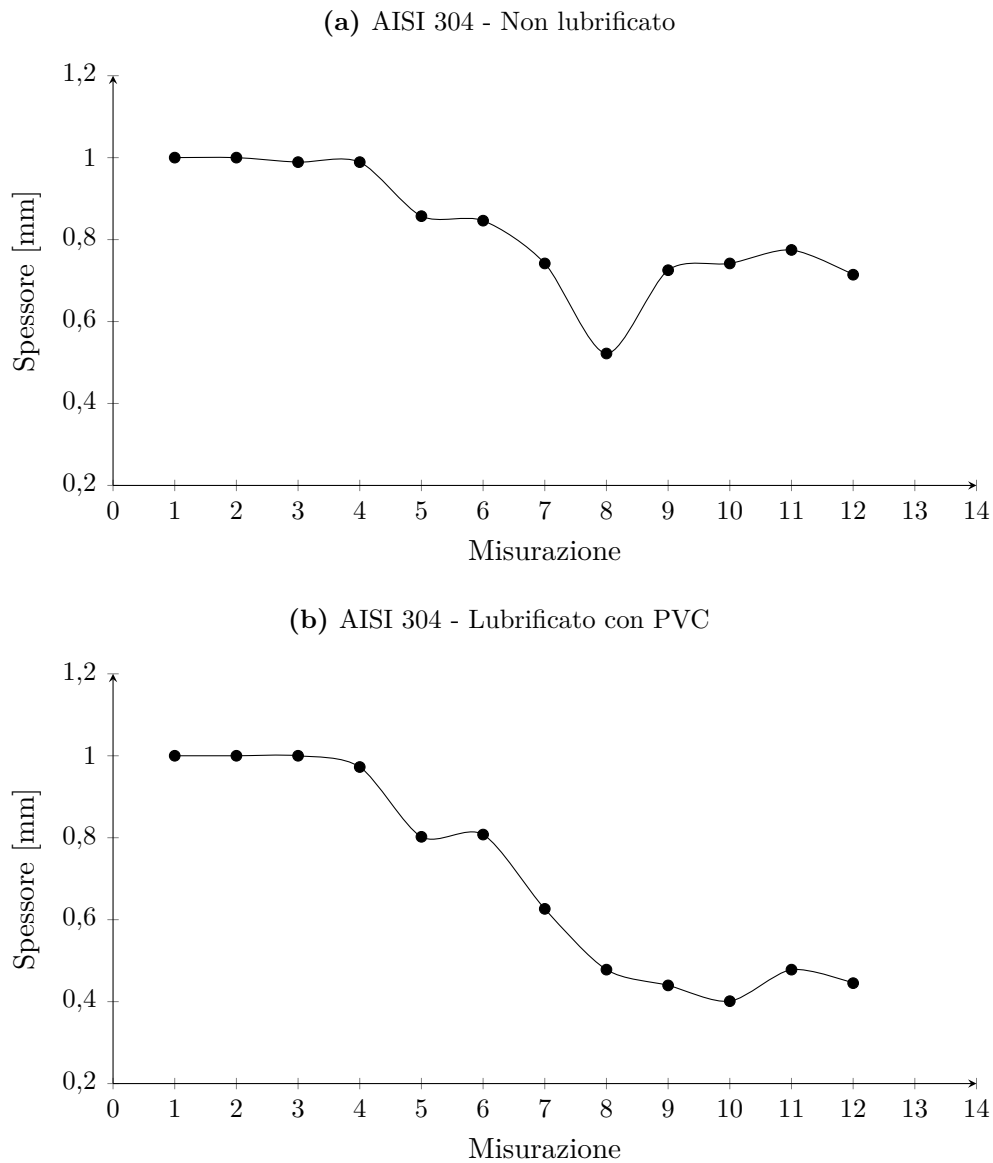
Nelle figure 7.27 e 7.28 sono invece riportate le misure dello spessore effettuate sulla sezione. In appendice B a pagina 186 vengono riportate per completezza le foto a contrasto migliorato delle sezioni di tutti e quattro i provini analizzati.

Per confrontare al meglio le deformazioni planari e le deformazioni nello spessore è utile sovrapporre i grafici delle deformazioni planari (7.25 e 7.26) ai grafici delle



**Figura 7.26:** Misurazione del pattern sui provini deformati in acciaio ferritico (AISI 430).

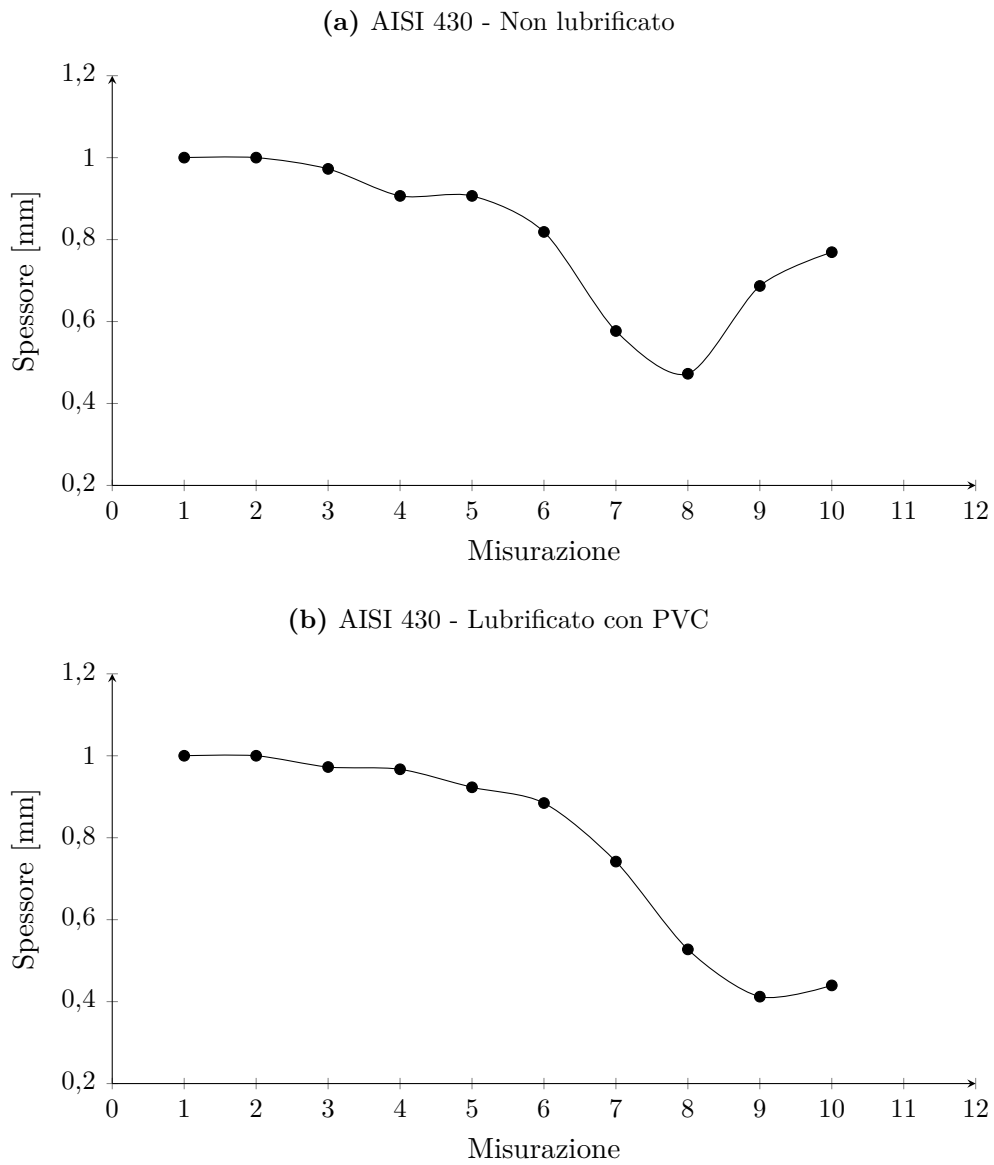
deformazioni nello spessore (7.27 e 7.28). Per fare questo conviene riportare la misura assoluta dei riferimenti e degli spessori ad una misura di deformazione rispetto alla dimensione originale del riferimento. Come convenzione si assumono positive le deformazioni in direzione delle frecce che indicano le deformazioni nelle tre direzioni in figura 7.29.



**Figura 7.27:** Misurazione degli spessori sui provini deformati in acciaio austenitico (AISI 304).

Nelle figure 7.30 e 7.31 sono riportate le deformazioni rispetto alle misure del provino indeformato. Dal momento che le misure nella sezione arrivano solo fino all'apice della zona deformata, sono state escluse dai grafici le misure planari relative al resto del provino.

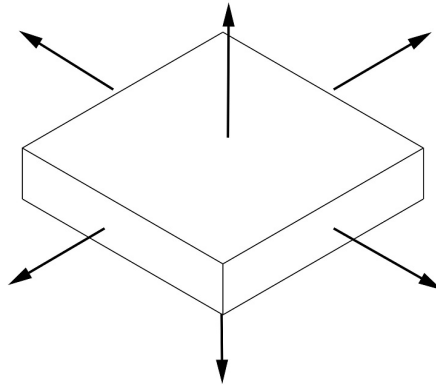
Osservando le figure appena esposte, si possono effettuare due tipi di confronto:



**Figura 7.28:** Misurazione degli spessori sui provini deformati in acciaio ferritico (AISI 430).

- differenze di comportamento tra provino lubrificato e non lubrificato (indipendentemente dal materiale).
- differenze di comportamento tra i due materiali (indipendentemente dalla lubrificazione);

Cominciamo ad analizzare il primo punto, che manifesta le differenze più marcate

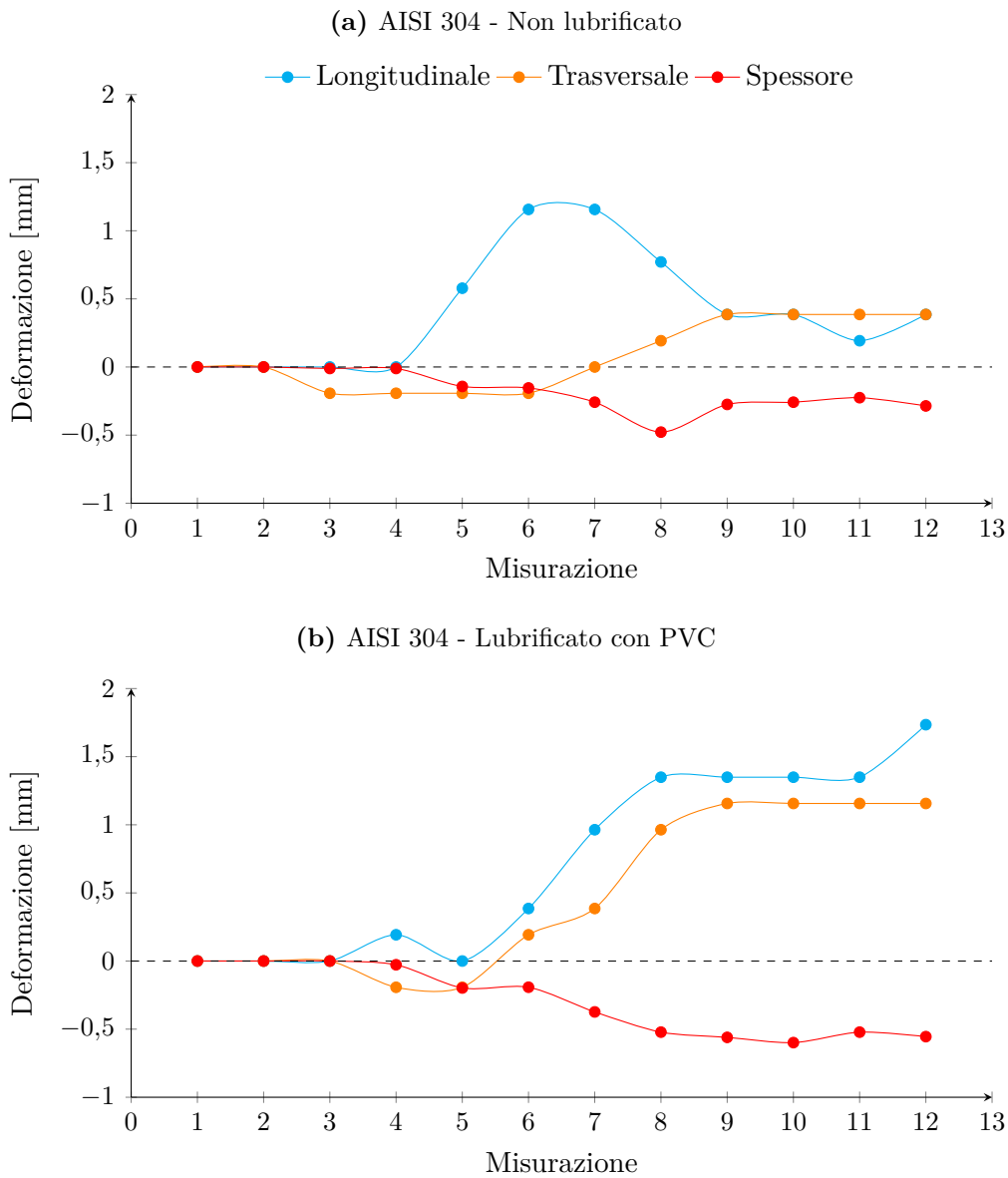


**Figura 7.29:** Convenzione assunta per la valutazione delle deformazioni.

ed evidenti, e prendiamo in considerazione le figure 7.25 e 7.26. Innanzitutto si può notare la diversa forma che assume il grafico relativo all’allungamento longitudinale: mentre le prove lubrificate assumono una forma a singola “campana”, con un solo punto di massimo locale, le prove non lubrificate sono caratterizzate da un andamento a doppia “campana”, cioè con due punti di massimo locale, ed un minimo locale in corrispondenza dell’apice del punzone. Questo comportamento è dettato dagli sforzi generatisi durante il test. La superficie dei provini non lubrificati non ha avuto modo di scorrere attorno al punzone per cui in quel punto i campioni non risultano eccessivamente deformati; l’area deformata è quindi quella del bordo in cui la lamiera non è a contatto ne col punzone, ne con il premilamiera. La superficie dei provini lubrificati con pellicola in PVC, invece ha avuto modo di scorrere liberamente su quella del punzone; in questa condizione tutto il materiale all’interno del premilamiera è riuscito a deformarsi senza impedimenti ed in modo più uniforme. I provini lubrificati sono perciò riusciti a deformarsi maggiormente rispetto ai corrispettivi non lubrificati.

Di conseguenza la posizione della cricca risulta essere differente: questa si manifesta sul bordo dei provini non lubrificati e sull’apice dei provini lubrificati, il che rispecchia l’andamento degli sforzi all’interno della lamiera. Questa situazione si nota chiaramente in figura 7.32 in cui sono messi a confronto due provini

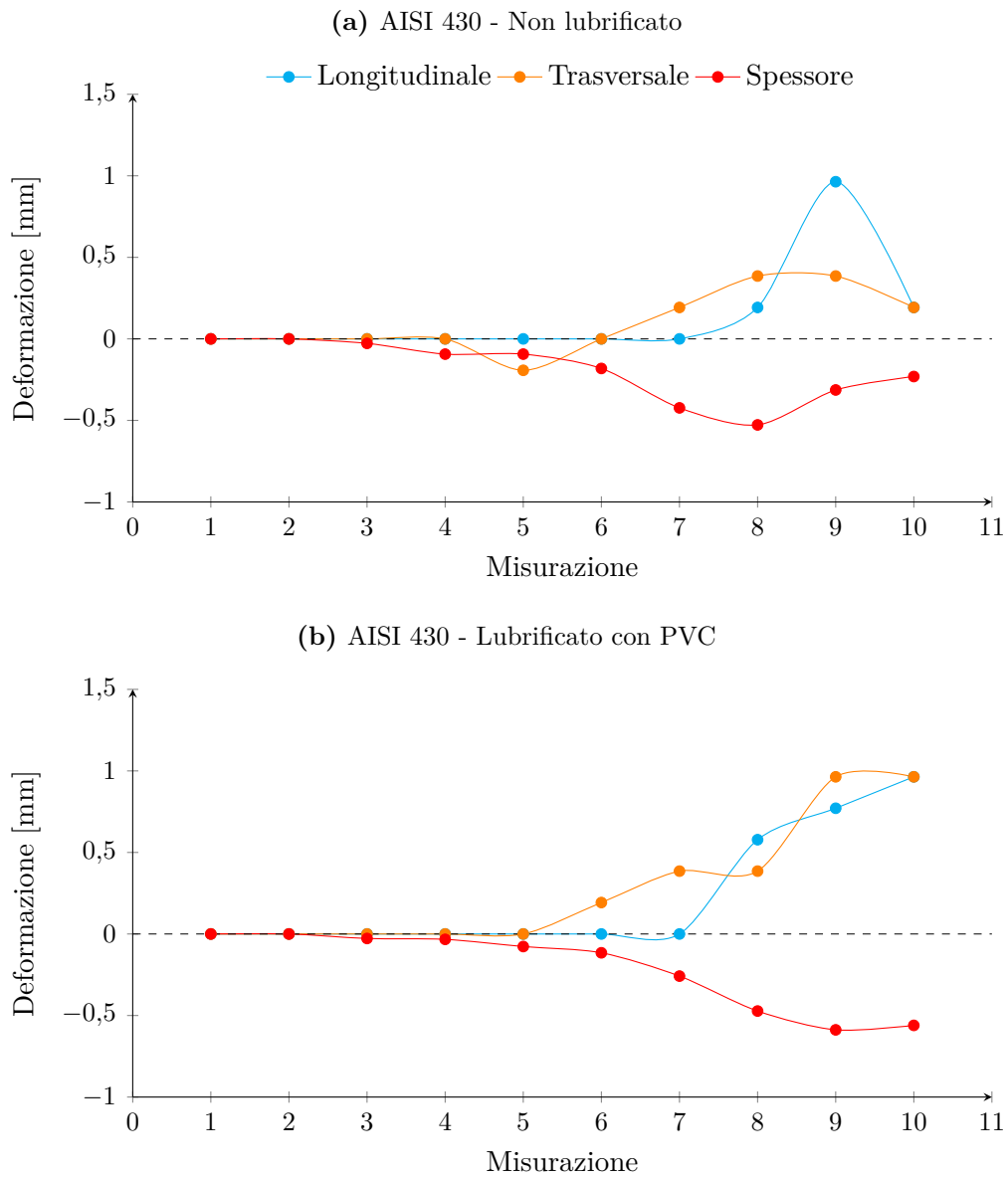




**Figura 7.30:** Confronto delle deformazioni nelle tre direzioni sui provini deformati in acciaio austenitico (AISI 304).

rappresentativi delle condizioni non lubrificato e lubrificato tramite PVC.

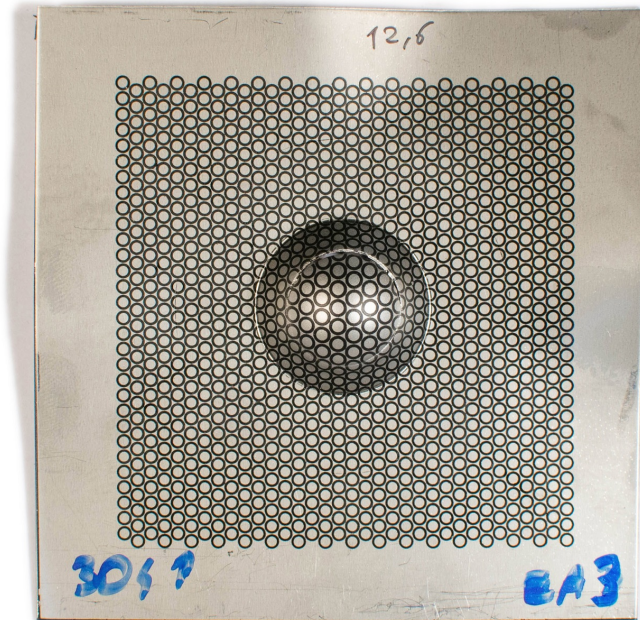
Occorre notare ancora una volta come la lubrificazione tramite petroliato non abbia sortito alcun effetto migliorativo nei confronti della deformazione e sia equiparabile alla condizione non lubrificata, in quanto tale lubrificante viene espulso dalla zona di contatto punzone-premilamiera a causa delle notevoli pressioni raggiunte durante



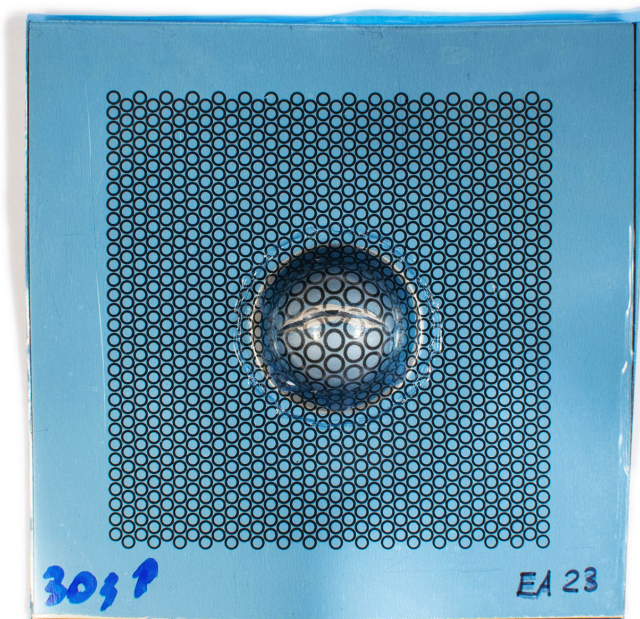
**Figura 7.31:** Confronto delle deformazioni nelle tre direzioni sui provini deformati in acciaio ferritico (AISI 430).

il test.

E' interessante pure confrontare l'andamento delle deformazioni trasversali rispetto a quelle longitudinali. Per comprendere meglio quanto si sta per dire, è utile richiamare la figura 2.2 a pagina 22. Nei campioni lubrificati la misura dei riferimenti presa lungo la direzione perpendicolare alla linea rossa di figura 7.22



(a) Non lubrificato



(b) Lubrificato con PVC

**Figura 7.32:** Le immagini mostrano le differenti posizioni delle cricche nei provini Erichsen nel caso non lubrificato e lubrificato tramite PVC per una lamiera in AISI 304.

segue l'andamento delle misurazioni longitudinali, mentre invece nei campioni caratterizzati dall'assenza di lubrificazione l'andamento si differenzia in maniera marcata.

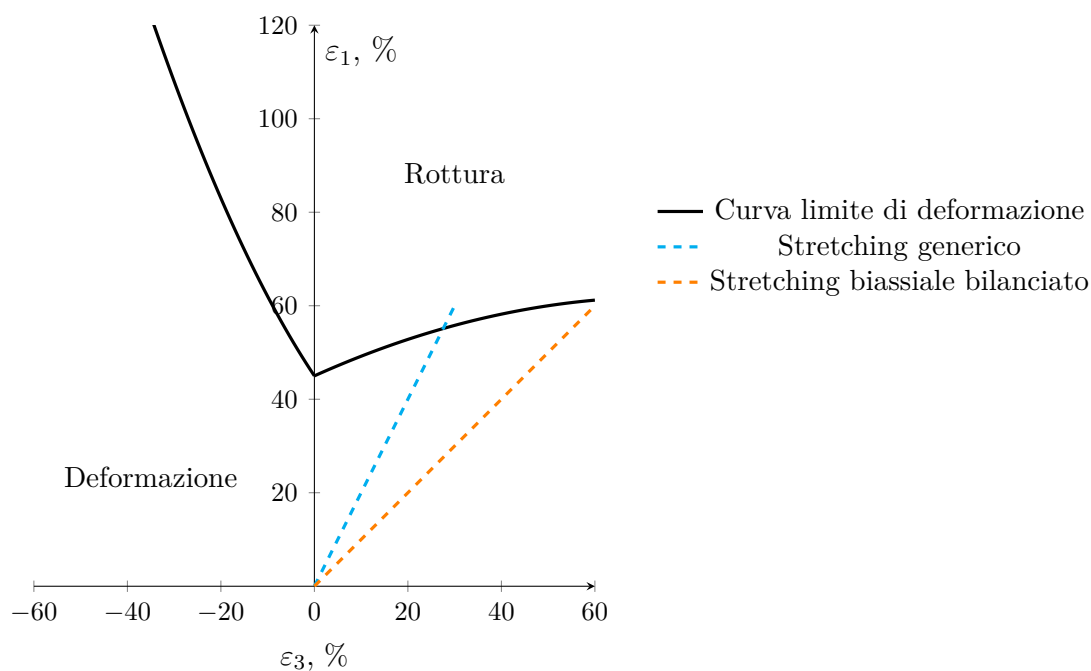
Per quanto riguarda i provini lubrificati, la condizione di carico presente in tutta la zona interessata dalla deformazione è influenzata dal fatto che il materiale è libero di scorrere in ogni direzione. Ne risultano riferimenti circolari che mantengono la loro geometria iniziale ma ingrandita. La condizione di deformazione ottenuta in questa modalità è di stretching biassiale bilanciato, visualizzato dalla linea di colore arancione di figura 7.33; le deformazioni nelle due direzioni principali sono quindi quasi identiche in tutti i punti della zona interessata dalla deformazione.

Nel caso invece dei provini non lubrificati, lo stato di sforzo ai bordi è differente ed il materiale viene deformato in modo minore lungo la direzione trasversale. Il materiale a contatto con il punzone invece risulta pressoché indeformato in quanto non libero di scorrere. I riferimenti circolari presenti sui bordi risultano quindi più allungati in direzione longitudinale mentre invece si deformano meno in direzione trasversale. Si ha in questa zona una predominanza dello sforzo in direzione longitudinale rispetto a quello in direzione trasversale che comunque rimane presente; la modalità di deformazione è dunque di stretching generico non bilanciato (retta blu di figura 7.33)

Se si comparano le due modalità di deformazione appena descritte con la curva limite di deformazione del materiale (figura 7.33) si possono fare alcune considerazioni. Gli acciai inossidabili austenitici lubrificati si comportano meglio della loro controparte non lubrificata per due motivi:

- il materiale resiste meglio ad una condizione di deformazione in stretching biassiale bilanciato rispetto a qualsiasi condizione di stretching generico non bilanciato;
- il provino lubrificato può contare su una maggiore quantità di materiale da poter deformare prima di giungere a rottura.

Per quanto riguarda i provini realizzati in materiale ferritico, invece, è valido



**Figura 7.33:** Curva limite di deformazione. Le linee tratteggiate indicano diverse condizioni di deformazione.

quasi esclusivamente il primo punto. Tali materiali infatti presentano un indice di incrudimento  $n$  minore rispetto agli austenitici (si veda il paragrafo 6.5), questo comporta che le deformazioni siano localizzate in un'area piuttosto ristretta dove il pezzo arriverà a rottura, non sfruttando quindi in modo ottimale tutto il materiale che avrebbero a disposizione per la deformazione. Questo si evince anche dai grafici di deformazione longitudinale dei materiali ferritici che presentano un'elevata deformazione in un'area piuttosto limitata (comunque più limitata della controparte in materiale austenitico).

A riprova di questo, è possibile analizzare la differenza di comportamento in caso di differente lubrificazione tra provini realizzati in AISI 304 e AISI 430. Tale differenza, già evidenziata nel paragrafo 7.3.3, è sottolineata in tabella 7.2. Si nota infatti come la differenza di avanzamento del punzone tra condizione lubrificata e non lubrificata nel caso di acciai inossidabili austenitici sia maggiormente marcata rispetto al caso di materiali ferritici (2,2 mm contro 0,3 mm).

	$IE_A$	$IE_B$	$IE_C$	Media	Diff.
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
AISI 304 secco	13,6	13,3	13,4	13,43	2,2
AISI 304 lubrificato	15,6	15,7	15,7	15,67	
AISI 430 secco	9,4	9,7	9,6	9,57	0,3
AISI 430 lubrificato	9,5	10,2	9,9	9,87	

**Tabella 7.2:** Confronto degli indici Erichsen per le repliche effettuate nelle condizioni considerate.

Analizziamo ora i grafici relativi alla variazione di spessore nella zona deformata, con particolare riferimento alle figure 7.27 e 7.28. Come è evidente, lo spessore dei provini in acciaio inossidabile austenitico risulta ridotto in modo molto più omogeneo e graduale sia nella condizione lubrificata che in quella in assenza di lubrificazione. Gli acciai inossidabili ferritici invece, come già esposto in precedenza, reagiscono al carico deformandosi in maniera maggiormente localizzata (questo si nota soprattutto nelle immagini dei profili riportate in appendice B a pagina 183). Essi tendono ad assottigliarsi poco nelle aree differenti da quella di rottura, ed è perciò adatto per deformazioni in modalità di drawing.

Una conferma numerica di questo fatto è già stata data nel paragrafo 6.4, in cui viene ricavato il valore del rapporto di deformazione plastica  $r$  (che si ricorda essere definito come  $r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t}$ , si veda il paragrafo 2.3.1 a pagina 23) per i quattro tipi di acciai utilizzati. Si nota come sia presente una sensibile differenza tra il valore assunto da  $r$  nei materiali austenitici ( $\bar{r} = 1,22$  per AISI 304) rispetto a quello assunto dai materiali ferritici ( $\bar{r} = 2,42$  per AISI 430). Un valore alto di tale rapporto è indice di basso assottigliamento in fase di stampaggio in modalità di drawing, consentendo un migliore controllo del processo ed uno spessore del prodotto finito più simile allo spessore originale.

Per quanto riguarda le differenze tra condizioni di lubrificazione si possono trarre le medesime conclusioni già esposte in precedenza. In generale in condizione di assenza di lubrificazione, il materiale, non riuscendo a scorrere al di sopra del

punzone e non essendo quindi sottoposto a sforzi, risulta deformato solamente nelle aree non a contatto con il premilamiera e con il punzone. Sempre parlando di differenze tra i materiali, si può quindi concludere che la serie AISI 400 offre buone prestazioni in fase di drawing grazie al suo alto rapporto di deformazione plastica  $r$ , a patto che la geometria dello stampo e le condizioni di scorrimento (condizionate dal tipo di lubrificante, dalla pressione del premilamiera e dalla velocità del punzone) siano tali che in nessuna zona del pezzo si presentino condizioni di stretching, difficilmente sopportabili dagli acciai inossidabili ferritici. In questo ultimo caso i materiali della serie AISI 300 offrono prestazioni sicuramente migliori, questo grazie alla loro grande deformabilità e alla loro buona attitudine all'incrudimento ( $n$  elevato) che consente di distribuire la deformazione a tutta la superficie della lamiera interessata dal punzone, anche se a scapito di una riduzione di spessore.

## 7.5 Analisi metallografiche

Per consentire dell'orientamento dei grani e della loro dimensione media ed osservare come questi ultimi si siano modificati dopo le prove Erichsen è stato necessario eseguire un'accurata analisi metallografica.

I campioni sono quindi stati lucidati a specchio ed attaccati tramite opportuni reagenti allo scopo di metterne in evidenza la microstruttura.

Per quanto riguarda gli acciai inossidabili austenitici si è ricorsi all'attacco chimico tramite *Vilella*, una soluzione di acido picrico (1,2%Vol, 90 ml) e acido cloridrico (37%Vol, 7 ml) in etanolo (50 ml). Il tempo di attacco è stato pari a 180 s.

Gli acciai inossidabili ferritici sono invece stati attaccati elettrochimicamente. Nello specifico l'attacco è stato condotto tramite una soluzione di acido ossalico in acqua per un tempo di circa 90 s.

Per non appesantire troppo la trattazione, tutte le immagini delle micrografie effettuate con vari ingrandimenti sono mostrate in appendice C a partire da pagina

189. In particolare si riportano, in ordine, una foto generale del provino analizzato con in evidenza le zone di maggior interesse fotografate ad ingrandimenti più elevati, la zona completa in tutto lo spessore e infine un particolare di tale zona a 500x per apprezzare in maniera ottimale la disposizione dei grani e la loro struttura.

### **7.5.1 Analisi metallografiche AISI 304**

Le micrografie relative al provino realizzato in AISI 304 in assenza di lubrificazione sono riportate da pagina 190 (da figura C.1 a figura C.13), mentre invece quelle attinenti allo stesso materiale ma lubrificato tramite PVC sono riportate 197 (da figura C.14 a figura C.26).

Si analizza dapprima il materiale testato in assenza di lubrificazione.

Nella zona 1 del provino, ossia il premilamiera, è possibile osservare come i grani del materiale siano equiassici. Si notino le bande di laminazione generate durante la produzione della lamiera. Non sono presenti quindi direzioni preferenziali in cui i grani si dispongono, indicando che tale zona non ha subito alcuna deformazione plastica.

La zona 2 presenta invece una struttura sostanzialmente diversa, con i grani deformati per effetto della curvatura e della sollecitazione di trazione subita durante la prova, i grani sono disposti nella direzione degli sforzi di trazione.

La zona 3 presenta grani deformati dalla sollecitazione di trazione anche se in minor misura rispetto alla zona 2.

La zona 4, zona della strizione per i provini non lubrificati, è caratterizzata, oltre che da uno spessore notevolmente ridotto, da grani particolarmente allungati, a testimonianza del fatto che tale zona è quella che ha subito la deformazione maggiore.

La zona 5 è pressoché identica alla 3, essendo limitrofa a quella di strizione ed avendo subito le stesse sollecitazioni della zona 4.



Per concludere la zona 6 all'apice del provino, che a causa della mancata lubrificazione ha subito deformazioni limitate. I grani risultano equiassici e senza una direzione di allungamento preferenziale. Ovviamente in questo caso il fenomeno è da imputare all'impossibilità di scorrere del materiale sul naso del punzone vista l'assenza di lubrificante. Le striature (figura C.13) sono dovute alle bande di laminazione generate durante la produzione della lamiera.

Per quanto riguarda il provino in acciaio austenitico lubrificato valgono le considerazioni appena descritte con alcune differenze per quel che concerne le zone in corrispondenza del naso del punzone. Grazie alla lubrificazione la lamiera si assottiglia gradualmente fino all'apice; di conseguenza i grani dalla zona 3 alla zona 6 risultano ben più deformati rispetto al provino ottenuto senza lubrificante.

### **7.5.2 Analisi metallografiche AISI 430**

Le micrografie relative al provino realizzato in AISI 430 in assenza di lubrificazione sono riportate a partire da pagina 204 (da figura C.27 a figura C.39), mentre quelle relative allo stesso acciaio ma lubrificato tramite PVC sono riportate da pagina 211 (da figura C.40 a figura C.52).

La distribuzione delle deformazioni dei grani lungo la sezione dei provini in acciaio inossidabile ferritico è simile a quella osservata in precedenza per quelli in acciaio inossidabile austenitico, sia per i campioni lubrificati con PVC che per quelli non lubrificati.

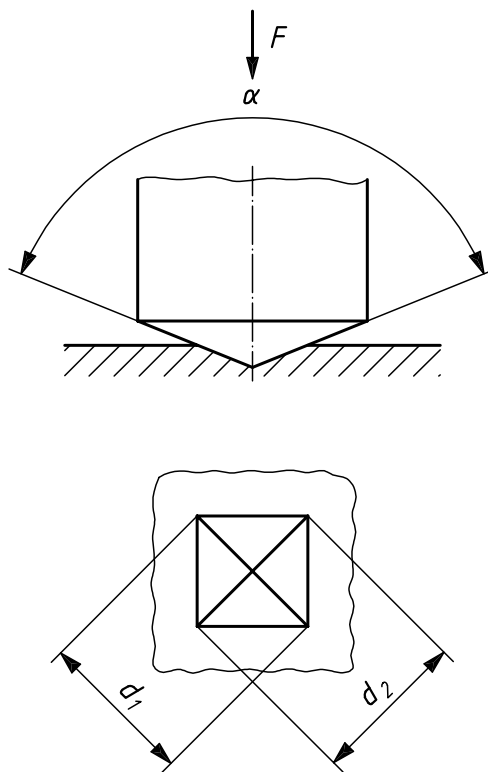
Differente è invece il grado di deformazione, meno marcato ai campioni in AISI 304 e concentrato in corrispondenza della zona di strizione.

## **7.6 Prove di microdurezza**

Per determinare quantitativamente il grado di incrudimento lungo la sezione sono state effettuate prove di microdurezza Vickers secondo la norma EN ISO 6507-

1 [14]. Maggiore sarà il valore di durezza, maggiore sarà il livello di incrudimento subito dal materiale durante la prova Erichsen.

La prova consta nell'applicazione di un carico, (al massimo di 2 kg<sub>f</sub> per prove di microdurezza), per 15 secondi, in modo da realizzare un'impronta piramidale a base quadrata sulla superficie del materiale (figura 7.34).



**Figura 7.34:** Schematizzazione del penetratore e dell'impronta Vickers, con evidenziati l'angolo al vertice della piramide e le due diagonali. [14]

Il valore di durezza è dato dal rapporto tra la forza applicata e l'area dell'impronta lasciata dal penetratore secondo la relazione:

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin\left(\frac{136}{2}\right)}{d^2} \quad (7.1)$$

Dove:

- $F$  è la forza applicata, [kgf];
- $d$  è la media aritmetica delle due diagonali dell'impronta [mm].

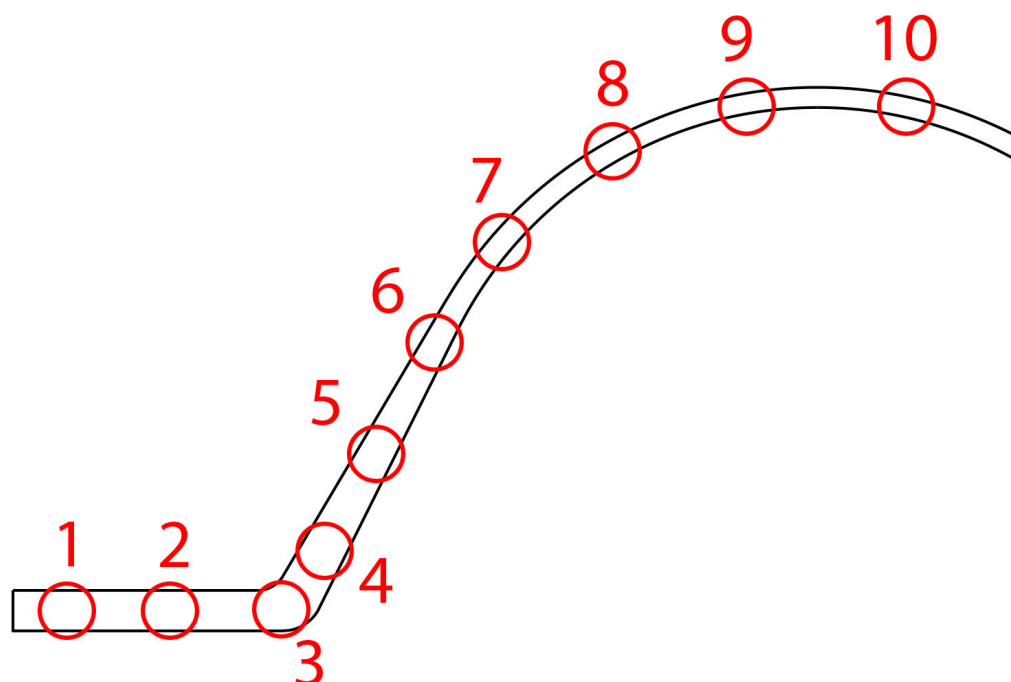
Data la dimensione ridotta delle impronte, i provini devono essere preventivamente lucidati a specchio.

La distanza tra il centro di un'impronta e quella successiva non deve essere inferiore a 2,5 volte la diagonale, mentre le impronte vicine al bordo devono essere distanti almeno 3 volte la diagonale, come mostrato in figura 7.35.



**Figura 7.35:** Micrografia di una serie di cinque impronte vickers effettuate perpendicolarmente allo spessore sulla sezione di un provino in AISI 304.

Le prove di microdurezza sono state effettuate per un totale di dieci serie disposte in corrispondenza della zona in cui ha agito il premilamiera, del bordo, della zona di strizione e dell'apice. Si faccia riferimento alla figura 7.36.



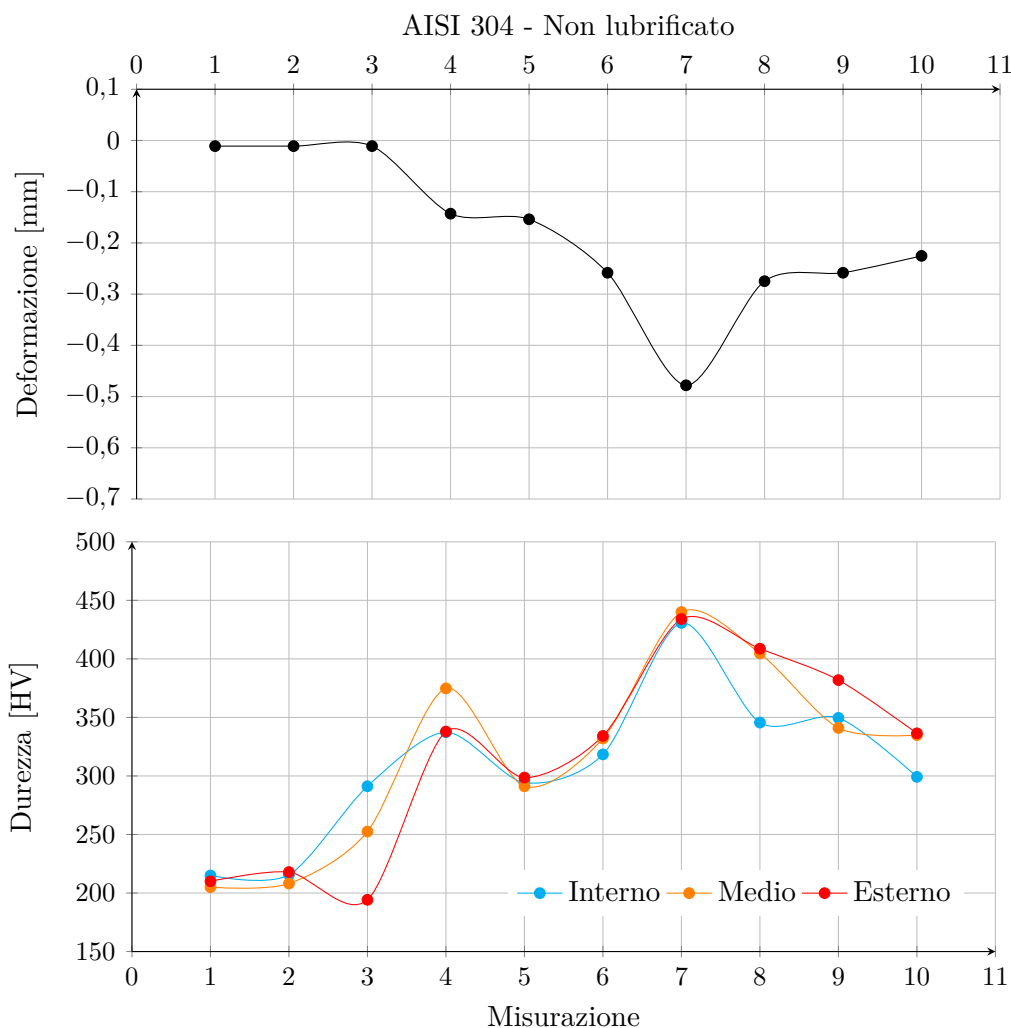
**Figura 7.36:** Panoramica della sezione del provino. I punti neri sono le microdurezze effettuate sul provino fatte risaltare dalla messa a fuoco e dall'aumento del contrasto.

Al termine delle prove, i valori di durezza misurati in corrispondenza della superficie a contatto con il punzone, del centro della lamiera e della superficie esterna, sono stati riportati su un grafico, unitamente alla riduzione di spessore subita dalla lamiera nelle stesse aree.

I quattro grafici così ottenuti sono riportati in figura 7.37 e 7.38 per quanto riguarda i provini in acciaio inossidabile austenitico e in figura 7.39 e 7.40 per quanto riguarda i provini in acciaio inossidabile ferritico.

Si possono ora effettuare delle considerazioni riguardo alla distribuzione delle durezza lungo il profilo, dalla zona del prelamiera fino all'apice, e riguardo al loro andamento lungo lo spessore della lamiera.

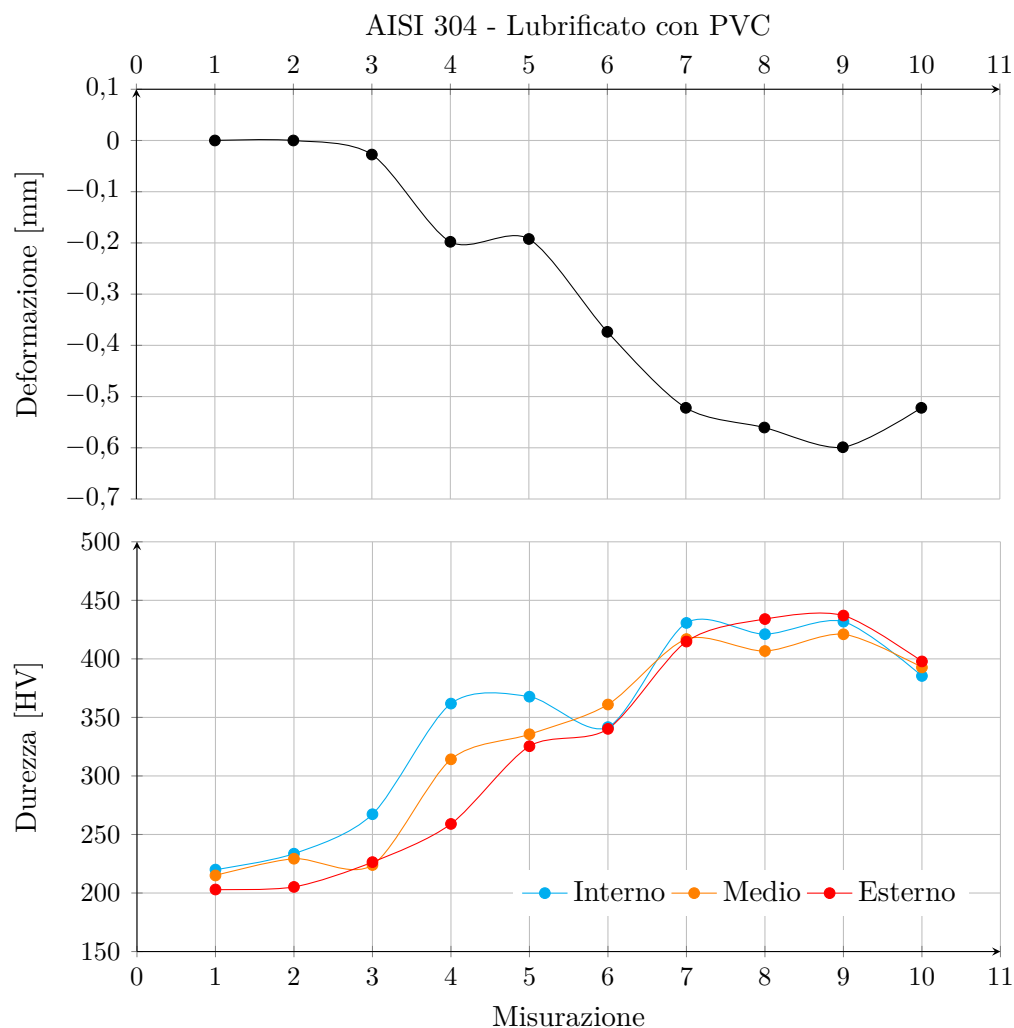
Osservando i grafici si nota immediatamente come in tutti i casi la riduzione di spessore è sempre accompagnata da un aumento di durezza, indice dell'incrudimento subito dall'acciaio durante la prova Erichsen.



**Figura 7.37:** Microdurezze rilevate sulla sezione di un provino in AISI 304 non lubrificato confrontate con la riduzione di spessore dello stesso. Le durezze sono campionate su tre profili: uno al centro e due in prossimità dei bordi, interno ed esterno.

La figura 7.37, mostra come in corrispondenza del punto 3 la durezza cresce senza che vi sia un corrispondente calo di spessore. La zona 3 si trova infatti a ridosso del premilamiera e durante il processo di formatura subisce una piega di notevole entità, senza una marcata riduzione di spessore.

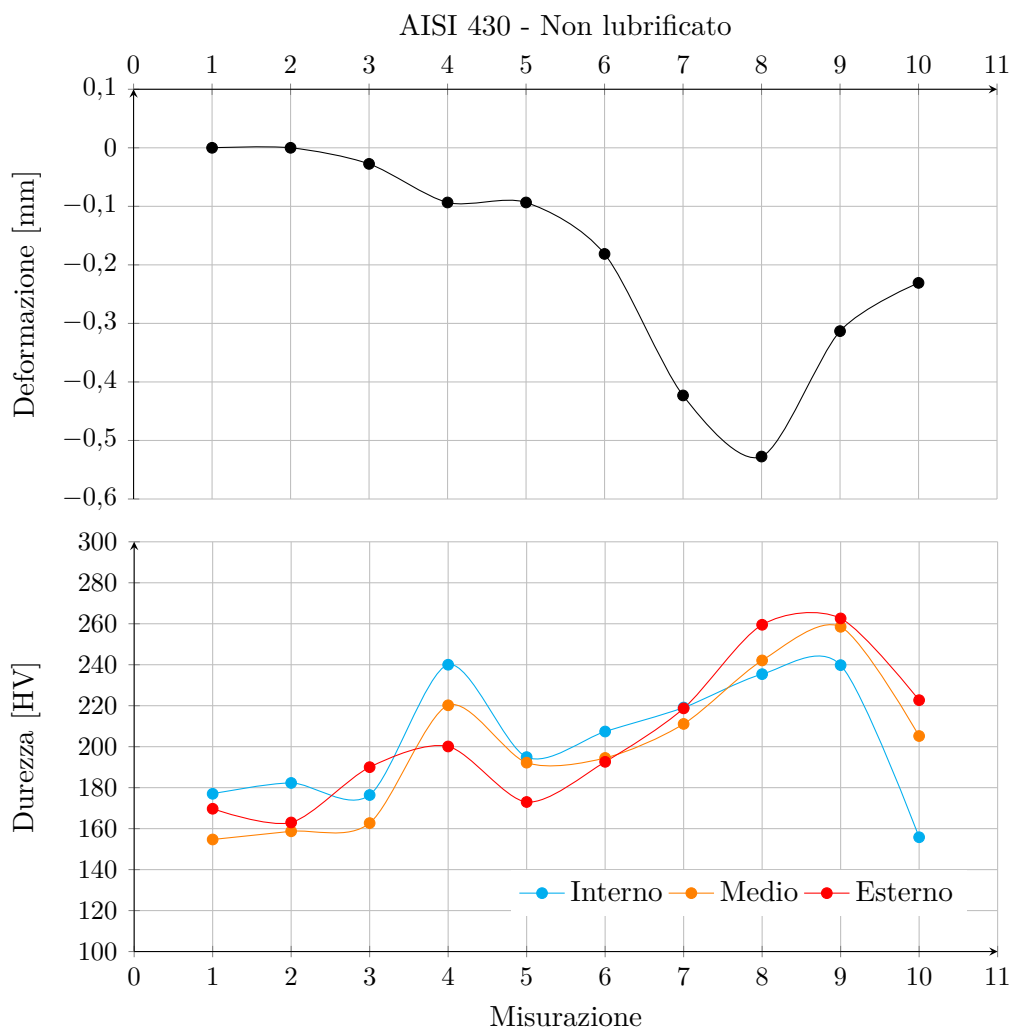
Dall'osservazione dei grafici si evince anche come vi siano zone in cui la differenza di durezza lungo lo spessore sia elevata e zone in cui invece sia molto limitata. Tale comportamento è riconducibile alle modalità con cui la lamiera viene deformata,



**Figura 7.38:** Microdurezze rilevate sulla sezione di un provino in AISI 304 lubrificato con PVC confrontate con la riduzione di spessore dello stesso. Le durezze sono campionate su tre profili: uno al centro e due in prossimità dei bordi, interno ed esterno.

piccole differenze indicano che durante lo stampaggio la lamiera ha subito una sollecitazione di flessione. Tale constatazione è ben visibile dal confronto fra la zona 3 e ridosso del premilamiera e la zona 4-5, compresa tra il punzone e la matrice.

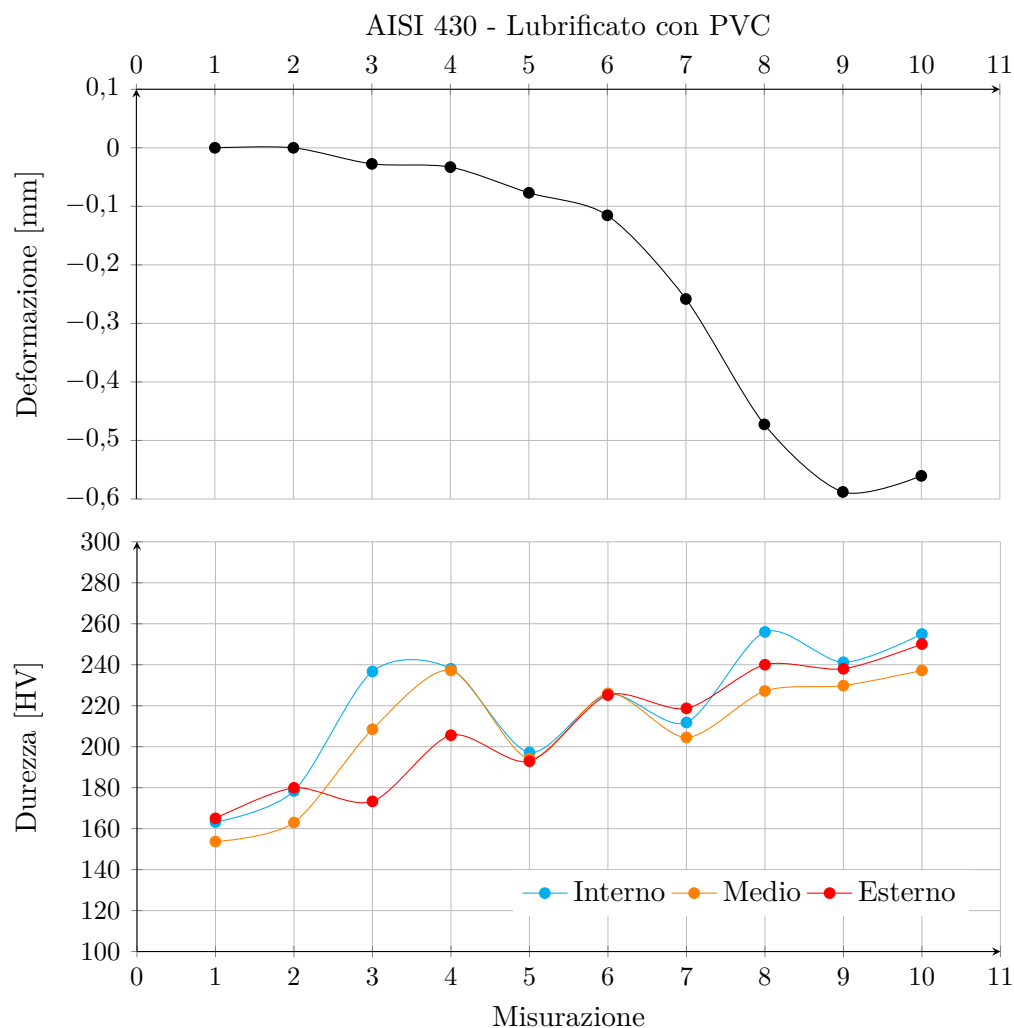
Ulteriori considerazioni vanno dedicate alla distribuzione delle durezze lungo lo spessore in corrispondenza del naso ed il punzone e al differente comportamento delle due famiglie di acciai inossidabili.



**Figura 7.39:** Microdurezze rilevate sulla sezione di un provino in AISI 430 non lubrificato confrontate con la riduzione di spessore dello stesso. Le durezze sono campionate su tre profili: uno al centro e due in prossimità dei bordi, interno ed esterno.

### Distribuzione di durezza in corrispondenza del naso del punzone

Nei campioni lubrificati la differenza di durezza tra l'interno e l'esterno è molto inferiore rispetto a quella che si riscontra nei campioni non lubrificati. I primi subendo ovunque una deformazione elevata sono sottoposti ad elevate sollecitazione di trazione, costanti lungo tutta la sezione, mentre nei secondi, soggetti ad una deformazione più limitata, prevale il contributo dovuto alla sollecitazione di flessione esercitata dal naso del punzone. Questa dinamica è confermata anche



**Figura 7.40:** Microdurezze rilevate sulla sezione di un provino in AISI 430 lubrificato con PVC confrontate con la riduzione di spessore dello stesso. Le durezze sono campionate su tre profili: uno al centro e due in prossimità dei bordi, interno ed esterno.

dalla zona limitrofa al prelamiera. In quest'area la differenza di durezza tra la superficie interna ed esterna è ben visibile anche nei campioni lubrificati.

La presenza del prelamiera impedisce infatti l'assottigliamento della lamiera lungo il cui spessore rimane ben visibile l'effetto della sollecitazione di flessione che non viene "nascosta" da quella di trazione.



### **Differente comportamento offerto dalla due famiglie di acciai**

Dall'osservazione dei profili di durezza si nota infatti come la differenza tra la durezza massima e minima generate dal processo di deformazione sia molto maggiore per il 304, rispetto al 430 (circa 100HV), tale circostanza si riscontra sia per i campioni lubrificati che per quelli non lubrificati. Ciò conferma che gli acciai inossidabili austenitici hanno una propensione all'incrudimento molto superiore a quella dei ferritici, il che facilita la distribuzione degli sforzi lungo tutta la zona dalla lamiera interessata dalla deformazione e prevenendo l'insorgere del fenomeno della strizione.

# Capitolo 9

## Conclusioni

L'obiettivo fondamentale del presente lavoro di tesi è stato lo studio del comportamento in fase di stampaggio a freddo di quattro tipologie di acciai inossidabili in differenti condizioni. Tale obiettivo è stato perseguito attraverso l'esecuzione e l'analisi dei risultati di prove sia sperimentali che numeriche.

### 9.1 Prove di Trazione

Le prove di trazione effettuate sui materiali a nostra disposizione hanno consentito di evidenziarne il comportamento e le peculiarità.

Innanzitutto si è constatato come le differenze di comportamento tra gli acciai "base" e le rispettive varianti commercializzate come "a profondo stampaggio" siano poco significative, soprattutto se paragonate alle differenze esistenti tra le due famiglie considerate, ovvero acciai inossidabili austenitici e acciai inossidabili ferritici. Le caratteristiche degli acciai AISI 304 e AISI 304PS sono infatti assolutamente confrontabili e le differenze minime. La stessa considerazione è valida per AISI 430 e AISI 441, come evidenziato dalla sovrapposizione delle curve sforzo deformazione mostrate in figura 6.7 a pagina 67 e dai valori numerici tabulati a pagina 65.

Se si considerano invece le due famiglie di acciai inossidabili (serie 300, austenitici e serie 400, ferritici) si nota invece una marcata differenza di comportamento. La prima notevole differenza è relativa all'allungamento a rottura: se gli acciai inossidabili ferritici superano di poco il 21 %, gli acciai inossidabili austenitici superano il 50 %. Altro valore da segnalare è il carico a rottura raggiunto dalle due famiglie: circa 470 MPa per la serie 400 e circa 650 MPa per la serie 300. Gli acciai inossidabili austenitici sono dunque in grado di sopportare maggiori sforzi e deformazioni prima di giungere a rottura.

Il calcolo dei coefficienti  $r$  (rapporto di deformazione plastica) ed  $n$  (coefficiente di incrudimento) ha consentito di ottenere ulteriori informazioni.

Il rapporto  $r$  indica una maggiore propensione da parte degli acciai austenitici di assottigliarsi durante la deformazione in campo plastico rispetto agli acciai inossidabili ferritici (l'indice  $r$  di questi ultimi è più del doppio rispetto ai primi). Questa caratteristica, se da un lato consente loro di assorbire maggiormente la deformazione senza andare incontro a rottura, è considerata negativa nell'ambito della deformazione plastica in quanto può portare ad ottenere un prodotto poco uniforme nello spessore rendendo quindi il processo tecnologico poco controllabile.

L'indice  $r$  ha permesso inoltre, tramite il calcolo della sua variazione per differenti direzioni di laminazione ( $\Delta r$ ), di calcolare il grado di anisotropia dei materiali a nostra disposizione; questo valore è rappresentativo sia del materiale sia del processo con cui è stato trasformato. Gli acciai inossidabili austenitici sono risultati, da questo punto di vista, i più omogenei.

Il coefficiente di incrudimento  $n$ , che esprime l'incremento di carico unitario necessario per far procedere la deformazione di un acciaio oltre lo snervamento, è invece risultato nettamente superiore negli acciai della serie 300 (si vedano i risultati numerici in tabella 6.8 a pagina 75). Questa caratteristica (indice  $n$  alto) risulta estremamente favorevole per quanto riguarda lo stampaggio, in quanto consente di distribuire le deformazioni su tutto il materiale impedendo che un aumento locale dello stato di sforzo si traduca in un consistente aumento della deformazione locale, condizione che può condurre alla lacerazione della lamiera.

## 9.2 Prove Erichsen

Attraverso le prove Erichsen si è voluto caratterizzare i materiali a nostra disposizione in base alla loro capacità di sopportare deformazioni in modalità di stretching, che risulta essere la condizione di deformazione più critica che è possibile riscontrare durante un processo di stampaggio a freddo di un acciaio inossidabile.

Dopo aver progettato e quindi condotto la campagna sperimentale, si è provveduto a studiare i risultati ottenuti tramite l'analisi statistica dei dati. Di tutti i fattori principali che sono risultati statisticamente significativi, il tipo di materiale e la modalità di lubrificazione sono risultate di gran lunga le più influenti.

Per quanto riguarda il materiale, si evidenzia la netta superiorità degli acciai inossidabili austenitici nel resistere a condizioni di carico per stretching. Anche qui, come per le prove di trazione, non si evidenziano particolari differenze tra acciai della stessa serie tali da giustificare la scelta degli uni piuttosto che degli altri.

Anche la lubrificazione gioca un ruolo di fondamentale importanza nel processo. Essa permette di distribuire le deformazioni su tutta la superficie interessata dalla formatura, a patto che il lubrificante rimanga in posizione durante tutto il processo. E' risultato infatti che la lubrificazione tramite lubrificante semisolido (nel nostro caso petrolato) non apporta alcun miglioramento rispetto alla condizione di assenza di lubrificazione, in quanto tale lubrificante, a causa delle notevoli pressioni in gioco, non riesce a garantire durante tutto il processo un meato stabile tra le superfici a contatto. Viceversa è consigliabile l'utilizzo di un lubrificante solido (nel nostro caso PVC) in quanto garantisce la presenza di un meato costante tra le superfici a contatto.

I fattori velocità e pressione del premilamiera sono invece risultati essere meno importanti anche se comunque significativi. Le migliori prestazioni in termini di profondità di stampaggio sono state ottenute utilizzando una bassa velocità ( $4,3 \text{ mm min}^{-1}$ ) ed una bassa pressione del premilamiera (6,57 MPa).

Infine, per quanto riguarda le interazioni, si pone in evidenza una discreta influenza delle condizioni di lubrificazione associate agli acciai della serie 300, mentre tale influenza è praticamente nulla se si considerano gli acciai della serie 400. Le notevoli prestazioni degli acciai inossidabili austenitici in condizioni di stretching sono dunque messe in risalto da una corretta lubrificazione delle superfici in contatto durante il processo di formatura; gli acciai inossidabili ferritici, invece, traggono un esiguo beneficio dalla lubrificazione a causa del loro basso indice di incrudimento e della limitata estensione in campo plastico.

Una volta compresi gli effetti che le varie condizioni sperimentali hanno comportato sul risultato della prova Erichsen, si è passati ad analizzare nel dettaglio i prodotti finiti. Si sono quindi selezionati quattro provini rappresentativi delle condizioni sperimentali di maggior interesse, ovvero due provini in AISI 304 e due in AISI 430, nelle condizioni di lubrificazione totale tramite PVC e assenza di lubrificazione. Per questi sono state condotte analisi sulle deformazioni e sulle durezza; sono state inoltre eseguite delle micrografie sulle aree di maggior interesse.

L'analisi delle deformazioni subite dai provini durante le prove Erichsen, nonché sulla posizione della cricca, ha permesso di effettuare ulteriori osservazioni, in particolare sulla condizione di lubrificazione. E' emerso come l'assenza di lubrificazione localizzi gli sforzi, e quindi le deformazioni, nelle limitate aree in cui le superfici del provino e del macchinario non sono a contatto, portando il provino a prematura rottura. Una corretta lubrificazione garantisce invece un'omogenea distribuzione delle deformazioni anche nelle zone di contatto tra provino e punzone. Condizione da cui traggono giovamento soprattutto i provini realizzati in acciaio inossidabile austenitico, in quanto riescono a distribuire al meglio gli sforzi, assottigliandosi e deformandosi in modo omogeneo prima di arrivare a rottura. I provini in acciaio inossidabile ferritico presentano invece una localizzazione molto più accentuata delle deformazioni anche in presenza di lubrificazione.

Le prove di microdurezza sono state eseguite in quanto indicano l'entità dello sforzo che ha agito all'interno del materiale. Tali prove confermano ancora una volta le ottime caratteristiche, in termini di incrudimento, e quindi di capacità di

subire le deformazioni, degli acciai inossidabili austenitici.

### 9.3 Simulazioni numeriche FEM

Per concludere si è ricorsi all'utilizzo della modellazione agli elementi finiti con la quale, a seguito di una necessaria validazione dei modelli, è stato possibile ottenere informazioni non ricavabili tramite l'analisi dei provini reali. In particolare sono stati ricavati dai risultati gli andamenti di varie grandezze in funzione dell'avanzamento temporale della prova e l'andamento degli sforzi lungo tutta la sezione ad incipiente rottura.

Questi dati confermano sostanzialmente tutte le osservazioni che sono state individuate a seguito dell'analisi delle prove reali.

In particolare viene ulteriormente evidenziato come la lubrificazione consenta di migliorare in ogni caso la distribuzione del carico lungo tutta la superficie, permettendo di distribuire in modo ottimale gli sforzi e le deformazioni nel tempo. Questa condizione viene però sfruttata al meglio solo dagli acciai inossidabili austenitici, come già detto grazie al loro alto coefficiente di incrudimento che indica una notevole capacità di distribuire gli sforzi.

In definitiva l'utilizzo degli acciai inossidabili ferritici nel campo del profondo stampaggio è una scelta del tutto corretta, soprattutto in virtù del loro minore costo, fintanto che la geometria del prodotto consente di non avere zone in cui la deformazione sia eccessiva o avvenga per stretching.

Tuttavia come esposto in questa tesi, se il bilancio costi/benefici lo permette, è sicuramente consigliabile utilizzare gli acciai inossidabili austenitici in quanto consentono di ottenere prodotti dalle geometrie più "estreme" sia grazie alle loro

proprietà meccaniche, sia perché riescono a migliorare notevolmente il proprio comportamento in presenza di lubrificante solido.

L'utilizzo di varianti a profondo stampaggio degli acciai "base" non è invece risolutivo in quanto non apporta miglioramenti sostanziali nelle aree critiche.

La forza esercitata dal premilamiera e la velocità di applicazione del carico, pur risultando fattori significativi, producono un effetto considerevolmente inferiore rispetto alla lubrificazione.

Quest'ultima risulta sicuramente il parametro più importante, a patto che sia eseguita correttamente, ovvero che venga garantita la presenza di un meato stabile ed uniforme per tutta la durata del processo di stampaggio.

A parità di acciaio ed in presenza di problemi che impediscono lo scorrimento della lamiera all'interno dello stampo (es. raggi di raccordo troppo severi) è la lubrificazione l'unico parametro che consente di ottenere un prodotto privo di fessurazioni.