



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**STUDIO DI PROCESSI DI FORMATURA PLASTICA DI LEGHE DI
TITANIO**

**STUDY OF PLASTIC FORMING PROCESSES OF TITANIUM
ALLOYS**

Relatore:
Prof. Ing. Archimede Forcellese

Tesi di Laurea di:
Rachele Romagnoli

Correlatore:
Prof. Ing. Michela Simoncini

A.A. 2019 / 2020

Indice

Introduzione	1
Capitolo 1: Il titanio	
1.1 Aspetti generali	2
1.2 Cenni storici	5
1.3 Il titanio e le sue leghe	6
Capitolo 2: Lavorazioni plastiche	
2.1 Prove meccaniche	14
2.2 Prova di trazione	17
2.3 Proprietà meccaniche	27
Capitolo 3: Procedure sperimentali	
3.1 Materiale	31
3.2 Procedura in laboratorio	34
Capitolo 4: Risultati e discussione	
4.1 Risultati della prova di trazione	38
4.2 Valutazione anisotropia	50
Capitolo 5: Conclusione	55
Bibliografia e sitografia	58

INTRODUZIONE

Il titanio, fin dai primi utilizzi negli anni '50, ha attratto nel tempo sempre maggiore interesse grazie alle sue caratteristiche uniche che hanno permesso di compensare il suo elevato costo di produzione, unico punto a suo sfavore.

Il titanio mostra un eccellente comportamento alle alte temperature e un'ottima resistenza meccanica, rapportata al peso, che gli permettono di essere un candidato idoneo per la costruzione di turbine a gas, strutture aerospaziali e per i motori degli aerei. Inoltre questo elemento a contatto con l'aria forma spontaneamente un sottile strato di ossido protettivo che gli conferisce un'elevata resistenza alla corrosione.

Grazie a queste proprietà le sue leghe, che permettono di migliorare le proprietà meccaniche del materiale, vengono impiegate in diversi settori, quali quello chimico, aeronautico, energetico, biomedico, automotive e manifatturiero. [7]

In particolare, il titanio puro grado 1, data la sua struttura cristallografica esagonale compatta, è caratterizzato da un elevato comportamento anisotropo.

In questo lavoro sono state studiate le caratteristiche di questo materiale, in particolare le proprietà meccaniche e l'anisotropia utilizzando prove di trazione con rottura del provino e prove di trazione interrotte effettuate in laboratorio.

CAPITOLO 1

Il titanio

1.1 Aspetti generali

Il titanio (Ti) è un elemento della tavola periodica e ha come numero atomico 22, è un metallo duttile e malleabile, di colore bianco, leggero ma molto resistente (Figura 1.1).



Figura 1.1 - Titanio puro

Si trova al nono posto per abbondanza sulla terra ma non lo si trova libero in natura, infatti è presente nei materiali come: anatasio, brookite, perovskite, ilmenite, leucoxene, sfeno e rutilo.

Pur essendo il titanio un elemento molto costoso il diossido di titanio, ottenuto per reazione diretta del metallo con l'ossigeno ad alta temperatura, al contrario è economico e molto utilizzato come pigmento bianco in vernici, plastiche e cemento da costruzione.

In merito alla produzione del titanio, con minerali a base di rutilo o leucoxene, questi vengono arricchiti attraverso processi di levigazione ed in caso separazione magnetica ed elettrostatica fino ad un 95% di TiO_2 . In caso di metalli a base di ilmenite (più poveri di titanio) si sottopongono a procedimenti di separazione degli ossidi di ferro e si ottengono scorie contenenti l'equivalente di circa l'85% di TiO_2 .

Dal momento che non è possibile la riduzione diretta del diossido né con carbone né con metalli riducenti, si prepara il tetracloruro che viene quindi ridotto a metallo e per ottenere ciò i minerali arricchiti vengono clorurati a 700-1000 °C formando tetracloruro di titanio.

Quest'ultimo contiene ancora diverse impurezze come: silicio, alluminio, vanadio, stagno e acido cloridrico di conseguenza deve essere ulteriormente purificato con distillazione frazionata o altro fino ad un titolo superiore al 99%. La procedura di riduzione del tetracloruro può essere effettuata mediante magnesio (processo Kroll) o con sodio (processo Hunter) a 800-900°C in atmosfera di gas inerte (generalmente argon). Il cloruro di magnesio o di sodio vengono recuperati ed elettrolizzati ottenendo così magnesio, o sodio, e cloro che vengono riciclati mentre, dopo distillazione e lavaggi, la spugna di titanio che otteniamo viene compattata per sinterizzazione.

Il titanio che si ottiene mediante questi processi ha una purezza del 99.2-99.8%, si può ottenere anche una purezza del 99.9% mediante una riduzione del tetracloruro con una formazione di spugna di titanio al catodo e cloro all'anodo.

PROPRIETA' FISICHE TITANIO PURO	VALORI
Numero atomico	22
Massa atomica	47,86
Densità a 20 °C (g/cm ³)	4,51
Punto di fusione (°C)	1650 - 1700
Calore specifico (cal/g * °C)	519
Espansione termica (μm/m * °C)	3
Conducibilità termica (W/m * K)	21,9
Resistività elettrica (μΩ * cm)	55
Conducibilità elettrica (%IACS)	31
Modulo di Young (Mpa)	103000
Coefficiente di Poisson	0,34
Durezza (HB)	120

Tabella 1.1 - Proprietà fisiche del titanio

Con la Tabella 1.1 si evidenziano le proprietà fisiche del titanio puro, un elemento con bassa densità, elevata resistenza alla corrosione, grazie alla sua capacità di formare spontaneamente a contatto con l'aria un sottile strato di ossido di titanio, e un vantaggioso rapporto resistenza/peso, è inoltre in grado di sostenere temperature estreme, è duttile e ha bassa conducibilità termica, espansione termica e basso modulo di elasticità. [3]

1.2 Cenni storici

Il primo ritrovamento dell'elemento di titanio risale al 1791, in Cornovaglia, quando il parroco William Gregor, attratto da particolari granuli neri della sabbia del fiume Helford, provò ad analizzarli e scoprì un elemento a lui sconosciuto a cui diede il nome di menacanite che oggi sappiamo essere ilmenite (Figura 1.2), un ossido misto di ferro e titanio (FeTiO_3).



Figura 1.2 - ilmenite

Successivamente, nel 1795, il chimico tedesco Martin Heinrich Klaproth studiò un campione di minerale rosso cristallino proveniente dall'attuale Slovacchia denominato rutilio (TiO_2) e dimostrò che sia questo elemento che quello scoperto dal parroco erano ossidi dello stesso metallo e gli diede il nome di titanio. Dovettero però passare più di cento anni prima di riuscire a ottenere titanio puro, a causa della tendenza di questo metallo a reagire con i gas dell'atmosfera in particolare con l'ossigeno.

Nel 1887 Lars Fredrik Nilson e Otto Pettersson riuscirono ad ottenere un 95% di titanio puro a partire dalla riduzione di tetracloruro di titanio con il sodio, eseguendo la reazione in un cilindro di acciaio inossidabile a tenuta d'aria.

Solo successivamente nel 1910 l'ingegnere aerospaziale neozelandese Matthew A. Hunter riuscì ad ottenere titanio puro al 99,9% utilizzando un metodo denominato poi come "processo Hunter", questo si differenzia da quello utilizzato da Nilson e Pettersson dal semplice utilizzo di tetracloruro di titanio molto più puro e di conseguenza ottenne un risultato migliore.

William J Kroll sostituì il magnesio al sodio e nel 1937 vennero prodotte le prime tonnellate di titanio. Quest'ultimo processo viene largamente sfruttato ancora oggi pur essendo molto costoso e meno efficiente di quello che porta alla produzione di acciaio in altoforno. Il primo e vero utilizzo avvenne nei primi anni '40 grazie all'industria bellica statunitense. [1]

1.2 Il titanio e le sue leghe

Il titanio possiede varie caratteristiche che lo rendono diverso da altri metalli leggeri e grazie alla sua struttura risulta sia complesso che interessante. Le leghe di questo materiale ottenute dall'aggiunta di particolari elementi, permettono di migliorarne le proprietà meccaniche come la resistenza a trazione e a snervamento, di incrementarne la tenacità e la resistenza a ossidazione.

A temperatura ambiente, il titanio possiede una struttura cristallina esagonale compatta (HCP, fase alfa), fino ad una data temperatura dove si trasforma in una struttura cubica a corpo centrato (BCC, fase beta), questa rimane stabile fino al punto di fusione che varia tra i 1650 °C e i 1700 °C, le due singole fasi sono separate dalla fase alfa-beta. La temperatura minima alla quale avviene questa trasformazione è definita beta-transus, vale 882 °C e può variare in base ad una sufficiente aggiunta di beta stabilizzanti al materiale.

Una più approfondita suddivisione inserisce anche la fase quasi alfa e la fase quasi beta come descritto nella Tabella 1.2. In particolare le leghe quasi alfa, oltre a contenere gli stabilizzanti in fase alfa, sono legate con l'1-2% di stabilizzanti in fase beta come molibdeno, silicio o vanadio.

L'aggiunta di elementi in lega può alzare o abbassare la temperatura di transizione e in base anche alla loro solubilità favorisce la fase alfa, la fase beta oppure tali elementi restano neutrali.

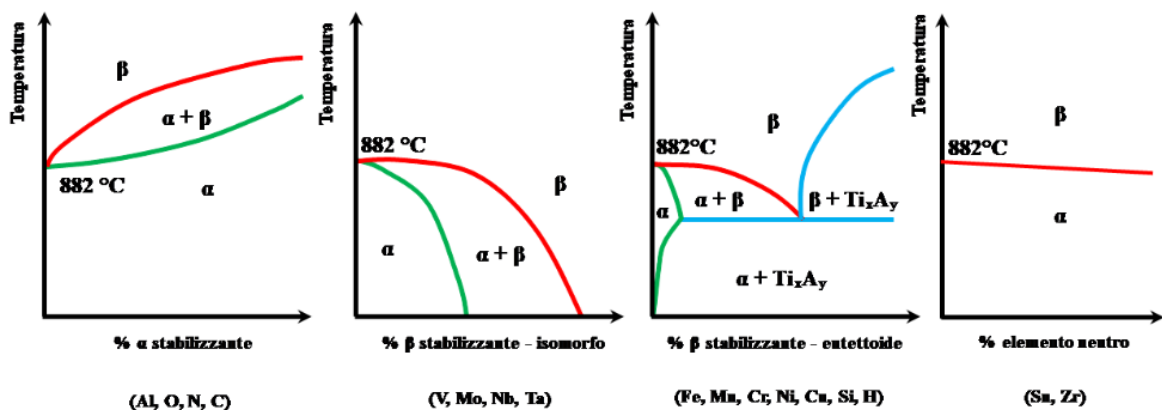


Figura 1.3 - Esempi delle differenti tipologie di diagrammi di stato binari, in cui si evidenzia l'effetto dei principali elementi di lega sulla temperatura di beta-transus e sulla stabilità delle fasi alfa e beta

Nella Figura 1.3 si possono vedere degli esempi delle differenti tipologie di diagrammi di stato binari, in cui si evidenzia l'effetto dei principali elementi di lega sulla temperatura di beta-transus e sulla stabilità delle fasi alfa e beta.

Nome Comune	Composizione (%)	β -Transus (°C)
Leghe α e titanio commercialmente puro		
Grado 1	CP-Ti (0,2 Fe – 0,18 O)	890
Grado 2	CP-Ti (0,3 Fe – 0,25 O)	915
Grado 3	CP-Ti (0,3 Fe – 0,35 O)	920
Grado 4	CP-Ti (0,5 Fe – 0,40 O)	950
Grado 7	Ti-0,2Pd	915
Grado 12	Ti-0,3Mo-0,76Ni	880
Ti-5-2,5 / Grado 6	Ti-5Al-2,5Sn	1040
Ti-3-2,5 / Grado 9	Ti-3Al-2,5V	935
Leghe quasi α		
Ti-8-1-1	Ti-8Al-1V-1Mo	1040
IMI 685	Ti-6Al-5Zr-0,5Mo-0,25Si	1020
Ti-6-2-4-2	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0,1Si	995
IMI 834	Ti-5,8Al-4Sn-3,5Zr-0,5Mo-0,7Nb-0,35Si-0,06C	1045
Leghe $\alpha + \beta$		
Ti-6-4 (0.20 max O) / Grado 5	Ti-6Al-4V	995
Ti-6-4 ELI (0.13 max O) / Grado 23	Ti-6Al-4V	975
Ti-662	Ti-6Al-6V-2Sn	945
IMI 550	Ti-4Al-2Sn-4Mo-0,5Si	975
Ti-6-2-4-6	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	935
Leghe quasi β		
β -CEZ	Ti-5Al-2Sn-2Cr-4Mo-4Zr-1Fe	890
Ti-5553	Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr	855 - 870
TMMA	Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn	-
Ti-10-2-3	Ti-10V-2Fe-3Al	790 - 805
-	Ti-35Nb-5Ta-7Zr	-
Leghe β		
-	Ti-29Nb-13Ta-4,6Zr	-
-	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	750 - 770
Beta 21S	Ti-15Mo-3Al-3Nb-0,2Si	795 - 805
Beta C	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	715- 740
-	Ti-12Mo-6Zr-2Fe	-
B120 VCA	Ti-13V-11Cr-3Al	650
Alloy C ⁽¹⁾	Ti-35V-15Cr	-

(1) E' l'unica tra le leghe riportate appartenente al sottogruppo delle leghe β -stabili, con un valore di Molibdeno Equivalente pari a 47,5

Tabella 1.2 - Elenco delle principali tipologie di titanio commercialmente puro e delle leghe di titanio di interesse industriale raggruppate per famiglia

L'alluminio, per esempio, stabilizza la fase alfa innalzando la temperatura di trasformazione alfa-beta, questo elemento è ampiamente utilizzato dal momento che costa poco, è facilmente reperibile e migliora la durezza della soluzione solida. Altri alfa stabilizzatori sono il carbonio, l'azoto e l'ossigeno; quest'ultimo permette l'innalzamento del carico di snervamento.

I beta stabilizzanti, invece, abbassano la temperatura di trasformazione alfa-beta, rendono la fase beta stabile alle basse temperature e si suddividono in beta-isomorfi e beta-eutettoidi a seconda della forma del diagramma di stato binario a cui danno luogo con il titanio. Alcuni di questi possono essere il silicio, il rame, il palladio, il cromo, l'idrogeno, ecc. Elementi come lo zirconio e lo stagno non modificano la temperatura di trasformazione.

La fase alfa mostra, rispetto alla fase beta, una maggiore resistenza alla deformazione plastica, una inferiore duttilità, maggiore anisotropia e migliore resistenza allo scorrimento; inoltre, la fase beta possiede un'elevata resistenza alla temperatura ambiente.

Nella fase intermedia, alfa-beta, troviamo una buona tenacità, producibilità e con l'aumento di beta stabilizzanti si migliora la resistenza a temperatura ambiente e decresce la resistenza allo scorrimento. [9]

Le leghe di titanio possono essere suddivise generalmente in due gruppi: titanio commercialmente puro (CP) e leghe a base di titanio. I materiali costituiti di titanio commercialmente puro sono semplicemente titanio puro (maggiore o uguale del 98%) e sono classificati in "gradi" dall'1 al 4 in base al loro livello di idrogeno, ossigeno, carbone, ferro e azoto (Tabella 1.3):

- Il titanio grado 1 è il più duttile tra le differenti tipologie di titanio commercialmente puro e possiede la più alta formabilità tra tutte le leghe di titanio, unitamente a elevati valori di resistenza a corrosione e tenacità;

- Il titanio grado 2 può essere considerato il titanio commercialmente puro più prodotto e utilizzato. Possiede le stesse caratteristiche le grado 1 ma con un sensibile aumento del carico unitario di snervamento. Pertanto si tratta di un materiale che ha buona saldabilità, resistenza meccanica, duttilità e formabilità;
- Il titanio grado 3 costituisce un'evoluzione del grado 2 con un ulteriore incremento della resistenza meccanica;
- Il titanio grado 4 mantiene buone proprietà di formabilità e saldabilità, pur costituendo una variante a più alta resistenza meccanica rispetto alle altre tre. [8]

ELEMENTI	Grado 1	Grado 2	Grado 3	Grado 4
Azoto	0,03	0,03	0,05	0,05
Carbonio	0,08	0,08	0,08	0,08
Idrogeno	0,015	0,015	0,015	0,015
Ferro	0,2	0,3	0,3	0,5
Ossigeno	0,18	0,25	0,35	0,4

Tabella 1.3 - Gradi del titanio commercialmente puro

Le leghe di titanio (Tabella 1.4) sono ottenute dall'aggiunta di uno o più elementi di lega al titanio puro o a quello CP, l'aggiunta di alliganti determina la durezza, la duttilità e la resistenza alla corrosione del materiale.

In base alle strutture delle leghe di titanio solo determinati elementi vengono utilizzati per formare la lega, alcuni degli attributi utilizzati per la loro selezione sono il costo, la densità, la solubilità e il limite di incrudimento. [9]

L'organismo ASTM International (American Society for Testing and Materials) ha redatto la norma B265-25a che distingue i vari gradi del titanio,

questa indica il numero distintivo di ciascuna lega, la loro composizione chimica e le proprietà meccaniche.

Il titanio e le sue leghe, grazie alle elevate proprietà meccaniche, vengono impiegati in diversi settori che spaziano da quello nautico, per la sua resistenza alla corrosione e il vantaggioso rapporto peso-resistenza, a quello dell'automotive. Altri campi di applicazione di questo materiale sono quello chimico, farmaceutico, aerospaziale, fino al suo ampio utilizzo per protesi dentali e dispositivi medici.

Due leghe a base di titanio degne di essere descritte sono: il nitinolo (NiTi) e la lega niobio titanio.

- Il nitinolo è un composto intermetallico dove troviamo due elementi che sono nickel e titanio, dal punto di vista cristallino gli atomi si dispongono sullo stesso reticolo alternandosi. Questa lega è definita a memoria di forma o metalli intelligenti e sono due espressioni utilizzate per indicare una serie di composti metallici che, deformati meccanicamente, presentano la curiosa proprietà di tornare alla forma originale quando vengono scaldati al di sopra di una certa temperatura. Inoltre il metallo può essere “programmato” per assumere una forma desiderata, proprietà che lo rende particolarmente utile per molte applicazioni tecnologiche. Il nome Nitinol deriva dal nome del luogo in cui si vide la prima manifestazione dell'effetto di memoria di forma, Nickel-Titanium Naval Ordinance Lab, l'anno in cui avvenne è il 1963.

Questa lega è tutt'oggi molto utilizzata grazie al costo contenuto e la sua facilità di fabbricazione, i campi di applicazione sono vari e diversi tra loro, dalle missioni spaziali, alle decorazioni floreali, dagli stent

vascolari per garantire il flusso sanguigno nelle arterie, agli attuatori (tendini artificiali).

L'estrema flessibilità di questo materiale trova impiego anche negli apparecchi ortodontici, nelle montature di occhiali e nelle placche per saldare fratture ossee (Figura 1.4). [5]



Figura 1.4 - Da sinistra: uno stent in nitinolo con la tipica struttura a maglia intrecciata. Lo stent è introdotto ancora chiuso all'interno dei vasi che rischiano l'occlusione (al centro). Qui si espandono attivati dalla temperatura corporea (destra).

- La lega niobio titanio (Figura 1.5) è una lega metallica dalle interessanti proprietà superconduttive e a differenza di altri materiali superconduttori ha la qualità di essere piuttosto insensibile alla deformazione meccanica alla quale può essere soggetto in fase di fabbricazione dei conduttori o in opera. La fabbricazione avviene mediante estrusione in una matrice di rame e viene impiegata come cavi nei magneti superconduttori. [4]



Figura 1.5 - Lega niobio titanio

GRADI	DESCRIZIONE
1	Titanio puro, basso ossigeno (0,18 wt% max), bassa resistenza
2	Titanio puro, ossigeno standard (0,25 wt% max), media resistenza
3	Titanio puro, ossigeno medio (0,35 wt% max), alta resistenza
4	Titanio puro, ossigeno alto (0,40 wt% max), media resistenza
5	Lega di titanio (6% Al, 4% V)
7	Titanio puro, più 0,12-0,25% Pd, ossigeno standard, resistenza media
9	Lega di titanio (3% Al, 2,5% V), alta resistenza; principalmente per applicazioni aerospaziali
11	Titanio puro, più 0,12-0,25% Pd, ossigeno basso, resistenza bassa
12	Lega di titanio (0,3% Mo, 0,8% Ni), alta resistenza
13	Lega di titanio (0,5% Ni, 0,05% Ru), ossigeno basso
14	Lega di titanio (0,5% Ni, 0,05% Ru), ossigeno standard
15	Lega di titanio (0,5% Ni, 0,05% Ru), ossigeno medio
16	Titanio puro, più di 0,04-0,08% Pd, ossigeno standard, resistenza media
17	Titanio puro, più 0,04-0,08% Pd, ossigeno basso, resistenza bassa
18	Lega di titanio (3% Al, 2,5% V, più 0,04-0,08% Pd)
19	Lega di titanio (3% Al, 8% V, 6% Cr, 4% Mo)
20	Lega di titanio (3% Al, 8% V, 6% Cr, 4% Zr, 4% Mo)
21	Lega di titanio (15% Mo, 3% Al, 2,7% Nb, 0,25% Si)
23	Lega di titanio (6% Al, 4% V)
24	Lega di titanio (6% Al, 4% V, più 0,04-0,08% Pd)
25	Lega di titanio (6% Al, 4% V, più 0,03-0,8% Ni e più 0,04-0,08% Pd)
26	Titanio puro, più 0,08-0,14% Ru, ossigeno standard, resistenza media
27	Titanio puro, più 0,08-0,14% Ru, ossigeno standard, resistenza bassa
28	Lega di titanio (3% Al, 2,5% V, più 0,08-0,14% Ru)
29	Lega di titanio (3% Al, 4% V, più 0,14% Ru)
30	Lega di titanio (0,3% Co, 0,05% Pd)
31	Lega di titanio (0,3% Co, 0,05% Pd)
32	Lega di titanio (5% Al, 1% Sn, 1% Zr, 1% V, 0,8% Cr)
33	Lega di titanio (0,4% Ni, 0,015% Pd, 0,025% Ru, 0,15% Cr)
34	Lega di titanio (0,4% Ni, 0,015% Pd, 0,025% Ru, 0,15% Cr)
35	Lega di titanio (4,5% Al, 2% Mo, 1,6% V, 0,5% Ferro, 0,3% Si)
36	Lega di titanio (46% niobio)
37	Lega di titanio (1,5% Al)
38	Lega di titanio (4% Al, 2,5% V, 1,5% Ferro)

Tabella 1.4 - Descrizione leghe di titanio

CAPITOLO 2

Lavorazioni plastiche

2.1 Prove meccaniche

Le prove meccaniche descrivono il comportamento di un materiale e sono necessarie per conoscere l'attitudine elastica e plastica, la resistenza alle sollecitazioni e la resistenza all'abrasione, inoltre per sapere la qualità del materiale e grazie ai risultati ottenuti da queste prove, si riesce a scegliere il materiale migliore da utilizzare per un determinato impiego.

Le prove meccaniche possono classificarsi in: prove convenzionali, non riproducono le condizioni reali di utilizzazione del materiale ma forniscono una serie di grandezze con le quali è possibile confrontare; prove simulate o reali, riproducono il più fedelmente possibile le condizioni di esercizio del materiale e dunque possono essere le più diverse.

La prima tipologia può essere poi suddivisa in base alle modalità di applicazione della forza:

- Prove statiche, quando il carico viene applicato per un tempo prolungato e gradualmente, alcuni esempi sono:
 - Prova di trazione (Figura 2.1), si ha una sollecitazione a trazione quando la forza applicata fa tendere le fibre del materiale;

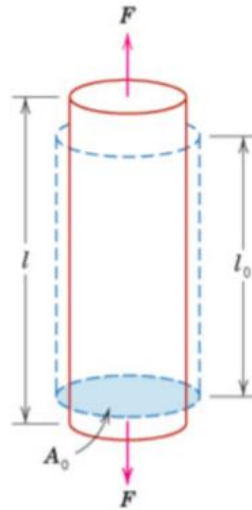


Figura 2.1 - Prova di trazione

- Prova di compressione (Figura 2.2), si ha una sollecitazione a compressione quando la forza applicata comprime le fibre;

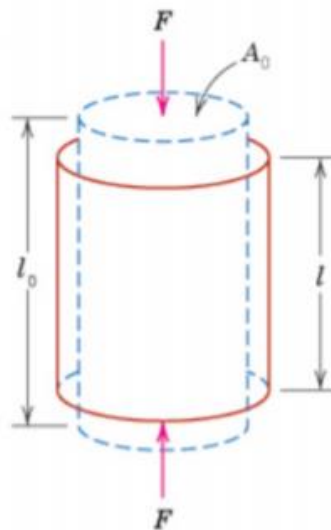


Figura 2.02 - Prova di compressione

- Prova a flessione (Figura 2.3), si ha una sollecitazione a flessione quando la forza applicata tende a comprimere le fibre da un lato e ad allungarle dall'altro;

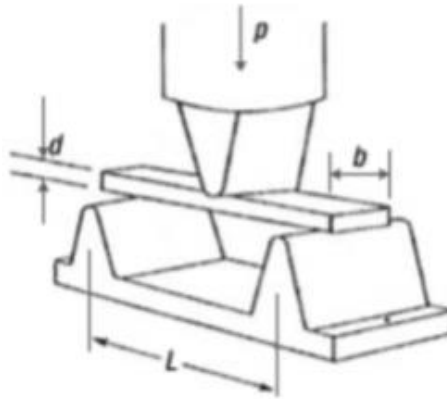


Figura 2.03 - Prova a flessione

- Prove dinamiche, quando viene applicata in un tempo breve, tipo prova d'urto;
- Prove d'urto, resilienza;
- Prove a carico oscillante, a fatica;
- Prove a carico insistente, scorrimento a caldo.

Le prove devono essere eseguite riferendosi a delle normative standard, differenti per ciascuna prova. Nello specifico ogni norma indica il metodo di esecuzione, i termini specifici che ne caratterizzano ciascuna, gli elementi in uso durante la stessa e le caratteristiche del materiale che viene studiato. Inoltre viene spiegato come ricavare e calcolare i risultati ottenuti direttamente dalla prova e elenca eventuali fattori che potrebbero falsare i risultati che si ottengono.

In Europa esistono diversi organismi di normalizzazione, in particolare in Italia si trova l'UNI (Ente Italiano di Normazione), a livello internazionale esiste l'ISO (International Organization for Standardization), altre norme utilizzate sono quelle emesse da ASTM (American Standard Testing Materials). [6]

2.2 Prova di trazione

La prova di trazione è classificata tra le prove statiche cioè dove il carico è gradualmente crescente ed è una prova meccanica distruttiva in quanto si ottiene la rottura del provino (Figura 2.4).

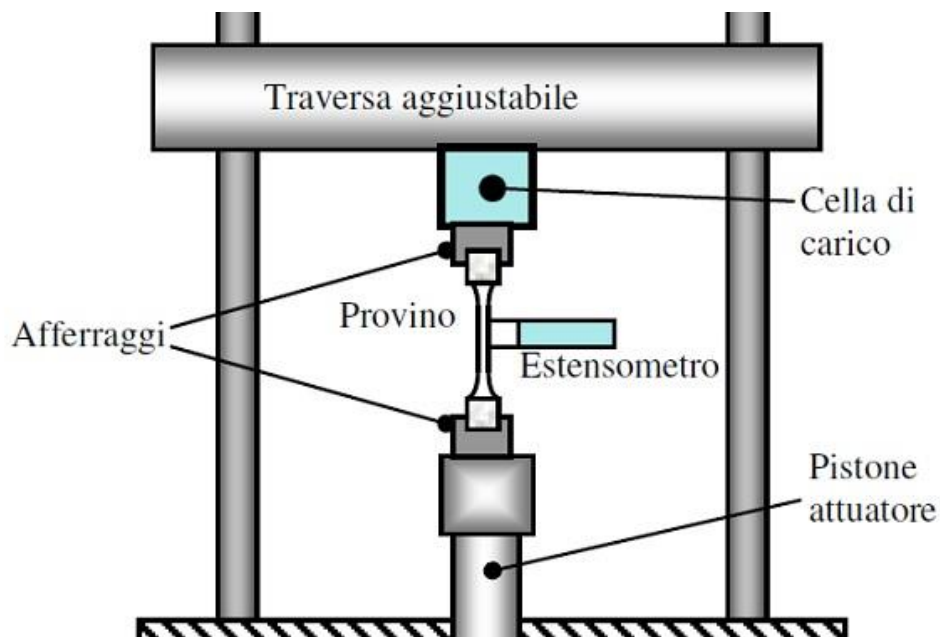


Figura 2.04 - Schematizzazione della prova di trazione

La prova di trazione per l'organismo statunitense ASTM è regolata dalla norma E8/E8M-16^{ε1} che descrive il metodo standard da seguire per poter effettuare la prova di trazione di materiali metallici.

La norma UNI EN 10002/1 (Materiali metallici – Prova di trazione – Parte 1: Metodo di prova a temperatura ambiente), a livello italiano, afferma che la prova di trazione consiste nel sottoporre un provino ad un carico monoassiale di trazione crescente che comporta un allungamento del provino fino alla sua rottura. Le modalità di esecuzione di questa prova, (UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione), è fissata dalla normativa UNI 556-62 ed è applicabile a:

- Materiali ferrosi di diametro $d \geq 4$ mm;
- Materiali ferrosi aventi spessore $s \geq 3$ mm;
- Materiali non ferrosi aventi diametro o spessore ≥ 0.5 mm.

Due fattori che influiscono notevolmente sull'esito della prova sono la temperatura e la velocità di esecuzione della stessa; la prova deve essere eseguita a temperatura ambiente quindi tra i 20 °C e i 30 °C, mentre la velocità viene assunta tra 10^{-2} e 10^{-4} s⁻¹.

Le provette che vengono utilizzate nella prova devono essere prelevate e preparate rispettando le norme, seguendo quella italiana si trova la norma UNI 551-61 che indica come ricavare le provette dal materiale da esaminare mentre la norma UNI EU 18 che spiega, per gli acciai ed i prodotti siderurgici in genere, come prelevare e preparare le provette.

Le provette possono avere sezione circolare quando sono ricavate dal pieno mediante lavorazione meccanica mentre quando sono ricavate da lamiere hanno sezione rettangolare conservando le superfici di laminazione.

Con il termine “saggio” si intende la parte di materiale, prelevata dall'elemento che si vuole studiare, in quantità sufficiente per ricavare da esso una o più

provette; con il termine “barotto” di indica la parte del saggio che ha subito un trattamento meccanico ed eventualmente un trattamento termico e che è destinato alla preparazione delle provette.

Il saggio e la preparazione dei provini deve avvenire in modo da non cambiare le caratteristiche del materiale, inoltre quest’ultime non devono presentare tracce di utensile e rigature dal momento che per l’effetto intaglio abbasserebbero i valori delle caratteristiche meccaniche, ecco perché è bene che siano lucidate.

La provetta è ottenuta attraverso lavorazione meccanica a freddo di un saggio prelevato da un prodotto colato, evitando che il materiale subisca riscaldamenti o incrudimenti che ne modificerebbero le proprietà meccaniche originarie. [2]

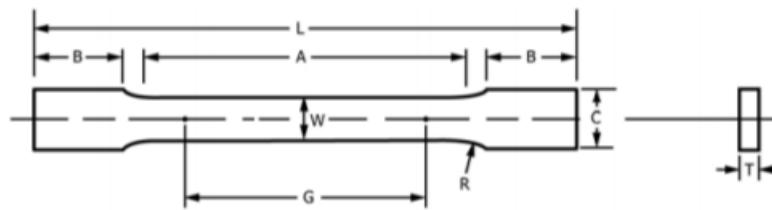


Figura 2.5 – Provino a “osso di cane”

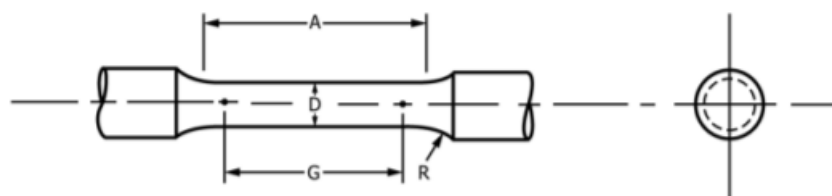


Figura 2.6 – Provino a sezione circolare

Come descritto dalla norma E8/E8M – 16a^{el} il provino definito a “osso di cane” (Figura 2.5) è utilizzato per testare materiali metallici solitamente di forma piatta con uno spessore di 5 mm o al di sopra, il campione di lamiera utilizzato per studiare materiali metallici con la conformazione di rettangolo o di foglio che solitamente possiedono uno spessore nominale tra 0.13 e 19 mm; infine troviamo il provino di tipo circolare (Figura 2.6) che ha generalmente un diametro di 12.5 mm. [13]

Le parti che contraddistinguono ciascun provino sono: le teste, i raccordi, il tratto a sezione costante “ L_c ” e il tratto utile di lunghezza iniziale “ L_0 ”, osservando la Figura 2.7.

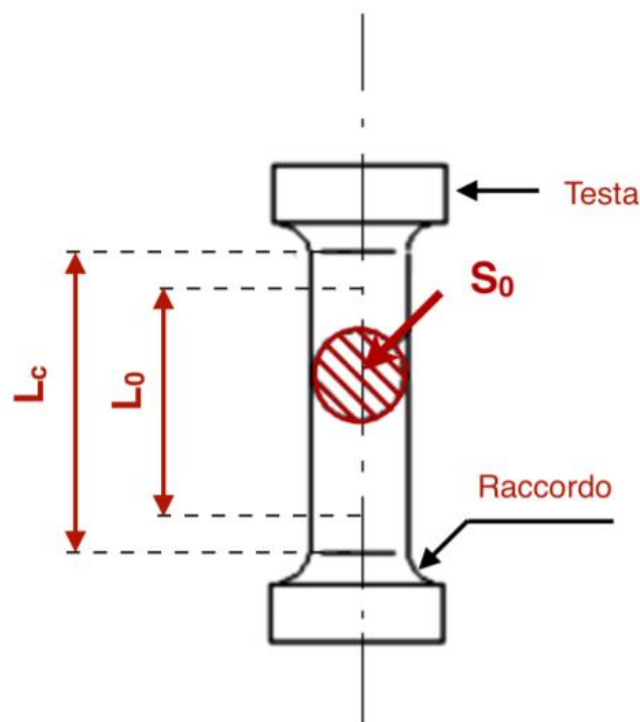


Figura 2.7 – Elementi del provino

Eventuali problemi potrebbero insorgere durante la prova e possono essere causati dal macchinario, dal provino, o da errate misurazioni. I problemi legati al macchinario possono essere i seguenti: la rigidità, capacità di smorzamento,

la frequenza naturale, parti in movimento della macchina di prova, l'accuratezza della forza indicata e la pressione di presa.

Le caratteristiche del materiale che potrebbero falsare i risultati della prova sono: l'omogeneità del materiale da studiare, il sistema di campionamento, la preparazione del provino e la sua dimensione. Un'altra causa che può portare all'annullamento del test è l'errore nella misurazione che include: estensimetro, micrometro e altri strumenti di misura. [13]

Appena la macchina inizia a lavorare, il carico applicato al provino e il corrispondente allungamento di quest'ultimo vengono acquisiti istante per istante, impostando all'inizio della prova la sezione iniziale del provino in uscita si otterranno i valori di tensione (S) e deformazione (e) nominali. Questi valori devono essere elaborati per poter conoscere i valori di tensione (σ) e deformazione (ϵ) reali.

Questa prova è molto utilizzata e ampiamente applicata dal momento che permette di conoscere la resistenza a rottura dei materiali e ulteriori indicazioni sulle caratteristiche dei materiali come il modulo di Young o modulo di elasticità, il carico unitario di snervamento, l'allungamento percentuale e la strizione percentuale. Questi elementi possono essere individuati mediante un diagramma, detto diagramma "carichi-allungamenti" (Figura 2.8).

Questi due valori, il carico e l'allungamento, vengono calcolati rispettivamente con una cella di carico e con un estensimetro, si ottengono quindi i valori nominali della prova.

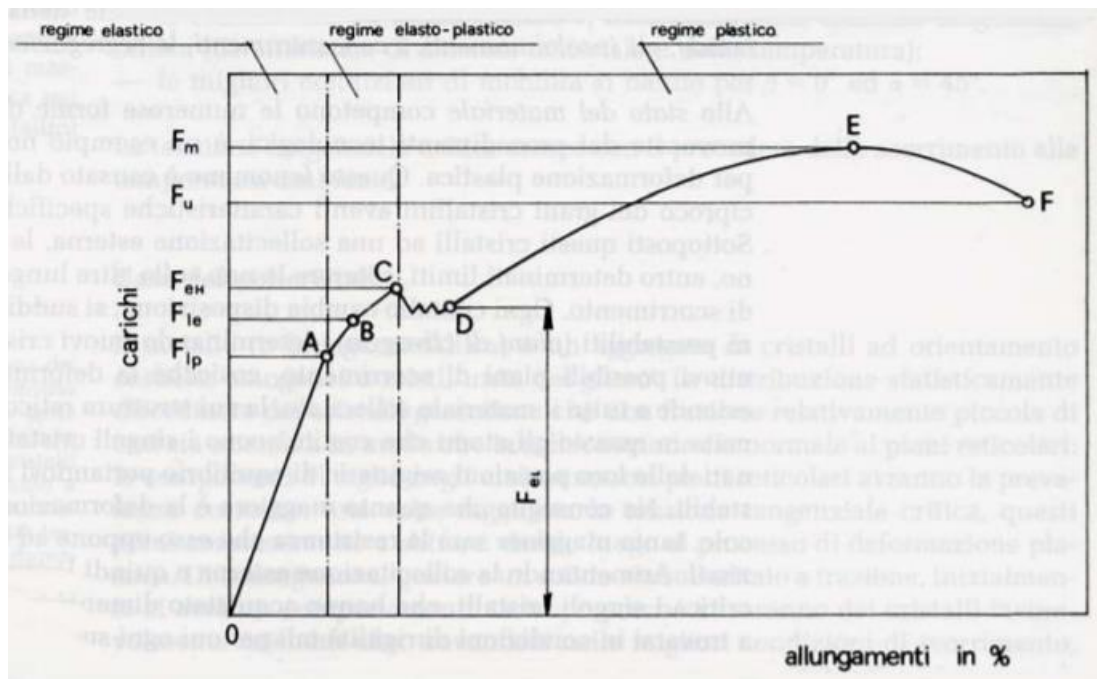


Figura 2.8 - Curva dei valori nominali

Al suo interno, che ha in ordinata il carico ed in ascissa l'allungamento, si individuano vari “regimi” quello elastico, elasto-plastico ed il regime plastico. In ciascun campo è possibile determinare le caratteristiche del materiale che viene sottoposto alla prova di trazione statica, cioè la deformabilità, la resistenza e l'elasticità.

Definiamo quindi:

- Un tratto di elasticità e proporzionalità OA: il diagramma è rettilineo infatti l'applicazione del carico comporta un proporzionale allungamento della provetta, le deformazioni sono elastiche, se si elimina il carico la provetta riacquista le dimensioni iniziali. Quindi l'elasticità è la proprietà che ha un corpo metallico di deformarsi per effetto di un carico esterno e di riacquistare forma e dimensioni originarie quando cessa il carico stesso, è valida la legge di Hooke secondo la quale le deformazioni provocate dalle sollecitazioni sono proporzionali alle sollecitazioni stesse;

- Un tratto di elasto-plasticità AC: il diagramma si incurva leggermente verso destra, gli allungamenti crescono più rapidamente rispetto alla crescita del carico e si trovano sia deformazioni elastiche che plastiche, in particolare:
 - Nel tratto AB (di sola elasticità), troviamo ancora una deformazione elastica, se eliminiamo il carico applicato il provino riprende la lunghezza iniziale, però l'allungamento non è più proporzionale al carico applicato quindi la provetta si allunga di più rispetto all'aumento del carico;
 - Nel tratto BC (elasticità e plasticità), se viene tolto il carico l'allungamento si riduce ma la provetta non torna alle dimensioni iniziali infatti questa subisce delle deformazione che sono in parte elastiche (sariscono) e in parte plastiche (permangono);
- Un tratto di plasticità CD: superato il punto C, scompare l'elasticità e inizia la deformazione plastica, che con l'aumentare del carico diventa sempre più evidente fino alla rottura del provino. Quando il carico raggiunge il punto C del diagramma, le distanze interatomiche del reticolo cristallino sono così grandi che, anche se cessasse l'applicazione del carico, gli atomi non riprenderebbero più la posizione iniziale, quindi inizia la deformazione plastica dal momento che le deformazioni sono irreversibili. Questo punto è più precisamente definito come *snervamento* che per un materiale duttile è quando le molecole iniziano a scorrere le une su le altre quindi il materiale continua ad allungarsi fino a quando l'orientazione delle molecole fa sì che il carico non venga assorbito più come prima, quindi la deformazione della provetta cresce senza che il carico aumenti, o addirittura quando il carico diminuisce;
- Nel tratto DE si ha un *incrudimento* del materiale che comporta un aumento della resistenza e gli allungamenti crescono notevolmente;

- Nell'ultimo tratto EF si ha un allungamento localizzato del provino anche se il carico diminuisce, l'allungamento è tanto maggiore quanto più è duttile il materiale. In tale intervallo si trova il fenomeno della *strizione*, cioè la sezione si restringe visibilmente e in tale zona si ha la rottura della provetta. [2]

Il macchinario utilizzato fornisce i valori del carico e del rispettivo allungamento in ogni istante, i valori ottenuti in uscita sono valori nominali, definiti come “*e*” ed “*S*” e calcolati mediante le formule:

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

$$S = \frac{P}{A_0} \quad (2.2)$$

I valori “*L*” e “*L*₀” descrivono rispettivamente la lunghezza istantanea e quella iniziale del provino, “*P*” è la forza istantanea applicata e “*A*₀” è l'area iniziale della sezione trasversale del provino. Questi valori dipendono dalla temperatura, dalla velocità di esecuzione della prova, da eventuali trattamenti termici preliminari e dalla composizione chimica del materiale.

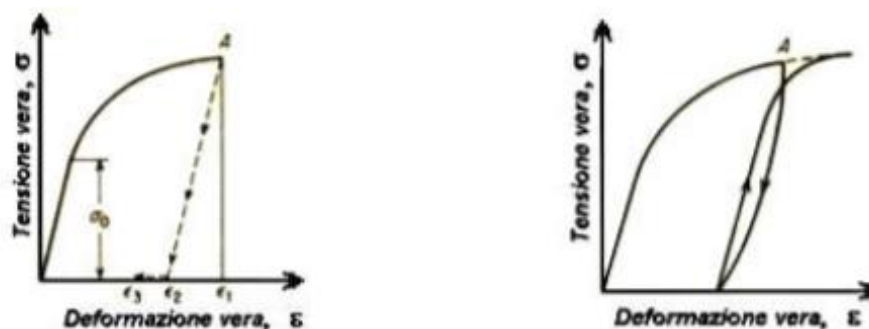


Figura 2.90 - Curva dei valori reali

La curva dei valori reali (Figura 2.9), invece, ci permette di ottenere una migliore descrizione dei dati sperimentali, infatti i valori ottenuti direttamente dalla macchina (valori nominali) devono essere elaborati per poter conoscere i valori di “ σ ” e di “ \mathcal{E} ” tramite le formule elencate successivamente.

Il provino viene caricato fino al punto “A”, poi viene scaricato e troviamo uno spostamento da “ \mathcal{E}_1 ” a “ \mathcal{E}_2 ”, questo tratto è definito deformazione elastica. Proseguendo c’è un passaggio della deformazione da “ \mathcal{E}_2 ” a “ \mathcal{E}_3 ” definita deformazione anelastica.

Quando viene applicato nuovamente il carico, successivo al precedente, la curva tensione-deformazione assume i valori che aveva prima dello scarico. Le formule per calcolare la tensione vera (σ) e la deformazione vera (\mathcal{E}) sono:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.3)$$

$$\mathcal{E} = \ln \left(\frac{L}{L_0} \right) \quad (2.4)$$

In questo caso “ A ” è l’area istantanea del provino.

Le formule che mettono in correlazione i valori nominali e quelli reali sono:

$$\sigma = S * (1 + e) \quad (2.5)$$

$$\mathcal{E} = \ln (1 + e) \quad (2.6)$$

Il grafico che rappresenta il confronto tra i due diagrammi è mostrato in Figura 2.10. [12]



Figura 2.10 - Curva valori reali e nominali

Si osservi infine la Figura 2.11 per capire al meglio la distribuzione del carico e la deformazione che si manifestano sul provino durante la prova.

Inoltre per una migliore comprensione dell'evoluzione della deformazione della provetta in concomitanza delle fasi della curva di tensione-deformazione si veda la Figura 2.12.

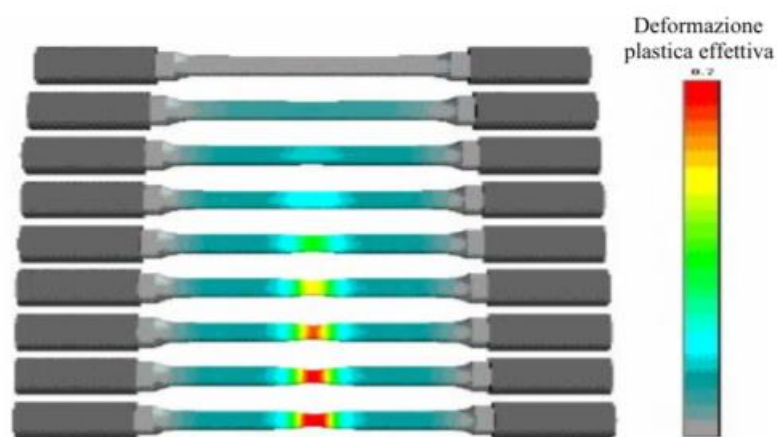


Figura 2.11 - Deformazione plastica effettiva

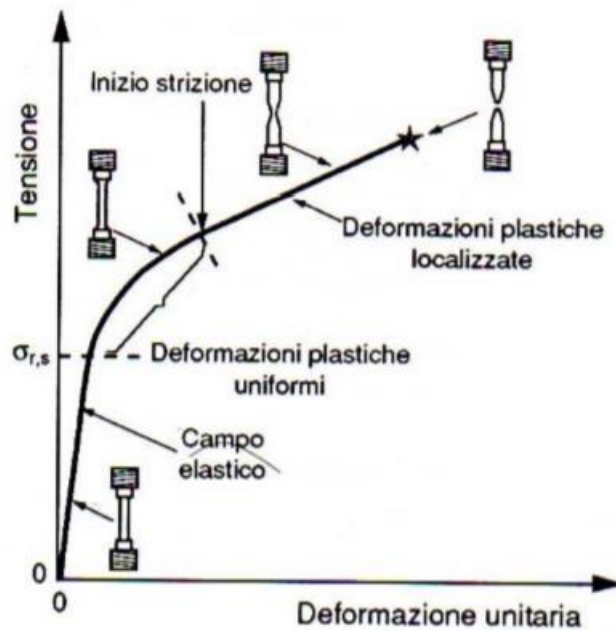


Figura 2.12 - Evoluzione della deformazione del provino in rapporto alla curva dei valori nominali

2.3 Proprietà meccaniche

Le proprietà meccaniche descrivono il comportamento di un materiale quando viene sottoposto a forze dinamiche o statiche e sono:

- Resistenza a fatica, quando un componente meccanico si danneggia sotto l'azione di tensioni cicliche nonostante i valori massimi di tensione si mantengano al di sotto di quelli di rottura, il cedimento avviene per il fenomeno definito appunto fatica;
- Resistenza a frattura (tenacità a frattura, valore critica del fattore intensità degli sforzi che porta alla rottura);
- Resistenza agli urti (resilienza, capacità di assorbire energia nel campo elastico);
- Resistenza all'indentazione, alla scalfittura e all'abrasione (durezza);
- Resistenza statica ad alta temperatura;

- Comportamento sforzi-deformazioni (elastico, plastico, viscoelastico) e resistenza statica (tipicamente quantificata mediante le tensioni di snervamento e rottura), determinato dalla prova di trazione. [6]

Altro argomento da affrontare è l'anisotropia di un materiale perché comporta differenti proprietà meccaniche e rapporti tra le deformazioni in base alla direzioni in cui viene studiato il materiale. [11]

L'azione dei rulli durante la fase di laminazione, come mostrato in Figura 2.13, permette di ottenere una lamiera dello spessore desiderato e determina una progressiva distorsione e orientamento dei grani cristallini secondo la direzione di trascinamento del lavorato, cioè verso la direzione di laminazione.

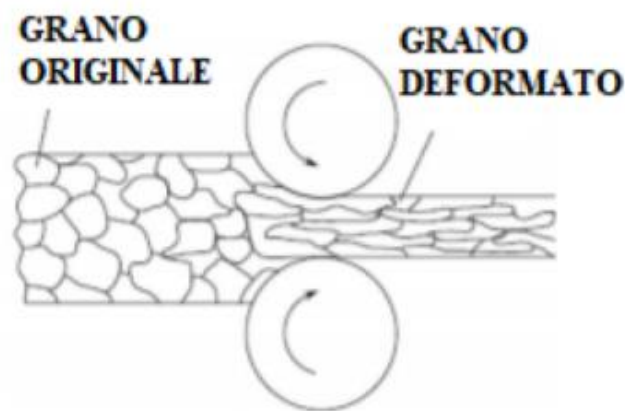


Figura 2.13 - Laminazione

Infatti se si vanno a ricavare dal foglio dei provini con differenti inclinazioni rispetto a quella principale di laminazione, definita “Rolling direction” (RD), a 45° “Diagonal direction” e a 90° “Transverse direction” si otterranno differenti caratteristiche meccaniche (Figura 2.14).

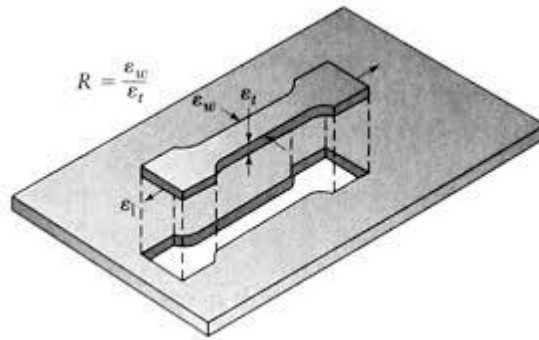


Figura 2.14 - Dimensioni del provino

Quindi, le lamiere presentano tutte un certo grado di anisotropia e in particolare, poiché esso dipende da un orientamento preferenziale dei grani, si parla di grado di anisotropia cristallografico. L'anisotropia è distinta in:

- Anisotropia normale, dove si ha un diverso comportamento tra il piano della lamiera e la direzione dello spessore;
- Anisotropia planare, dove si ha un diverso comportamento tra le direzioni nel piano della lamiera.

La prima elencata viene valutata prelevando dei provini dalla lamiera e sottoponendoli a prove di trazione, l'indice di anisotropia normale (R) è calcolato con la formula:

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w_0}{w_f}\right)}{\ln\left(\frac{t_0}{t_f}\right)} \quad (2.7)$$

dove “ ε_w ” indica la deformazione nella direzione della lunghezza mentre “ ε_t ” indica la deformazione nella direzione dello spessore, i pedici “o” e “f” indicano rispettivamente le dimensioni iniziali e finali. Un valore di R uguale

a 1 denota un materiale isotropo, mentre diverso da 1 un materiale anisotropo. Dal momento che vengono eseguite prove di trazione in differenti direzioni rispetto alla direzione di laminazione si calcolano variabili valori di R in base appunto alla direzione, l'indice medio di anisotropia normale è R_m ed è la media dei valori di R ricavati lungo le diverse direzioni rispetto RD:

$$R_m = \frac{R_0 + R_{90} + 2R_{45}}{4} \quad (2.8)$$

L'indice di anisotropia planare è la deviazione dal valore isotropo, ovvero la differenza tra i valori di R ricavati a 0° e 90° , rispetto a RD, e valore di R a 45° :

$$\Delta R = \frac{R_0 + R_{90} + 2R_{45}}{4} \quad (2.9)$$

CAPITOLO 3

Materiali e procedure sperimentali

3.1 Materiali

Il materiale impiegato in questa prova è titanio grado 1 appartenente al gruppo titanio commercialmente puro (CP Ti), esso possiede un'elevata forza, risponde bene alle elevate temperature e ha una buona resistenza alla corrosione per questo è usato in ambienti corrosivi. Il CP Ti è conosciuto per avere elevata duttilità, la maggiore formabilità e bassa resistenza a causa del suo basso tenore di carbonio e ferro. Ha un basso contenuto di ossigeno ed è inoltre adatto per lo stampaggio profondo e per le deformazioni a freddo, inoltre può essere facilmente saldato. Grazie alle sue qualità, il Grado 1 è il materiale di scelta per qualsiasi applicazione dove è richiesta facilità di formabilità, queste includono:

- Settore chimico;
- Pannelli in ambito architettonico;
- Settore medico;
- Settore marino;
- Componenti automobilistici;
- Dissalatori. [10]

I provini impiegati nella prova sono stati ottenuti da fogli di lamiera di titanio grado 1, solo alcuni provini sono stati scelti dal momento che presentavano geometrie idonee per la prova di trazione.

Le provette sono state tagliate sui fogli destinati allo studio, nello specifico ne sono state ricavate tre, la prima lungo la direzione di laminazione (Rolling Direction), la seconda con un'inclinazione di 45° (Diagonal Direction) e la

terza di 90° (Transversal Direction), rispettivamente R0, R45 e R90. La forma dei provini è definita a “osso di cane”, derivando da una lamiera, e le dimensioni dei provini sono mostrate nelle Figure 3.1 e 3.2.



Figura 3.01 - Foto del provino utilizzato nella prova di trazione

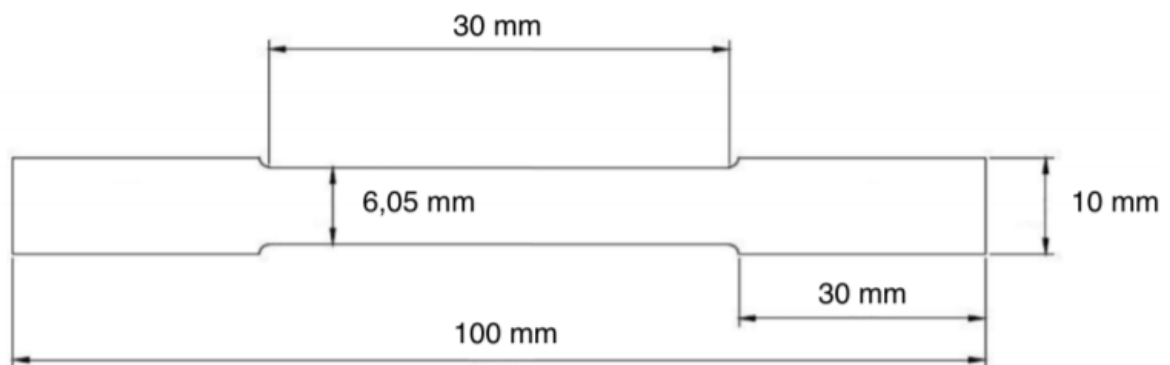


Figura 3.2 - Dimensioni del provino impiegato nella prova di trazione

Inoltre nelle Tabelle 3.1 – 3.2, sono mostrate l’esatta composizione chimica e le caratteristiche meccaniche del materiale, titanio grado 1, preso in esame per la prova di trazione i dati provengono direttamente dall’azienda promotrice dello studio, che ha fornito i fogli di lamiera selezionati.

CARATTERISTICHE MECCANICHE / Tensile Test in as delivery condition						
Colata / Heat	Coil No.	Inspection No.		TS (MPa)	Ys (0.2 %) (MPa)	E (%)
N56305	90 - 9066	6B – ZT305	TL	323	172	48
			TT	303	208	37

Tabella 3.1 – Caratteristiche meccaniche del materiale in esame

COMPOSIZIONE CHIMICA / Chemical Composition (Ladlo Analysis)										
Colata / Heat		Fe (%)	O (%)	N (%)	H (%)	H (%) P	C (%)	Residual Each (%)	Residual Total	Ti (%)
N56305	TOP	0.03	0.04	0	0.001	0.002	0	0.01	0.04	BAL.
	BOTTOM	0.02	0.04	0	0.001		0	0.01	0.04	BAL.

Tabella 3.2 - Composizione chimica del materiale in esame

3.2 Procedure sperimentali

Per poter ottenere una misurazione dell'anisotropia del materiale sono state eseguite prove di trazione interrotte e per poter ottenere una caratterizzazione meccanica del materiale sono state eseguite prove di trazione portando i provini a rottura.

Al fine di ottenere una ripetibilità delle prove, queste sono state effettuate due volte su ciascun provino avente una differente direzione rispetto quella di laminazione; si è potuto così dimostrare che i risultati acquisiti su provini analoghi, aventi le stesse condizioni, sono confrontabili tra loro.

Il primo passo della procedura sperimentale è stato quello di misurare le condizioni iniziali del provino tramite l'impiego di un calibro e di un micrometro in tre differenti punti del tratto utile del provino per poter determinare la larghezza e lo spessore, tre misurazioni per ciascuna dimensione (Figura 3.3).

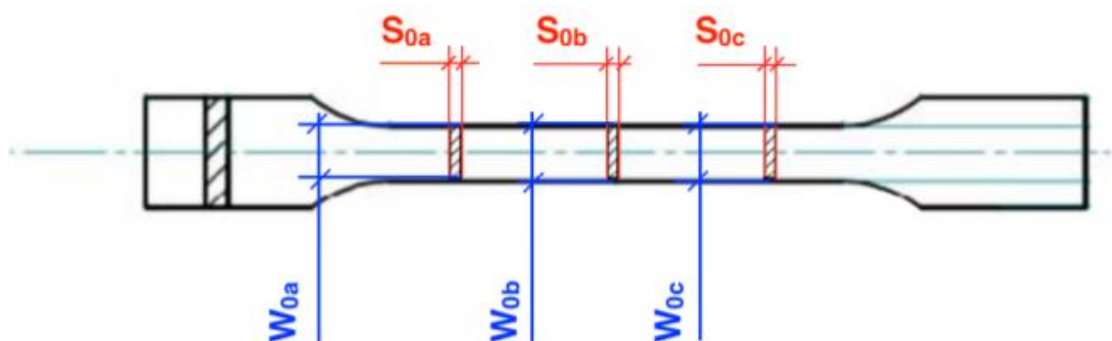


Figura 3.3 - Zone del provino dove sono state eseguite le rilevazioni

Viene poi calcolata una media dei valori e impostati come input nella macchina utilizzata per la prova; è stata impiegata una macchina per prove meccaniche. L'apparecchiatura utilizzata è una macchina di prova universale MTS 810 (Material Testing System) servo-idraulica mostrata in Figura 3.4. Viene impiegata per test statici e a fatica come trazione, flessione e compressione e per prove di meccanica della frattura su provini di diversa sezione e materiale; è caratterizzata da un carico massimo di 250 kN. Un PC, collegato alla macchina, raccoglie i dati di carico e deformazione in tempo reale, il primo misurato mediante cella di carico, il secondo tramite estensimetro.



Figura 3.4 – Afferraggi del sistema MTS 810

Per la prova di trazione devono essere impostati altri importanti parametri come la velocità e la corsa del pistone traslante e i dati di output che si vogliono ottenere al termine della prova. La corsa viene impostata con estrema precisione solo per una prova di trazione interrotta perché si vuole evitare la strizione, mentre per la prova di trazione standard il provino viene sollecitato fino alla rottura finale.

Si procede quindi al posizionamento del provino sulla MTS, questo viene stretto e mantenuto in posizione verticale tramite due afferraggi che ne serrano le estremità mantenendole allineate all'asse verticale.

A questo punto, una volta impostate le misurazioni delle provette e la velocità di esecuzione della prova di 0.2 mm/s, la macchina viene avviata.

In questo caso, i provini destinati allo studio dell'anisotropia non devono raggiungere la rottura e prima ancora la strizione, definita appunto prova interrotta, per questo viene dato come input alla macchina la corsa da effettuare, 8 mm per i provini R0 e R45 mentre 5 mm per i provini R90.

Ulteriori condizioni da registrare sono: la prova è stata effettuata a temperatura ambiente e inoltre sono state effettuate due prove per ciascuna direzione rispetto a quella di laminazione.

Al termine della prova sono stati ottenuti un numero di provini testati pari a:

- 2 R0;
- 2 R45;
- 2 R90.

Durante l'esecuzione della prova il software del computer collegato alla macchina registra i valori di output, come l'allungamento nominale e il carico nominale.

Il programma utilizzato, il software LabVIEW, riesce ad impostare, in simultanea alla prova, il grafico dell'allungamento rapportato al carico imposto.

Al termine delle prove i dati così ottenuti vengono elaborati tramite Excel: le curve ed i valori dimostrano l'anisotropia del materiale. [12]

CAPITOLO 4

Risultati e discussione

In questo capitolo sono presentati i risultati ottenuti e successivamente elaborati delle prove di trazione su provini portati a rottura e di prove interrotte prima dello snervamento per poter evidenziare la caratteristica anisotropa del materiale.

I dati elaborati sono mostrati mediante grafici e tabelle riassuntive.

4.1 Risultati della prova di trazione

Sono state effettuate più prove sulla stessa direzione di orientazione del provino per poter ottenere una ripetibilità delle prove e una caratterizzazione migliore del materiale studiato.

I parametri che possono essere ottenuti e quindi calcolati portando il provino a rottura sono:

- R_p : tensione nominale di snervamento;
- R_m : tensione nominale corrispondente alla strizione;
- A_{gt} : deformazione nominale relativa al campo plastico;
- A_g : deformazione nominale totale;
- N : coefficiente di incrudimento;
- K : coefficiente di resistenza.

Nel successivo grafico (Figura 4.1) sono mostrati i valori ottenuti direttamente in uscita dalla prova, la deformazione in rapporto al carico applicato cioè la tensione e la deformazione nominale.

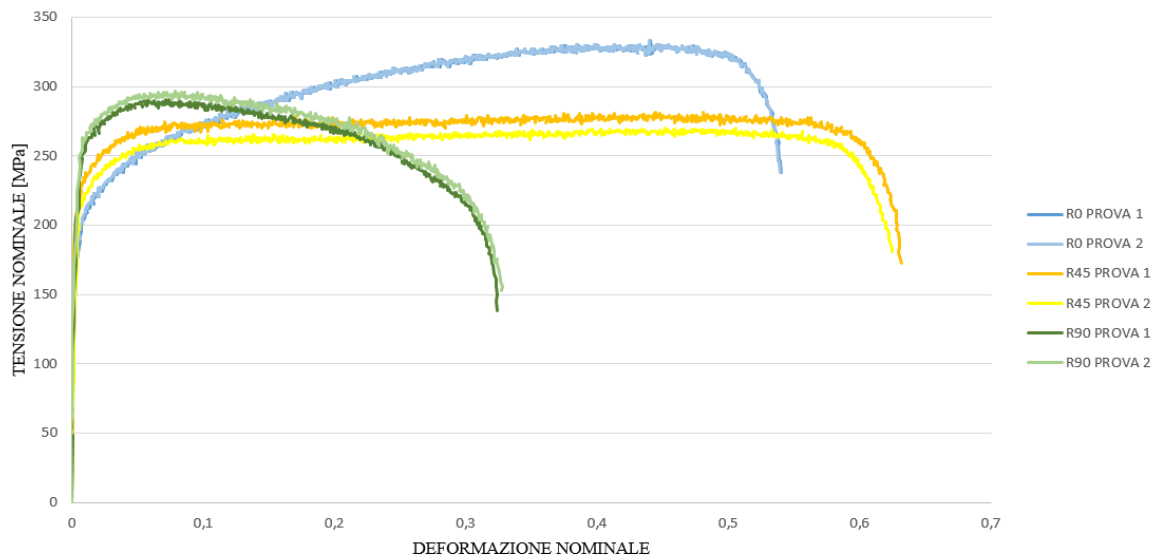


Figura 4.1 - Grafico tensione nominale - deformazione nominale di tutte le prove effettuate nelle diverse direzioni.

Osservando le curve corrispondenti a prove effettuate su provini aventi la stessa inclinazione rispetto la direzione di laminazione si rileva che presentano lo stesso andamento: in particolare le due curve che rappresentano i dati dei provini R0, quindi paralleli alla direzione di laminazione, sono perfettamente coincidenti. Questo indica che c'è una perfetta ripetibilità nelle prove.

Con riferimento al punto in cui avviene la strizione, definito necking cioè l'assottigliamento localizzato, le curve, riferite ai campioni presi nelle diverse direzioni della lamiera, mostrano un comportamento completamente diverso:

- Nel caso del provino R0 la deformazione post-necking, cioè dopo il punto di massimo della curva, è molto ridotta. Questa situazione può

essere anche notata nella Figura 4.2 dove si vede che la sezione è più larga, questo significa che, dopo una minima strizione, il provino ha quasi immediatamente subito la rottura;

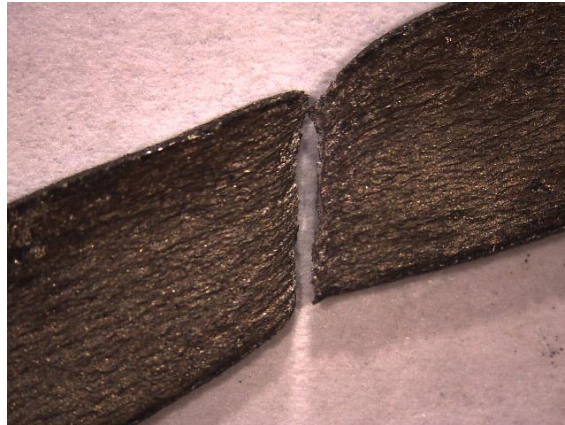


Figura 4.2 - Provino R0

- Nel caso del provino R45, dopo il raggiungimento del carico massimo, cioè il momento di inizio della strizione, la provetta continua a deformarsi, il post-necking è molto esteso come si vede dalla Figura 4.3 che mostra un provino, nella zona di rottura, più sottile.

Si può fare un confronto tra il provino R0 e R45 dal momento che entrambi arrivano a valori di deformazione simile però il comportamento che li caratterizza è diverso dal momento che nel primo caso il provino mostra un allungamento elevato prima della strizione, infatti arrivato a questo punto avviene poco dopo la rottura, mentre nel secondo caso il provino arriva più velocemente alla strizione, quindi al punto massimo, ma la deformazione continua fino quasi ad uguagliare quella del provino R0.

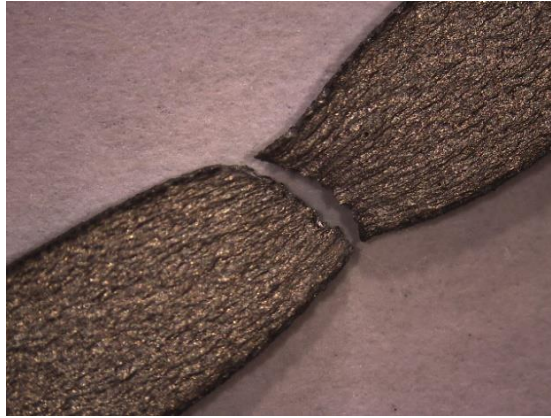


Figura 4.3 - Provino R45

- Nel caso del provino R90 si nota, anche in questo caso, un comportamento completamente differente rispetto alle altre due direzioni. In questo caso la provetta raggiunge subito il picco, cioè la strizione, poi la curva, pur decrescendo, mostra che il provino sopporta il carico prima di arrivare alla rottura e lo si vede anche nella Figura 4.4: infatti l'R90 mostra una maggiore strizione nella zona di rottura.

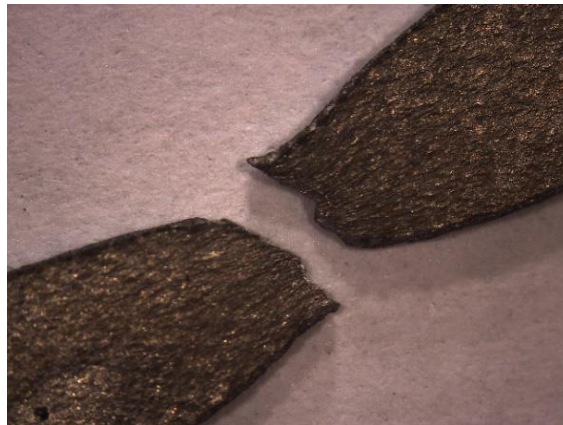


Figura 4.4 - Provino R90

Bisogna quindi sottolineare che il materiale possiede una caratteristica anisotropa molto elevata, infatti il comportamento mostrato dal provino nelle tre differenti direzioni è completamente diverso. Le caratteristiche meccaniche

si differenziano in base alla direzione di laminazione: in particolare il provino R45 mostra un'elevata duttilità, mentre il provino R0 mostra un'elevata resistenza a trazione. Nella Figura 4.5 vengono mostrati i tre provini a confronto.



Figura 4.5- Da sinistra: provino R0, Provino R45, provino R90

Partendo dai diagrammi ricavati è stato calcolato il valore di R_p : nelle Figure 4.6 – 4.7 – 4.8 è mostrato un esempio di calcolo della prima prova effettuata su ciascun provino; partendo dai valori di tensione e deformazione, rappresentanti solo la parte plastica “S” ed “e”, sono stati calcolati e raffigurati i valori R_m , A_g e A_{gt} , anche in questo caso la modalità di calcolo dei valori per la prima prova di ciascun provino è mostrata nelle Figure 4.9 – 4.10 – 4.11. I valori degli indici sono stati successivamente raccolti per ogni direzione del provino nelle Tabelle 4.1 – 4.2 – 4.3.

R0 PROVA 1

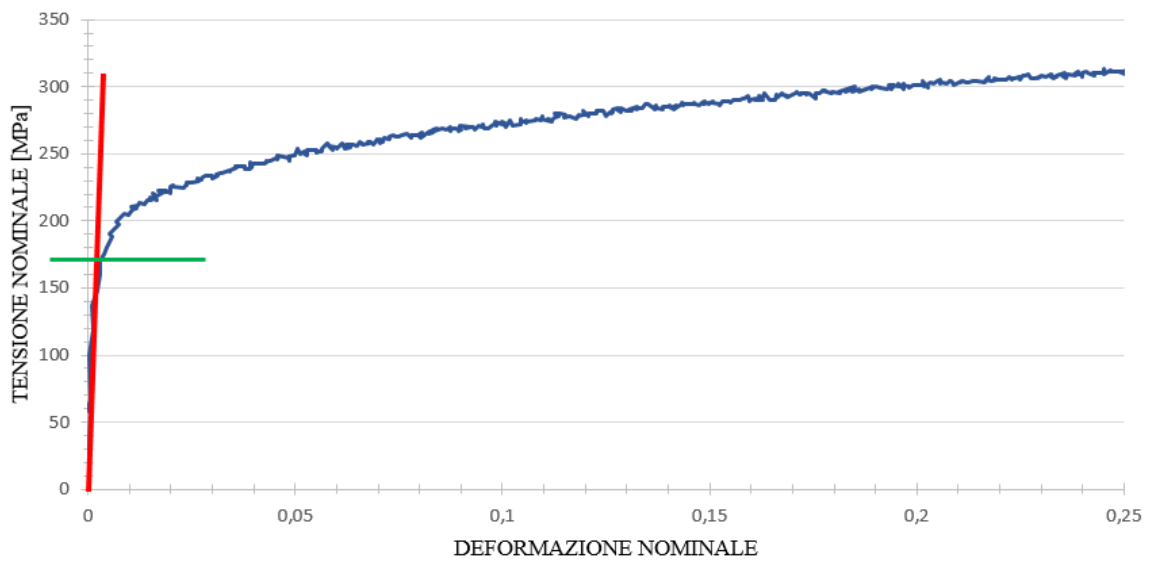


Figura 04.6 – Valore di Rp per il provino R0 PROVA 1

R45 PROVA 1

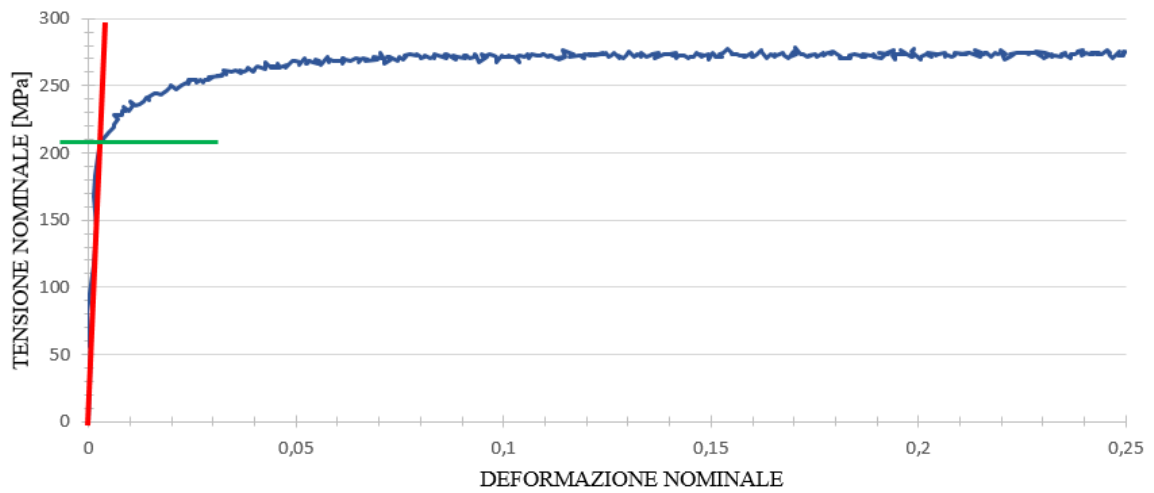


Figura 4.7 - Valore di Rp per il provino R45 PROVA 1

R90 PROVA 1

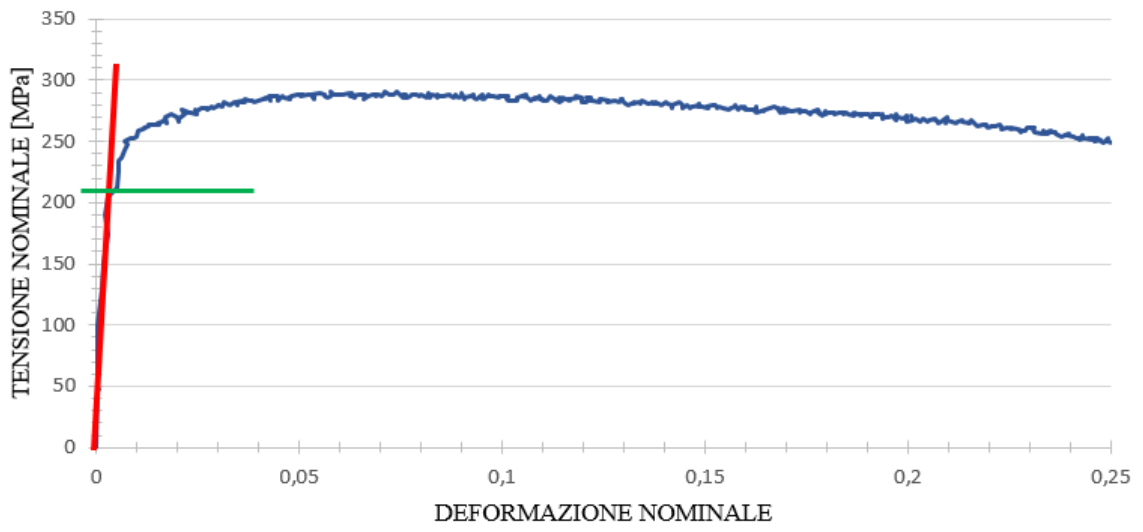


Figura 4.8 - Valori di Rp per il provino R90 PROVA 1

R0 PROVA 1

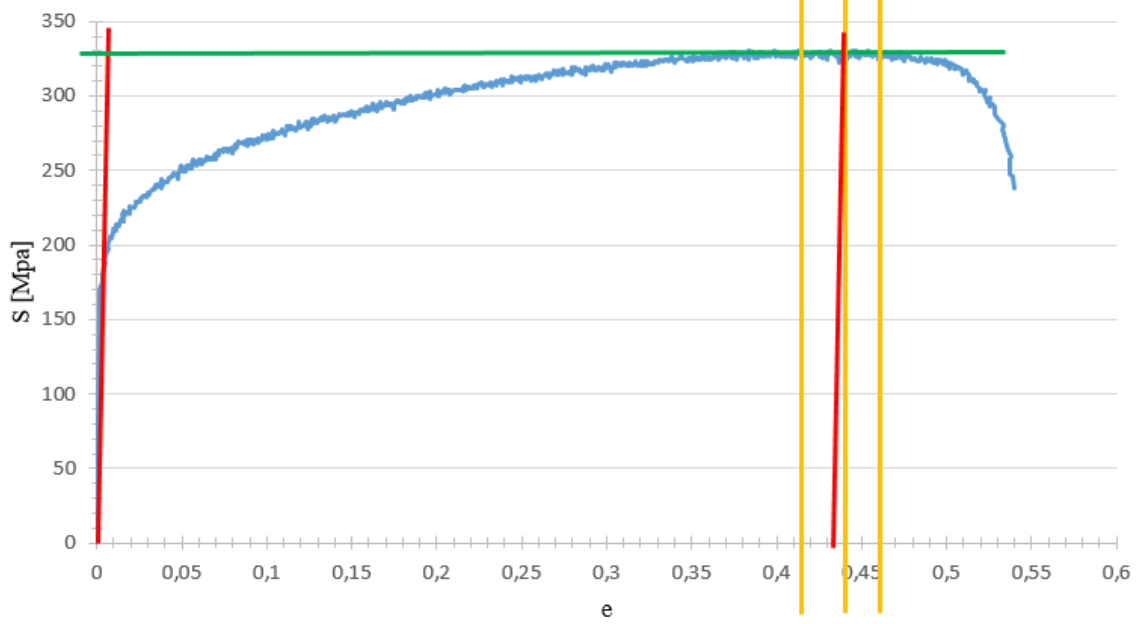


Figura 4.9 - Indici di Rm, Ag, Agt.

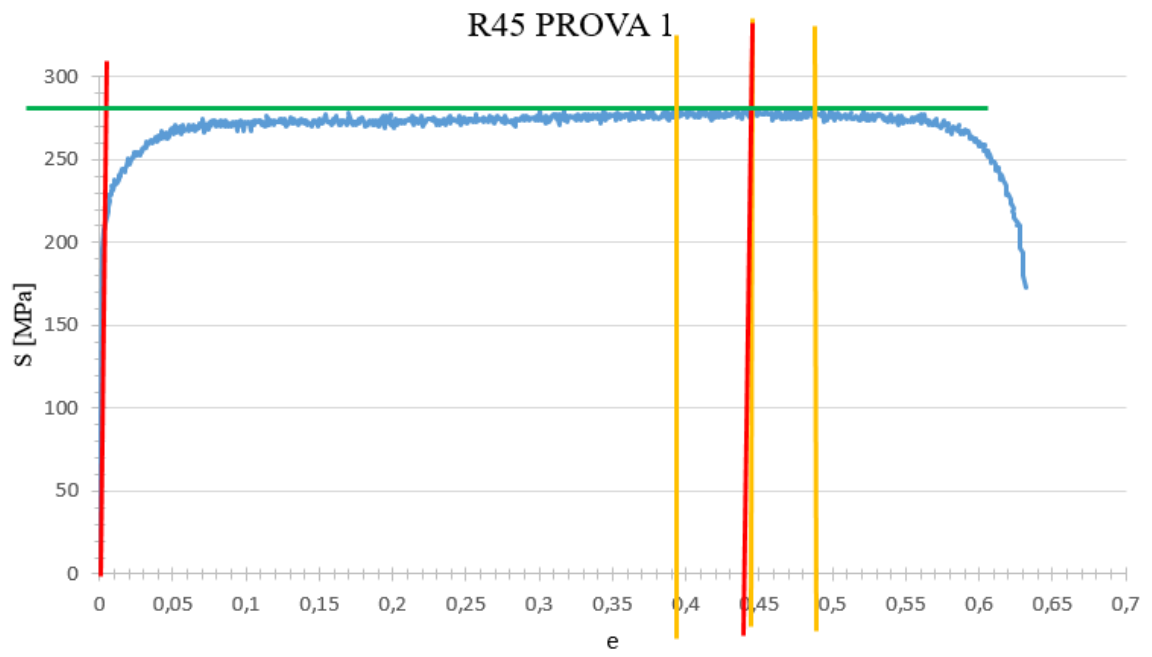


Figura 4.10 - Valori di R_m , A_g , A_{gt}

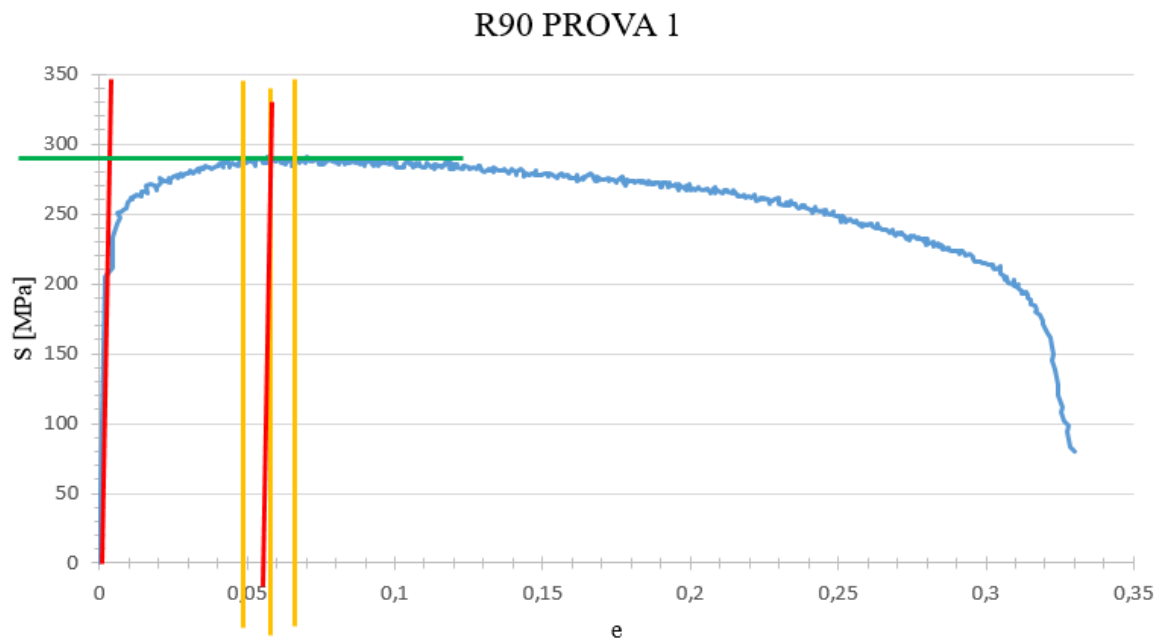


Figura 4.11 - Valori di R_m , A_g , A_{gt} .

Nella Figura 4.12 sono mostrati i valori della tensione (σ) e della deformazione (ϵ) calcolati tenendo conto della deformazione reale durante la prova. Le curve reali sono state valutate fino all'inizio della strizione.

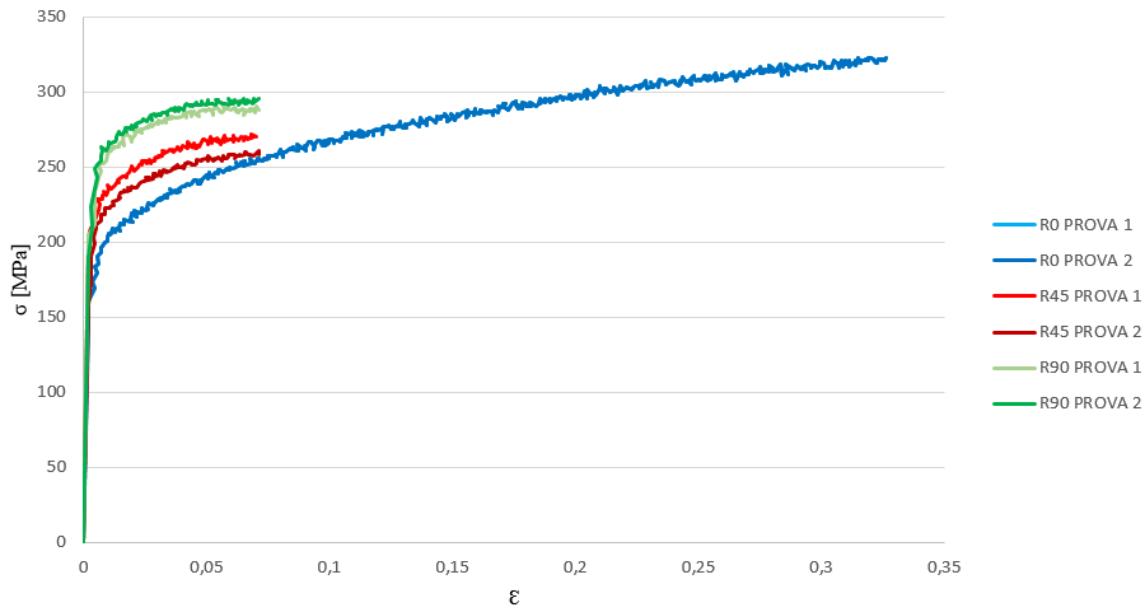


Figura 4.12 - Grafico $\sigma - \epsilon$ di tutte le prove effettuate nelle diverse direzioni valutate fino all'inizio della strizione

Anche in questo caso è evidente la caratteristica anisotropa del materiale: infatti, a seconda della direzione di utilizzo del materiale otterremo una diversa resistenza del materiale, indicando il provino R90 come quello con maggiore resistenza. Si può notare anche una evidente differenza di deformazione plastica, il valore maggiore appartiene al provino R0.

Per andare ora a determinare l'andamento delle curve reali previste, ovvero quelle riguardanti il tratto plastico prima della strizione bisogna calcolare gli indici n e K . Questi due termini si trovano calcolando come prima cosa il valore del $\log \sigma$ e il $\log \epsilon$ e successivamente andando a rimpicciolire l'intervallo di valori fino a che la linea di tendenza combaci al meglio con la curva di dati presi in considerazione. Dalla curva di tendenza ottenuta si estrapola il

coefficiente angolare che corrisponde a n e, per quanto riguarda il termine K , si pone come esponente del numero 10 il termine noto nella curva. Le curve sono mostrate nelle Figure 4.13 – 4.14 – 4.15, una per ogni direzione del provino.

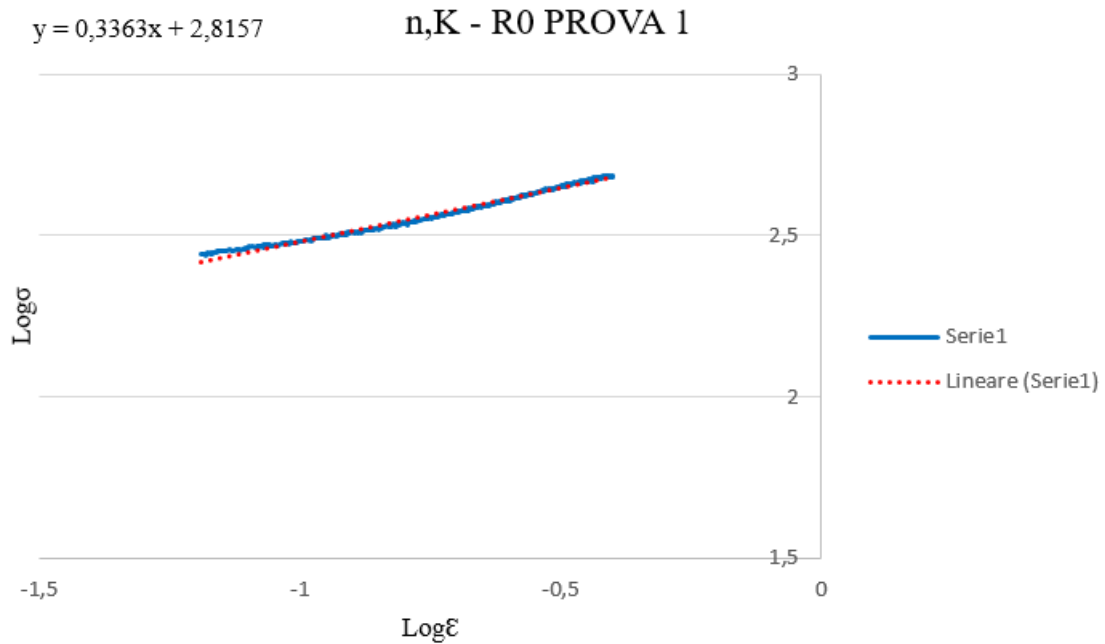


Figura 4.13 - Curva reale prevista

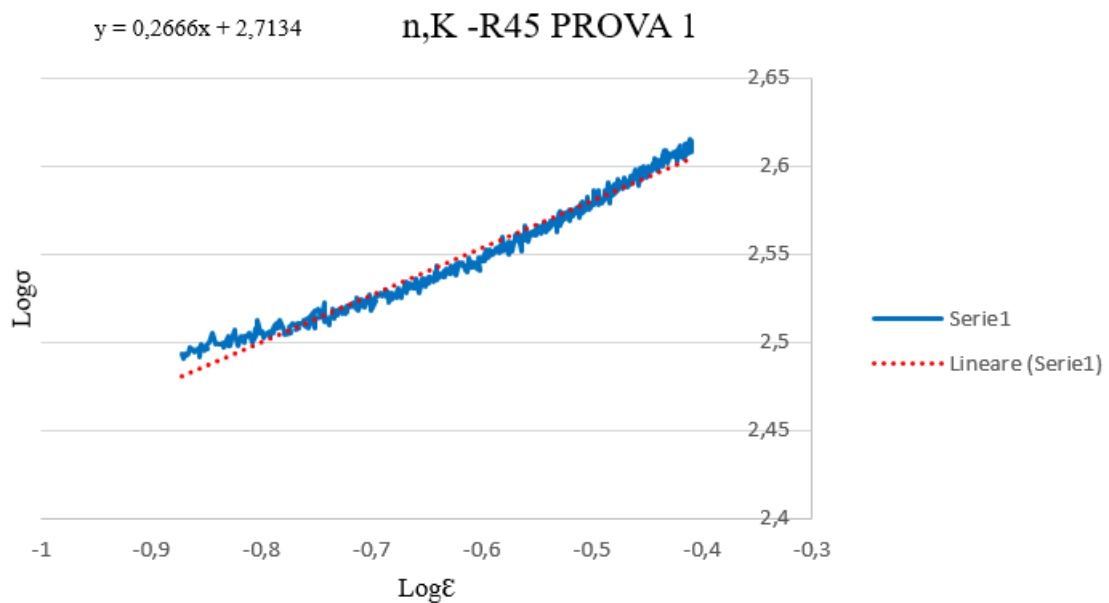


Figura 4.14 - Curva reale prevista

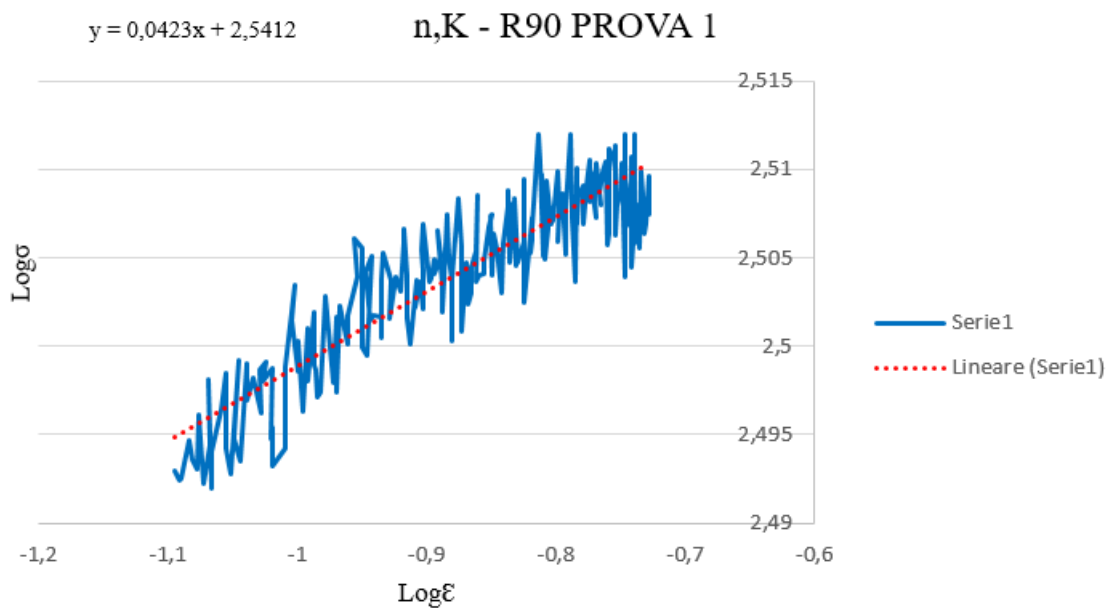


Figura 4.15 - Curva reale prevista

Emerge a questo punto un'ulteriore dimostrazione della differenza tra le tre orientazioni dei provini rispetto alla direzione di laminazione: infatti la linea di tendenza rappresenta perfettamente il tratto plastico del caso R0 mentre nel caso R45 e R90 la pendenza decresce progressivamente. Infatti si passa da una situazione ottimale nel primo caso (R0), ad una sfavorevole cioè un'elevata difficoltà della linea di tendenza ad approssimare i valori (R90). I valori di R45 rappresentano una casistica intermedia tra le due.

Infine vengono riportati i valori dei parametri trovati tramite le sei prove di trazione a rottura: 2 per ciascuna prova R0 (Tabella 4.1), R45 (Tabella 4.2), R90 (Tabella 4.3).

R0						
	Rp	Rm	Ag	Agt	n	K
Prova 1	170	330	0.43	0.44	0.336	654.184124
Prova 2	160	330	0.45	0.48	0.35	661.606861

Tabella 4.1 – Indici calcolati sul provino R0

R45						
	Rp	Rm	Ag	Agt	n	K
Prova 1	210	280	0.44	0.445	0.267	516.892225
Prova 2	205	270	0.41	0.42	0.257	485.959414

Tabella 4.2 – Indici calcolati sul provino R45

R90						
	Rp	Rm	Ag	Agt	n	K
Prova 1	210	290	0.052	0.059	0.042	347.696245
Prova 2	195	298	0.065	0.07	0.043	355.385742

Tabella 4.3 - Indici calcolati sul provino R90

4.2 Valutazione anisotropia

Ora vengono mostrati i dati ottenuti ed elaborati delle prove interrotte, due per ogni direzione, al fine di poter valutare l'anisotropia del materiale studiato.

Nel dettaglio le grandezze ottenute tramite le prove sono:

- R , indice di anisotropia normale;
- R_m , indice medio di anisotropia normale;
- ΔR , indice di anisotropia planare.

Questi valori sono stati calcolati a partire dalle misure di larghezza W , spessore S e lunghezza L , di ciascuno la misura iniziale e quella finale, effettuate nei tre punti caratteristici per ogni provino, successivamente è stata calcolata una media dei valori.

Le Tabelle 4.4 e 4.5 riportano i dati del provino R0, le Tabelle 4.6 e 4.7 per il provino R45 e le Tabelle 4.8 e 4.9 per il provino R90.

R0 PROVA 1						
	W_0	W_f	L_0	L_f	S_0	S_f
a	5.98	5.36	30	35.50	0.99	0.95
b	5.99	5.40	30	35.50	0.99	0.95
c	6.01	5.47	30	35.50	0.99	0.95
MEDIA	5.99	5.41	30.00	35.50	0.99	0.95
Δ	-0.58		5.50		-0.04	

Tabella 4.4 - Dimensioni iniziali e finali del provino R0 PROVA 1

R0 PROVA 2						
	W_0	W_f	L_0	L_f	S_0	S_f
a	5.98	5.34	30	35.45	0.98	0.94
b	5.97	5.37	30	35.45	0.97	0.93
c	5.96	5.37	30	35.45	0.97	0.93
MEDIA	5.97	5.36	30.00	35.45	0.97	0.93
Δ	-0.61		5.45		-0.04	

Tabella 4.5 - Dimensioni iniziali e finali del provino R0 PROVA 2

R45 PROVA 1						
	W_0	W_f	L_0	L_f	S_0	S_f
a	5.99	4.86	30	38.50	0.99	0.97
b	5.99	4.71	30	38.50	0.99	0.95
c	5.97	4.76	30	38.50	0.99	0.97
MEDIA	5.98	4.78	30.00	38.50	0.99	0.96
Δ	-1.21		8.50		-0.03	

Tabella 4.6 - Dimensioni iniziali e finali del provino R45 PROVA 1

R45 PROVA 2						
	W_0	W_f	L_0	L_f	S_0	S_f
a	6.01	5.26	30	36.18	1.03	0.99
b	5.98	5.15	30	36.18	1.11	1.02
c	5.97	5.19	30	36.18	1.08	1.01
MEDIA	5.99	5.20	30.00	36.18	1.07	1.01
Δ	-0.79		6.18		-0.07	

Tabella 4.73 - Dimensioni iniziali e finali provino R45 PROVA 2

R90 PROVA 1						
	W_0	W_f	L_0	L_f	S_0	S_f
a	6.08	5.83	30.00	31.00	1.00	0.99
b	6.02	5.72	30.00	31.00	1.00	0.99
c	6.01	5.75	30.00	31.00	0.99	0.98
MEDIA	6.04	5.77	30.00	31.00	1.00	0.99
Δ	-0.27		1.00		-0.01	

Tabella 4.8 - Dimensioni iniziali e finali del provino R90 PROVA 1

R90 PROVA 2						
	W_0	W_f	L_0	L_f	S_0	S_f
a	6.04	5.78	30.00	31.50	0.97	0.97
b	5.96	5.68	30.00	31.50	1.01	0.99
c	5.93	5.67	30.00	31.50	0.99	0.97
MEDIA	5.98	5.71	30.00	31.50	0.99	0.98
Δ	-0.27		1.50		-0.01	

Tabella 4.9 - Dimensioni iniziali e finali del provino R90 PROVA 2

Di seguito, nella Tabella 4.10, si riportano gli indici di anisotropia ottenuti.

	R			ΔR	R_m
	R0	R45	R90		
Prova 1	2.483	7.757	4.538	-2.123	5.634
Prova 2	2.568	2.197	3.366	0.385	2.582
MEDIA	2.526	4.977	3.952	-0.869	4.108

Tabella 4.10 - Indici anisotropia complessiva

Tramite la Tabella 4.10 si osserva che i valori di ΔR e R_m sono entrambi diversi da 1 e non nulli: queste condizioni permettono di affermare che si è in presenza di un materiale anisotropo.

Inoltre il valore di ΔR , indice di anisotropia planare, essendo molto basso indica una bassa tendenza alla formazione di orecchie nei processi di imbutitura. Il valore di R , invece, maggiore di 1 in tutte e tre le direzioni, implica la tendenza del materiale a deformarsi nel piano della lamiera e non lungo lo spessore.

CAPITOLO 5

Conclusioni

Lo scopo di questo studio è stato quello di conoscere le proprietà meccaniche del titanio commercialmente puro di grado 1 così da poter indicare eventuali utilizzi in base alle caratteristiche trovate.

L'obbiettivo è stato quindi quello di sottoporre il materiale a determinate prove per conoscerne nello specifico parametri e valori che ne permettessero la previsione del comportamento.

In particolare, i provini estratti da una lamiera precedentemente laminata, sono stati sottoposti alla prova di trazione, portando la provetta a rottura, e ad una prova interrotta primo dello snervamento del materiale per poter conoscere nel particolare le proprietà anisotrope del materiale.

- I diagrammi dimostrano una quasi perfetta ripetibilità delle prove, infatti si trova una sovrapposizione delle curve raffiguranti le prove effettuate su provini aventi la stessa direzione di laminazione, il provino R0 è quello che mostra la migliore sovrapposizione tra le curve.
- I risultati ottenuti dalla prova di trazione a rottura evidenziano l'elevata anisotropia del titanio grado 1; infatti le caratteristiche meccaniche cambiano del tutto in base alla direzione di prelievo dei campioni rispetto alla direzione di laminazione. I valori del provino R0 rispetto a quelli del provino R45 mostrano la maggiore deformazione, anche se nel primo avviene prima della strizione mentre nel secondo troviamo la condizione di post-necking. Il provino R90 subisce subito la strizione, per valori

molto bassi, anche se la sua deformazione continua prima della rottura; anche qui troviamo il fenomeno del post-necking.

- Gli indici di anisotropia calcolati mostrano l'anisotropia del materiale in quanto i valori R anisotropia normale, ΔR anisotropia planare e R_m indice di anisotropia medio sono tutti diversi da 1.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

[1] <https://www.meccanicanews.com/2020/02/18/titanio-tutto-cio-che-si-deve-sapere/>

[2] http://www.unife.it/interfacolta/design/insegnamenti/materiali-per-prodotto-industriale/PROVA%20DI%20TRAZIONE%20STATICA_sito.pdf

[3] <https://www.chimica-online.it/elementi/titanio.htm>

[4] https://it.wikipedia.org/wiki/Niobio_titanio

[5] <http://www.nanolab.unimore.it/wp-content/uploads/2012/06/niti-background-reading.pdf>

[6] <https://didattica2000.archived.uniroma2.it//STM/deposito/Lezione4.pdf>

[7] Khan, A. S., & Yu, S. (2012). Deformation induced anisotropic responses of Ti–6Al–4V alloy. Part I: Experiments. *International Journal of Plasticity*, 38, 1-13.

[8]<https://www.tag.it/le-leghe-di-titanio-la-classificazione/>

[9]Polmear, I., StJohn, D., Nie, J. F., & Qian, M. (2017). *Light alloys: metallurgy of the light metals*. Butterworth-Heinemann.

[10]Young-Suk, K. I. M., Bong-Hyun, L. E. E., & Seung-Han, Y. A. N. G. (2018). Prediction of forming limit curve for pure titanium sheet. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 28(2), 319-327.

[11]https://learn.univpm.it/pluginfile.php/191148/mod_resource/content/1/Comportamento%20plastico%202019-20.pdf

[12]Tesi di laurea triennale in ingegneria meccanica di Laura Gironella: “Studio del comportamento alla deformazione plastica a freddo di provini in lega di titanio ottenuti mediante LASER Fibra”, Relatore Archimede Forcellese, Correlatore Michela Simoncini.

[13]Norma, A. S. T. M. (2020). E8/E8M 16a^{e1}, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM.

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il professore Archimede Forcellese e la professoressa Michela Simoncini per la disponibilità e l'attenzione durante la stesura della tesi.

Ringrazio la mia famiglia, Andrea e le mie amiche per avermi supportato e sopportato in questi intensi ma bellissimi anni.