



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**Studio del comportamento meccanico di acciai per
stampaggio**

**Study of the mechanical behaviour of stamping
steels**

Relatore:

Prof. Archimede Forcellese

Tesi di laurea di:

Matteo Tiberi

Correlatore:

Prof. Michela Simoncini

Dott. Luciano Greco

Anno Accademico 2021-2022

Alla mia famiglia e ai miei amici

Il presente lavoro è stato svolto presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche.

Giunto a conclusione di questo percorso di studi, desidero ringraziare il Prof. Forcellese per la possibilità che mi ha offerto e per la sua continua disponibilità, la Prof. Simoncini per avermi aiutato a risolvere tutte le problematiche che si sono presentate e per avermi dato le spiegazioni di cui necessitavo ed il Dottorando Greco Luciano per avermi seguito durante tutto lo svolgimento del tirocinio e della tesi e per essere stato un continuo punto di riferimento.

Vorrei ringraziare inoltre tutte le persone che mi sono state vicine in questi anni e soprattutto in questo ultimo periodo difficile. Desidero ringraziare con il cuore mio padre Sauro per avermi trasmesso forza ed energia quando ero demoralizzato o quando si presentava una difficoltà che sembrava insuperabile, mia madre Maria per l'affetto e per avermi insegnato a non arrendermi mai, mia sorella Silvia per l'amore incondizionato che mi ha sempre dimostrato, sei sempre stata la persona su cui ho potuto fare riferimento in ogni momento difficile, e tutta la mia famiglia per avermi dato il sostegno di cui necessitavo ed essere stati sempre presenti in questo percorso formativo duro e impegnativo. Desidero ringraziare anche tutti i miei amici per essermi stati vicino, anche con una semplice risata mi avete aiutato a rendere più leggero questo cammino. Ringrazio tutti coloro che hanno condiviso la loro vita con la mia, anche per breve tempo, e tutte le persone che ho perso nel tragitto che mi hanno reso una persona felice e che mi hanno donato il loro amore e la loro amicizia. Grazie a tutti per essere stati presenti nel bene e nel male, per essere stati miei complici e per ogni momento che abbiamo passato insieme; porterò sempre tutto con me nel cuore. Infine vorrei ringraziare me stesso per i sacrifici, per l'ostinazione e la perseveranza che mi hanno permesso di arrivare fino a qui. Con questo lavoro chiudo un percorso di studi universitario e mi preparo ad affrontarne un altro, con la consapevolezza di essere fortunato ad avere vicino a me persone così speciali.

Ancona, Ottobre 2022

Matteo

Indice

Introduzione	III
Capitolo 1: L'acciaio	1
1.1 PROPRIETÀ FISICHE E MECCANICHE	2
1.2 APPLICAZIONI	5
1.3 ACCIAIO DX54D	6
Capitolo 2: Proprietà meccaniche di un materiale metallico	9
2.1 PROVA DI TRAZIONE	9
2.1.1 I PROVINI	10
2.1.2 CURVA DEI VALORI NOMINALI	13
2.1.3 CURVA DEI VALORI REALI	20
2.2 ANISOTROPIA	25
Capitolo 3: Procedure sperimentali	28
3.1 ATTREZZATURA NECESSARIA	28
3.2 I PROVINI	29
3.3 PROVA DI TRAZIONE A ROTTURA	30

3.4 PROVA DI TRAZIONE INTERROTTA	32
Capitolo 4: Risultati sperimentali e discussione	34
4.1 PROPRIETÀ MECCANICHE DI UN MATERIALE METALLICO	34
4.2 ANISOTROPIA	40
Conclusioni	43
Riferimenti bibliografici	45

Introduzione

L'acciaio è una lega ferrosa composta principalmente da ferro e carbonio, con una percentuale di quest'ultimo non superiore al 2,11% poiché oltre tale limite le proprietà del materiale cambiano e la lega assume la denominazione di ghisa. Oggi l'acciaio è di gran lunga il materiale più usato al mondo per via delle sue notevoli proprietà meccaniche. Le principali applicazioni le troviamo nel settore dell'edilizia e delle infrastrutture, nell'industria chimica e petrolchimica, nell'estrazione e distribuzione degli idrocarburi, nelle centrali termiche, nell'industria meccanica e manifatturiera, ecc. Un settore in cui l'acciaio riveste un ruolo molto importante è quello automobilistico poiché costituisce in media tra il 50% e il 70% del peso di un'autovettura; inoltre ha una posizione centrale anche nella industria ferroviaria (sia nella produzione dei treni che in quella delle rotaie), navale e aeronautica. Una delle principali sfide al giorno d'oggi è quella di diminuire il peso del veicolo, in modo da ridurre il consumo di carburante: dal 2009 alcune case automobilistiche hanno iniziato a utilizzare acciai riciclabili AHSS (Advanced High-Strength Steels) riducendo il peso della vettura di oltre il 16%. Oggi la FSV (Future Steel Vehicle) vanta di aver raggiunto oltre il 35 % di riduzione di massa della vettura e fino al 70% del contenimento dei gas inquinanti.

Le proprietà dell'acciaio possono variare enormemente in base alla composizione chimica e alla presenza di impurità (come il fosforo e lo zolfo), pertanto per migliorare una o più proprietà l'acciaio può essere legato con cromo, rame, molibdeno, cobalto ecc. In generale le proprietà fisiche come la densità, la conduttività elettrica e termica non cambiano molto da una lega all'altra, tuttavia le proprietà meccaniche come resistenza, duttilità e durezza possono invece subire notevoli variazioni.

Generalmente l'acciaio presenta le seguenti proprietà meccaniche:

- buona resistenza allo snervamento e alla rottura a trazione;
- elevata conducibilità elettrica e termica;

- elevata resistenza alla corrosione nel caso di acciai inossidabili;
- buona resistenza al fuoco (l'acciaio non brucia e non conduce il fuoco ma le sue proprietà meccaniche variano sensibilmente con la temperatura);
- grande deformabilità e durezza.

Per valutare le proprietà meccaniche di un materiale metallico solitamente si esegue la prova di trazione che consiste nel sottoporre il provino a uno sforzo di trazione generalmente fino alla rottura. Quest'ultima è la più importante e usata tra le prove meccaniche distruttive e fornisce, oltre alle proprietà meccaniche, anche la descrizione quantitativa del comportamento alla deformazione plastica. Misurando la forza applicata e l'allungamento del provino istante per istante e trasformando quest'ultime in tensione e deformazione, i risultati che la prova fornisce sono la curva dei valori nominali e reali di tensione e deformazione da cui si ricavano le varie proprietà meccaniche.

Nel presente studio si analizzano le più importanti proprietà meccaniche che si possono ricavare dalla prova di trazione e l'anisotropia, cioè il diverso comportamento del materiale in differenti direzioni, valutata con la prova di trazione interrotta.

Il materiale oggetto dello studio è stato l'acciaio DX54D, uno degli acciai usati per la produzione di pezzi per deformazione plastica, utilizzabile anche nelle imbutiture più profonde.

Capitolo 1

L'acciaio

L'acciaio è il materiale più usato al giorno d'oggi e trova applicazione in un notevole numero di settori anche molto diversi tra loro.

Nel corso della storia l'uomo ha fatto uso di diversi tipi di metallo ma è con la scoperta del ferro e con l'inizio dell'"età del ferro" che l'umanità si avvia verso la civilizzazione. L'acciaio iniziò ad essere utilizzato già diverse centinaia di anni fa anche se il vero e proprio sviluppo si ebbe nella seconda rivoluzione industriale, durante la quale la produzione mondiale passò da meno di 1 milione di tonnellate nel 1879 a quasi 30 milioni di tonnellate nel 1900. Dal 1900 la produzione di acciaio è sempre stata in aumento anche grazie all'introduzione sul mercato dell'acciaio inossidabile che ebbe un notevole impatto sull'economia (Figura 1.1) [1,2].



Figura 1.1 – Aumento della produzione di acciaio dal 1900 agli anni 2000

Oggi nel mondo si producono oltre 1800 milioni di tonnellate di acciaio in un anno, ottenute sia con il ciclo integrale con l'affinazione della ghisa dall'altoforno, sia con la fusione di rottami

ferrosi, che sono successivamente lavorati tramite diversi processi di produzione industriale quali laminazione, estrusione, trafilatura, forgiatura e stampaggio.

Tra i principali produttori di acciaio al mondo abbiamo al primo posto la Cina, seguita poi da altri paesi come India, Giappone, Stati Uniti, Russia (Figura 1.2).

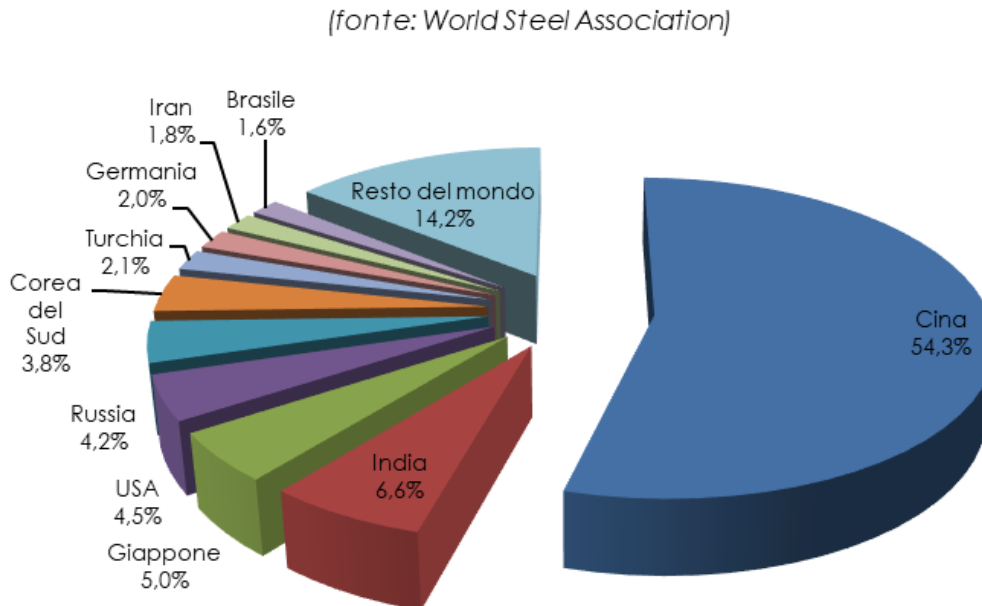


Figura 1.2 – Produzione mondiale di acciaio gennaio 2022

1.1 PROPRIETÀ FISICHE E MECCANICHE

Il ferro è uno dei principali elementi che costituiscono l'acciaio ed è molto abbondante e diffuso in natura, essendo presente nella crosta terrestre con una percentuale del 5%, collocandosi dopo l'ossigeno, il silicio e l'alluminio. Il ferro deve essere estratto tramite lavorazioni specifiche dai minerali ferrosi poiché non si trova in forma metallica in natura. Tra i minerali di ferro usati nell'industria siderurgica troviamo la pirite (FeS_2), il ferro spatico o siderite (FeCO_3), l'ematite bruna o limonite ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), l'ematite rossa o ferro oligisto (Fe_2O_3) ed infine il ferro magnetico o magnetite, in cui la percentuale teorica del ferro è pari a 72.4%, più alta rispetto agli altri minerali [2].

Il ferro puro è polimorfo cioè si può presentare sotto forme molto diverse tra loro. Possiamo avere tre forme differenti:

- ferro α con reticolo cubico a corpo centrato stabile fino a 912°C , magnetico fino a 770°C (punto di Curie);
- ferro γ con reticolo cubico a facce centrate, stabile tra 912°C e 1394°C ;
- ferro δ con reticolo cubico a corpo centrato, stabile tra 1394°C e la temperatura di fusione del ferro (1538°C).

Il ferro puro ha una densità di 7870 kg/m^3 , molto più elevata rispetto a quella del magnesio (1739 kg/m^3), una resistenza meccanica alla rottura di $180\text{-}290\text{ MPa}$ e una resistenza meccanica a snervamento di $100\text{-}170\text{ MPa}$. Inoltre ha un allungamento percentuale del $40\text{-}50\%$, una durezza Brinnell di $45\text{-}55$ e un modulo di Young di 210 GPa . Il ferro puro, quindi, è un metallo poco resistente: per questo motivo si aggiunge quantomeno il carbonio (inferiore al 2.11%) ottenendo l'acciaio.

L'acciaio è il metallo più usato al mondo (circa l' 80%) e può essere fabbricato con specifiche proprietà meccaniche poiché ha un intervallo di resistenza che va da circa $200\text{-}300\text{ MPa}$ a 2500 MPa . Oltre alla buona resistenza a rottura e snervamento, l'acciaio è molto deformabile e possiede grande durezza, è resistente al fuoco cioè non brucia e non conduce il fuoco ma le sue proprietà meccaniche diminuiscono notevolmente con l'aumento della temperatura. Possiede una conducibilità termica che può variare da 10 a 100 W/mK circa e un coefficiente di dilatazione termica che varia tra $9\text{-}27\cdot 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Un'altra proprietà importante è il coefficiente di Poisson a cui solitamente si attribuisce un valore fisso di $\nu = 0,3$.

A seconda della composizione chimica delle leghe ferro-carbonio le proprietà possono variare notevolmente [2]:

- il carbonio può variare da $0,008$ a $2,11\%$: ad una percentuale maggiore corrisponde un aumento di resistenza meccanica, durezza, resistenza all'usura, fusibilità e temprabilità. Una percentuale elevata di carbonio provoca però una diminuzione di resilienza, plasticità a freddo e di saldabilità;
- il cromo ha un ruolo essenziale poiché una percentuale superiore al $12\text{-}13\%$ rende l'acciaio inossidabile, in quanto si forma uno strato di ossido non poroso sulla superficie che protegge il materiale dalla corrosione. Inoltre il cromo può contribuire ad aumentare la resistenza meccanica, ad usura e la durezza;

- il nichel aumenta la resistenza e la durezza dopo la bonifica e può essere aggiunto all'acciaio inox poiché contribuisce ad incrementare la resistenza a corrosione in ambiente neutro o leggermente ossidante (in questo caso può raggiungere percentuali molto elevate); inoltre stabilizza l'austenite a temperatura ambiente e, in opportune concentrazioni, può aumentare la duttilità e la formabilità;
- il molibdeno aumenta la resistenza a corrosione degli acciai inossidabili, in particolare quella da cloruri che si verifica in ambiente marino; inoltre aumenta la resistenza meccanica ad alta temperatura, quella a caldo e ad usura e viene usato in concentrazioni notevoli per produrre acciai per utensili;
- il silicio viene spesso utilizzato negli acciai per molle perché aumenta il limite di elasticità e innalza la resistenza a snervamento e il rapporto R_s/R ;
- il manganese aumenta il tasso di incrudimento in alte percentuali e stabilizza l'austenite a temperatura ambiente, aumenta la durezza e la resistenza ad usura. D'altra parte un acciaio ad alta percentuale di manganese ha lavorabilità nulla alle macchine utensili;
- il niobio e il tantalio sono essenziali negli acciai indurenti per precipitazione, aumentano la resistenza meccanica, a fatica, a corrosione e ad usura;
- il tungsteno aumenta la resistenza a rottura e la durezza, inoltre la sua percentuale è notevolmente elevata negli acciai rapidi per utensili.

È da evitare la presenza di zolfo, fosforo, idrogeno e ossigeno poiché questi ultimi aumentano la fragilità della lega e diminuiscono le proprietà meccaniche.

Le proprietà meccaniche inoltre dipendono molto dal tipo di trattamento termico che viene eseguito sull'acciaio. Alcuni dei trattamenti termici più importanti sono la tempra, il rinvenimento, la bonifica, la ricottura ecc. Nel corso della tempra degli acciai, che consiste nel riscaldamento a una data temperatura e successivo raffreddamento più o meno rapido, si forma martensite, una struttura ad elevata durezza e ad elevato carico di rottura. Poiché la tempra ha lo svantaggio di lasciare l'acciaio con una resilienza e tenacità piuttosto bassa, si sottopone l'acciaio al rinvenimento che ha lo scopo di ridurre la durezza, aumentando la tenacità e trasformando la martensite in martensite rinvenuta. La sequenza di tempra e successivo rinvenimento è detta bonifica.

Altri trattamenti importanti sono quelli di indurimento superficiale, che hanno lo scopo di ottenere strati superficiali ad elevata durezza, mantenendo adeguati valori di tenacità ed elevati valori di resistenza per sforzi di taglio e compressione a cuore. I due trattamenti di diffusione più importanti sono la carbocementazione e la nitrurazione. Il primo consiste nell'arricchimento

di carbonio fino a una percentuale prefissata, mentre il secondo consiste nella diffusione di azoto su materiali ferrosi a temperature comprese tra 500 e 570°C. Entrambi questi trattamenti hanno lo scopo di ottenere uno strato superficiale di elevata durezza, resistenza ad usura e fatica.

1.2 APPLICAZIONI

L'acciaio, offrendo proprietà così svariate, trova applicazione in un numero di settori molto vasto. Uno dei settori in cui l'utilizzo è più marcato è quello delle costruzioni e delle infrastrutture: infatti negli ultimi decenni, grazie alla resistenza alle sollecitazioni e agli agenti atmosferici, l'acciaio è un materiale di primaria importanza nella industria edile per la costruzione di ponti, viadotti, palazzi, grattacieli ecc. Un tipo di acciaio usato in alcune infrastrutture è l'acciaio CORTEN (Corrosion-Resistant Tensile-Strength), che ha il vantaggio di essere molto resistente alla corrosione adoperata dai fenomeni atmosferici. Questa caratteristica è dovuta alla presenza di rame, poiché si forma uno strato di ossido di ferro non poroso (fenomeno della passivazione) che protegge il materiale da ulteriori perdite [3]. L'acciaio presenta un colore rossastro e trova applicazione nel Golden Gate a San Francisco, in uno stadio a Honolulu (Aloha Stadium) e in molte altre opere architettoniche.

Un altro settore in cui l'acciaio è notevolmente utilizzato è quello dei trasporti, occupando una posizione preminente non solo nell'industria ferroviaria per la produzione di treni e rotaie, ma anche in quella aeronautica e navale. Anche nell'industria automobilistica resta il materiale di gran lunga più usato, costituendo in media tra il 50 e il 70% del peso di una autovettura.

L'acciaio inoltre ricopre un ruolo importante sia nell'estrazione e distribuzione degli idrocarburi (essendo usato per la costruzione di piattaforme e trivelle negli impianti di estrazione oltre che per gasdotti e oleodotti), sia nell'industria chimica e petrolchimica, in cui è impiegato per costruire tubazioni capaci di resistere all'azione corrosiva dei fluidi trasportati e a condizioni di temperatura e pressione elevate.

Nell'industria meccanica l'acciaio è utilizzato per la produzione di alberi, cuscinetti, ingranaggi, cilindri, stampi, cesoie, punzoni, seghe e altri componenti di macchinari in ogni ambito industriale. Nelle centrali invece serve a realizzare i principali componenti per produrre energia elettrica, le caldaie, le turbine, i condensatori ecc.

Infine, l'acciaio trova vasto utilizzo anche nel settore della conservazione alimentare poiché garantisce un elevato livello di igiene, nel settore degli elettrodomestici (frigoriferi, lavatrici, lavastoviglie e condizionatori) e in molti oggetti di uso quotidiano come posate, pentole, coltelli da cucina, ecc.

1.3 ACCIAIO DX54D

Il materiale oggetto di studio è stato l'acciaio DX54D, considerato come uno dei migliori acciai per imbutitura e piegatura a freddo.

La classificazione degli acciai è stabilita dalla norma UNI EN 10027-1:2016 [4] che prevede che la designazione degli acciai avvenga in modo diverso a seconda del gruppo a cui l'acciaio appartiene. L'acciaio DX54D rientra nella designazione del primo gruppo cioè la designazione in base all'impiego e alle caratteristiche meccaniche o fisiche. La prima lettera (D) corrisponde a prodotti piani per formatura a freddo, la seconda lettera (X) corrisponde invece ad un prodotto con stato di laminazione non specificato. L'ultima lettera (D) indica un rivestimento applicato mediante immersione a caldo, mentre i numeri degli acciai DX possono variare da 51 a 57: più il numero è grande, più l'acciaio si presta ad essere formato a freddo. Il 54 indica "special deep drawing quality" quindi un acciaio che si presta molto alla formatura a freddo [5]. In generale, l'acciaio DX54D presenta la seguente composizione chimica (Tabella 1.1):

Tabella 1.1 – Composizione chimica dell'acciaio DX54D

Elemento chimico	Percentuale (max)
Carbonio (C)	0.12
Silicio (Si)	0.5
Manganese (Mn)	0.6
Fosforo (P)	0.1
Zolfo (S)	0.045
Titanio (Ti)	0.3

L'acciaio DX54D è un acciaio a basso tenore di carbonio e, per effetto della sua composizione, ha delle proprietà meccaniche più elevate rispetto al semplice acciaio non legato. Nella Tabella 1.2 sono riassunte alcune delle proprietà meccaniche più importanti con i rispettivi valori:

Tabella 1.2 – proprietà dell'acciaio DX54D

Rivestimento	Re (MPa)	Rm (MPa)	A80 min %			r90 min			n90 min	
	min- max	min- max	t=0.5	0.5< t< 0.7	t>0.7	t=0.7	0.7< t< 1.5	t>1.5	t= 0.7	t> 0.7
+Z, +ZA	120-220	260-350	32	34	36	1.6	1.6	1.4	0.18	0.18
+ZF	120-220	260-350	30	32	34	1.4	1.4	1.2	0.18	0.18
+AZ	120-220	260-350	32	34	36	-	-	-	-	-
+AS	120-220	260-350	30	32	34	1.2	1.4	1.2	0.17	0.18

dove:

Re = Yield Strength, Rm = Tensile Strength, A80 = elongation, r90 = Plastic Strain Ratio,
n90 = Strain Hardening Exponent, t = thickness

Come si vede dalla tabella, si applica un rivestimento in modo da migliorare la resistenza alla corrosione. Le sigle dei rivestimenti si riferiscono ai diversi tipi che si possono adoperare: Z se è solo zinco, ZA se è una lega composta da zinco e alluminio, ZF se è una lega con zinco e ferro, AZ se è una lega composta da alluminio e zinco e infine AS se è una lega composta da alluminio e silicio. La protezione catodica alla corrosione è direttamente proporzionale al suo spessore: un rivestimento spesso quindi darà maggior protezione rispetto a uno sottile, d'altra parte uno spessore sottile è richiesto in tutte le applicazioni dove si desidera una formabilità elevata.

L'acciaio DX54D è caratterizzato da limiti massimi di snervamento e di rottura ed allungamenti minimi garantiti, è uno degli acciai più formabili tra tutti gli acciai DX e può essere utilizzato nelle diverse lavorazioni a freddo, dagli stampaggi meno critici alle imbutiture più profonde.

Questo è dovuto al fatto che sono presenti elementi in lega che variano le proprietà meccaniche: i loro principali effetti, come descritto al paragrafo §1.1, sono l'aumento della durezza, del limite di snervamento e rottura, della tenacità e della resistenza a usura.

Lo zolfo è un elemento che può provocare una diminuzione della tenacità e peggiorare le caratteristiche meccaniche ma solitamente è inserito con il manganese (altrimenti è una impurezza) per aumentare la lavorabilità alle macchine utensili, poiché forma solfuri di manganese che minimizzano tale perdita.

Capitolo 2

Proprietà meccaniche di un materiale metallico

Le proprietà meccaniche di un materiale metallico possono essere ricavate da diverse prove: quella di trazione, quella di compressione ecc. La loro conoscenza è fondamentale per poter realizzare, ad esempio, un progetto di formatura plastica oppure per costruire un edificio in sicurezza. Alcune delle più importanti proprietà che si ricavano dalla prova di trazione sono: resistenza allo snervamento, resistenza a carico massimo, resistenza alla rottura, modulo di Young ecc.

2.1 PROVA DI TRAZIONE

La prova di trazione è la più importante e usata tra tutte le prove meccaniche distruttive e fornisce, oltre alle proprietà meccaniche, la descrizione quantitativa del comportamento alla deformazione plastica. In questa prova il provino, bloccato sulla macchina secondo diverse modalità, viene sottoposto a una sollecitazione di trazione (lo stato tensionale è il più semplice in assoluto) generalmente fino a rottura.

Il test è eseguito ad una temperatura tra 10°C e 35°C se non altrimenti specificato; invece i test eseguiti in condizioni controllate devono essere svolti con una temperatura di 23°C ± 5°C.

In una macchina per la prova di trazione si possono distinguere due parti: un telaio chiuso e i trasduttori di segnale (Figura 2.1). Il telaio chiuso è costituito da una parte fissa (traversa fissa) e una parte mobile (traversa mobile); nella zona di mezzieria delle due traverse sono alloggiato le due teste di afferraggio del provino. La traversa mobile è solitamente azionata da un dispositivo idraulico o elettromeccanico e il movimento relativo delle due traverse consente di sollecitare il provino a trazione. L'utilizzo di azionamenti idraulici è sicuramente il più diffuso poiché permette di ottenere leggi di spostamento diversificate e un controllo maggiore sulle

stesse. Durante l'esecuzione della prova si misura, istante per istante, sia la forza applicata sul provino (P), sia l'allungamento dello stesso ($\Delta L=L-L_0$ dove L_0 è la lunghezza iniziale del tratto utile del provino indeformato e L è la lunghezza dello stesso dopo aver subito la deformazione) nella direzione di applicazione del carico. Si utilizzano diversi trasduttori di segnale per misurare:

- la forza applicata (cella di carico che è disposta in serie con il provino);
- lo spostamento della traversa mobile (questo trasduttore è fondamentale anche ai fini del controllo del moto della traversa);
- l'effettivo allungamento subito dal provino (estensometro).

Diagrammando su due assi istante per istante i segnali misurati dalla cella di carico e dall'estensometro, si determina il diagramma forza-allungamento. Da quest'ultimo è possibile, mediante semplici calcoli, ottenere il diagramma sforzo-deformazione.

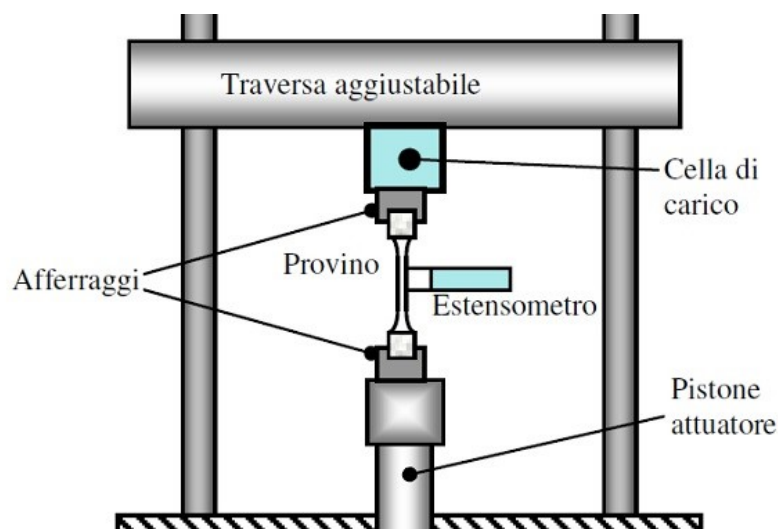


Figura 2.1 – Componenti della macchina usata per eseguire la prova di trazione

2.1.1 I PROVINI

La forma e le dimensioni del provino che deve essere testato sono vincolate dalla forma e dalle dimensioni del materiale metallico da cui il provino stesso è ricavato. Di solito il provino si ottiene dalla lavorazione di un campione del prodotto oppure tramite colata in pressione; prodotti con sezioni trasversali uniformi (barre, fili metallici ecc.) possono essere testati senza

essere lavorati. Le sezioni trasversali dei provini possono essere circolari, quadrate, rettangolari, anulari o, in casi speciali, anche altre sezioni trasversali uniformi. Si preferisce utilizzare provini per cui vale la relazione $L_0 = k * \sqrt{S_0}$, dove L_0 è la lunghezza del tratto utile originale, S_0 è l'area della sezione trasversale originale e k è un coefficiente a cui si assegna internazionalmente il valore 5,65 [6]. Se l'area della sezione trasversale è troppo piccola per soddisfare questa esigenza ($k = 5,65$), si utilizza un valore più elevato (preferibilmente 11,3) oppure un provino in cui non vale la relazione precedente. Inoltre la lunghezza del tratto utile L_0 non deve mai essere inferiore a 15 millimetri ed è necessario, in ogni caso, tenere in considerazione il fatto che usando una lunghezza L_0 minore di 20 millimetri l'incertezza sulla misurazione aumenta.

I provini che vengono lavorati devono includere un raggio di transizione tra le estremità bloccate e il tratto L_c (cioè il tratto in cui il provino ha una sezione trasversale S_0) se hanno differenti dimensioni (Figura 2.2). Le dimensioni del raggio di transizione sono importanti ed è raccomandato che queste siano definite nelle specifiche del materiale se non sono date dalla norma ISO 6892-1 [6]. La lunghezza del tratto a sezione costante L_c o, nel caso in cui non ci sia nessun raggio di transizione, la lunghezza libera tra le estremità bloccate deve sempre essere superiore alla lunghezza del tratto utile originale L_0 .

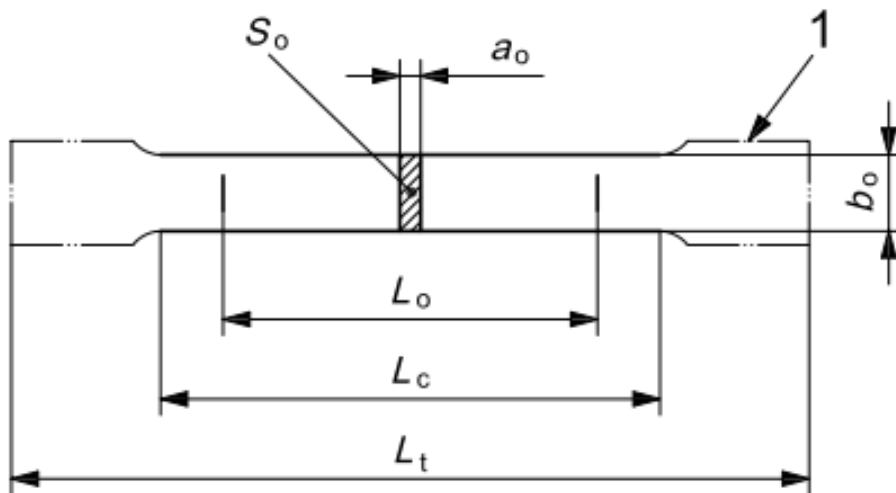


Figura 2.2 – Tipico provino con cui si esegue la prova di trazione



Le estremità in cui avviene il bloccaggio del provino possono essere di qualsiasi forma mentre l'asse del provino deve coincidere con l'asse di applicazione della forza.

Se il provino non è stato lavorato, la lunghezza libera tra le estremità bloccate deve essere sufficientemente grande affinché i segni per la misurazione siano a una distanza adeguata dalle estremità bloccate (si veda da allegato B ad E della norma ISO 6892-1 [6]). Anche in questo caso le dimensioni del raggio di transizione tra le estremità bloccate e la lunghezza L_c sono importanti e devono rientrare nello standard del prodotto. Le estremità di bloccaggio possono avere qualsiasi forma e il tratto a lunghezza L_c deve essere maggiore della lunghezza del tratto utile originale L_0 .

I tipi principali di provino sono definiti nell'allegato da B a E della norma ISO 6892-1 [6] in accordo con la forma e il tipo di prodotto, come mostrato in Tabella 2.1.

Tabella 2.1 – Diversi provini in accordo con il tipo di prodotto

Dimensions in millimetres

Type of product		Corresponding Annex
Sheets — Plates — Flats  Thickness a	Wire — Bars — Sections  Diameter or side	
$0,1 \leq a < 3$	—	B
—	< 4	C
$a \geq 3$	≥ 4	D
Tubes		E

Le dimensioni rilevanti del provino devono essere misurate a una sezione trasversale sufficiente, perpendicolare all'asse longitudinale nella regione centrale del tratto L_c del provino. Un minimo di tre sezioni trasversali è raccomandato: l'area S_0 sarà l'area media delle sezioni trasversali misurate e deve essere calcolata con misurazioni delle dimensioni appropriate. Ogni estremità del tratto utile L_0 deve poi essere marcata con dei segni e non con intagli perché potrebbero dar luogo a frattura prematura. Per i provini in cui vale la relazione $L_0 = k * \sqrt{S_0}$, il valore calcolato della lunghezza originale L_0 deve essere arrotondato al più vicino multiplo di 5 millimetri: il valore misurato e quello marcato della lunghezza utile originale non devono differire per più del 10% di L_0 .

Si fissa poi il punto zero della forza dopo che l'attrezzatura per svolgere il test è stata assemblata correttamente e prima che il provino sia bloccato in entrambe le estremità. Dopo aver stabilito il punto zero, il sistema di misurazione della forza non deve essere cambiato durante lo svolgimento del test. Esistono diversi metodi per bloccare le estremità del provino: possiamo avere un bloccaggio con viti, con un sistema idraulico di compressione, ecc. Inoltre per

assicurare l'allineamento tra il sistema di bloccaggio e il provino, si applica una forza preliminare purché questa sia minore del 5% della forza di snervamento specificata o prevista.

2.1.2 CURVA DEI VALORI NOMINALI

Durante lo svolgimento della prova si misura in ogni istante sia l'allungamento sia la forza applicata al provino. Entrambe queste grandezze sono poi trasformate in deformazione nominale e tensione nominale con cui si costruisce il diagramma tensione-deformazione, il quale è uno strumento importante per l'individuazione di molte proprietà meccaniche.

Innanzitutto si definisce la tensione nominale s :

$$s = \frac{P}{S_0} \quad (2.1)$$

dove P è la forza istantanea applicata al provino, mentre S_0 è l'area iniziale della sezione trasversale originale. La deformazione nominale invece si ricava con la seguente relazione:

$$e = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1 \quad (2.2)$$

dove L_0 è la lunghezza del tratto utile del provino mentre L è la lunghezza istantanea del provino sotto l'azione della forza P .

La prova di trazione quindi ci permette di ottenere il diagramma tensione-deformazione in cui abbiamo in ascissa la deformazione nominale e in ordinata la tensione nominale. La curva che si ottiene, detta curva dei valori nominali, è costituita da due regioni principali:

- la regione elastica, dove la curva ha un andamento tipicamente lineare ed è caratterizzata dal fatto che il provino torna alla lunghezza iniziale se azzeriamo la sollecitazione. La regione elastica va dall'inizio della curva al punto di snervamento;
- la regione plastica, dove la curva ha un andamento non lineare. Si trova al di sopra del punto di snervamento ed è caratterizzata dal fatto che, se azzeriamo la sollecitazione, il provino non torna più alla lunghezza iniziale poiché permane una deformazione residua. Quest'ultima rimane perché il materiale allo scarico segue una traiettoria che è parallela a quella del tratto elastico lineare (quindi la deformazione elastica viene recuperata mentre rimane solo quella plastica).

L'andamento tipico della curva è riportato qui di seguito (Figura 2.3).

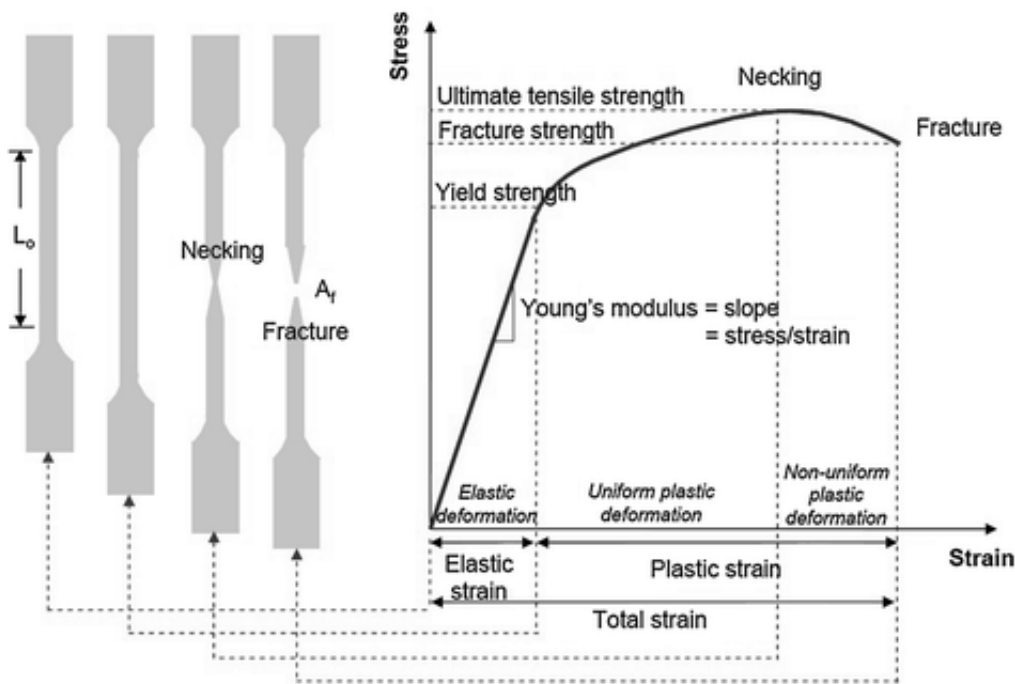


Figura 2.3 – Classico andamento della curva dei valori nominali con evidenziati alcuni punti e regioni tipiche

La curva può essere anche divisa in una zona dove la deformazione avviene omogeneamente, cioè la deformazione è distribuita in modo uniforme lungo tutto il provino, e un'altra zona dove la deformazione è localizzata. Quest'ultima zona, che inizia nel punto più alto della curva e procede fino alla fine della curva, è dovuta all'inizio della strizione localizzata, cioè si verifica una riduzione di sezione in un punto di debolezza del provino dove si concentra tutta l'ulteriore deformazione plastica [7]. La curva quindi tende a decrescere fino a quando si verifica la rottura del provino e la prova termina.

Nella prima regione della curva, la regione elastica lineare, esiste una proporzionalità diretta tra la tensione nominale e la deformazione nominale e la relazione che le lega è la seguente:

$$s = Ee + s_0 = E(e - e_0) \tag{2.3}$$

nota come legge di Hooke.

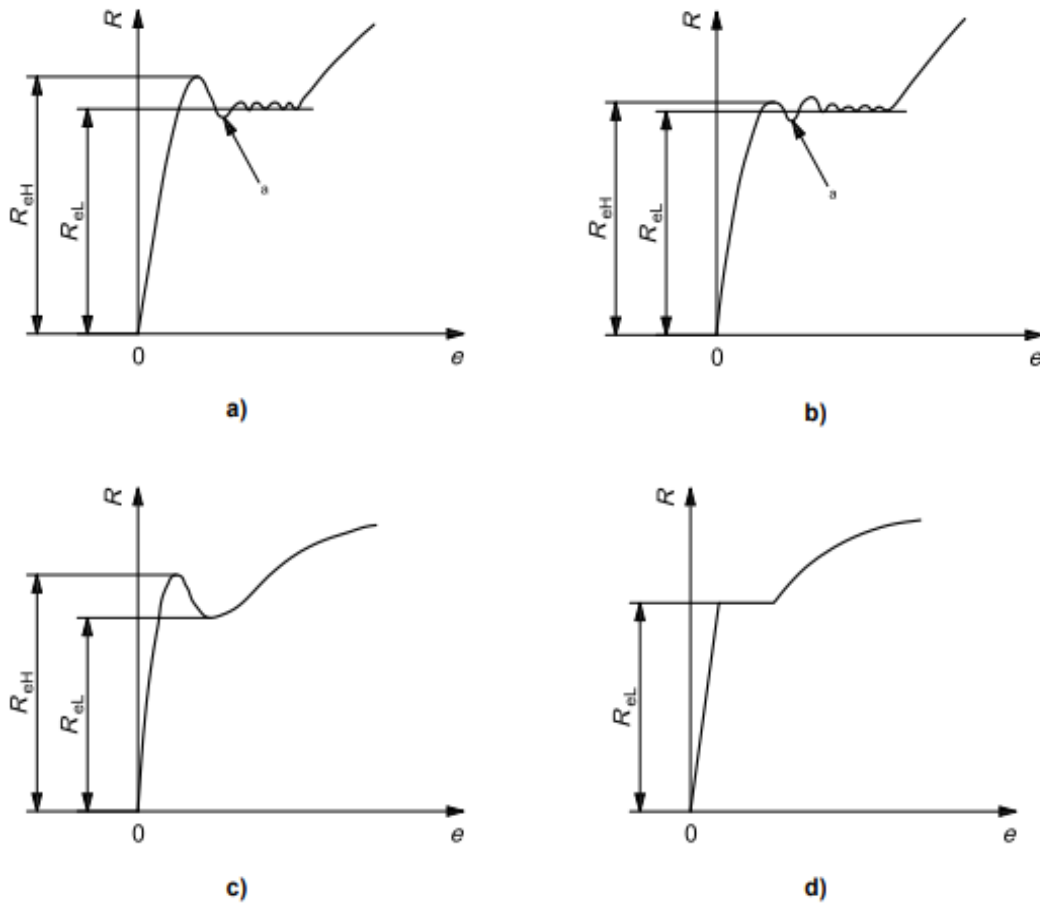
La costante di proporzionalità E è detta modulo di elasticità normale o modulo di Young, la e_0 è la deformazione residua, cioè corrispondente ad una tensione nulla, mentre la $s_0 = -Ee_0$ è la tensione residua, cioè la tensione in corrispondenza di un allungamento nullo del provino (i

materiali per cui $s_0 = 0$ e $e_0 = 0$ si dicono allo stato naturale) [8]. Il modulo di Young ha diverse proprietà:

- geometricamente è la tangente dell'angolo tra l'asse delle ascisse e il tratto elastico lineare;
- ha le dimensioni di una tensione (MPa oppure N/mm^2);
- è una caratteristica intrinseca del materiale e per l'acciaio vale circa 210 GPa in accordo con la norma EN-1993-1-1 [9].

I materiali che hanno modulo di Young grande si dicono poco deformabili mentre quelli con modulo di Young piccolo si dicono deformabili.

L'inizio della regione plastica è solitamente legato allo snervamento. A causa della riorganizzazione a livello cristallino il materiale manifesta una zona di forte instabilità (effetto Portevin-le Châtelier), dove al crescere della deformazione la tensione oscilla bruscamente attorno a un valore medio costante [10,11]. A causa di questo effetto, le proprietà meccaniche del materiale sono degradate, infatti si verifica una perdita di duttilità e un decremento della resistenza a frattura [12,13]. In questa zona possiamo individuare due punti importanti: il punto di snervamento superiore ed il punto di snervamento inferiore. Il punto di snervamento superiore (caratterizzato da un valore di tensione chiamato R_{eH}) può essere determinato dalla curva sforzo-deformazione ed è definito come il massimo valore di tensione precedente al primo decadimento della forza (Figura 2.4). Il valore di questa tensione si può ottenere dividendo la forza di snervamento superiore F_{eH} per la sezione trasversale originale del provino S_0 . Il punto di snervamento inferiore (caratterizzato da un valore di tensione chiamato R_{eL}) può essere determinato dalla curva sforzo-deformazione ed è definito come il minimo valore di tensione, durante la deformazione plastica, ignorando tutti gli effetti transienti (Figura 2.4). Il valore di questa tensione si può ottenere dividendo la forza di snervamento inferiore F_{eL} per la sezione trasversale originale del provino S_0 . Il punto di snervamento vero e proprio è una proprietà meccanica molto importante perché separa la regione elastica da quella plastica. Dato che spesso è difficile individuarlo correttamente, per convenzione quest'ultimo si determina tracciando una retta parallela al tratto elastico lineare della curva a una deformazione prefissata dello 0,2%. Il punto in cui la linea interseca la curva ci permette di trovare il punto di snervamento, caratterizzato da una tensione indicata con R_p . Andando ora alla regione plastica, il punto in cui finisce la deformazione plastica omogenea e inizia la strizione è caratterizzato da un valore di tensione R_m , detta tensione a carico massimo o resistenza a trazione, poiché la tensione in questo punto raggiunge il suo valore massimo (Figura 2.5).



Key

- e percentage extension
- R stress
- R_{eH} upper yield strength
- R_{eL} lower yield strength
- ^a Initial transient effect.

Figura 2.4 – Alcuni esempi di punti di snervamento inferiori e superiori per diverse curve

Procedendo oltre questo punto, la tensione si riduce e infine il provino si rompe: il punto in cui il provino si rompe è detto punto di rottura ed è caratterizzato da un valore di tensione R_t . Il punto di rottura si ricava disegnando una linea parallela all’asse delle ordinate ad una distanza da quest’ultimo pari all’estensione percentuale totale prescritta. Il punto dove la linea interseca la curva dei valori nominali è il punto desiderato.

Oltre ai valori di tensione, possiamo ricavare anche alcuni allungamenti percentuali che sono di notevole interesse pratico e teorico. L’allungamento percentuale plastico a carico massimo è uno dei più importanti allungamenti e si determina calcolando l’estensione a carico massimo al

quale si sottrae la deformazione elastica. L'allungamento percentuale plastico si trova con la seguente equazione:

$$A_g = \left(\frac{\Delta L_m}{L_e} - \frac{R_m}{m_E} \right) * 100 \quad (2.4)$$

dove:

- L_e è la lunghezza del tratto utile misurata dall'estensometro;
- m_E è la pendenza della parte elastica della curva tensione-deformazione;
- R_m è la tensione a carico massimo;
- ΔL_m è l'estensione a carico massimo.

Per trovare l'allungamento percentuale totale a carico massimo invece si determina l'estensione a carico massimo. Questo allungamento è chiamato A_{gt} e si calcola con la seguente equazione:

$$A_{gt} = \left(\frac{\Delta L_m}{L_e} \right) * 100 \quad (2.5)$$

Per materiali che esibiscono un tratto di curva orizzontale a carico massimo di ampiezza Δe , l'allungamento percentuale totale a carico massimo si trova considerando il punto medio di quel tratto.

L'allungamento percentuale totale a rottura è l'allungamento massimo che il provino raggiunge e si calcola con la seguente equazione:

$$A_t = \left(\frac{\Delta L_f}{L_e} \right) * 100 \quad (2.6)$$

dove ΔL_f è l'estensione a rottura.

L'ultimo allungamento importante è l'allungamento percentuale dopo rottura e si determina prendendo le due parti di provino che si sono rotte e ricomponendole insieme, in modo tale che i loro assi siano allineati. Speciali precauzioni devono essere prese per assicurare un contatto appropriato tra le due parti rotte del provino: questo è particolarmente importante per i pezzi di piccola sezione trasversale e provini aventi bassi valori di allungamento.

Per calcolare l'allungamento percentuale dopo rottura si usa l'equazione:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} * 100 \quad (2.7)$$

dove:

- L_0 è la lunghezza originale del tratto utile;
- L_u è la lunghezza finale dopo rottura.

L'allungamento dopo rottura $L_u - L_0$ deve essere arrotondato al più vicino valore 0,25 mm o si può usare uno strumento di misura con una risoluzione sufficiente. Tutti i diversi allungamenti percentuali sono riportati in Figura 2.5.

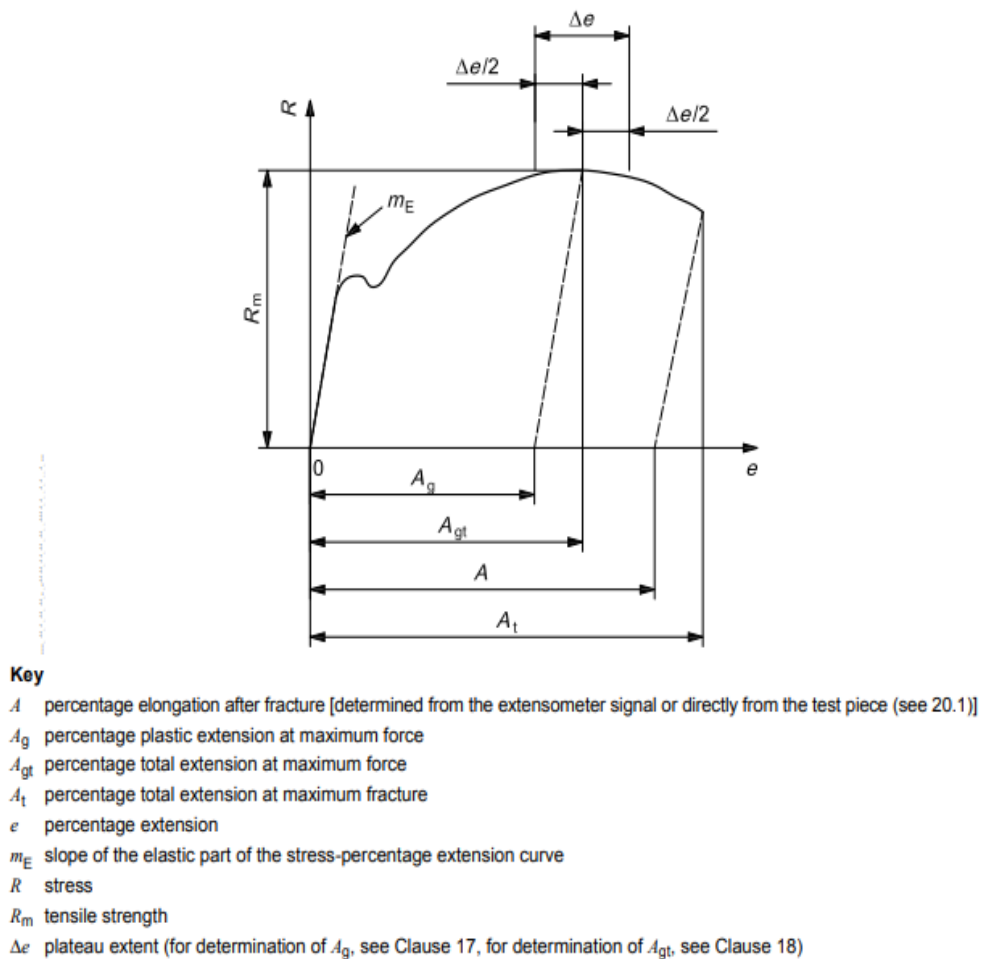


Figura 2.5 – Curva dei valori nominali con evidenziati i vari allungamenti, la tensione a carico massimo e il tratto orizzontale a carico massimo di estensione Δe .

È possibile anche calcolare la riduzione percentuale di area che è definita come la massima variazione dell'area trasversale che si verifica durante la prova. Quest'ultima è detta Z e vale:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} * 100 \tag{2.8}$$

dove:

- S_0 è la sezione trasversale originale del tratto L_c ;
- S_u è la minima sezione trasversale dopo rottura.

Se necessario i due pezzi rotti del provino devono essere ricomposti in modo che i loro assi giacciono su una linea dritta per la misurazione.

Altre proprietà inoltre possono essere dedotte dalla prova di trazione: la duttilità, la resilienza e la tenacità. La duttilità è la capacità dei materiali di assorbire deformazioni anelastiche senza rompersi; a parità di resistenza e durezza, i materiali più duttili sono più adatti ad assorbire sovraccarichi e ad essere lavorati a freddo per deformazione plastica. La duttilità può essere misurata attraverso l'allungamento a rottura (e_f) con la seguente formula:

$$e_f = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (2.9)$$

dove L_f è la lunghezza del tratto utile a rottura.

Usualmente si ammette che un materiale al di sotto del 5% di allungamento sia fragile, al di sopra sia duttile. Un altro modo per misurare la duttilità è la riduzione di area a rottura (r_f):

$$r_f = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \quad (2.10)$$

dove S_f è la area della sezione a rottura.

Grazie alla relazione (2.10) e alla costanza del volume possiamo anche scrivere e_f in funzione di r_f :

$$e_f = \frac{L_f}{L_0} - 1 = \frac{S_0}{S_f} - 1 = \frac{r_f}{1 - r_f} \quad (2.11)$$

La resilienza è un'altra proprietà importante e può essere definita come la capacità del materiale di assorbire energia in campo elastico e di restituirla allo scarico. Può essere valutata con il modulo di resilienza cioè l'energia immagazzinata per unità di volume nel tratto elastico:

$$U_R = \frac{1}{2} R_p * e_0 = \frac{1}{2} \frac{R_p^2}{E} \quad (2.12)$$

dove e_0 è la deformazione corrispondente al punto di snervamento mentre R_p è la tensione a snervamento.

La resilienza corrisponde all'area compresa tra il tratto di curva elastico e l'asse delle ascisse; materiali ad alta resilienza come gli acciai per molle sono caratterizzati da bassi valori di modulo di Young e di s_0 elevati.

La tenacità infine è la capacità dei materiali di assorbire energia in campo plastico senza rotture; questa proprietà combina resistenza e duttilità ed è rappresentata da tutta l'area sottesa dalla curva s-e. Per i materiali duttili la curva è tendenzialmente piatta e una buona approssimazione dell'energia è data da:

$$U_T = \frac{1}{2} (R_p + R_t) * e_f \quad (2.13)$$

Per i materiali fragili invece si assume che la curva s-e in campo plastico sia una parabola e l'energia di conseguenza vale:

$$U_T = \frac{2}{3} R_t * e_f \quad (2.14)$$

2.1.3 CURVA DEI VALORI REALI

Oltre alla curva dei valori nominali esiste un'altra curva, detta curva dei valori reali, che mette in relazione la tensione reale e la deformazione reale. La tensione reale o vera è definita come:

$$\sigma = \frac{P}{S} \quad (2.15)$$

La deformazione reale o vera invece si ricava grazie alla seguente relazione:

$$\varepsilon = \ln \frac{L}{L_0} \quad (2.16)$$

dove P è la forza istantanea applicata al provino e la S è la superficie istantanea della sezione trasversale del provino.

La curva dei valori reali è sempre crescente a meno dell'addolcimento che può essere presente ad elevata temperatura (Figura 2.6).

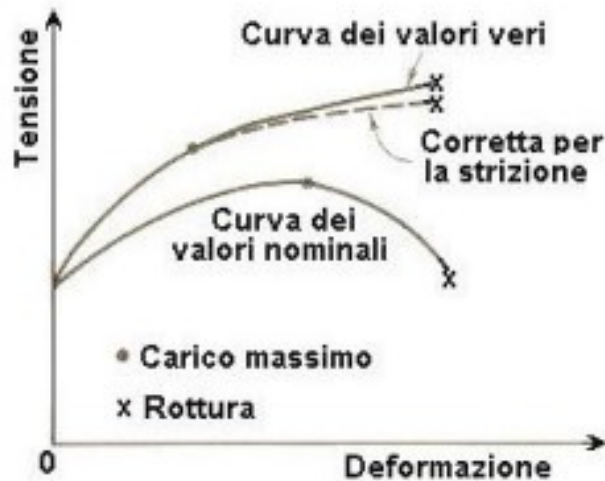


Figura 2.6 – Curva dei valori reali a confronto con quella dei valori nominali

È possibile mettere in relazione la deformazione e la tensione reali con quelle nominali corrispondenti. Per la tensione vale la seguente equazione:

$$\sigma = s(1 + e) \quad (2.17)$$

mentre per la deformazione:

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (2.18)$$

La curva dei valori reali è posizionata più in alto e a sinistra rispetto alla curva dei valori nominali s-e fino all'inizio della strizione che si manifesta al raggiungimento del picco della curva dei valori nominali [14]. La relazione (2.18) tra la deformazione reale e quella nominale è valida solo nella regione della deformazione omogenea. Oltre questa regione, a causa dell'inizio della strizione, bisogna ricorrere a espressioni della ε in funzione della variazione di area:

$$d\varepsilon = \frac{dL}{L} = -\frac{dS}{S} \quad (2.19)$$

Quindi integrando tra S_0 (area della sezione trasversale originale) e S_f (area della sezione trasversale finale) ottengo:

$$\varepsilon_f = \ln \frac{S_0}{S_f} \quad (2.20)$$

Nella regione della deformazione omogenea lo stato tensionale è monoassiale, mentre con la strizione diventa triassiale e quindi risulta necessario apportare delle correzioni alla curva σ - ε (come mostrato in Figura 2.6).

Al picco della curva dei valori nominali la tensione a carico massimo è detta R_m e la deformazione corrispondente è detta e_u : queste possono essere messe in relazione con la deformazione reale corrispondente ε_u e con la tensione reale corrispondente σ_u . Per la tensione otteniamo:

$$\sigma_u = \frac{P_{max}}{S_u} = R_m \frac{S_o}{S_u} = R_m * e^{\varepsilon_u} \quad (2.21)$$

mentre per la deformazione si ha:

$$\varepsilon_u = \ln \frac{L_u}{L_o} = \ln \frac{S_o}{S_u} = \ln(1 + e_u) \quad (2.22)$$

Infine la deformazione reale a rottura è:

$$\varepsilon_f = \ln \frac{S_o}{S_f} \quad (2.23)$$

Quest'ultima non è correlabile con la deformazione nominale corrispondente e_f ma possiamo correlarla con r_f (introdotto al paragrafo §2.1.2):

$$\varepsilon_f = \ln \frac{1}{1 - r_f} \quad (2.24)$$

La legge che lega la σ alla ε in campo plastico è detta legge reologica e descrive il comportamento alla deformazione plastica dei metalli. La legge reologica fornisce la resistenza alla deformazione del materiale in funzione dei parametri della deformazione ($\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T$) e della microstruttura (dimensione dei grani, presenza di seconde fasi, ...). L'effetto della sola deformazione porta alla seguente legge:

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (2.25)$$

dove K è il coefficiente di resistenza e n è il coefficiente di incrudimento [15]. Questi due coefficienti sono proprietà importanti del materiale e possono essere ricavate andando a calcolare i logaritmi di σ e di ε e riportando questi valori in un grafico doppio-logaritmico. I punti (colorati in azzurro in Figura 2.7) si dispongono lungo una retta che si trova nel secondo quadrante, dato che $\log \varepsilon$ assume valori sempre negativi. La retta che interpola i vari punti relativi al campo plastico ha equazione:

$$\log \sigma = \log K + n \log \varepsilon \quad (2.26)$$

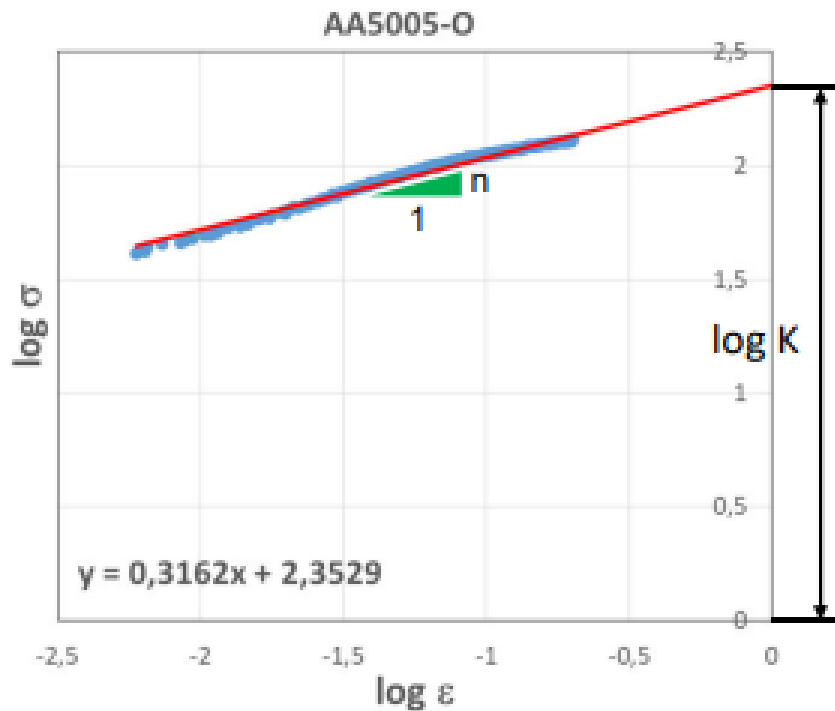


Figura 2.7 – grafico $\log \sigma$ - $\log \varepsilon$

Una volta che la retta interpolante è stata determinata, l'intersezione con l'asse y mi dà il $\log K$ (quindi è possibile ricavare K), mentre la pendenza della retta è il coefficiente di incrudimento n . Si può dimostrare che il coefficiente di incrudimento n è pari alla deformazione reale ad inizio strizione ε_u , quindi maggiore è il valore del coefficiente di incrudimento, maggiore è la lavorabilità. I valori di n tipici sono compresi tra 0,1 e 0,5 ma in generale può assumere valori compresi tra 0 (materiale idealmente plastico) e 1 (solido elastico). Per uno stesso materiale i valori di n e K possono variare in base al trattamento termico subito prima della deformazione e in base alla storia di caricamento precedente alla deformazione plastica. I valori di n e K quindi sono riferiti ad una condizione ben precisa e il valore di n decresce all'aumentare della temperatura T e al diminuire di $\dot{\varepsilon}$ cioè della velocità di deformazione. La temperatura inoltre influenza anche le proprietà meccaniche: infatti se la temperatura aumenta, la curva tende a ridursi poiché si verifica il riassetto dinamico e poi la ricristallizzazione dinamica. L'incremento della temperatura quindi porta ad un decremento della resistenza a snervamento, a carico massimo, a rottura ecc. (Figura 2.8) [16,17].

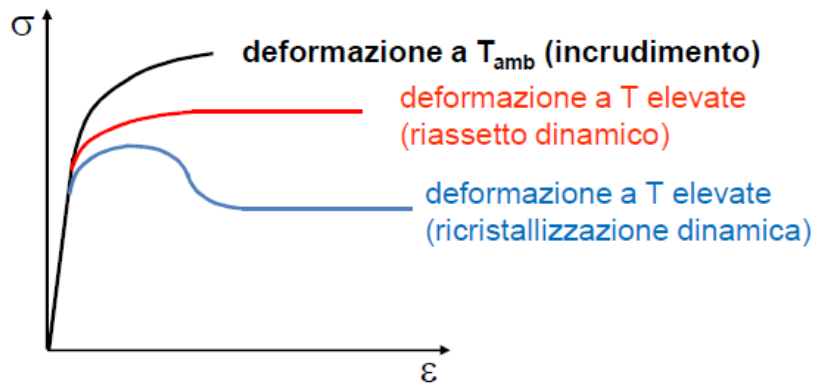


Figura 2.8 – Diversi andamenti delle curve di trazione per effetto della temperatura

Infine esistono diversi modelli semplificati di curve dei valori reali ottenuti considerando il comportamento del materiale (Figura 2.9) [18]:

- rigido-plastico ideale: in questo caso la tensione è costante al variare della deformazione. Questo modello approssima bene il comportamento dei metalli duttili fortemente incruditi;
- elastico-plastico ideale: in questo caso inizialmente si presenta il tratto elastico lineare e poi quello plastico ideale con tensione costante. Il modello elastico-plastico ideale approssima bene il comportamento dei metalli con snervamento pronunciato;
- elastico-plastico lineare: in questo caso il materiale esibisce un comportamento lineare in entrambe le regioni ma le pendenze sono diverse per il tratto elastico e plastico; questo modello è valido per tutti gli altri metalli.

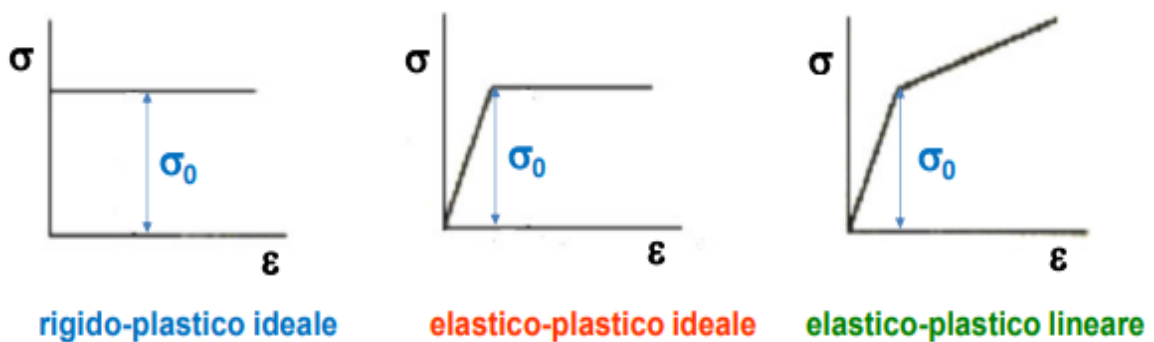


Figura 2.9 – diversi modelli semplificati della curva σ - ϵ

2.2 ANISOTROPIA

Le lamiere sono ottenute mediante cicli comprendenti operazioni di laminazione che possono essere eseguite a caldo o a freddo (nello stadio finale). Il materiale è fortemente incrudito lungo la direzione di laminazione (RD) e si presenta un comportamento anisotropo se non è eseguito alcun trattamento di ricottura post-laminazione [19,20]. L'anisotropia è il diverso comportamento del materiale in differenti direzioni ed è un aspetto importante da considerare nella formatura delle lamiere. Essa è causata dall'orientazione preferenziale dei grani in direzione precise e influenza le proprietà meccaniche e i rapporti tra le deformazioni. Può essere di due tipi:

- anisotropia normale: in questo caso abbiamo un diverso comportamento tra le direzioni contenute nel piano della lamiera e la direzione dello spessore;
- anisotropia planare: il diverso comportamento è tra le differenti direzioni nel piano della lamiera.

L'anisotropia si valuta prelevando dei provini dalla lamiera e sottoponendoli alla prova di trazione interrotta, cioè non si arriva alla rottura del provino poiché la prova è arrestata nel campo della deformazione plastica omogenea. Si calcola la deformazione ε_l (deformazione nella direzione della lunghezza), la ε_t (deformazione nella direzione dello spessore) e la ε_w (deformazione nella direzione della larghezza). Grazie a queste si introduce un importante parametro, cioè l'indice di anisotropia normale (R), definito con la seguente equazione:

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln \frac{w_0}{w_f}}{\ln \frac{t_0}{t_f}} \quad (2.27)$$

Il valore di R è variabile con la direzione rispetto alla quale è valutato: si eseguono infatti diverse prove di trazione con direzioni tipicamente di 0° , 45° e 90° rispetto a RD. In questo modo si possono ottenere valori diversi dell'indice di anisotropia normale: R_0 , R_{45} , R_{90} (Figura 2.10) [21,22].

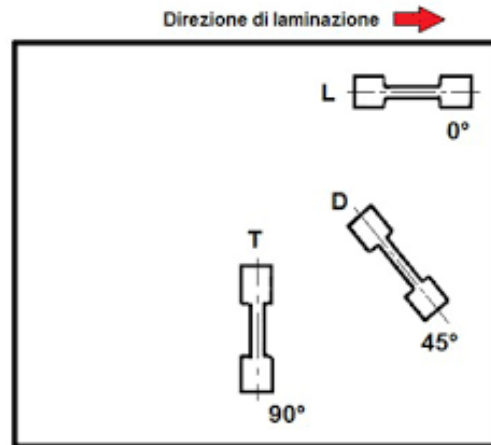


Figura 2.10 – differenti direzioni rispetto a RD

Si introducono poi due indici molto importanti che permettono la valutazione dell'anisotropia:

- l'indice medio di anisotropia normale, che è dato dalla media dei valori di R ricavati lungo le diverse direzioni rispetto a RD:

$$R_m = \frac{R_0 + R_{90} + 2R_{45}}{4} \quad (2.28)$$

- l'indice di anisotropia planare, che rappresenta la deviazione dal valore isotropo ovvero la differenza tra i valori di R ricavati a 0° e 90° rispetto a RD e il valore di R a 45°:

$$\Delta R = \frac{R_0 + R_{90} - 2R_{45}}{4} \quad (2.29)$$

Nel caso in cui tutte le diverse R siano uguali a 1, il materiale esibisce una isotropia normale, poiché la deformazione nella direzione dello spessore è uguale a quella nella direzione della larghezza cioè $\varepsilon_t = \varepsilon_w = -0,5\varepsilon_l$ (quindi $R_m = 1$) e una isotropia planare, dal momento che R non dipende dall'orientazione del provino rispetto a RD (quindi $\Delta R = 0$). Il valore di R_m può essere maggiore, uguale o minore di 1: si può notare che se R_m diminuisce, aumenta la sensibilità del materiale alla riduzione dello spessore e all'assottigliamento, di conseguenza cresce il pericolo di incorrere in fratture duttili (è bene quindi che R_m sia maggiore di 1 piuttosto che minore). Anche la formazione delle orecchie (earings) è un fenomeno ricorrente causato dall'anisotropia: questo si verifica a causa del diverso flusso plastico del materiale nelle differenti direzioni del piano (Figura 2.11) [23]. La formazione delle orecchie implica uno spreco di materiale poiché il bordo ondulato deve essere eliminato; inoltre l'altezza delle

orecchie cresce all'aumentare del valore di ΔR e il difetto è assente solo nel caso in cui R_0 , R_{90} e R_{45} siano uguali a 1, quindi per $\Delta R = 0$ (caso di isotropia planare).



Figura 2.11 – Difetto di formazione delle orecchie su un pezzo meccanico

Ricapitolando, le migliori caratteristiche di un materiale si hanno per:

- elevati valori di R_m , in modo da evitare l'eccessivo assottigliamento;
- bassi valori di ΔR , per evitare la formazione delle orecchie o almeno ridurla;
- elevati valori di n , in modo da aumentare il campo della deformazione plastica omogenea (aumento della lavorabilità).

Capitolo 3

Procedure sperimentali

Al fine di ottenere le proprietà meccaniche dell'acciaio DX54D è stata eseguita la prova di trazione. Grazie a quest'ultima è stato possibile determinare la resistenza a snervamento, a carico massimo, a rottura, tutti i vari allungamenti percentuali, il coefficiente di incrudimento ecc. Inoltre è stata eseguita anche la prova di trazione interrotta per valutare l'anisotropia del materiale. La prova di trazione a rottura e quella interrotta sono state compiute con la stessa macchina e con provini aventi medesime dimensioni.

3.1 ATTREZZATURA NECESSARIA

La prova di trazione è stata eseguita con una macchina detta MTS, cioè una macchina di prova universale che può essere utilizzata per svolgere anche prove a fatica in trazione-compressione ad alto numero di cicli, a fatica in trazione-compressione oligociclica, di flessione su più punti, di meccanica della frattura ecc. La macchina è costituita da una centralina idraulica, un telaio prova ed un'unità di controllo computerizzata (Figura 3.1). Il telaio è composto da un pannello per i comandi manuali, un attuatore ad afferraggio inferiore, una barra trasversale per i movimenti verticali dell'afferraggio superiore e una cella di carico in grado di misurare le forze generate dall'attuatore. Il sistema idraulico fornito di servo-valvola garantisce una elevata precisione di spostamento verticale della barra (nell'ordine del micrometro) e dell'attuatore. Lo strumento è anche dotato di un forno che può riscaldare il provino fino a circa 1300°C e la temperatura può essere monitorata grazie ad una termocoppia posta sullo stesso. Può essere presente anche una camera cilindrica in cui, tramite l'introduzione di azoto liquido, è possibile raggiungere temperature di -130°C. La presenza dell'estensometro, utilizzato per rilevare le piccole deformazioni dimensionali del corpo, comporta che la temperatura sia più limitata

rispetto a quella raggiungibile con il forno o con l'azoto liquido: infatti non si possono raggiungere temperature superiori a 1000°C e inferiori a -100°C . I test eseguiti sul provino DX45D sono stati svolti a temperatura ambiente, quindi non è stato necessario utilizzare né il forno né l'azoto liquido. Il bloccaggio del provino sulla macchina è avvenuto grazie ad un sistema idraulico e la velocità di movimento della traversa mobile durante la prova è stata di $0,1\text{ mm/s}$ con frequenza 5 Hz .

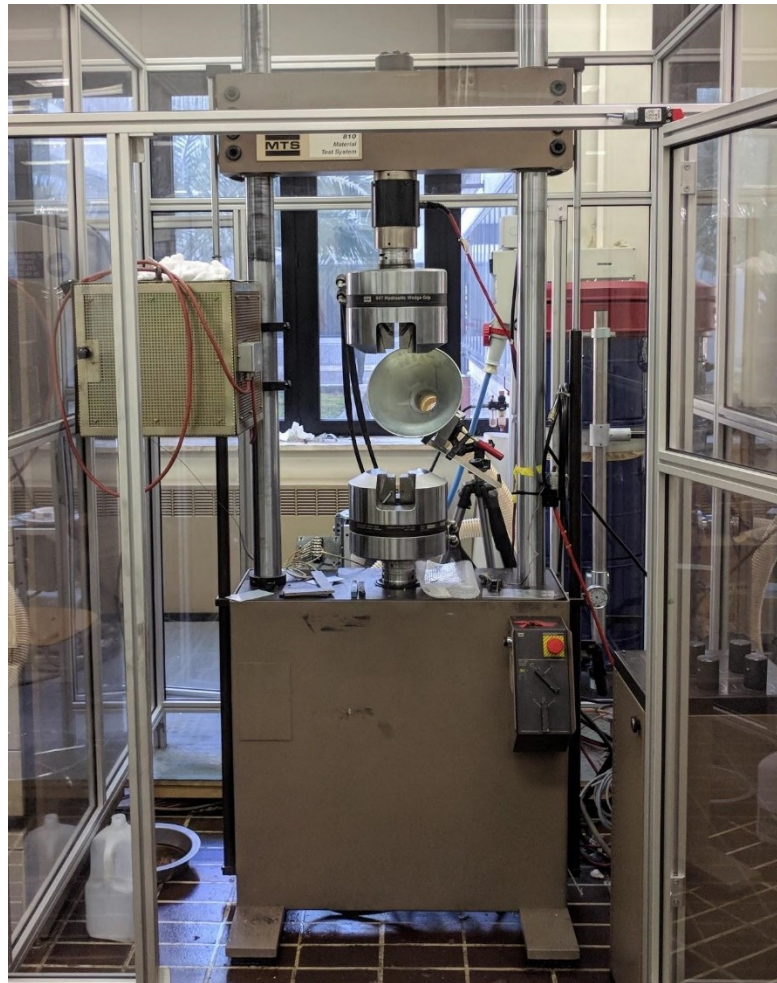


Figura 3.1 – Macchina MTS

3.2 I PROVINI

Sono stati testati 5 provini per ogni valore dell'indice di anisotropia normale R (R_0 , R_{45} e R_{90}) in modo da ottenere valori affidabili per le proprietà meccaniche ed assicurare una maggiore

ripetibilità. Ognuno di questi aveva forma prismatica con lunghezza del tratto utile L_0 di 65 mm e base rettangolare di dimensioni pari a 0,603 mm e 12,697 mm (Figura 3.2).

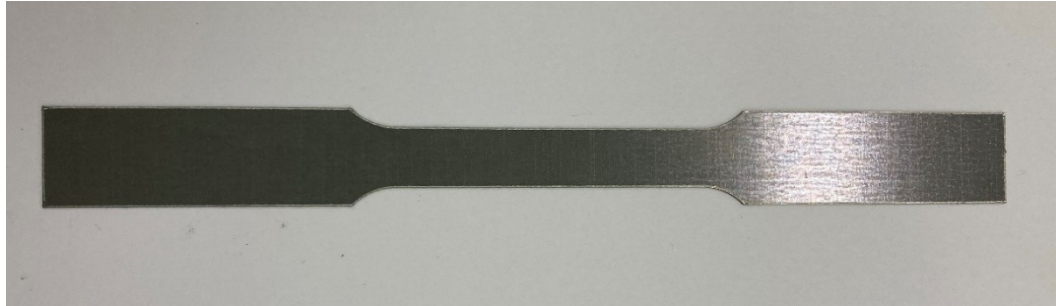


Figura 3.2 – Provino non deformato

Le estremità di bloccaggio del provino hanno dimensioni maggiori rispetto a quelle della sezione utile e, come già descritto nel paragrafo §2.1.1, c'è un raggio di raccordo molto importante che le collega. Nella Figura 3.3 si può notare che nelle estremità del provino rimangono molti piccoli punti che sono dovuti all'azione del sistema idraulico di bloccaggio della macchina MTS.

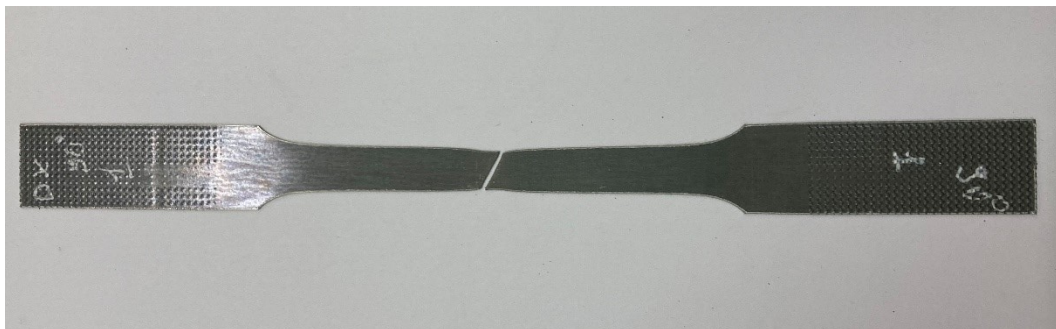


Figura 3.3 – Provino rotto

3.3 PROVA DI TRAZIONE A ROTTURA

La macchina rileva la forza e l'allungamento istante per istante e, grazie alla (2.1) e alla (2.2), si ottengono la tensione nominale e la deformazione nominale. Una volta che quest'ultime sono state determinate, è possibile riportarle su un grafico e costruire la curva dei valori nominali che si può usare per ricavare molte proprietà differenti (Figura 3.4). Il punto di snervamento si

calcola tracciando una retta parallela al tratto elastico lineare, passante per una deformazione prefissata dello 0,2%. L'intersezione di questa retta con la curva è proprio il punto di snervamento desiderato e la tensione di snervamento R_p si determina tracciando una retta orizzontale passante in quel punto. Il valore della tensione massima R_m , detta resistenza a trazione, si ricava con una retta orizzontale nel punto più alto della curva dei valori nominali. Il punto di rottura invece è il punto dove avviene la rottura ed il valore della tensione di rottura si può determinare grazie ad una retta orizzontale che arriva fino all'asse delle ordinate.

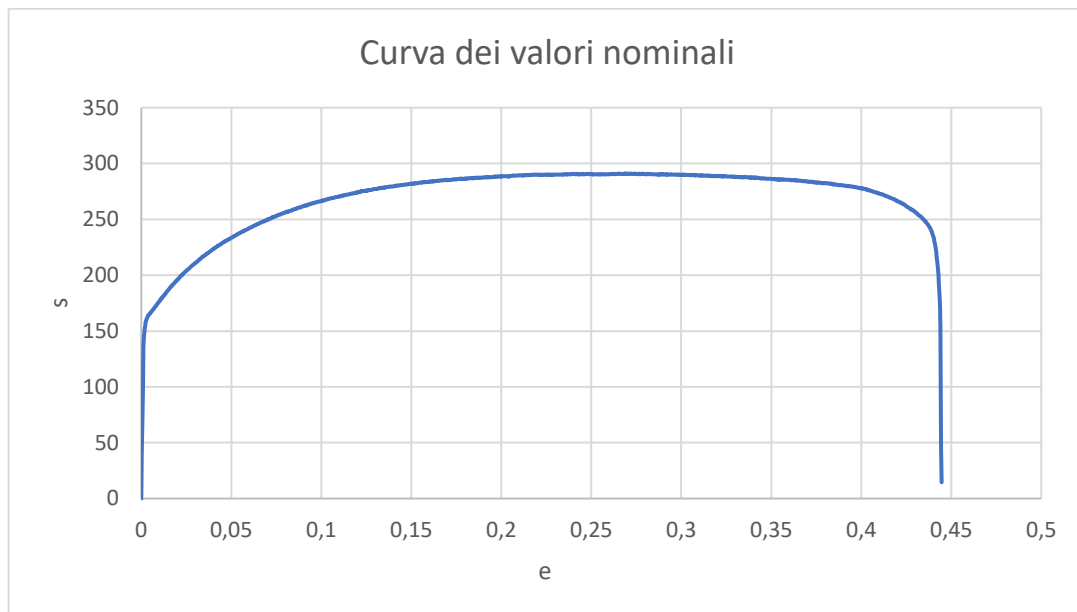


Figura 3.4 – Curva dei valori nominali

I vari allungamenti percentuali si determinano sempre dalla curva dei valori nominali. Per determinare A_g (allungamento percentuale plastico a carico massimo) si traccia una retta parallela al tratto elastico lineare passante per il punto a carico massimo. Nello stesso punto si può anche tracciare la retta verticale per trovare A_{gt} (allungamento percentuale totale a carico massimo). Per determinare A (allungamento percentuale dopo rottura) si traccia una retta parallela al tratto elastico lineare e la si fa passare per il punto di rottura. Infine, A_t (allungamento percentuale totale a rottura) si trova con la retta verticale passante sempre per il punto di rottura. Intersecando tutte le rette con l'asse delle ascisse troviamo i valori dei vari allungamenti.

A questo punto si può passare a considerare la curva dei valori reali. Per disegnarla si sfrutta la (2.17) e la (2.18) che ci permettono di determinare la deformazione reale e la tensione reale

conoscendo quelle nominali. Successivamente si fanno i logaritmi in base 10 di tensione e deformazione reale nel tratto plastico, riportando i valori determinati in un grafico doppio-logaritmico. Si procede tracciando la retta interpolante i punti determinati che risulta avere equazione $\log \sigma = \log K + n \log \varepsilon$. La pendenza di tale retta permette di trovare il coefficiente di incrudimento n e l'intersezione con l'asse y permette di trovare il coefficiente di resistenza K . Una volta calcolate tutte le proprietà meccaniche del singolo provino, il procedimento si ripete per gli altri 4 con lo stesso indice R . Si ottengono dunque 5 valori per ogni proprietà meccanica e, attraverso la media aritmetica, si calcola il valore più affidabile per ognuna di esse.

3.4 PROVA DI TRAZIONE INTERROTTA

Per valutare l'anisotropia si esegue la prova di trazione interrotta, cioè il provino non è portato a rottura poiché la prova è arrestata nel campo della deformazione plastica omogenea. Si sono svolte 5 prove per ogni valore dell'indice di anisotropia normale R (R_0, R_{45}, R_{90}) e per ogni provino si prendono in considerazione 3 sezioni: quella all'inizio, al centro e alla fine del tratto utile L_0 (Figura 3.5).

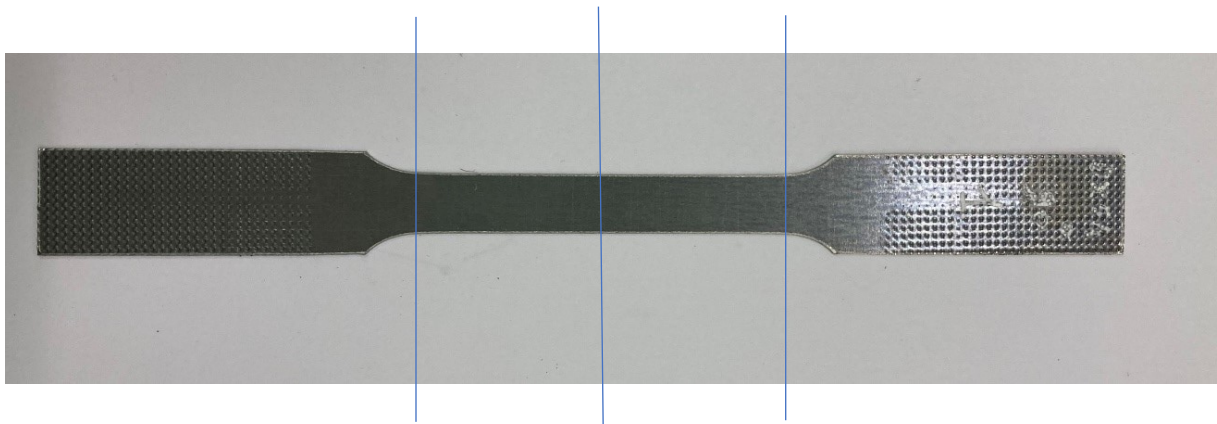


Figura 3.5 – Provino con le 3 sezioni considerate per calcolare spessore e larghezza

In queste 3 sezioni si determinano lo spessore (t) e la larghezza (w) sia prima che dopo la prova. Si ottengono quindi 3 valori per la larghezza iniziale w_0 , per la larghezza finale w_f , per lo spessore iniziale t_0 e per lo spessore finale t_f . Si fa una media per ogni grandezza determinata e si calcola la ε_t , deformazione nella direzione dello spessore, e la ε_w , deformazione nella

direzione della larghezza. Grazie a queste si valuta l'indice di anisotropia normale (R), definito con la seguente equazione:

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln \frac{w_0}{w_f}}{\ln \frac{t_0}{t_f}} \quad (3.1)$$

Per ogni provino si calcola la R ed in totale si ottengono 5 valori per ogni direzione considerata ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$). A questo punto si calcolano i due parametri fondamentali che consentono la valutazione dell'anisotropia, cioè l'indice medio di anisotropia normale R_m e l'indice di anisotropia planare ΔR , rispettivamente con la (2.28) e la (2.29). Ottenuti i valori di R_m e di ΔR per ogni provino, si procede facendo la media tra i 5 valori calcolati e si determinano gli indici finali.

Capitolo 4

Risultati sperimentali e discussione

4.1 PROPRIETÀ MECCANICHE DI UN MATERIALE METALLICO

Per determinare le proprietà meccaniche dell'acciaio DX54D è stata svolta la prova di trazione a rottura. Come già descritto nel paragrafo §3.2, sono stati utilizzati 5 provini per ogni valore dell'indice di anisotropia normale R (R_0, R_{45}, R_{90}), aventi le medesime dimensioni.

Grazie al rilevamento della forza e dell'allungamento, istante per istante, si sono calcolate la deformazione e la tensione nominale per ogni provino che sono caratteristiche più generalizzabili. È stata poi costruita la curva dei valori nominali grazie alla quale è stato possibile determinare le principali proprietà meccaniche. Prendendo in considerazione uno dei provini, ad esempio il provino 1 con indice di anisotropia normale R_0 , si procede con il calcolo di tutte le proprietà meccaniche. Nella Figura 4.1 è mostrato graficamente il procedimento che porta all'individuazione della tensione di snervamento per il singolo provino (retta parallela al tratto elastico lineare passante per una deformazione prefissata dello 0,2%). Sempre dalla curva è possibile tracciare due rette orizzontali: una nel punto dove il carico è massimo e l'altra nel punto di rottura. L'intersezione di queste rette con l'asse delle ordinate ha permesso di calcolare rispettivamente il valore della tensione a carico massimo e quella a rottura. Nella figura 4.2 è mostrato il procedimento per ottenere la tensione a carico massimo, o resistenza a trazione, e la tensione di rottura.

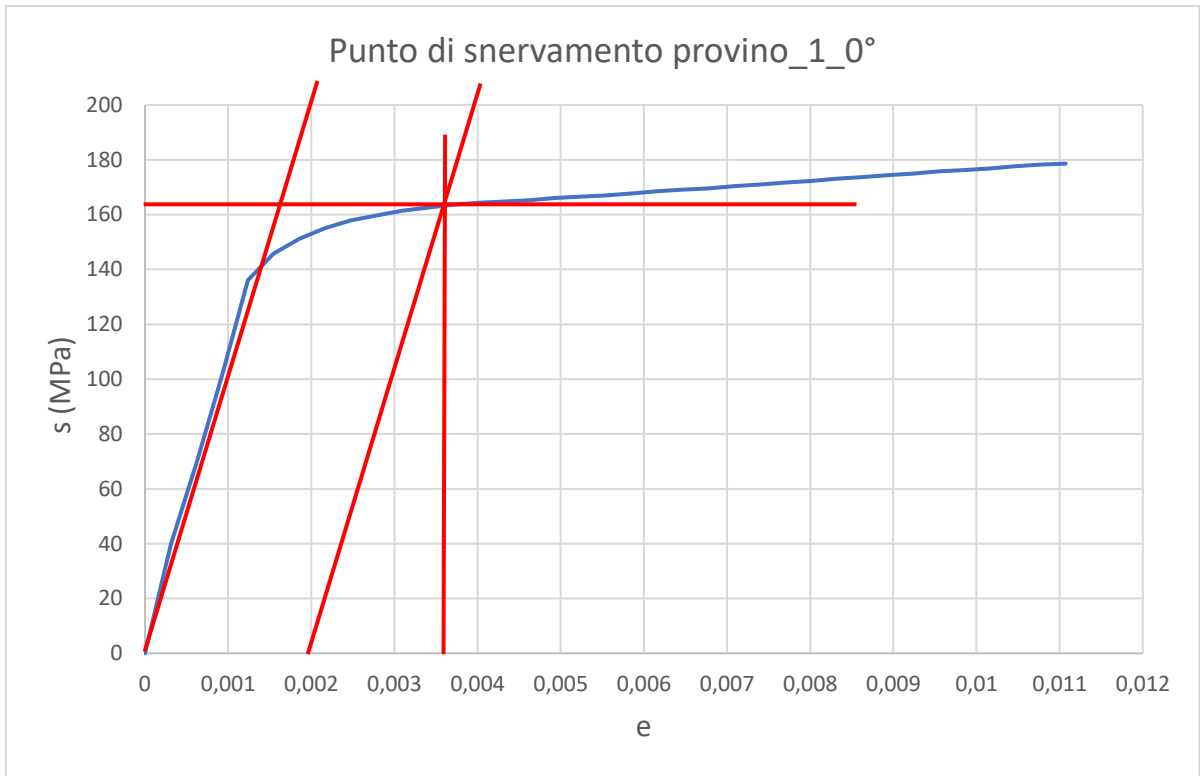


Figura 4.1 – Punto di snervamento

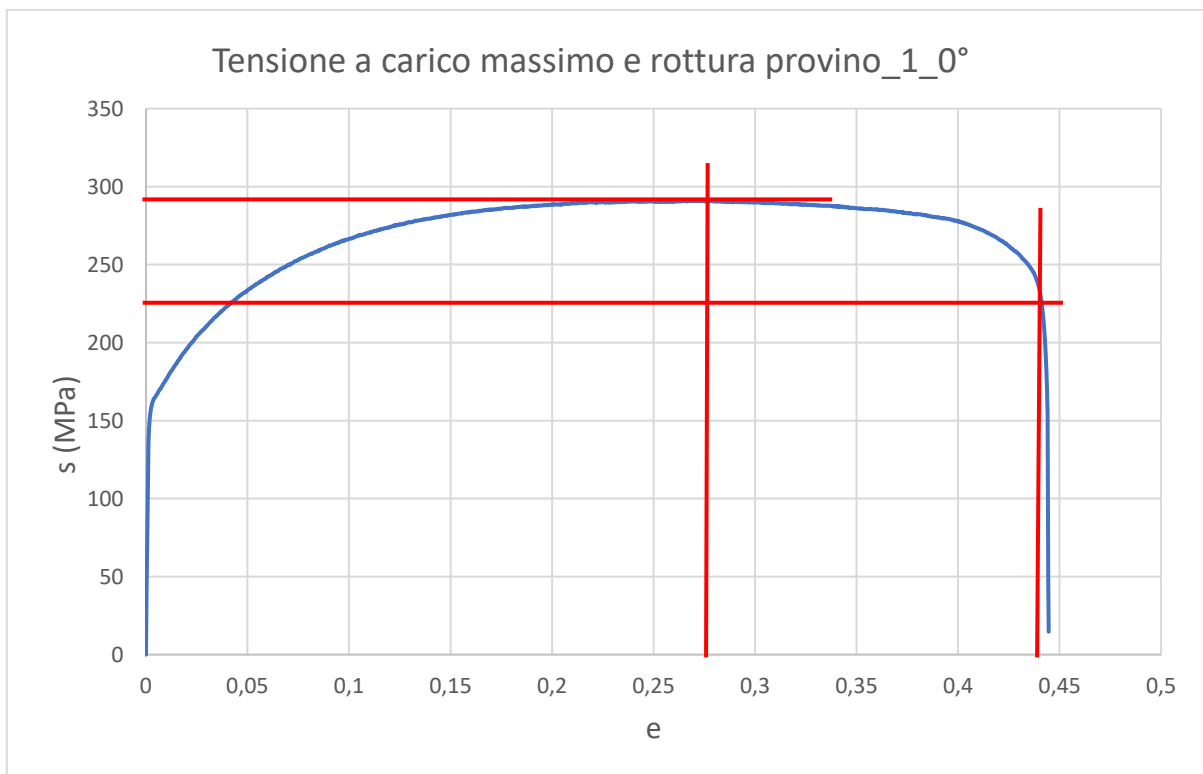


Figura 4.2 – Tensione e deformazione a carico massimo

Anche i valori degli allungamenti percentuali possono essere ricavati dalla curva dei valori nominali: in questo studio è stato ricavato A_{gt} , allungamento percentuale totale a carico massimo e A_t , allungamento percentuale totale a rottura. Entrambi si ricavano tracciando una retta verticale rispettivamente nel punto a carico massimo e di rottura (Figura 4.3).

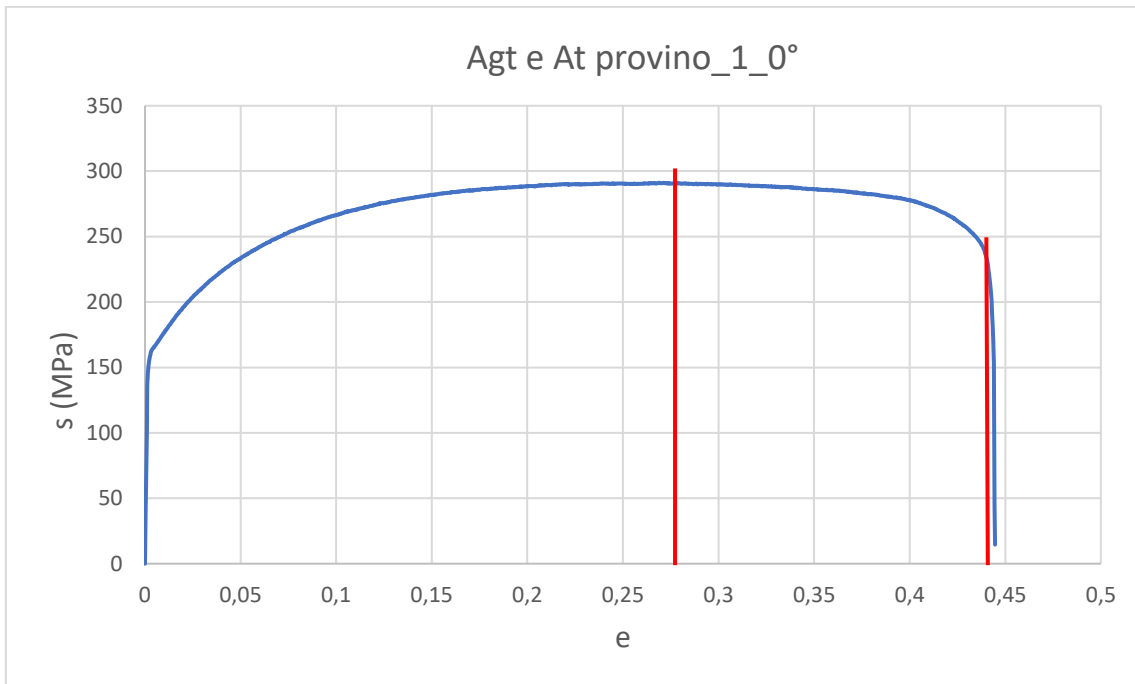


Figura 4.3 – Allungamenti percentuali A_{gt} e A_t

Una volta terminato il calcolo delle proprietà principali con la curva dei valori nominali, si è passati alla curva dei valori reali. Le relazioni che hanno permesso il calcolo della tensione e della deformazione reale sono la (2.17) e la (2.18). La curva dei valori reali è spostata più in alto e a sinistra rispetto a quello dei valori nominali corrispondente come ci si aspettava (Figura 4.4). Come già descritto nel paragrafo §2.1.3, facendo i logaritmi in base 10 della tensione e deformazione nominale, si costruisce il grafico doppio-logaritmico $\log\sigma$ - $\log\epsilon$. I punti si dispongono lungo una linea quindi si traccia la retta interpolante tali punti che ci permette di ricavare il coefficiente di incrudimento n e il coefficiente di resistenza K (Figura 4.5).

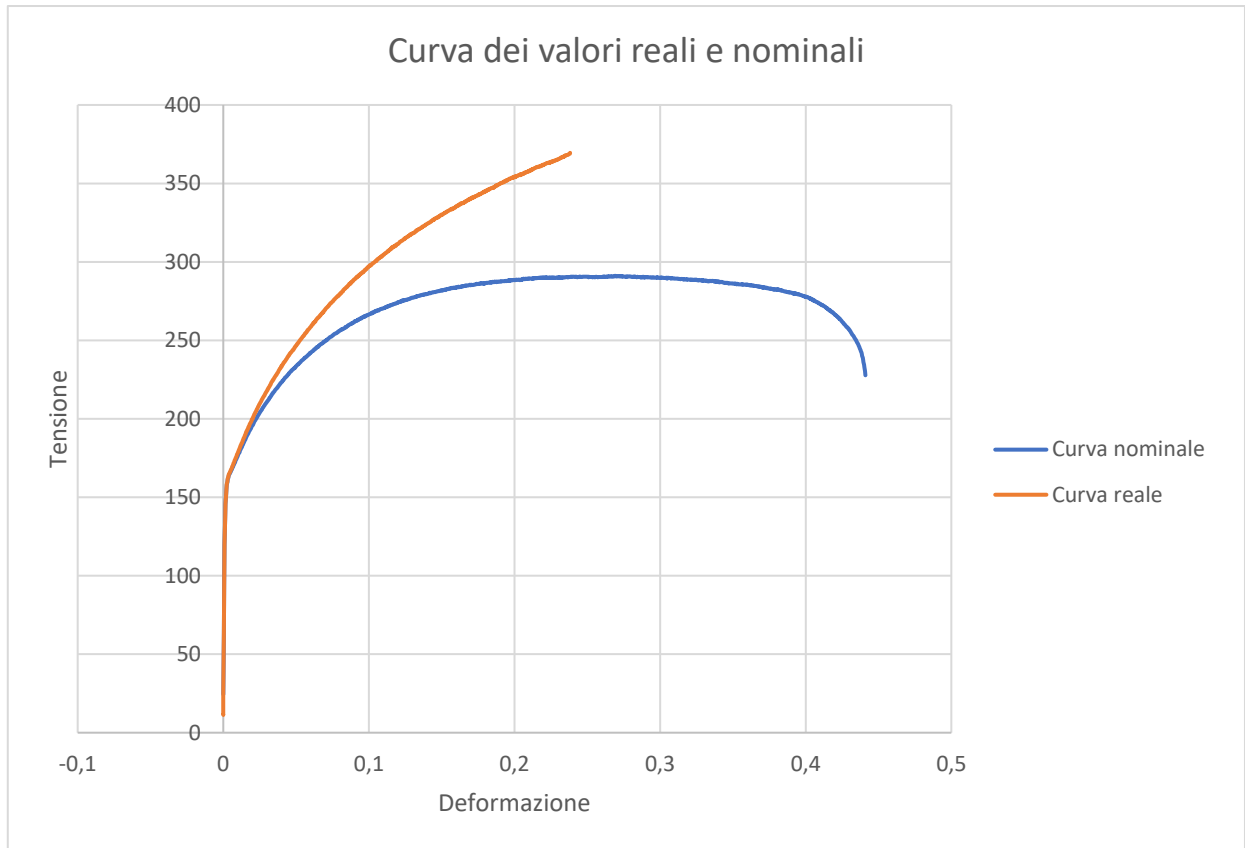


Figura 4.4 – Curva dei valori reali e nominali a confronto

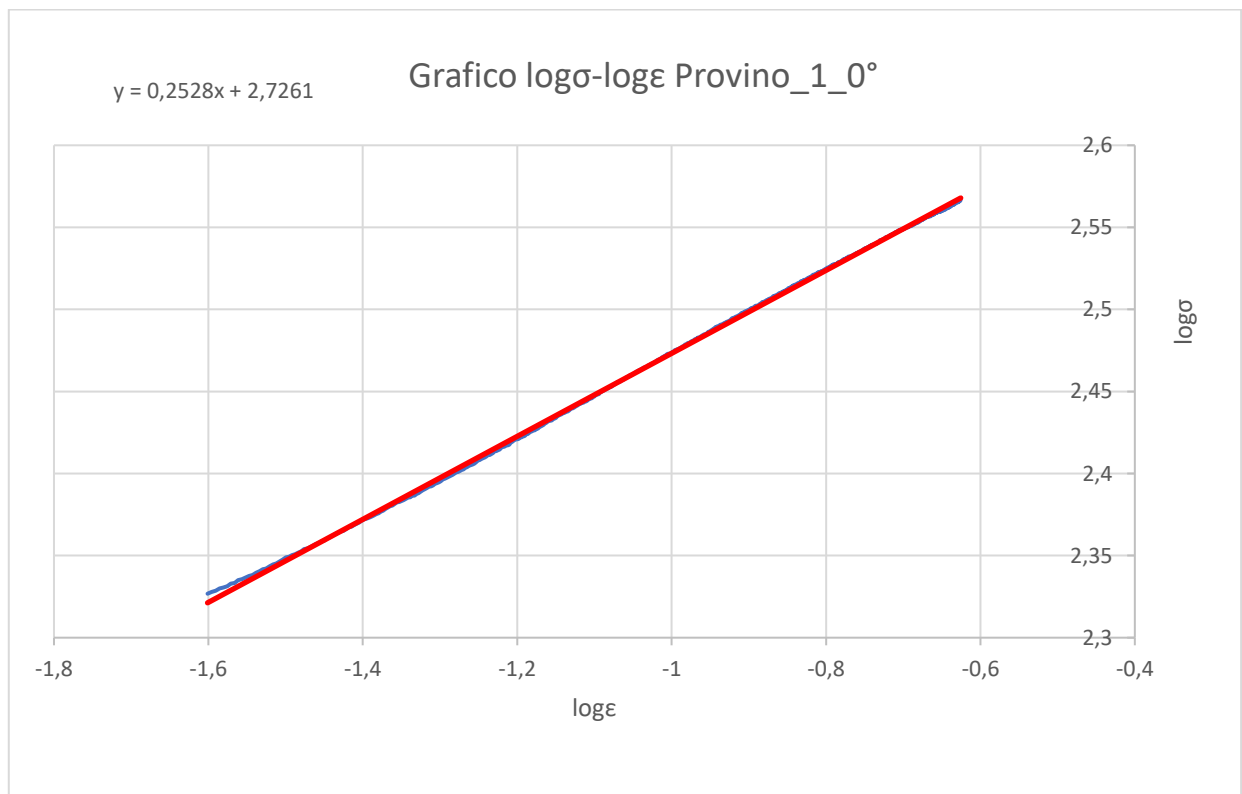


Figura 4.5 – Grafico doppio-logaritmico

Tutto il procedimento sopra descritto per un provino si ripete per tutti i provini e per tutti i valori dell'indice di anisotropia normale. Nelle figure 4.6, 4.7 e 4.8 sono rappresentate le curve dei valori nominali di tutti i provini che sono stati testati.

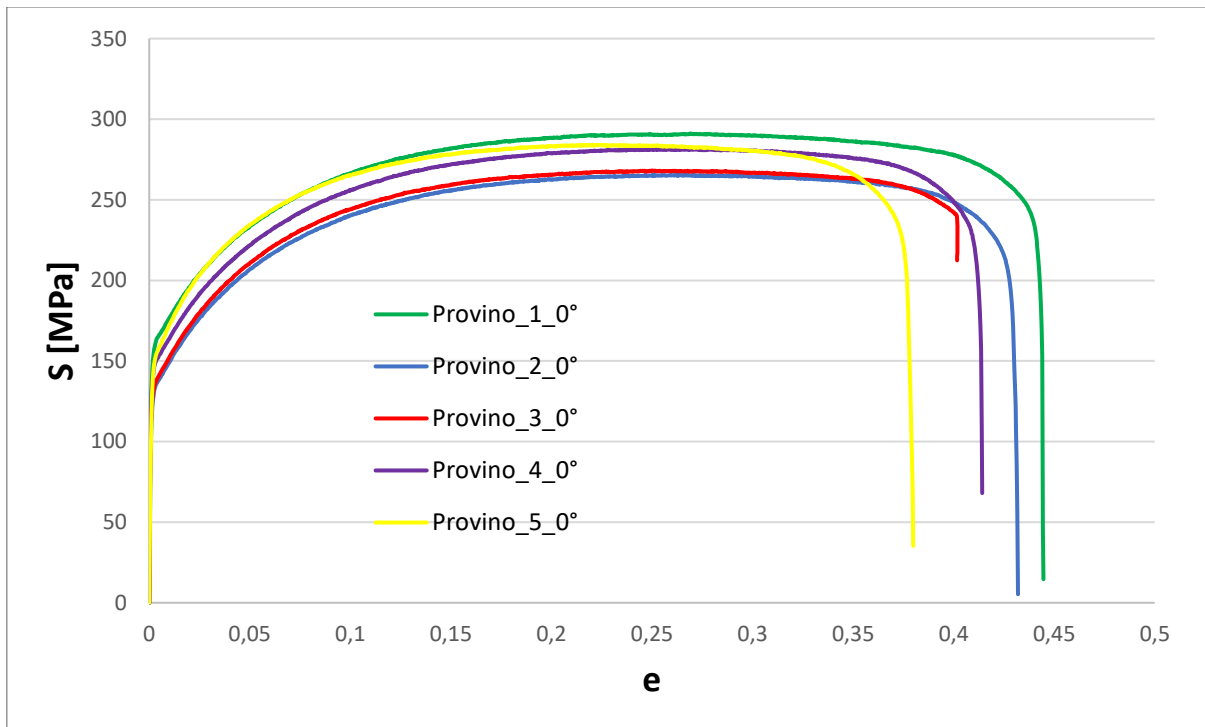


Figura 4.6 – Curve dei valori nominali per i provini con indice di anisotropia normale R_0

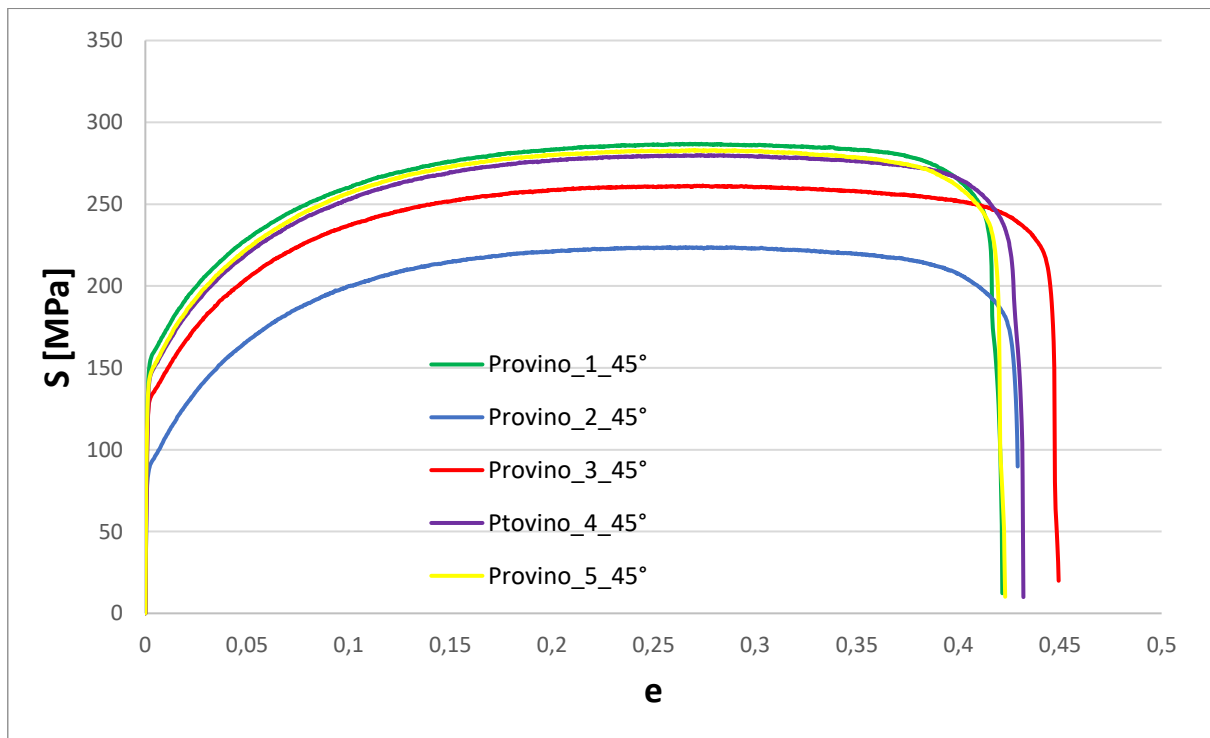


Figura 4.7 – Curve dei valori nominali per i provini con indice di anisotropia normale R_{45}

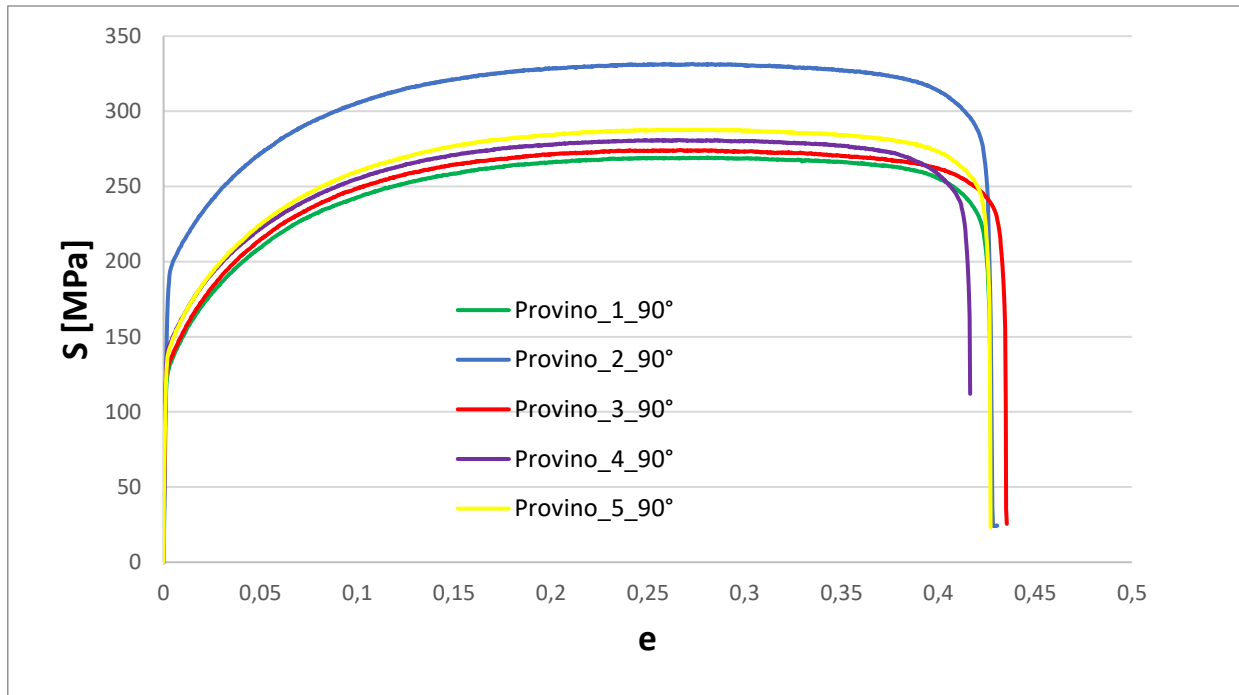


Figura 4.8 – Curve dei valori nominali per i provini con indice di anisotropia normale R_{90}

Per ogni proprietà meccanica individuata si sono presi i valori ottenuti dai 5 provini e si è fatta la media di quest’ultimi. Tutte le proprietà con i rispettivi valori e la media sono riassunte nelle seguenti tabelle (Tabella 4.1, 4.2 e 4.3):

Tabella 4.1 – Principali proprietà meccaniche dei provini con indice di anisotropia normale R_0

Fibre 0°							
	Rp (Mpa)	Rm (Mpa)	Agt	Rt (Mpa)	At	n	K
Provino 1	163,65	291,18	26,9%	227,74	44,10%	0,253	532,1
Provino 2	135,21	265,44	26,7%	209,50	42,65%	0,275	503,5
Provino 3	134,92	268,19	25,0%	240,89	40,12%	0,278	508,2
Provino 4	151,74	281,49	25,7%	210,49	41,14%	0,264	524,8
Provino 5	155,32	284,14	22,42%	209,24	37,61%	0,239	524,8
	148,17	278,09	25,34%	219,57	41,12%	0,262	518,7

Tabella 4.2 – Principali proprietà meccaniche dei provini con indice di anisotropia normale R_{45}

Fibre 45°							
	Rp (Mpa)	Rm (Mpa)	Agt	Rt (Mpa)	At	n	K
Provino 1	155,87	286,86	27,63%	231,89	41,51%	0,259	527,2
Provino 2	89,61	223,71	28,58%	170,92	42,55%	0,297	438,5
Provino 3	89,61	261,46	27,42%	208,72	44,44%	0,297	438,5
Provino 4	150,72	280,02	28,46%	209,36	42,68%	0,264	438,5
Provino 5	151,01	283,03	29,01%	208,63	41,90%	0,263	524,8
	127,37	267,02	28,22%	205,90	42,62%	0,276	473,5

Tabella 4.3 – Principali proprietà meccaniche dei provini con indice di anisotropia R_{90}

	Fibre 90°						
	Rp (Mpa)	Rm (Mpa)	Agt	Rt (Mpa)	At	n	K
Provino 1	125,68	269,26	28,09%	214,18	42,40%	0,297	438,5
Provino 2	186,81	331,68	27,32%	260,11	42,46%	0,242	594,3
Provino 3	136,03	274,39	26,68%	226,26	43,08%	0,296	515,2
Provino 4	146,92	280,94	26,63%	216,33	41,43%	0,263	521,2
Provino 5	146,21	287,83	26,46%	204,97	42,55%	0,269	539,5
	138,71	278,09	26,96%	215,43	42,36%	0,281	503,6

I risultati forniti dal provino 2 con le fibre disposte a 90° rispetto a RD (le cui proprietà sono colorate in azzurro in Tabella 4.3) sono molto distanti da quelli forniti dagli altri provini con stessa orientazione delle fibre. Di conseguenza la prova è stata evidentemente effettuata in modo errato e i risultati forniti da questo provino non sono stati presi in considerazione quando si è fatta la media aritmetica.

Confrontando i valori della resistenza a snervamento, carico massimo e rottura per i provini con indice R_0 , si nota subito che risultano maggiori rispetto a quelli con indice R_{45} oppure R_{90} . Questo era facilmente intuibile dato che per i provini con indice R_0 hanno direzione di laminazione coincidente con la direzione in cui viene applicata la forza.

4.2 ANISOTROPIA

La prova di trazione interrotta è stata svolta sui provini per valutare l'anisotropia. Come già detto in precedenza, la prova è detta "interrotta" perché non si porta il provino fino alla rottura ma si arresta la prova nella zona della deformazione plastica omogenea. Si sono svolte 5 prove per ogni valore dell'indice di anisotropia normale R (R_0, R_{45}, R_{90}) e per ognuno dei provini deformati si sono prese in esame almeno 3 sezioni, quella all'inizio, al centro e alla fine del tratto utile L_0 . In queste 3 sezioni si misurano lo spessore (t) e la larghezza (w) sia prima che dopo la prova e si ottengono dunque 3 valori per la larghezza iniziale w_0 , la larghezza finale w_f , lo spessore iniziale t_0 e lo spessore finale t_f . Si fa una media per ogni grandezza determinata e poi si calcola la deformazione ε_t , deformazione nella direzione dello spessore, e la ε_w , deformazione nella direzione della larghezza. In Tabella 4.4, Tabella 4.5 e Tabella 4.6

sono mostrati i valori ottenuti grazie alla media aritmetica degli spessori e delle larghezze e le relative deformazioni.

Tabella 4.4 – Risultati misurazioni provini con indice R_0

	Media delle misurazioni					
	Wo	Wf	to	tf	ϵ_w	ϵ_t
PROVINO 1	12,557	11,560	0,610	0,587	0,083	0,039
PROVINO 2	12,557	11,600	0,610	0,583	0,079	0,045
PROVINO 3	12,660	11,673	0,610	0,583	0,081	0,045
PROVINO 4	12,540	11,573	0,610	0,590	0,080	0,033
PROVINO 5	12,577	11,677	0,610	0,590	0,074	0,033

Tabella 4.5 – Risultati misurazioni provini con indice R_{45}

	Media delle misurazioni					
	Wo	Wf	to	tf	ϵ_w	ϵ_t
PROVINO 1	12,580	11,650	0,613	0,590	0,077	0,039
PROVINO 2	12,560	11,647	0,620	0,583	0,075	0,061
PROVINO 3	12,557	11,637	0,610	0,590	0,076	0,033
PROVINO 4	12,557	11,663	0,610	0,580	0,074	0,050
PROVINO 5	12,560	11,657	0,610	0,583	0,075	0,045

Tabella 4.6 – Risultati misurazioni provini con indice R_{90}

	Media delle misurazioni					
	Wo	Wf	to	tf	ϵ_w	ϵ_t
PROVINO 1	12,557	11,657	0,620	0,590	0,074	0,050
PROVINO 2	12,560	11,683	0,610	0,590	0,072	0,033
PROVINO 3	12,553	11,643	0,620	0,583	0,075	0,061
PROVINO 4	12,560	11,690	0,610	0,583	0,072	0,045
PROVINO 5	12,543	11,617	0,610	0,590	0,077	0,033

Da queste misurazioni si ricava il valore dell'indice di anisotropia normale con l'equazione (2.27) nelle diverse direzioni rispetto alla direzione di laminazione. Grazie a questi valori si determinano poi i parametri che permettono di valutare l'anisotropia che sono l'indice medio di anisotropia normale e l'indice di anisotropia planare con le equazioni (2.28) e (2.29). I risultati per le diverse prove sono mostrati nella seguente tabella (Tabella 4.7).

Tabella 4.7 – Calcolo dei diversi parametri dell'anisotropia

	R			ΔR	Rm
	R0	R45	R90		
Prova 1	2,120	1,980	1,500	-0,085	1,895
Prova 2	1,773	1,238	2,170	0,367	1,605
Prova 3	1,815	2,283	1,234	-0,379	1,904
Prova 4	2,406	1,463	1,606	0,271	1,735
Prova 5	2,227	1,670	2,302	0,298	1,967
MEDIA	2,068	1,727	1,763	0,094	1,821

Esaminando la tabella, si evince che il metallo avrà formazione di orecchie molto ridotta poiché il valore dell'indice di anisotropia planare è molto basso, vicino allo zero. Il valore dell'indice medio di anisotropia normale invece è abbastanza elevato poiché è lontano dall'unità (condizione in cui si presenta isotropia). Il metallo quindi non presenta un eccessivo assottigliamento che provocherebbe fratture duttili, le quali si presenterebbero per bassi valori di Rm. Si conclude che il metallo si presta bene a subire processi di formatura plastica dati i bassi valori dell'indice di anisotropia planare e gli alti valori dell'indice medio di anisotropia normale.

Conclusioni

Il presente lavoro è stato intrapreso al fine di studiare le più importanti proprietà meccaniche di un acciaio per stampaggio.

Lo studio delle proprietà meccaniche di un materiale metallico ci fa comprendere quanto il materiale è adatto ad una determinata prestazione ed è di fondamentale importanza per la progettazione di qualsiasi processo di formatura plastica. Il materiale oggetto di studio è stato l'acciaio DX54D, uno degli acciai per stampaggio più adatti a subire deformazioni plastiche. Per determinare le proprietà meccaniche è stata svolta la prova di trazione, la prova più importante e usata tra tutte le prove meccaniche distruttive. Successivamente è stata eseguita anche la prova a trazione interrotta per determinare l'anisotropia del materiale. Entrambe le prove sono state eseguite a temperatura ambiente con la macchina MTS.

I più significativi risultati sperimentali ottenuti dai provini deformati con la prova di trazione possono essere riassunti come segue:

- i risultati forniti dal provino 2 con le fibre disposte a 90° rispetto a RD, sono molto distanti da quelli forniti dagli altri provini con stessa orientazione delle fibre. Se ne deduce quindi che la prova è stata effettuata in modo errato e i risultati forniti da questo provino non sono stati presi in considerazione in questo studio;
- confrontando i valori della resistenza a snervamento, carico massimo e rottura, si nota subito che i provini con indice R_0 risultano avere maggior resistenza rispetto a quelli con indice R_{45} oppure con indice R_{90} ;
- l'allungamento percentuale totale a carico massimo A_{gt} e l'allungamento percentuale totale a rottura A_t assumono i valori più elevati con fibre orientate a 45° mentre sono minimi con fibre orientate a 0° ;
- il valore del coefficiente di incrudimento è massimo quando le fibre sono disposte a 90° mentre è minimo per fibre disposte a 0° ;
- il valore del coefficiente di resistenza è massimo quando le fibre sono disposte a 0° mentre è minimo quando le fibre sono disposte a 45° .

Per valutare l'anisotropia sono state condotte prove di trazione interrotta. I più significativi risultati sperimentali ottenuti dai provini deformati con la prova di trazione interrotta possono essere riassunti come segue:

- il valore medio di R_0 è il più elevato mentre il valore medio di R_{45} è il più basso. Il valore di R_{90} è molto vicino a quello di R_{45} ;
- il metallo avrà formazione di orecchie molto ridotta poiché il valore dell'indice di anisotropia planare è molto basso, vicino allo zero;
- il valore dell'indice medio di anisotropia normale è abbastanza elevato poiché è lontano dall'unità (condizione in cui si presenta isotropia). Di conseguenza il metallo non presenta un eccessivo assottigliamento che provocherebbe fratture duttili.

Riferimenti bibliografici

- [1] Jianfeng Yang, Yun Yu, Teng Ma, Cuiguang Zhang, Quan Wang, Evolution of energy and metal demand driven by industrial revolutions and its trend analysis, Chinese Journal of Population, Resources and Environment 19 (2021) 44-52
- [2] W. Nicodemi, Metallurgia, Zanichelli (2007)
- [3] V.K. Bupesh Raja, K. Palanikumar, R. Rohith Renish, A.N. Ganesh Babu, Jashwanth Varma, P. Gopal, Corrosion resistance of corten steel – A review, Materials Today: Proceedings 46 (2021) 3572-3577
- [4] UNI EN 10027-1:2016, Designation systems for steels – Part 1: Steel names, European Committee for Standardization (CEN), Brussels (2016)
- [5] UNI EN 10346:2015, Continuously hot-dip coated steel flat products for cold forming – Technical delivery conditions, European Committee for Standardization (CEN), Brussels (2015)
- [6] ISO 6892-1:2009(E), Metallic materials – Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature, International Standard Organization (ISO), Switzerland (2009)
- [7] Mansoo Joun, Insu Choi, Jaegun Eom, Mincheol Lee, Finite element analysis of tensile testing with emphasis on necking, Computational Materials Science 41 (2007) 63–69
- [8] Sonja Kostic, Jasmina Miljojkovic, Goran Simunovic, Djordje Vukelic, Branko Tadic, Uncertainty in the determination of elastic modulus by tensile testing, Engineering Science and Technology, an International Journal 25 (2002) 100998
- [9] EN-1993-1-1, Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, European Committee for Standardization (CEN), Brussels (2005)

- [10] F.B. Klose, A. Ziegenbein, J. Weidenmüller, H. Neuhäuser, P. Hähner, Portevin-LeChatelier effect in strain and stress controlled tensile tests, *Computational Materials Science* 26 (2003) 80-86
- [11] Apu Sarkar, Sturat A. Maloy, Korukonda L. Murty, Investigation of Portevin – Le Chatelier effect in HT-9 steel, *Materials Science & Engineering A* 631 (2015) 120-125
- [12] M. Srinivas, S. V. Kamat, P. Rama Rao, Influence of dynamic strain ageing on mixed mode I/III fracture toughness of Armco iron, *Materials Science and Engineering: A Volume* 443 (2007) 132-141
- [13] A. Nagesha, M. Valsan, R. Kannan, K. Bhanu Sankara Rao, S. L. Mannan, Influence of temperature on the low cycle fatigue behaviour of a modified 9Cr-1Mo ferritic steel, *International Journal of Fatigue* 24 (2002) 1285-1293
- [14] Hyeong Do Kweon, Jin Weon Kim, Ohseop Song, Dongho Oh, Determination of true stress-strain curve of type 304 and 316 stainless steels using a typical tensile test and finite element analysis, *Nuclear Engineering and Technology* 53 (2021) 647-656
- [15] A. Abedini, A. Narayanan, C. Butcher, An investigation into the characterization of the hardening response of sheet metals using tensile and shear tests with surface strain measurement, *Forces in Mechanics* 7 (2022) 100090
- [16] Lu Yao, Shaofeng Zhang, Xiaojian Cao, Zhenyuan Gu, Changzi Wang, Wentao He, Tensile mechanical behavior and failure mechanisms of fiber metal laminates under various temperature environments, *Composite Structures* 284 (2022) 115142
- [17] Dongpo Xuan, Cheng Zhou, You Zhou, Tianliang Jiang, Biji Zhu, Wenhao Fan, Effect of test temperature on tensile behavior of Fe-6.5wt.%Si alloy as-cast strip, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 559 (2022) 169540
- [18] Xiang Yun, Leroy Gardner, Stress-strain curves for hot-rolled steels, *Journal of Constructional Steel Research* (2017) 36-46

- [19] Alireza Bagheri, Ali Shabani, Mohammad Reza Toroghinejad, Aboozar Taherizadeh, Post-rolling annealing of a multilayered Brass/IFS/Brass composite: An evaluation of anisotropy, formability, and mechanical properties, *Journal of Materials Research and Technology* (2022); 19:732-746
- [20] Yi Yao, Chuming Liu, Yonghao Gao, Shilun Yu, Shunong Jiang, Zhiyong Chen, Annealing-induced microstructural evolution and mechanical anisotropy improvement of the Mg-Gd-Y-Zr alloy processed by hot ring rolling, *Materials Characterization* 144 (2018) 641-651
- [21] Iulian-Ionut Ailinei, Sergiu-Valentin Galatanu, Liviu Marsavina, Influence of anisotropy on the cold bending of S600MC sheet metal, *Engineering Failure Analysis* 137 (2022) 106206
- [22] H. Hoffmann, C. Vogl, Determination of True Stress-Strain-Curves and Normal Anisotropy in Tensile Tests with Optical Strain Measurement, *CIRP Annals Volume 52, Issue 1* (2003) Pages 217-220
- [23] Deepika Tirumalasetty, Darshan Chalapathi, Veerabhadra Veeramusti, S. Sankaran, Anand K. Kanjarla, Bain variant dependent plastic anisotropy and formability in duplex stainless steels, *Materials Letters* 307 (2022) 131031