



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

Dipartimento di ingegneria industriale e scienze matematiche  
Corso di laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**CARATTERIZZAZIONE TERMO-MECCANICA DI  
GHISE FERRITICHE RAFFORZATE AL SILICIO**

**Thermo-mechanical characterization of solid-solution-strengthened  
cast iron**

Relatore:  
**Prof. Marco Sasso**

Candidato:  
**Riccardo Belletti**

Correlatore:  
**Dott. Mattia Utzeri**

*Anno Accademico 2023-2024*





UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

Dipartimento di ingegneria industriale e scienze matematiche  
Corso di laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**CARATTERIZZAZIONE TERMO-MECCANICA DI  
GHISE FERRITICHE RAFFORZATE AL SILICIO**

**Thermo-mechanical characterization of solid-solution-strengthened  
cast iron**

Relatore:  
**Prof. Marco Sasso**

Candidato:  
**Riccardo Belletti**

Correlatore:  
**Dott. Mattia Utzeri**

*Anno Accademico 2023-2024*



*Alla mia famiglia*



# Indice

---

<b>Sommario</b> .....	1
<b>Abstract</b> .....	3
<b>Introduzione</b> .....	5
<b>Capitolo 1 - Ghise</b> .....	6
1.1 Carbonio nelle ghise.....	7
1.2 Elementi alliganti nelle ghise.....	8
1.3 Classificazione delle ghise .....	8
1.4 SSFDI .....	9
<b>Capitolo 2 - Prove meccaniche</b> .....	10
2.1 Prova di trazione.....	10
2.1.1 Macchina di prova .....	10
2.1.2 Provini .....	11
2.1.3 Curva $\sigma - \varepsilon$ .....	14
2.1.4 Effetto Poisson .....	17
2.1.5 Diagramma reale nel caso di conservazione del volume.....	17
2.1.6 Diagramma reale nel caso di non conservazione del volume.....	18
2.2 Prova di compressione.....	20
2.3 Caratterizzazione termo-meccanica .....	21
2.3.1 Effetto termoelastico .....	21
2.3.2 Effetti termici nel tratto plastico.....	22
2.4 Digital Image Correlation .....	23
2.4.1 Analisi 2D.....	24
2.4.2 Speckle pattern.....	24
2.4.3 Principio di funzionamento della DIC .....	25
2.4.4 Parametri di analisi .....	25
<b>Capitolo 3 - Elaborazione dei dati</b> .....	27
3.1 Provino TRA.....	27
3.1.1 Elaborazione dei dati della macchina di trazione.....	28
3.1.2 Elaborazione delle immagini in MatchID.....	30
3.1.3 Elaborazione delle immagini della termocamera .....	35
3.2 Provini T0-6 e T0-8.....	39
3.3 Provino per la prova di compressione .....	41

3.4 Provini D1 e D2.....	44
3.4.1 Tensioni tangenziali .....	44
3.4.2 Elaborazione dei dati.....	45
3.4.3 Confronto con gli altri test .....	47
3.5 Provini T1-8 e T2-6.....	48
3.5.1 Triassialità .....	48
3.5.2 Elaborazione dei dati.....	49
3.5.3 Confronto con gli altri test .....	50
<b>Capitolo 4 - Conclusioni .....</b>	<b>51</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>53</b>



# Elenco delle figure

---

Figura 1.1: Diagramma Fe - C .....	6
Figura 1.2: Forme della grafite nella ghisa .....	7
Figura 2.1: La macchina di prova .....	11
Figura 2.2: Tratto utile e tratto calibrato di un provino .....	11
Figura 2.3: Disegno tecnico del provino TRA .....	12
Figura 2.4: Disegno tecnico del provino T0-6 .....	12
Figura 2.5: Disegno tecnico del provino T0-8 .....	12
Figura 2.6: Disegno tecnico del provino C3 .....	13
Figura 2.7: Disegno tecnico del provino D1 .....	13
Figura 2.8: Disegno tecnico del provino D2 .....	13
Figura 2.9: Disegno tecnico del provino T1-8 .....	14
Figura 2.10: Disegno tecnico del provino T2-6 .....	14
Figura 2.11: Curva $\sigma - \varepsilon$ .....	15
Figura 2.12: Tipologie di snervamento .....	16
Figura 2.13: Confronto tra curva ingegneristica e curva reale .....	18
Figura 2.14: Curve reali per diversi valori di $v$ .....	20
Figura 2.15: Barreling e instabilità elastica .....	21
Figura 2.16: Variazione di temperatura durante la deformazione in una prova di trazione .....	22
Figura 2.17: Confronto del setup tra analisi 2D e 3D .....	23
Figura 2.18: Sistemi ottici ordinari e telecentrici .....	24
Figura 2.19: Speckle pattern .....	25
Figura 2.20: Principio di funzionamento della DIC .....	25
Figura 3.1: Setup delle prove .....	27
Figura 3.2: Provino TRA .....	27
Figura 3.3: Curva $\sigma - \varepsilon$ fornita dalla macchina .....	28
Figura 3.4: Codice MATLAB per la correzione della non linearità del tratto elastico .....	28
Figura 3.5: Modello di molle in serie .....	29
Figura 3.6: Curva $\sigma - \varepsilon$ del provino TRA .....	29
Figura 3.7: Curva ingegneristica e curva reale del provino TRA .....	30
Figura 3.8: Strumento “estensometro” in MatchID .....	30
Figura 3.9: Strumento per l’analisi 2D in MatchID .....	31
Figura 3.10: Codice MATLAB risolvete il non sincronismo tra macchina e telecamera .....	31
Figura 3.11: Curva della macchina e curve della DIC .....	32

Figura 3.12: Accuratezza del modulo di Young .....	33
Figura 3.13: Coefficiente di Poisson.....	33
Figura 3.14: Curve "Macchina" e curve "Estensometro" .....	34
Figura 3.15: Temperatura misurata durante la prova .....	36
Figura 3.16: Confronto tra andamento reale e teorico della temperatura.....	36
Figura 3.17: Corrispondenza tra punto di snervamento e punto di minima temperatura.....	37
Figura 3.18: Confronto tra campi di deformazione e di temperatura a inizio prova.....	37
Figura 3.19: Confronto tra campi di deformazione e di temperatura a metà prova .....	38
Figura 3.20: Confronto tra campi di deformazione e di temperatura a fine prova.....	38
Figura 3.21: Provino T0-6.....	39
Figura 3.22: Provino T0-8.....	39
Figura 3.23: Curve ingegneristiche "Macchina" e "Estensometro" relative a T0-6 e T0-8.....	39
Figura 3.24: Confronto delle curve relative ai provini T0 .....	40
Figura 3.25: Curve relative ai provini TRA, T0-6 e T0-8 .....	40
Figura 3.26: Provino C3.....	41
Figura 3.27: Curve relative alla prova di compressione.....	42
Figura 3.28: Curve ingegneristiche di trazione e compressione .....	42
Figura 3.29: Curve reali di trazione e compressione per $\nu = 0.39656$ .....	43
Figura 3.30: Piano delle tensioni principali .....	43
Figura 3.31: Provino D1.....	44
Figura 3.32: Provino D2.....	44
Figura 3.33: Profilo della sezione di taglio nei provini dreamier.....	45
Figura 3.34: Derivate delle tensioni tangenziali rispetto allo spostamento.....	46
Figura 3.35: Grafici delle curve $\tau - x$ dei provini dreamier.....	46
Figura 3.36: Piano delle tensioni principali con provini D1 e D2.....	47
Figura 3.37: Provino T1-8.....	48
Figura 3.38: Provino T2-6.....	48
Figura 3.39: Curve ingegneristiche "Macchina" e "Estensometro" relative a T1-8 e T2-6.....	49
Figura 3.40: Curve ingegneristiche al variare del fattore di triassialità .....	50
Figura 4.1: Analisi FEM di D1 nel piano delle tensioni principali .....	51

## **Elenco delle tabelle**

---

Tabella 3.1: Caratteristiche meccaniche di TRA.....	32
Tabella 3.2: Valori statistici del coefficiente di Poisson.....	34
Tabella 3.3: Valori dei parametri fisici della SSFDI .....	35
Tabella 3.4: Caratteristiche meccaniche di TRA, T0-6 e T0-8.....	41
Tabella 3.5: Caratteristiche meccaniche di T1 e T2 .....	47
Tabella 3.6: Valori di snervamento ottenuti da TRA, T0-6, T0-8, C3, D1 e D2 .....	47
Tabella 3.7: Caratteristiche meccaniche di T1-8 e T2-6.....	49

# Sommario

---

Oggetto di questa tesi è la caratterizzazione di una particolare ghisa, la SSFDI (solid-solution-strengthened ferritic ductile iron), che sta guadagnando notorietà per le sue proprietà meccaniche e tecnologiche. Per caratterizzare questo materiale, saranno condotte prove quasi-statiche di trazione e compressione. Durante ciascun test, verranno acquisite immagini utilizzando una fotocamera e una termocamera. Per l'elaborazione dei dati, si utilizzeranno due strumenti: MATLAB, una piattaforma di programmazione e calcolo numerico, e MatchID, un software specializzato nella misura della deformazione senza contatto (Digital Image Correlation).



# Abstract

---

The subject of this thesis is the characterization of a particular cast iron, SSFDI (solid-solution-strengthened ferritic ductile iron), which is gaining notoriety for its mechanical and technological properties. To characterize this material, quasi-static tensile and compression tests will be conducted. During each test, images will be acquired using a camera and a thermal camera. For data processing, two tools will be used: MATLAB, a programming and numerical computing platform, and MatchID, a software specialized in non-contact strain measurement (Digital Image Correlation).



# Introduzione

---

In questo lavoro di tesi si propone la caratterizzazione di una recente ghisa che possiede delle proprietà interessanti dal punto di vista ingegneristico, la SSFDI.

Saranno eseguite delle prove meccaniche su provini di geometria diversa, durante le quali verranno acquisiti i dati relativi a spostamento, forze e tempo di prova. Saranno utilizzate una fotocamera e una termocamera per l'acquisizione rispettivamente di immagini e temperatura del provino durante il test. Per l'elaborazione dei dati si utilizzeranno dei codici sviluppati in MATLAB, mentre le immagini saranno utilizzate in MatchID, un programma dedicato alla misura senza contatto delle deformazioni.

L'elaborato è articolato in quattro capitoli: nel primo verranno presentate le ghise e le loro caratteristiche, si analizzeranno i principali effetti degli elementi alliganti e saranno introdotte le SSFDI; il secondo capitolo tratterà le principali prove meccaniche, introducendo le grandezze utili per la descrizione e gli strumenti adatti per la buona riuscita di esse, in particolare, verranno descritti i provini, la macchina di prova e la DIC (Digital Image Correlation), la tecnica utilizzata per lo studio delle deformazioni; il terzo capitolo sarà dedicato all'elaborazione dei dati e la discussione dei risultati; infine, l'ultimo capitolo sarà riservato alle conclusioni del lavoro svolto, in cui verranno riassunti i principali risultati e problematiche.



# Capitolo 1 - Ghise

Le ghise sono leghe Fe-C ad alto contenuto di carbonio (in genere maggiore del 2.1%). Il diagramma Fe-C (figura 1.1) mostra come l'aumento di contenuto di carbonio determini l'abbassamento della temperatura di fusione fino al punto eutettico, rendendo le ghise delle leghe da fonderia (per questo in inglese vengono definite "cast iron").

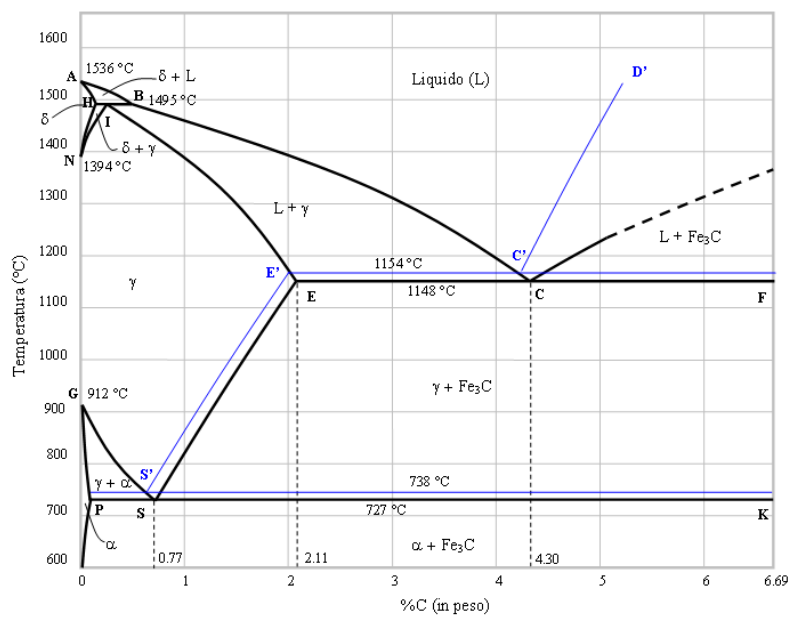


Figura 1.1: Diagramma Fe - C<sup>1</sup>

Sono conosciute, oltre che per la loro colabilità, anche per la loro facilità di lavorazione alle macchine utensili data dalla presenza di grafite nella loro matrice che agisce da lubrificante. Inoltre, sono buoni conduttori termici, ottimi smorzatori di vibrazioni e, in generale, risultano economiche. Lo svantaggio principale è rappresentato dalla grande fragilità che non permette lavorazioni per deformazione plastica.

<sup>1</sup> [https://it.wikipedia.org/wiki/File:Diagramma\\_Ferro-Carbonio.PNG](https://it.wikipedia.org/wiki/File:Diagramma_Ferro-Carbonio.PNG)

## 1.1 Carbonio nelle ghise

Il carbonio nelle ghise può presentarsi sotto forma di cementite o di grafite, modificando significativamente le proprietà meccaniche. L'ottenimento di una fase o l'altra è determinato dalle leggi di raffreddamento (velocità di raffreddamento basse promuovono la formazione di grafite) e dalla composizione chimica (elementi come Si, Al, Ni, Cu hanno un effetto grafitizzante).

La cementite non è stabile, ma tende a decomporsi in ferro e grafite e la velocità di decomposizione aumenta con la temperatura: a temperatura ambiente la reazione è così lenta da non provocare effetti rilevanti nel breve termine (diagramma Fe-C metastabile), mentre a temperature elevate i fenomeni diffusori aumentano e la cementite si decompone velocemente portando alla formazione di grafite (diagramma Fe-C stabile). Ovviamente, avere ghise o nella sola forma stabile o nella sola forma metastabile è un caso scarsamente frequente, ma di norma il carbonio si trova in entrambe le fasi con concentrazioni variabili.

### 1.1.1 La grafite

La grafite può essere classificata secondo forma, dimensione e distribuzione. Le normative aiutano il riconoscimento della classe di appartenenza della grafite attraverso delle immagini di riferimento (in figura 1.2 sono riportate le immagini per la classificazione della grafite secondo la forma).

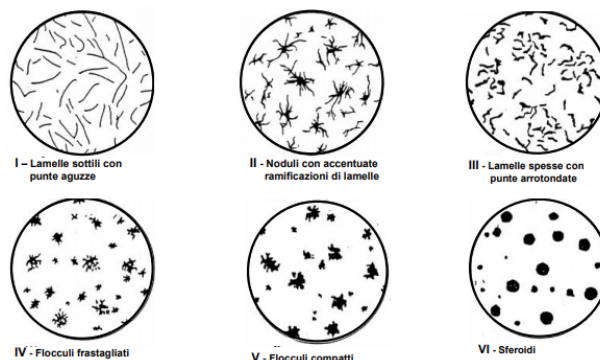


Figura 1.2: Forme della grafite nella ghisa<sup>2</sup>

<sup>2</sup> <https://www.aqcsrl.it/wp-content/uploads/2019/09/Grafite-in-acciaio.png>

Le lamelle di grafite interrompono la continuità della matrice metallica peggiorando le proprietà meccaniche della ghisa poiché facilitano l'apertura e la propagazione di micro-cricche, riducendo duttilità e resistenza meccanica del materiale. La forma sferoidale, avendo una geometria che a parità di volume presenta una superficie minore, riduce sensibilmente tale effetto.

## **1.2 Elementi alliganti nelle ghise**

Le proprietà di una ghisa variano assieme alla composizione chimica: gli elementi di lega agiscono in modo vario e complesso perché ognuno produce i propri effetti migliorando o peggiorando specifiche caratteristiche della lega.

A titolo di esempio, il cromo favorisce la formazione di carburi, il nichel ha effetto grafitizzante, il tellurio agisce da stabilizzante dei carburi.

Sono importanti gli effetti di cerio, magnesio e silicio perché i primi due hanno la particolare proprietà di favorire la sferoidizzazione della grafite, mentre il terzo è l'elemento con più alto potere grafitizzante [1].

## **1.3 Classificazione delle ghise**

Esistono quattro grandi gruppi di ghise: bianche, malleabili, grigie e duttili

Nelle ghise bianche il carbonio è sotto forma di cementite che le rende dure e fragili.

La ghisa malleabile è una ghisa bianca a basso contenuto di silicio trattata termicamente con opportuni processi atti a migliorare le proprietà meccaniche.

Le ghise grigie presentano carbonio sotto forma di grafite e sono leghe Fe-C-Si con tenore di carbonio tra il 2% e il 4.5% e di silicio tra l'1% e il 3%. La loro resistenza meccanica dipende fortemente da forma e distribuzione delle lamelle di grafite.

Infine, quella duttile è una ghisa con una composizione chimica simile a quella delle ghise grigie, ma presenta grafite in forma sferoidale (motivo per cui vengono anche dette ghise sferoidali) [2].

## 1.4 SSFDI

Le SSFDI (dall'inglese solution-strengthened ferritic ductile iron, cioè ghise ferritiche duttili rafforzate al silicio) sono ghise duttili di recente sviluppo che presentano una quantità di silicio maggiore rispetto alla versione "tradizionale", tra il 3% e il 4.3%. Possiedono caratteristiche meccaniche e tecnologiche piuttosto interessanti, infatti, hanno la stessa lavorabilità alle macchine utensili e la stessa colabilità di una ghisa classica, ma con il vantaggio di avere una maggiore resistenza a snervamento e una maggiore duttilità. Con queste caratteristiche diventano paragonabili ad un acciaio con medio contenuto di carbonio, mantenendo i bassi costi delle ghise [3].

Un tenore di silicio maggiore al 4.3% causa la formazione degli aggregamenti di ferro-silicio che provocano l'infragilimento della struttura [4].

Il punto di forza di queste ghise è la possibilità di essere lavorate per deformazione plastica, acquisendo tutti i vantaggi che tali lavorazioni offrono, come ad esempio l'aumento della resistenza dovuta all'effetto di incrudimento del materiale.

Le applicazioni della SSF-DI potrebbero essere svariate, trovando posto nelle industrie manifatturiere, automobilistiche e ferroviarie. Per esempio, un'applicazione piuttosto interessante può essere rappresentata dai dischi freno che beneficerebbero della particolare proprietà della grafite di agente lubrificante, diminuendo l'effetto abrasivo e aumentando la vita del componente.

## Capitolo 2 - Prove meccaniche

---

Le prove meccaniche rappresentano lo strumento d'indagine per lo studio delle proprietà meccaniche dei materiali. Sono stati creati diversi test con lo scopo di studiare i comportamenti dei materiali ed ognuno ha i propri vantaggi e svantaggi. Le prove di trazione e di compressione sono sicuramente tra le più celebri.

È fondamentale avere strumenti adatti per l'elaborazione dei dati. Verranno utilizzati due software: MATLAB, dedicato alla programmazione ed al calcolo numerico, e MatchID, dedicato alla tecnica di Digital Image Correlation.

### 2.1 Prova di trazione

Il test più frequentemente utilizzato per la caratterizzazione dei materiali è la prova di trazione, prova di tipo quasi-statico distruttivo in cui il provino viene sottoposto ad un carico assiale di trazione.

#### 2.1.1 Macchina di prova

La macchina di prova (figura 2.1) è composta da una traversa fissa e da una traversa mobile che scorre su due montanti che le fanno da guida, da due afferraggi che bloccano il provino alle sue estremità durante il test, da celle di carico, da trasduttori che permettono la misura dello spostamento e da un sistema di acquisizione che permette la registrazione delle grandezze misurate.



Figura 2.1: La macchina di prova

## 2.1.2 Provini

I provini per la prova di trazione hanno geometria e dimensioni normate, e sono caratterizzati da sviluppo assiale. Le sezioni possono essere rettangolari o circolari. Generalmente nei provini si possono distinguere tre parti fondamentali: la testa (parte afferrata), il tratto utile (tratto centrale del provino in cui si effettua la misura delle deformazioni) e il tratto calibrato (tratto opportunamente raccordato con la testa). La testa ha una sezione maggiore rispetto a quella del resto del provino poiché deve resistere anche alle sollecitazioni degli afferraggi. In figura 2.2 si trova la rappresentazione schematica di un provino, dove  $L_T$  è la lunghezza totale del provino,  $L_0$  del tratto utile e  $L_C$  del tratto calibrato [5].

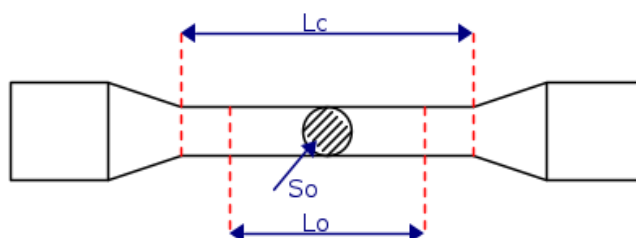


Figura 2.2: Tratto utile e tratto calibrato di un provino<sup>3</sup>

<sup>3</sup> <https://encrypted-tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRkPqXQ3nbPDeQZoXZCCq0vVwoiw5JX9F8IBw6s5a7oEvvofjtjMG>

In questo lavoro sono stati utilizzati provini di diverse forme e dimensioni; qui di seguito ne sono riportati i disegni tecnici.

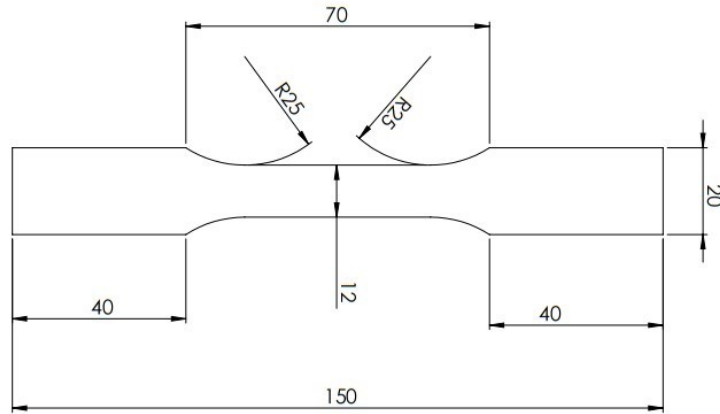


Figura 2.3: Disegno tecnico del provino TRA

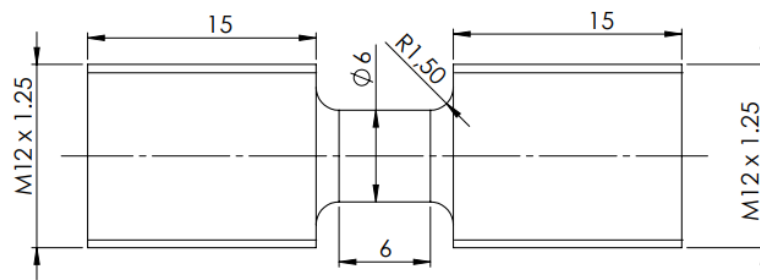


Figura 2.4: Disegno tecnico del provino T0-6

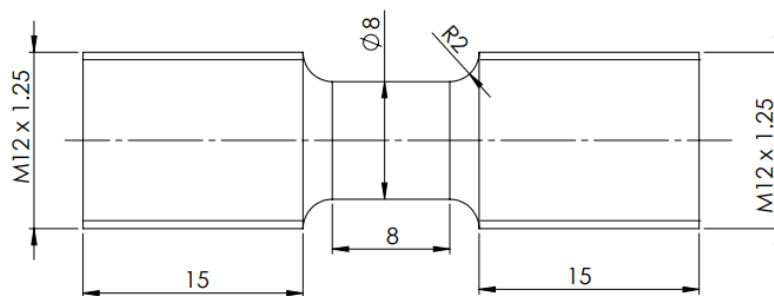


Figura 2.5: Disegno tecnico del provino T0-8

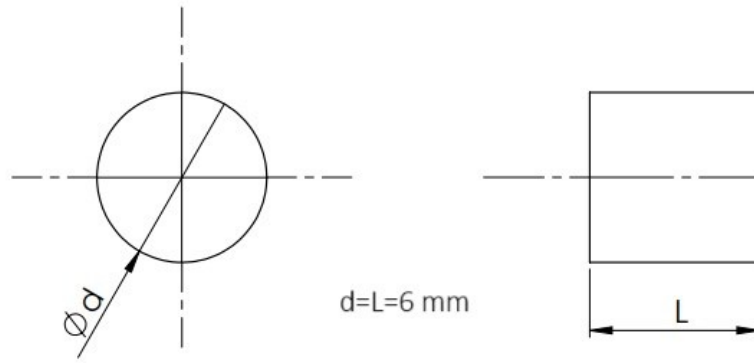


Figura 2.6: Disegno tecnico del provino C3

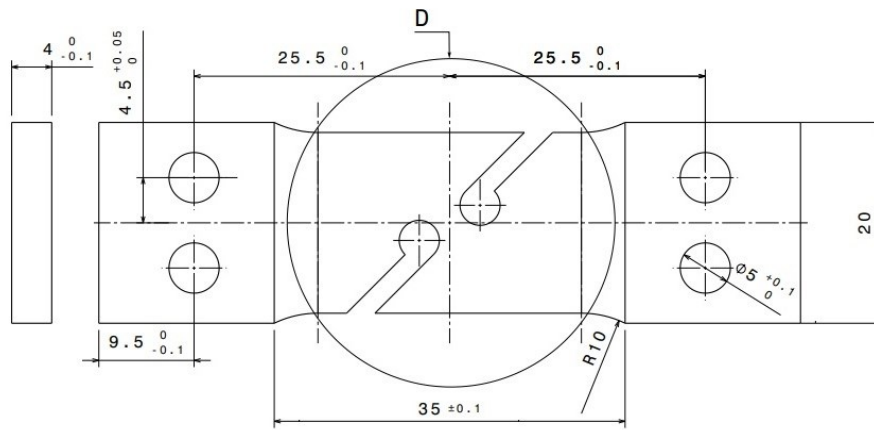


Figura 2.7: Disegno tecnico del provino D1

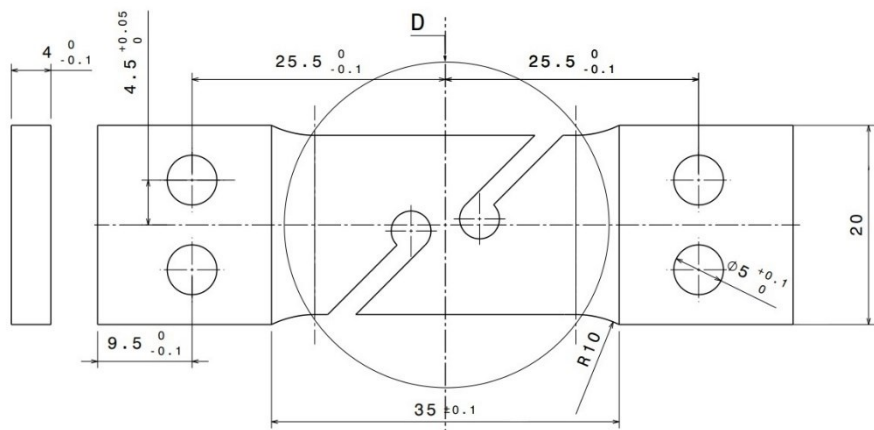


Figura 2.8: Disegno tecnico del provino D2



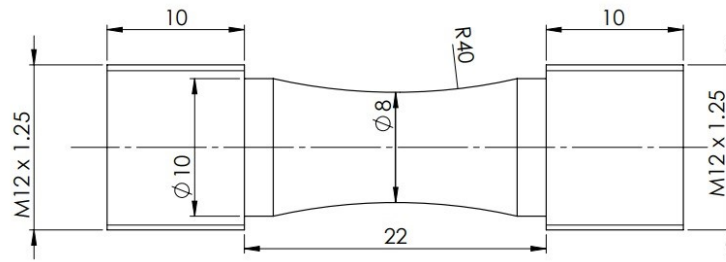


Figura 2.9: Disegno tecnico del provino T1-8

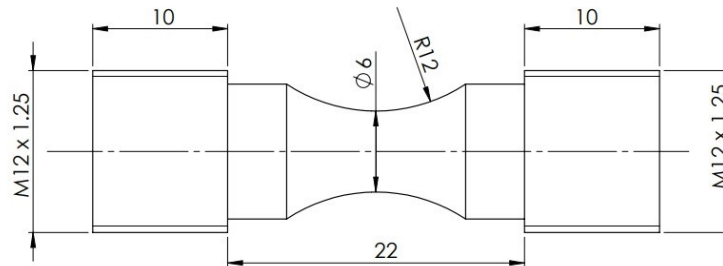


Figura 2.10: Disegno tecnico del provino T2-6

### 2.1.3 Curva $\sigma - \epsilon$

Durante il test si misurano contemporaneamente due grandezze, il carico  $F$  e l'allungamento  $\Delta L$  ed i risultati sono graficati. Tuttavia, questi dati sono influenzati dalla geometria del provino poiché il carico di rottura aumenta assieme alle dimensioni del provino. Nasce la necessità di definire delle grandezze indipendenti da tali fattori in modo da avere una caratterizzazione effettiva del materiale. A tale scopo vengono utilizzate la deformazione ingegneristica

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.1)$$

e la tensione ingegneristica

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.2)$$

dove  $L_0$  e  $A_0$  sono rispettivamente la lunghezza e l'area iniziale del tratto utile del provino.

Graficando queste due grandezze si ottiene la celebre curva  $\sigma - \epsilon$ , rappresentata in figura 2.11, che mette in relazione la tensione e la deformazione.

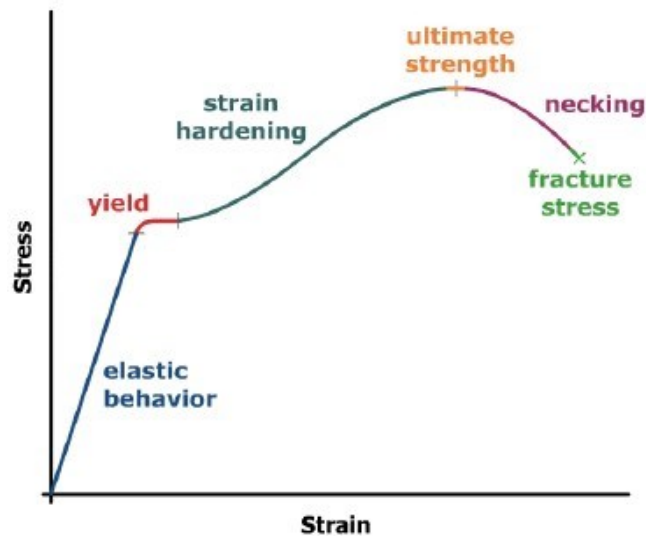


Figura 2.11: Curva  $\sigma - \varepsilon^4$

In genere, è possibile riconoscere tre fasi: la fase elastica, la fase plastica di incrudimento e la fase plastica di strizione.

La fase elastica rappresenta il periodo delle piccole deformazioni e costituisce la prima parte della curva. Il comportamento del materiale in questa fase è di tipo elastico, cioè il materiale se caricato e scaricato ritorna alle condizioni iniziali (ritorno elastico).

Esiste un tratto in cui il comportamento elastico è di tipo lineare e vale la legge di Hooke

$$\sigma = E\varepsilon$$

che lega tensioni e deformazione attraverso il modulo di elasticità lineare  $E$  (anche detto modulo di Young).

La fase plastica di incrudimento rappresenta il periodo delle grandi deformazioni: le deformazioni diventano irreversibili e crescono molto più rapidamente. Il legame tra tensioni e deformazioni non è più lineare, ma, per molti materiali, diventa del tipo esponenziale

$$\sigma = k\varepsilon^n$$

dove  $k$  è una costante che dipende dalla resistenza del materiale e  $n$  rappresenta l'indice di incrudimento.

<sup>4</sup> [https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcR6CBge-\\_LggGJfWVjQ6GSbK0JEMNHKsdthfLdV0spyfmbZJWzL](https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcR6CBge-_LggGJfWVjQ6GSbK0JEMNHKsdthfLdV0spyfmbZJWzL)

L'ultima fase è quella plastica di strizione: nei materiali più duttili è possibile assistere ad una fase in cui deformazioni e tensioni si localizzano in una sezione del provino, la quale inizia a ridursi fino a raggiungere una dimensione tale da causare la rottura del provino. Durante tale fase lo stato tensionale non è più uniassiale, ma diventa triassiale. Il punto che separa la fase elastica da quella plastica coincide con il punto di snervamento del materiale, che non è sempre facilmente identificabile. A tal proposito si osservi la figura 2.12, in cui si possono riconoscere tre casi. Il primo caso, in realtà, non presenta alcun punto di snervamento e, generalmente, si sceglie come punto di fine elasticità, quello per cui la deformazione residua è pari allo 0.2%. Nel secondo caso il punto di snervamento è evidente, e nel terzo caso si assiste ad un vero e proprio periodo di snervamento.

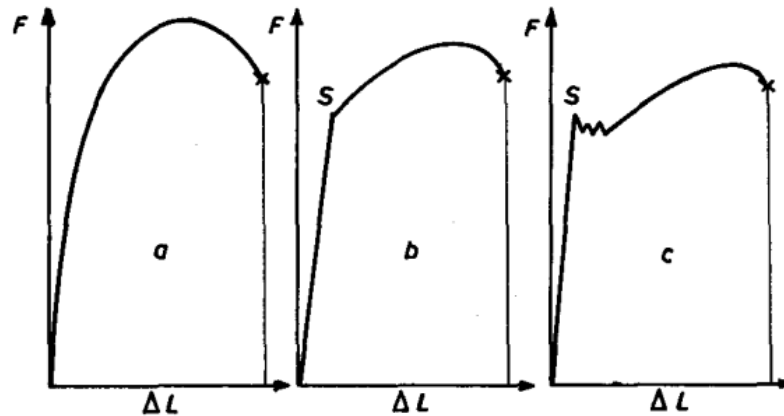


Figura 2.12: Tipologie di snervamento<sup>5</sup>

La fase di incrudimento e la fase di strizione sono separate dal punto di massima tensione della curva, la tensione ad esso associata è detta tensione di rottura.

Un'altra informazione importante che si può ricavare dalla curva  $\sigma - \varepsilon$  è la duttilità: un materiale duttile è un materiale particolarmente deformabile, quindi avrà una curva che si estenderà maggiormente rispetto a quella di un materiale fragile. Il parametro che fornisce una misura quantitativa della duttilità è l'allungamento percentuale  $A\%$ , definito come segue

$$A\% = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100$$

<sup>5</sup> <https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQejqdwQZUocuNE1IB6gmwnUOr-919R89eLN-OLY0KrRVTH7kpT>

### 2.1.4 Effetto Poisson

Durante la prova di trazione si assiste ad un allungamento uniforme del provino accompagnato da una progressiva riduzione di sezione. Il coefficiente di Poisson  $\nu$  quantifica quest'effetto e viene definito come segue

$$\nu = -\frac{d\varepsilon_T}{d\varepsilon_A}$$

dove  $d\varepsilon_A$  è la deformazione assiale, cioè quella lungo l'asse del provino, e  $d\varepsilon_T$  è la trasversale, cioè quella perpendicolare all'asse del provino.

Nel caso di materiali isotropi, scegliendo un sistema di riferimento orientato con l'asse  $x$  coincidente con l'asse di simmetria del provino risulta

$$\nu = -\frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_x} = -\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_x} \quad (2.3)$$

dove  $d\varepsilon_k$  è la deformazione nella direzione  $k$ .

Per motivi fisici  $-1 < \nu < 0.5$  e, in genere, i materiali possiedono un coefficiente di Poisson positivo e il caso ideale  $\nu = 0.5$  determina la conservazione del volume (la gomma possiede valori molto prossimi a 0.5). I materiali con coefficiente di Poisson negativo vengono detti auxetici.

Tipicamente negli acciai durante la fase elastica  $\nu \approx 0.3$ , mentre durante la fase plastica  $\nu \approx 0.5$ , mentre per le ghise tipicamente si hanno valori minori.

### 2.1.5 Diagramma reale nel caso di conservazione del volume

Si definiscono la deformazione reale  $\tilde{\varepsilon}$  e la tensione reale  $\tilde{\sigma}$  come segue

$$\tilde{\varepsilon} = \int_{L_0}^L \frac{dl}{l} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (2.4)$$

$$\tilde{\sigma} = \frac{F}{A} \quad (2.5)$$

dove  $L$  e  $A$  sono rispettivamente la lunghezza e l'area istantanea del tratto utile del provino.

Si dimostra facilmente che le grandezze reali sono legate a quelle ingegneristiche.

Infatti, dalle (2.1), (2.2), (2.4), (2.5) risulta:

$$\tilde{\varepsilon} = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \left( 1 + \frac{\Delta L}{L_0} \right) = \ln(1 + \varepsilon)$$

$$\tilde{\sigma} = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{A_0}{A} = \sigma \frac{L}{L_0} = \sigma(1 + \varepsilon)$$

dove si è assunto che  $A_0 L_0 = AL$ , cioè che il volume si conserva durante la prova.

Dalle precedenti relazioni si osserva che  $\tilde{\varepsilon} < \varepsilon$  e  $\tilde{\sigma} > \sigma$ , e che per piccole deformazioni le grandezze reali coincidono con quelle ingegneristiche poiché

$$\tilde{\varepsilon} = \ln(1 + \varepsilon) \sim \varepsilon \text{ per } \varepsilon \rightarrow 0$$

$$\tilde{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon) \sim \sigma \text{ per } \varepsilon \rightarrow 0$$

Nella figura 2.13 sono riportate le due curve, ingegneristica e reale: si osserva che le due curve sono quasi del tutto sovrapposte nel tratto elastico, mentre nel tratto plastico la curva vera diventa visibilmente maggiore di quella ingegneristica.

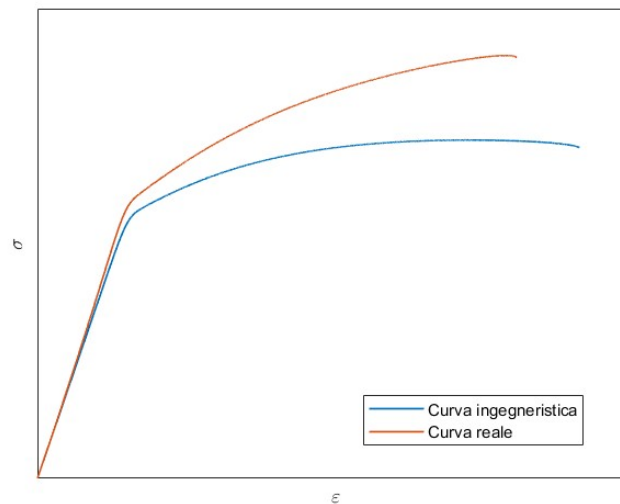


Figura 2.13: Confronto tra curva ingegneristica e curva reale

## 2.1.6 Diagramma reale nel caso di non conservazione del volume

Nel caso in cui il volume non si conserva, la relazione che lega  $\tilde{\sigma}$  e  $\varepsilon$  cambia.

Scegliendo un sistema di riferimento orientato con l'asse  $x$  lungo l'asse del provino, dalla (2.3) risulta

$$v = -\frac{dy/y}{dx/x} \Rightarrow -v \frac{dx}{x} = \frac{dy}{y} \Rightarrow -v \int_{x_0}^x \frac{dx}{x} = \int_{y_0}^y \frac{dy}{y} \Rightarrow -v \ln \frac{x}{x_0} = \ln \frac{y}{y_0}$$

Si ottiene

$$v = -\frac{\ln(1 + \varepsilon_y)}{\ln(1 + \varepsilon_x)} = -\frac{\tilde{\varepsilon}_y}{\tilde{\varepsilon}_x}$$

Analogamente

$$\nu = -\frac{\ln(1 + \varepsilon_z)}{\ln(1 + \varepsilon_x)} = -\frac{\tilde{\varepsilon}_z}{\tilde{\varepsilon}_x}$$

Si osserva che per piccole deformazioni si ottiene la più comune forma

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x}$$

Dalle precedenti relazioni risulta

$$(1 + \varepsilon_y) = (1 + \varepsilon_x)^{-\nu} \quad (2.6)$$

$$(1 + \varepsilon_z) = (1 + \varepsilon_x)^{-\nu} \quad (2.7)$$

Inoltre, per la (2.4) vale

$$y = y_0 e^{\tilde{\varepsilon}_y}$$

$$z = z_0 e^{\tilde{\varepsilon}_z}$$

Si possono calcolare l'area iniziale  $A_0$  e l'area in un istante generico  $A$  come segue

$$A_0 = ky_0z_0$$

$$A = kyz$$

dove è stato introdotto il parametro  $k$  che dipende della geometria della sezione (per sezioni circolari  $k = 2\pi$ , per sezioni rettangolari  $k = 1$ ).

Dunque

$$\frac{A - A_0}{A_0} = \frac{kyz - ky_0z_0}{ky_0z_0} = \frac{y_0z_0 e^{\tilde{\varepsilon}_y} e^{\tilde{\varepsilon}_z} - y_0z_0}{y_0z_0} = e^{\tilde{\varepsilon}_y} e^{\tilde{\varepsilon}_z} - 1$$

Essendo  $e^{\tilde{\varepsilon}_k} = (1 + \varepsilon_k)$  risulta

$$\frac{A - A_0}{A_0} = (1 + \varepsilon_y)(1 + \varepsilon_z) - 1$$

Sostituendo le (2.6) e (2.7) si ottiene

$$\frac{A}{A_0} = (1 + \varepsilon_x)^{-2\nu} \quad (2.6)$$

È possibile ridefinire la tensione reale [6] come segue

$$\tilde{\sigma} = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{A_0}{A} = \sigma(1 + \varepsilon_x)^{2\nu}$$

Si noti che se  $\nu = 0.5$  si riottiene il caso particolare valido nel caso di conservazione di volume e risulta

$$\begin{cases} \tilde{\sigma} > \sigma & \text{se } 0 < \nu < 0.5 \\ \tilde{\sigma} = \sigma & \text{se } \nu = 0 \\ \tilde{\sigma} < \sigma & \text{se } -1 < \nu < 0 \end{cases}$$

In figura (2.14) sono raffigurate le curve reali al variare di  $\nu$ .

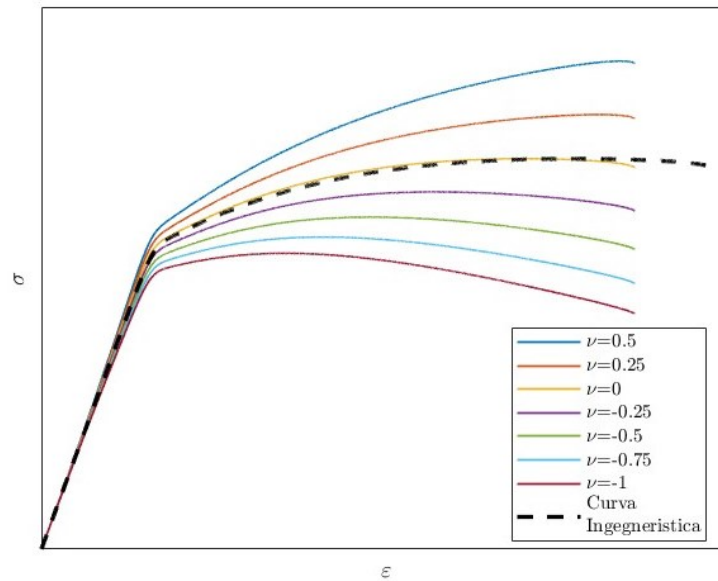


Figura 2.14: Curve reali per diversi valori di  $\nu$

## 2.2 Prova di compressione

La prova di compressione è un test quasi-statico distruttivo in cui il carico è assiale in cui un provino cilindrico viene compresso tra due piastre.

Si presentano due problematiche (figura 2.15) delle quali la prova di trazione ne è priva.

La prima problematica è rappresentata dal cosiddetto barreling: il provino vorrebbe espandersi radialmente per l'effetto Poisson, ma tale espansione è bloccata dall'attrito tra piastre e provino ed il provino assume la tipica forma a barile (da cui il nome) e lo stato tensionale che ne risulta sia triassiale.

La seconda problematica è data dall'instabilità elastica: il provino, se troppo snello, potrebbe collassare prima che raggiungi il carico di rottura a causa di un'inflexione dello stesso [7].

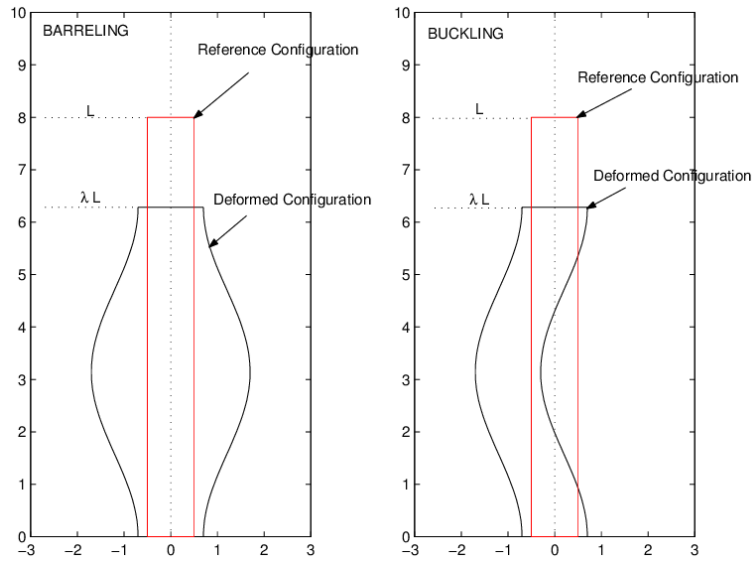


Figura 2.15: Barreling e instabilità elastica<sup>6</sup>

## 2.3 Caratterizzazione termo-meccanica

I fenomeni meccanici e termici sono estremamente connessi tra loro: si pensi, ad esempio, al materiale che si scalda durante le lavorazioni per asportazioni di truciolo, oppure al materiale che aumenta la sua duttilità con l'aumento della temperatura. Negli ultimi anni si sono sviluppate delle teorie con lo scopo di fondere le due materie: teoria termo-elastica e termo-plastica. La tensione diventa funzione, oltre che della deformazione, anche della temperatura.

### 2.3.1 Effetto termoelastico

Si vuole approfondire un particolare fenomeno derivante dalla teoria termo-elastica per il quale la temperatura del materiale nel tratto elastico varia in funzione della tensione. Tale effetto è detto effetto termoelastico e, utilizzando la notazione di Einstein, è descritto dalla seguente legge [8]:

$$\Delta T = -T_0 \frac{\alpha}{\rho c_p} \Delta \sigma_{kk} \quad (2.7)$$

<sup>6</sup> <https://www.researchgate.net/profile/Pablo-Negron-Marrero/publication/265818180/figure/fig2/AS:392239688765440@1470528637070/Compressions-of-either-barreling-or-buckling-type-of-a-rectangular-slab.png>



dove  $T_0$  è la temperatura iniziale del provino espressa in Kelvin,  $\alpha$  è il coefficiente di dilatazione termica,  $\rho$  è la densità,  $c_p$  è il calore specifico a pressione costante e il termine  $\Delta\sigma_{kk} = \Delta(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})$  indica la variazione del primo invariante del tensore della tensione. Si noti il segno negativo: ad esempio, uno stato tensionale risultante di trazione implica una diminuzione di temperatura, mentre uno stato di compressione ne prevede un aumento.

La precedente relazione può essere riscritta come segue:

$$\Delta T = -T_0 \frac{\alpha E}{\rho c_p} \Delta \varepsilon_{kk} \quad (2.8)$$

La dimostrazione della (2.7) presuppone l'ipotesi di adiabaticità e reversibilità: l'ipotesi di adiabaticità può essere più o meno garantita durante tutta la prova meccanica (essa è maggiormente confermata a velocità di prova alte poiché le dissipazioni di calore sono meno rilevanti), mentre la reversibilità è valida solo nel tratto elastico.

### 2.3.2 Effetti termici nel tratto plastico

Nel tratto plastico nascono dei fenomeni irreversibili che producono calore e la temperatura del provino aumenta.

Ricordando che il punto di snervamento divide fase elastica da fase plastica, allora esso è anche il punto in cui l'effetto termoelastico non è più rilevante: ciò diventa visibile con un cambio di pendenza nell'andamento della temperatura durante la prova (figura 2.16).

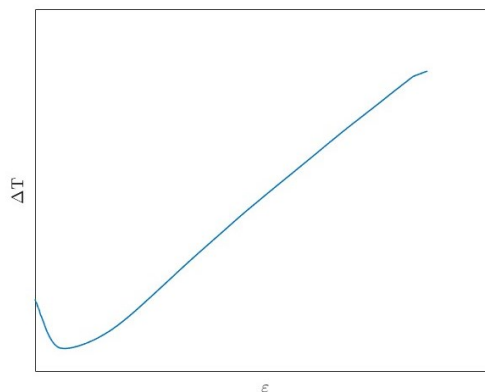


Figura 2.16: Variazione di temperatura durante la deformazione in una prova di trazione

## 2.4 Digital Image Correlation

Nelle prove meccaniche, dunque, risulta necessario conoscere il valore della deformazione durante la prova. La macchina di trazione fornisce lo spostamento della sua traversa che però non coincide con l'allungamento del provino a causa delle rigidità della macchina stessa e delle celle di carico.

Con lo sviluppo delle nuove tecnologie, si sono sviluppate tecniche di misura della deformazione più innovative come la Digital Image Correlation (DIC), tecnica basata sul processamento e sull'elaborazione delle immagini per l'ottenimento dei campi di spostamento e deformazione.

L'analisi delle immagini può essere bidimensionale o tridimensionale: se bidimensionale, l'acquisizione delle immagini viene fatta attraverso l'ausilio di una fotocamera disposta perpendicolarmente alla superficie di cui si vuole misurare la deformazione, altrimenti, nel caso di analisi tridimensionale occorre un sistema stereoscopico composto da due fotocamere disposte come in figura 2.17.

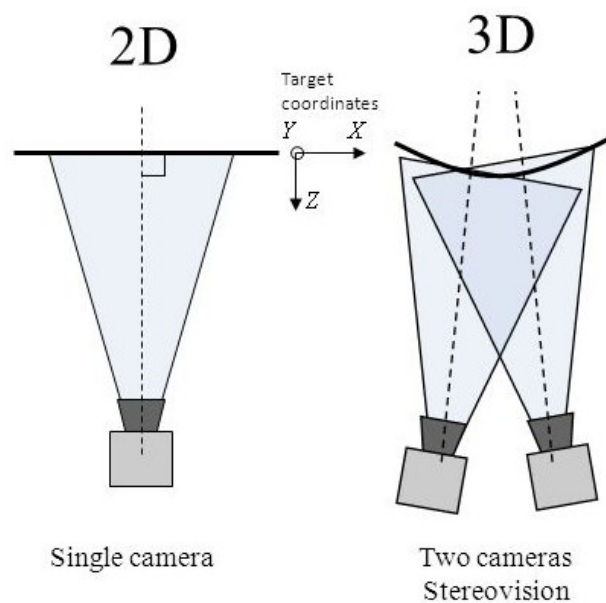


Figura 2.17: Confronto del setup tra analisi 2D e 3D<sup>7</sup>

<sup>7</sup> [https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQQBG8xm1\\_Trkoc3xIjvaieFsN224WvQAXva9Zrve9qnr6NURfz](https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQQBG8xm1_Trkoc3xIjvaieFsN224WvQAXva9Zrve9qnr6NURfz)

## 2.4.1 Analisi 2D

Nell'analisi 2D vengono perse le informazioni sulla profondità (lungo l'asse  $z$  riferendoci al sistema di riferimento adottato figura 2.17), quindi diventa possibile il suo utilizzo quando la deformazione si svolge in un piano (o in una retta), cioè quando le deformazioni sono assenti o trascurabili in una direzione (o in due direzioni), per esempio nel caso di una prova di trazione su un provino piatto.

L'utilizzo di un sistema telecentrico diventa fondamentale nell'analisi 2D, poiché permette di acquisire delle immagini limitando notevolmente gli errori prospettici, in quanto il principio di funzionamento è basato su un sistema di lenti disposte in modo da rendere le onde elettromagnetiche parallele tra loro (si veda figura 2.18 per il confronto con i sistemi ordinari).

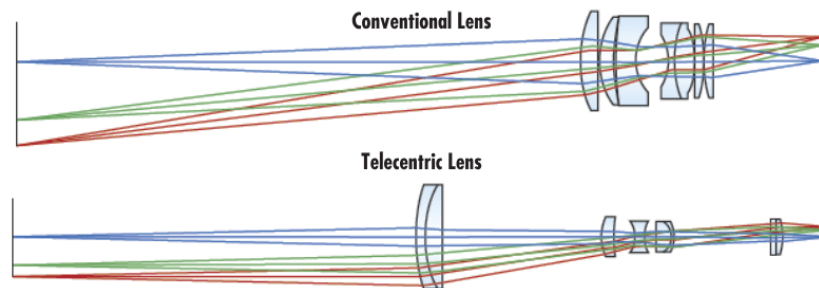


Figura 2.18: Sistemi ottici ordinari e telecentrici<sup>8</sup>

## 2.4.2 Speckle pattern

Il provino deve essere tale da facilitare il riconoscimento dello spostamento dei vari punti che lo costituiscono: occorre preparare opportunamente la sua superficie con un pattern specifico che abbia dei punti che il software possa usare come punti guida.

Il pattern utilizzato viene detto "speckle pattern" poiché costituito da una trama maculata (figura 2.19). Per la realizzazione di un buon pattern le macchioline devono essere disposte in maniera caotica, distanziate in maniera opportuna e diverse in dimensioni tra loro in modo da favorirne il riconoscimento. Esso può essere ottenuto in svariati modi: il metodo più semplice risulta essere l'utilizzo di vernice spray [9].

<sup>8</sup> <https://www.edmundoptics.com/media/0azkyibe/advantages-of-telecentricity-1.svg?rmode=max>

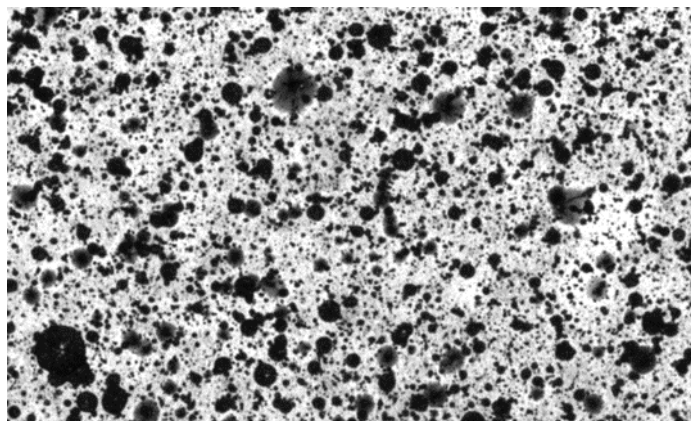


Figura 2.19: Speckle pattern

### 2.4.3 Principio di funzionamento della DIC

La superficie di misura viene divisa in diverse regioni quadrate che prendono il nome di subset. Ogni subset viene ricercato nella sua configurazione deformata sulla successiva immagine, ricavando lo spostamento del suo centro (figura 2.20). Il risultato è dato da un campo vettoriale che fornisce lo spostamento di ogni centro e da esso può essere calcolato il campo di deformazione.

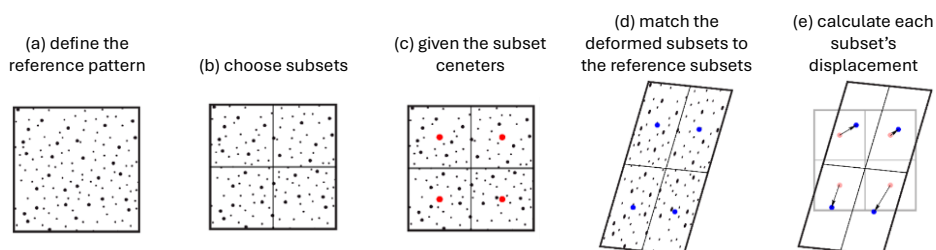


Figura 2.20: Principio di funzionamento della DIC<sup>9</sup>

### 2.4.4 Parametri di analisi

Per l'elaborazione delle immagini sono fondamentali due parametri, subset size e step size. Il primo permette la scelta delle dimensioni del quadrato del subset nell'immagine di riferimento, mentre il secondo rappresenta la distanza tra i centri dei subset.

<sup>9</sup> <https://digitalimagecorrelation.org/assets/img/DICsubset-01.png>

Entrambi i parametri devono essere scelti con criterio: ad esempio scegliendo un valore di step size troppo elevato si aumenta la risoluzione della misura a discapito dei tempi di elaborazione che potrebbero diventare poco sostenibili, oppure scegliendo un subset size troppo piccolo il sistema potrebbe avere problemi di riconoscimento tra i vari subset non riuscendo a concludere l'analisi.

## Capitolo 3 - Elaborazione dei dati

---

Per le prove meccaniche sono state utilizzate una telecamera, per l'acquisizione delle immagini da utilizzare per l'analisi in MatchID, e una termocamera, per l'analisi termica del provino durante la prova (figura 3.1).



Figura 3.1: Setup delle prove

### 3.1 Provino TRA

Il primo provino in esame è il provino piatto TRA mostrato in figura 3.2.



Figura 3.2: Provino TRA

### 3.1.1 Elaborazione dei dati della macchina di trazione

Graficando i valori di deformazione e tensione ottenuti dalla macchina si ottiene il grafico di figura 3.3.

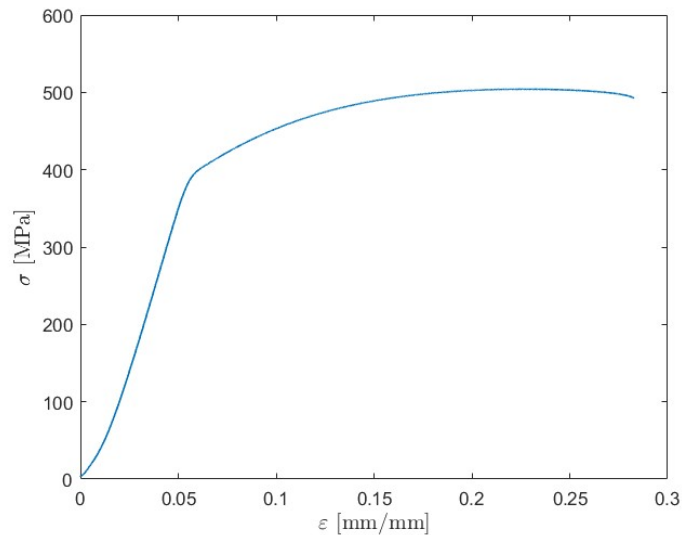


Figura 3.3: Curva  $\sigma - \epsilon$  fornita dalla macchina

Il tratto iniziale non risulta lineare, ma presenta un primo tratto curvilineo causato dall'assestamento del provino: avvengono degli spostamenti rigidi che non oppongono resistenza alla macchina. È necessario fare una prima correzione della curva affinché tale tratto curvilineo sia sostituito da un tratto lineare. In figura 3.4 è possibile visionare il codice per l'ottenimento della curva corretta.

```
73 Strain_C = linspace(0,Stress(I)/E,I);
74 Stress_C = Strain_C*E;
75 Strain_C = Strain_C';
76 Stress_C = Stress_C';
77 delta_epsilon = Strain(I) - Strain_C(I);
78 Strain_C(I+1:length(Strain)) = Strain(I+1:length(Strain)) - delta_epsilon;
79 Stress_C(I+1:length(Stress)) = Stress(I+1:length(Stress));
```

Figura 3.4: Codice MATLAB per la correzione della non linearità del tratto elastico

Graficando nuovamente si ottiene una curva che, in realtà, è influenzata dalla rigidità della macchina perché lo spostamento fornito dalla macchina è quello della traversa mobile, che è influenzato dalla deformazione del provino  $\epsilon_P$  e dalla deformazione della macchina e delle celle di carico  $\epsilon_M$ , cioè risulta

$$\epsilon_{TOT} = \epsilon_P + \epsilon_M$$

Considerando il sistema macchina-provino come due molle in serie (figura 3.5), la deformazione del provino potrà essere calcolata mediante la seguente relazione:

$$\varepsilon_P = \varepsilon_{TOT} - \frac{\sigma}{E_M}$$



Figura 3.5: Modello di molle in serie

Occorrerà ipotizzare il modulo elastico della macchina  $E_M$  correttamente affinché la deformazione  $\varepsilon_P$  risulterà quella del provino. Sappiamo che la ghisa ha un modulo di Young pari a 175 GPa, basterà verificare che la curva ottenuta sia parallela, nel tratto elastico, ad una retta con coefficiente angolare pari a tale valore. Essa rappresenta la curva che caratterizza il materiale ed è riportata in figura 3.6.

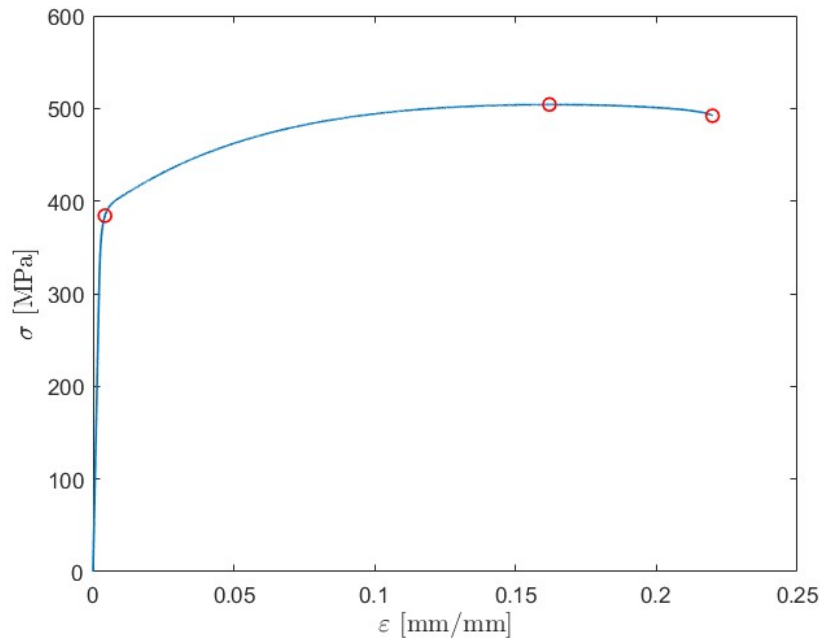


Figura 3.6: Curva  $\sigma - \varepsilon$  del provino TRA

La tensione di snervamento  $\sigma_y$  vale 384 Mpa, la tensione di rottura  $\sigma_{UTS}$  504 Mpa e l'allungamento percentuale  $A\%$  22%.



In figura 3.7 viene mostrato il confronto tra curva ingegneristica e curva reale.

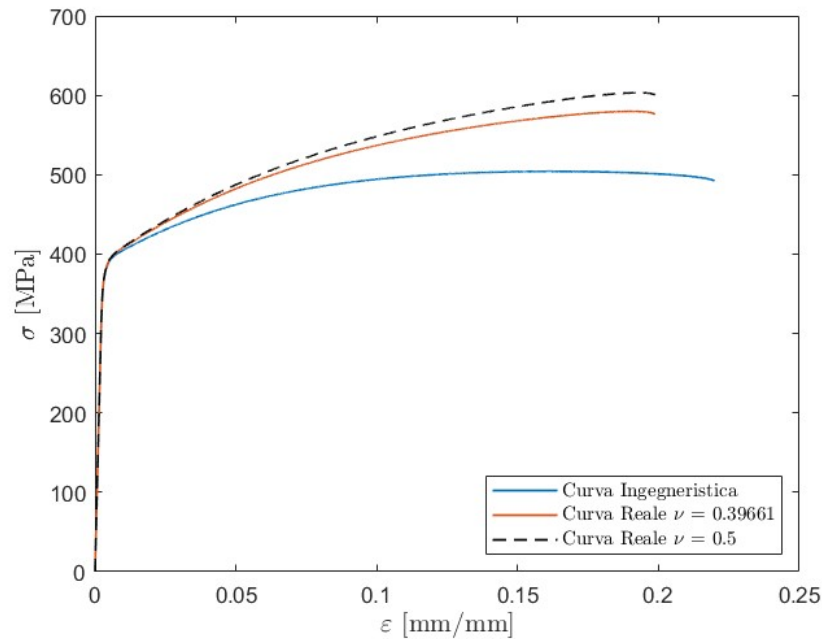


Figura 3.7: Curva ingegneristica e curva reale del provino TRA

### 3.1.2 Elaborazione delle immagini in MatchID

Per l'analisi DIC si utilizza il software MatchID che permette l'elaborazione di immagini attraverso due strumenti. Il primo agisce come un estensometro, cioè si occupa del calcolo degli spostamenti tra gli estremi del tratto utile (figura 3.8).

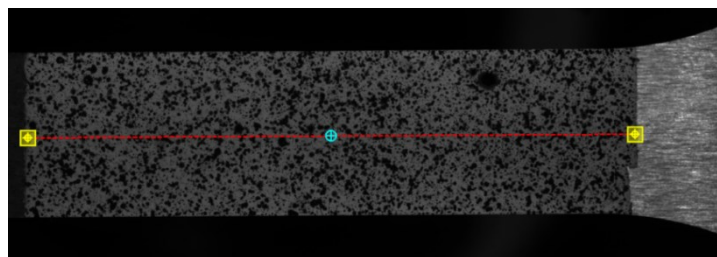


Figura 3.8: Strumento "estensometro" in MatchID

Il secondo strumento elabora i dati di una regione selezionata così da ottenere tutto il campo di spostamento all'interno di essa (figura 3.9). I risultati sono forniti sotto forma di matrice le cui componenti corrispondono ai centri dei subset, e valori rappresentano

l'intensità dello spostamento e le deformazioni  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$  e  $\varepsilon_{xy}$  saranno calcolate successivamente all'interno dello stesso programma.

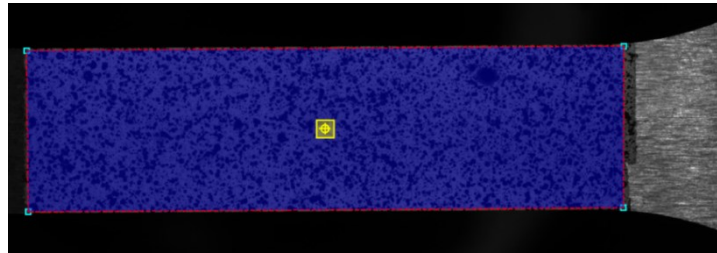


Figura 3.9: Strumento per l'analisi 2D in MatchID

Queste elaborazioni sono importanti per la verifica della correttezza della curva ottenuta tramite le correzioni fatte nel paragrafo precedente. Infatti, se le correzioni sono state fatte in modo errato, non ci sarebbe nessuna corrispondenza tra le deformazioni ottenute tramite DIC e quelle ottenute tramite la correzione.

Occorre precisare che telecamera e macchina di prova non erano sincronizzate nel campionamento né per l'istante di inizio né per la frequenza. In MATLAB questa problematica viene corretta attraverso la creazione di un vettore tempo della telecamera sul quale vengono interpolati i dati della macchina. In figura 3.10 viene riportato il codice:  $t$  è il vettore tempo di cui si parlava,  $DeltaTime$  è l'intervallo di tempo di non sincronismo.

```
169 fs = 2; % [Hz]
170 t = (0:1/fs:1/fs*(length(eEng)-1))';
171 DeltaTime = 1.6;
172 DIC_Stress = interp1(TestTime-DeltaTime,Stress,t);
173 DIC_EpsX = exx.Mean;
174 DIC_TrueStress = DIC_Stress.*exp(DIC_EpsX);
```

Figura 3.10: Codice MATLAB risolvete il non sincronismo tra macchina e telecamera

In figura 3.11 sono raffigurate le tre curve  $\sigma - \varepsilon$  ottenute: la curva azzurra “Macchina” è la curva che ha come deformazioni quelle del provino ottenute tramite le correzioni discusse precedentemente, la curva rossa “Estensometro” utilizza come deformazioni quelle ingegneristiche calcolate da MatchID tramite lo strumento omonimo, la curva gialla “DIC” utilizza le medie dei valori delle matrici ottenute con l'analisi 2D.

Le prime due curve sono quasi del tutto coincidenti: ciò significa che le correzioni fatte alla curva sono accettabili, mentre la terza si discosta dalle altre principalmente per due

ragioni: la deformazione non è uniforme in tutto il provino poiché ci sono punti in cui le deformazioni sono meno intense; le deformazioni sono state calcolate con metodi diversi da quelli descritti nel capitolo 2.

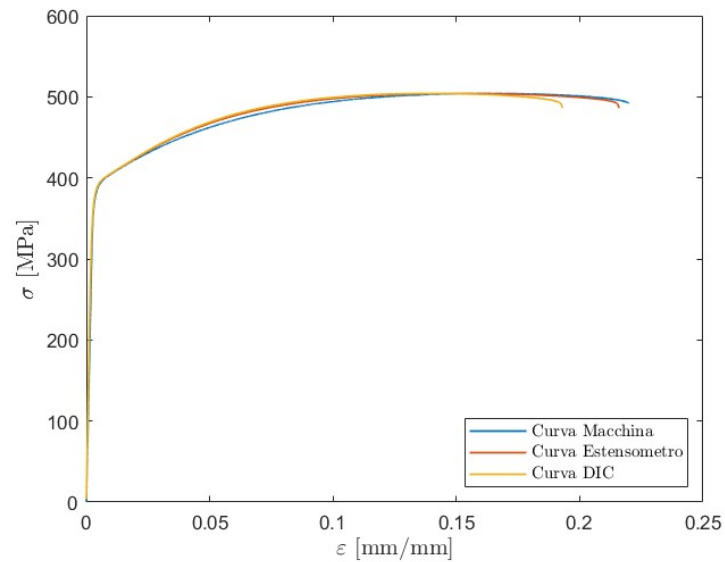


Figura 3.11: Curva della macchina e curve della DIC

Ricalcolando il valore di  $\sigma_y$ ,  $\sigma_{UTS}$  e  $A\%$  si trovano valori leggermente diversi rispetto a quelli calcolati con la macchina, nella tabella 3.1 sono riportati i valori.

	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_{UTS}$ [MPa]	$A\%$ [%]
Macchina	384	504	21.9
Estensometro	387	504	21.6

Tabella 3.1: Caratteristiche meccaniche di TRA

In figura 3.12 viene mostrata la curva “Estensometro” e la retta avente coefficiente elastico uguale a 175 GPa: la correttezza del modulo di Young utilizzato diventa visibile dalla sovrapposizione delle due curve nel tratto elastico.

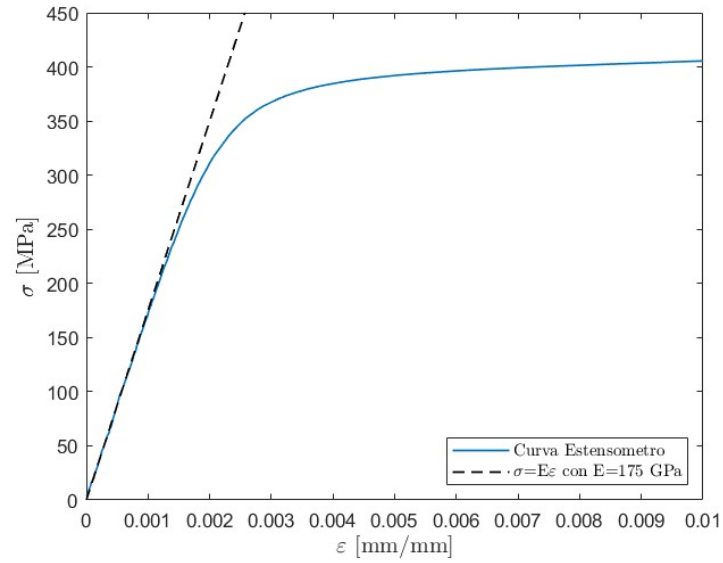


Figura 3.12: Accuratezza del modulo di Young

Utilizzando i valori medi delle deformazioni fornite dall'analisi 2D è possibile ricavare l'andamento del coefficiente di Poisson, che viene mostrato in figura 3.13 insieme alla curva  $\sigma - \epsilon$  in modo da distinguere fase elastica e plastica.

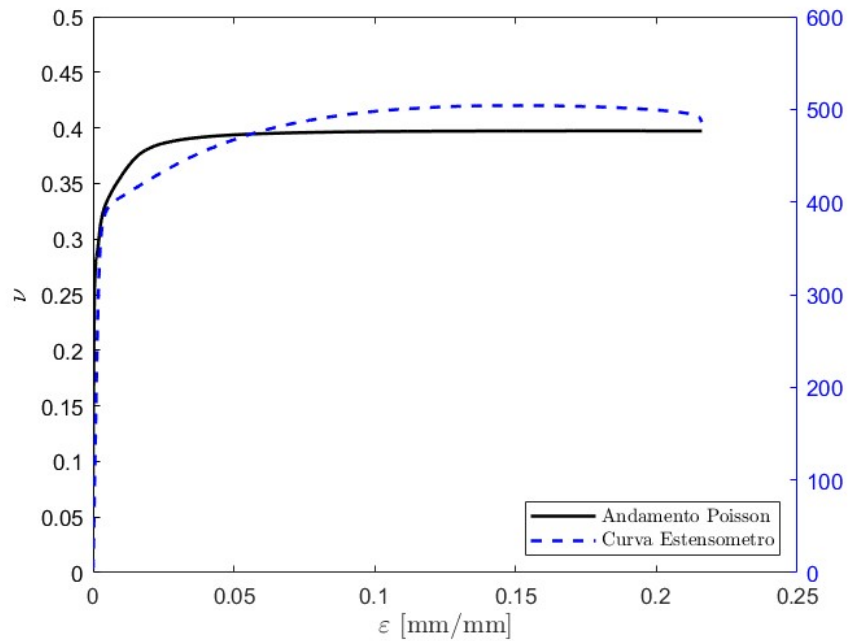


Figura 3.13: Coefficiente di Poisson

Nella fase elastica il valore di  $\nu$  è crescente con un valore medio pari a  $\nu = 0.243$ , mentre nella fase plastica l'andamento è pressoché costante con valore medio uguale a  $\nu = 0.392$ .

Nella fase elastica, però, l'elevato valore di deviazione standard di 0.07 fa preferire come valore rappresentativo il valore della mediana 0.273.

Per una maggiore facilità di lettura, nella tabella 3.2 si riassumono i dati statistici appena citati.

	$\bar{\nu}$	$\nu_{std}$	$\nu_{med}$
Fase elastica	0.243	0.070	0.273
Fase plastica	0.392	0.012	0.397

Tabella 3.2: Valori statistici del coefficiente di Poisson

In figura 3.14 vengono confrontate le curve "Macchina" ed "Estensometro" ingegneristiche e reali, e si osserva che la sovrapposizione delle due curve permane ancora.

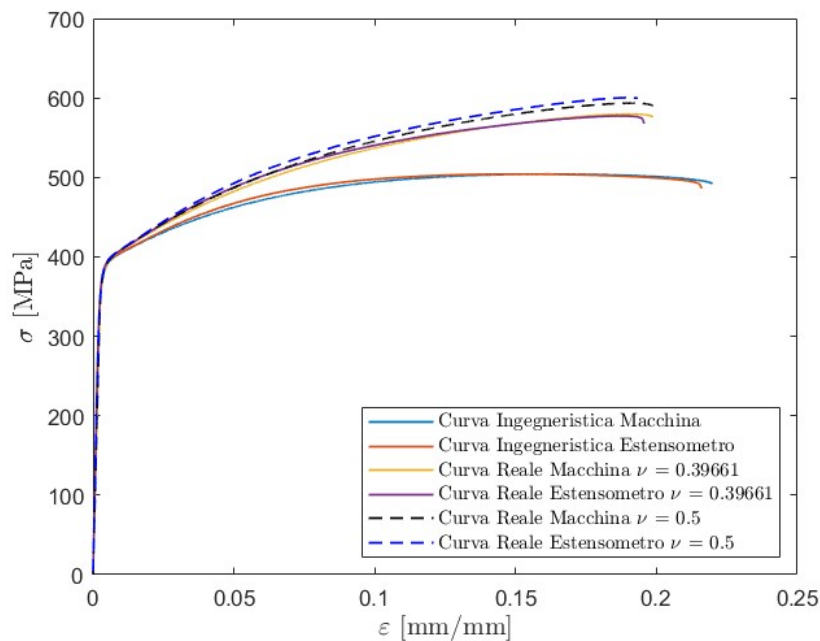


Figura 3.14: Curve "Macchina" e curve "Estensometro"

### 3.1.3 Elaborazione delle immagini della termocamera

Anche per l'acquisizione della temperatura è stata preparata la superficie del provino in modo da migliorare l'acquisizione delle immagini, infatti è stata colorata di nero per aumentarne l'emissività, cioè la quantità di energia capace di irraggiare.

Con le immagini della termocamera si vuole osservare l'andamento della temperatura del provino durante la prova e verificare la realizzazione dell'effetto termoelastico descritto dalla relazione (2.8) che si riporta di seguito per praticità:

$$\Delta T = -T_0 \frac{\alpha E}{\rho c_p} \Delta \varepsilon_{kk}$$

I valori dei parametri fisici  $\alpha$ ,  $\rho$ ,  $c_p$  ed  $E$  sono riportati in tabella 3.3.

$\alpha$ [K <sup>-1</sup> ]	$\rho$ [Kg · m <sup>-3</sup> ]	$c_p$ [J · Kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	$E$ [GPa]
$1.15 \cdot 10^{-5}$	7300	515	175 GPa

Tabella 3.3: Valori dei parametri fisici della SSFDI

In figura 3.15 è rappresentato l'andamento effettivo della temperatura del provino durante la prova, mentre, in figura 3.16, la sua variazione rispetto alla temperatura iniziale ( $T_0 = 21.69$  °C) viene confrontata con la "retta teorica" data dalla (2.8). È evidente che i parametri sono stati scelti correttamente vista la coincidenza tra i due grafici; questo conferma nuovamente che il modulo di Young scelto inizialmente per la correzione è corretto.

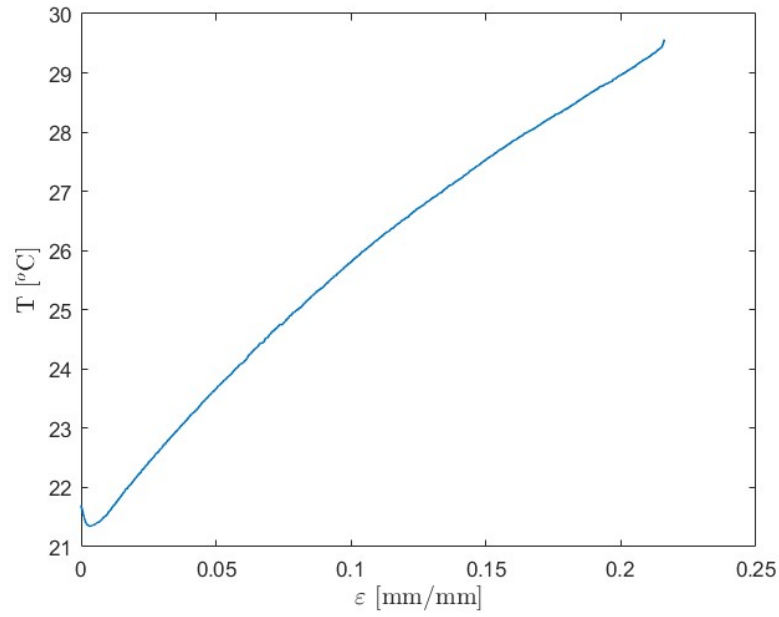


Figura 3.15: Temperatura misurata durante la prova

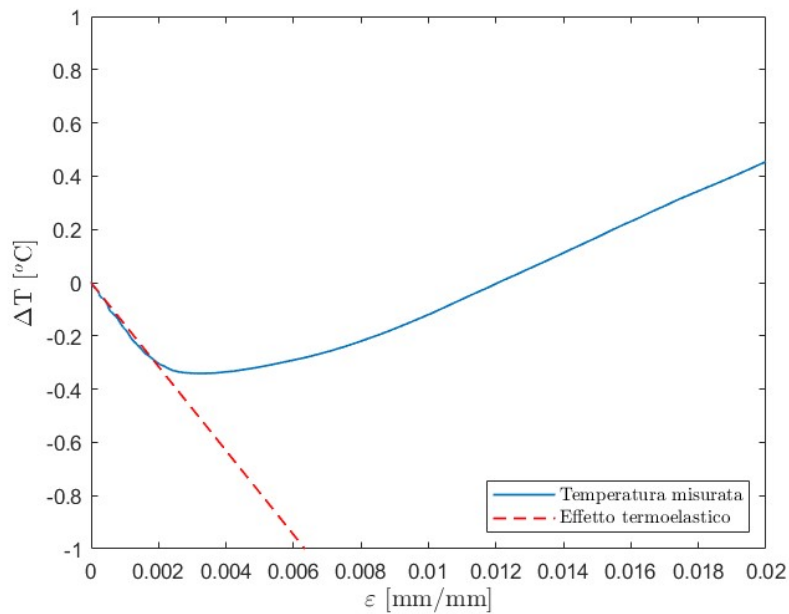


Figura 3.16: Confronto tra andamento reale e teorico della temperatura

In figura 3.17 viene mostrata la quasi totale corrispondenza tra punto di minimo della temperatura e il punto di snervamento. È possibile calcolare il punto di snervamento utilizzando l'ascissa  $\epsilon^*$ , quindi  $\sigma_y = \sigma(\epsilon^*) = 376$  MPa.

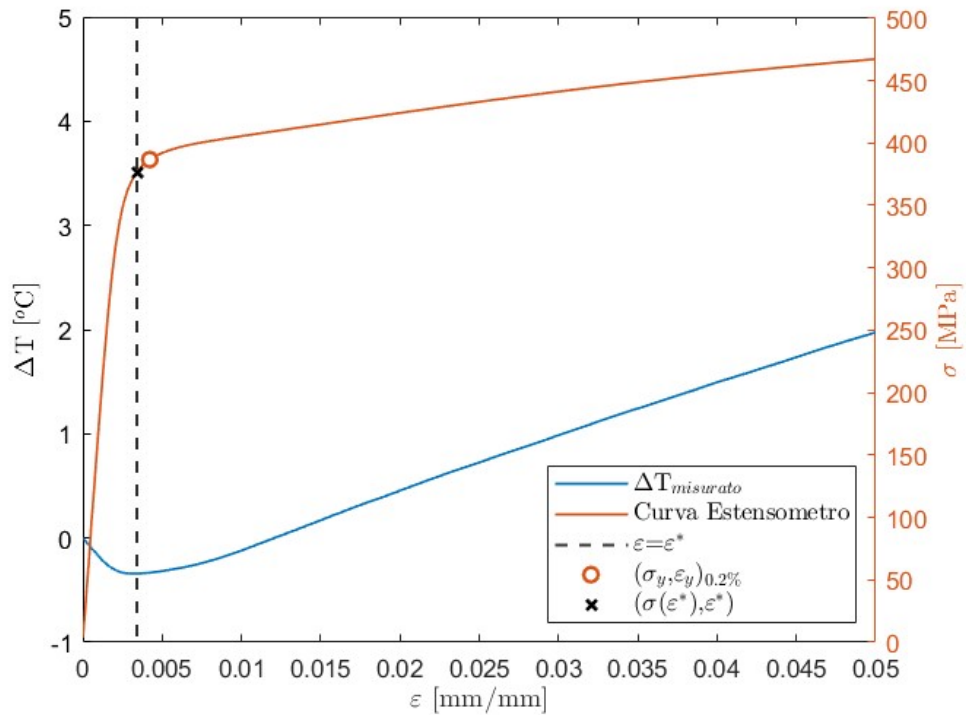


Figura 3.17: Corrispondenza tra punto di snervamento e punto di minima temperatura

Confrontando le immagini ottenute dall'analisi DIC e quelle della termocamera si è notato che i campi delle deformazioni e delle temperature sono sovrapponibili (figure 3.18, 3.19, 3.20). Questo è evidente nell'istante che precede la rottura del provino (figura 3.20), dove i due campi presentano un andamento a V.

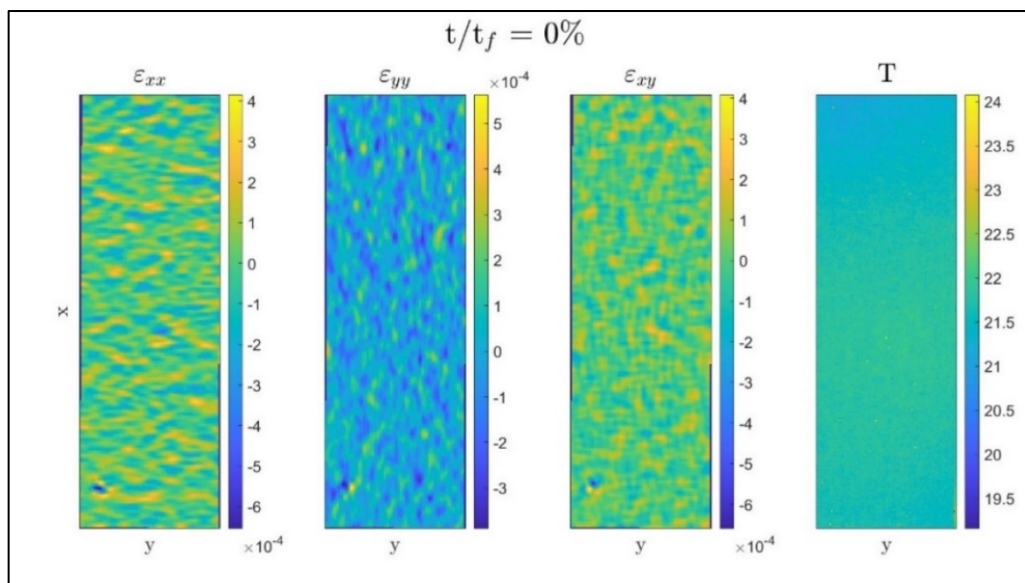


Figura 3.18: Confronto tra campi di deformazione e di temperatura a inizio prova



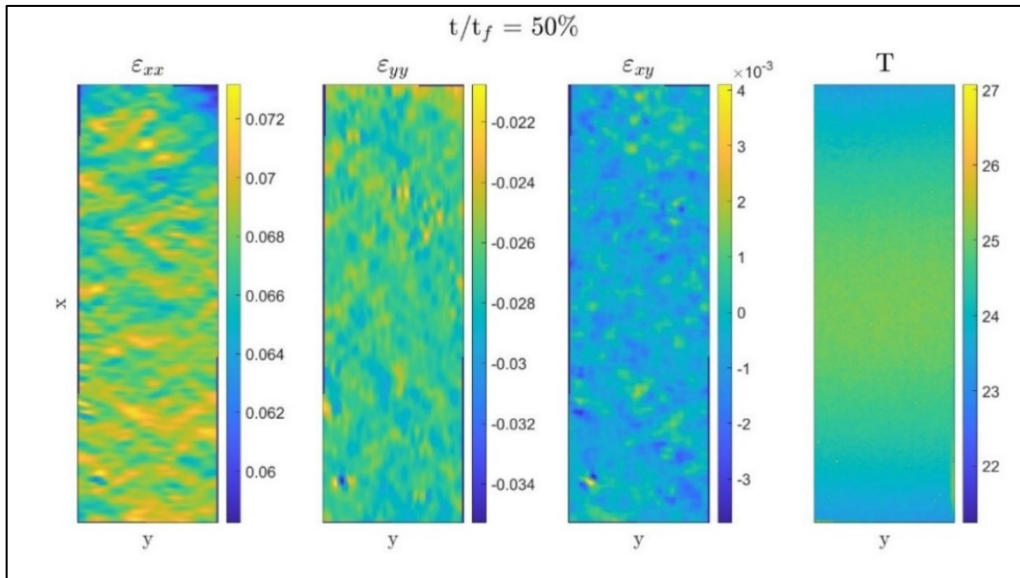


Figura 3.19: Confronto tra campi di deformazione e di temperatura a metà prova

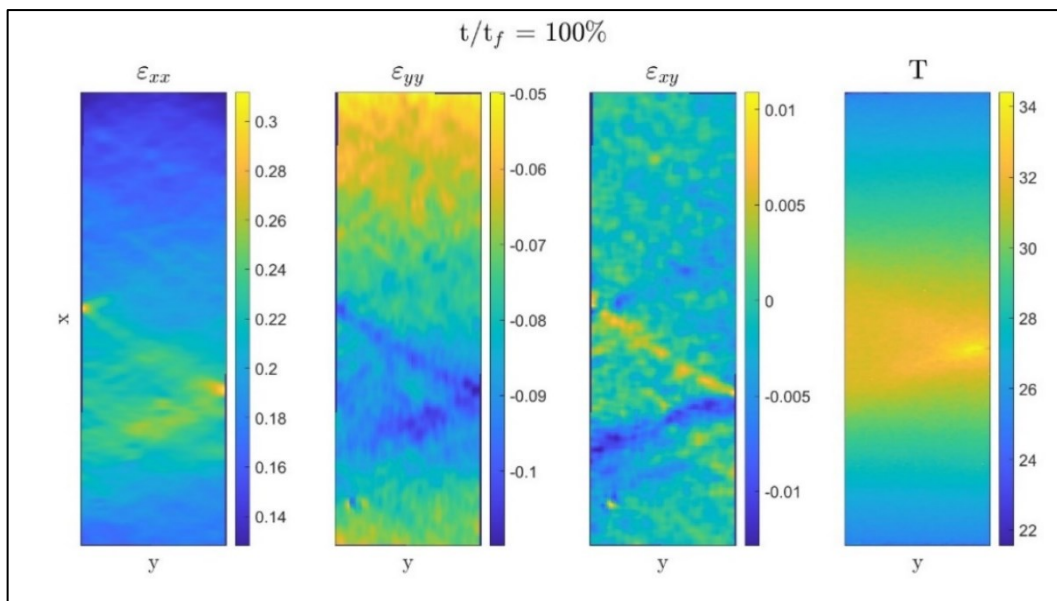


Figura 3.20: Confronto tra campi di deformazione e di temperatura a fine prova

## 3.2 Provini T0-6 e T0-8

I prossimi provini, T0-6 (figura 3.21) e T0-8 (figura 3.22), hanno una forma assialsimmetrica.



Figura 3.21: Provino T0-6



Figura 3.22: Provino T0-8

La procedura per l'elaborazione è la stessa discussa nel paragrafo precedente, si elencano di seguito i principali risultati.

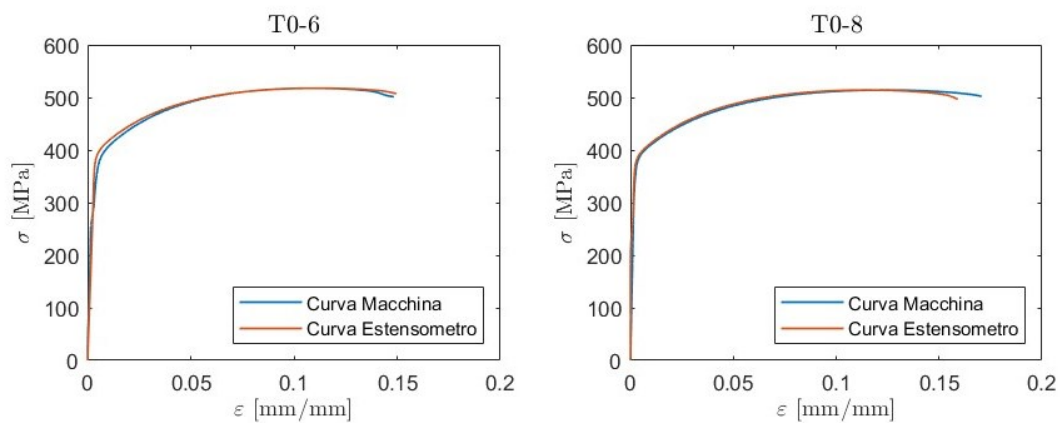


Figura 3.23: Curve ingegneristiche "Macchina" e "Estensometro" relative a T0-6 e T0-8

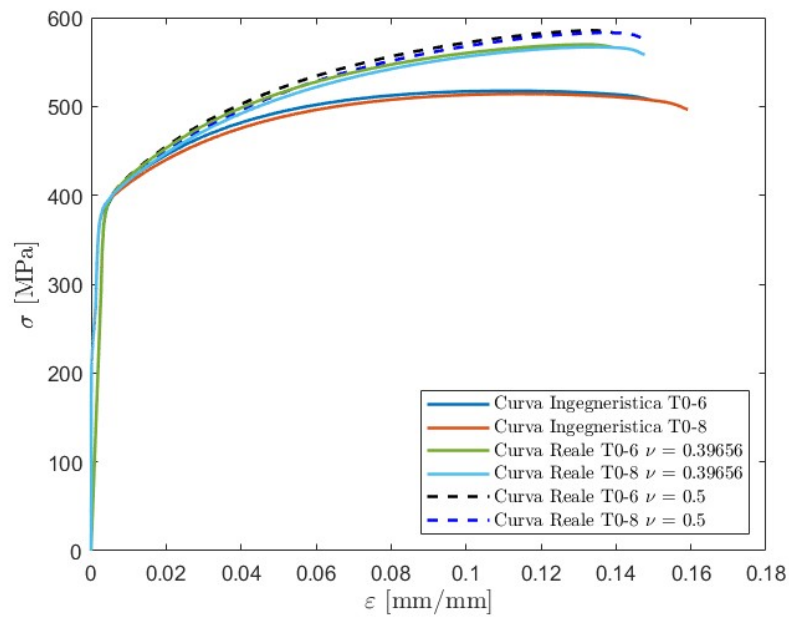


Figura 3.24: Confronto delle curve relative ai provini T0

In figura 3.25 sono confrontate le varie curve ottenute dalle prove di trazione sui provini TRA, T0-6 e T0-8 e in tabella 3.4 si trovano i relativi valori dei punti caratteristici: si nota, nei provini cilindrici, una peggiore duttilità a favore di una maggiore resistenza del materiale.

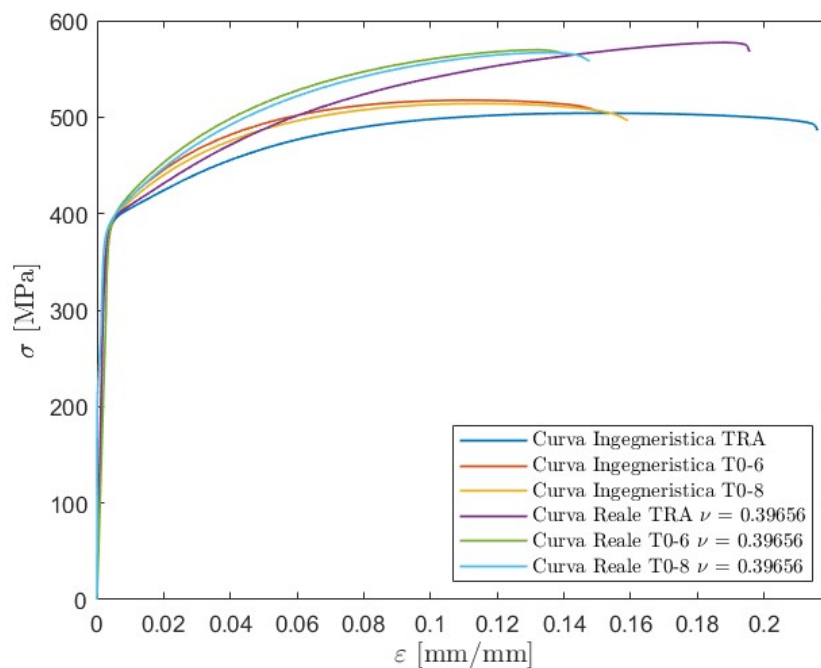


Figura 3.25: Curve relative ai provini TRA, T0-6 e T0-8

	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_{UTS}$ [MPa]	A% [%]
TRA	387	504	21.6
T0-6	385	518	15.0
T0-8	391	514	16.0

Tabella 3.4: Caratteristiche meccaniche di TRA, T0-6 e T0-8

### 3.3 Provino per la prova di compressione

Per la prova di compressione si utilizza il provino cilindrico C3 (figura 3.26).



Figura 3.26: Provino C3

La procedura per l'elaborazione dei dati è ancora la stessa, ma, in questo caso, la prova è stata terminata prima della rottura del provino quindi si è ottenuto il valore della tensione di snervamento, che vale 409 MPa, e i valori di tensione e deformazione di fine prova, che valgono rispettivamente 0.34 mm/mm, e non coincide con il valore dell'allungamento percentuale.

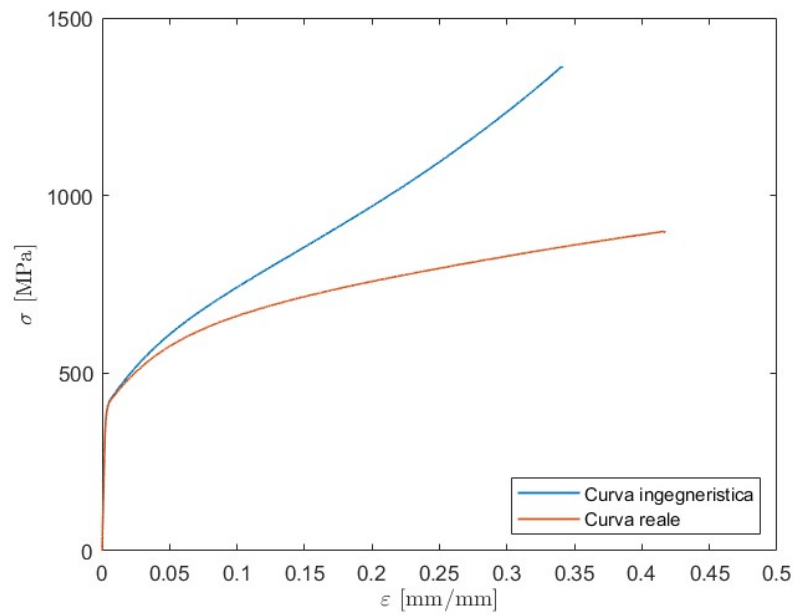


Figura 3.27: Curve relative alla prova di compressione

Il calcolo delle deformazioni reali per la compressione si differenzia perché occorre cambiare il segno delle deformazioni ingegneristiche all'interno della formula. In figura 3.28 vengono confrontate le curve ingegneristiche relative a trazione e compressione, e in figura 3.29 vengono confrontate quelle reali. Si osserva che la curva reale della compressione risulta più bassa di quella nominale, avvicinandosi alle curve di trazione.

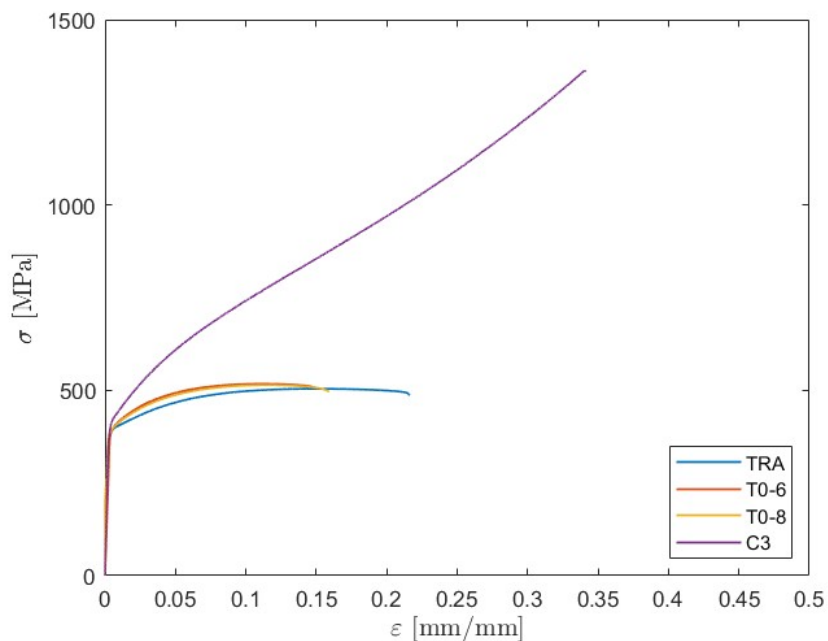


Figura 3.28: Curve ingegneristiche di trazione e compressione

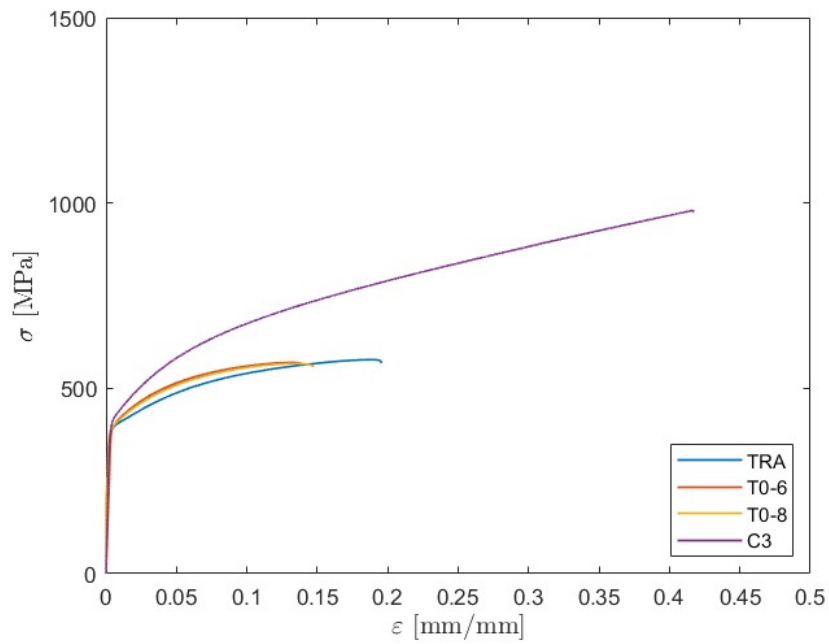


Figura 3.29: Curve reali di trazione e compressione per  $\nu = 0.39656$

È utile il piano delle tensioni principali per confrontare le tensioni di snervamento (figura 3.30).

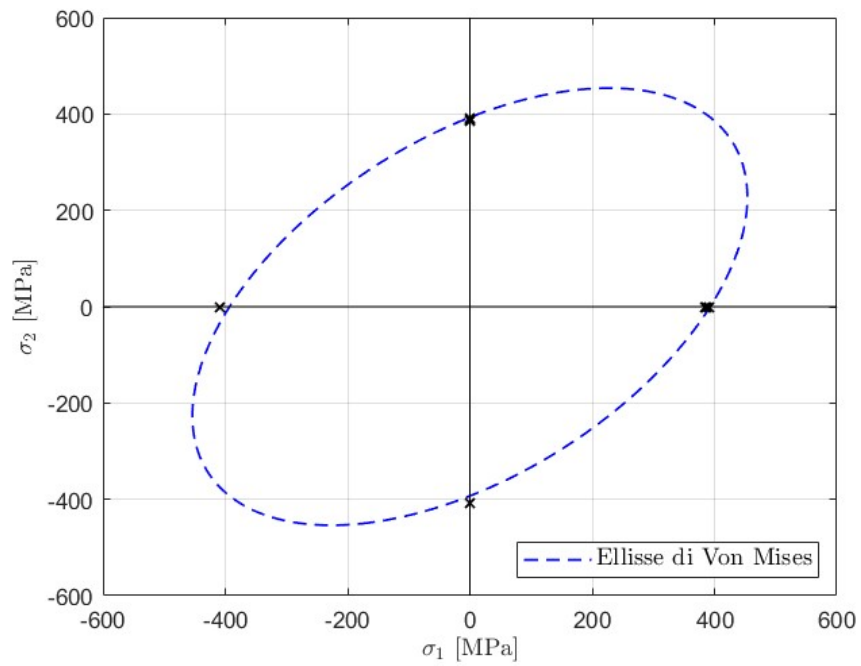


Figura 3.30: Piano delle tensioni principali

### 3.4 Provini D1 e D2

I provini dreamier, D1 (figura 3.31) e D2 (figura 3.32), hanno una forma tale da instaurare delle tensioni tangenziali  $\tau$  nel provino.

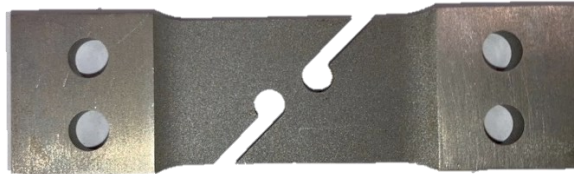


Figura 3.31: Provino D1



Figura 3.32: Provino D2

La differenza principale tra i due provini è rappresentata dalla distanza dei fori centrali dall'asse di simmetria del provino che è minore nel D2, dove i due fori si trovano quasi allineati. Questa distanza è importante poiché influenza lo stato di tensione nella parte centrale del provino.

#### 3.4.1 Tensioni tangenziali

Nei provini dreamier lo stato tensionale è caratterizzato sia da tensioni normali che da tensioni tangenziali e può essere descritto un tensore delle tensioni del tipo:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Nel proseguo, si assume che lo stato tensionale sia di puro taglio per poi discutere sulla validità di tale ipotesi. In tal caso, il tensore delle tensioni risulta

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & \tau & 0 \\ \tau & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

le cui tensioni principali valgono  $\sigma_{1,2} = \pm\tau$  e  $\sigma_3 = 0$ .

La tensione tangenziale è calcolata con la seguente relazione:

$$\tau = \frac{T}{A_T}$$

dove  $T$  è la forza di taglio che agisce sul provino che corrisponde con la forza esercitata dalla macchina, mentre  $A_T$  è la sezione del provino che risente della sollecitazione (mostrata in rosso in figura 3.33).

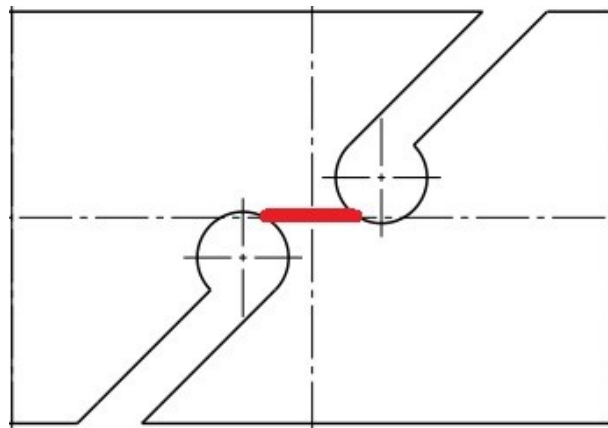


Figura 3.33: Profilo della sezione di taglio nei provini dreamier

### 3.4.2 Elaborazione dei dati

In questo caso non vengono calcolate le deformazioni, ma viene direttamente utilizzato lo spostamento  $x$  della traversa fornito dalla macchina. Il punto di snervamento deve essere trovato in un modo diverso da come fatto con gli altri provini poiché non si può usare il concetto di deformazione residua. Ricordando che esso divide la regione elastica da quella plastica è possibile riconoscerlo come quel punto in cui cambia l'inclinazione della curva; quindi, basterà usare il concetto di derivata per la ricerca delle sue coordinate.

Nel tratto elastico la relazione è lineare  $\tau = C \cdot x$  con  $C$  costante del materiale, nel tratto plastico la relazione non è più lineare e la pendenza della curva diminuisce. Pertanto, risulta

$$\tau(x) = \begin{cases} C \cdot x & \text{nel tratto elastico} \\ f(x) & \text{nel tratto plastico} \end{cases} \Rightarrow \frac{d\tau}{ds} = \tau'(x) = \begin{cases} C & \text{nel tratto elastico} \\ f'(x) & \text{nel tratto plastico} \end{cases}$$

con  $f'(x) < C \quad \forall x$ .



Basta trovare il valore di spostamento per cui si ha il cambio di inclinazione, cioè, basta trovare  $x_y$  tale per cui

$$\begin{cases} \tau'(x_y + \delta) \neq C \\ \tau'(x_y - \delta) = C \end{cases}$$

con  $\delta$  valore di spostamento sufficientemente piccolo. La tensione tangenziale di snervamento  $\tau_y$  è data da

$$\tau_y = \tau(x_y)$$

In figura 3.34 sono graficate le derivate dei provini, dove viene indicato il punto a cui corrisponde lo spostamento  $x_y$  scelto.

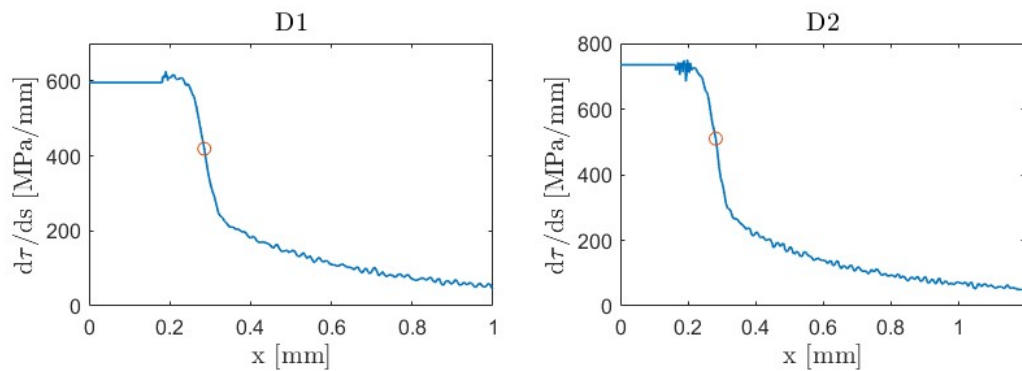


Figura 3.34: Derivate delle tensioni tangenziali rispetto allo spostamento

In figura 3.35 sono rappresentati i grafici  $\tau - x$  e in tabella 3.5 si indicano i valori dei punti caratteristici.

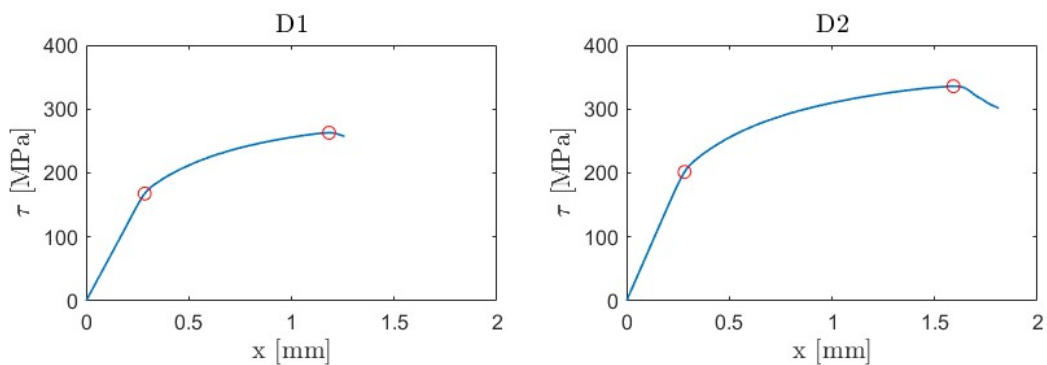


Figura 3.35: Grafici delle curve  $\tau - x$  dei provini dreamier

	$x_y$ [mm]	$\tau_y$ [MPa]	$\tau_{UTS}$ [MPa]
D1	0.285	168	263
D2	0.283	202	336

Tabella 3.5: Caratteristiche meccaniche di T1 e T2

### 3.4.3 Confronto con gli altri test

Per comodità, nella tabella 3.6 vengono riportati i valori delle tensioni di snervamento delle prove meccaniche.

	TRA	T0-6	T0-8	C3	D1	D2
$\sigma_y$ (o $\tau_y$ ) [MPa]	387	385	391	409	168	202

Tabella 3.6: Valori di snervamento ottenuti da TRA, T0-6, T0-8, C3, D1 e D2

In figura 3.36 si confrontano, nel piano delle tensioni principali, i valori in esame, mettendo come valore di riferimento per la trazione quello ottenuto tramite la media delle tensioni di snervamento dei provini TRA, T0-6 e T0-8, ossia 388 MPa.

Il punto relativo al provino D2 è posizionato vicino all'ellisse di Von Mises, quindi, l'ipotesi di taglio puro è accettabile, mentre per il D2 l'ipotesi è meno accettabile in quanto il punto è significativamente distante dall'ellisse.

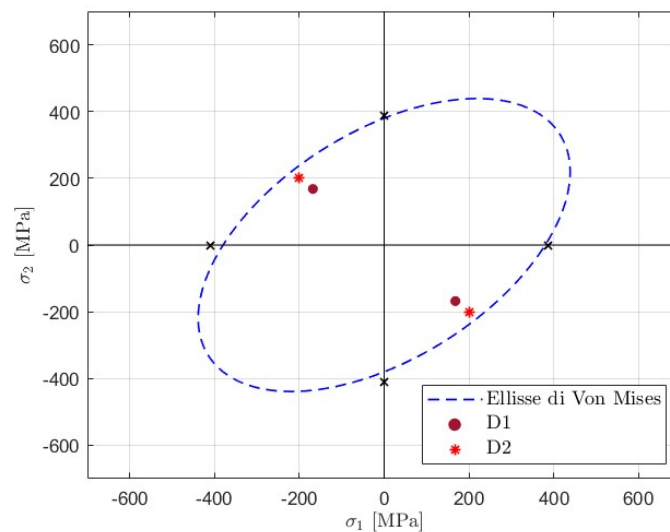


Figura 3.36: Piano delle tensioni principali con provini D1 e D2

## 3.5 Provini T1-8 e T2-6

I provini T1-8 (figura 3.37) e T2-6 (figura 3.38), quando sollecitati assialmente, presentano uno stato tensionale triassiale causato dalla loro sezione variabile lungo il tratto utile che genera una concentrazione delle tensioni.



Figura 3.37: Provino T1-8



Figura 3.38: Provino T2-6

### 3.5.1 Triassialità

Risulta utile definire un parametro che quantifichi, in qualche modo, la triassialità assunta. A tale scopo viene tipicamente utilizzato il fattore di triassialità.

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_e} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3\sigma_e}$$

dove  $\sigma_m$  è la tensione idrostatica e  $\sigma_e$  è la tensione equivalente (tipicamente viene utilizzata quella di Von Mises). Per una prova di compressione  $\eta = -0.33$  e per una prova di trazione con provino cilindrico (T0)  $\eta = 0.33$ .

Questo fattore costituisce il grado di tensione idrostatica rispetto alla tensione totale e rappresenta il grado di triassialità di uno stato tensionale: minore è il valore di  $\eta$ , maggiore è la parte deviatorica della tensione rispetto a quella totale.

Gli stati tensionali triassiali causano la riduzione della duttilità del materiale, cioè all'aumentare di  $\eta$ , diminuisce il valore di  $A\%$ .

Il fattore di triassialità dipende dalla geometria e, per il provino T1-8 vale 0.35, mentre per il provino T2-6 vale 0.50.

### 3.5.2 Elaborazione dei dati

La sezione utilizzata per il calcolo della tensione è quella centrale il cui diametro vale 8 mm per T1-8 e vale 6 mm per T2-6.

L'elaborazione dei dati del test è eseguita con la stessa metodologia usata per i provini TRA, T0-6 e T0-8. Si riportano di seguito i principali risultati.

	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_{UTS}$ [MPa]	$A\%$ [%]
T1-8	417	525	6.0
T2-6	468	555	4.5

Tabella 3.7: Caratteristiche meccaniche di T1-8 e T2-6

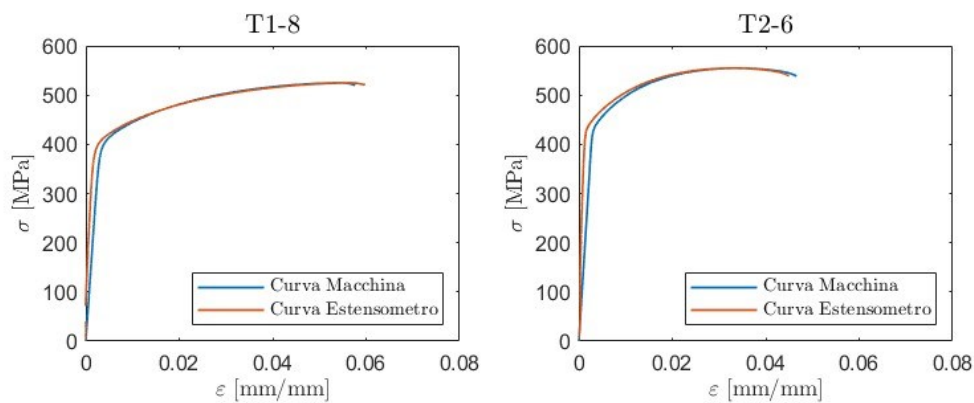


Figura 3.39: Curve ingegneristiche "Macchina" e "Estensometro" relative a T1-8 e T2-6

### 3.5.3 Confronto con gli altri test

In figura 3.40 vengono confrontate le curve ingegneristiche ottenute dalle prove eseguite sui provini T2-6, T1-8, T0-8 e C3. Si osserva facilmente che il fattore di triassialità influisce sul comportamento meccanico della ghisa in quanto ad un incremento del suo valore corrisponde l'infragilimento del materiale.

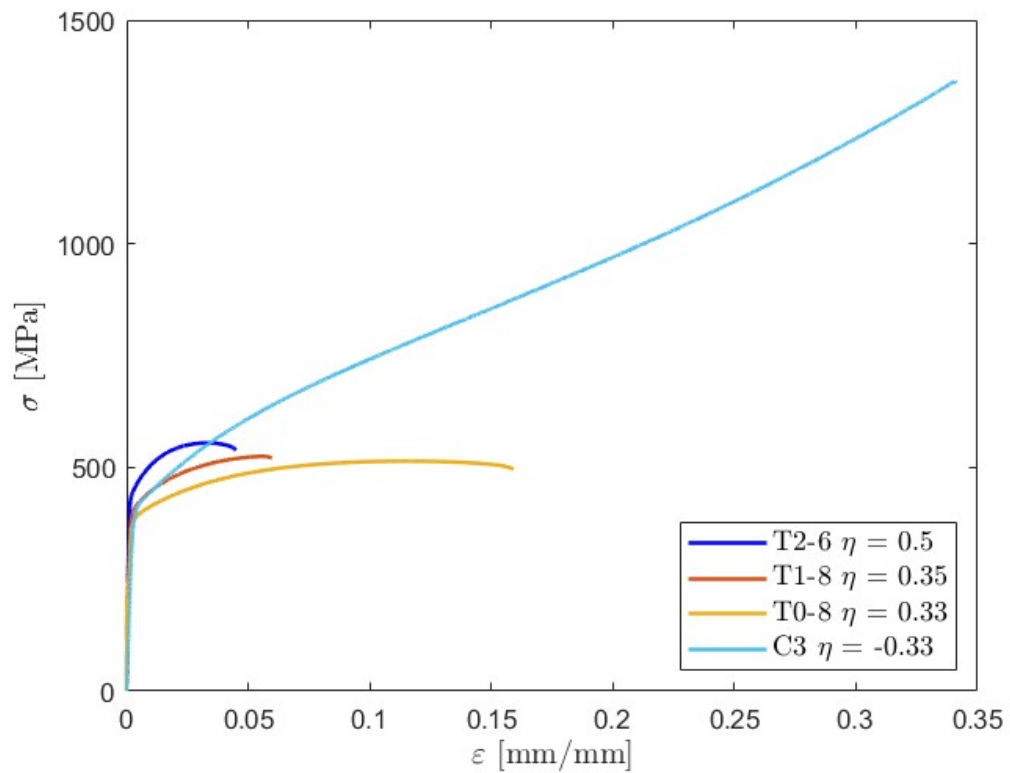


Figura 3.40: Curve ingegneristiche al variare del fattore di triassialità

## Capitolo 4 - Conclusioni

Per i provini dreamier, le prove di trazione sono state simulate con strumenti di calcolo numerico ad elementi finiti che hanno confutato l'ipotesi di taglio puro: lo stato tensionale è descritto dalla (3.1) in cui le tensioni  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  sono equiparabili, mentre le tensioni agenti lungo la direzione z, ossia  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xz}$  e  $\tau_{yz}$ , possono essere trascurate. In particolare, per D1 si è ottenuto il tensore

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 281 & 137 & 0 \\ 137 & -88 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ MPa}$$

le cui tensioni principali valgono  $\sigma_1 = 318$  MPa,  $\sigma_2 = 0$  e  $\sigma_3 = -168$  MPa e, nel piano delle tensioni principali, il punto si riposiziona come in figura 4.1.

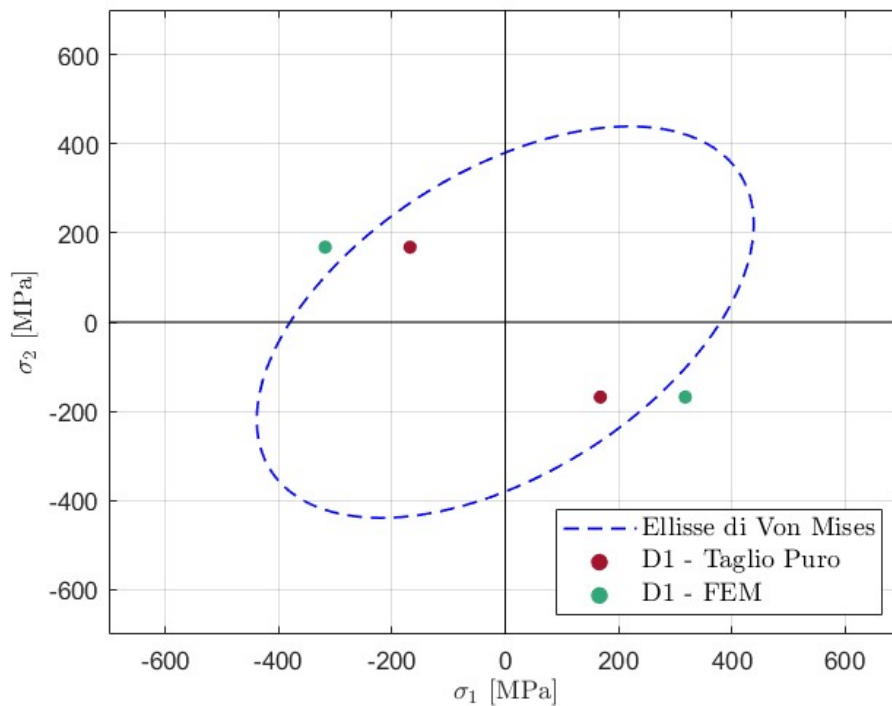


Figura 4.1: Analisi FEM di D1 nel piano delle tensioni principali

Per avere un paragone reale potrebbe essere utile eseguire delle prove di torsione in cui lo stato di tensione è realmente di puro taglio e confrontare i risultati.

I risultati delle prove meccaniche mostrano che il materiale presenta un comportamento asimmetrico, cioè, possiede una maggiore resistenza a compressione.

Le caratteristiche meccaniche della SSFDI sono migliori della gran parte degli acciai strutturali ad uso comune e paragonabili a quelle di alcuni acciai al carbonio. Questa ghisa potrebbe sostituire gran parte degli acciai permettendo di avere risparmi economici anche importanti.

## Bibliografia

---

- [1] W. Nicodemi, «Le ghise,» in *Acciai e leghe non ferrose*, Milano, Zanichelli, 2000, pp. 184-219.
- [2] S. Barella e A. Gruttadauria, «Le ghise,» in *Metallurgia e materiali non metallici. Teoria ed esercizi svolti*, Bologna, Esculapio, 2016, pp. 215-221.
- [3] P. Ferro, D. A. Cendón, F. Berto, A. Fabrizi e K. Tang, «Mechanical Properties of 3.45 wt.% Si Solution Strengthened Ferritic Ductile Iron at Room and Low Temperatures: Microstructure and Tensile Properties,» *Strength of Materials*, vol. 55, pp. 775-880, 2023.
- [4] D. Franzen, P. Weiß, B. Pustal e A. Bührig-Polaczek, «Modification of Silicon Microsegregation in Solid-Solution-Strengthened Ductile Iron by Alloying with Aluminum,» *International Journal of Metalcasting*, vol. 14, pp. 1105-1114, 2020.
- [5] S. Barella e A. Gruttadauria, «La prova di trazione,» in *Metallurgia e materiali non metallici. Teoria ed esercizi svolti*, Bologna, Esculapio, 2016, pp. 38-48.
- [6] C. Vergari, P. Pourcelot, L. Holden, B. Ravary-Plumioen, G. Gerard, P. Laugier, D. Mitton e N. Crevier-Denoix, «True stress and Poisson's ratio of tendons during loading,» *Journal of biomechanics*, vol. 44, pp. 719-724, 2011.
- [7] S. Kalpakjian e S. R. Schmid, «Compressione,» in *Tecnologia meccanica*, Milano-Torino, Pearson, 2021, pp. 43-46.
- [8] G. Pitarresi e E. Patterson, «A review of the general theory of thermoelastic effect,» *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 38, pp. 405-417, 2003.
- [9] D. Lecompte, H. Sol, J. Vantomme e A. Habraken, «Analysis of speckle patterns for deformation measurements by DIC,» *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 6341, 2006.