



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**Test di trazione ed elaborazione tramite analisi di immagine di provini
realizzati tramite additive manufacturing.**

**Tensile test and processing through image analysis of specimens made
through additive manufacturing.**

Relatore: **Prof. Marco Rossi**

Tesi di Laurea di: **David Khairy Girgis**

Correlatore: **Prof. Gianluca Chiappini**

A.A. 2020 / 2021

INDICE

1. <u>INTRODUZIONE</u>	6
2. <u>L'ADDITIVE MANUFACTURING</u>	7
MATERIALI POLIMERICI	9
MATERIALI METALLICI	10
3. <u>PROVA DI TRAZIONE</u>	11
IL FUNZIONAMENTO DELLA PROVA	12
DIAGRAMMI SFORZO-DEFORMAZIONE E COMPORTAMENTO DEL MATERIALE	14
4. <u>I PROVINI</u>	18
L'ANISOTROPIA	19
5. <u>REALIZZAZIONE DEI PROVINI</u>	21
IMPOSTAZIONE MECCANISMO DELLA PROVA	23
6. <u>I GRAFICI</u>	25
COMMENTO GRAFICI	31
7. <u>RISULTATI FINALI</u>	33
COMMENTO RISULTATI FINALI	36
8. <u>CONCLUSIONI</u>	38
<u>RINGRAZIAMENTI</u>	40
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	42

Introduzione

In questa tesi verrà riportato il risultato delle analisi fatte su provini di metallo realizzati con tecnologia di additive manufacturing. Tramite le prove di trazione monoassiali, realizzate al laboratorio, si ottengono dei dati derivati dagli estensimetri presenti nel macchinario utilizzato per effettuare queste prove. Successivamente questi dati entrano in comparazione tra di loro, al fine di analizzare le proprietà del provino in esame.

Il presente lavoro di tesi è stato articolato nel seguente modo:

- Capitolo 1: Additive manufacturing, verrà detto che cos'è tale lavorazione, i suoi vantaggi e i materiali più utilizzati.
- Prova di trazione: che cos'è la prova, come viene realizzata e il suo funzionamento.
- I provini: Il concetto dell'anisotropia e il loro dimensionamento.
- Capitolo 5: La realizzazione dei provini.
- Capitolo 6: I grafici, viene fatto un paragone tra i gruppi di grafici dei vari provini.
- Capitolo 7: Risultati finali: Verranno riportati le tabelle con tutti i valori delle caratteristiche meccaniche dei provini.

Additive manufacturing

L'additive manufacturing nasce dall'esigenza di avere un'evoluzione rispetto ai metodi di prototipazione, velocizzando un processo che altrimenti sarebbe quasi del tutto manuale. Essa è una tecnologia molto sfruttata ed, ad oggi, trova applicazione in diversi campi industriali, come per esempio nella industria dell'automotive.

La produzione additiva è un processo di unione dei materiali, di solito uno strato sopra l'altro, per fabbricare oggetti sulla base dei dati relativi a un modello computerizzato tridimensionale, in opposizione alle tecnologie di produzione sottrattiva.

L'additive manufacturing consiste nel trasformare un modello 3D in un oggetto concreto: questa tecnica si basa sulla suddivisione di una forma virtuale 3D in un numero di sottili strati 2D. Questi strati vengono poi depositati fisicamente, uno ad uno, da una stampante (la macchina di produzione additiva), fissando ogni strato su quello precedente e ricostituendo un oggetto tridimensionale reale. Si possono utilizzare diversi tipi di materiali, da polimeri e prodotti organici a ceramiche e metalli.

Questo concetto di "additive manufacturing" racchiude tre approcci di tipo diverso:

- Rapid prototyping: consiste nella produzione automatica di modelli fisici a partire da modelli CAD
- Rapid tooling: tratta della produzione automatica o semiautomatica di stampi per produrre prototipi a partire da modelli CAD dell'oggetto
- Rapid Manufacturing: consiste nella produzione automatica di componenti o prodotti finiti a partire da modelli CAD

Il processo avviene in diversi passi di cui si riportano degli accenni:

- Software di modellazione 3D (software CAD)
- Segue un processo semi-automatico di conversione del file in formato STL (Standard Triangulation Language) Software per convertire i file .STL in file .Gcode.
- Software dedicati alla stampa 3D (software host della stampante).
- Il corpo viene scomposto in vari strati, layer, attraverso un altro software di modellazione.
- Preparazione stampa: definizione supporti e condizioni del materiale di deposizione e vengono impostati i vari parametri di stampaggio.
- Stampa finale: Stampa 3D, produzione del layer e creazione dell'oggetto finale.

Si preferisce usare una produzione di tipo additiva perché essa apporta numerosi vantaggi. In particolare, un ingegnere progettista, grazie a questo tipo di lavorazione, ha massima libertà in fase di idealizzazione di una parte e può personalizzarla al massimo. L'additive manufacturing permette, infatti, di realizzare oggetti anche con forme particolarmente complesse, non realizzabili con altre tecnologie.

Essendo, essenzialmente, un processo additivo di stampa 3D il materiale viene aggiunto solo nelle zone in cui è necessario, ciò permette come vantaggio di realizzare pezzi con un peso ridotto e contenuto.

Rispetto ad altre lavorazioni come la fonderia, la fucinatura, le lavorazioni per asportazioni di truciolo, l'additive manufacturing non comporta nessun costo per la realizzazione di eventuali stampi, utensili o per attrezzature di produzione.

Realizzare il prototipo di una parte comporta tempi e costi brevi, infatti, si parte dal semplice rendering CAD della parte, poi il file CAD, nel formato specifico, è già pronto da inviare al processo di stampaggio 3D.

Ovviamente, si riducono di molto anche i tempi di set up, cioè quelli i tempi necessari ad organizzare il processo di lavorazione.

Un ultimo, ma importantissimo vantaggio, è l'abbattimento degli sfridi di produzione. Purtroppo, nelle altre lavorazioni lo spreco del materiale è necessario, soprattutto ad ottenere certe proprietà meccaniche desiderate. Basti pensare alle lavorazioni per asportazione di truciolo, che sono delle produzioni di tipo sottrattivo, dove l'asportazione di materiale sottoforma di quello che viene chiamato truciolo è inevitabile al fine di realizzare il lavoro. Si capisce quindi che, visto che nell'additive manufacturing il materiale è aggiunto solo dove necessario tramite il processo di stampa 3D, allora in questo caso lo spreco del materiale viene totalmente abbattuto.

Questo è un vantaggio notevole, non solo per il costo ridotto di materie prime, ma soprattutto da un punto di vista ambientale, in quanto per esempio il truciolo viene riciclato e riusato, ma il processo di riciclo composta sia dei costi ma anche un notevole impatto sull'ambiente, che negli ultimi anni in cui stiamo vivendo, sta diventando, come giusto che sia, un aspetto da tenere sempre con più cura.

La tecnologia di produzione additiva permette di utilizzare varie tipologie di materiali ed i progettisti impiegano grandi risorse per cercare nuovi materiali sempre più performanti. I materiali usati si possono dividere in

diverse categorie, di cui, nel settore dell'ingegneria industriale, ne spiccano principalmente due:

- Polimeri: garantiscono costi ridotti e sono molto versatili, infatti, quasi tutti i materiali polimerici possono essere utilizzati in additive manufacturing.
- Metalli: essi offrono prestazioni meccaniche ovviamente elevate rispetto ai materiali polimerici, ma il loro impiego comporta anche una disponibilità di denaro maggiore.

Materiali polimerici

- PLA: è un materiale derivato dall'amido e molto flessibile. Offre buone proprietà meccaniche, considerato eco-friendly e può essere stampato a temperature nettamente inferiori rispetto agli altri materiali;
- ABS: è un materiale adatto agli sforzi visto le sue alte caratteristiche meccaniche. È un materiale rigido, resistente al calore e al graffio. Può essere anche verniciato e lucidato;
- Nylon: esso va trattato con molta attenzione, si salda bene con sé stesso nascondendo i vari strati dovuti alla produzione additiva. È un materiale sensibile alla umidità e necessità di temperature in fase di stampaggio elevate, sui circa 250 C°;
- HDPE: è un prodotto atossico, assorbe poco l'acqua ed offre un'elevata resistenza alle sostanze chimiche. Esso è uno dei materiali plastici più diffusi visto anche la sua versatilità di stampa. Molto usato nell'industria chimica, elettrica ed alimentare;
- PVA: materiale da conservare in luogo asciutto, al fine di evitare il suo degrado. Richiede elevata temperatura di stampa, quindi la sua produzione è più complessa. È idrosolubile ma resistente agli idrocarburi. Viene principalmente usato per creare supporti da eliminare per immersione in acqua.

Materiali metallici

- Alluminio: ha come vantaggio di essere un materiale molto leggero garantendo al contempo un buon compromesso con le capacità termiche. Molto usato nell'azienda dell'automotive e nell'industria aeronautica;
- Cobalto – Cromo: offre, grazie alla presenza del cromo, elevata resistenza alla corrosione, oltre ad alte proprietà meccaniche che sono proporzionali all'aumento della temperatura fino ai 550 – 600 C°. Usato in applicazioni ingegneristiche ad alta temperatura;
- Nichel: i settori dove viene più usato sono quello aeronautico ed energetico, tipo nelle turbine. Resiste ad alte temperature, fino a 1200 C° ed offre alte proprietà meccaniche;
- Acciaio: è la lega più usata a causa della sua notevole flessibilità;
- Titanio: viene usato nel motorsport e in aeronautica. Presenta una bassa densità, alte proprietà meccaniche, resiste alla corrosione. È biocompatibile, questo lo porta ad essere molto usato nel settore biomedico.

Prova di trazione

La prova di trazione monoassiale è una prova meccanica, rispetto la norma UNI EN 10002, di tipo statico perché il carico viene applicato gradualmente. La trazione consiste nell'applicare uno sforzo che coincide con l'asse del pezzo in esame e tende ad allungarlo fino a provocare la rottura. L'obbiettivo di questa prova è determinare le caratteristiche di resistenza, elasticità, deformabilità del provino.

La resistenza meccanica del materiale cioè a quale sforzo esso è in grado di resistere prima di rompersi o di deformarsi in modo irreversibile, cioè plasticamente. Mentre la deformabilità è la capacità di deformarsi sotto l'applicazione di un certo carico. E l'elasticità è la capacità di un materiale di resistere all'applicazione di un carico deformandosi in modo non permanente (elastico) ritornando alla forma e dimensioni originali dopo aver rimosso il carico. Quest'ultima caratteristica è una relazione che lega allungamento e forza applicata e si può esprimere con la legge di Hooke

$$F = K X$$

Dove: K è la costante elastica

X è l'elongazione infinitesima

Proporzionalità forza-allungamento

- In regime elastico k si mantiene costante
- Poiché k è costante se applichiamo una forza doppia, otteniamo un allungamento doppio
- Se applichiamo una forza tripla, otteniamo un allungamento triplo e così via

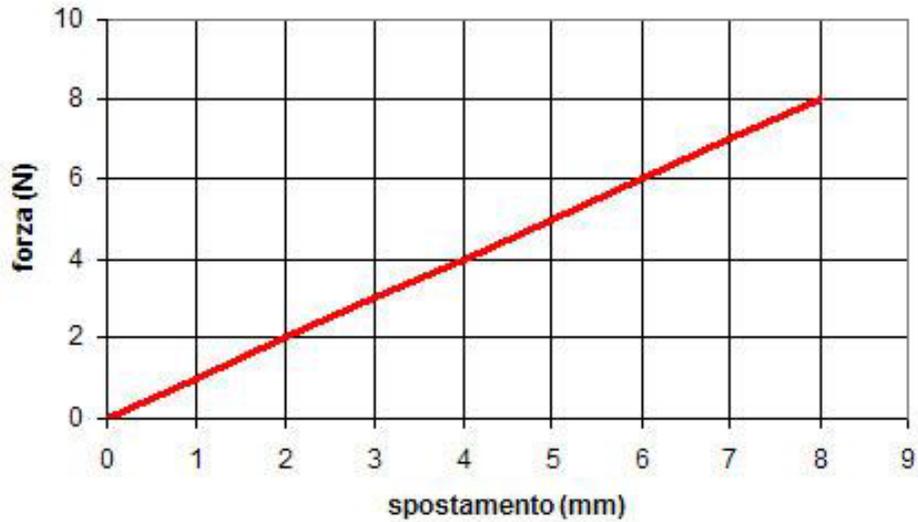


Figura 1: diagramma rapporto forza-spostamento

Il funzionamento della prova

La prova consiste nell'introdurre un provino con una certa forma su una macchina per effettuare la prova. Viene serrato il provino tra due morse poste lungo il suo asse. Una morsa rimane fissa e l'altra è mobile, movimentata da un motore elettrico. Ci sono anche degli appositi estensimetri che sono in contatto con il provino che sono sensibili alla variazione di lunghezza. Il meccanismo è collegato ad un computer che tramite un software vengono riportati i risultati necessari.



Figura 2: esempio meccanismo per la prova

Questi risultati sono una serie di valori che vengono prelevati istante per istante costruendo un grafico tensione-deformazione.

La macchina universale registra gli allungamenti del provino in relazione ai carichi e ne elabora un grafico dal quale si desumono dati fondamentali:

- Allungamento percentuali,
- Carico al limite della proporzionalità,
- Carico unitario di rottura.

Diagrammi sforzo-deformazione e comportamento del materiale

Le sollecitazioni e le deformazioni sono calcolate da grandezze facilmente misurabili (carico normale, diametro, allungamento, lunghezza originale) e possono essere tracciati l'uno contro l'altro come in figura. Tali diagrammi sforzo-deformazione vengono utilizzati per studiare il comportamento di un materiale dal punto in cui viene caricato fino alla rottura. Ogni materiale produce un diverso diagramma sforzo-deformazione.

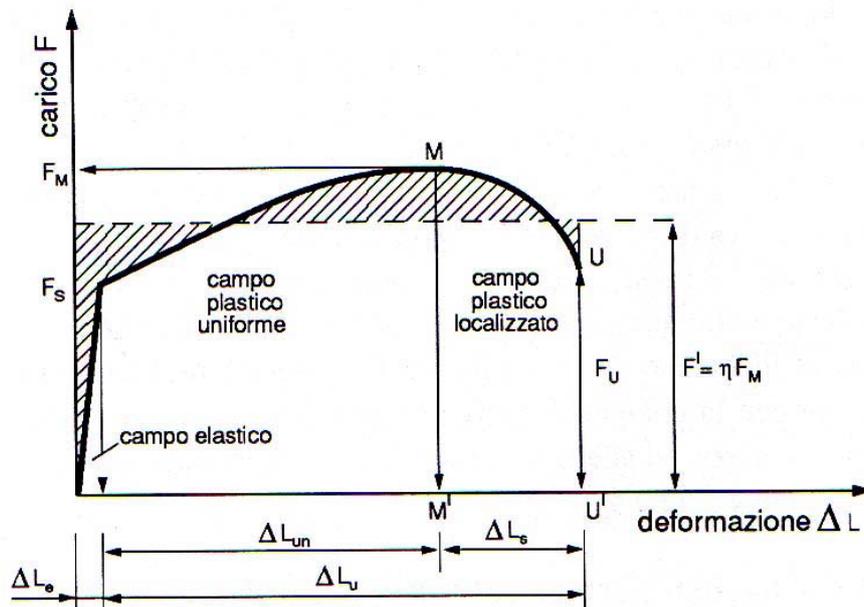


Figura 3: curva sforzo-deformazione, evidenziando i campi di deformazione

Il punto d'origine del diagramma rappresenta lo stato originale non deformato e scaricato del materiale. Quando il materiale viene caricato, sia la sollecitazione che la deformazione aumentano e si crea una retta fino al punto F_s in figura. Se il materiale viene scaricato prima del F_s , il materiale ritornerà al punto iniziale. Se il materiale viene scaricato in qualsiasi punto tra il punto F_s e il punto iniziale ritornerà allo stato iniziale, questa zona viene denominata zona elastica. La curva appare lineare tra i due punti, F_s e l'origine. In questa regione lo sforzo e la deformazione sono proporzionali. La costante di proporzionalità è chiamata modulo elastico o modulo di Young (E).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Dove: σ è la tensione, sforzo

ε è la deformazione

Il punto F_s è chiamato punto di snervamento. Se viene passato, il materiale non tornerà più alla sua lunghezza originale. Avrà una certa deformazione permanente. Oltre l'area della zona elastica si trova la zona plastica. Se continuiamo dopo il punto F_s per arrivare al punto M si aumenta lo sforzo e aumenta anche la deformazione. Se il materiale si scarica al punto M la curva ritornerà al punto M' non all'origine, perché si sarà deformato plasticamente. Se il materiale viene caricato di nuovo, la curva procederà dal punto M' al punto M con lo stesso Modulo elastico (pendenza). Il modulo elastico rimarrà invariato, ma la resistenza allo snervamento verrà aumentata. Aumentando lo sforzo il campione raggiungerà infine il punto u in cui si rompe.



Figura 4: curva Tensione-Deformazione nominale, evidenziando i punti critici

Alcuni esempi di curve sforzo-deformazione che mostrano diversi punti di snervamento:

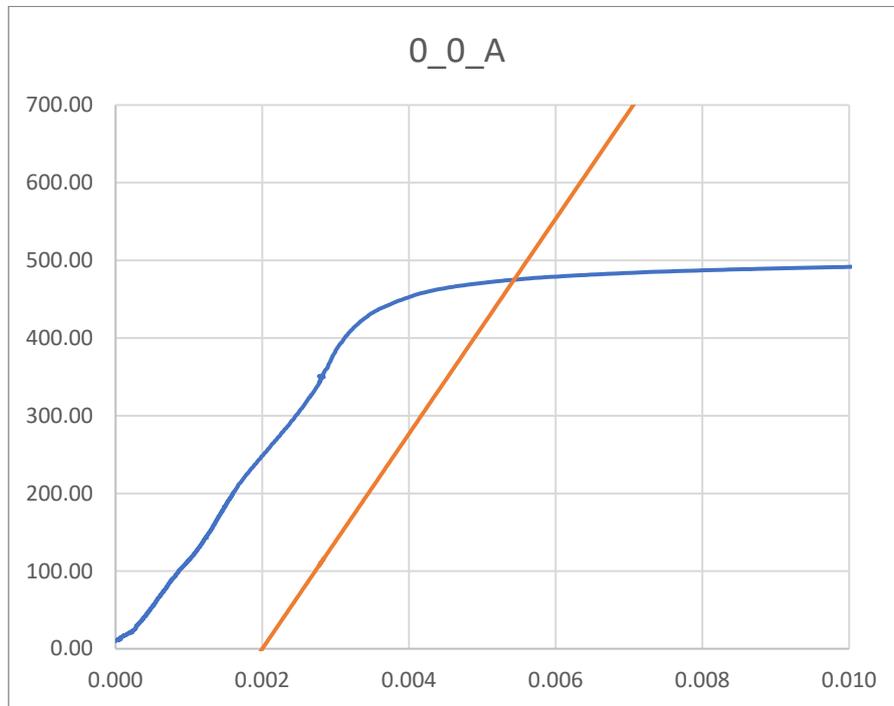


Figura 5 curva sforzo-deformazione del provino 0_0_A

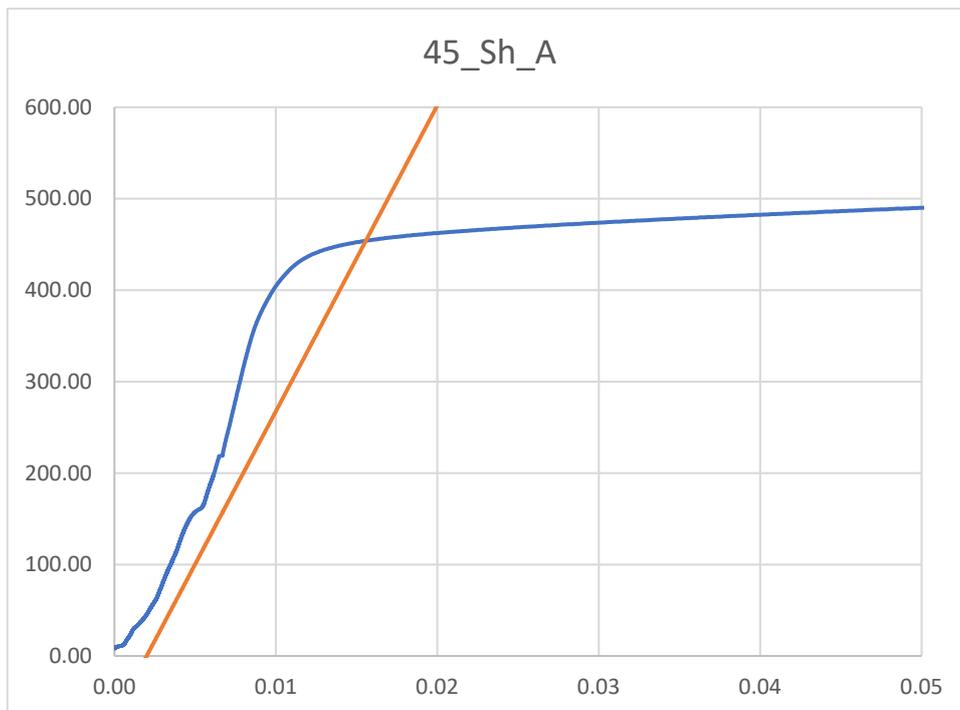


Figura 6 curva sforzo-deformazione del provino 45_shift_A

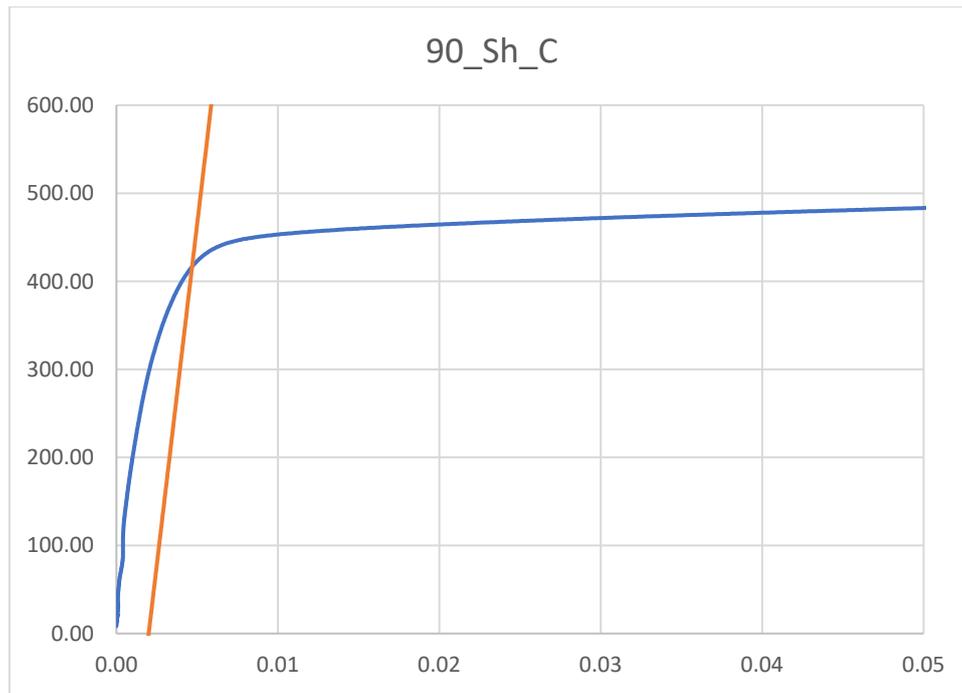


Figura 7 curva sforzo-deformazione del provino 90_shift_C

Costruendo una retta che parte 0.002 e parallela al tratto lineare che interseca la curva in un punto, questo punto è il punto di snervamento.

I PROVINI

I provini utilizzati per realizzare i test sono a sezione rettangolare ed hanno le seguenti dimensioni (in mm), lo spessore era di 2 mm.

Nelle provette di trazione si distinguono:

- Tratto utile L_0 (nel nostro caso è uguale a 40 mm)
- Tratto calibrato LC ($L_0 + d_0/2 < LC < L_0 + 2d_0$)
- Le teste opportunamente raccordate al tratto calibrato
- La sezione che può essere circolare, quadrata, rettangolare.

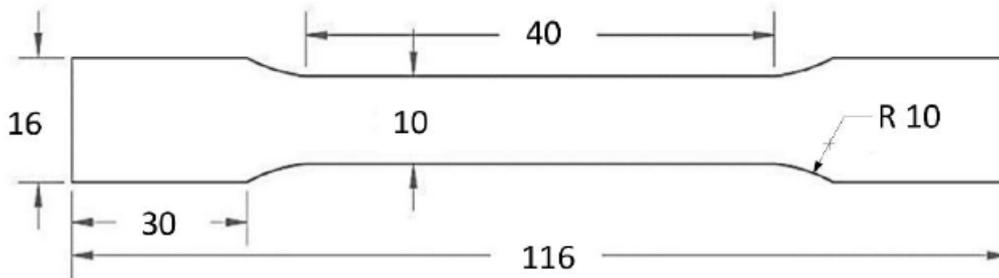


Figura 8: provino con dimensionamento

I provini utilizzati in queste analisi sono realizzati con la tecnologia additiva. Essi sono stati realizzati con due particolari accorgimenti nella preparazione per la stampa:

- La direzione di avanzamento della stampa (valutazione anisotropia normale).
- L'orientamento del provino nel piano prescelto per la stampa (valutazione anisotropia planare).

Quindi sono state scelte tre direzioni di avanzamento per stampare:

- 0°, piano di lavoro orizzontale
- 45° rispetto al piano orizzontale
- 90°, ovvero perpendicolare al piano iniziale

Questa modifica nella tipologia di stampa ha avuto un grande effetto sul comportamento e sulle caratteristiche mostrate da ogni provino.

L'anisotropia

L'anisotropia è la proprietà di un materiale di assumere un certo comportamento differente a seconda della direzione in cui esso è valutato. Essa è un aspetto importante da tener conto per poter caratterizzare le proprietà meccaniche di un materiale.

L'anisotropia può essere di due tipi:

1. Normale: quando il materiale presenta comportamento diverso tra le direzioni contenute nel piano e la direzione dello spessore
2. Planare: quando il materiale presenta diverso comportamento tra le diverse direzioni del piano.

Per valutare l'anisotropia quindi, essendo essa di due tipi, si usano due indici: L'indice medio di anisotropia normale (R_m) e l'indice di anisotropia planare (ΔR).

Per valutarli si usano dei particolari provini, stampati con diversi angoli di inclinazione, al fine di poter capire come variano le proprietà meccaniche al variare dell'angolo di inclinazione e quindi della direzione.

Di ogni singolo materiale si stampano almeno 3 provini, creati con 3 diverse direzioni di avanzamento di stampa, uno realizzato con un angolo di 0° rispetto il piano orizzontale, uno con un angolo di 45° ed infine un ultimo con un'inclinazione di 90° rispetto l'orizzontale.

Ora sapendo che l'indice di anisotropia normale R :

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t}$$

dove ε_w è la deformazione in direzione della larghezza del provino e ε_t è quella in direzione dello spessore.

Allora si può valutare l'indice medio di anisotropia normale come media tra i valori di R ricavati lungo le tre diverse direzioni:

$$R_m = \frac{R_0 + R_{90} + 2R_{45}}{4}$$

Mentre, l'indice di anisotropia planare rappresenta la deviazione rispetto il valor medio:

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

Se $R_0 = R_{45} = R_{90} = 1$ allora il materiale è isotropo normale, vuol dire che l'indice medio di anisotropia normale vale 1 e l'indice di anisotropia planare risulta nullo. Negli altri casi il materiale può risultare anisotropo sia in direzione dello spessore che sul piano.

Un materiale può avere un comportamento sia isotropo normale che planare quando

$$\varepsilon_w = \varepsilon_t = -\frac{1}{2}\varepsilon_l$$

Posto ε_l la deformazione cui è soggetto il provino nella direzione della sua lunghezza.

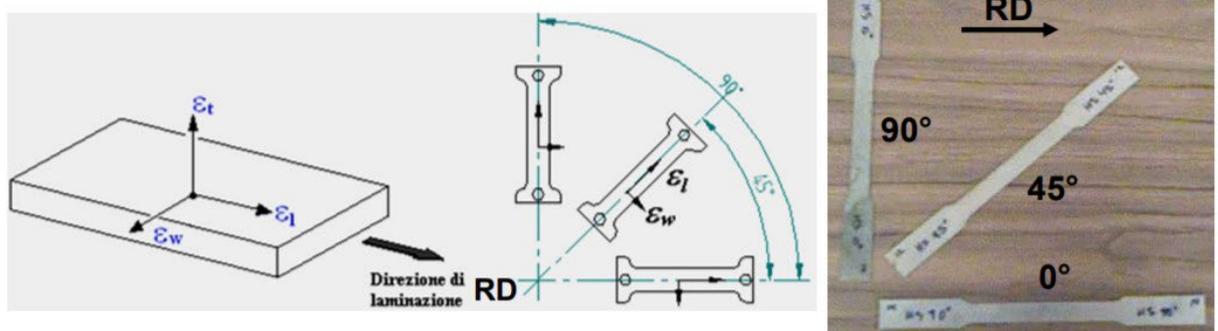


Figura 9: valutazione anisotropia planare lamiera

Realizzazione dei provini

I provini sono raggruppati in base al modo di realizzazione. Sono suddivisi in 3 gruppi ed ogni gruppo è costituito da 16 provini. La sigla di ogni provino è costituita da due numeri e una lettera. Il primo numero è riferito alla direzione di stampa, il secondo rappresenta l'angolo di inclinazione con cui è stato realizzato infine la lettera per differenziare, perché di ogni tipo sono stati stampati 4 provini identici, quindi, vengono specificati con delle lettere (A, B, C, D).

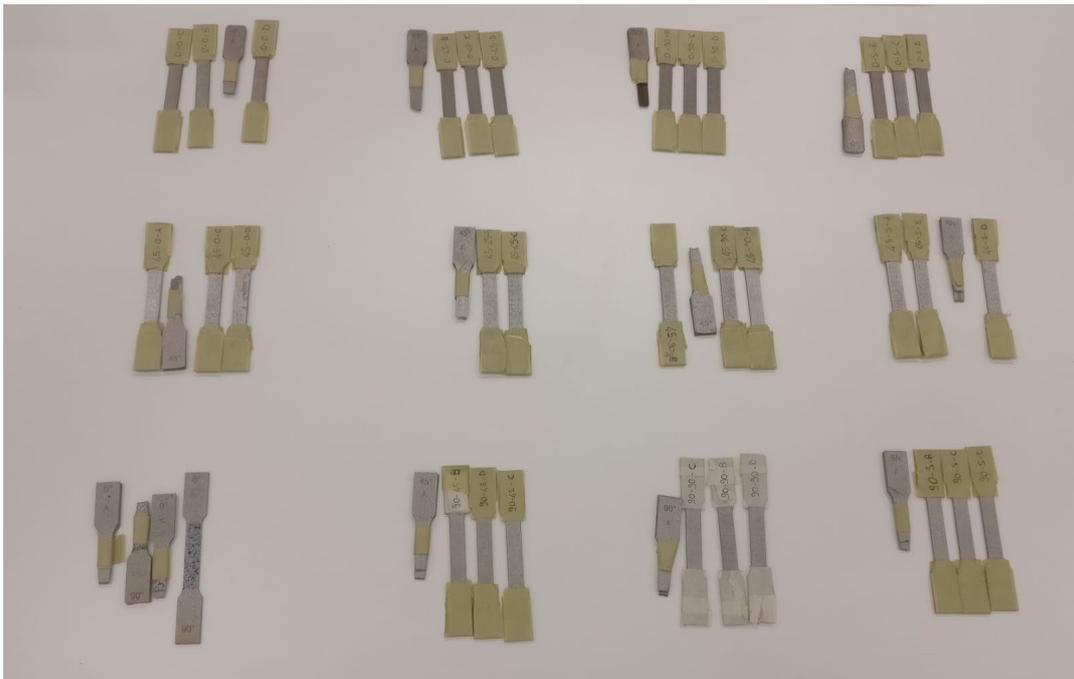


Figura 10: provini raggruppati in base alla modalità di realizzazione

Il primo gruppo è il gruppo 0, questo gruppo è costituito da 4 sottogruppi ed ogni sottogruppo è costituito da 4 provini. Per la direzione a 0° ci sono 16 provini, per la direzione a 45° ci sono 16 provini e anche per la direzione a 90° i provini in esame sono 16. In totale sono stati utilizzati 48 provini per effettuare questi test.

La suddivisione dei provini è la seguente:

- 0_0 sono i provini realizzati ad un angolo di inclinazione pari a 0° e angolo di avanzamento di stampa 0°
- 0_45 sono i provini realizzati ad un angolo di inclinazione pari a 0° ed un angolo di avanzamento di stampa pari a 45°

- 0_90 sono i provini realizzati ad un angolo di inclinazione pari a 0° ed un angolo di avanzamento di stampa pari a 90°
- 0_Shift sono i provini realizzati ad un angolo di inclinazione pari a 0° ed un angolo di avanzamento di stampa casuale

La tipologia di provini denominata “shift” consiste nello stampare due layer successivi con un’inclinazione di 66° in modo da non avere una direzione preferenziale di stampa ma casuale.

Non si poteva fare la prova su un solo provino che rappresenta una certa direzione di avanzamento di stampa e inclinazione, ma bisognava avere più di uno per ottenere dati più precisi ed accurati. Questo fatto è importante perché le condizioni di stampa variano da un provino all’altro. Infatti, c’erano provini che avevano la stessa direzione di avanzamento di stampa e la stessa inclinazione e hanno mostrato comportamenti diversi durante la prova. Ad esempio, alcuni provini avevano un piccolo piegamento, a differenza di altri anche se sono stati realizzati nelle stesse condizioni. Si è visto l’effetto di questo piegamento al momento dell’applicazione del carico durante la prova, il provino impiegava più tempo per deformarsi.

Impostazione meccanismo della prova

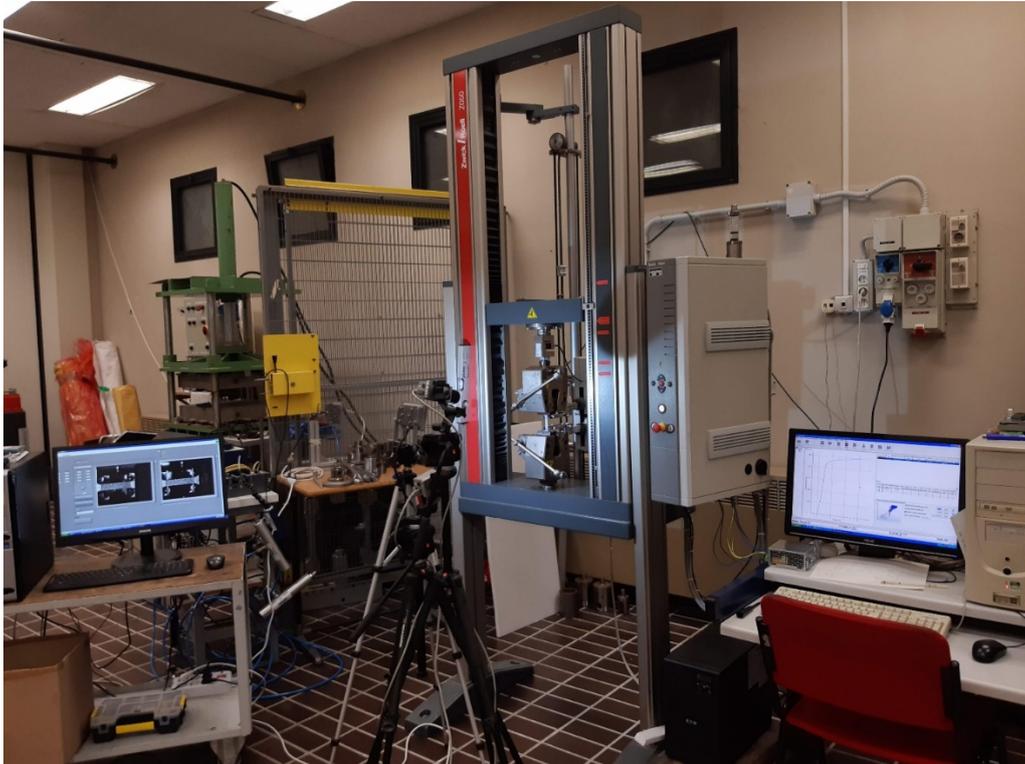


Figura 11: impostazione del meccanismo per la realizzazione della prova

Oltre alla macchina stessa che applica il carico per far avvenire la rottura, ci sono altri componenti che sono necessari per la prova:

- Le telecamere, che scattano una foto ogni frazione di secondo e registrarle per poi vengono analizzate tramite appositi software (esempio: Matlab utilizzando "image processing toolbox"), queste analisi si chiamano analisi DIC (Digital Image Correlation). Una volta sono impostate queste telecamere non si devono muovere, o almeno devono essere messe nello stesso identico modo ogni volta che andiamo a fare la prova. Perché il cambiamento della posizione delle camere (la distanza dal provino, l'angolo di inclinazione con il quale scatta le foto) cambia i valori che si possono ottenere nella fase di analisi delle immagini.

Prima dell'analisi i due provini sono stati verniciati con un marker specifico, in modo da creare un pattern ideale per la rilevazione. Il software utilizzato per fare le analisi riesce a riconoscere dei punti specifici grazie a questa verniciatura. Confrontando due immagini

consecutive il software riesce a valutare lo spostamento, deformazione, di una certa zona del provino.

- Un computer per registrare le foto ottenute con le telecamere, ed un altro che ha il compito di registrare i valori e realizzare il grafico sforzo-deformazione.

Il computer collegato alla macchina di prova è lo strumento sul quale è basato il nostro lavoro di questa tesi. Esso è collegato all'estensimetro e registra la deformazione in base alla forza applicata al provino. Noi inseriamo manualmente i valori dello spessore e la larghezza iniziale misurati prima del montaggio del provino sulla macchina e il software crea una curva che ha l'andamento basato sul carico applicato dalla macchina e la deformazione del provino. Su questo schermo possiamo vedere anche altri valori importanti come il modulo di Young, la tensione di snervamento, l'allungamento percentuale, la strizione percentuale e la tensione di rottura.

I GRAFICI

- Provini realizzati in direzione a 0°

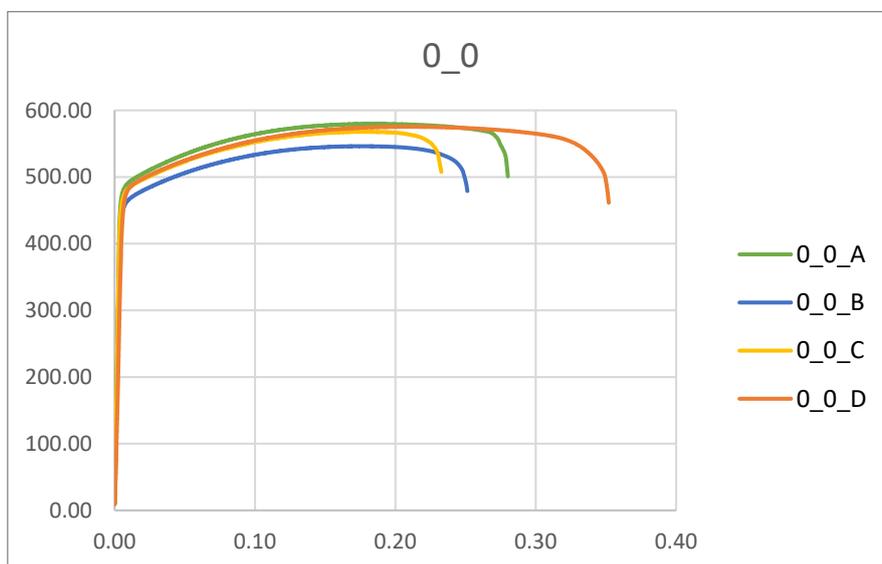


Grafico 1: curve ottenute in direzione a 0° ed inclinazione 0°

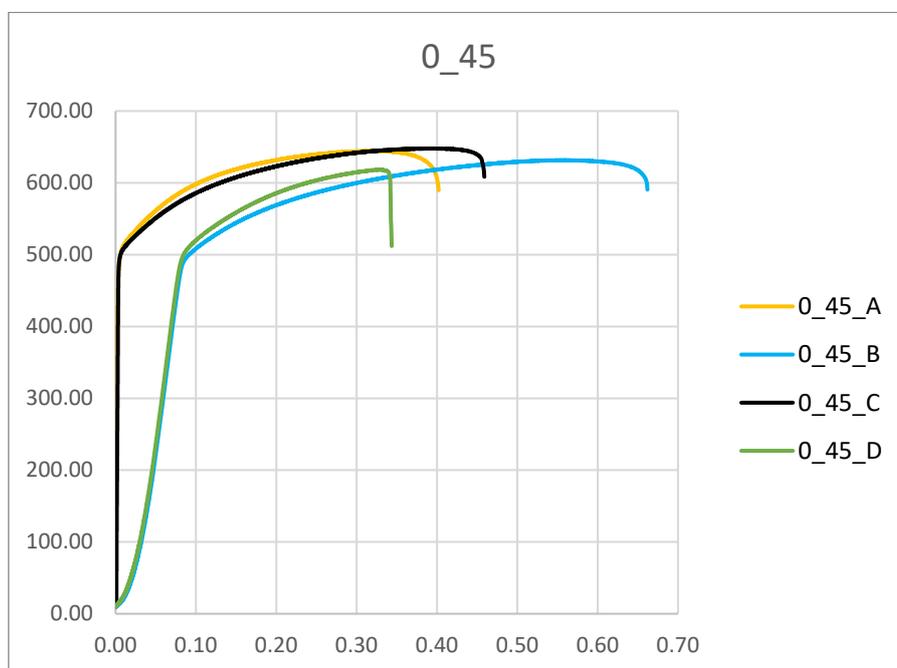


Grafico 2: curve ottenute in direzione a 0° ed inclinazione 45

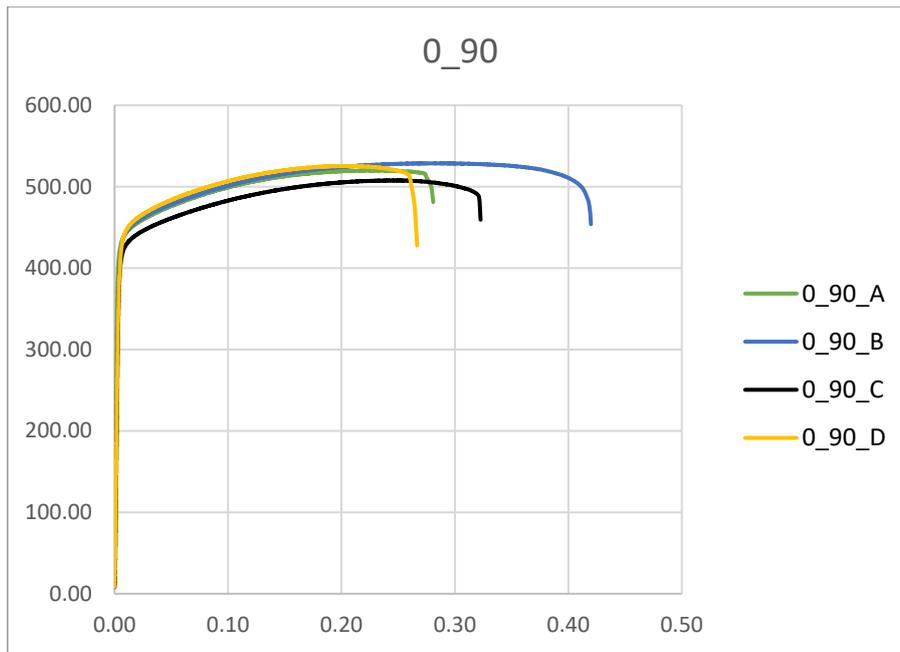


Grafico 3: curve ottenute in direzione a 0° ed inclinazione 90

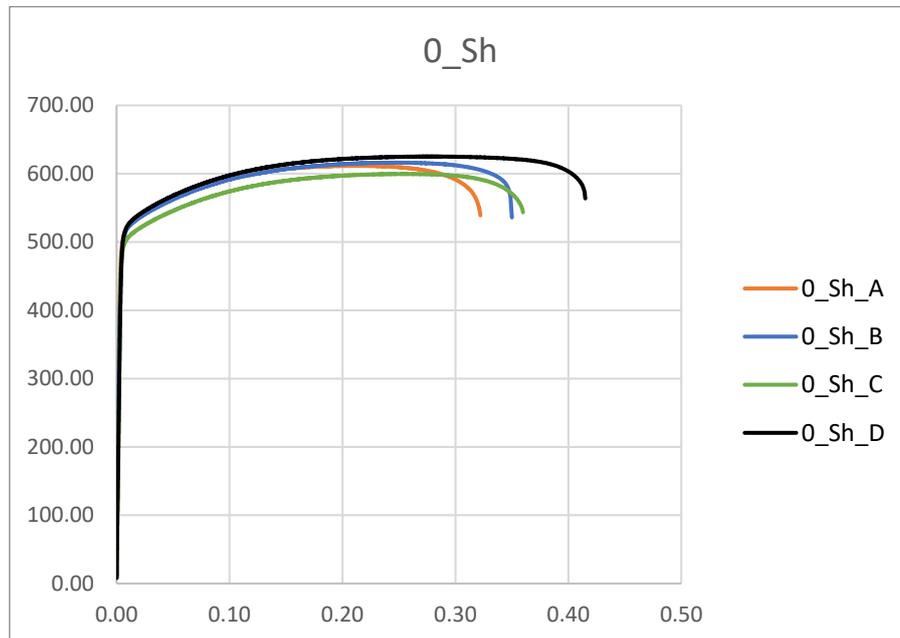


Grafico 4: curve ottenute in direzione a 0° ed inclinazione shift

- Provini in direzione a 45°

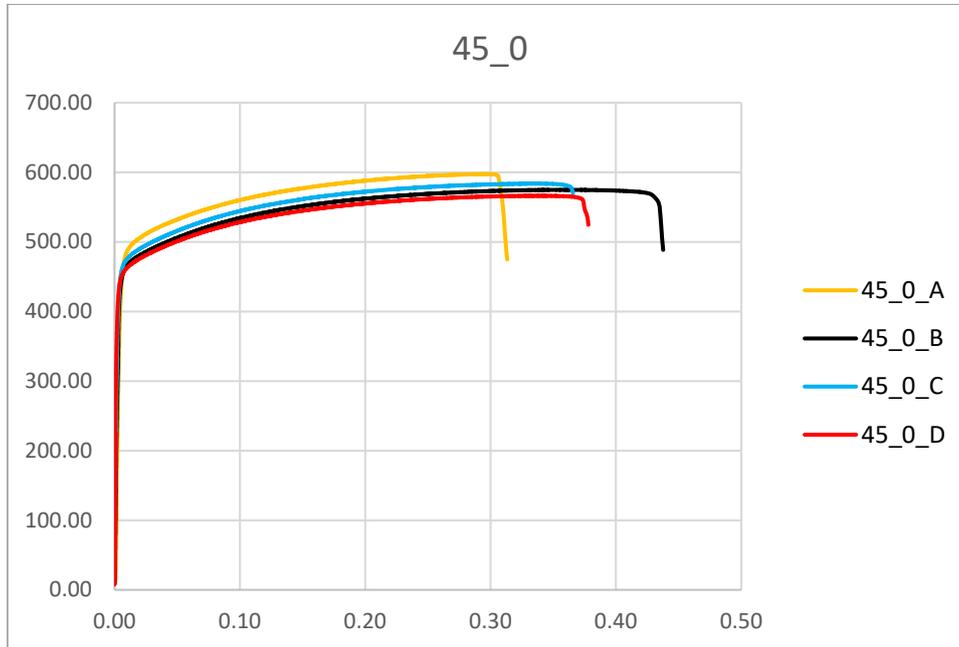


Grafico 5: curve ottenute in direzione a 45° ed inclinazione 0°

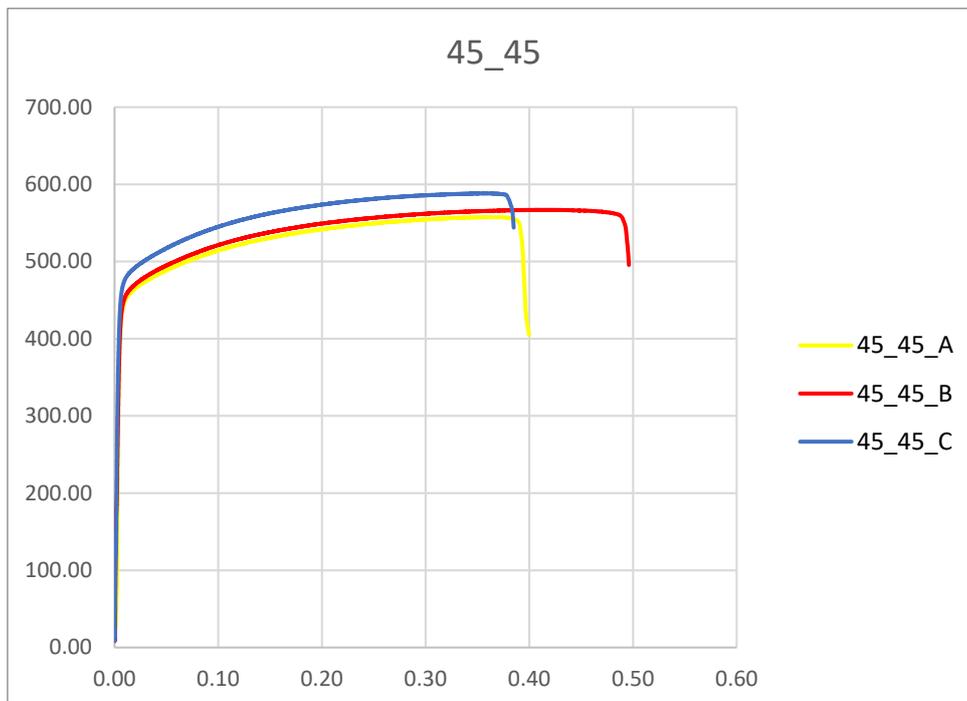


Grafico 6: curve ottenute in direzione a 45° ed inclinazione 45°

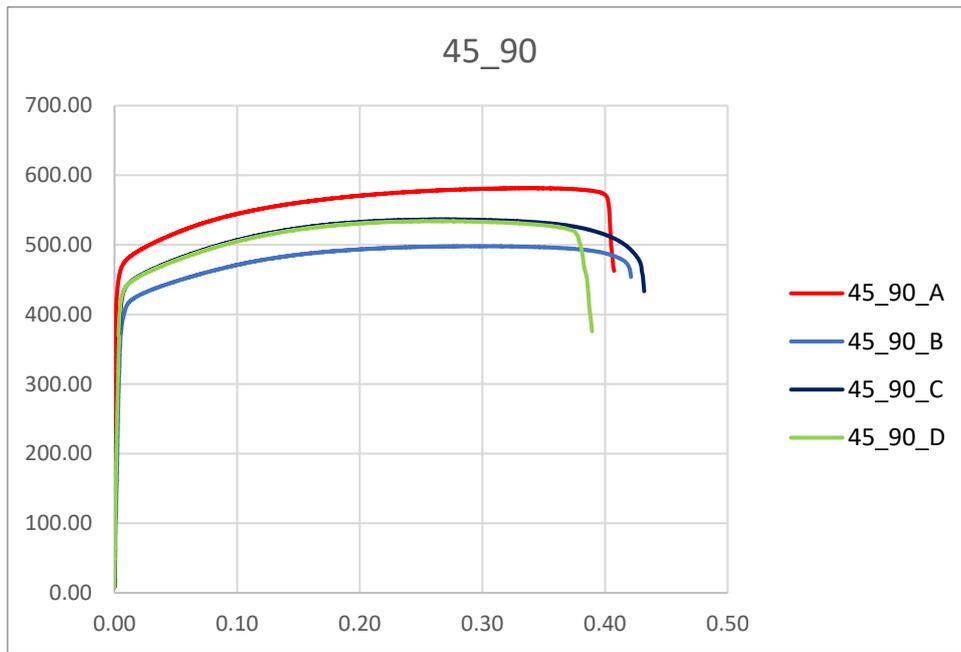


Grafico 7: curve ottenute in direzione a 45° ed inclinazione 90°

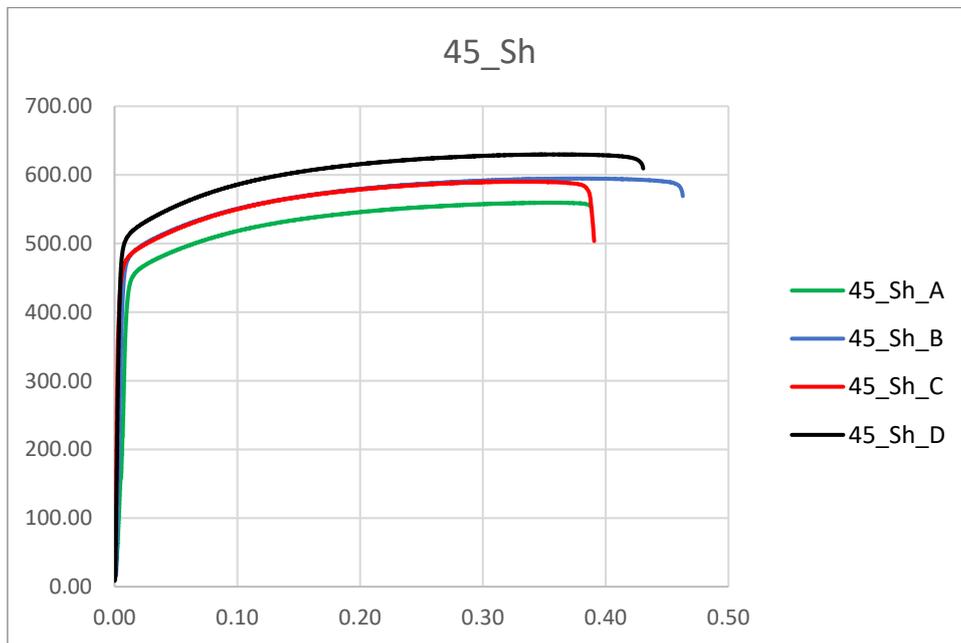


Grafico 8: curve ottenute in direzione a 45° ed inclinazione shift

- Provini in direzione a 90°

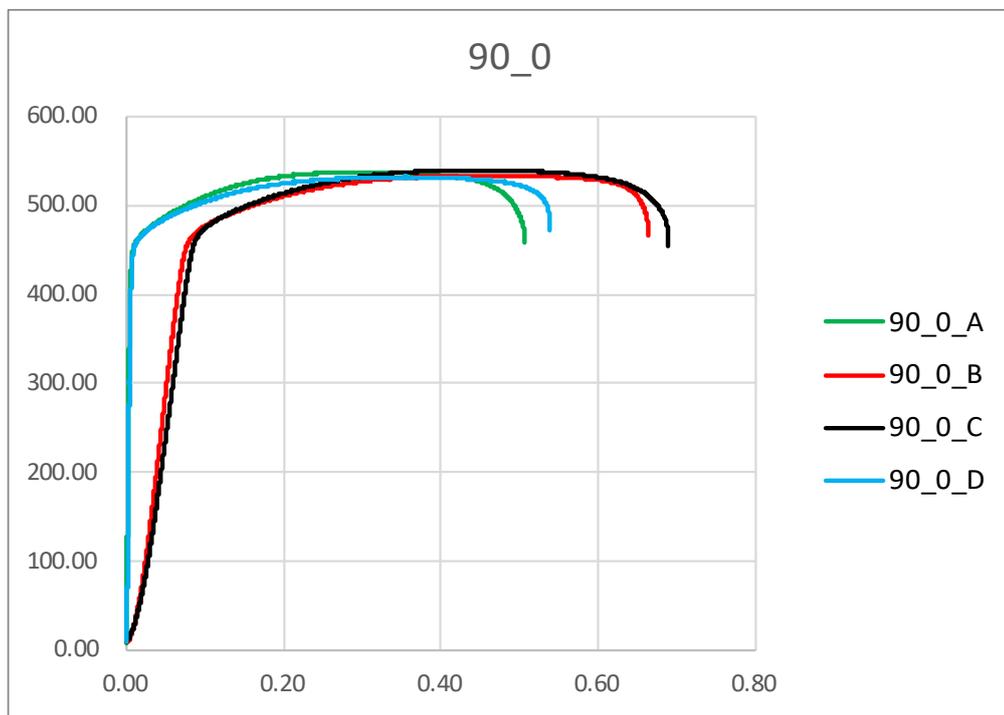


Grafico 9: curve ottenute in direzione a 90° ed inclinazione 0°

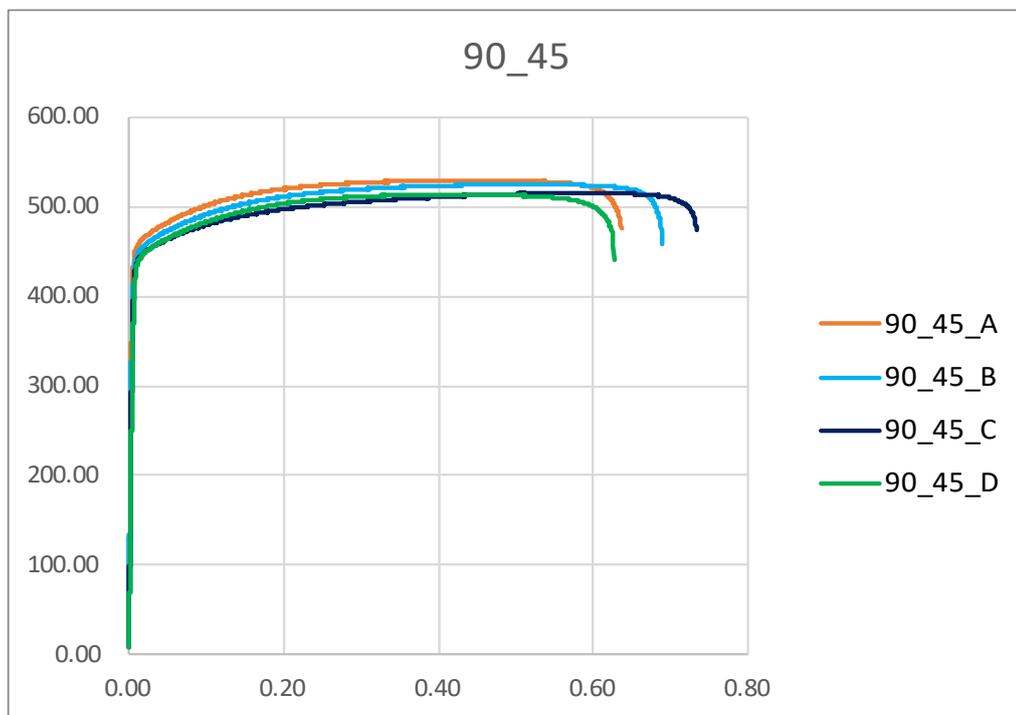


Grafico 10: curve ottenute in direzione a 90° ed inclinazione 45°

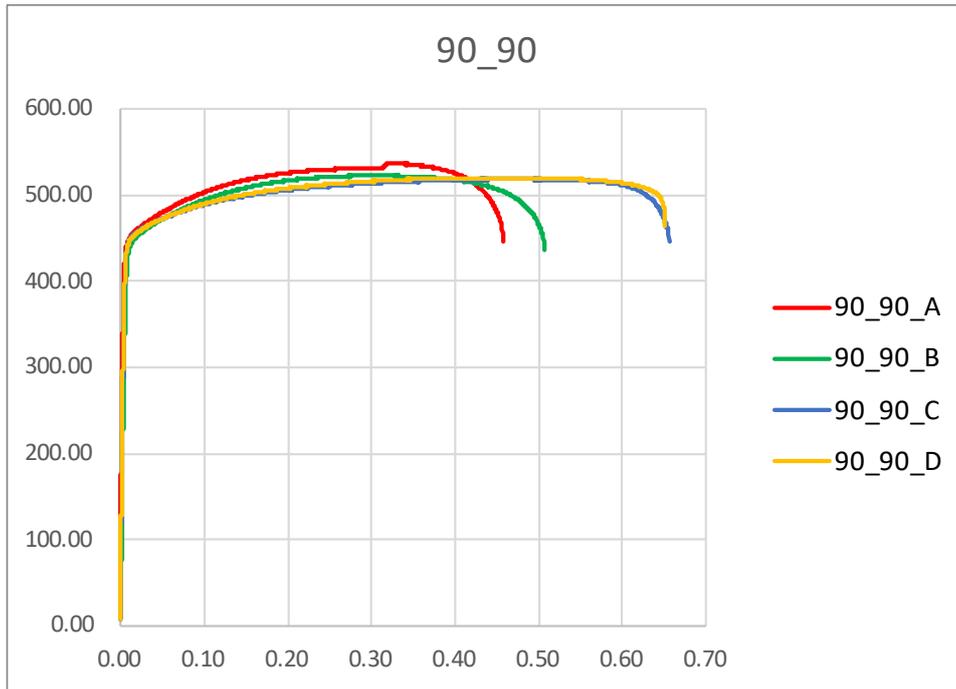


Grafico 11: curve ottenute in direzione a 90° ed inclinazione 90°

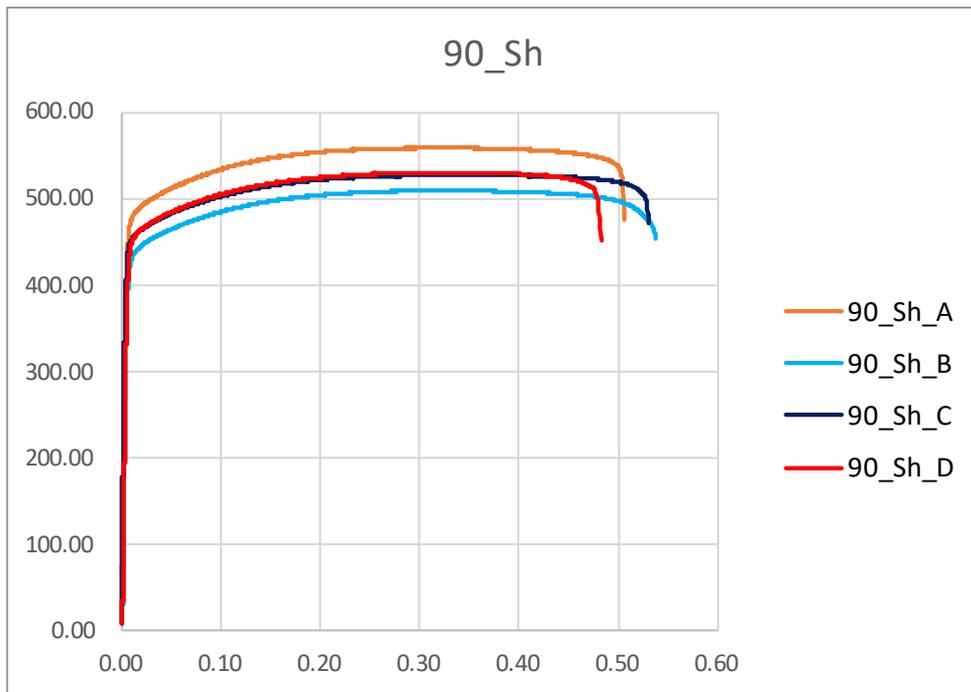


Grafico 12: curve ottenute in direzione a 90° ed inclinazione shift

Commento grafici

Questi grafici sono ottenuti con excel utilizzando la serie dei risultati presi dalla prova di trazione di ogni provino. In ordinata abbiamo il carico applicato al provino ed in ascissa la deformazione.

I grafici sono raggruppati in base alla modalità di realizzazione dei loro provini. Sono riportati 12 grafici ognuno è composto da 4 curve; ad esempio il grafico 1 sono le curve sforzo-deformazione dei 4 provini realizzati in direzione di stampa a 0° ed un'inclinazione a 0°, così abbiamo in totale 48 curve per tutti i provini.

Se andiamo a considerare un gruppo di curve che fanno parte dello stesso grafico, esempio grafico 2 (0_45) notiamo che c'è una differenza nella loro pendenza e anche i punti di rottura non sono gli stessi. Quindi possiamo capire che anche se i provini sono realizzati nelle stesse condizioni possono mostrare comunque un diverso comportamento durante la prova di trazione. Questa variazione del comportamento può dipendere da tanti fattori tra i quali: le condizioni di realizzazione dei provini, a volte non sono proprio identiche oppure durante la fase del serraggio del provino sulla macchina, per inserire i 4 provini possono esserci delle piccole modifiche che modificheranno nelle curve ottenute.

Paragonando i diversi grafici tra di loro, possiamo discutere due fattori: la tensione massima e l'allungamento o deformazione ottenuta.

I provini che hanno un valore di "tensione massima" alto sono:

- 0_45
- 0_Shift
- 45_Shift

I provini che hanno un basso valore di "tensione massima" sono:

- 0_90
- 90_0
- 90_45

Mentre per l'allungamento; i provini che mostrano un valore di allungamento alto sono:

- 90_0

- 90_45
- 90_90

I provini che hanno un basso valore di allungamento sono:

- 0_0
- 0_90
- 0_Shift

Risultati finali

- I valori ottenuti dai provini a 0°

Sigla	E	σ_s	σ_R	ϵ_m	ϵ_R	R
0 - 0 - A	132.552	475.191	579.71	18.62%	28.02%	0.5818
0 - 0 - B	118.783	448.833	546.25	17.42%	25.12%	0.6863
0 - 0 - C	104.599	472.988	567.91	17.88%	23.27%	0.6706
0 - 0 - D	86.428	471.032	575.45	20.86%	35.20%	0.5596
0 - 45 - A	156.726	495.299	644.23	32.02%	40.20%	0.4328
0 - 45 - B	7.128	482.000	631.53	55.45%	66.19%	0.4699
0 - 45 - C	175.436	493.352	647.90	39.64%	45.90%	0.4047
0 - 45 - D	7.062	490.000	618.38	33.04%	34.35%	0.4480
0 - 90 - A	137.458	426.313	519.93	23.17%	28.09%	2.1209
0 - 90 - B	121.919	419.969	528.66	28.40%	41.99%	2.3980
0 - 90 - C	120.801	405.400	507.65	24.97%	32.26%	1.4004
0 - 90 - D	119.782	417.058	525.43	20.75%	26.67%	1.6814
0 - Sh - A	145.968	502.853	611.71	21.03%	32.21%	0.6421
0 - Sh - B	140.709	497.399	616.25	24.70%	35.00%	0.5830
0 - Sh - C	126.284	491.750	599.69	25.78%	35.98%	0.5362
0 - Sh - D	114.234	511.899	625.27	27.68%	41.50%	0.7577

Tabella 1

- I valori medi

Sigla	E	σ_s	σ_R	ϵ_m	ϵ_R	R
0_0	111.691	472.010	571.681	18.25%	26.57%	0.626
0_45	81.927	491.676	637.881	36.34%	43.05%	0.440
0_90	121.360	418.513	522.684	24.07%	30.17%	1.901
0_Sh	133.497	500.126	613.976	25.24%	35.49%	0.613

Tabella 2

- I valori ottenuti dai provini a 45°

Sigla	E	σ_s	σ_R	ϵ_m	ϵ_R	R
45 - 0 - A	147.275	415.174	597.383	29.15%	31.33%	2.2000
45 - 0 - B	163.322	432.892	574.889	36.24%	43.76%	2.1089
45 - 0 - C	161.990	449.862	583.810	33.82%	36.56%	2.0614
45 - 0 - D	307.333	429.117	566.258	33.81%	37.80%	16.9895
45 - 45 - A	159.849	333.778	557.644	36.12%	39.98%	1.2948
45 - 45 - B	71.177	446.357	566.942	41.65%	49.61%	0.9488
45 - 45 - C	80.202	471.350	588.319	35.51%	38.49%	2.6670
45 - 90 - A	123.761	282.561	581.626	34.04%	40.73%	2.1921
45 - 90 - B	76.997	396.229	498.201	29.32%	42.12%	1.7728
45 - 90 - C	104.819	422.268	536.601	26.64%	43.19%	1.6696
45 - 90 - D	108.178	425.617	534.217	26.52%	38.94%	1.9395
45 - Sh - A	37.071	454.009	559.585	35.85%	38.86%	2.3262
45 - Sh - B	72.407	467.035	594.840	37.65%	46.28%	2.0948
45 - Sh - C	114.635	455.373	590.320	32.70%	39.06%	1.4878
45 - Sh - D	131.126	473.552	629.933	35.79%	43.05%	1.9325

Tabella 3

- I valori medi

Sigla	E	σ_s	σ_R	ϵ_m	ϵ_R	R
45_0	162.656	431.005	579.350	33.81%	37.18%	2.154
45_45	80.202	446.357	566.942	36.12%	39.98%	1.295
45_90	90.908	409.249	535.409	27.98%	41.43%	1.856
45_Sh	93.521	461.204	592.580	35.82%	41.06%	2.014

Tabella 4

- I valori ottenuti a 90°

Sigla	E	σ_s	σ_R	ϵ_m	ϵ_R	R
90 - 0 - A	99.856	436.419	537.253	30.82%	50.75%	0.9584
90 - 0 - B	7.447	455.000	533.852	45.63%	66.44%	0.8764
90 - 0 - C	6.252	459.000	539.754	45.26%	68.96%	0.9017
90 - 0 - D	96.646	403.410	531.941	35.37%	53.89%	0.6411
90 - 45 - A	105.132	431.908	529.755	44.54%	63.58%	1.1497
90 - 45 - B	106.225	415.277	525.129	51.68%	68.88%	1.0821
90 - 45 - C	86.211	413.125	515.475	60.32%	73.27%	1.1222
90 - 45 - D	76.740	406.790	513.657	42.55%	62.64%	1.1741
90 - 90 - A	120.347	427.726	536.879	32.61%	45.76%	3.5567
90 - 90 - B	73.635	416.273	522.383	30.26%	50.68%	1.8508
90 - 90 - C	85.492	433.768	518.310	46.76%	65.56%	2.6140
90 - 90 - D	94.338	427.218	519.817	45.20%	65.12%	2.7334
90 - Sh - A	107.366	449.542	559.398	32.06%	50.61%	0.9619
90 - Sh - B	91.474	402.492	509.631	31.30%	53.74%	0.8294
90 - Sh - C	154.839	416.752	527.916	34.25%	53.06%	0.6648
90 - Sh - D	98.737	406.200	530.742	32.56%	48.26%	0.9691

Tabella 5

- I valori medi

Sigla	E	σ_s	σ_R	ϵ_m	ϵ_R	R
90_0	52.047	445.710	535.553	40.31%	60.17%	0.889
90_45	95.671	414.201	520.302	48.11%	66.23%	1.136
90_90	89.915	427.472	521.100	38.90%	57.90%	2.674
90_Sh	103.051	411.476	529.329	32.31%	51.83%	0.896

Tabella 6

Commento risultati finali

Questi risultati riportati nelle tabelle sono stati elaborati su excel utilizzando la serie di valori ottenuti dalla prova di trazione fatta al laboratorio. Per ogni provino sono stati calcolati 6 valori, che nonostante il fatto che ci siano dei provini molto simili abbiamo ottenuto risultati non proprio uguali. Questo fatto è influenzato da tanti fattori di cui abbiamo parlato precedentemente.

In seguito è riportato un elenco del significato di ogni valore:

- E: Il modulo di Young (modulo di elasticità lineare)
- σ_s : è la tensione di snervamento
- σ_R : è la tensione di rottura
- ε_m : è la deformazione al punto di massimo carico
- ε_R : è la deformazione al punto di rottura
- R: è il rapporto di anisotropia

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t}$$

$$\varepsilon_t = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right)$$

$$\varepsilon_w = \ln\left(\frac{b}{b_0}\right)$$

Dove:

- ε_w : deformazione larghezza
- ε_t : deformazione spessore
- t: lo spessore finale
- t_0 : lo spessore iniziale
- b: la larghezza finale
- b_0 : la larghezza iniziale

Una delle caratteristiche importanti per le quali si effettua la prova di trazione è il rapporto d'anisotropia, che mette in relazione la deformazione della larghezza e la deformazione dello spessore. I due valori, t_0 e b_0 sono prelevati manualmente prima di inserire il provino alla macchina di prova, essi si aggiungono come dati iniziali al software collegato alla macchina. Alla fine della prova, dopo che viene tolto il provino rotto, si misura la larghezza finale e lo spessore finale. Come abbiamo già detto che la precisione e l'accuratezza sono due concetti molto importanti durante l'elaborazione, quando andavamo a misurare sia larghezza che spessore prendevamo più di una misura per fare in modo che non ci siano grandi margini di errori, poi veniva fatta la media tra le misure.

CONCLUSIONI

Quindi possiamo notare che i provini realizzati con l'additive manufacturing possono avere delle caratteristiche meccaniche migliori rispetto ai provini realizzati tramite altri processi. Perché con la tecnologia additiva si possono controllare tanti fattori, un fattore fondamentale è l'orientamento o la direzione delle fibre. Controllando questa caratteristica si possono migliorare le proprietà del materiale.

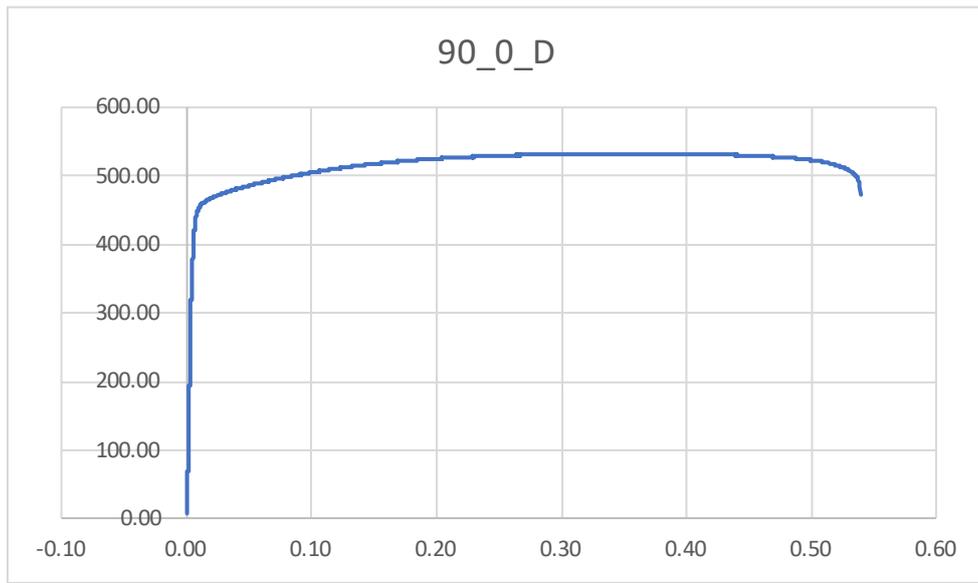


Grafico 13 curva con alto valore di deformazione

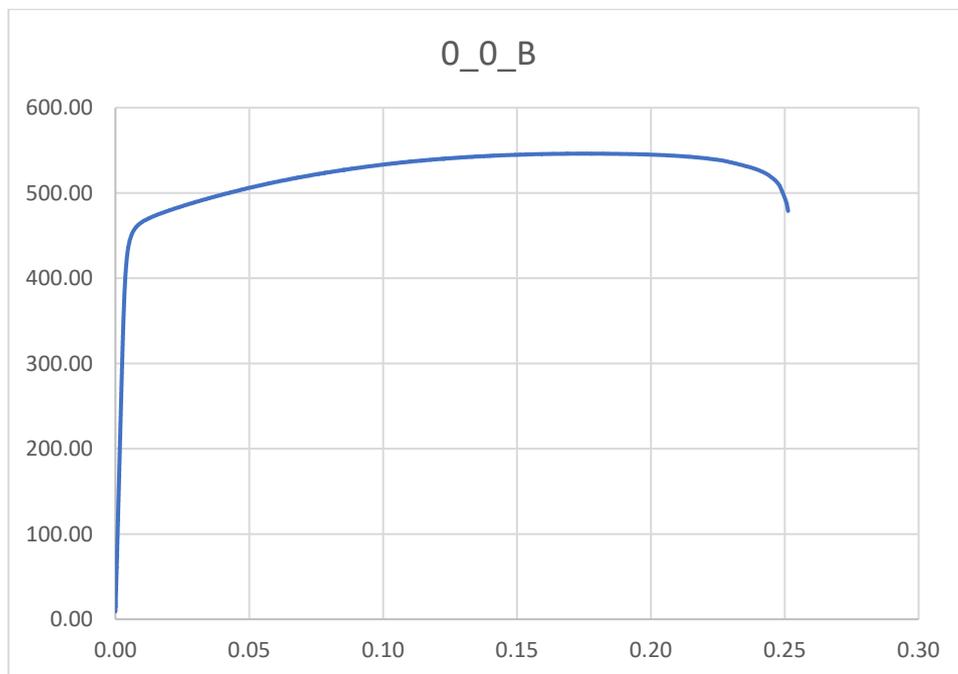


Grafico 14 curva con basso valore di deformazione

Osservando queste due curve riusciamo a capire che i provini realizzati ad un'inclinazione a 90° mostrano migliori proprietà rispetto a quelli realizzati a 0° .

Riusciamo anche a notare che le analisi DIC sono molto più precise e accurate rispetto agli estensimetri per la registrazione delle piccole deformazioni.

RINGRAZIAMENTI

A conclusione di questo elaborato vorrei menzionare tutte le persone che mi sono state vicine in questo percorso di maturazione personale e professionale.

Ringrazio il mio relatore il Professore Marco Rossi, ed il mio correlatore, il Professore Gianluca Chiappini, che mi hanno seguito, con la loro grande disponibilità, in ogni passo della realizzazione dell'elaborato e anche durante il tirocinio.

Ringrazio anche la mia famiglia per il suo supporto, incoraggiamento, per essermi stata sempre presente e senza di loro nemmeno questo lavoro esisterebbe.

Ringrazio gli amici che sono stati sempre vicini a me, in ogni occasione anche nei momenti in cui non avevo voglia di fare niente mi tiravano su di morale e mi incitavano a continuare e fare il meglio.

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: diagramma rapporto forza-spostamento	12
Figura 2: esempio meccanismo per la prova	12
Figura 3: curva sforzo-deformazione, evidenziando i campi di deformazione	14
Figura 4: curva Tensione-Deformazione nominale, evidenziando i punti critici.....	15
Figura 5 curva sforzo-deformazione del provino 0_0_A	16
Figura 6 curva sforzo-deformazione del provino 45_shift_A	16
Figura 7 curva sforzo-deformazione del provino 90_shift_C	17
Figura 8: provino con dimensionamento	18
Figura 9: valutazione anisotropia planare lamiera	20
Figura 10: provini raggruppati in base alla modalità di realizzazione	21
Figura 11: impostazione del meccanismo per la realizzazione della prova	23

INDICE DEI GRAFICI

Grafico 1: curve ottenute in direzione a 0° ed inclinazione 0°	25
Grafico 2: curve ottenute in direzione a 0° ed inclinazione 45.....	25
Grafico 3: curve ottenute in direzione a 0° ed inclinazione 90.....	26
Grafico 4: curve ottenute in direzione a 0° ed inclinazione shift	26
Grafico 5: curve ottenute in direzione a 45° ed inclinazione 0°	27
Grafico 6: curve ottenute in direzione a 45° ed inclinazione 45°	27
Grafico 7: curve ottenute in direzione a 45° ed inclinazione 90°	28
Grafico 8: curve ottenute in direzione a 45° ed inclinazione shift	28
Grafico 9: curve ottenute in direzione a 90° ed inclinazione 0°	29
Grafico 10: curve ottenute in direzione a 90° ed inclinazione 45°	29
Grafico 11: curve ottenute in direzione a 90° ed inclinazione 90°	30
Grafico 12: curve ottenute in direzione a 90° ed inclinazione shift.....	30

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1	33
Tabella 2	33
Tabella 3	34
Tabella 4	34
Tabella 5	35
Tabella 6	35

BIBLIOGRAFIA

Rossi, M. (2020/21). Appunti corso Costruzione di Macchine, UNIVPM

Forcellese, A. (2020/21). Appunti corso tecnologia meccanica. UNIVPM

SITOGRAFIA

- <https://www.ukessays.com/essays/engineering/theory-of-tensile-test-engineering-essay.php>
- <https://link.springer.com/>
- <https://www.engineeringvillage.com/home.url?redir=t>