

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E SCIENZE
MATEMATICHE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

CARATTERIZZAZIONE
TERMO-MECCANICA DI
GHISE FERRITICHE
RAFFORZATE AL SILICIO

THERMO-MECHANICAL CHARACTERIZATION OF
SILICON-REINFORCED FERRITIC CAST IRONS

Relatore

Prof. Marco SASSO

Correlatore

Dott. Mattia UTZERI

Candidato

Lorenzo MIRA

Anno Accademico 2023 - 2024

Alla mia Famiglia

Indice

Sommario	1
Abstract	2
1 Introduzione	3
1.1 Ghise	3
1.1.1 Carbonio nelle ghise	4
1.1.2 Elementi alliganti	5
1.1.3 Tipologie di ghise	5
1.1.4 SSFDI	5
1.2 Prove Meccaniche	6
1.2.1 Prova di trazione	6
1.2.2 Prova di compressione	18
1.2.3 Stato tensionale triassiale	18
1.2.4 Caratterizzazione termo-meccanica	20
1.2.5 Digital Image Correlation	23
1.3 Analisi agli elementi finiti	26
1.3.1 Analisi agli elementi finiti con sistemi CAE	26
1.3.2 FEM: Finite Element Method	27
1.3.3 Algoritmo esplicito	28
2 Analisi Sperimentale	32
2.1 Attrezzaggio	32
2.2 Risultati sperimentali T_{amb}	34
2.2.1 Provino DB	34
2.2.2 Provini T0-6 e T0-8	43
2.2.3 Provino C3	45
2.2.4 Provini D1 e D2	46
2.2.5 Provini T1-8 e T2-6	48
2.3 Risultati sperimentali prove in temperatura	52
3 Analisi Numerica	54
3.1 Ipotesi del modello numerico	54
3.2 Unità di misura del modello	55
3.3 Sviluppo del modello	55

3.4	Danneggiamento: USDFLD	57
3.5	Risultati simulazione	58
3.5.1	Validazione	58
3.5.2	Estrazione dati	60
4	Conclusioni	68

Elenco delle figure

1.1	Diagramma Fe-C. Immagine tratta da Wikipedia.	3
1.2	Forme della grafite nella ghisa. Immagine tratta da AQC SRL. . .	4
1.3	Macchina di Prova	7
1.4	Tratto utile e tratto calibrato di un provino. Immagine tratta da Sito Web.	8
1.5	Disegno tecnico del provino DB	8
1.6	Disegno tecnico del provino T0-6	8
1.7	Disegno tecnico del provino T0-8	9
1.8	Disegno tecnico del provino C3	9
1.9	Disegno tecnico del provino D1	9
1.10	Disegno tecnico del provino D2	10
1.11	Disegno tecnico del provino T1-8	10
1.12	Disegno tecnico del provino T2-6	10
1.13	Curva $\sigma - \varepsilon$. Immagine tratta da Blog di meccanica.	11
1.14	Tipologie di snervamento	13
1.15	Confronto tra curva ingegneristica e curva reale	15
1.16	Curve reali per diversi valori di ν	17
1.17	Barreling e instabilità elastica. Immagine tratta da ResearchGate. .	18
1.18	Visualizzazione delle tensioni agenti sulle facce di un cubetto ele- mentare. Immagine tratta da Blog.	19
1.19	Variazione di temperatura durante la deformazione in una prova di trazione	22
1.20	Confronto del setup tra analisi 2D e 3D. Immagine tratta da slideplayer.	23
1.21	Sistemi ottici ordinari e telecentrici. Immagine tratta da edmun- doptics.	24
1.22	Speckle pattern	25
1.23	Principio di funzionamento della DIC. Immagine tratta da digita- limagecorrelation.	25
1.24	Schema di calcolo della risoluzione esplicita	30
2.1	Setup delle prove T_{amb}	32
2.2	Setup delle prove in temperatura	33
2.3	Pirometro	34
2.4	Provino DB	34

2.5	Curve $\sigma - \epsilon$ fornite dalla Zwick	35
2.6	Confronto curva ingegneristica Zwick e curva ingegneristica corretta	36
2.7	Modello di molle in serie	37
2.8	Curva corretta con modulo di Young	37
2.9	Curva corretta $\sigma - \epsilon$ provino DB	38
2.10	"Estensometro"	38
2.11	Mesh Dic2D provino DB	39
2.12	Grafico verifica delay time	40
2.13	Curva reale macchina e DIC	40
2.14	Coefficiente di Poisson	41
2.15	Temperatura misurata durante la prova	42
2.16	Confronto tra andamento reale e teorico della temperatura	42
2.17	Corrispondenza tra punto di snervamento e punto di minima tem- peratura	43
2.18	Confronto tra campi di deformazione e di temperatura a fine prova	43
2.19	Provino T0-6	44
2.20	Provino T0-8	44
2.21	Confronto delle curve relative ai provini T0	44
2.22	Curve relative ai provini TRA, T0-6 e T0-8	45
2.23	Provino C3	45
2.24	Curve relative alla prova di compressione	46
2.25	Provino D1	46
2.26	Provino D2	46
2.27	Grafici delle curve $\tau - x$ dei provini dreamier	48
2.28	Provino T1-8	48
2.29	Provino T2-6	48
2.30	Schema dello stato tensionale triassiale	49
2.31	Curve ingegneristiche e reali relative a T1-8 e T2-6	50
2.32	Curve ingegneristiche al variare del fattore di triassialità	50
2.33	Piano delle tensioni principali	51
2.34	Comportamento a frattura SSF-DI	51
2.35	Curve ingegneristiche provino DB	52
2.36	Rottura provini DB	53
3.1	Tipica risposta sforzo-deformazione della ghisa grigia sotto tensio- ne monoassiale e compressione monoassiale. Immagine tratta da ABAQUS	56
3.2	Curve plastiche reali: tensione e compressione	56
3.3	User subroutine in Fortran	57
3.4	Confronto curve reali sperimentali e simulate: trazione e compres- sione	58
3.5	Confronto curve reali sperimentali e simulate: taglio puro	59
3.6	Confronto mappa di deformazione, immagine termografica e simu- lazione numerica	59
3.7	Curva reale Abaqus: provino DB	60

3.8	Mappa di deformazione simulazione numerica: provino DB	61
3.9	Curva reale Abaqus: provino C3	61
3.10	Mappa di deformazione simulazione numerica: provino C3	62
3.11	Curva reale Abaqus: provino D1	62
3.12	Mappa di deformazione simulazione numerica: provino D1	63
3.13	Curva reale Abaqus: provino D2	64
3.14	Mappa di deformazione simulazione numerica: provino D2	65
3.15	Curva reale Abaqus: provino T1-8	65
3.16	Mappa di deformazione simulazione numerica: provino T1-8 . . .	66
3.17	Curva reale Abaqus: provino T2-6	66
3.18	Mappa di deformazione simulazione numerica: provino T2-6 . . .	67
4.1	Curve trazione compressione: acciaio vs SSFDI	68
4.2	Relazione tra bassa temperatura e alta temperatura. Immagine tratta da Sito Web	69
4.3	Superficie di Frattura. Immagine tratta da Articolo scientifico . .	70

Elenco delle tabelle

1.1	Valori di η per diversi stati di stress	20
2.1	Valori dei parametri fisici delle SSFDI	41
2.2	Caratteristiche meccaniche di TRA, T0-6 e T0-8	45
2.3	Caratteristiche meccaniche di D1 e D2	48
2.4	Caratteristiche meccaniche di T1-8 e T2-6	49
3.1	Unità di misura delle grandezze fisiche	55
3.2	Proprietà del materiale: densità, modulo elastico, coefficiente di Poisson elastico e plastico.	57
4.1	Proprietà meccaniche di acciai con $0.3 < C\% < 0.5$	69

Sommario

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, forza e tempo di prova. Saranno utilizzate una fotocamera e una termocamera per l'acquisizione rispettivamente di immagini e temperatura del provino durante il test e verrà utilizzato un induttore per effettuare alcune di queste prove in temperatura. Per l'elaborazione dei dati si utilizzeranno dei codici sviluppati in PYTHON, mentre le immagini saranno elaborate in Dic2D, un programma dedicato alla misura senza contatto delle deformazioni. Successivamente i dati raccolti verranno utilizzati per effettuare una modellazione FEM tramite il software ABAQUS. L'elaborato è articolato in quattro capitoli: nel primo verranno presentate le ghise e in particolare le SSFDI, verranno introdotte le prove meccaniche effettuate e l'Analisi agli Elementi Finiti ; il secondo capitolo sarà dedicato all'Analisi Sperimentale quindi tratterà degli strumenti adatti per la buona riuscita delle prove meccaniche e dei risultati sperimentali delle prove a temperatura ambiente e ad elevate temperature; il terzo capitolo sarà dedicato all'Analisi Numerica e quindi al modello numerico ottenuto; infine, l'ultimo capitolo sarà riservato alle conclusioni, in cui verranno riassunti i principali risultati.

Abstract

In this thesis work, the characterisation of a recent cast iron with interesting properties from an engineering point of view, SSFDI, is proposed. Mechanical tests will be carried out on specimens of different geometry, during which displacement, force and test time data will be acquired. A camera and thermal imaging camera will be used to acquire images and temperature of the test specimen during the test, respectively, and an inductor will be used to perform some of these temperature tests. For data processing, codes developed in PYTHON will be used, while the images will be processed in Dic2D, a programme dedicated to non-contact deformation measurement. Subsequently, the collected data will be used to carry out FEM modelling using ABAQUS software. The paper is divided into four chapters: in the first one, cast irons and in particular SSFDI will be presented, the mechanical tests carried out and Finite Element Analysis will be introduced; the second chapter will be devoted to Experimental Analysis and will therefore deal with the instruments suitable for successful mechanical tests and the experimental results of the tests at room temperature and at high temperatures; the third chapter will be devoted to Numerical Analysis and therefore to the numerical model obtained; finally, the last chapter will be reserved for the conclusions, in which the main results will be summarised.

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Ghise

La ghisa è una lega Fe-C ad alto contenuto di carbonio (generalmente superiore al 2,1%). Il diagramma Fe-C (figura 1.1) mostra come un aumento del contenuto di carbonio determini l'abbassamento della temperatura di fusione fino al punto eutettico, rendendo la ghisa lega da colata.

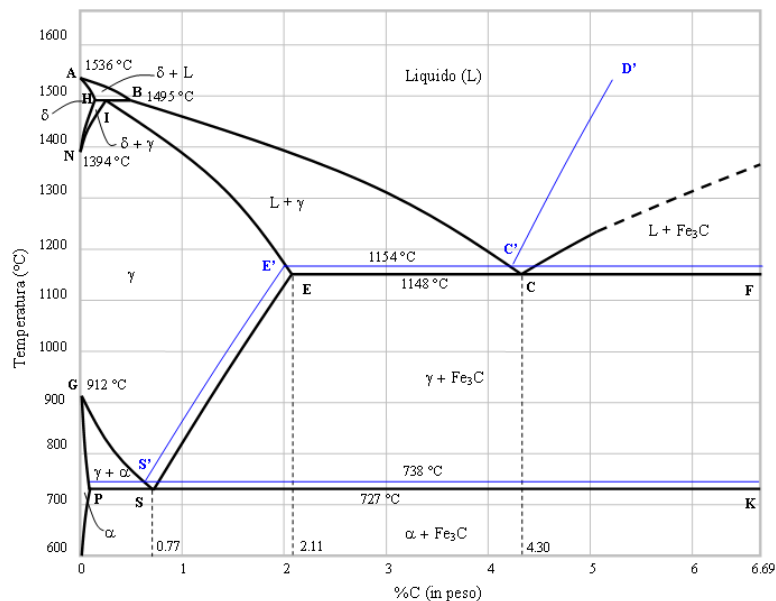


Figura 1.1: Diagramma Fe-C. Immagine tratta da Wikipedia.

Sono note non solo per la loro colabilità, ma anche per la facilità con cui possono essere lavorate con macchine utensili, grazie alla presenza di grafite nella loro matrice, che funge da lubrificante. Inoltre, presentano buone proprietà di conduzione termica, sono eccellenti smorzatori di vibrazioni e, in generale, risultano

essere economiche. Tuttavia, il principale svantaggio è la loro elevata fragilità, che limita le possibilità di lavorazione per deformazione plastica.

1.1.1 Carbonio nelle ghise

Il carbonio presente nelle ghise può manifestarsi come cementite o grafite, influenzando in modo significativo le proprietà meccaniche del materiale. La formazione di una fase piuttosto che dell'altra è influenzata dalle leggi di raffreddamento (una bassa velocità di raffreddamento favorisce la formazione di grafite) e dalla composizione chimica (elementi come Si, Al, Ni e Cu hanno un effetto che promuove la grafitizzazione).

La cementite non è una fase stabile e tende a decomporsi in ferro e grafite; la velocità di questa decomposizione aumenta con l'aumento della temperatura. A temperatura ambiente, la reazione avviene così lentamente da non avere effetti significativi nel breve periodo (come indicato nel diagramma Fe-C metastabile), mentre a temperature più elevate i fenomeni di diffusione aumentano, portando a una rapida decomposizione della cementite e alla formazione di grafite (come mostrato nel diagramma Fe-C stabile). È importante notare che avere ghise esclusivamente nella forma stabile o in quella metastabile è un evento raro; di solito, il carbonio si presenta in entrambe le fasi con concentrazioni variabili.

La grafite

La grafite può essere suddivisa in base a forma, dimensione e distribuzione. La normativa fornisce supporto nel riconoscere la classe di appartenenza della grafite tramite immagini di riferimento (figura 1.2).

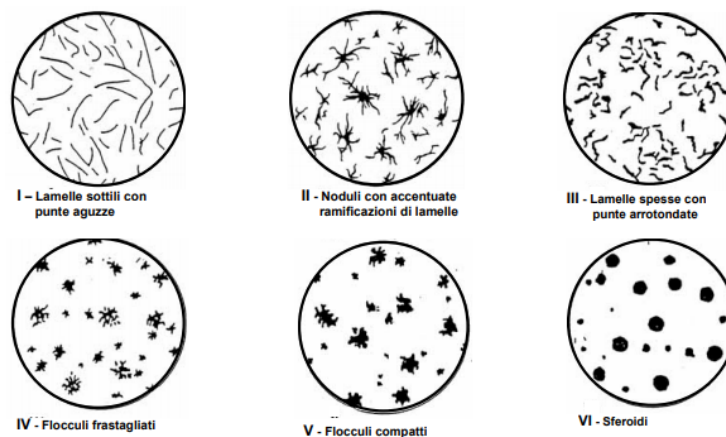


Figura 1.2: Forme della grafite nella ghisa. Immagine tratta da AQC SRL.

Le lamelle di grafite interrompono la continuità della matrice metallica, compromettendo le proprietà meccaniche della ghisa, poiché favoriscono l'apertura e la diffusione di micro-cricche, diminuendo così la duttilità e la resistenza meccanica del materiale. Al contrario, la forma sferoidale, grazie a una geometria che, a

parità di volume, presenta una superficie ridotta, attenua notevolmente questo effetto.

1.1.2 Elementi alliganti

Le proprietà della ghisa variano in base alla sua composizione chimica, poiché gli elementi di lega interagiscono in modi diversi e complessi, influenzando in modo positivo o negativo specifiche caratteristiche della lega. Ad esempio, il cromo promuove la formazione di carburi, il nichel ha un effetto grafitizzante, mentre il tellurio funge da stabilizzante per i carburi. È fondamentale considerare anche gli effetti del cerio, del magnesio e del silicio: i primi due favoriscono la sferoidizzazione della grafite, mentre il silicio è l'elemento con il maggiore potere grafitizzante [1].

1.1.3 Tipologie di ghise

Esistono quattro principali categorie di ghise: bianche, malleabili, grigie e duttili. Nelle ghise bianche, il carbonio si trova sotto forma di cementite, conferendo loro durezza e fragilità. La ghisa malleabile è una variante della ghisa bianca con un basso contenuto di silicio, sottoposta a trattamenti termici specifici per migliorarne le proprietà meccaniche. Le ghise grigie contengono carbonio in forma di grafite e sono leghe di ferro, carbonio e silicio, con un contenuto di carbonio compreso tra il 2% e il 4,5% e di silicio tra l'1% e il 3%. La loro resistenza meccanica è fortemente influenzata dalla forma e dalla distribuzione delle lamelle di grafite. Infine, la ghisa duttile ha una composizione chimica simile a quella delle ghise grigie, ma presenta grafite in forma sferoidale, motivo per cui è anche conosciuta come ghisa sferoidale [2].

1.1.4 SSFDI

Le SSF-DI (solution-strengthened ferritic ductile iron, ovvero ghise ferritiche duttili rinforzate al silicio) sono un tipo di ghisa duttile di recente sviluppo, caratterizzata da un contenuto di silicio superiore rispetto alla versione tradizionale, compreso tra il 3% e il 4,3%. Questa lega presenta proprietà meccaniche e tecnologiche notevoli: offre una lavorabilità e una colabilità simili a quelle delle ghise classiche, ma vanta una maggiore resistenza allo snervamento e una migliore duttilità. Grazie a queste caratteristiche, può essere paragonata a un acciaio con un contenuto medio di carbonio, mantenendo però i costi contenuti tipici delle ghise [3]. Un contenuto di silicio superiore al 4,3% può portare alla formazione di aggregati di ferrosilicio, che compromettono la struttura del materiale [4]. Il principale vantaggio delle SSF-DI è la loro lavorabilità per deformazione plastica, che consente di sfruttare i benefici di tali processi, come l'incremento della resistenza dovuto all'effetto di incrudimento. Le potenziali applicazioni delle SSF-DI sono molteplici e possono essere utilizzate in vari settori, tra cui l'industria manifatturiera, automobilistica e ferroviaria. Un esempio interessante

è l'uso di queste ghise nella produzione di dischi freno, dove la grafite presente nel materiale agisce come lubrificante, riducendo l'attrito e aumentando la durata del componente.

1.2 Prove Meccaniche

Le prove meccaniche ad oggi costituiscono il migliore 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 tra di loro troviamo le prove di trazione e di compressione. Inoltre è di fondamentale importanza avere strumenti adatti per l'elaborazione dei dati perciò in questo elaborato verranno utilizzati due software: PYTHON, dedicato alla programmazione ed al calcolo numerico, e Dic2Dunivpm, dedicato alla tecnica di Digital Image Correlation.

1.2.1 Prova di trazione

Il metodo di caratterizzazione dei materiali più comunemente impiegato è la prova di trazione, un test quasi-statico distruttivo in cui il campione è sottoposto a un carico assiale di trazione.

Macchina di prova

La macchina di prova (vedi figura 1.3) è costituita da una traversa fissa e una traversa mobile, la quale si muove lungo due montanti che fungono da guida. Include inoltre due afferraggi che immobilizzano il provino alle estremità durante il test, celle di carico, trasduttori per la misurazione dello spostamento e un sistema di acquisizione per la registrazione delle grandezze rilevate.



Figura 1.3: Macchina di Prova

Provini

I provini per la prova di trazione presentano geometria e dimensioni standardizzate, con uno sviluppo assiale. Le sezioni possono essere di forma rettangolare o circolare. E' possibile individuare nei provini tre parti principali: la testa (la sezione che viene afferrata), il tratto utile (la parte centrale del provino dove si effettuano le misurazioni delle deformazioni) e il tratto calibrato (la sezione opportunamente raccordata alla testa). La testa ha una sezione più ampia rispetto al resto del provino, in quanto deve sopportare le sollecitazioni derivanti dagli afferraggi. Nella figura 1.4 è illustrato in modo schematico un provino, dove L_T rappresenta la lunghezza totale del provino, L_O indica la lunghezza del tratto utile e L_C quella del tratto calibrato [2].

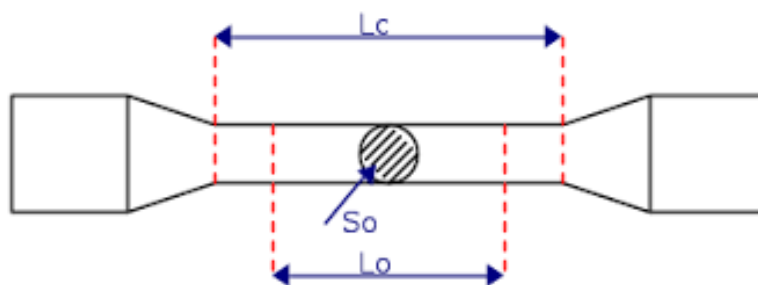


Figura 1.4: Tratto utile e tratto calibrato di un provino. Immagine tratta da Sito Web.

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

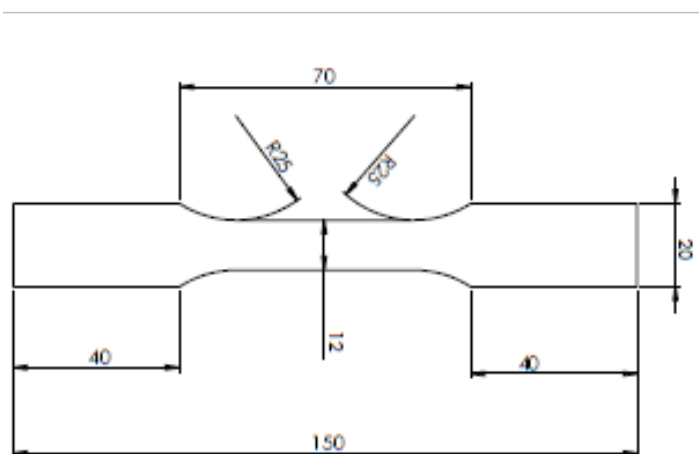


Figura 1.5: Disegno tecnico del provino DB

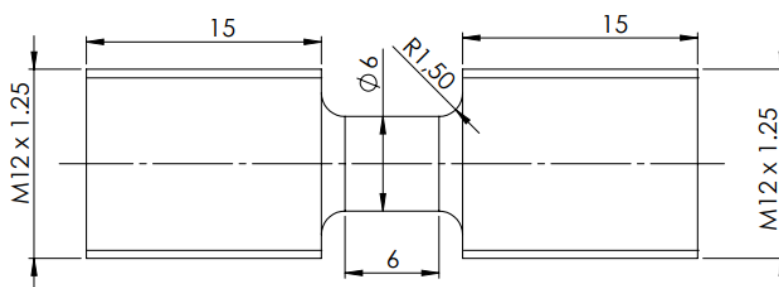


Figura 1.6: Disegno tecnico del provino T0-6

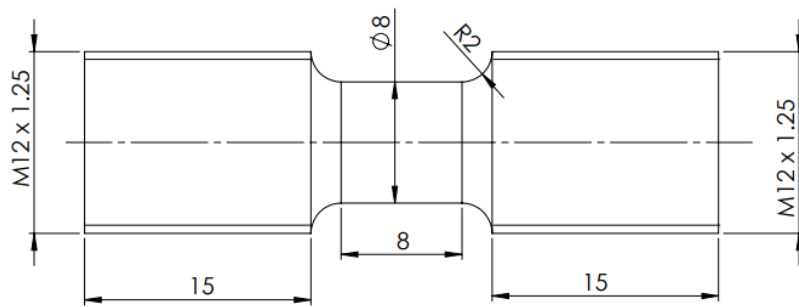


Figura 1.7: Disegno tecnico del provino T0-8

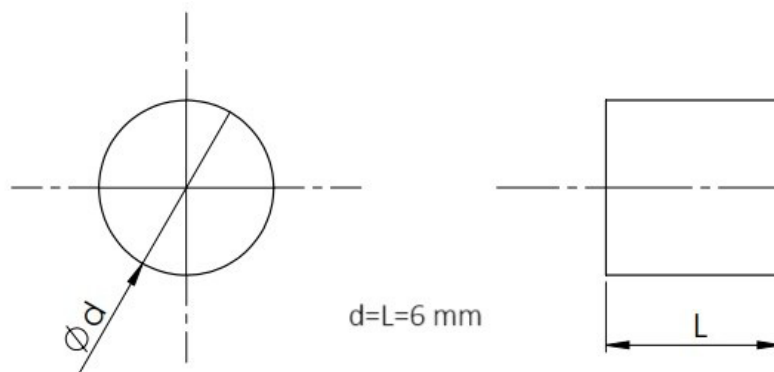


Figura 1.8: Disegno tecnico del provino C3

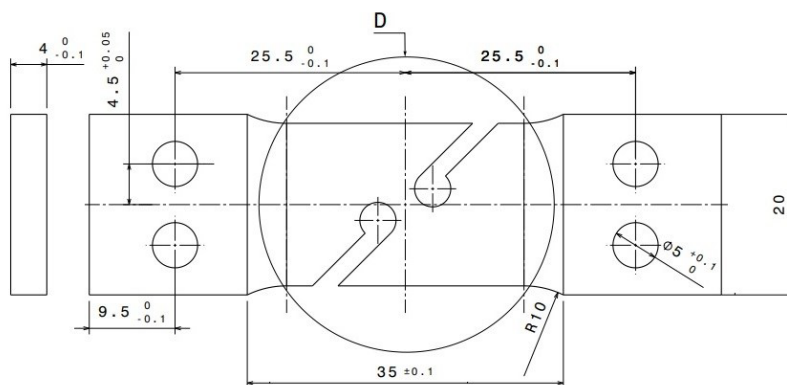


Figura 1.9: Disegno tecnico del provino D1

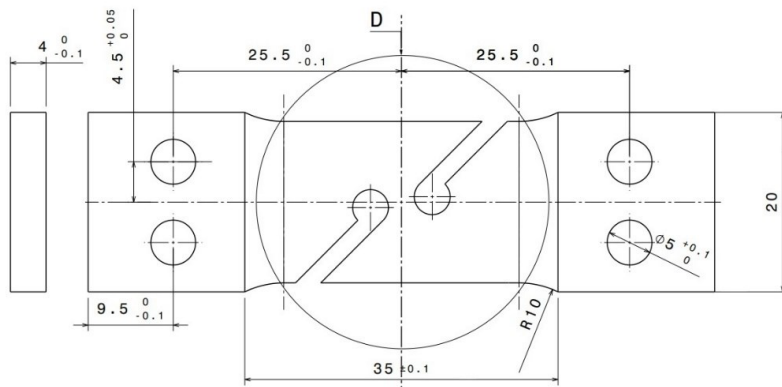


Figura 1.10: Disegno tecnico del provino D2

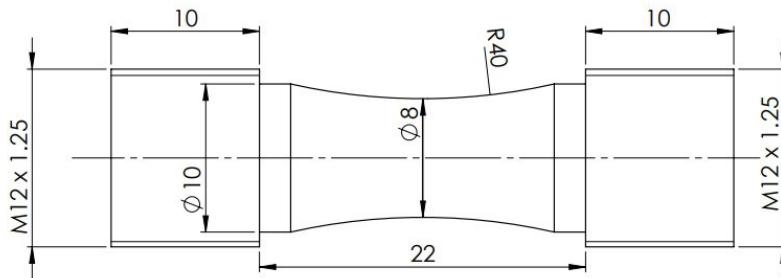


Figura 1.11: Disegno tecnico del provino T1-8

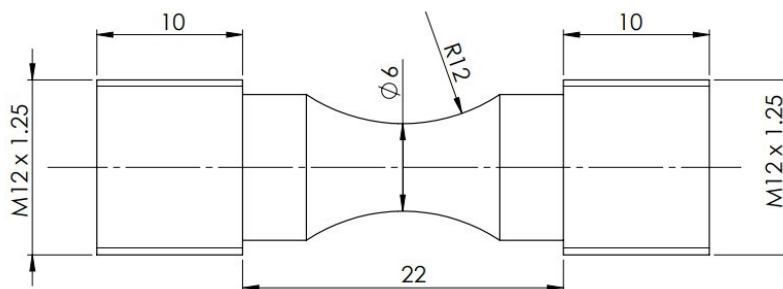


Figura 1.12: Disegno tecnico del provino T2-6

Curva $\sigma - \varepsilon$

Durante le prove, vengono misurate simultaneamente due grandezze: il carico F e l'allungamento ΔL , i cui risultati vengono rappresentati graficamente. Queste grandezze però sono influenzate dalla geometria del campione, poiché il carico di rottura tende ad aumentare con le dimensioni del provino. Pertanto, si rende necessario definire grandezze che siano indipendenti da tali fattori, al fine di ottenere una caratterizzazione accurata del materiale. A questo scopo, viene introdotta la deformazione ingegneristica

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1.1)$$

e la tensione ingegneristica

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1.2)$$

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

Rappresentando in un grafico queste due grandezze si ottiene curva $\sigma - \varepsilon$, figura 1.13, che mette in relazione la tensione e la deformazione.

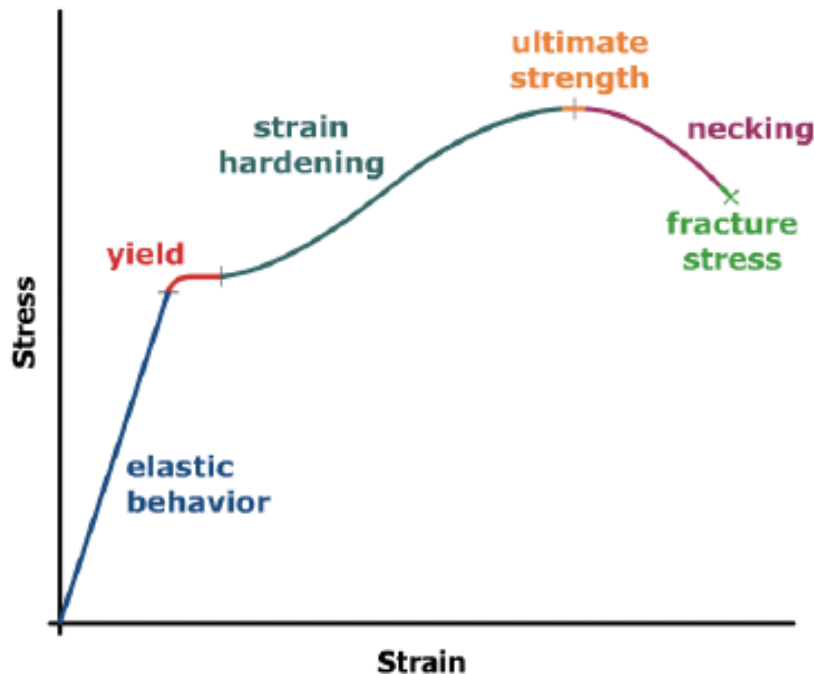


Figura 1.13: Curva $\sigma - \varepsilon$. Immagine tratta da Blog di meccanica.

In generale, si possono identificare tre fasi: la fase elastica, la fase plastica di incrudimento e la fase plastica di strizione. La fase elastica corrisponde al periodo

delle piccole deformazioni e costituisce la parte iniziale della curva. Durante questa fase, il materiale si comporta in modo elastico, il che significa che, una volta caricato e successivamente scaricato, ritorna alle sue condizioni originali (ritorno elastico). Come si può osservare è visibile un intervallo in cui il comportamento elastico è lineare e segue la legge di Hooke

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1.3)$$

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

La fase plastica di incrudimento segna il momento in cui si verificano significative deformazioni: queste diventano irreversibili e aumentano in modo molto più rapido. Il rapporto tra tensioni e deformazioni non è più lineare e per molti materiali, assume invece una forma esponenziale

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1.4)$$

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

L'ultima fase è quella plastica di strizione che nei materiali più duttili si può manifestare con delle deformazioni e tensioni concentrate in una specifica sezione del provino, che inizia a ridursi fino a raggiungere una dimensione tale da provocare la rottura del provino. Durante questa fase, lo stato tensionale non è più uniassiale, ma diventa triassiale. Il passaggio dalla fase elastica a quella plastica corrisponde al punto di snervamento del materiale, che non è sempre facilmente identificabile.

A questo proposito, si può fare riferimento alla figura 1.14, dove si possono distinguere tre casi. Nel primo, non si osserva alcun punto di snervamento e, di solito, si considera come punto di fine elasticità quello in cui la deformazione residua è pari allo 0,2%. Nel secondo caso, il punto di snervamento è chiaramente visibile, mentre nel terzo caso si verifica un vero e proprio periodo di snervamento.

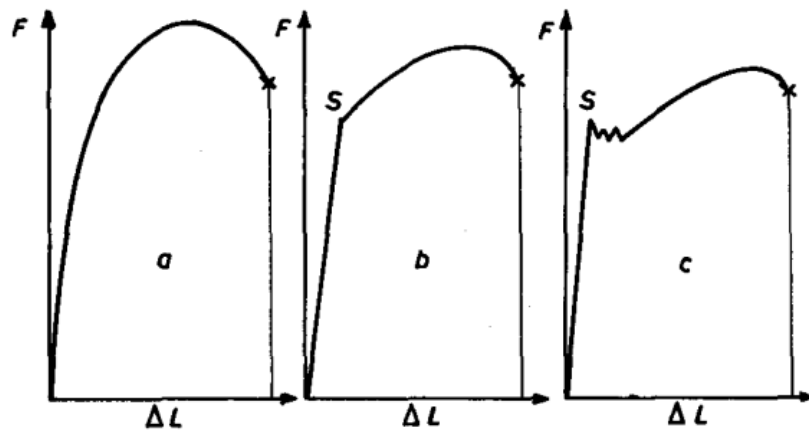


Figura 1.14: Tipologie di snervamento

La fase di incrudimento e quella di strizione sono distinte dal punto di massima tensione della curva, e la tensione corrispondente a questo punto è conosciuta come tensione di rottura. Un'altra informazione significativa che si può ottenere dalla curva $\sigma - \varepsilon$ è la duttilità: un materiale duttile è caratterizzato da una notevole capacità di deformazione, il che implica che la sua curva si estenderà di più rispetto a quella di un materiale fragile. La grandezza che fornisce una misura quantitativa della duttilità è l'allungamento percentuale $A\%$, definito come segue

$$A\% = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (1.5)$$

Effetto Poisson

Durante la prova di trazione si osserva un allungamento uniforme del provino accompagnato da una progressiva riduzione di sezione. Il coefficiente di Poisson ν quantifica questo effetto e viene definito come segue

$$\nu = -\frac{\delta\varepsilon_{\text{trasv}}}{\delta\varepsilon_{\text{ass}}} \quad (1.6)$$

dove $\delta\varepsilon_{\text{ass}}$ è la deformazione assiale, cioè quella lungo l'asse del provino, e $\delta\varepsilon_{\text{trasv}}$ 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

$$\nu = -\frac{\delta\varepsilon_y}{\delta\varepsilon_x} = -\frac{\delta\varepsilon_z}{\delta\varepsilon_x} \quad (1.7)$$

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

Per ragioni fisiche, il coefficiente di Poisson è compreso tra -1 e 0.5. Solitamente, i materiali presentano un coefficiente di Poisson positivo, e nel caso ideale in cui

$\nu=0.5$ si verifica la conservazione del volume (la gomma ha valori molto vicini a 0.5), mentre materiali con un coefficiente di Poisson negativo sono definiti auxetici. Ad esempio negli acciai, durante la fase elastica, il valore di ν è circa 0.3, mentre nella fase plastica si avvicina a 0.5; al contrario, le ghise tendono ad avere valori inferiori.

Diagramma reale nel caso di conservazione del volume

Nel caso di conservazione del volume si definiscono la deformazione reale $\tilde{\varepsilon}$ e la tensione reale $\tilde{\sigma}$ come segue

$$\tilde{\varepsilon} = \int_{L_0}^L \frac{dl}{l} = \ln \left(\frac{L}{L_0} \right) \quad (1.8)$$

$$\tilde{\sigma} = \frac{F}{A} \quad (1.9)$$

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

Si dimostra facilmente che le grandezze reali sono legate a quelle ingegneristiche. Infatti, dalle equazioni (1.1), (1.2), (1.8), (1.9) risulta:

$$\tilde{\varepsilon} = \ln \left(\frac{L}{L_0} \right) = \ln \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0} \right) = \ln(1 + \varepsilon) \quad (1.10)$$

$$\tilde{\sigma} = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{A_0}{A} = \sigma \frac{L}{L_0} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (1.11)$$

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

$$\tilde{\varepsilon} = \ln(1 + \varepsilon) \sim \varepsilon \quad \text{per } \varepsilon \rightarrow 0 \quad (1.12)$$

$$\tilde{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon) \sim \sigma \quad \text{per } \varepsilon \rightarrow 0 \quad (1.13)$$

Nella figura 1.15 sono riportate le due curve, ingegneristica e reale: si può osservare 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.

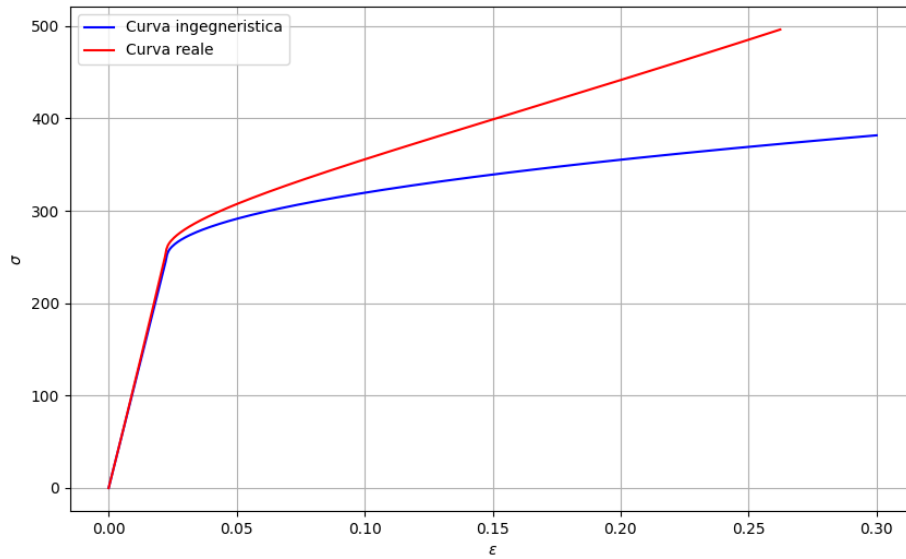


Figura 1.15: Confronto tra curva ingegneristica e curva reale

Diagramma reale nel caso di non conservazione del volume

Nel caso di non conservazione del volume la relazione tra $\tilde{\sigma}$ e ε subisce delle modifiche. Optando per un sistema di riferimento orientato con l'asse x allineato con l'asse del provino, dalla (1.7) si ottiene:

$$\nu = -\frac{dy/y}{dx/x} \implies -\nu \frac{dx}{x} = \frac{dy}{y} \implies -\nu \int_{x_0}^x \frac{dx}{x} = \int_{y_0}^y \frac{dy}{y} \implies -\nu \ln \frac{x}{x_0} = \ln \frac{y}{y_0} \quad (1.14)$$

Si ottiene

$$\nu = -\frac{\ln(1 + \varepsilon_y)}{\ln(1 + \varepsilon_x)} = -\frac{\tilde{\varepsilon}_y}{\tilde{\varepsilon}_x} \quad (1.15)$$

Analogamente

$$\nu = -\frac{\ln(1 + \varepsilon_z)}{\ln(1 + \varepsilon_x)} = -\frac{\tilde{\varepsilon}_z}{\tilde{\varepsilon}_x} \quad (1.16)$$

Per piccole deformazioni si ottiene

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \quad (1.17)$$

Dalle precedenti relazioni risulta

$$(1 + \varepsilon_y) = (1 + \varepsilon_x)^{-\nu} \quad (1.18)$$

$$(1 + \varepsilon_z) = (1 + \varepsilon_x)^{-\nu} \quad (1.19)$$

Inoltre, per la (1.8) vale

$$y = y_0 e^{\tilde{\varepsilon}_y} \quad (1.20)$$

$$z = z_0 e^{\tilde{\varepsilon}_z} \quad (1.21)$$

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

$$A_0 = ky_0z_0 \quad (1.22)$$

$$A = kyz \quad (1.23)$$

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

$$\frac{A - A_0}{A_0} = \frac{kyz - ky_0z_0}{ky_0z_0} = \frac{y_0z_0 e^{\tilde{\varepsilon}_y} e^{\tilde{\varepsilon}_z} - y_0z_0}{y_0z_0} = e^{\tilde{\varepsilon}_y} e^{\tilde{\varepsilon}_z} - 1 \quad (1.24)$$

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

$$\frac{A - A_0}{A_0} = (1 + \varepsilon_y)(1 + \varepsilon_z) - 1 \quad (1.25)$$

Sostituendo si ottiene

$$\frac{A}{A_0} = (1 + \varepsilon_x)^{-2\nu} \quad (1.26)$$

È possibile ridefinire la tensione reale [5] come segue

$$\tilde{\sigma} = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{A_0}{A} = \sigma(1 + \varepsilon_x)^{2\nu} \quad (1.27)$$

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

$$\begin{cases} (1 + \varepsilon_x)^{2\nu} & \text{se } 0 < \nu < 0.5 \\ \tilde{\sigma} = \sigma & \text{se } \nu = 0 \\ (1 + \varepsilon_x)^{2\nu} & \text{se } -1 < \nu < 0 \end{cases} \quad (1.28)$$

In figura (1.14) sono raffigurate le curve reali al variare di ν .

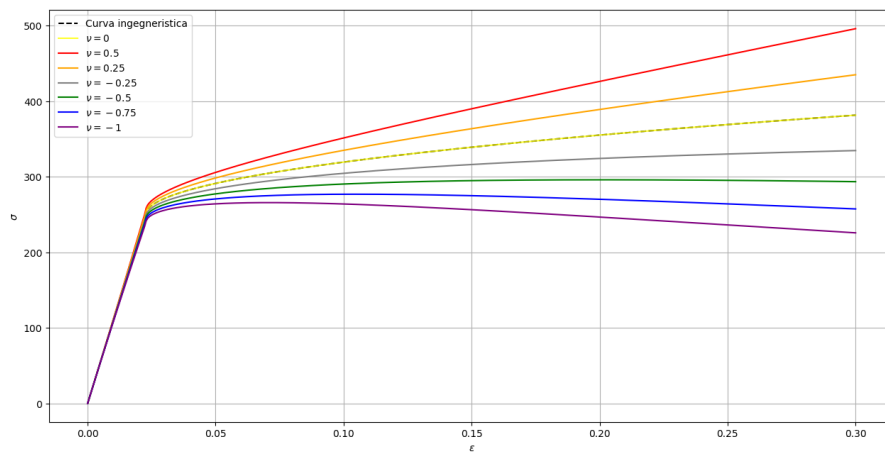


Figura 1.16: Curve reali per diversi valori di ν

1.2.2 Prova di compressione

La prova di compressione è un test quasi-statico distruttivo in cui un provino cilindrico viene sottoposto a un carico assiale. In questo tipo di prova si presentano due problematiche (vedi figura 1.16) che non si riscontrano nella prova di trazione. La prima è il fenomeno del barreling: il provino tende ad espandersi radialmente a causa dell'effetto Poisson, ma tale espansione è ostacolata dall'attrito tra le piastre e il provino, il quale assume così una caratteristica forma a barile, generando uno stato tensionale triassiale. La seconda problematica riguarda l'instabilità elastica: se il provino è troppo snello, potrebbe collassare prima di raggiungere il carico di rottura a causa di un'inflessione [6].

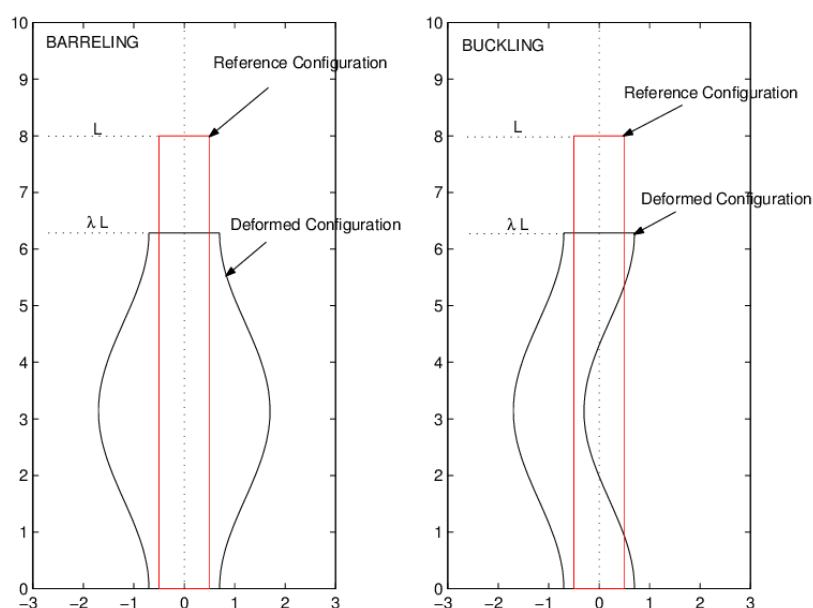


Figura 1.17: Barreling e instabilità elastica. Immagine tratta da ResearchGate.

1.2.3 Stato tensionale triassiale

Fino a questo momento, abbiamo esaminato il comportamento meccanico dei materiali sottoposti a una sollecitazione unicamente monoassiale tuttavia questa considerazione non è sempre valida. Ad esempio, nella prova di trazione monoassiale, è stato notato che, in presenza di strizione (necking), la sezione del provino subisce una deformazione non più omogenea, il che compromette le formulazioni utilizzate per il calcolo del grafico tensione-deformazione.

Tensore degli sforzi

Si prendano ora in considerazione le 9 componenti del tensore degli sforzi ottenute tramite l'analisi del tetraedo di Cauchy:

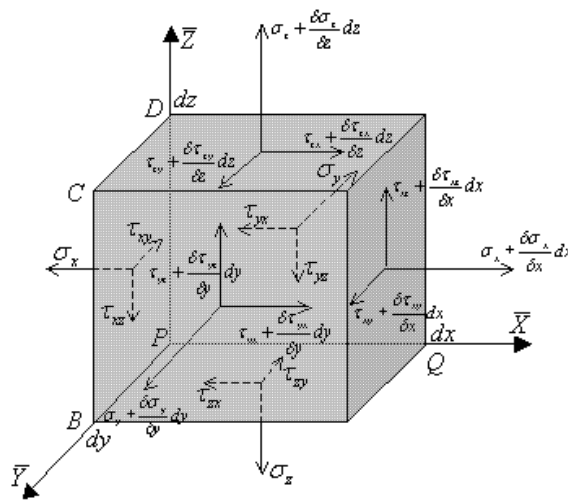


Figura 1.18: Visualizzazione delle tensioni agenti sulle facce di un cubetto elementare. Immagine tratta da Blog.

In notazione matriciale è possibile definire tale tensore come:

$$T = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (1.29)$$

Considerando le ipotesi di isotropia e omogeneità del materiale, il tensore degli sforzi è simmetrico e i suoi autovalori sono reali. È possibile calcolare il tensore T in un sistema di assi principali:

$$T = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad (1.30)$$

dove $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ e le componenti di taglio (τ) sono nulle. Nel caso in cui una tensione principale è nulla si parla di stato tensionale piano, mentre se due tensioni principali sono nulle si parla di stato tensionale monoassiale. Si calcola il determinante:

$$\det[T] = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 \quad (1.31)$$

è possibile vedere che la condizione di stato tensionale piano o monoassiale risulta valida se e solo se il determinante di T è nullo. Si definisce la sollecitazione idrostatica come la media delle componenti di stress principali:

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (1.32)$$

mentre la componente deviatorica è espressa dalla relazione:

$$\sigma'_x = \sigma_1 - \sigma_{\text{idro}} \quad (1.33)$$

Triassilità

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

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_e} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3\sigma_e} \quad (1.34)$$

Dove σ_m è la tensione idrostatica e σ_e è la tensione equivalente (tipicamente quella di Von Mises). 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 η , maggiore è la parte deviatorica della tensione rispetto a quella totale. Inoltre gli stati tensionali triassiali causano la riduzione della duttilità del materiale, cioè all'aumentare di η , diminuisce il valore di $A\%$.

Stress State	η
Tensione Assimetrica	0.33
Tensione Assimetrica (con intaglio)	> 0.33
Defromazione Piana	0.6
Puro Taglio	0
Compressione	-0.33

Tabella 1.1: Valori di η per diversi stati di stress

1.2.4 Caratterizzazione termo-meccanica

I fenomeni meccanici e termici sono strettamente correlati. Un esempio è rappresentato dal materiale che si riscalda durante le lavorazioni di asportazione di truciolo, oppure dal materiale che mostra un incremento della sua duttilità con l'aumento della temperatura. Per spiegare questi fenomeni sono nate delle teorie, come la teoria termo-elastica e quella termo-plastica. In ognuna di esse si assume che la tensione dipende non solo dalla deformazione, ma anche dalla temperatura.

Effetto termoelastico

In questo paragrafo si intende esaminare un fenomeno specifico legato alla teoria termo-elastica, in cui la temperatura del materiale nella zona elastica cambia in base alla tensione. Questo fenomeno è conosciuto come effetto termoelastico e, impiegando la notazione di Einstein, è rappresentato dalla seguente legge [7]:

$$\Delta T = -T_0 \cdot \frac{\alpha}{\rho c_p} \Delta \sigma_{kk} \quad (1.35)$$

dove T_0 rappresenta la temperatura iniziale del campione espressa in Kelvin, α è il coefficiente di dilatazione termica, ρ indica la densità, c_p è il calore specifico a pressione costante e il termine $\Delta \sigma_{kk} = \Delta(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})$ si riferisce alla variazione del primo invariante del tensore di tensione. È importante notare il segno negativo: ad esempio, uno stato di tensione che provoca trazione comporta una diminuzione della temperatura, mentre uno stato di compressione prevede un aumento della temperatura.

La precedente relazione può essere riscritta come segue:

$$\Delta T = -T_0 \cdot \frac{\alpha E}{\rho c_p} \cdot \Delta \varepsilon_{kk} \quad (1.36)$$

Le precedenti equazioni si basano sull'assunzione di adiabaticità e reversibilità. L'ipotesi di adiabaticità può essere assicurata in misura variabile durante l'intero processo meccanico, risultando particolarmente valida a elevate velocità di prova, poiché in tali condizioni le perdite di calore sono meno significative. D'altra parte, la reversibilità è applicabile esclusivamente nella fase elastica.

Effetti termici nel tratto plastico

Durante la fase plastica si verificano fenomeni irreversibili che generano calore, causando un aumento della temperatura del campione. Poiché il punto di snervamento segna la transizione tra la fase elastica e quella plastica, rappresenta anche il momento in cui l'effetto termoelastico perde rilevanza. Questo cambiamento diventa evidente attraverso una variazione della pendenza nel grafico della temperatura durante il test (figura 1.19).

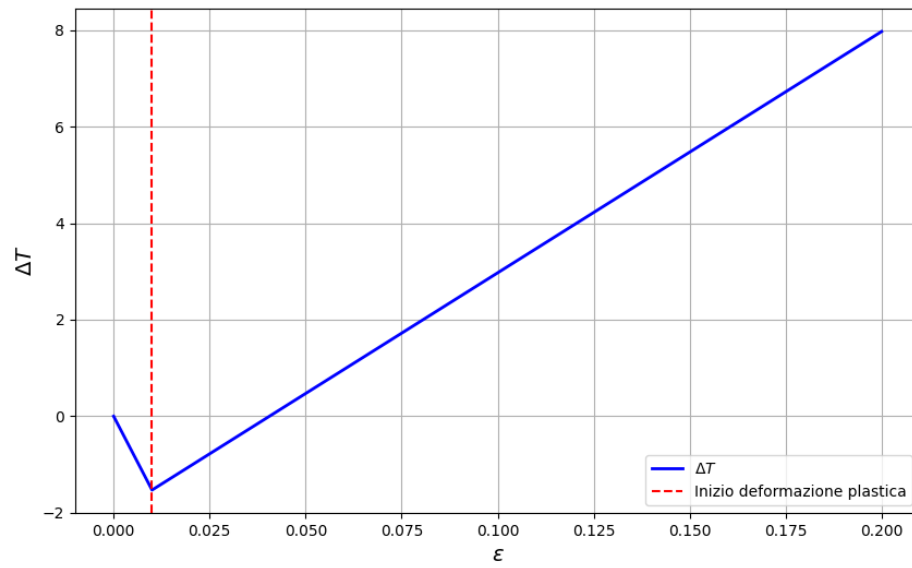


Figura 1.19: Variazione di temperatura durante la deformazione in una prova di trazione

1.2.5 Digital Image Correlation

Nelle prove meccaniche, è fondamentale conoscere il valore della deformazione durante il test. La macchina di trazione fornisce lo spostamento della sua traversa, ma questo non corrisponde all'allungamento del provino a causa delle rigidità della macchina stessa e delle celle di carico. Per questo sono emerse delle tecniche di misurazione della deformazione più avanzate, come la Digital Image Correlation (DIC), che si basa sull'analisi delle immagini per ottenere i campi di spostamento e deformazione. L'analisi delle immagini può essere sia bidimensionale che tridimensionale: nel caso bidimensionale, le immagini vengono acquisite tramite una fotocamera posizionata perpendicolarmente alla superficie da misurare; per l'analisi tridimensionale, invece, è necessario un sistema stereoscopico composto da due fotocamere disposte come illustrato nella figura 1.20.

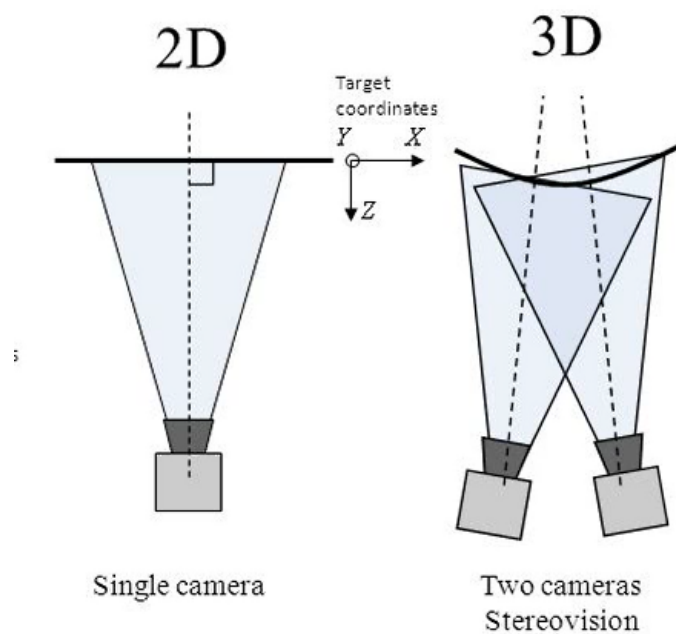


Figura 1.20: Confronto del setup tra analisi 2D e 3D. Immagine tratta da slide-player.

Analisi 2D

Nell'analisi bidimensionale, si perdono le informazioni relative alla profondità (lungo l'asse z , come illustrato nella figura 1.20). Pertanto, questa metodologia è applicabile quando la deformazione avviene in un piano (o lungo una retta), ovvero quando le deformazioni sono assenti o trascurabili in una o due direzioni, come nel caso di una prova di trazione su un campione piatto. Per questa ragione l'uso di un sistema telecentrico è cruciale nell'analisi 2D, poiché consente di acquisire immagini riducendo significativamente gli errori prospettici. Questo è garantito grazie a un sistema di lenti progettato per rendere parallele le onde luminose (la figura 1.21).

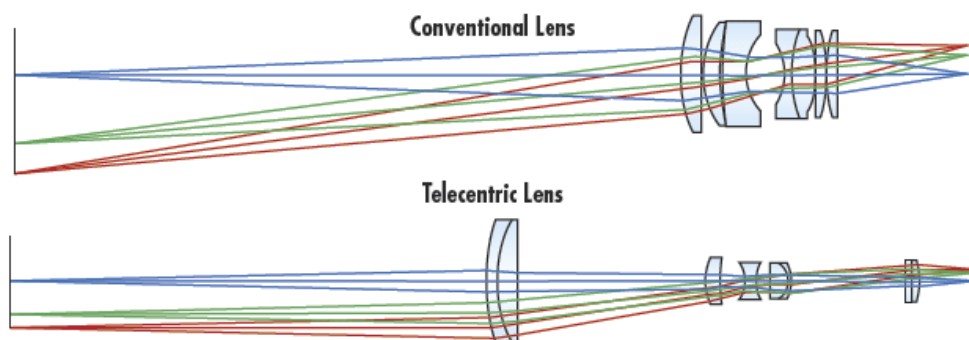


Figura 1.21: Sistemi ottici ordinari e telecentrici. Immagine tratta da edmund-optics.

Speckle pattern

Il provino deve essere progettato in modo da facilitare l'identificazione dei movimenti dei vari punti che lo compongono. È necessario preparare la sua superficie con un pattern specifico, dotato di punti che il software possa utilizzare come riferimenti. Questo pattern è conosciuto come "speckle pattern", in quanto presenta una trama maculata (figura 1.22). Per creare un buon pattern, le macchie devono essere disposte in modo casuale, con distanze appropriate tra di loro e dimensioni variabili, al fine di facilitarne il riconoscimento. Esistono diversi metodi per ottenerlo, ma il più semplice consiste nell'utilizzare vernice spray [8].

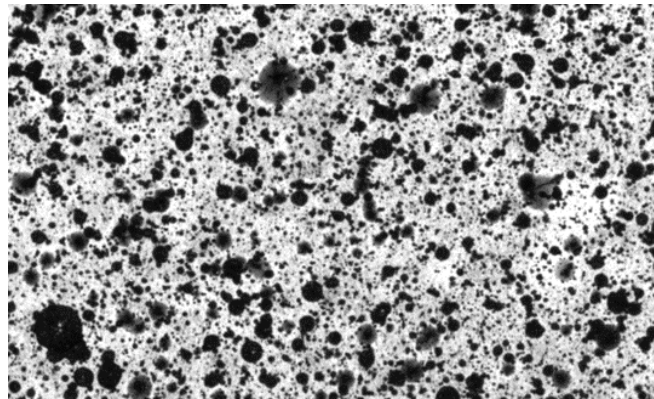


Figura 1.22: Speckle pattern

Principio di funzionamento della DIC

La superficie di misura è suddivisa in diverse aree quadrate, denominate subset. Ogni subset viene analizzato nella sua configurazione deformata nell'immagine successiva, permettendo di determinare lo spostamento del suo centro (figura 1.23). Il risultato ottenuto è un campo vettoriale che indica lo spostamento di ciascun centro, da cui è possibile calcolare il campo di deformazione.

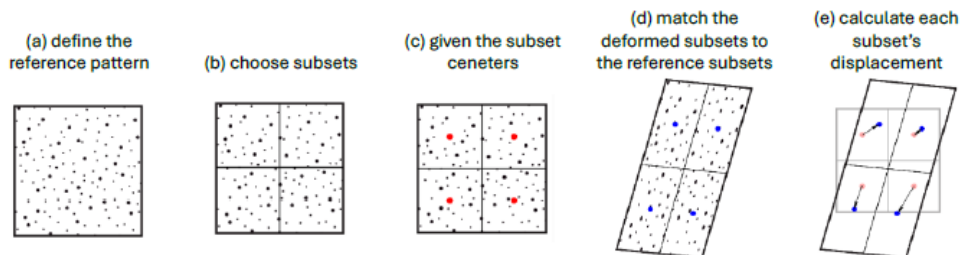


Figura 1.23: Principio di funzionamento della DIC. Immagine tratta da digital-imagecorrelation.

Subset

Per definire il subset si utilizzano due parametri: la dimensione e il passo. La dimensione del subset determina le misure del quadrato del subset nell'immagine di riferimento, mentre il passo indica la distanza tra i centri dei subset. È importante selezionare entrambi i parametri con attenzione: ad esempio, un valore di passo troppo elevato può migliorare la risoluzione della misura, ma potrebbe rendere i tempi di elaborazione insostenibili. D'altra parte, una dimensione del subset troppo ridotta potrebbe causare difficoltà nel riconoscimento dei vari subset, impedendo il completamento dell'analisi.

1.3 Analisi agli elementi finiti

L'analisi agli elementi finiti è una tecnica di simulazione numerica utilizzata in ambito strutturale. Questo approccio consente di determinare il comportamento strutturale di un sistema suddividendo un oggetto complesso in numerosi elementi, che possono essere analizzati in modo più semplice. Condurre un'analisi strutturale FEM offre notevoli vantaggi, poiché viene eseguita prima della produzione di un oggetto specifico con conseguente riduzione dei tempi tecnici.

1.3.1 Analisi agli elementi finiti con sistemi CAE

L'attuale progresso tecnologico ha portato alla creazione di numerosi solutori numerici, ciascuno con diverse capacità, per una varietà di analisi. Questi strumenti consentono di affrontare una vasta gamma di problemi, che spaziano dalle semplici analisi statiche a quelle non lineari, che includono anche aree di contatto, fino ad arrivare ad analisi dinamiche a diverse velocità.

Nel campo strutturale, molti solutori, oltre a fornire analisi dettagliate su materiali isotropi, hanno nel tempo acquisito la capacità di gestire anche materiali compositi. L'aumento dell'uso di tali materiali nell'industria ha reso necessario lo sviluppo di software specifici.

In questa tesi è stato impiegato il software ABAQUS di Simulia, uno dei solutori commerciali più diffusi nel mercato. Questo tipo di software, insieme ad altri comunemente utilizzati nel settore ingegneristico, ha un approccio alla soluzione che si suddivide in tre fasi: Pre-processo, Processo, Post-processo.

La fase di pre-processo permette di costruire il modello strutturale, definire le proprietà dei materiali coinvolti, assegnare i materiali a ciascuna parte della struttura, e stabilire i carichi e le condizioni al contorno. Una volta raccolte tutte le informazioni necessarie, il solutore calcola le matrici di rigidezza del modello e le forze interne ed esterne che agiscono su di esso.

Durante la fase di processo, utilizzando le informazioni fornite, vengono risolte le equazioni di equilibrio e calcolati gli spostamenti. Infine, l'ultima fase consente di visualizzare graficamente le soluzioni ottenute nel processo.

Pre-Process

Il calcolo della matrice di rigidezza in un software FEM richiede informazioni sul materiale e sulla geometria della struttura. La geometria può essere creata tramite solutori CAD integrati nel programma o, per geometrie complesse, utilizzando software CAD esterni. Tuttavia, il trasferimento da CAD a FEM può causare problemi nelle connessioni e nella geometria. Ogni programma FEM ha una libreria di elementi categorizzati (trave, solido, shell), con codici diversi per i vari solutori commerciali. Gli elementi devono essere associati a un tipo di materiale, con proprietà che possono variare in base all'analisi.

La struttura deve essere discretizzata in nodi tramite una mesh, il cui compromesso tra precisione e tempi di simulazione è a carico dell'utente. La prima fase del pre-processo consiste nella creazione della geometria, assegnazione del materiale e definizione degli elementi. La seconda fase prevede l'attribuzione delle condizioni necessarie per i calcoli, come stati di carico, condizioni al contorno e vincoli. Le condizioni al contorno riguardano i gradi di libertà del corpo, mentre il carico può essere concentrato o distribuito. Questa fase di pre-processo è fondamentale per fornire i dati necessari al solutore per i calcoli numerici successivi.

Process

La fase del processo viene eseguita solo dopo aver completato una fase di verifica delle informazioni inserite. Una volta conclusa questa fase, inizia il processo di soluzione numerica, durante il quale le equazioni algebriche vengono risolte utilizzando il metodo degli elementi finiti. Le analisi che possono essere effettuate sono diverse e spaziano dalle analisi statiche lineari a quelle non lineari, fino ad arrivare alle analisi dinamiche. Per ulteriori dettagli, si rimanda al paragrafo 1.2.

Post-process

Durante la fase di post-processo, si esaminano i risultati derivanti dalla soluzione calcolata. Questi risultati vengono generalmente presentati e analizzati tramite un'interfaccia grafica, in cui il modello è rappresentato con colori. Ogni colore corrisponde a un intervallo specifico di valori numerici di tensione o deformazioni, permettendo così di identificare le aree maggiormente sollecitate.

1.3.2 FEM: Finite Element Method

Le analisi agli elementi finiti utilizzano la teoria degli spostamenti per risolvere strutture continue, semplificando la complessità delle equazioni differenziali in equazioni algebriche. Questo metodo prevede la discretizzazione della struttura in elementi, con scambio di sforzi solo tra i nodi, e richiede l'imposizione di equilibrio e congruenza sui nodi per ottenere soluzioni. Le forze sui nodi sono calcolate secondo la legge di Hooke $P = Ku$, valida nel campo di linearità. Un esempio semplice è una trave incastrata rappresentata da due elementi e tre nodi, dove la rigidità è approssimata tramite un elemento molla. La risoluzione del sistema richiede l'inversione della matrice di rigidità, che deve essere non singolare. Nelle strutture continue, si introducono matrici di rotazione e funzioni di forma per correlare spostamenti nodali e tensioni, garantendo solo la congruenza. La matrice di rigidità dell'intero corpo si ricava dalle funzioni di forma, e la corretta discretizzazione è cruciale per bilanciare precisione e complessità computazionale.

Analisi lineari e non lineari

Negli ultimi decenni, le analisi agli elementi finiti (FEA) sono diventate fondamentali per la progettazione di strutture complesse, grazie al miglioramento delle metodologie e alla semplificazione dell'interfaccia CAE-FEM. È essenziale avere una buona comprensione della fenomenologia del problema per evitare errori, come una scorretta definizione delle condizioni al contorno. I modelli lineari sono i più utilizzati per la loro rapidità, ma in alcuni casi è necessario ricorrere a modelli non lineari per ottenere risultati più accurati, anche se ciò comporta un aumento del tempo di calcolo.

La rigidità di un corpo, che influisce sulla sua risposta a sollecitazioni, dipende da fattori come la forma, il materiale e i vincoli applicati. Se le variazioni di rigidità sono piccole, si può considerare l'analisi come lineare; altrimenti, si deve utilizzare un modello non lineare. Le analisi FE seguono la legge $F = Ku$, dove F rappresenta le forze esterne, K la matrice di rigidità e u gli spostamenti nodali. Se la rigidità non è costante, si richiede un'analisi non lineare, che è più lenta computazionalmente.

In situazioni di instabilità o contatto tra superfici, è necessaria un'analisi non lineare per prevedere il comportamento della struttura. Anche vincoli non lineari possono richiedere questo tipo di analisi. Sebbene l'approssimazione lineare possa fornire informazioni utili, in molti casi un modello non lineare è necessario per una rappresentazione più accurata del comportamento reale della struttura. La scelta tra analisi lineare e non lineare dipende dalle esigenze specifiche e dal compromesso tra qualità dei risultati e complessità di calcolo.

1.3.3 Algoritmo esplicito

Le analisi agli elementi finiti possono essere statiche o dinamiche, con quest'ultime che considerano effetti di inerzia, carichi temporali e smorzamenti. Le analisi dinamiche possono essere lineari o non lineari, a seconda della variazione della rigidità del modello sotto carico. Per piccole deformazioni, come nel caso di un motore che vibra, è sufficiente un'analisi lineare, mentre per situazioni come un impatto, è necessaria un'analisi non lineare a causa delle elevate deformazioni.

I metodi di risoluzione delle equazioni differenziali in meccanica strutturale si dividono in metodi impliciti ed espliciti. I metodi impliciti, come il metodo di Newmark, non forniscono informazioni sulla rottura del materiale, mentre i metodi espliciti permettono di analizzare il danno. I metodi espliciti sono più rapidi nel calcolo, ma richiedono più intervalli temporali per risultati accurati, mentre i metodi impliciti necessitano di meno passi temporali ma richiedono l'inversione della matrice di rigidità ad ogni passo. Il modello utilizzato da Abaqus/Explicit [9] integra le equazioni del moto nel tempo utilizzando un metodo alle differenze centrali. Allo step iniziale il programma calcola l'equilibrio dinamico utilizzando la formula derivante dal secondo principio della dinamica:

$$F^{(i)} - I^{(i)} = M \cdot \ddot{u}^{(i)} \quad (1.37)$$

dove F è il vettore delle forze esterne applicate, I è il vettore delle forze interne, M la matrice diagonale della massa e \ddot{u} è il vettore delle accelerazioni. Le incognite del problema saranno le accelerazioni nodali, per cui è necessario effettuare l'inversione di tale equazione matriciale. Tutti i termini dell'eq. 1.37 sono considerati all' i -esimo step. Se indichiamo con t il tempo corrispondente all' i -esimo incremento si possono calcolare le accelerazioni all'inizio dell'intervallo:

$$\ddot{u}^{(i)} \Big|_t = (F^{(i)} - I^{(i)}) \Big|_t \cdot [M]^{-1} \quad (1.38)$$

La velocità viene ottenuta come integrazione della accelerazione che è considerata costante. Il metodo alle differenze centrali è considerato esplicito perché utilizza gli stati noti \ddot{u}_t , accelerazione al tempo t , e $u(t - (\delta t/2))$ velocità al tempo $t - (\delta t/2)$. Pertanto la velocità allo stato $t + (\delta t/2)$ sarà data dalla somma della velocità alla metà dell'incremento temporale precedente ($t - (\delta t/2)$), che è noto, e della variazione temporale per l'accelerazione al tempo t . Si effettua, cioè, una interpolazione lineare delle velocità medie (Eq. 1.38) :

$$\dot{u}_{t+\Delta t/2} = \dot{u}_{t-\Delta t/2} + \frac{\Delta t_{t+\Delta t} + \Delta t_t}{2} \cdot \ddot{u}_t \quad (1.39)$$

Le velocità così calcolate vengono integrate, ottenendo gli spostamenti. Inserendole, poi, nell'Eq. 1.39 e sommandole agli spostamenti nodali ottenuti nell'intervallo precedente t , si ottengono gli spostamenti all'intervallo $t + \Delta t$:

$$u_{(t+\Delta t)} = u_t + \Delta t_{(t+\Delta t)} \cdot \dot{u}_{(t+\Delta t/2)} \quad (1.40)$$

Per come è strutturato, questo metodo integra solo le accelerazioni costanti: per non avere errori numerici si devono considerare intervalli di tempo non elevati. Lo schema di calcolo descritto può essere riassunto come in figura 1.24:

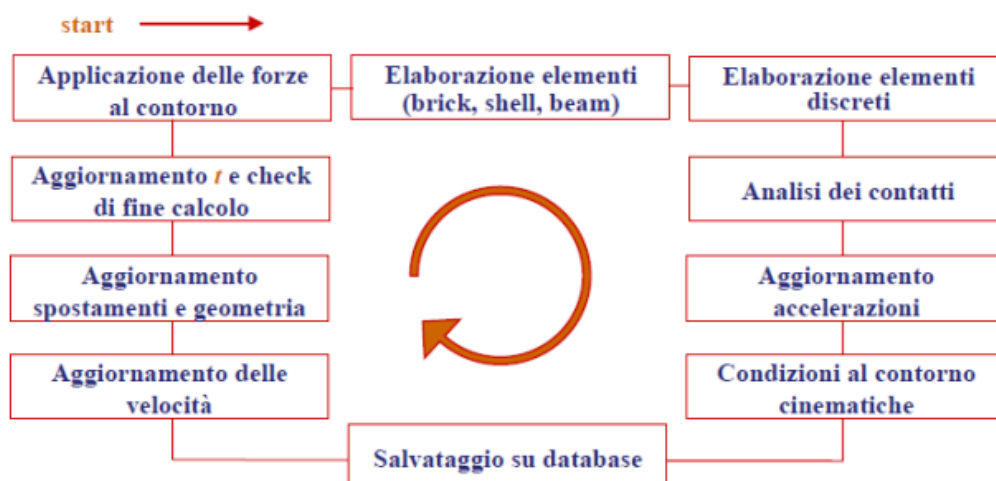


Figura 1.24: Schema di calcolo della risoluzione esplicita

Una volta calcolati gli spostamenti, ad ogni incremento si valutano le deformazioni e successivamente le tensioni, che determinano le forze interne.

Tempo di incremento stabile

Il tempo di incremento stabile è cruciale per la stabilità dei metodi di integrazione, poiché garantisce che gli errori numerici non crescano ad ogni passo. Si distingue tra stabilità "incondizionata", dove la soluzione rimane limitata per qualsiasi condizione iniziale, e stabilità "condizionata", che è valida solo per incrementi di tempo inferiori a valori critici [10]. È importante non confondere stabilità con accuratezza: la stabilità riguarda la divergenza numerica, mentre l'accuratezza si riferisce all'errore rispetto a un valore di riferimento. Il tempo di incremento stabile influisce sulla durata della simulazione, rendendo fondamentale comprenderne i fattori che lo influenzano. Abaqus/Explicit utilizza un solutore alle differenze centrali condizionatamente stabile, e la determinazione del limite di stabilità è complessa, ma viene effettuata una stima conservativa.

La frequenza naturale massima del sistema non può essere determinata con precisione, poiché è soggetta a numerosi fattori. Pertanto, si procede a una stima approssimativa. Si calcola, quindi, la Ω_{max} per ciascun elemento, dimostrando che essa risulta superiore alla frequenza massima dell'intero modello. Di conseguenza, si definisce il limite di stabilità secondo la seguente relazione:

$$\Delta T = \min \left(\frac{L_e}{c_d} \right) \quad (1.41)$$

dove L_e è la lunghezza caratteristica dell'elemento di discretizzazione e c_d la velocità di propagazione delle onde dilatazionali del modello.

Dalla Eq. 1.41 si nota come le dimensioni degli elementi della mesh e la velocità di propagazione delle onde dilatazionali influenzino il tempo di incremento stabile in un'analisi strutturale. Maggiore è la dimensione degli elementi della mesh, più lungo sarà il tempo di incremento stabile, che aumenta anche con la diminuzione della velocità di propagazione, inversamente correlata alla rigidità del materiale. Conoscendo le dimensioni dell'elemento più piccolo e la velocità di propagazione, è possibile stimare questo tempo. Il solutore perciò può controllare la discretizzazione per prevenire instabilità. Inoltre, le caratteristiche del materiale influenzano la velocità di propagazione: in fase elastica è costante, mentre in fase plastica diminuisce, aumentando il limite di stabilità.

Capitolo 2

Analisi Sperimentale

In questo capitolo verrà descritto il set-up di ciascuna prova, verranno esposti i dati sperimentali e la metodologia applicata per analizzarli.

2.1 Attrezzaggio

Sono state effettuate delle prove quasi-statiche, delle prove dinamiche e delle prove quasi-statiche a temperature elevate. Per le prove meccaniche a temperatura ambiente oltre alla Zwick (figura 2.1) sono state utilizzate una telecamera, per l'acquisizione delle immagini da utilizzare per l'analisi DIC, una termocamera, per l'analisi termica del provino durante la prova e due faretti led volti ad ottenere delle immagini con la corretta esposizione (figura 2.1).



Figura 2.1: Setup delle prove T_{amb}

Per le prove meccaniche ad elevate temperature in aggiunta al precedente set-up è stato utilizzato un induttore che posto intorno al provino ha permesso di riscaldarlo alla temperatura desiderata (figura 2.2).

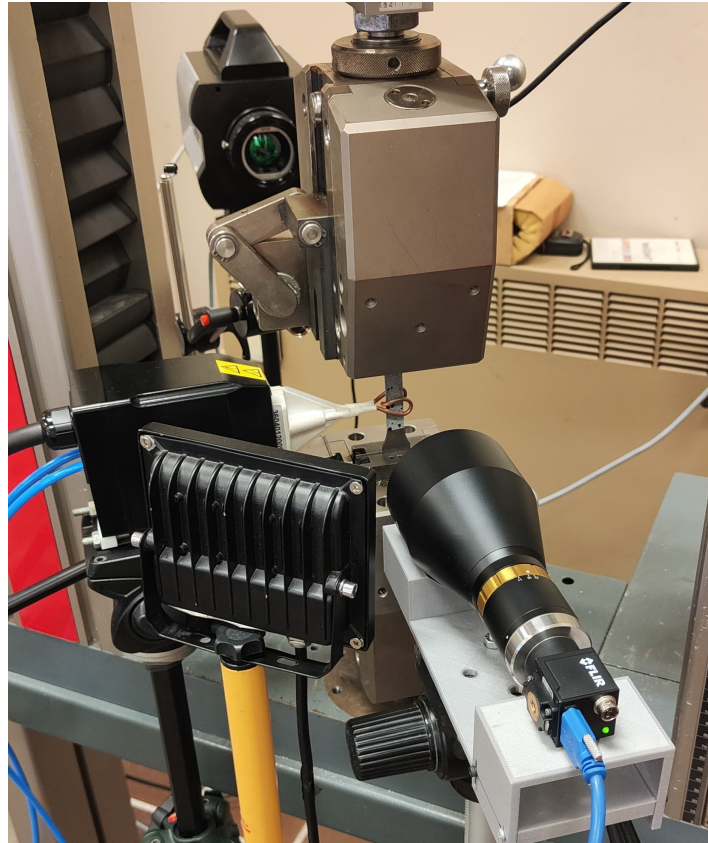


Figura 2.2: Setup delle prove in temperatura

La regolazione della temperatura è stata effettuata in modo indiretto agendo sulla potenza fornita all'induttore. Infatti l'alimentazione dell'induttore è gestita da un dispositivo denominato 'Master Controller' che in funzione della temperatura letta da un pirometro ad esso collegato gestisce il duty cycle dell'alimentazione (figura 2.3).

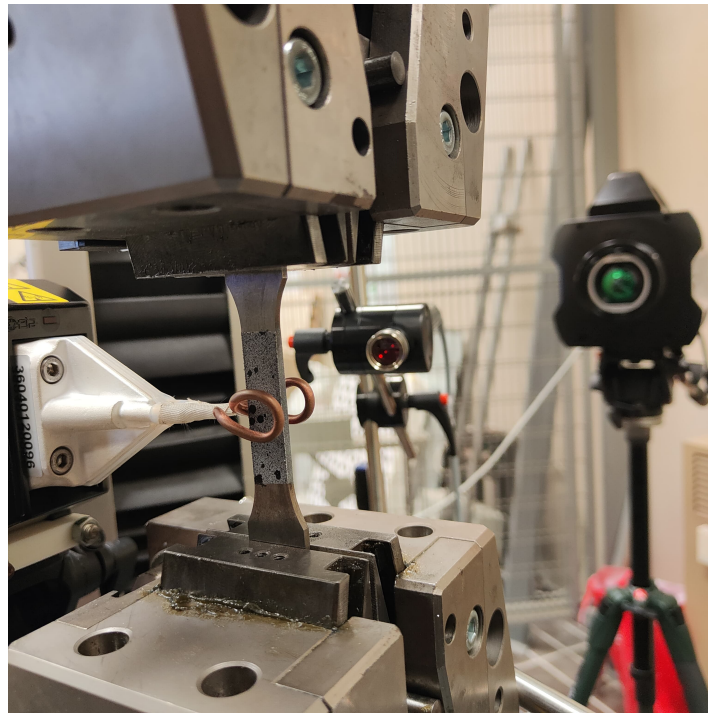


Figura 2.3: Pirometro

Infine ogni provino prima, di ogni prova, è stato verniciato da un lato con il pattern di cui si è discusso precedentemente per l'analisi DIC e dall'altro con una vernice alto-emissiva così da garantire una buona acquisizione da parte della termocamera.

2.2 Risultati sperimentali T_{amb}

I dati raccolti per ogni provino in esame tramite la Zwick sono stati poi confrontati con i dati ottenuti tramite la DIC considerati più attendibili così da poter verificare la fedeltà della prova.

2.2.1 Provino DB

Il primo provino in esame è il provino piatto DB mostrato in figura 2.4.



Figura 2.4: Provino DB

Elaborazione dei dati Zwick

Rappresentando in un grafico i valori di deformazione e tensione ottenuti dalla Zwick si ottiene il grafico di figura 2.5

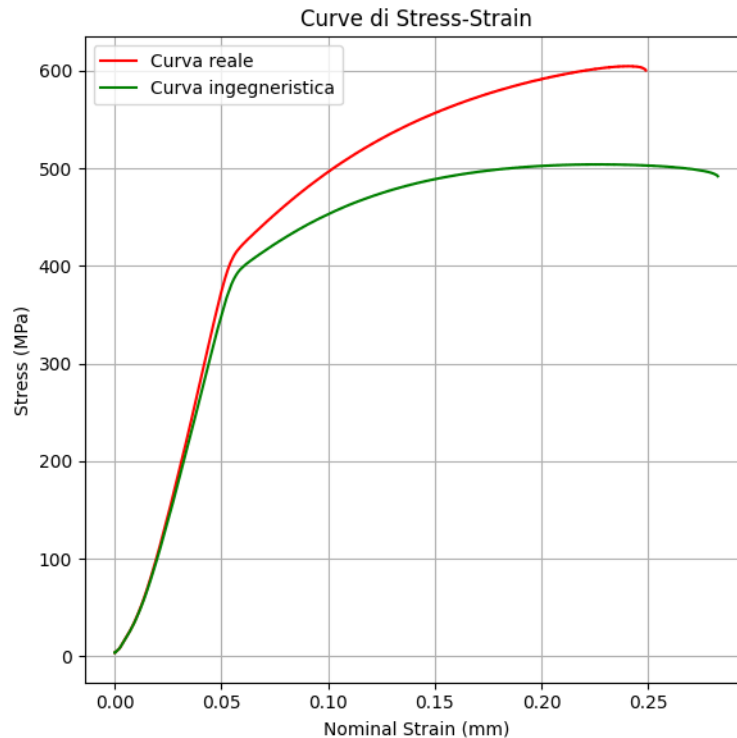


Figura 2.5: Curve $\sigma - \epsilon$ fornite dalla Zwick

Si può notare come il tratto iniziale non risulta lineare, ma presenta un primo tratto curvilineo causato dall'assestamento del provino ovvero degli spostamenti rigidi che non oppongono resistenza alla macchina e quindi non influenzano i valori di stress. Quindi risulta necessario fare una prima correzione della curva affinché tale tratto curvilineo sia sostituito da un tratto lineare. Di seguito viene riportato il codice per l'ottenimento della curva corretta che possiamo osservare in figura 2.6.

```
def sostituisci_valori(max_E_smoothed, corresponding_stress,
    max_E_smoothed_index, stress, nominal_strain_modified,
    corresponding_nominal_strain):

    new_nominal_strain = np.arange(0, corresponding_stress / max_E_smoothed,
        (corresponding_stress / max_E_smoothed) / 10)

    new_nominal_stress = new_nominal_strain * max_E_smoothed
    tratto_1 = list(zip(new_nominal_strain, new_nominal_stress))
    tratto_2 = list(zip(nominal_strain_modified[max_E_smoothed_index:] -
        (corresponding_nominal_strain - (corresponding_stress /
```

```

max_E_smoothed)), stress[max_E_smoothed_index:]))
new_curve_ingegneristica = tratto_1 + tratto_2
return new_curve_ingegneristica

```

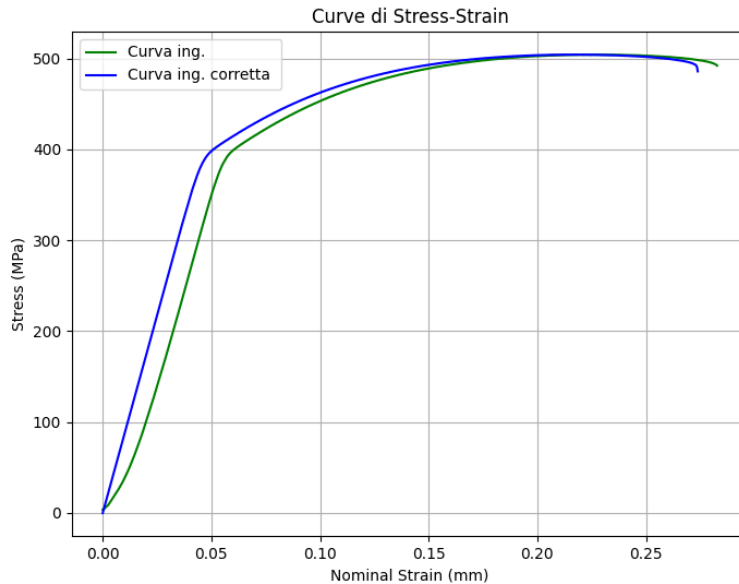


Figura 2.6: Confronto curva ingegneristica Zwick e curva ingegneristica corretta

In realtà la curva che si ottiene non è ancora quella corretta infatti risulta influenzata dalla rigidità della macchina. Lo spostamento fornito dalla macchina è quello della traversa mobile, che è influenzato dalla deformazione del provino ε_P e dalla deformazione della macchina e delle celle di carico ε_M , cioè risulta

$$\varepsilon_{TOT} = \varepsilon_P + \varepsilon_M \quad (2.1)$$

Una possibile soluzione risiede nel considerare il sistema macchina-provino come due molle in serie (figura 2.7), la deformazione del provino potrà così essere calcolata mediante la seguente relazione:

$$\varepsilon_P = \varepsilon_{TOT} - \left(\frac{\sigma}{E_M} \right) \quad (2.2)$$

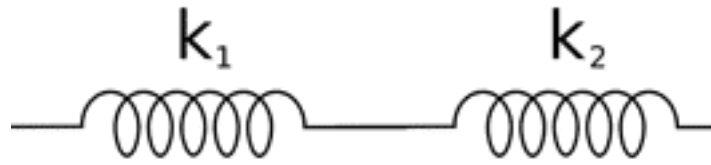


Figura 2.7: Modello di molle in serie

Volendo utilizzare l'Eq 4.2 è necessario stimare correttamente il valore del modulo elastico della macchina E_M affinché la deformazione ε_P risulterà quella del provino. Considerando che il modulo di Young della ghisa è di 175 GPa, sarà sufficiente controllare che la curva ottenuta sia parallela, nella sua porzione elastica, a una retta con un coefficiente angolare corrispondente a questo valore figura 2.8.

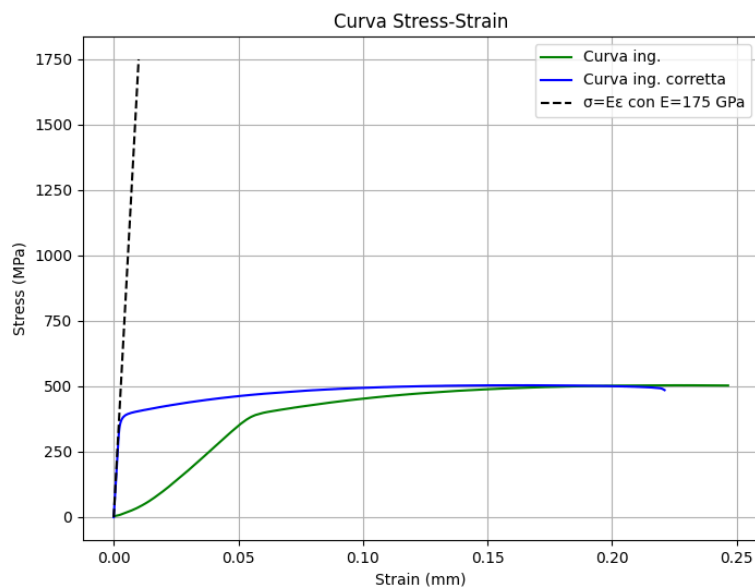


Figura 2.8: Curva corretta con modulo di Young

Tale retta rappresenta la curva caratteristica del materiale, come illustrato nella figura 2.9.

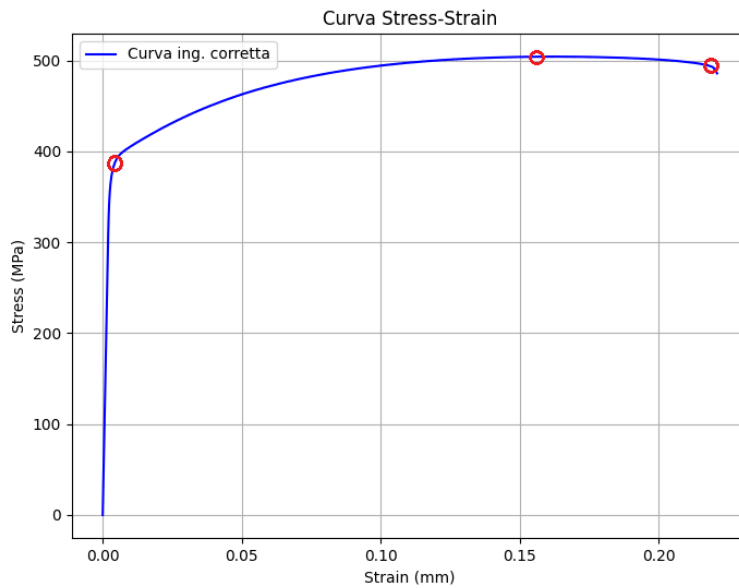


Figura 2.9: Curva corretta $\sigma - \epsilon$ provino DB

La tensione di snervamento σ_y vale 398 Mpa, la tensione di rottura σ_{UTS} 504 Mpa e l'allungamento percentuale $A\%$ 22%.

Elaborazione delle immagini in Dic2D

Per l'analisi DIC si utilizza il software Dic2D che permette l'elaborazione di immagini ottenute durante la prova. Questo strumento permette di definire una mesh regolare gestendo vari parametri, questo ha permesso di svolgere due tipologie di analisi. Nella prima è stato ricreato un estensometro, così da calcolare gli spostamenti tra gli estremi del tratto utile (figura 2.10).

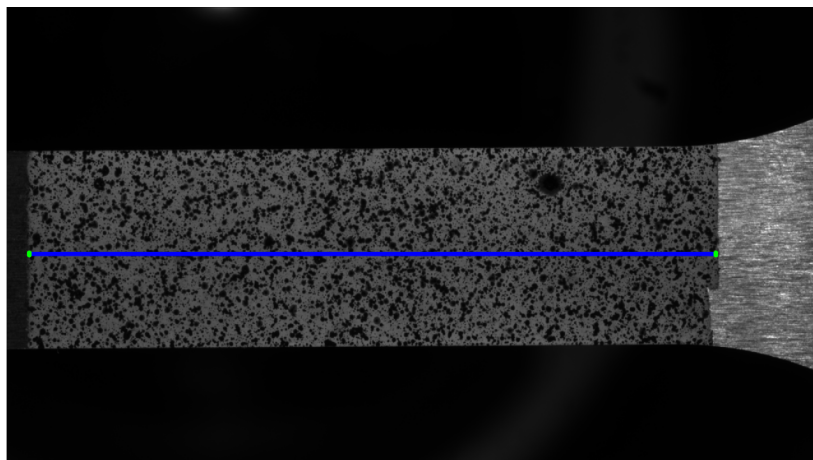


Figura 2.10: "Estensometro"

Nella seconda è stata realizzata una mesh più ampia così da ottenere tutto il campo di spostamento all'interno di essa, facendo attenzione ad evitare zone in cui il pattern non fosse omogeneo (figura 2.11).

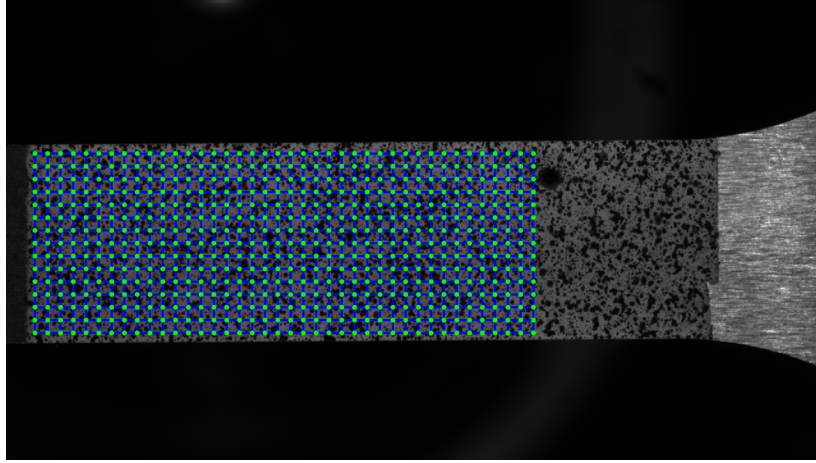


Figura 2.11: Mesh Dic2D provino DB

Il software calcola direttamente le deformazioni ε_{xx} , ε_{yy} e ε_{xy} , restituendo i loro valori per ogni istante all'interno di un file excel.

Queste elaborazioni risultano fondamentali per la verifica della correttezza della curva ottenuta tramite le correzioni fatte nel paragrafo precedente. Occorre precisare che telecamera e macchina di prova non erano sincronizzate nel campionamento né per l'istante di inizio né per la frequenza. In PYTHON questa problematica viene risolta attraverso la creazione di un vettore tempo della telecamera in funzione del quale vengono interpolati i dati della macchina. Di seguito viene riportato il codice: t_2 è il vettore tempo di cui si parlava, 2.6 è l'intervallo di tempo di non sincronismo valore che è stato scelto tramite verifica grafica (figura 2.12).

```
def interpolate_stress( stress, t1, t2):

    t1 = np.array(test_time)
    t2 = np.arange(0, (len(dati_strain_xls_maximum) * 0.5), 0.5) + 2.6
    #Aggiungendo 2.6 sono in grado di sincronizzare le due acquisizioni

    # Creiamo una funzione di interpolazione per gli stress
    interp_func = interp1d(t1, stress, fill_value="extrapolate")
    # Troviamo gli indici corrispondenti nel vettore t1 per ogni istante
    di tempo in t2
    interpolated_stress_S2 = interp_func(t2)

    return interpolated_stress_S2
```

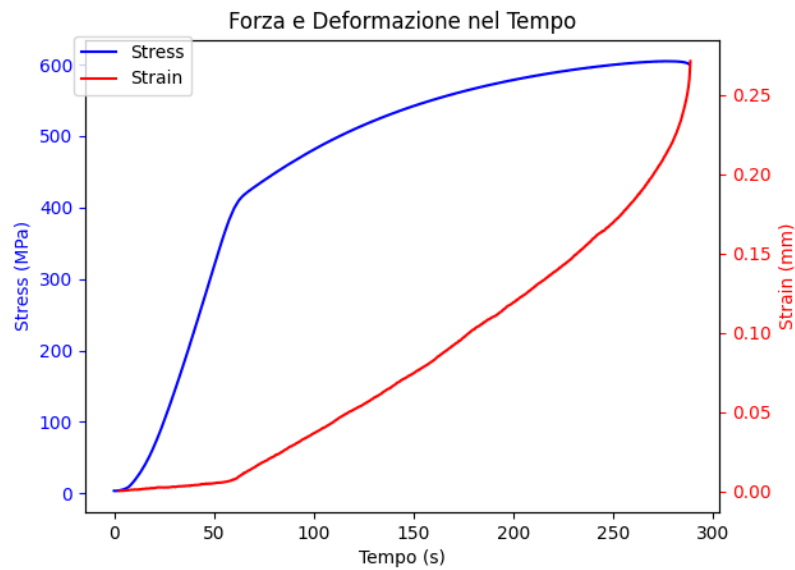


Figura 2.12: Grafico verifica delay time

Successivamente vengono riportate le due curve $\sigma - \epsilon$ ottenute: la curva rossa è la curva reale corretta ottenuta a partire dai dati della curva ingegneristica corretta, la curva grigia utilizza invece lo stress reale ottenuto interpolando lo stress reale della macchina con le deformazioni reali medie ottenute tramite il software Dic2D. Le curve sono quasi del tutto coincidenti: ciò significa che le correzioni fatte alla curva sono accettabili.

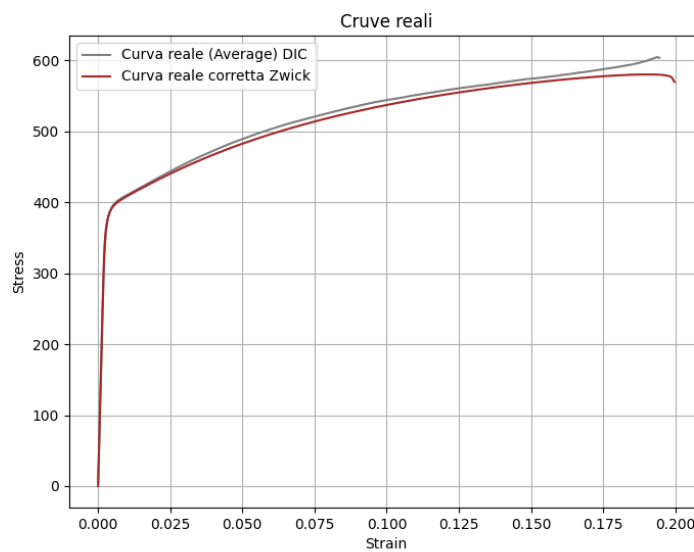


Figura 2.13: Curva reale macchina e DIC

Utilizzando i valori medi delle deformazioni fornite dall'analisi DIC è possibile ricavare l'andamento del coefficiente di Poisson nel tempo, che viene mostrato in figura 2.14.

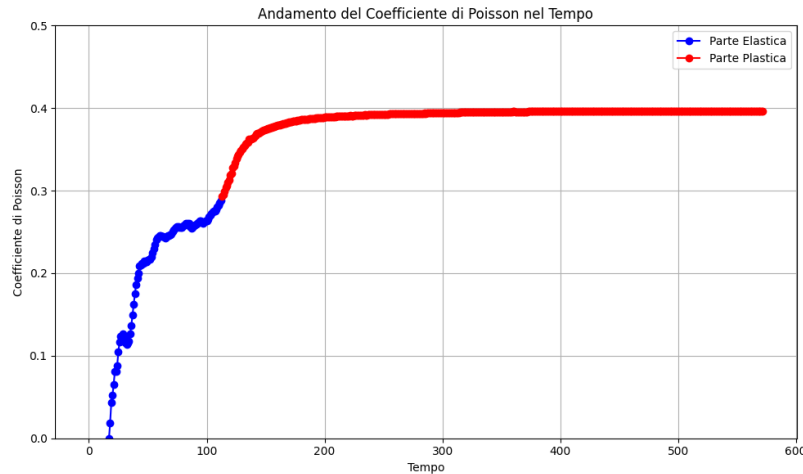


Figura 2.14: Coefficiente di Poisson

Nella fase elastica il valore di ν è crescente con un valore medio pari a $\nu=0.258$, mentre nella fase plastica l'andamento è pressoché costante con valore medio uguale a $\nu=0.389$.

Elaborazione immagini della termocamera

L'obiettivo è osservare l'andamento della temperatura del provino durante la prova e utilizzare le immagini termografiche per verificare la presenza dell'effetto termoelastico espresso dalla relazione (1.36).

I valori dei parametri fisici α , ρ , c_p ed E sono riportati in tabella

α [K^{-1}]	ρ [$kg \cdot m^{-3}$]	c_p [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	E [GPa]
$1.15 \cdot 10^{-5}$	7300	515	175

Tabella 2.1: Valori dei parametri fisici delle SSFDI

Nella figura 2.15 è mostrato l'andamento reale della temperatura del campione in relazione al suo allungamento, mentre nella figura 2.16 si confronta la sua variazione rispetto alla temperatura iniziale ($T_0=21.69$ °C) con la "retta teorica" fornita dalla (1.36). È chiaro che i parametri sono stati selezionati in modo appropriato, vista la tangenza tra i due grafici; ciò conferma ulteriormente che il modulo di Young inizialmente scelto per la correzione è corretto.

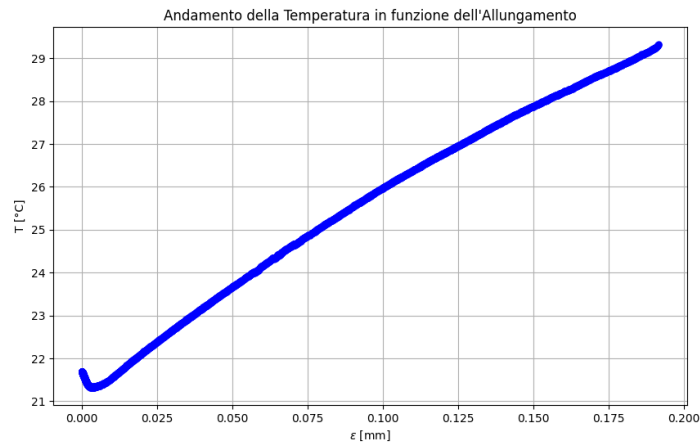


Figura 2.15: Temperatura misurata durante la prova

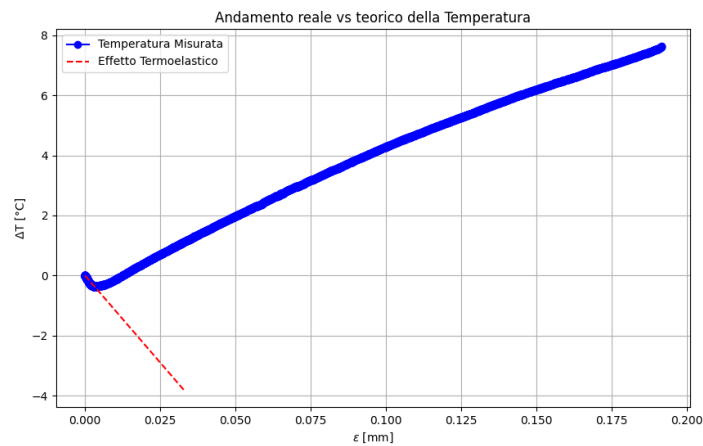


Figura 2.16: Confronto tra andamento reale e teorico della temperatura

In figura 2.17 viene mostrata la quasi corrispondenza tra punto di minimo della temperatura e il punto di snervamento.

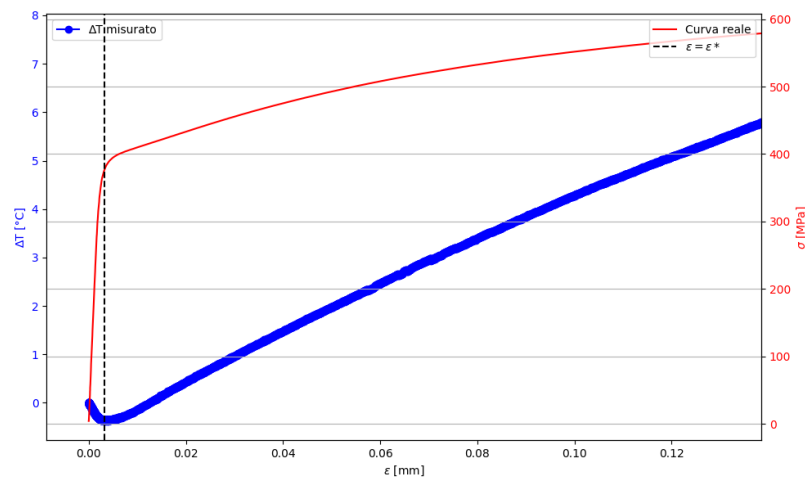


Figura 2.17: Corrispondenza tra punto di snervamento e punto di minima temperatura

Analizzando le immagini derivate dall'analisi DIC e quelle catturate dalla termocamera, si è osservato che i campi di deformazione e temperatura risultano sovrapponibili. Questo è particolarmente evidente nel momento che precede la rottura del campione (figura 2.18), in cui entrambi i campi mostrano un andamento a V.

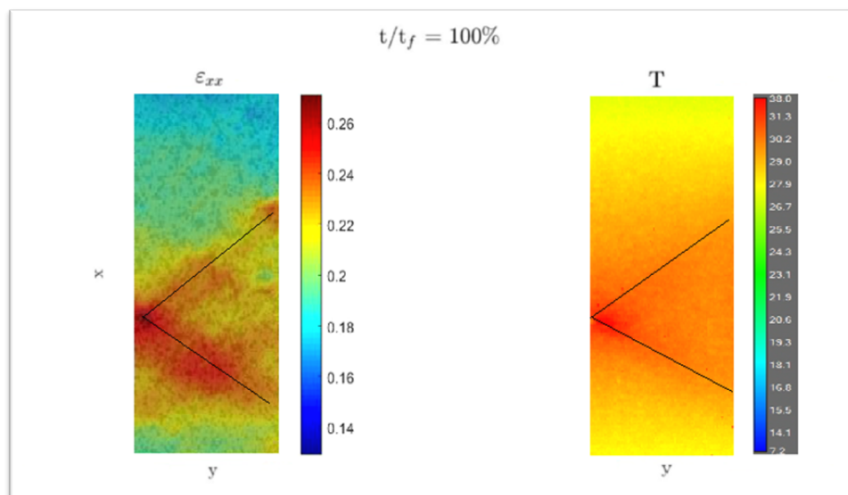


Figura 2.18: Confronto tra campi di deformazione e di temperatura a fine prova

2.2.2 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 2.19: Provino T0-6



Figura 2.20: Provino T0-8

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

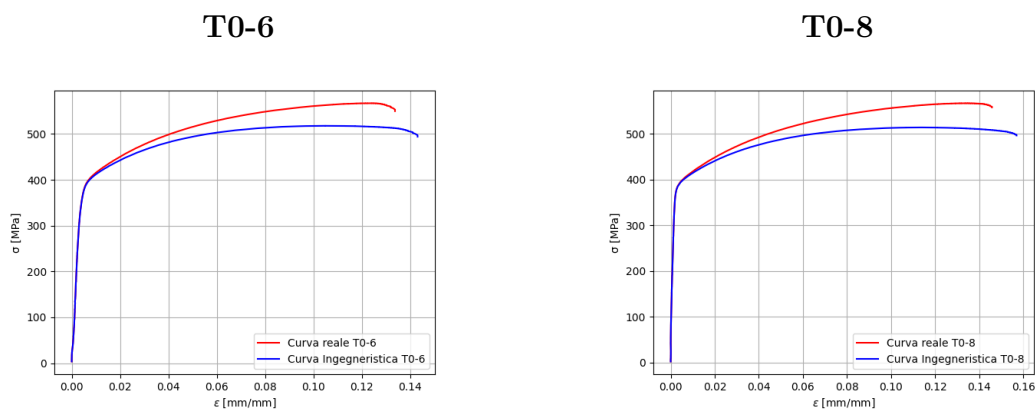


Figura 2.21: Confronto delle curve relative ai provini T0

Nella figura 2.22 sono messe a confronto le diverse curve derivate dai test di trazione sui campioni TRA, T0-6 e T0-8, mentre nella tabella 2.2 sono riportati i valori corrispondenti ai punti caratteristici. Si osserva che nei campioni cilindrici si registra una minore duttilità, a fronte di una maggiore resistenza del materiale.

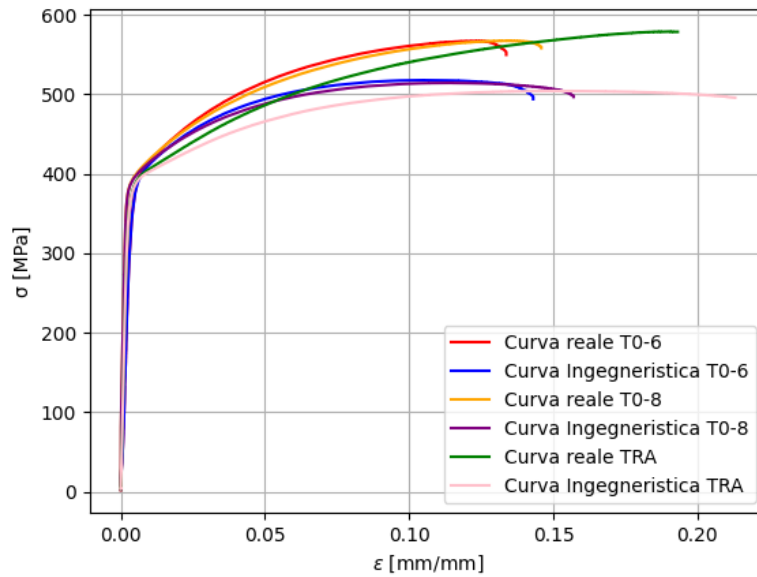


Figura 2.22: Curve relative ai provini TRA, T0-6 e T0-8

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

Tabella 2.2: Caratteristiche meccaniche di TRA, T0-6 e T0-8

2.2.3 Provino C3

Per la prova di compressione si utilizza il provino cilindrico C3 (figura 2.23).



Figura 2.23: Provino C3

La procedura per l'elaborazione dei dati rimane invariata; tuttavia, in questa circostanza, il test è stato concluso prima della rottura del campione. Di conseguenza, è stato possibile ottenere il valore della tensione di snervamento, pari

a 416 MPa, insieme ai valori di tensione e deformazione al termine della prova, che risultano rispettivamente 0,33 mm/mm (figura 2.24).

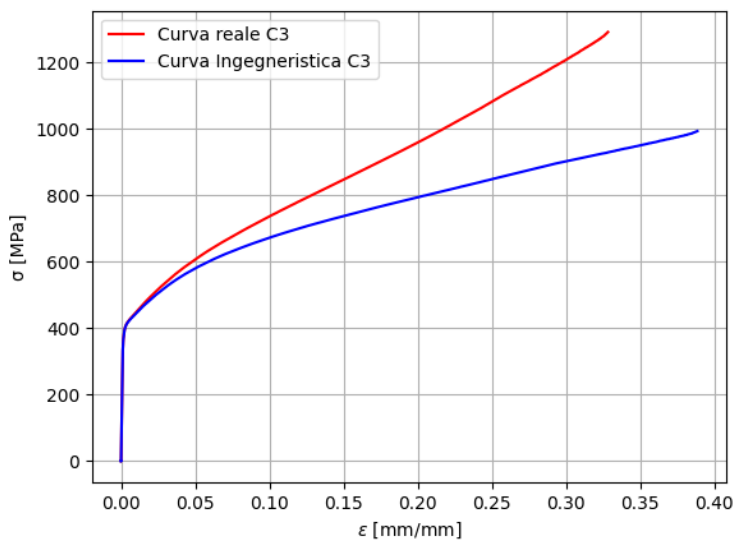


Figura 2.24: Curve relative alla prova di compressione

2.2.4 Provini D1 e D2

I provini dreamier, D1 (figura 2.25) e D2 (figura 2.26), sono stati disegnati in modo tale da far sì che nascano delle tensioni tangenziali τ nel provino.



Figura 2.25: Provino D1



Figura 2.26: Provino D2

Nei provini dreamier la distanza dei fori dall'asse di simmetria ci permette di distinguere i due provini e influenza lo stato tensionale che è caratterizzato sia

da tensioni normali che da tensioni tangenziali e può essere descritto un tensore delle tensioni del tipo:

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

Nel nostro caso si può assumere che lo stato tensionale sia di puro taglio quindi 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.

Per queste ragioni non vengono calcolate le deformazioni, ma viene direttamente utilizzato lo spostamento x della traversa fornito dalla Zwick. Quindi per trovare il punto di snervamento non è stato possibile sfruttare il concetto di deformazione residua ma è stato sfruttato come riferimento il cambio di pendenza che si verifica nel passaggio dalla regione elastica a quella plastica. In termini matematici avendo una funzione $f(x)$, la sua derivata $f'(x)$ rappresenta la pendenza della curva di $f(x)$ nel punto x .

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:

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

$$d\tau = \tau'(x) = \begin{cases} C & \text{nel tratto elastico} \\ f'(x) < C \quad \forall x & \text{nel tratto plastico} \end{cases}$$

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

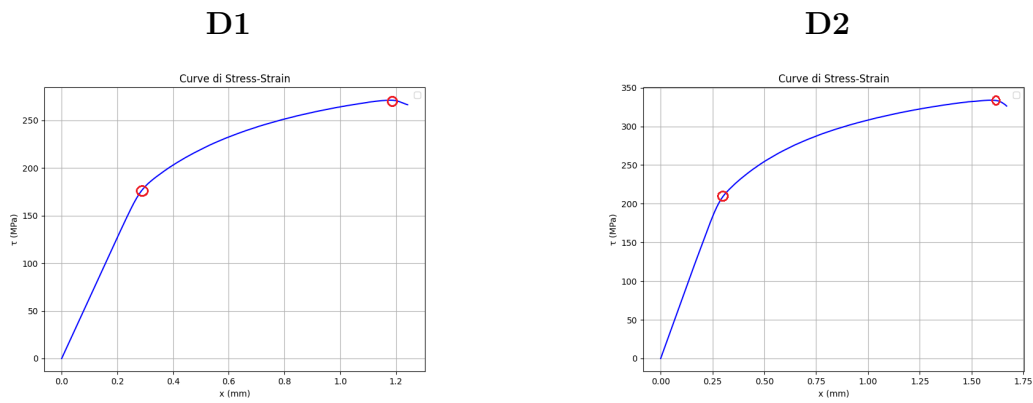


Figura 2.27: Grafici delle curve $\tau - x$ dei provini dreamier

	τ_y [MPa]	τ_{UTS} [MPa]
D1	170	270
D2	210	336

Tabella 2.3: Caratteristiche meccaniche di D1 e D2

2.2.5 Provini T1-8 e T2-6

Di seguito vengono riportati i provini T1-8 (figura 3.37) e T2-6 (figura 3.38).



Figura 2.28: Provino T1-8



Figura 2.29: Provino T2-6

Tali provini quando sollecitati assialmente, presentano uno stato tensionale triassiale causato dalla loro sezione variabile lungo il tratto utile che genera una concentrazione delle tensioni.

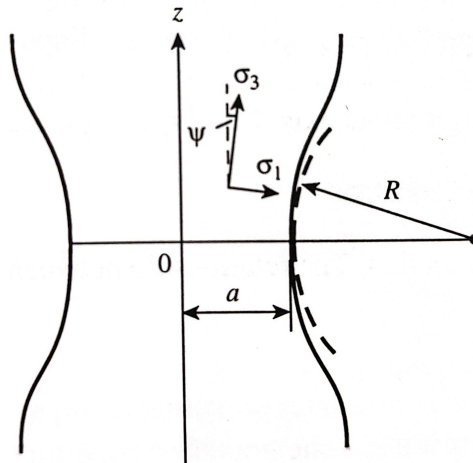


Figura 2.30: Schema dello stato tensionale triassiale
Libro.

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.

Per queste ragioni una volta eseguita l'elaborazione dei dati del test con la stessa metodologia usata per i provini TRA, T0-6 e T0-8 è stata effettuata una correzione sfruttando le seguenti relazioni [11]:

$$\sigma_z - \sigma_r = Y \quad (2.3)$$

$$\frac{\sigma}{Y} = 1 + \left(\frac{2R}{r} \right) \ln \left(1 + \frac{2R}{r} \right) \quad (2.4)$$

dove Y è la tensione di snervamento uniassiale, r il raggio della sezione centrale del provino e R il raggio di raccordo. Si riportano di seguito i principali risultati:

Provino	σ_y [MPa]	σ_{UTS} [MPa]	$A\%$ [%]
T1-8	417	553	6.0
T2-6	450	590	4.5

Tabella 2.4: Caratteristiche meccaniche di T1-8 e T2-6

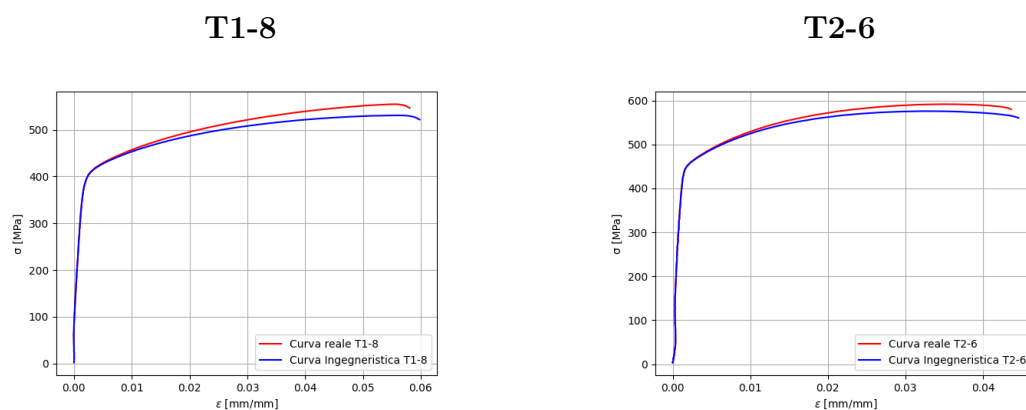


Figura 2.31: Curve ingegneristiche e reali relative a T1-8 e T2-6

In figura 2.32 vengono confrontate le curve ingegneristiche ottenute dalle prove eseguite sui provini T2-6, T1-8, T0-8 e C3. Si può osservare come il fattore di triassialità influisce sul comportamento meccanico della ghisa in quanto ad un incremento del suo valore corrisponde l'infragilimento del materiale.

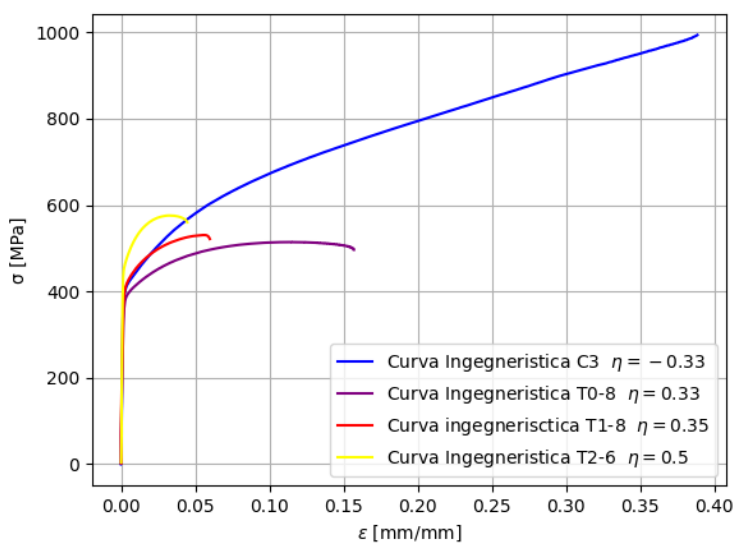


Figura 2.32: Curve ingegneristiche al variare del fattore di triassialità

In figura 2.33 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. Si può osservare come tutti i provini rispettino il criterio di Von Mises fatta eccezione per il provino D1, per il quale l'ipotesi è meno accettabile in quanto il punto è significativamente distante dall'ellisse.

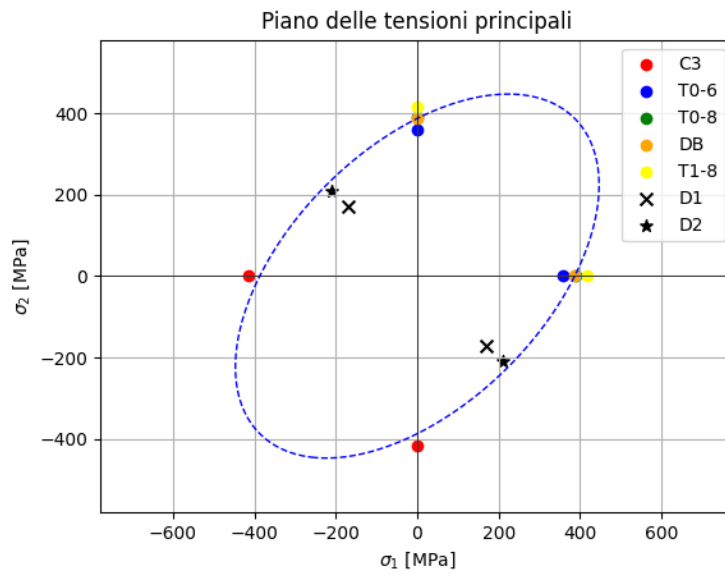


Figura 2.33: Piano delle tensioni principali

In figura 2.34 viene invece riportato il grafico dove sono stati inseriti i valori delle deformazione equivalente a frattura rispetto alla trassialità con i quali è stata definita una funzione in blu tale da modellare il comportamento del materiale a frattura.

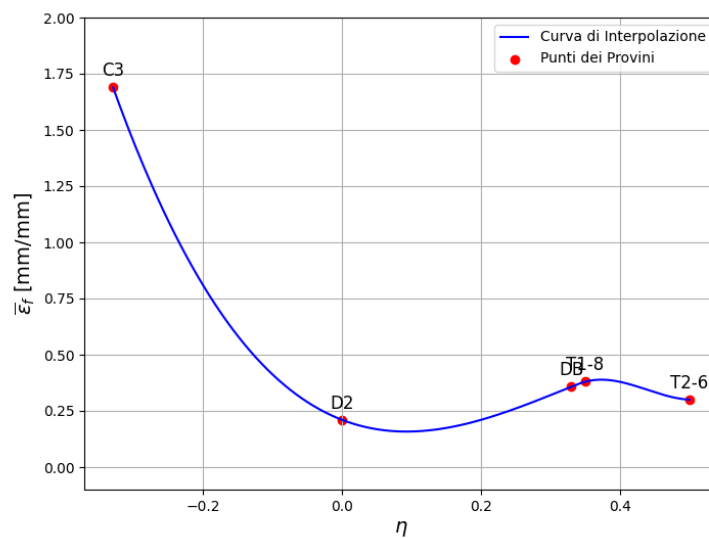


Figura 2.34: Comportamento a frattura SSF-DI

2.3 Risultati sperimentali prove in temperatura

Le prove in temperatura sono state effettuate unicamente sul provino DB a quattro temperature differenti: 200°, 400°, 500° e 600°C. In figura 2.35 vengono confrontate le curve delle prove in temperatura con la curva a temperatura ambiente.

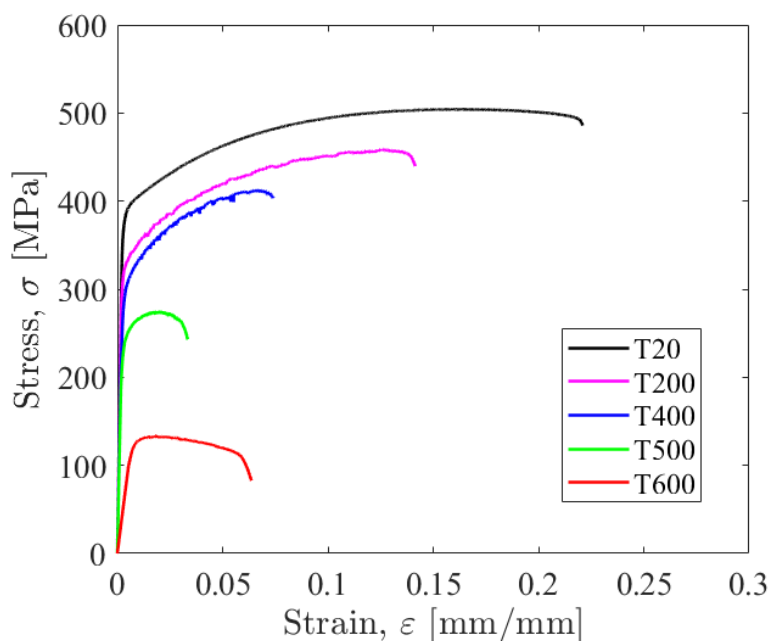


Figura 2.35: Curve ingegneristiche provino DB

Si può osservare come le curve a 200°, 400° e 500° C mantengono lo stesso modulo di Young della curva a temperatura ambiente e gradualmente riducono il loro tratto plastico quindi il materiale diventa più fragile all'aumentare della temperatura. Mentre la curva a 600°C presenta un modulo di Young differente, il suo tratto plastico aumenta rispetto alla curva precedente e come si può notare anche in figura 2.36 si manifesta il fenomeno della strizione. Inoltre le curve a 200° e 400° C presentano del rumore dovuto a delle piccole oscillazioni di temperatura nell'ordine dei 2/4°C, infatti l'induttore non è in grado di mantenere una temperatura costante durante l'intera prova.

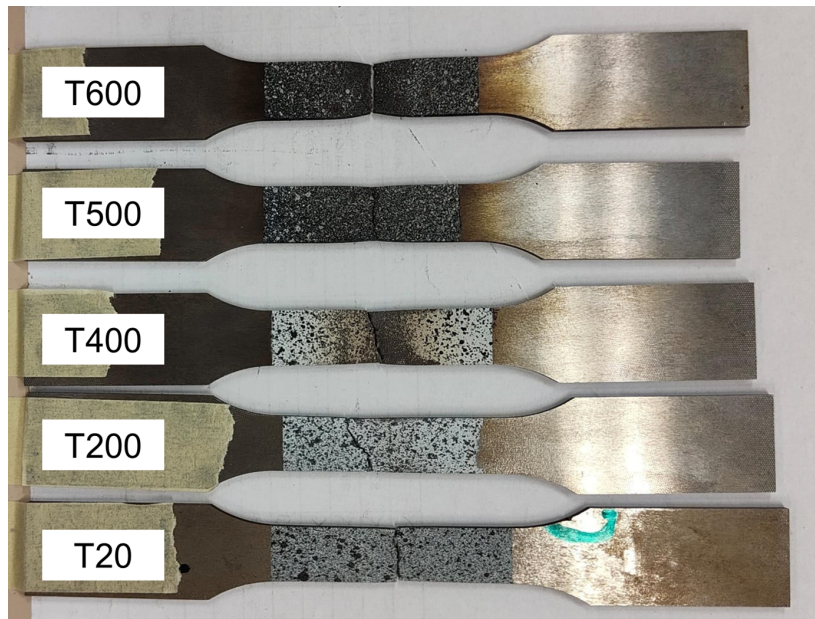


Figura 2.36: Rottura provini DB

Capitolo 3

Analisi Numerica

In questo capitolo, si vuole descrivere il processo di simulazione implementato attraverso il software agli elementi finiti, ABAQUS. Le ragioni che hanno portato ad attuare una campagna simulativa, risiedono nella realizzazione di un modello che simula in modo puntuale il comportamento del materiale e nella creazione di una nuova tipologia di grafico che permette di capire l'influenza della triassialità sulla deformazione a rottura. A questo scopo è stato analizzato il comportamento dei provini DB, C3, T1-8, T2-6, D1 e D2.

3.1 Ipotesi del modello numerico

Il modello numerico creato è stato ideato avvalendosi delle seguenti ipotesi. Le dimensioni geometriche dei provini sono da ritenersi pari ai provini reali poiché entrambi fanno riferimento ai disegni tecnici originali. Il modello utilizzato è di tipo 3D ovvero sono stati impiegati elementi "solid". Il materiale si considera isotropo perciò presenta le stesse proprietà meccaniche e termiche in tutte le direzioni ed inoltre abbiamo ipotizzato che rispetti al modello in Abaqus denominato "Cast Iron Plasticity". La dimensione della Mesh è uniforme in tutto il provino fatta eccezione per la regione d'interesse dove si è impiegata una mesh più fitta. Inoltre per i provini D1 e D2 nei raccordi è stata impiegata una mesh tetraedrica. I nodi posti alla base del provino sono sottoposti ad un incastro quindi sono bloccati gli spostamenti e le rotazioni in ciascuna direzione mentre i nodi superiori del provino sono vincolati per permettere solo lo spostamento lungo la direzione di tiro. Inoltre, tali nodi si muovono con una velocità il più possibile vicina a quella della macchina di trazione.

3.2 Unità di misura del modello

Per la creazione del modello sono state impiegate le seguenti unità di misura:

Grandezza	Simbolo	Unità di Misura
Modulo elastico	E	[GPa]
Stress	σ	[GPa]
Densità	ρ	$\frac{\text{Kg}}{\text{mm}^3}$
Forza	F	[kN]
Dimensioni geometriche	-	[mm]

Tabella 3.1: Unità di misura delle grandezze fisiche

3.3 Sviluppo del modello

La simulazione pone le proprie basi sul modello matematico Cast Iron Plasticity [12]. Tale modello illustra il comportamento meccanico della ghisa grigia, un materiale caratterizzato da una microstruttura in cui le scaglie di grafite sono distribuite all'interno di una matrice di acciaio. Durante la trazione, le scaglie di grafite fungono da concentratori di sforzi, causando uno snervamento che dipende dalla massima sollecitazione principale, seguito da un comportamento fragile. Al contrario, in compressione, le lamelle di grafite non influenzano significativamente la risposta macroscopica, risultando in un comportamento duttile simile a quello di molti acciai. ABAQUS/Standard utilizza una superficie di snervamento composita per descrivere il diverso comportamento in trazione e compressione. In trazione si ipotizza che lo snervamento sia governato dalla massima sollecitazione principale, mentre in compressione si ipotizza che lo snervamento sia indipendente dalla pressione e governato dalle sole sollecitazioni deviatoriche (condizione di snervamento di Mises) (figura 3.1).

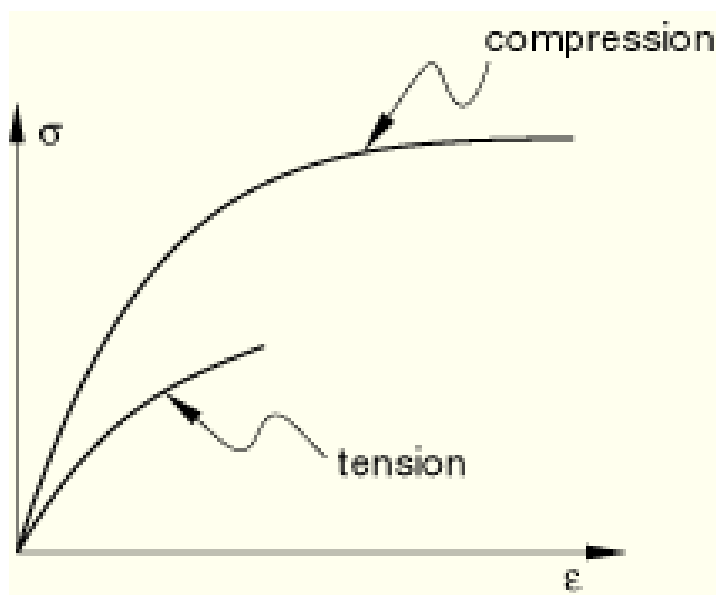


Figura 3.1: Tipica risposta sforzo-deformazione della ghisa grigia sotto tensione monoassiale e compressione monoassiale. Immagine tratta da ABAQUS

Poiché l'indurimento della ghisa grigia è diverso in tensione uniassiale e in compressione uniassiale, è necessario fornire due serie di dati sull'indurimento in forma tabellare: una basata su un esperimento di tensione uniassiale che definisce $\sigma_t = \sigma_t(\epsilon_t^{pl}, \theta, f^\alpha)$ e l'altra basata su un esperimento di compressione uniassiale che definisce $\sigma_c = \sigma_c(\epsilon_c^{pl}, \theta, f^\alpha)$ (figura 3.2).

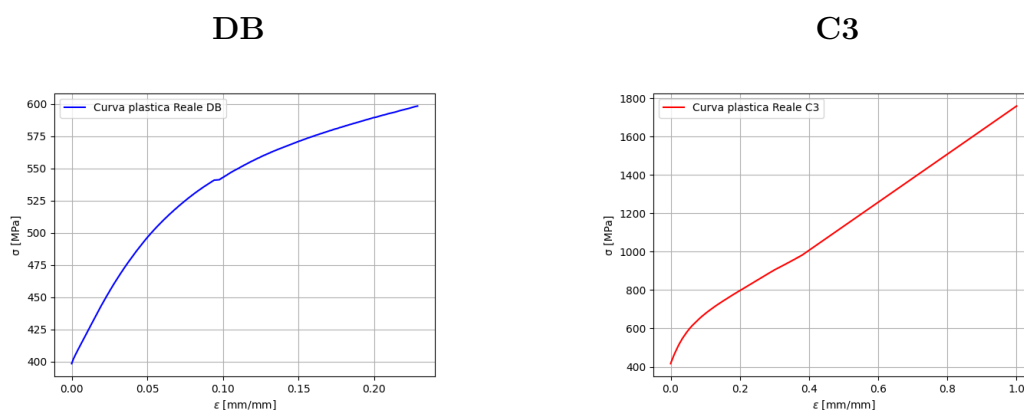


Figura 3.2: Curve plastiche reali: tensione e compressione

Inoltre in questo modello è necessario fornire il valore del “rapporto di Poisson” plastico, che è il valore assoluto del rapporto tra la deformazione plastica trasversale e quella longitudinale sotto tensione uniassiale. Il rapporto di Poisson plastico può variare con la deformazione plastica tuttavia, il modello in ABA-

QUS/Standard assume che sia costante rispetto alla deformazione plastica per questo si assume un valore predefinito pari a 0.4.

ρ [Kg/mm ³]	E [GPa]	ν_{els}	ν_{plt}
7.1E-09	180	0.25	0.4

Tabella 3.2: Proprietà del materiale: densità, modulo elastico, coefficiente di Poisson elastico e plastico.

Mentre in Output tale modello fornisce due valori particolarmente significativi in questo contesto ovvero:

- PEEQ → Deformazione plastica equivalente in compressione monoassiale

$$\bar{\epsilon}_c^{pl} = \int_0^t \dot{\bar{\epsilon}}_c^{pl} dt \quad (3.1)$$

- PEEQT → Deformazione plastica equivalente in tensione monoassiale

$$\bar{\epsilon}_t^{pl} = \int_0^t \dot{\bar{\epsilon}}_t^{pl} dt \quad (3.2)$$

3.4 Danneggiamento: USDFLD

Il modello numerico Cast Iron Plasticity, di cui sopra, non permette di modellare il danneggiamento ovvero non permette di inserire il valore di stress al quale il provino rompe a questo scopo introduciamo la "User subroutine (USDFLD)" di Abaqus.

La subroutine utente consente di definire le variabili di campo in un punto materiale come funzioni del tempo o di una qualsiasi delle quantità disponibili nel punto materiale elencate nella tabella "Output Variable Identifiers". Di seguito viene riportato una sezione del codice utilizzato (Figura 3.3) :

```

jStatus = 1
call vgetvrm('PEEQ',rdata,jdata,cdata,jStatus)

Critical_Strain(1)=0.2650

do k = 1, nblock
  StrainE11 = rData(k)

  maxprincipalE(1) = StrainE11

  if (maxprincipalE(1) .ge. Critical_Strain(1)) then
    stateNew(k,1) = 0
  end if

```

Figura 3.3: User subroutine in Fortran

Si può osservare come sia stata utilizzata la variabile PEEQT per modellare il danneggiamento ovvero ogni elemento della mesh che raggiunge il valore indicato di PEEQT si spegne dando origine alla rottura del provino.

3.5 Risultati simulazione

Le simulazioni numeriche hanno permesso di calcolare i valori utili per effettuare, in seguito, valutazioni sul rapporto tra triassialità e deformazione plastica a rottura. Prima di estrarre i valori desiderati, si è rivelato necessario far coincidere le curve stress-strain sperimentali con quelle simulate attraverso il modello numerico.

3.5.1 Validazione

Il processo di validazione del modello numerico è stato eseguito su tre provini DB, C3 e D1 che simulano rispettivamente il comportamento del materiale nel caso di trazione monoassiale, compressione monoassiale e taglio puro.

Di seguito vengono riportati i grafici che permettono il confronto tra i dati sperimentali e quelli ottenuti della simulazione.

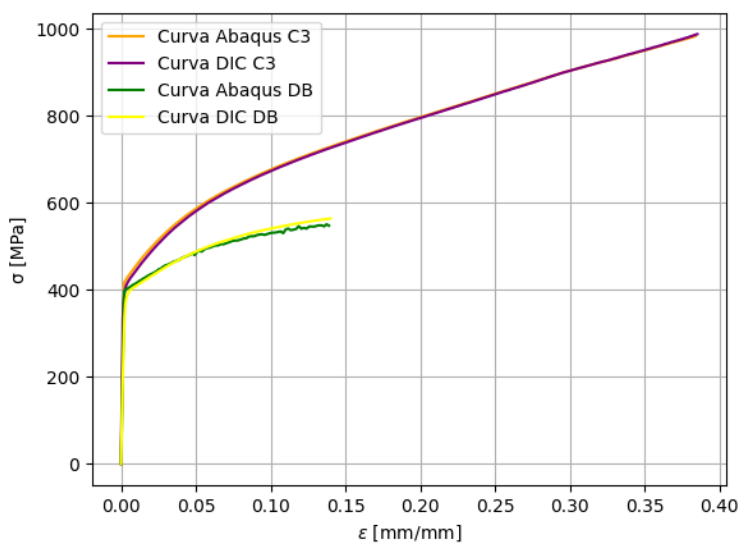


Figura 3.4: Confronto curve reali sperimentali e simulate: trazione e compressione

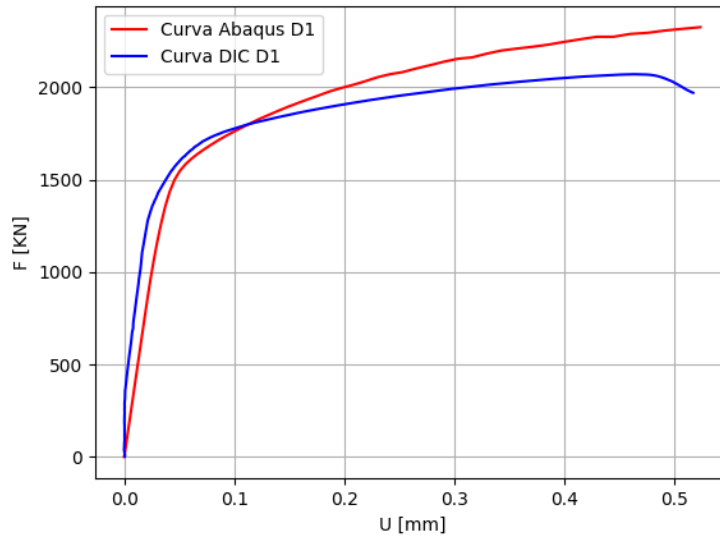


Figura 3.5: Confronto curve reali sperimentali e simulate: taglio puro

Si può osservare come le curve in trazione e compressione (figura 3.4) coincidono perfettamente con le curve ottenute dalla simulazione numerica, mentre per il caso di taglio puro (figura 3.5) nonostante non ci sia una perfetta corrispondenza comunque si può notare il medesimo andamento.

Di seguito viene riportata un'immagine che mette a confronto la mappa di deformazione estratta dalla DIC con un'immagine termografica e la mappa di deformazione ottenuta dalla simulazione numerica corrispondenti all'incirca allo stesso stato tensionale (Figura 3.6).

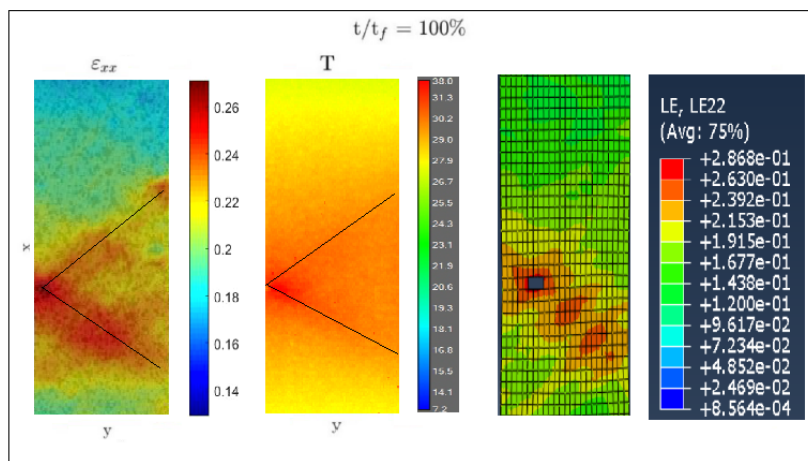


Figura 3.6: Confronto mappa di deformazione, immagine termografica e simulazione numerica

3.5.2 Estrazione dati

Riportiamo i dati estratti dall'analisi numerica in Abaqus sotto forma di curve "stress-strain" e mappe di deformazione per i provini DB, C3, D1, D2, T1-8 e T2-6.

Nel seguente grafico viene riportato il risultato della simulazione numerica per il provino DB (Figura 3.7). E' possibile notare del rumore dovuto a una non perfetta sincronia tra i dati forniti ad Abaqus e gli "step" indicato per la simulazione.

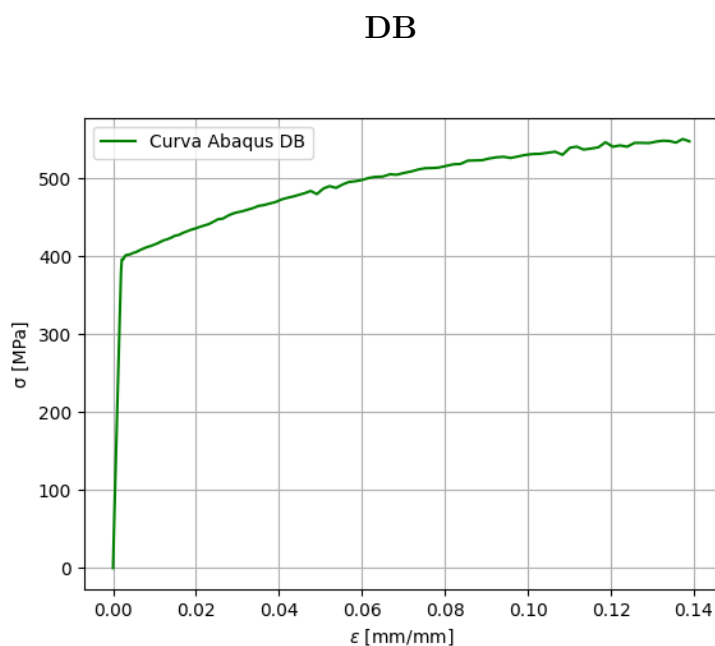


Figura 3.7: Curva reale Abaqus: provino DB

Di seguito vengono riportate le mappa di deformazione del provino DB rispettivamente a 0%, 50% e 100% della deformazione lungo l'asse y (LE22).

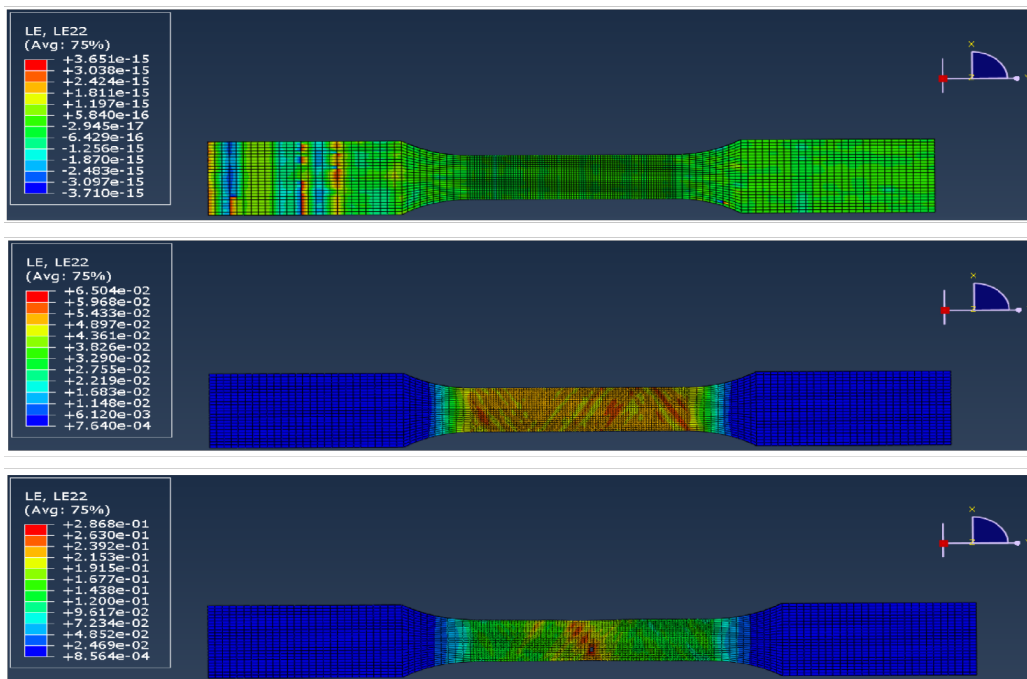


Figura 3.8: Mappa di deformazione simulazione numerica: provino DB

Nel seguente grafico viene riportato il risultato della simulazione numerica per il provino C3 (Figura 3.9).

C3

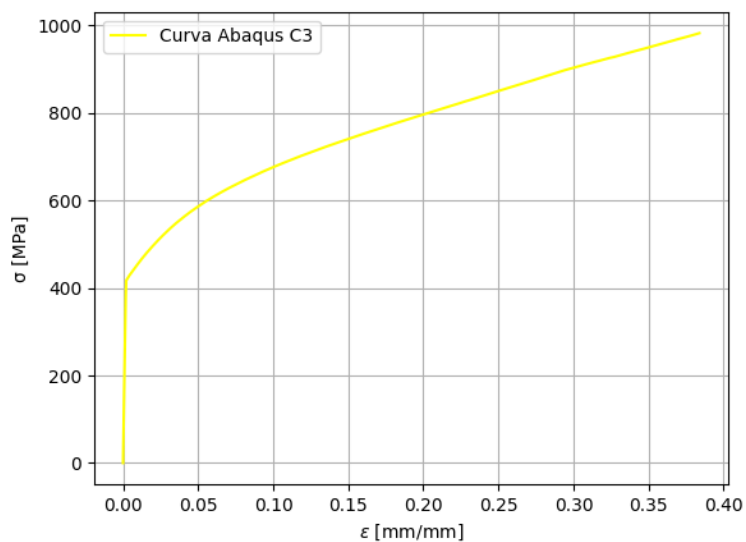


Figura 3.9: Curva reale Abaqus: provino C3

Di seguito vengono riportate le mappa di deformazione del provino C3 rispettivamente a 0%, 50% e 100% della deformazione lungo l'asse y (LE22).

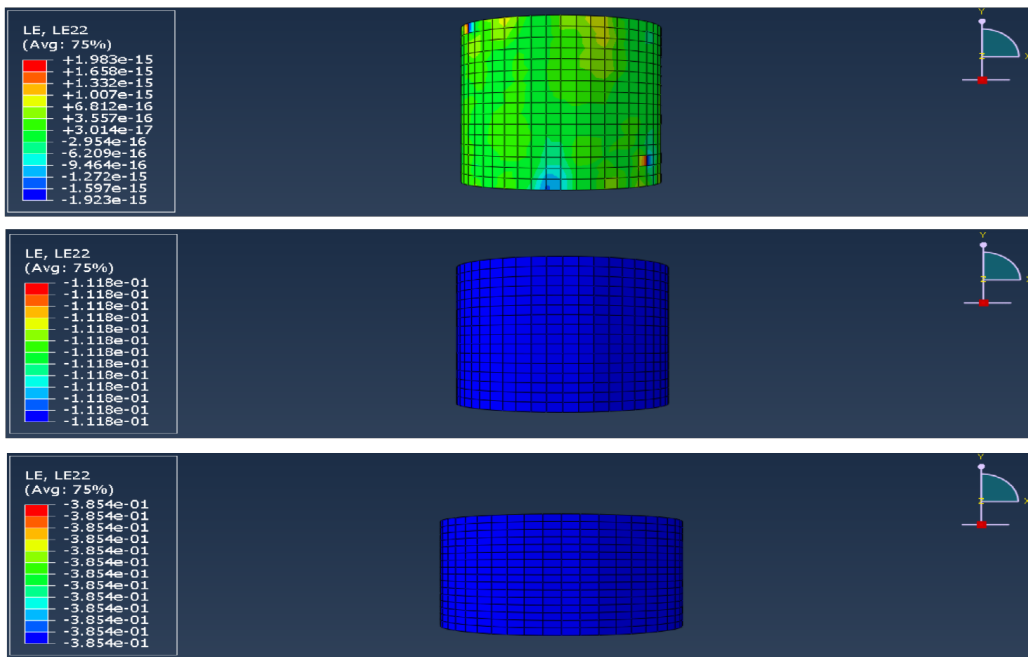


Figura 3.10: Mappa di deformazione simulazione numerica: provino C3

Nel seguente grafico viene riportato il risultato della simulazione numerica per il provino D1 si può notare che in questo caso si è preferito estrarre i dati di forza spostamento indispensabili per la fase di validazione nella quale il confronto avviene in riferimento a queste grandezze (Figura 3.11).

D1

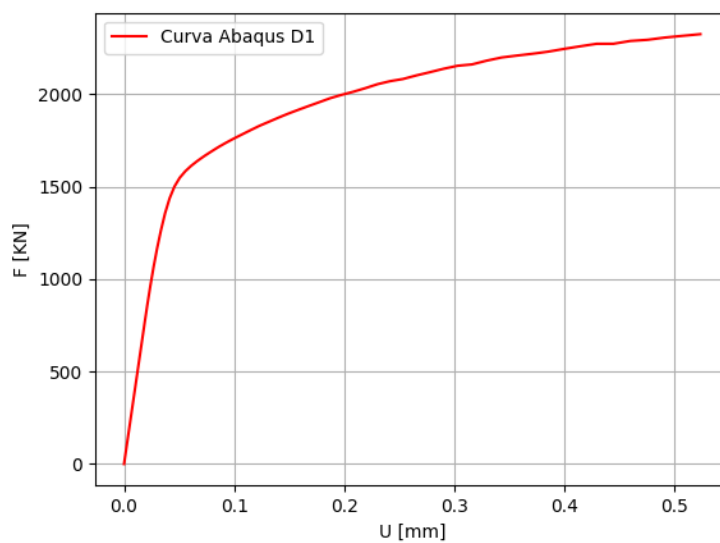


Figura 3.11: Curva reale Abaqus: provino D1

Di seguito vengono riportate le mappa di deformazione del provino D1 rispettivamente a 0%, 50% e 100% della deformazione lungo l'asse y (LE22). Come già evidenziato la mesh nelle zone dei raccordi è di tipo tetraedrico.

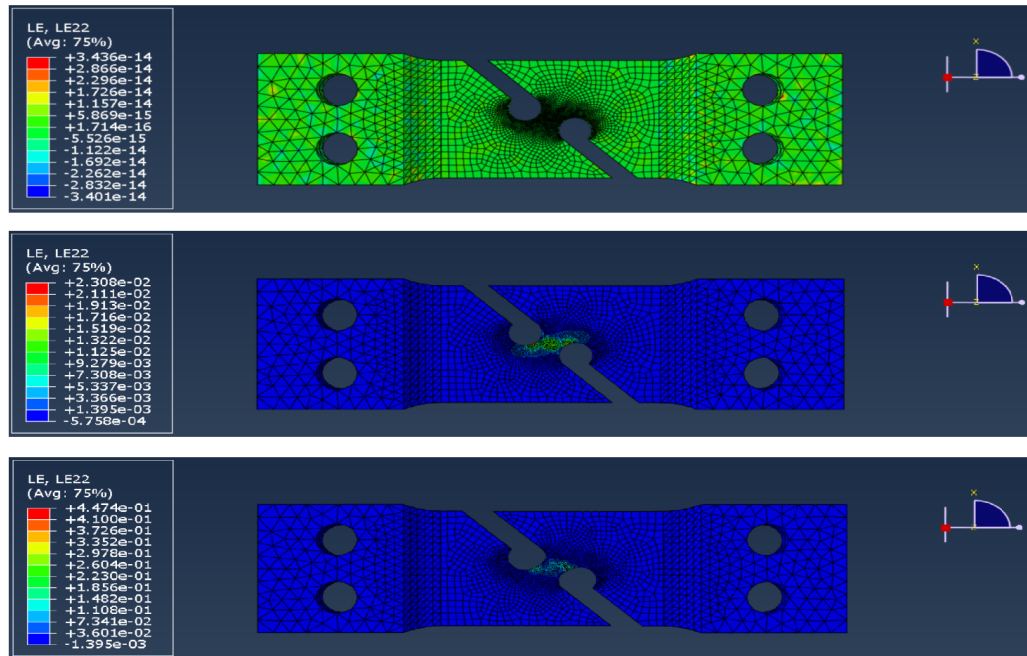


Figura 3.12: Mappa di deformazione simulazione numerica: provino D1

Nel seguente grafico viene riportato il risultato della simulazione numerica per il provino D2 si può notare che in questo caso si è preferito estrarre i dati di forza spostamento indispensabili per la fase di validazione nella quale il confronto avviene in riferimento a queste grandezze (Figura 3.13).

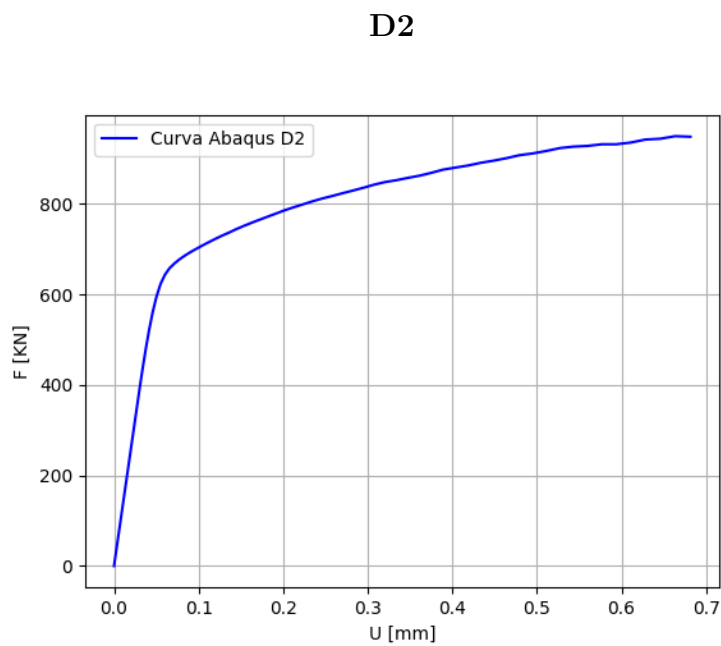


Figura 3.13: Curva reale Abaqus: provino D2

Di seguito vengono riportate le mappa di deformazione del provino D2 rispettivamente a 0%, 50% e 100% della deformazione lungo l'asse y (LE22). Come già evidenziato la mesh nelle zone dei raccordi è di tipo tetraedrico.

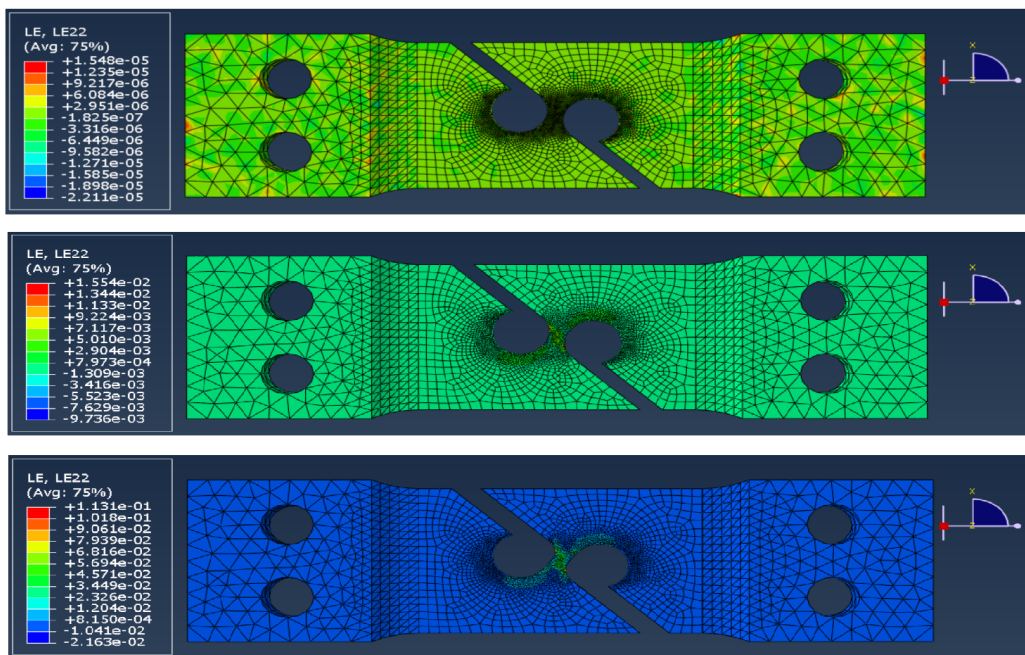


Figura 3.14: Mappa di deformazione simulazione numerica: provino D2

Nel seguente grafico viene riportato il risultato della simulazione numerica per il provino T1-8 si può notare come rispetto alle precedenti prove di trazione nei provini ad alta triassilità sia più evidente la fase di snervamento (Figura 3.15).

T1-8

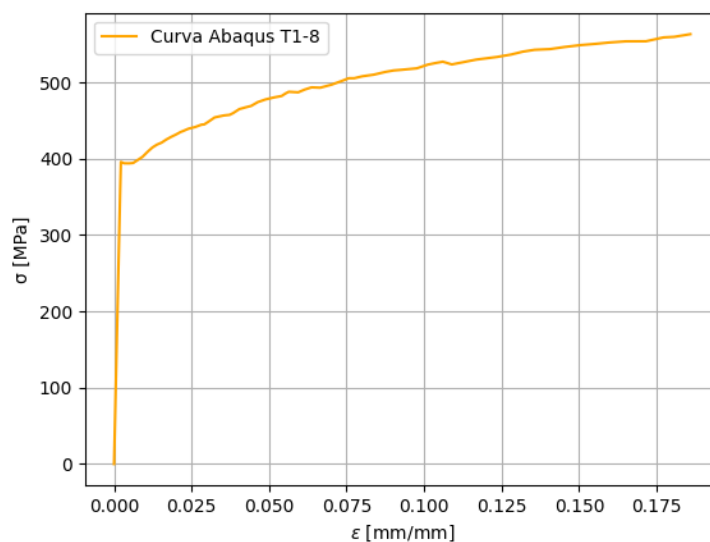


Figura 3.15: Curva reale Abaqus: provino T1-8

Di seguito vengono riportate le mappa di deformazione del provino T1-8 rispettivamente a 0%, 50% e 100% della deformazione lungo l'asse y (LE22).

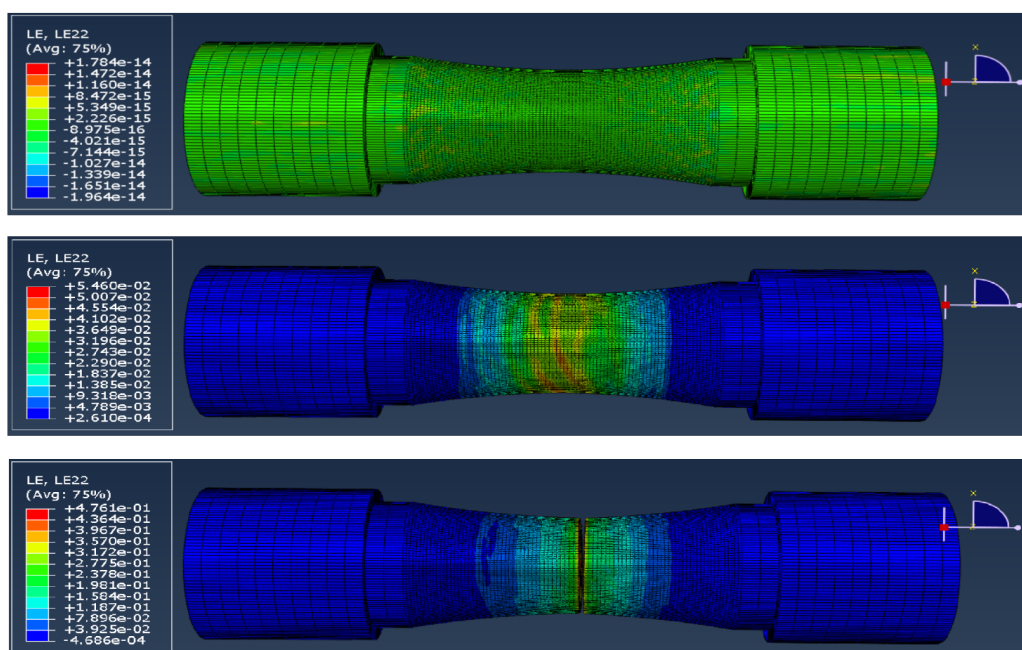


Figura 3.16: Mappa di deformazione simulazione numerica: provino T1-8

Nel seguente grafico viene riportato il risultato della simulazione numerica per il provino T2-6 si può notare come rispetto alle precedenti prove di trazione nei provini ad alta triassilità sia più evidente la fase di snervamento (Figura 3.17).

T2-6

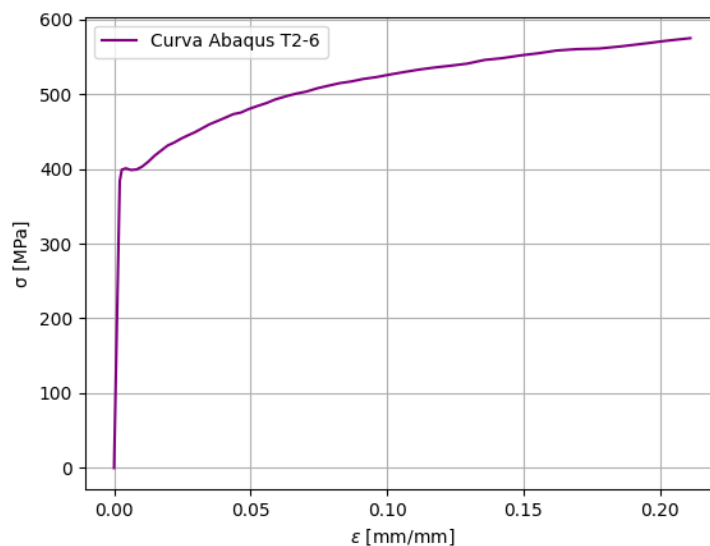


Figura 3.17: Curva reale Abaqus: provino T2-6

Di seguito vengono riportate le mappa di deformazione del provino T2-6 rispettivamente a 0%, 50% e 100% della deformazione lungo l'asse y (LE22).

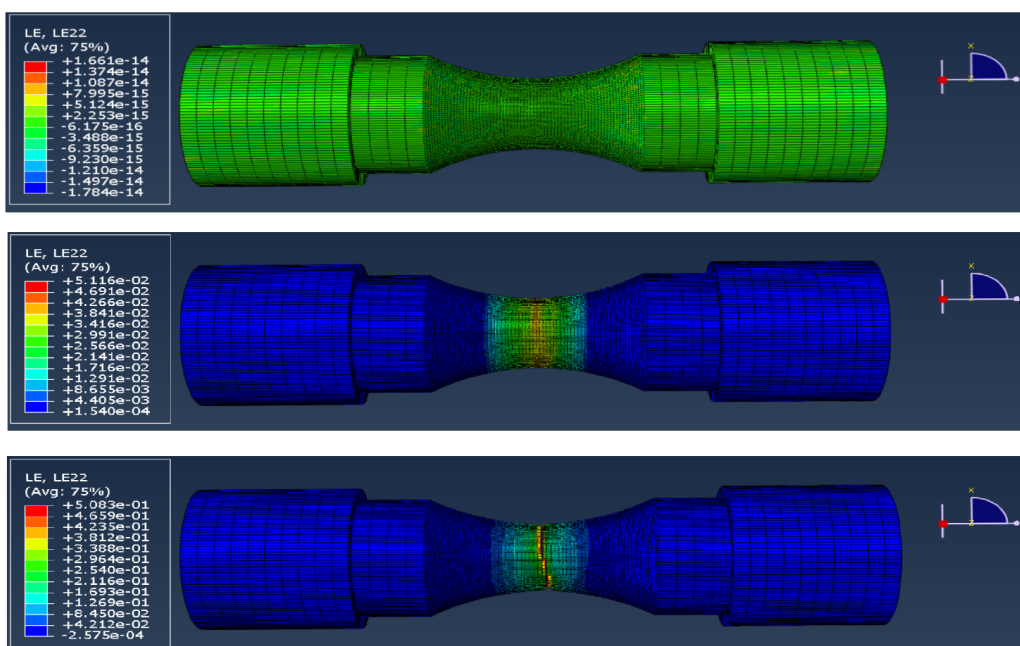


Figura 3.18: Mappa di deformazione simulazione numerica: provino T2-6

Capitolo 4

Conclusioni

I risultati ottenuti nei test sperimentali evidenziano che le caratteristiche meccaniche della SSFDI sono migliori della gran parte degli acciai strutturali ad uso comune e paragonabili a quelle di alcuni acciai a medio contenuto di carbonio (Figura 4.1).

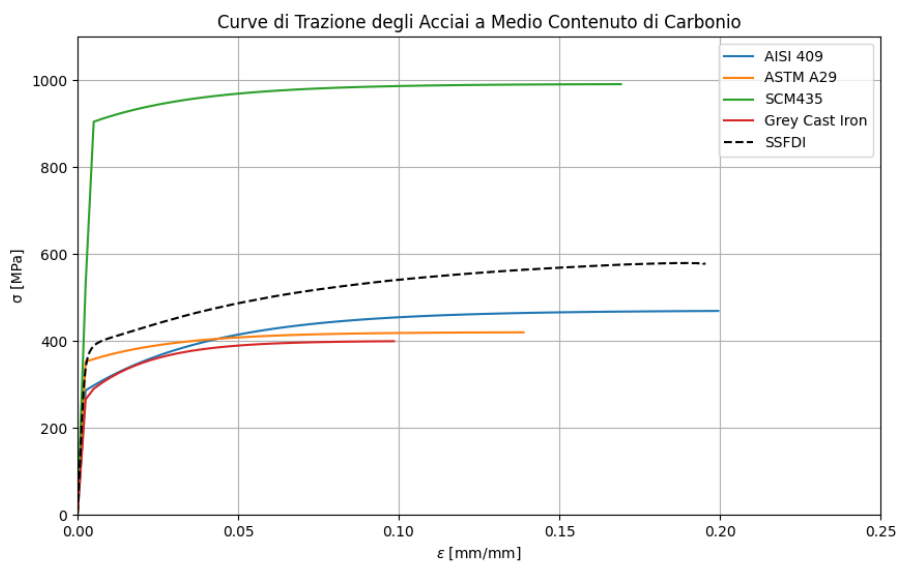


Figura 4.1: Curve trazione compressione: acciaio vs SSFDI

Le curve del grafico sono state tracciate considerando tre tipologie di acciai a medio contenuto di carbonio ($0.3 < C\% < 0.5$) con le seguenti caratteristiche (Tabella 4.1):

Tabella 4.1: Proprietà meccaniche di acciai con $0.3 < C\% < 0.5$

Materiale	Modulo di Elasticità (GPa)	Resistenza alla Trazione (MPa)	Limite di Snervamento (MPa)	Allungamento (%)
AISI 409	220	470	280	20
ASTM A29	205	420	350	14
SCM435	210	991	902	17

La curva in rosso fa riferimento ad una generica ghisa grigia mentre la curva tratteggiata riporta il comportamento in trazione delle SSF-DI. Possiamo quindi affermare che tale ghisa potrebbe sostituire gran parte degli acciai permettendo di avere risparmi economici anche importanti.

Dalle prove in temperatura è stato riscontrato un comportamento anomalo infatti all'aumentare della temperatura un materiale duttile come le SSFDI avrebbe dovuto mostrare un allungamento della fase plastica (Figura 4.2).

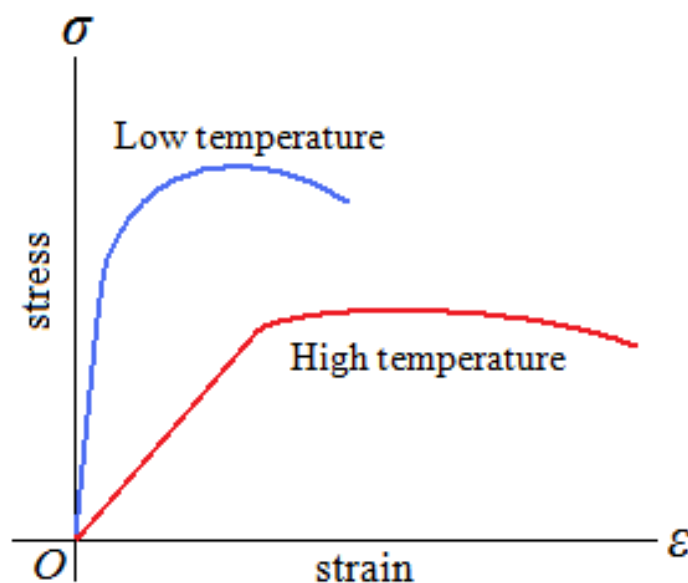


Figura 4.2: Relazione tra bassa temperatura e alta temperatura. Immagine tratta da Sito Web

Un comportamento che si manifesta invece solo una volta raggiunti i 600°C dove si osserva non più una rottura di schianto ma duttile.

Per quanto riguarda l'analisi numerica la procedura di validazione attuata conferma la bontà delle scelte effettuate per la modellazione del materiale e in particolare modo riguardo la scelta del modello "Cast Iron Plasticity".

I risultati ottenuti dall'analisi numerica potrebbero poi essere utilizzati per effettuare ulteriori valutazioni rispetto al rapporto tra triassialità e deformazione

plastica a rottura con l'obiettivo di definire la superficie di frattura del materiale (Figura 4.3).

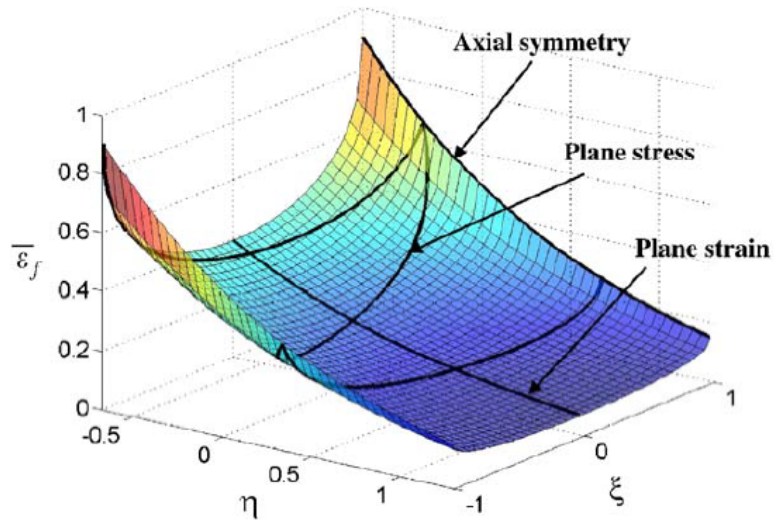


Figura 4.3: Superficie di Frattura. Immagine tratta da Articolo scientifico

La precedente immagine rappresenta una generica superficie di frattura nello spazio della triassialità, dello stress e della variabile di stato deviatorica. Si può notare inoltre il posizionamento delle linee corrispondenti allo stato asimmetrico, alla deformazione piana e allo stato di stress piano.

Il singolare comportamento mostrato nelle prove in temperatura sottolinea ancor di più l'importanza di definire tale superficie.

Bibliografia

- [1] W. Nicodemi. *Acciai e leghe non ferrose*. Milano: Zanichelli, 2000.
- [2] S. Barella e A. Gruttadauria. *Metallurgia e materiali non metallici*. Bologna: Esculapio, 2016.
- [3] P. Ferro D. A. Cendón F. Berto. «Microstructure and Tensile Properties». In: *Strength of Materials* 55 (2023), pp. 775–880.
- [4] C. Vergari P. Pourcelot L. Holden B. Ravary-Plumioen G. Gerard P. Laugier D. Mitton e N. Crevier-Denoix. «Modification of Silicon Microsegregation in Solid-Solution-Strengthened Ductile Iron by Alloying with Aluminum». In: *International Journal of Metalcasting* 14 (2020), pp. 1105–1114.
- [5] C. Vergari P. Pourcelot L. Holden B. Ravary-Plumioen. «True stress and Poisson’s ratio of tendons during loading». In: *Journal of biomechanics* 44 (2011), pp. 719–724.
- [6] S. Kalpakjian e S. R. Schmid. *Tecnologia meccanica*. Milano-Torino: Pearson, 2021.
- [7] G. Pitarresi e E. Patterson. «A review of the general theory of thermoelastic effect». In: *Journal of Strain Analysis for Engineering Design* 38 (2003), pp. 405–417.
- [8] D. Lecompte H. Sol J. Vantomme e A. Habraken. «Analysis of speckle patterns for deformation measurements by DIC». In: *roceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* 6341 (2006).
- [9] *Getting Started With Abaqus*.
- [10] Alessandro Rivola. «Dinamica delle macchine Lm». Tesi di dott. Università di Bologna, 2012.
- [11] J Chakrabarty. *Applied Plasticity*. New York: Springer, 2000.
- [12] *Cast iron plasticity, Abaqus 6.6*.