



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

SCUOLA DI INGEGNERIA  
- Sede di Forlì -

CORSO DI LAUREA  
IN INGEGNERIA MECCANICA  
Classe: L-9

**Analisi di componenti bi-materiale fabbricati tramite  
tecnologia additiva a deposizione diretta (DED)**

Candidato:  
Francesco Albonetti

Relatrice  
Prof.ssa Erica Liverani

---

Anno Accademico 2023-2024  
Appello di marzo 2025



# Sommario

La continua evoluzione e ricerca della perfezione sta portando l'uomo all'esplorazione di nuove tecniche per la realizzazione di macchine sempre più prestazionali.

Una delle tecnologie alle quali ci si sta rivolgendo è l'additive manufacturing (AM), che permette di superare limiti che prima sembravano insormontabili.

Uno di questi, era lo sviluppo di rotori per motori a riluttanza sincrona (SynRel), che a causa di vincoli strutturali, avevano una velocità massima limitata.

Tramite la tecnologia additiva di deposizione diretta (DED), che permette di creare stampe multi-materiale, si cerca di abbattere il limite di velocità ora presente.

Per la realizzazione di rotori, si è riscontrato che le leghe di FeSi hanno alta permeabilità magnetica, perciò sono ottimi materiali magnetici dolci. Al contrario, l'acciaio inossidabile austenitico AISI 316L, ha una permeabilità simile a quella dell'aria, il che lo rende adatto alla creazione di barriere di flusso.

Lo scopo di questo elaborato è caratterizzare, tramite prove di trazione, componenti bi-materiale realizzati con la combinazione di FeSi2.9 e AISI 316L.

Viene eseguita in seguito un'analisi delle deformazioni dei campioni, subite durante le prove, tramite il metodo Digital Image Correlation (DIC).



# Indice

<b>Sommario</b>	<b>i</b>
<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2 Stato dell'arte</b> .....	<b>5</b>
2.1 Applicazione dei processi AM per la realizzazione di rotori .....	5
2.2 Scelta dei materiali .....	6
2.2.1 FeSi <sub>2,9</sub> .....	6
2.2.2 AISI 316L .....	6
2.2.3 Caratterizzazione dei materiali .....	7
2.3 Analisi di altri studi .....	10
2.3.1 Studio della lega ferro-silicio .....	10
2.3.2 Studio dell'acciaio 316L .....	14
2.4 Confronto dei casi di studio .....	18
2.5 Produzione dei campioni bi-materiale .....	20
<b>3 Analisi e risultati</b> .....	<b>21</b>
3.1 Prove di trazione .....	21
3.2 Risultati delle prove di trazione .....	24
3.3 Risultati dell'analisi DIC (Digital Image Correlation) .....	31
3.4 Discussione e confronto dei risultati .....	38
<b>4 Conclusioni</b>	<b>41</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>44</b>



# 1

## Introduzione

Il processo di additive manufacturing (AM), noto comunemente come stampa 3D, è in realtà un processo tecnologico innovativo più ampio, che permette di realizzare modelli partendo da un disegno tridimensionale progettato su programmi di progettazione assistita da computer (CAD).

I primi passi in questo campo sono stati mossi attorno agli anni '80, e con il passare del tempo e grazie al progresso della tecnologia, l'AM è passato dall'essere uno strumento di prototipazione rapida ad essere un vero e proprio processo di produzione di componenti. Mentre i metodi tradizionali ricavano il componente da un blocco grezzo di partenza (manifattura sottrattiva) o tramite fusione, l'AM ha la capacità di creare un componente attraverso una produzione "bottom-up", ovvero un approccio "strato per strato". Questa caratteristica è nota, soprattutto negli ultimi anni dove si ha un occhio di riguardo per la sostenibilità, per la riduzione degli sprechi, dato che non si avrà la produzione di trucioli.

La stampa 3D ha la possibilità di creare geometrie più complesse, o addirittura impossibili da realizzare con altri processi produttivi. Permette di produrre il design limitando al minimo il numero di post-processi necessari, indispensabili invece nei processi classici. Si ha una maggiore libertà di personalizzazione senza dover utilizzare attrezzatura aggiuntiva. La possibilità di realizzare subito il componente senza l'esigenza di adoperare diversi macchinari, rende più breve il tempo di produzione. Tramite AM si ha la possibilità di processare una vasta gamma di materiali, tra cui polimeri, metalli, ceramiche e compositi.

L'additive non presenta solo vantaggi, ma ha ancora alcuni ostacoli. I materiali che si possono impiegare sono limitati. I componenti stampati, in alcuni casi, richiedono delle lavorazioni

aggiuntive, e le proprietà meccaniche sono anisotrope, il contrario dei risultati che si ottengono con una lavorazione tradizionale, con la quale le proprietà risultano isotrope.

American Society for Testing and Materials (ASTM) con la UNI EN ISO/ASTM 52900:2015 classifica sette categorie di processi additivi: deposizione di legante (BJ), deposizione diretta (DED), estrusione di materiale (ME), deposizione di materiale (MJ), fusione a letto di polvere (PBF), laminazione di fogli (SL) e fotopolimerizzazione in vasca (VP).

I campioni che verranno analizzati da questo elaborato sono stati realizzati tramite tecnologia additiva di deposizione diretta (DED).

La DED è un processo AM avanzato, che sfruttando una sorgente di calore ad alta densità energetica (come un laser, un fascio di elettroni o un arco di plasma), fonde il materiale che si vuole depositare. Viene formata così una stratificazione di metallo, che darà origine al componente finale.

Il processo di realizzazione, parte dalla creazione di un modello su software di progettazione (CAD). Tramite ulteriori programmi, l'oggetto virtuale viene sezionato. Successivamente si regolano i parametri fondamentali per la stampa, come lo spessore delle fette che verranno stampate, la spaziatura tra una traccia e la successiva, il percorso che verrà seguito dall'ugello e la potenza del laser.

Come accennato, questa tecnologia sfrutta una fonte di energia termica concentrata per fondere il materiale, che viene erogato tramite un ugello, sotto forma di polvere (come nel caso in esame, rappresentato in Figura 1.1a) o filo metallico (Figura 1.1b). La testa di stampa è collegata a un braccio robotizzato, che permette il movimento su più assi, con la possibilità di realizzare geometrie più complesse.

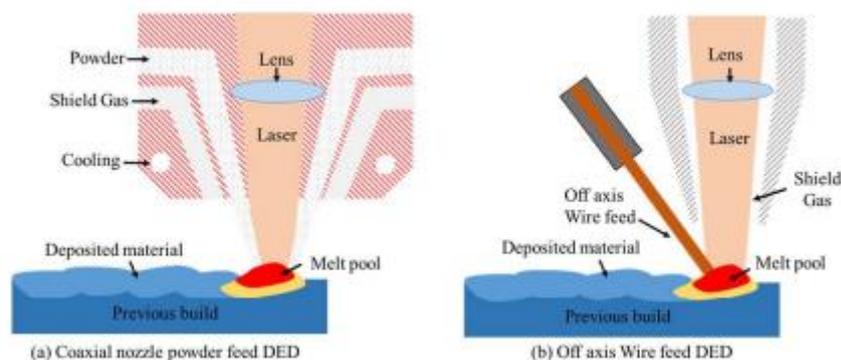


Figura 1.1 Diverse tipologie di ugello

Il laser fonde il substrato, creando un pool di fusione. Il materiale, erogato appena raggiunge il bagno di fusione, si liquefa a sua volta, realizzando così l'inizio della deposizione.

La sorgente di calore, con annesso l'estrusore, procede lungo il percorso predefinito, permettendo al metallo depositato precedentemente di solidificare, formando così un cordone.

Al termine della creazione di un livello, la testa si alza per stampare il secondo. La sovrapposizione di più strati, porta alla formazione del componente 3D.

La norma ASTM 3413-19e1 elenca i principali vantaggi che presenta la tecnologia DED. Si parte dall'ampia gamma di materiali di base che si possono elaborare, che possono essere acciai inossidabili, leghe di titanio, leghe a base di nichel, alluminio e cobalto-cromo. Si prosegue con la possibilità di realizzare stampe con materiali multipli. Le proprietà meccaniche statiche e dinamiche sono migliori rispetto a quelle che si ottengono tramite altre tecnologie. È possibile creare stampe complete, o solamente dettagli specifici, come rivestimenti di superfici. Infine è caratterizzata da un'elevata velocità di produzione.

Il processo DED, come citato nella norma ASTM, non viene sfruttato solo per la creazione di componenti, ma permette di essere applicata in diversi contesti. La deposizione diretta è una tecnica che permette la riparazione di componenti usurati o danneggiati, il riadattamento e personalizzazione di elementi già realizzati, il rivestimento superficiale di pezzi soggetti a usura.

La tecnologia DED può essere adottata in sinergia con i processi produttivi tradizionali, sfruttando i vantaggi di entrambe le tecnologie, andando ad ottimizzare la produzione.

L'evoluzione della scienza e della tecnologia sta rendendo possibile la stampa multi-materiale, che permette, in un'unica stampa, l'uso di più materiali, offrendo così la possibilità di variare le proprietà localmente, ampliando le possibilità di progettazione e le funzionalità dei componenti prodotti.

Questa tecnologia, però, presenta ancora delle limitazioni, come la finitura superficiale, che risulta ruvida ed ha una bassa precisione. Per questo i prodotti realizzati tramite DED richiedono spesso un post-trattamento per migliorare la superficie. I difetti che si riscontrano sono dovuti a diversi fattori, ad esempio gas intrappolati, fusione non completa o assente e rapida solidificazione.

Inoltre, i processi DED, presentano delle tensioni residue, dei restringimenti durante il raffreddamento e delle deformazioni, fenomeni causati dai gradienti di temperatura presenti nei componenti.

Negli ultimi anni, l'interesse per le macchine elettriche è cresciuto significativamente. I motori che vengono adottati nei casi in cui sono richieste elevate velocità di rotazione, sono i motori a magneti permanenti (PM). Il motivo è dato dal fatto che sono macchine molto efficienti e che riescono a lavorare in un range molto ampio di velocità. I materiali utilizzati per la loro costruzione sono il motivo per cui vengono svolte ricerche che puntano allo sviluppo di nuove tecnologie. Infatti, per la produzione di un motore a magneti permanenti, sono utilizzati materiali delle terre rare, che a causa dell'estrazione e delle lavorazioni, generano preoccupazioni a livello ambientale e sociale, e l'uso di questi materiali, determina un'instabilità del prezzo nel tempo.

Per questo motivo, si sta puntando a sviluppare la tecnologia dei motori a riluttanza sincrona (SynRel) per applicazioni ad alto numero di giri. La limitazione di velocità ora presente, è data dalla debolezza meccanica dei rotori, causata dagli intagli presenti nella struttura per creare le barriere di flusso, che impattano sulla rigidità strutturale.

Per cercare di risolvere questo problema, viene in aiuto la tecnologia additiva di metalli (AM), che permette la realizzazione di rotori realizzati con più materiali, consentendo di sfruttare le caratteristiche dei singoli materiali. I processi additivi più propensi alla realizzazione di componenti per motori sincroni, sono i processi di deposizione diretta (DED, Direct Energy Deposition), che consentono di creare dei prodotti con la deposizione di materiali diversi a strati alterni.

Tramite questa tecnologia, si cerca di sviluppare un rotore, composto da due materiali: AISI 316L e FeSi2.9. La scelta dei materiali è stata effettuata in base alle loro proprietà specifiche e alla compatibilità chimica.

Per lo sviluppo di questo progetto, sarà necessario la presenza di un materiale magnetico, realizzato in lega di ferro-silicio, e di un materiale per la creazione delle barriere di flusso, costituito da acciaio inossidabile austenitico 316L. L'obiettivo dello studio è caratterizzare campioni bi-materiale (FeSi2.9 e AISI 316L) ottenuti mediante stampa con tecnologia DED. L'analisi verrà condotta su quattro provini attraverso prove di trazione.

# 2

## Stato dell'arte

### 2.1 Applicazione dei processi AM per la realizzazione di rotor

I processi di produzione additiva multimateriale (MMAM) trovano nel campo delle macchine elettriche molte possibilità per la sua implementazione.

La realizzazione di rotor è un'applicazione adatta ai processi additivi AM. L'obiettivo per il miglioramento è l'eliminazione delle barriere di flusso realizzate con aria, e la successiva sostituzione con un materiale che presenta una permeabilità magnetica paragonabile ad essa. La rimozione degli spazi vuoti permette un aumento della densità di potenza e un miglioramento dell'integrità strutturale. Lo sforzo che sarebbe presente nelle nervature, è ora distribuito sull'intero rotore, essendo completamente realizzato con materiale solido.

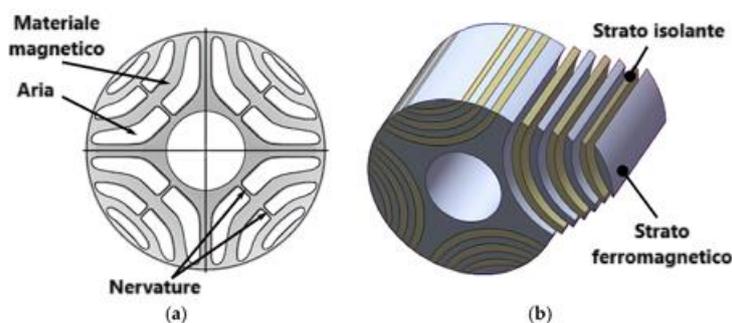


Figura 2.1 Realizzazione dei rotor classici e rotor tramite DED

In Figura 2.1a è rappresentato un classico rotore con la presenza di nervature per la realizzazione delle barriere. Tramite processi AM si riesce a realizzare un rotore nel quale le barriere sono realizzate con strati isolanti, alternati a strati di materiale ferromagnetico, in analogia a quanto illustrato in Figura 2.1b.

## 2.2 Scelta dei materiali

Per la produzione di un rotore tramite tecnologia additiva bi-materiale, è necessario individuare due materiali in base alle loro proprietà specifiche e alla loro compatibilità chimica, ma soprattutto i materiali devono essere compatibili con il processo DED.

Il materiale magnetico, che si alterna con il materiale isolante, dovrà possedere elevate permeabilità e saturazione, bassa resistività termica ed elevata conducibilità termica. Per lo sviluppo di questo progetto, la lega di ferro-silicio ( $\text{FeSi}_{2,9}$ ) è risultata ottimale per la realizzazione degli strati magnetici. La presenza di silicio (Si) permette di limitare le perdite di correnti parassite, ma al contempo, una percentuale troppo elevata, renderà il componente fragile e sarà più complicata la sua produzione.

Le barriere di flusso devono avere una permeabilità magnetica paragonabile a quella dell'aria, e dovrà possedere proprietà meccaniche simili a quelle del materiale magnetico, così da garantire una stampa con caratteristiche omogenee ed adeguate alle sollecitazioni che saranno presenti durante l'applicazione pratica. L'acciaio inossidabile austenitico 316L rispecchia le caratteristiche richieste, perciò è stato scelto come materiale isolante.

### 2.2.1 FeSi<sub>2.9</sub>

Le leghe di ferro-silicio sono risultate le migliori tra i materiali magnetici dolci per la realizzazione di un rotore. Si è riscontrato tramite gli studi sulle tecnologie DED e LPBD (Laser Powder Bed Fusion) un'ottima stampabilità del ferro puro, che permette di raggiungere densità relative fino al 99,7%. La presenza di silicio all'interno della lega riduce le perdite di correnti parassite, rendendo così il materiale ottimo per le applicazioni elettromagnetiche. Il contenuto che permette di avere un beneficio è compreso tra il 2,5-3,5%. Una concentrazione elevata, oltre al 3,5%, renderebbe peggiore la lavorabilità. Se si raggiungessero percentuali superiori al 6,5%, gli acciai diventerebbero estremamente fragili, rendendo così complicata la lavorazione del materiale.

### 2.2.2 AISI 316L

Per la realizzazione delle barriere di flusso, il materiale adottato è l'acciaio inossidabile austenitico 316L. L'acciaio presenta una permeabilità magnetica paragonabile a quella dell'aria ed è noto per la sua eccellente stampabilità tramite i processi di produzione additiva. Tramite studi, è stata dimostrata questa peculiarità, ricavando, da stampe realizzate con l'uso della tecnologia DED, componenti in

316L con elevata densità, ottime proprietà meccaniche e bassa porosità, rendendolo quindi un ottimo materiale adatto ai processi additive manufacturing.

### 2.2.3 Caratterizzazione dei materiali

Per svolgere le prove che permetteranno di eseguire la caratterizzazione dei materiali, inizialmente sono stati stampati, tramite tecnologia DED, due parallelepipedi composti dai singoli materiali ( $\text{FeSi}_{2.9}$  e 316L), dai quali sono stati ricavati i provini con l'ausilio della tecnologia W-EDM, seguendo le misure riportate in Figura 2.2.

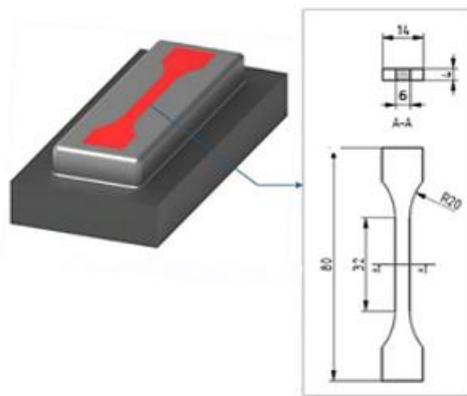


Figura 2.2 Misure dei campioni ricavati per la caratterizzazione

Per la realizzazione dei campioni è stato utilizzato un robot ABB IRB 4600 a 6 assi abbinato a un posizionatore IRBP A250. La fonte di energia è un laser a diodo Laserline LDF-4500-60, che può erogare una potenza massima di 4,5 kW. Il sistema è equipaggiato con un focalizzatore Laserline OTS-5, caratterizzato da una lunghezza focale di collimazione di 80 mm e una lunghezza focale di 300 mm, consentendo di ottenere un punto focale sulla superficie con un diametro di 2,2 mm.

La polvere viene erogata tramite un ugello GTV PN6625 con 6 uscite, posizionato ad un'altezza di 25 mm. È stato scelto l'Argon come gas di trasporto e di protezione del bagno fuso, con portate di 8 l/min e 20 l/min rispettivamente. I parallelepipedi realizzati per entrambi i materiali hanno dimensione pari a 30x90x10 mm, dai quali vengono ricavati i campioni.

Per la realizzazione è stata adottata una tecnologia di scansione nella quale viene prima realizzato il contorno, poi viene effettuato il riempimento avanti e indietro, con una sovrapposizione delle tracce del 50%. A ogni livello la direzione di stampa viene ruotata di 90° e viene inoltre modificato il punto di partenza.

In Tabella 2.1 vengono riportati per chiarezza i parametri di stampa utilizzati per entrambi i materiali. Nella tabella sono riportati i valori della velocità di scansione  $v$ , la potenza del laser  $P$ , la portata di polvere  $g$ , l'altezza degli strati stampati  $\Delta z$  e infine l'energia specifica  $E$ .

Nella sezione della potenza del laser sono riportati tre valori, che corrispondono rispettivamente alla potenza iniziale, a quella finale e l'ultimo valore indica di quanto viene diminuita ad ogni cambio di livello.

Viene riportato anche il valore di potenza specifica, calcolata come:

$$E = \frac{P}{v * D}$$

dove P indica la potenza del laser, v la velocità di scansione e infine D il diametro del punto laser.

	Scan velocity v [mm · min <sup>-1</sup> ]	Laser power, P [W]	Powder flow rate, g [g · min <sup>-1</sup> ]	Layer height, Δz [mm]	Specific energy, E [J · mm <sup>-2</sup> ]
AISI 316L	1020	2200-2000-80	9,1	0,7	58,8
FeSi2.9	1200	2000-1800-80	10	0,8	45,5

*Tabella 2.1 Parametri di stampa*

Per eseguire successivamente un confronto con i casi di studio esaminati, viene calcolata la densità di energia del laser per la stampa della lega ferro-silicio, secondo l'Eq. 1 riportata nel secondo articolo esaminato relativo al FeSi. La densità nel caso di massima potenza del laser, risulta pari a 26,31 J/mm<sup>3</sup>, mentre per la potenza impostata al valore minimo, risulta pari a 23,68 J/mm<sup>3</sup>. I valori vengono riportati in Tabella 2.2.

	$\rho_E$ [J/mm <sup>3</sup> ]
2000 [W]	26,31
1800 [W]	23,68

*Tabella 2.2 Densità di energia*

Successivamente alla realizzazione dei campioni, è seguito un trattamento termico per entrambi i materiali. L'obiettivo è quello di migliorare le proprietà magnetiche della lega ferro-silicio e ridurre le tensioni presenti nell'acciaio 316L.

Basandosi sulla ricerca di M. Garibaldi, I. Ashcroft, J. N. Lemke, M. Simonelli e R. Hague, intitolata "Effect of annealing on the microstructure and magnetic properties of soft magnetic Fe-Si produced via laser additive manufacturing", si è scelto il trattamento termico da applicare ai provini. Lo studio analizza il cambiamento di proprietà dei campioni realizzati tramite tecnologia di fusione laser a letto di polvere (LPBF) sottoposti a ricottura, e riscontra un miglioramento delle proprietà magnetiche del FeSi se questo è effettuato ad alte temperature.

Secondo lo studio condotto da Q. Xiao, J. Chen, H. B. Lee, C. Jang, and K. Jang, intitolato “Effect of heat treatment on corrosion behaviour of additively manufactured 316L stainless steel in high-temperature water”, ha dimostrato che tramite una ricottura ad alta temperatura, si ottiene una riduzione delle tensioni residue dell'acciaio.

Vieni perciò adottato un trattamento di ricottura a 850°C per entrambi i materiali per 1 ora, e successivamente un raffreddamento in aria.

Per valutare le caratteristiche dei singoli materiali, sono stati condotti test di trazione quasi statici secondo la norma BS EN ISO 6892, utilizzando una pressa idraulica Italsigma.

Tramite i test di trazione, è stato possibile ricavare le curve sforzo-deformazione ingegneristiche (Figura 2.3), dalle quali sono poi stati estratti i risultati dell'allungamento percentuale, la tensione a rottura e il carico unitario di snervamento (Tabella 2.3).

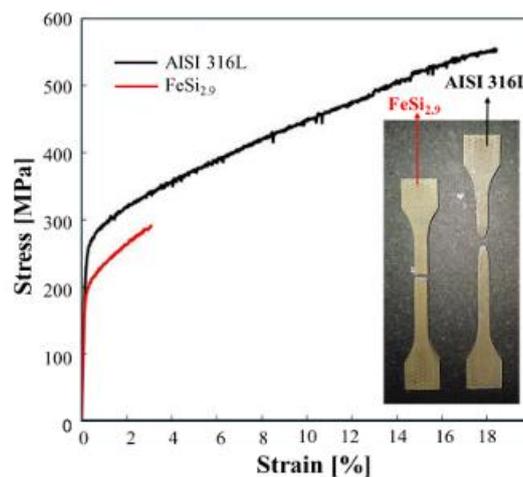


Figura 2.3 Curve sforzo-deformazione ingegneristiche

	Young's Modulus (Gpa)	A% (%)	UTS (Mpa)	R <sub>p0,2</sub>
FeSi <sub>2,9</sub>	131 - 144	1,1 - 3,1	255 - 290	215 - 190
316L	130 - 145	14,8 - 18,4	470 - 555	190 - 230

Tabella 2.3 Risultati delle prove di trazione

Nella Figura 2.3, siccome le curve sono comparabili, vengono rappresentati entrambi gli andamenti dei due materiali. Si nota che l'acciaio AISI 316L ha un comportamento più duttile, subendo una deformazione massima pari al 18,4%, con un carico a rottura pari a 555 MPa.

Viceversa, la lega Fe-Si risulta essere più fragile, con una deformazione che si attesta al 3,1% e un carico di rottura pari a 290 Mpa.

## 2.3 Analisi di altri studi

L'analisi degli studi presenti in letteratura è un passaggio fondamentale per poter inquadrare il lavoro svolto all'interno di quello che è lo stato dell'arte dell'argomento. Similmente alle ricerche svolte per questo progetto, altri autori hanno stampato e caratterizzato questi materiali. In questo capitolo verranno perciò analizzati gli studi presenti in bibliografia, in maniera tale da confrontare i risultati ottenuti da altri ricercatori con quelli ricavati dalle prove svolte nell'ambito di questo studio.

### 2.3.1 Studio della lega ferro-silicio

Il primo studio è stato svolto da Sabrina A.Khan, Pornthep Chivavibul, Petr Sedlak, Satoshi Arai, e Manabu Enoki, intitolato "Analysis of Acoustic Emission Signals during Tensile Deformation of Fe-Si Steels with Various Silicon Contents".

L'indagine è focalizzata sullo studio del comportamento di provini in lega Fe-Si realizzati mediante fusione e laminazione a freddo, sottoposti a prove di trazione. Vengono analizzati diversi campioni, che presentano una percentuale di silicio differente (2, 3 e 4,5%), e le prove sono condotte a diversa temperatura (temperatura ambiente, indicata con RT, e ad una temperatura di 200 °C).

Al variare della percentuale di silicio all'interno dei provini, si nota una variazione in termini di carico di snervamento, rottura e allungamento percentuale.

Ciò che si osserva è un calo dell'allungamento a rottura al progressivo aumentare della quantità di silicio. Al contempo però i campioni presentano un aumento del carico di rottura e snervamento.

Quanto sopra, determina un passaggio da un comportamento duttile del materiale, a un comportamento più fragile.

Le prove di trazione sono state eseguite tramite una macchina di trazione universale (AG-5000C, Shimadzu Co., Giappone), svolgendo il test con una velocità pari a 1 mm/min.

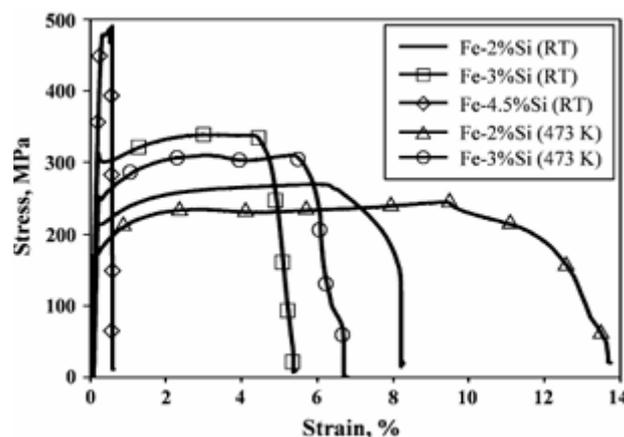


Figura 2.4 Curve sforzo-deformazione

In figura 2.4 vengono riportati i grafici di sforzo-deformazione per i diversi provini, e sono raffigurate anche le prove eseguite ad alta temperatura.

Dal grafico si notano le variazioni del comportamento del materiale all'aumentare della percentuale in peso di silicio. I campioni composti da FeSi2 e FeSi3, rappresentati nel grafico rispettivamente con una linea nera e una contrassegnata da quadrati, presentano un comportamento duttile.

Al contrario, la lega con la percentuale di silicio maggiore (FeSi4.5), illustrata con una linea nera marcata da rombi, riporta un comportamento fragile.

L'aumento di silicio, provoca un miglioramento dal punto di vista della resistenza alla rottura e del carico unitario di snervamento, ma implica una diminuzione del valore di allungamento a rottura.

Nella tabella 2.4 vengono riepilogati i valori di tensione di snervamento, rottura e l'allungamento percentuale.

Specimen	Test Temperature (°C)	Chemical Composition (Wt Pct)				Yield Strength (Mpa)	Tensile Strength (Mpa)	Failure Strain (Pct)
		Si	Mn	P	Al			
Fe-2 pct Si	RT	2	0,24	0,012	0,051	220	270	8,5
Fe-3 pct Si	ET	3	0,24	0,012	0,051	310	338	5,6
Fe-4,5 pct Si	ET	4,5	0,24	0,012	0,051	480	487	0,6
Fe-2 pct Si	200	2	0,24	0,012	0,051	178	244	13,5
Fe-3 pct Si	200	3	0,24	0,012	0,051	252	310	7

*Tabella 2.4 Risultati delle prove di trazione*

I risultati raggiunti per il campione costituito da FeSi2 sono coerenti con i valori ottenuti dai provini realizzati in FeSi2.9 per il caso in esame.

Un ulteriore confronto si può eseguire analizzando il caso di studio “Enhanced magnetic properties and Goss texture development of FeSi3.5 by direct energy deposition”, svolto da Jeongwoo Lee, Akanksha Parmar, Yung C. Shin, Leyi Zhu.

La ricerca mira alla realizzazione di campioni in materiale magnetico dolce in lega di FeSi (con una percentuale di silicio pari a 3,5%) realizzati tramite tecnologia DED.

Per la realizzazione dei provini, l'acciaio Fe-Si è stato erogato sotto forma di sfere e viene fuso tramite la fonte di energia. Le stampe vengono realizzate su un substrato di SS304 spesso 6.35 mm, e viene utilizzato Argon come gas vettore, che viene emesso con una portata di 5 l/min.

Sono state utilizzate due tecniche scansione per la realizzazione dei campioni. La prima prevede una deposizione che segue sempre la stessa direzione, senza una variazione di angolo. La seconda tecnica, utilizza angoli di orientamento diverso per ogni livello di stampa (0°, 60°, 120°, 180°, 240°, 300°). Viene sfruttato il sistema OPTOMECH LENS 750<sup>TM</sup>, che permetterà di avere una densità di energia pari a 148,54 J/mm<sup>3</sup>. La densità di energia viene indicata con  $\rho_e$  (J/mm<sup>3</sup>) e viene calcolata secondo l'Eq. (1) come segue:

$$\rho_e = \frac{P}{Av} \quad (1)$$

dove P (W) è la potenza del laser, v (mm/s) è la velocità di scansione ed infine A (mm<sup>2</sup>) è l'area di fuoco del laser. Per poter fare un confronto con i valori utilizzati per la realizzazione dei provini esaminati nel corso di questo progetto, è necessario ricavare la potenza del laser (P), ma a causa dell'assenza di valori, viene calcolata la densità di energia per il caso in esame.

Inoltre vengono forniti i parametri della portata di alimentazione e della distanza tra i cordoni stampati. Tutti i valori vengono riportati in Tabella 2.5.

Parameters	Value
Laser energy density	148,54 J/mm <sup>3</sup>
Powder feed rate	7 g/min
Hatch distance	0,2 mm

*Tabella 1.5 Parametri di stampa*

I provini in esame sono stati trattati termicamente, con l'obiettivo di eliminare tensioni residue e omogeneizzare la microstruttura. I trattamenti sono stati eseguiti in un intervallo di temperatura compreso tra 700 °C e 1050 °C, effettuati attraverso una serie di step termici successivi, come mostrato in Figura 2.5.

Le velocità di riscaldamento e raffreddamento sono rispettivamente pari a 10 °C/min e 5 °C/min. Raggiunta la temperatura, il trattamento ha una durata di 1 ora per le temperature di 700-1000 °C, e di 2 ore per la temperatura finale di 1050 °C. I campioni sono poi lasciati raffreddare all'interno del forno fino a temperatura ambiente.

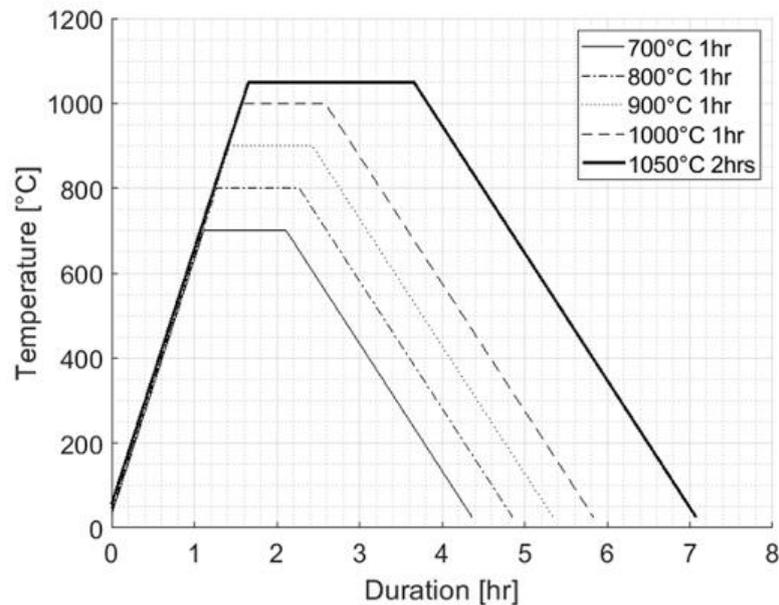


Figura 2.5 Trattamento termico

Vengono svolte successivamente prove di trazione per la caratterizzazione del materiale. In Figura 2.6 viene rappresentato il diagramma di sforzo-deformazione ottenuto, nel quale sono rappresentati altri test eseguiti su provini realizzati tramite altre tecnologie, ma che non vengono tenuti in considerazione per questo elaborato.

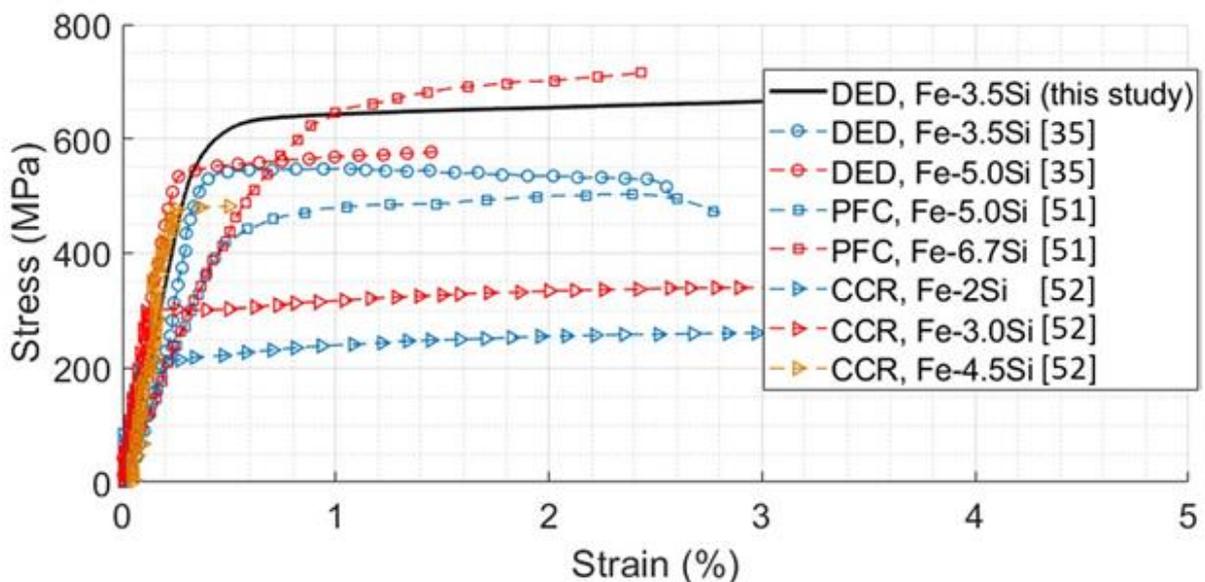


Figura 2.6 Curva tensioni-deformazioni

In Tabella 2.6 sono riassunti i valori di tensione di snervamento, che mostrano un valore per i provini realizzati tramite DED in FeSi3.5 pari a 625 MPa. Questo risultato è superiore a quello ottenuto per i campioni in FeSi2.9, il che è comprensibile a causa della percentuale maggiore di silicio al loro interno, confermando l'aumento della resistenza a trazione con l'incremento della percentuale in peso di silicio.

FeSi	Manufacturing method	Yield strength (0,2% offset)
This study (Si: 3,5 wt%)	DED	625 Mpa
Teh et al. [35] (Si: 3,5 wt%)	DED	543 Mpa
Teh et al. [35] (Si: 5,0 wt%)	DED	557 Mpa
Ferrando et al [51] (Si 5.0 wt%)	Planar flow casting	460 Mpa
Ferrando et al [51] (Si 6,7 wt%)	Planar flow casting	630 Mpa
Khan et al. [52] (Si: 2,0 wt%)	Casting & cold rolling	218 Mpa
Khan et al. [52] (Si: 3,0 wt%)	Casting & cold rolling	303 Mpa
khan et al. [52] (Si: 4,5 wt%)	Casting & cold rolling	478 Mpa

*Tabella 2.6 Risultati delle prove di trazione*

### 2.3.2 Studio dell'acciaio 316L

Per eseguire il confronto dei risultati ottenuti per l'acciaio 316L, viene ora analizzato l'articolo intitolato "Characterization of 316L stainless steel alloyed with 70S-6 mild steel via dual wire GTAW additive manufacturing" redatto da M. Rahmankhah, Kh. Gheisari, K. Ranjbar, S.M. Leri Baghal.

L'obiettivo di questa ricerca è la caratterizzazione delle proprietà meccaniche, microstrutturali e di resistenza alla corrosione di una lega ottenuta combinando acciaio inossidabile 316L e acciaio 70S-6 tramite tecnologia additiva a filo e arco elettrico (WAAM).

Lo studio prevede la realizzazione di tre tipologie di provini. Due di essi ottenuti mediante la deposizione separata dei materiali, producendo quindi un provino in 316L e uno in acciaio 70S-6. Il terzo provino verrà invece realizzato tramite la deposizione combinata dei due materiali.

In Figura 2.7 sono rappresentate le curve di sforzo-deformazione ingegneristiche. Tramite esse, è stato possibile ricavare i dati significativi per poter fornire una caratterizzazione dei materiali, ovvero carico di snervamento, carico di rottura e allungamento percentuale.

Nel grafico sono raffigurate tre curve, corrispondenti ai tre provini realizzati. Tra queste, l'unica ad essere considerata è la curva relativa all'acciaio 316L, per poter eseguire il confronto con i dati ottenuti con i provini analizzati in questo elaborato.

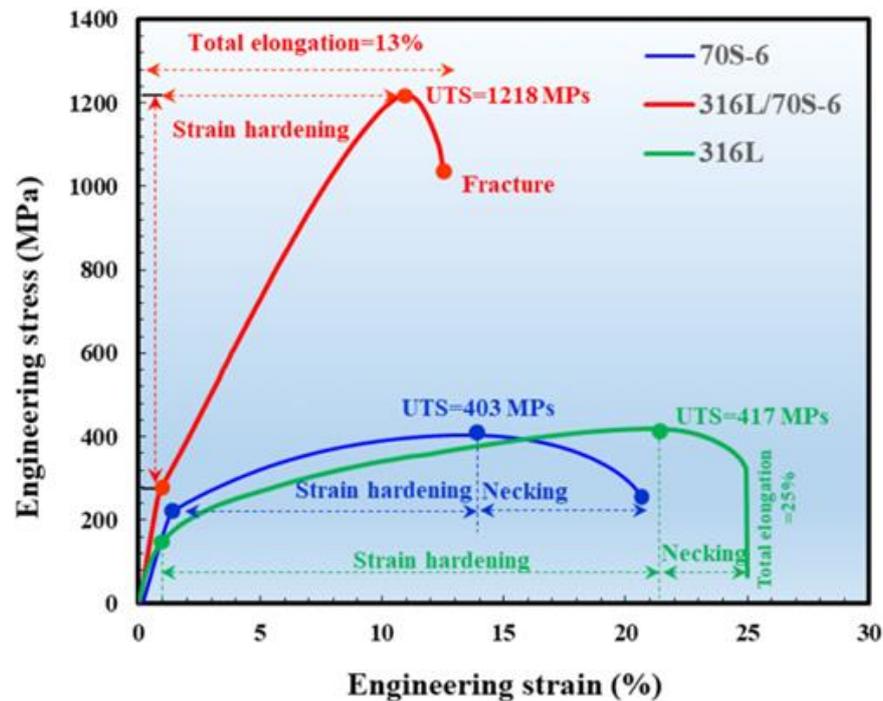


Figura 2.7 Curve tensione-deformazione

Nella Tabella 2.7 sono riassunti i valori fondamentali sopra nominati. I dati ottenuti dai provini realizzati con 316L nel presente studio, sono coerenti con quelli proposti dal caso analizzato.

Mechanical properties of the deposited alloys in the longitudinal direction (Y).

Specimen	Yield strength (Mpa)	Ultimate tensile strength (Mpa)	Elongation (%)
70S-6	$225 \pm 32,5$	$403 \pm 19,5$	$21 \pm 2,9$
70S-6 + 316L	$270 \pm 42,5$	$1218 \pm 24,5$	$13 \pm 1,8$
316L	$128 \pm 26,5$	$417 \pm 21,5$	$25 \pm 3,5$

Tabella 2.7 Risultati delle prove di trazione

Per ottenere un confronto diretto con la stampa DED dell'AISI 316L, si studia ora l'articolo intitolato "Laser Directed Energy Deposition of Bulk 316L Stainless Steel", redatto da Alessandro Ascari, Adrian H. A. Lutey, Erica Liverani e Alessandro Fortunato. L'obiettivo di questo studio è quello di caratterizzare l'acciaio 316L stampato tramite tecnologia additiva DED, svolgendo le analisi su molteplici campioni, realizzati variando le caratteristiche della stampa. La tecnica di scansione per la realizzazione delle stampe consiste nella deposizione iniziale del perimetro, seguita poi dal riempimento realizzato tutto nella stessa direzione, oppure con cordoni di stampa con direzioni che si alternano ad ogni passata. Alcuni parametri di stampa sono stati mantenuti costanti per tutte le

stampe, e vengono riportati in Tabella 2.8. All'interno compaiono la spaziatura tra i cordoni, la velocità di movimento rapido, la tipologia di gas di trasporto e protezione con le relative portate, il diametro del punto del laser, la distanza di stand-off e il diametro dell'iniettore di polvere.

Hatch spacing	1 mm
Rapid movement velocity	50 mm/s
Transport gas	Argon (7,5 L/min)
Shielding gas	Argon (20 L/min)
Laser spot diameter	2,3 mm
Stand-off distance	25 mm
Powder injector diameter	1 mm

*Tabella 2.8 Parametri costanti di processo*

I parametri che sono stati variati in base alla stampa vengono riportati in Tabella 2.9, e comprendono la portata di alimentazione, la velocità di scansione, l'altezza di ogni piano stampato, la potenza iniziale P, il delta P, ovvero di quanto viene calata la potenza ad ogni strato stampato, la potenza minima, la strategia di scansione del riempimento ed infine il numero di strati (n).

Test	m·	V	m· <sup>^</sup>	$\Delta z$	P	$\Delta P$	Pmin	Scan.	n
1A	9,1	17	8,9	1300	2300	75	1800	R	18
1B	9,1	17	8,9	1300	2300	75	1800	R	22
2A	9,1	17	8,9	1200	2000	75	1500	S	18
2B	9,1	17	8,9	1200	2000	75	1500	S	21
3A	11,9	17	11,7	1650	2500	75	2000	S	15
3B	11,9	17	11,7	1650	2500	75	2000	S	16
4A	14,6	17	14,3	2000	2700	75	2200	S	10
4B	14,6	17	14,3	2000	2700	75	2200	S	14
5A	9,1	27	5	800	2200	100	1500	S	25
5B	9,1	27	5,6	800	2200	100	1500	S	33
6A	11,9	27	7,3	1000	2500	100	1500	S	25
6B	11,9	27	7,3	1000	2500	100	1500	S	27
7A	14,6	27	9	1300	3000	100	1700	S	18
7B	14,6	27	9	1300	3000	100	1700	S	21

*Tabella 2.9 Parametri di stampa*

Le stampe sono state divise in orizzontali, dove hanno una base più ampia perciò la stampa si sviluppa orizzontalmente e poco verticalmente, e verticali, dove la base è minore, perciò la stampa si sviluppa verticalmente.

I campioni vengono estratti dai parallelepipedi stampati, e non vengono svolti trattamenti termici per il miglioramento delle proprietà. Si passa direttamente allo svolgimento delle analisi.

I risultati che vengono tenuti in considerazione in questo elaborato, sono solamente quelli inerenti alle prove di trazione, dalle quali sono ricavati i valori di tensioni di snervamento e rottura e l'allungamento a rottura. I dati sono riportati in un grafico in Figura 2.8.

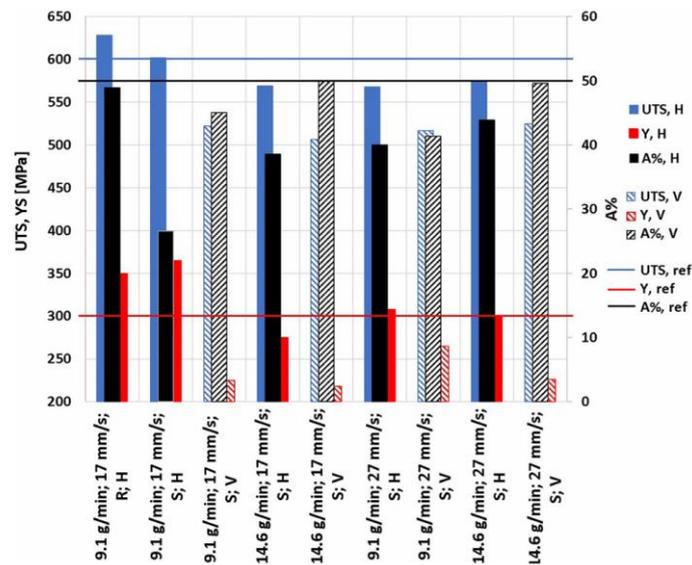


Figura 2.8 Risultati delle prove di trazioni

Vengono riportati i valori sia per i campioni estratti dalle stampe verticali, segnalati dalla lettera V, sia per i campioni estratti dalle stampe orizzontali, segnalati con la lettera H, ma non sono riportati i valori esatti delle tensioni e deformazioni, ma è possibile comunque fare un confronto con i risultati ottenuti dai provini di 316L analizzati per questo studio.

## 2.4 Confronto dei casi di studio

Tramite gli studi presenti in bibliografia che sono stati precedentemente esaminati, è possibile creare un paragone tra i dati ottenuti dalle prove di trazione dei campioni. In seguito verranno quindi confrontati i dati ottenuti per i provini di ferro-silicio esaminato per questo caso di studio, e a seguire i dati degli studi che hanno esaminato le stampe dello stesso acciaio.

Successivamente verrà applicata la stessa analisi sui campioni realizzati in AISI 316L.

Partendo quindi dalla lega di FeSi, in Tabella 2.10 vengono riportati nella prima riga i valori ottenuti dai campioni studiati per questo progetto, seguiti da due provini realizzati tramite fusione e laminazione a freddo, infine è presente un confronto con l'analisi di provi realizzati tramite tecnologia DED.

	Tecnica	UTS [MPa]	Y [MPa]	A%
FeSi <sub>2,9</sub>	DED	255-290	190-215	1,1 - 3,1
FeSi <sub>2</sub>	*	270	220	8,5
FeSi <sub>3</sub>	*	338	310	5,6
FeSi <sub>3,5</sub>	DED	~660	625	~3,5 - 4

*Tabella 2.10 Confronto dei casi di studio per l'acciaio ferro-silicio*

Ciò che si nota è la diminuzione dell'allungamento con l'aumentare della quantità di silicio presente, e al contempo un aumento dei valori delle tensioni. I provini di questo studio sono paragonabili ai risultati dei campioni in FeSi<sub>2</sub> realizzati da fusione e laminazione a freddo. Sono anche coerenti con i risultati dei provini realizzati tramite DED, anche se con tensioni differenti, ma questo è dovuto alla percentuale maggiore di silicio.

Passando al confronto dell'acciaio 316L, si riportano in Tabella 2.11 i valori delle prove eseguite per i vari casi di studio.

	Tecnica	UTS [MPa]	Y [MPa]	A%
AISI 316L	DED	470 - 555	190 - 230	14,8 - 18,4
AISI 316L	WAAM	417 ± 21,5	128 ± 26,5	25 ± 3,5
AISI 316L	DED_1	~583	~317	~41
AISI 316L	DED_2	~545	~233	~46,5

*Tabella 2.11 Confronto dei casi di studio per l'AISI 316L*

I risultati ottenuti dai provini analizzati in questo studio (nella prima riga) risultano paragonabili a quelli ottenuti dai campioni sempre realizzati tramite DED nello studio intitolato “Laser Directed Energy Deposition of Bulk 316L Stainless Steel”. I valori riportati per lo studio esaminato, sono stati estratti dalla Figura 2.8 e, sebbene presentano una certa approssimazione, rispecchiano con una buona accuratezza i valori reali. L'unico parametro che non è coerente è l'allungamento a rottura, che potrebbe essere influenzato da una prova di trazione non ottimale. Il valore più attendibile è quello riportato nell'ultimo studio, ovvero un allungamento a rottura pari a circa il 40%.

Le variazioni tra i diversi risultati, sono dovute anche ai diversi parametri di stampa ed eventualmente ai trattamenti termici che sono stati effettuati sui campioni.

## 2.5 Produzione dei campioni bi-materiale

I campioni che verranno analizzati sono stati estratti da una stampa bi-materiale realizzata tramite tecnologia DED, con la quale si sono realizzati strati alterni di FeSi<sub>2.9</sub> e AISI 316L. Il primo livello è composto di FeSi depositato su una base realizzata in 316L di spessore pari a 26 mm. Successivamente si sono alternati gli strati di 316L e FeSi.

I parametri di stampa vengono riportati in Tabella 2.12

	AISI 316L	FeSi <sub>2.9</sub>
g [rpm]	3	3
v [mm/s]	17	20
P <sub>i</sub> [W]	2200	2000
ΔP [W]	80	75
P <sub>min</sub> [W]	1600	1600
Δz	0,7	0,9

Tabella 2.12 Parametri di stampa

dove g [rpm] indica il numero di giri, v [mm/s] è la velocità di stampa, P<sub>i</sub> [W] indica la potenza iniziale del laser, che viene calata di un ΔP [W] ad ogni nuovo piano, fino a raggiungere la potenza finale P<sub>min</sub> [W], infine il Δz [mm] indica l'altezza di ogni strato stampato.

I provini sono stati ricavati dalla stampa bi-materiale tramite tecnologia W-EDM, seguendo le quote riportate in Figura 2.9. I bordi dei campioni sono stati successivamente rifiniti tramite macchine a controllo numerico (CNC).

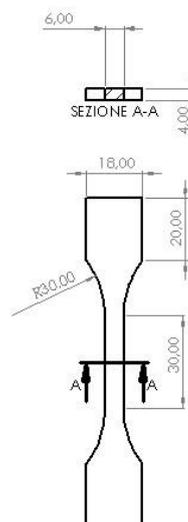


Figura 2.9 Quote dei provini

# 3

## Analisi e risultati

Nel capitolo seguente vengono analizzati e riportati i risultati delle prove di trazione che permetteranno di ricavare i valori principali per una caratterizzazione dei campioni in bi-materiale. Successivamente, verrà impiegata una tecnica non invasiva di misurazione delle deformazioni tramite un software, nota come Correlazione d'Immagine Digitale (DIC).

### 3.1 Prove di trazione

Per lo svolgimento delle prove di trazione, è stata utilizzata una macchina di prova idraulica (Italsigma, Forlì, Italia), eseguendo i test in conformità con la norma BS EN ISO 6892 e in condizioni di temperatura ambiente. Sulla macchina è stata montata una cella di carico da 20kN, scelta in base alle previsioni del valore massimo raggiungibile.



*Figura 3.1* Provino preparato per la prova di trazione

Prima del montaggio dei provini nei morsetti, è necessaria una parte di preparazione, per poter successivamente, tramite software, eseguire l'analisi DIC. Il programma di elaborazione delle foto, richiede un pattern sui provini, per garantire una tracciabilità delle immagini, ottenuto verniciando un'area definita della superficie tramite bombolette. Si parte da una pulizia accurata tramite alcool per evitare la presenza di sostanze che potrebbero poi far staccare la vernice durante la prova. Con l'aiuto di un calibro è stata individuata una sezione centrale del provino, che sarà quella che presenterà il pattern.

I coltelli dell'estensometro sono distanziati 25 mm l'uno dall'altro, e dovranno far presa sul materiale del provino, senza la presenza di vernice che possa ostacolare la lettura. L'area verniciata avrà quindi un'estensione di circa 20mm.

Dovrà essere presente un'altra regione caratterizzata dal modello a macchie per l'analisi delle immagini, di minor estensione, nel caso in cui ci dovesse essere slittamento dei provini tra gli afferraggi. Questa zona è stata posizionata nella parte superiore del provino, poco sotto le superfici di presa degli attacchi. Infine, è stata posizionata una superficie solidale alla traversa fissa, anch'essa verniciata, per compensare, durante l'analisi dati DIC, i moti rigidi presenti inevitabilmente durante le prove.

Una volta incartati i provini con nastro adesivo di carta, tracciando le superfici da verniciare, si procede alla creazione del motivo tramite bombolette. La base sarà realizzata con vernice bianca, distribuita in maniera uniforme e successivamente, tramite una bomboletta di vernice nera è stato creato il pattern casuale richiesto. L'aspetto del provino, terminata la preparazione, è mostrato in Figura 3.1.

Conclusa la preparazione dei campioni, viene montato il primo negli afferraggi. L'estensometro viene posizionato con i coltelli in presa sul provino tramite due elastici, mentre la fotocamera che realizzerà le immagini per la DIC, viene disposta ortogonalmente alla superficie verniciata.

Dall'analisi delle immagini scattate, si è notato successivamente che la zona destinata al controllo degli eventuali slittamenti non è stata inquadrata. Tuttavia, non si sono rilevati movimenti, perciò l'assenza dell'inquadratura non ha comportato alcun problema. È invece stato fondamentale il corretto centraggio del provino con affianco la piastrina solidale alla traversa fissa, per permettere un'analisi precisa delle immagini.

La macchina per le prove e la fotocamera sono collegate a un PC, che tramite due software appositi, vengono gestite. Nella macchina di prova viene impostata la velocità alla quale far muovere il pistone idraulico mentre alla fotocamera viene impostato il tempo di scatto.

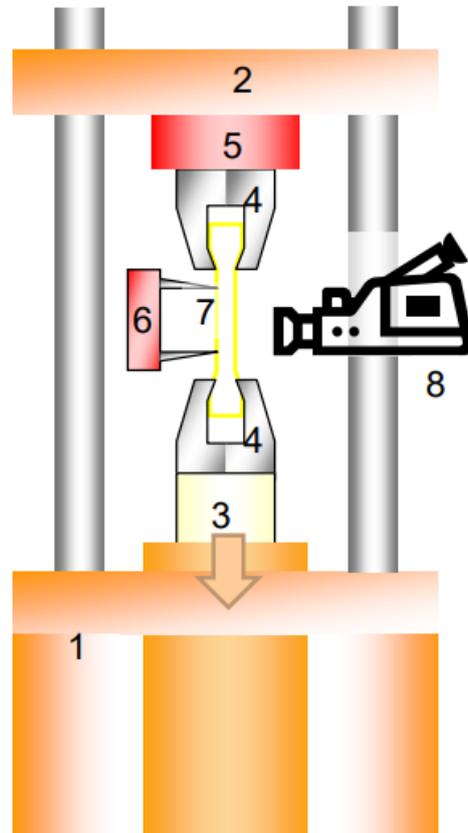


Figura 3.2 Configurazione della macchina

La configurazione completa è raffigurata in Figura 3.2, nella quale sono indicati i vari componenti. In ordine si distinguono: il basamento, la traversa fissa, il pistone idraulico, gli afferraggi, la cella di carico, l'estensometro, il provino e la fotocamera.

Verrà svolta una prova quasi statica, perciò la velocità del pistone è impostata a 1mm/min, mentre le foto vengono scattate consecutivamente con un intervallo tra una foto e la successiva pari a un delta tempo che viene impostato dal programma. Le foto non sono scattate basandosi su una variazione del carico, siccome verrebbero scattate foto solamente durante la fase elastica, essendo che nella fase plastica, non si avranno delle variazioni significative per eseguire abbastanza scatti.

## 3.2 Risultati delle prove di trazione

Durante le prove di trazione, tramite i sistemi di acquisizione, sono stati raccolti i valori necessari per la successiva rielaborazione, permettendo di ricavare i parametri fondamentali per la caratterizzazione meccanica. Come detto precedentemente, parallelamente alla prova di trazione, vengono scattate fotografie al campione mentre viene esaminato.

I dati raccolti vengono salvati in file di testo rielaborati successivamente al computer tramite software come MATLAB e ZEISS Quality Suite.

Con la prova di trazione viene elaborato il primo file, contenente quattro colonne che indicano rispettivamente il tempo [s], il carico espresso in kN, l'LVDT [mm], ovvero il valore ottenuto dal trasduttore di posizione lineare ed infine la deformazione misurata dall'estensometro [mm/mm].

In un primo momento, i dati contenuti nel file di testo, sono stati aperti tramite Excel, con il quale è stata eseguita la prima rielaborazione. Più precisamente sono stati modificati i valori del carico, trasformati in MPa, dell'LVDT e quelli dell'estensometro. I valori di quest'ultimo sono stati fondamentali per l'individuazione del tratto elastico del materiale, mentre in campo plastico sono stati implementati i valori dell'LVDT. Questo è dovuto al fatto che l'estensometro, superata una certa deformazione, satura, non permettendo di leggere correttamente tutta la deformazione che subirà il campione. L'utilizzo dei dati dell'LVDT nella fase plastica, non altera in maniera significativa i risultati, mentre se venissero usati anche nel regime elastico, verrebbero lette anche le deformazioni della struttura della macchina, andando ad alterare gli esiti della prova.

Al termine della fase di adattamento dei dati tramite Excel, i valori ottenuti sono lo stress [MPa] e l'allungamento percentuale [A%], che vengono ora analizzati da un codice sviluppato su MATLAB, per terminare il loro sviluppo. Il codice crea la curva tensione-deformazione, dalla quale vengono ricavati i valori di tensione di snervamento, rottura e l'allungamento a rottura.

I campioni studiati sono quattro, e vengono ora mostrati i risultati ottenuti dalle prove di trazione.

Partendo dal primo, il codice plotta il grafico che rappresenta la curva caratteristica, riportato in Figura 3.3.

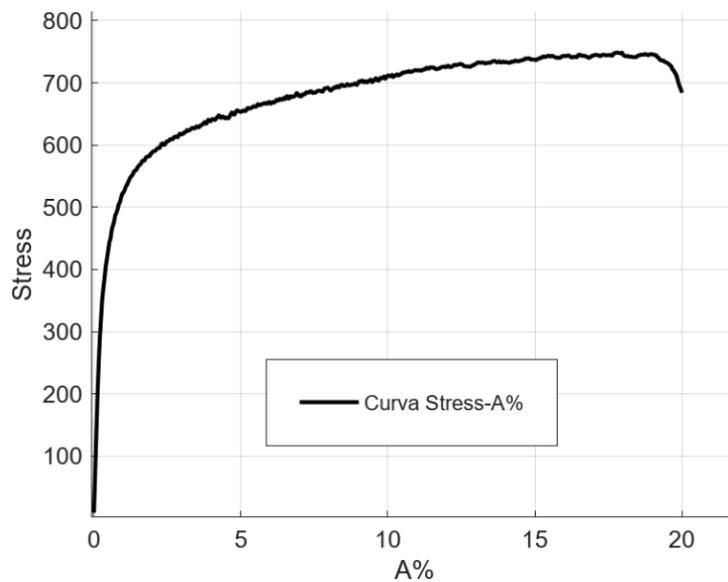


Figura 3.3 Curva tensione-deformazione del primo provino

La curva ottenuta rappresenta l'andamento dello stress in funzione della deformazione del materiale, ed è la base per la determinazione dei parametri che serviranno successivamente. All'interno del diagramma si distinguono principalmente due zone, dette "regimi", ovvero il regime elastico e il regime plastico.

Nella prima fase, ovvero nella zona elastica, il materiale si deforma in maniera proporzionale al carico che viene applicato. Se a un provino che si trova in questo regime, viene tolto il carico, esso ritornerà alle condizioni iniziali. La fine di questa regione è determinata dal carico di snervamento.

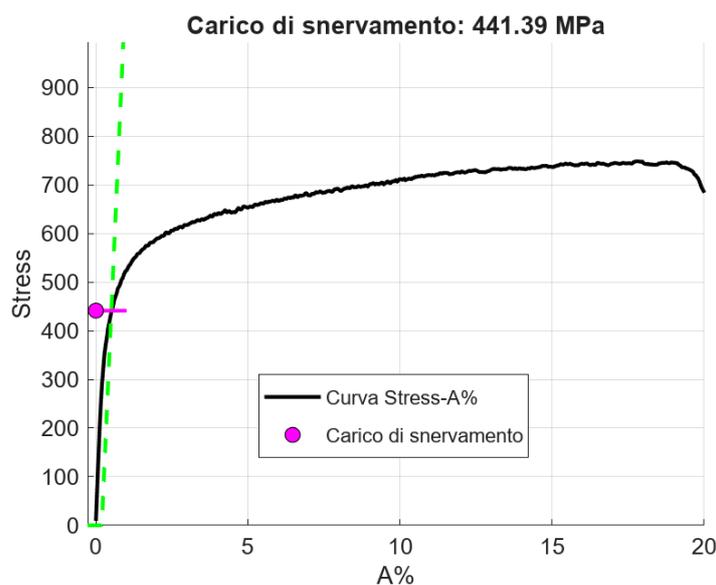


Figura 3.4 Carico di snervamento

Individuata la retta parallela al tratto elastico, in Figura 3.4 rappresentata da una retta verde tratteggiata, è ora possibile trovare il punto nel quale termina la fase elastica. Tale punto viene indicato come carico di snervamento, individuato sulla curva con l'intersezione della retta parallela al tratto elastico traslata di uno 0,2%. Per ottenere il valore, è stata tracciata una retta parallela (retta magenta) all'asse delle ascisse, passante per il punto di intersezione (Figura 3.4). Dall'analisi risulta una tensione pari a 441,39 MPa. Ciò significa che superato questo carico, il materiale inizierà a comportarsi plasticamente.

Il parametro successivo da individuare è il carico di rottura, definito come il massimo valore di tensione raggiunto durante la prova. Il codice MATLAB cerca in automatico il dato, e lo individua nel grafico tramite la retta blu tratteggiata rappresentata in Figura 3.5. L'intersezione della retta con l'asse delle ordinate, individua il carico di rottura, che risulta essere pari a 768,75 MPa.

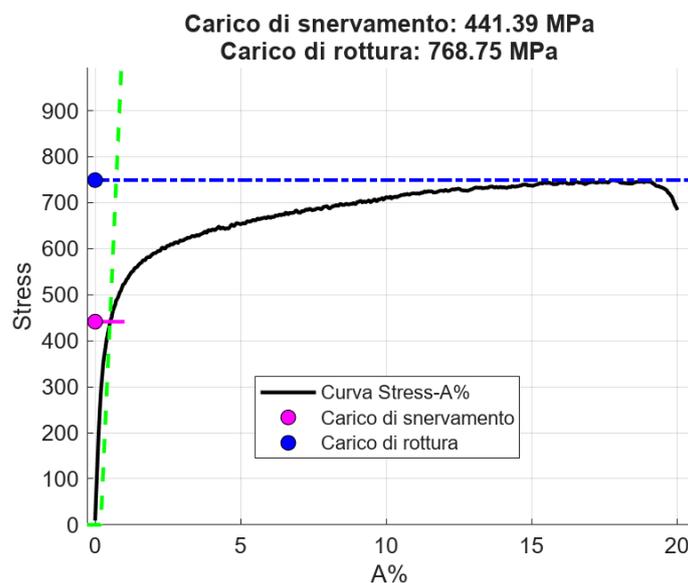
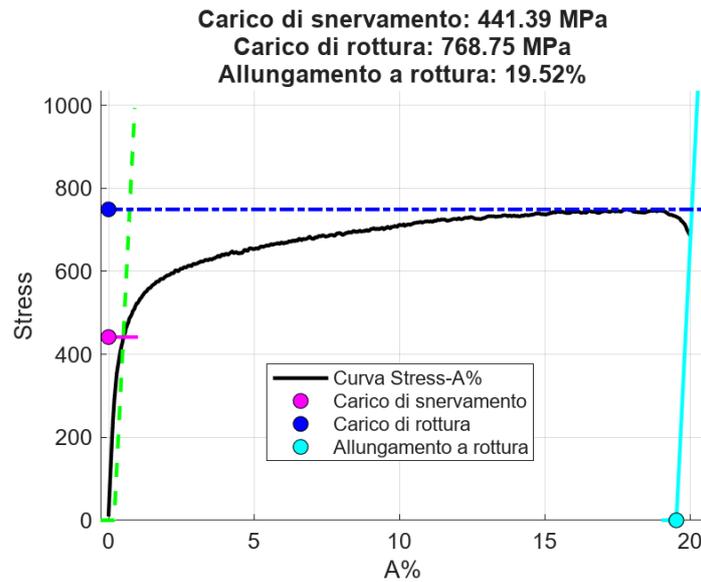


Figura 3.5 Carico di rottura

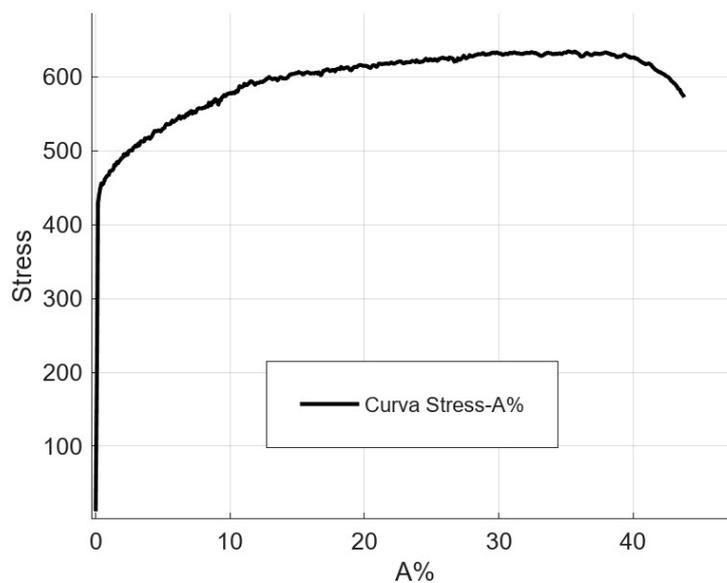
Infine, l'ultimo valore da ricavare è l'allungamento a rottura, ottenuto sempre tramite il codice. L'allungamento rappresenta il massimo valore di deformazione che si ottiene dal provino giunto a rottura. Si individua trasladando la retta parallela al tratto elastico (rappresentata dalla retta verde tratteggiata) fino all'ultimo punto della curva. La sua intersezione con l'asse delle ascisse indica il valore finale di allungamento, riportato in Figura 3.6 tramite il punto celeste.



Per il primo campione viene misurato un allungamento elevato, di molto superiore al 5%, valore comunemente preso come riferimento per distinguere i materiali fragili da quelli duttili.

Dal grafico si osserva un allungamento pari a 19,52%, che permette di classificare il materiale come duttile.

Terminata l'analisi del campione, si procede con il secondo, sempre sfruttando la metodologia utilizzata per il primo, partendo dall'analisi della curva, riportata in Figura 3.7.



Viene analizzato successivamente il carico di snervamento, plottando una retta sempre parallela al tratto elastico e traslata di uno 0,2%. Tramite la retta magenta, passante per l'intersezione tra la retta parallela traslata e la curva, si individua il carico, che è pari a 463,29 MPa (Figura 3.8).

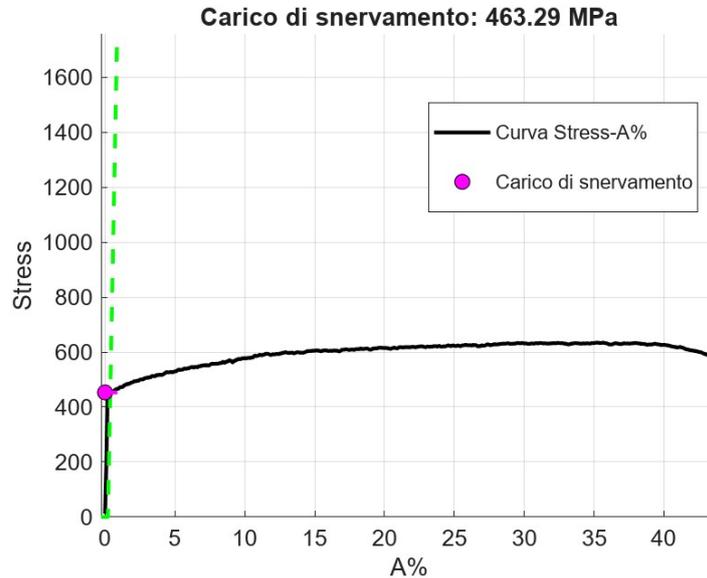


Figura 3.8 Carico di snervamento

Si passa all'analisi del carico di rottura, individuato dall'intersezione della retta tratteggiata blu passante per il punto di massimo carico che interseca l'asse delle ordinate, indicando tramite il punto blu il carico cercato, che risulta essere pari a 653,75 MPa (Figura 3.9).

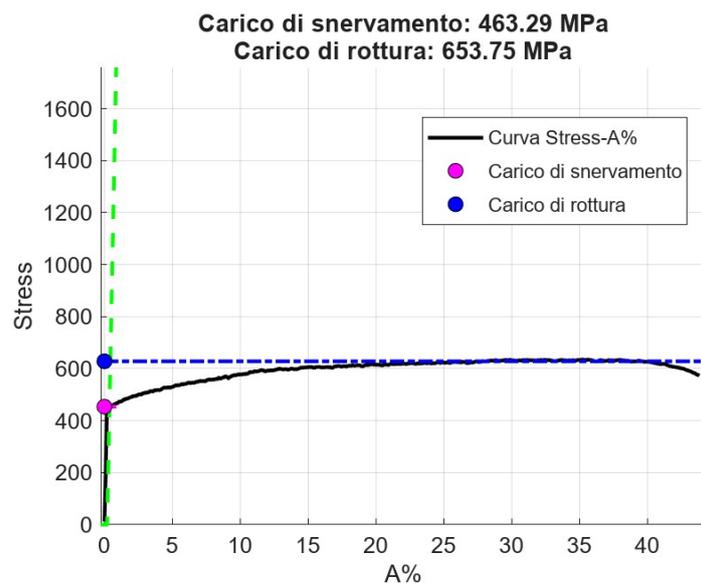


Figura 3.9 Carico di rottura

Infine, viene plottato il grafico nel quale si individua l'allungamento a rottura, indicato tramite il punto celeste, che mostra un allungamento finale del 43,52% (raffigurato in Figura 3.10).

Nei grafici che vengono generati per ultimi, vengono riportati tutti i valori cercati durante l'analisi.

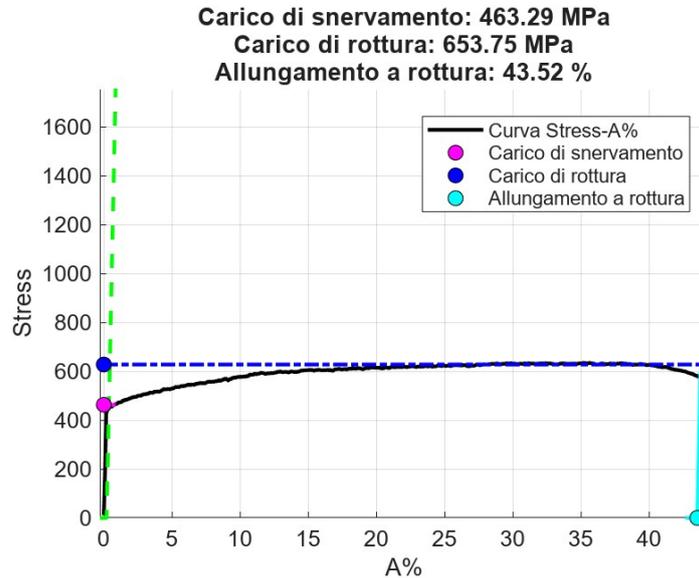


Figura 3.10 Allungamento a rottura

Si procede con il terzo provino, dove in Figura 3.11 viene riportato il grafico completo con tutti i dati dei carichi e dell'allungamento a rottura. I valori dei carichi di snervamento e rottura sono rispettivamente pari a 445,68 e 784,58, mentre l'allungamento risulta essere del 30,11%.

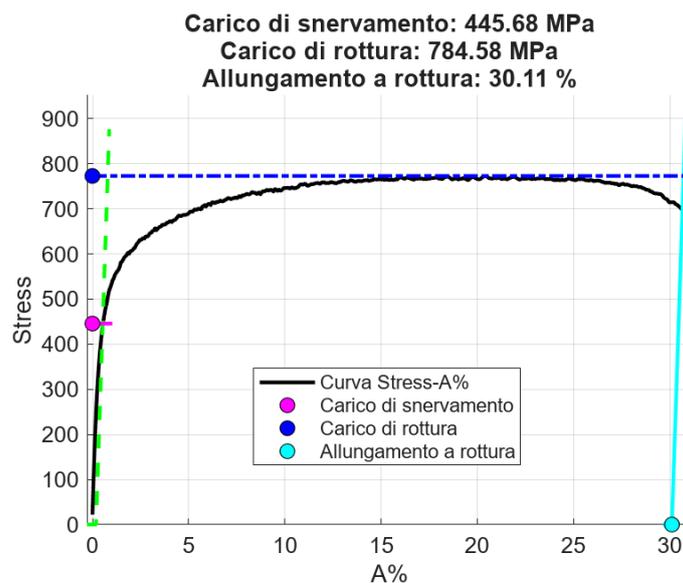
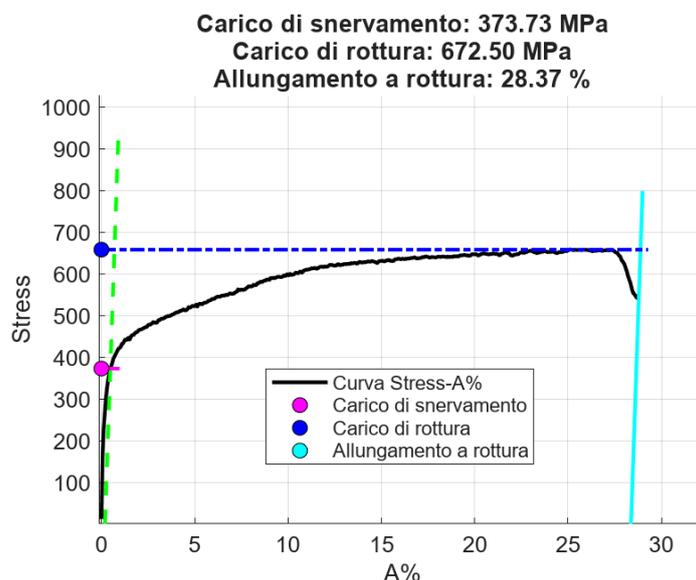


Figura 3.11 Grafico della curva tensione-deformazione del terzo provino con riportati i valori di carico di snervamento, rottura e allungamento a rottura

Infine è stato generato il grafico relativo all'ultimo campione esaminato, anch'esso riportato in un diagramma unico che contiene tutti i valori dei carichi e dell'allungamento (Figura 12). I valori dei carichi sono di 373,73 MPa per lo snervamento e 672,50 MPa per la rottura, infine l'allungamento è del 28,37%.



*Figura 3.12* Grafico della curva tensione-deformazione del quarto provino con riportati i valori di carico di snervamento, rottura e allungamento a rottura

I valori ricavati dalle curve vengono ora riportati in Tabella 3.1 per una comprensione più chiara e per poter eseguire successivamente un confronto tra essi.

	Tensione di snervamento [MPa]	Tensione di rottura [MPa]	Allungamento a rottura [%]
Provino 1	441,39	768,75	19,52
Provino 2	463,29	653,75	43,52
Provino 3	445,68	784,58	30,11
Provino 4	373,73	672,5	28,37
Media	431,0225	719,895	30,38

*Tabella 3.1* Confronto dei valori ottenuti dalle prove di trazione

### 3.3 Risultati dell'analisi DIC (Digital Image Correlation)

L'analisi DIC, ovvero la correlazione digitale di immagini, è un metodo che permette di valutare parametri meccanici come spostamenti e deformazioni, ma anche parametri cinematici, senza un contatto diretto con il componente. Il principio di funzionamento si basa sul confronto di una serie di immagini acquisite durante le prove, ad esempio durante una prova di trazione.

Precedentemente a quello che è il test, il campione necessita di una preparazione. Sarà infatti fondamentale la realizzazione di un pattern sulla superficie, che renda possibile il tracciamento dei movimenti da parte del software. Il pattern è realizzato a macchie tramite bombolette di vernice nera su sfondo bianco. L'obiettivo è quello di realizzare un motivo a macchie abbastanza grandi da permettere il tracciamento, e non interromperlo durante l'analisi, ma al contempo è necessario che le macchie siano sufficientemente piccole da ottenere una buona risoluzione.

Questa tecnologia è stata utilizzata in questa analisi per poter avere un confronto con i dati ottenuti dalle prove di trazione, tramite LVDT ed estensometro, e validarne i risultati.

Il vantaggio della DIC è che vengono escluse le deformazioni della macchina, analizzando solo la variazione del tratto utile preso in considerazione, permettendo quindi di ottenere risultati più accurati.

Per l'analisi DIC di questi campioni, è stato utilizzato un software di ZEISS, chiamato ZEISS Quality Suite, dove al suo interno sono presenti diverse applicazioni per permettere di svolgere differenti tipologie di analisi. Per valutare le deformazioni, è stato installato il pacchetto "correlate", che permette l'analisi della serie di foto realizzate durante la prova, generando una correlazione tra di loro.

Partendo dal primo campione, sono state importate le immagini scattate durante la prova dentro al programma. Il primo passaggio consiste nel definire la scala 2D, la quale viene determinata tenendo in considerazione la larghezza del tratto utile, pari a 6 mm.

Vengono successivamente definite due superfici (Figura 3.13), la ROI (Region of Interest) ovvero l'area in cui verranno effettuate le misurazioni, e la superficie denominata "Moti rigidi", utilizzata per creare l'allineamento per componente, consentendo così la compensazione dei moti rigidi presenti a causa delle deformazioni della macchina, garantendo una maggiore accuratezza dei risultati.

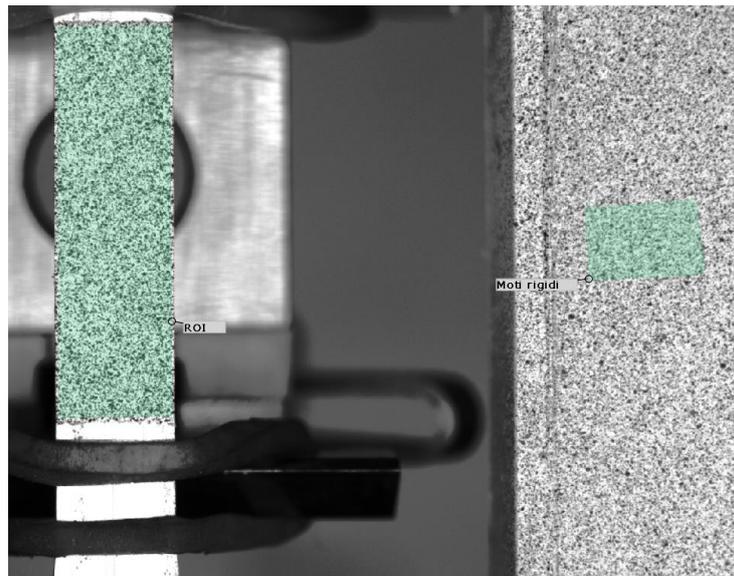


Figura 3.13 Creazione delle due superfici (ROI e Moti rigidi)

Successivamente si passa all'analisi delle deformazioni tramite la funzione estensimetro presente tra le opzioni del programma, che permetterà di valutare le variazioni della lunghezza lungo l'asse Y (Figura 3.14). L'estensimetro viene posizionato vicino ai punti di rottura del provino, per riuscire ad ottenere la misura più precisa possibile.

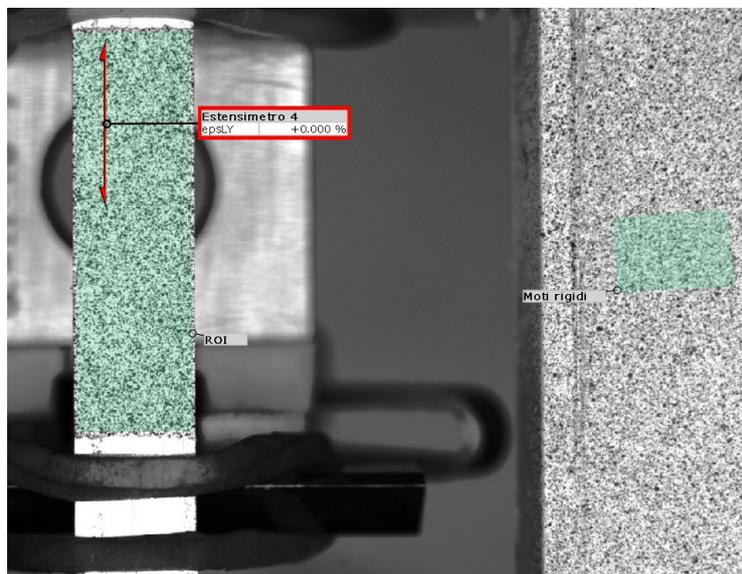


Figura 3.14 Aggiunta dell'estensimetro sulla ROI

Scorrendo la serie di immagini, il valore (epsLY) varia in funzione dell'allungamento che subisce il provino, come è illustrato in Figura 3.15, che rappresenta la deformazione l'istante prima della

rottura. Viene nel contempo generato un diagramma nel quale viene rappresentata la deformazione in funzione del tempo.

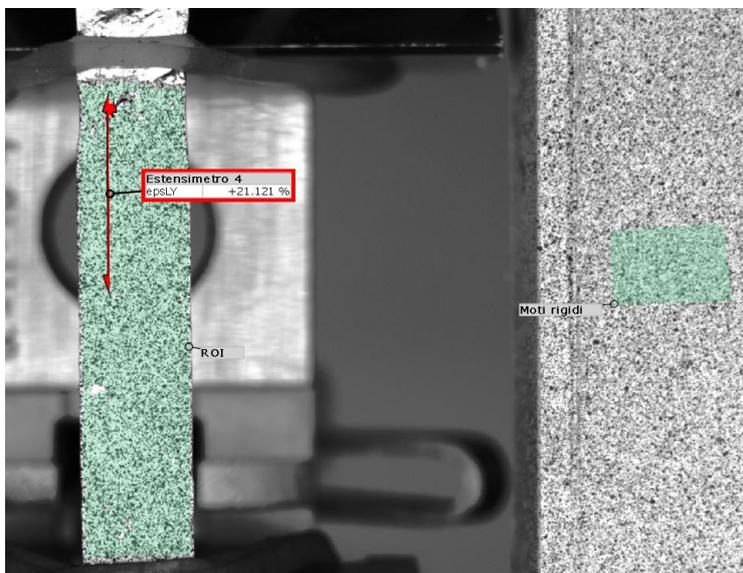


Figura 3.15 Variazione del valore dell'estensimetro

Il grafico ottenuto, riportato in Figura 3.16, viene estratto dal programma, per subire una manipolazione dei dati, per poi ottenere la curva tensione-deformazione tramite il codice MATLAB, che permetterà di eseguire un confronto tra i risultati della DIC con quelli delle prove di trazione.



Figura 3.16 Curva deformazione-tempo ricavata da DIC

Durante l'acquisizione delle foto, veniva generato simultaneamente un file di testo, nel quale, per ogni scatto, venivano registrati i valori di LVDT [mm], della cella di carico da 100 kN [N] ed infine i valori della cella di carico da 20 kN [N]. Il file contenente tutti i dati è stato importato in Excel, trasformati i valori di carico della cella da 100 kN in valori di stress [MPa], passaggio eseguito conoscendo il valore dell'area della sezione del provino, ed infine sono stati inseriti i valori di deformazione ottenuti tramite la DIC. Sono stati utilizzati i valori della cella da 100 kN e non quelli della cella da 20 kN per un problema tecnico che faceva saturare la lettura della cella.

Utilizzando lo stesso programma MATLAB che ha generato i grafici per le prove di trazione, sono stati disegnati i grafici di tensione-deformazione. In Figura 3.17 viene riportata la curva con i carichi di snervamento, rottura e l'allungamento a rottura.

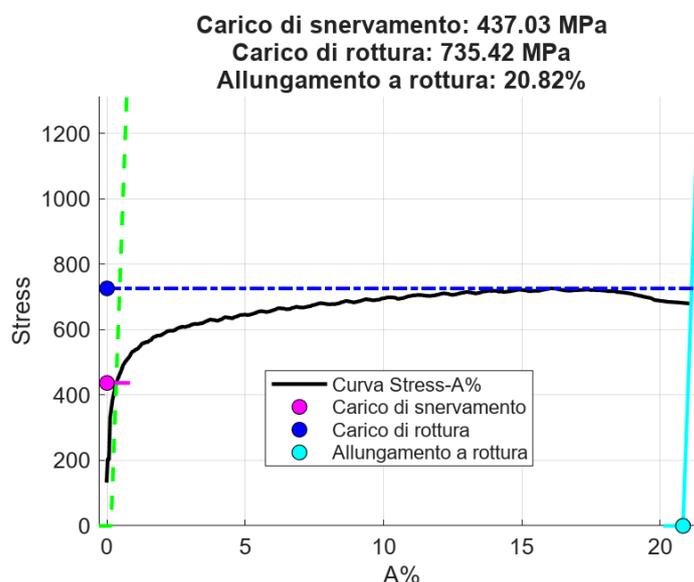


Figure 3.17 Curva tensione-deformazione ottenuta tramite DIC

Si nota un carico di snervamento pari a 437,03 MPa, carico di rottura di 735,42 MPa e un allungamento a rottura del 20,82%.

In Tabella 3.2 vengono riportati i valori ottenuti con le prove di trazione e quelli ottenuti tramite la DIC del primo campione, per fare un confronto preliminare.

	Trazione	DIC
Carico di snervamento [MPa]	441,39	437,03
Carico di rottura [MPa]	768,75	735,42
Allungamento a rottura [%]	19,52	20,82

Tabella 3.2 Confronto dei risultati tra prova di trazione e DIC per il primo campione

Per il secondo campione è stato svolto lo stesso procedimento eseguito sul primo, ottenendo quindi la curva rappresentata in Figura 3.18.

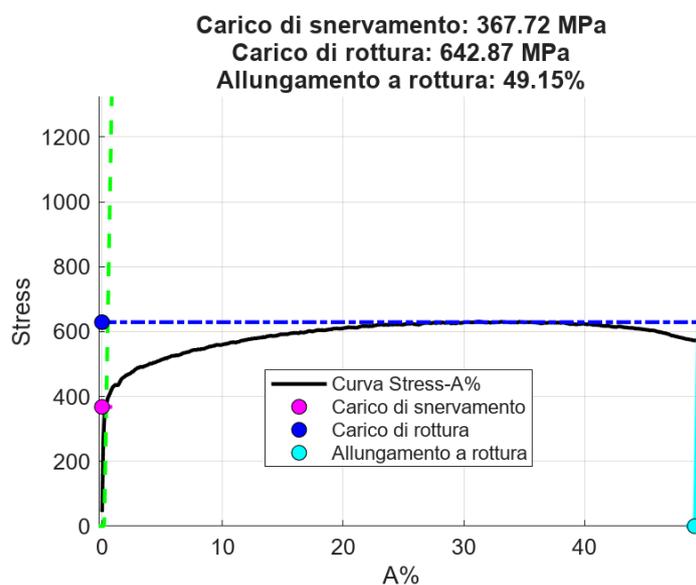


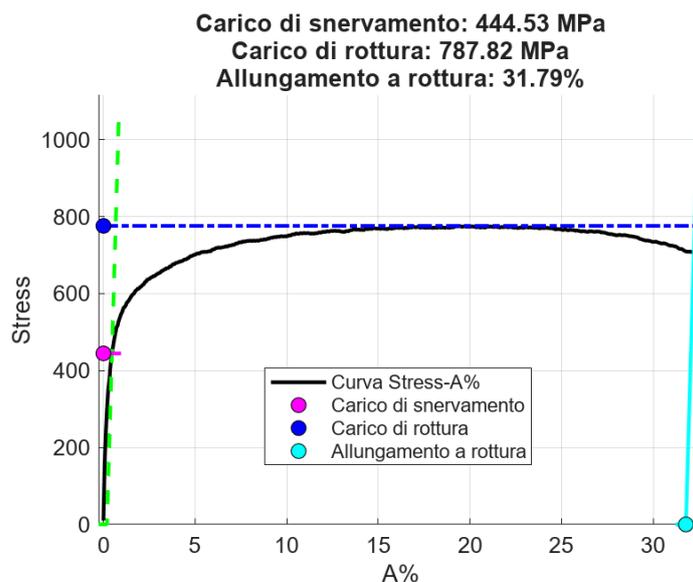
Figura 3.18 Curva tensione-deformazione ottenuta tramite DIC

I valori ottenuti dalla DIC mostrano un carico di snervamento pari a 367,72 MPa, per la rottura misura 642,87 MPa e un allungamento a rottura del 49,15%. In tabella 3.3 vengono riportati i dati relativi alla prova di trazione e della DIC del secondo campione.

	Trazione	DIC
Carico di snervamento [MPa]	463,29	367,72
Carico di rottura [MPa]	653,75	642,87
Allungamento a rottura [%]	43,52	49,15

Tabella 3.3 Confronto dei risultati tra prova di trazione e DIC per il secondo campione

Si analizza ora il terzo provino sempre tramite il codice che plotta il diagramma dal quale si ricavano i valori dei carichi e della deformazione (Figura 3.19).



*Figura 3.19* Curva tensione-deformazione ottenuta tramite DIC

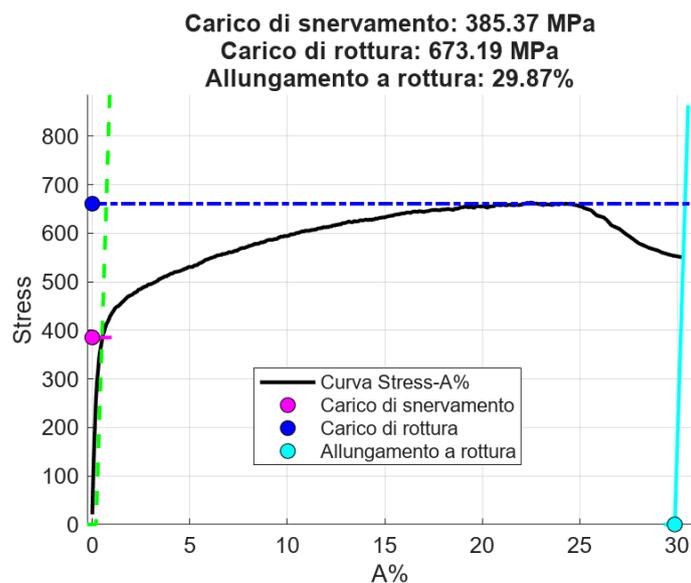
I carichi di snervamento e rottura risultano rispettivamente di 444,53 MPa e 787,82 MPa, mentre l'allungamento a rottura raggiunge il 31,79%.

In Tabella 3.4 viene fatto il confronto, come per i precedenti campioni, tra i risultati della prova di trazione e la DIC per il terzo provino.

	Trazione	DIC
Carico di snervamento [MPa]	445,68	444,53
Carico di rottura [MPa]	784,58	787,82
Allungamento a rottura [%]	30,11	31,79

*Tabella 3.4* Confronto dei risultati tra prova di trazione e DIC per il terzo campione

Infine si elaborano i dati relativi al quarto e ultimo campione, per il quale la curva ottenuta tramite DIC è riportata in Figura 3.20, e mostra carico di snervamento raggiunto a 385,37 MPa, il carico di rottura posto a 673,19 MPa ed infine l'allungamento a rottura risulta pari al 29,87%.



*Figura 3.20 Curva tensione-deformazione ottenuta tramite DIC*

Per ultima è riportata la tabella di confronto tra la prova di trazione eseguita per il quarto provino e i risultati della DIC (Tabella 3.5).

	Trazione	DIC
Carico di snervamento [MPa]	373,73	385,37
Carico di rottura [MPa]	672,5	63,19
Allungamento a rottura [%]	28,37	29,87

*Tabella 3.5 Confronto dei risultati tra prova di trazione e DIC per il quarto campione*

Come fatto per le prove di trazione, in Tabella 3.6 vengono raccolti i dati relativi ai quattro campioni ricavati dall'analisi DIC, e ne viene fatta la media.

	Tensione di snervamento [MPa]	Tensione di rottura [MPa]	Allungamento a rottura [%]
Provino 1	437,03	735,42	20,82
Provino 2	367,72	642,87	49,15
Provino 3	444,53	787,82	31,79
Provino 4	385,37	673,19	29,87
Media	408,6625	709,825	32,9075

*Tabella 3.6 Confronto dei valori ottenuti dall'analisi DIC*

### 3.4 Discussione e confronto dei risultati

In questo capitolo vengono analizzati e confrontati i dati ottenuti dalle prove di trazione con quelli ottenuti con la tecnologia DIC, con l'obiettivo di validare i risultati sperimentali ed analizzare al meglio le proprietà meccaniche dei provini. La possibilità di eseguire questo incrocio di dati permette di valutare se i risultati ottenuti tramite i test sono attendibili, oppure sono presenti delle discrepanze.

Analizzando i valori raccolti durante la prova di trazione emerge una variabilità dei dati misurati attorno alla media. La presenza di questo fenomeno è dovuta alla composizione non uniforme dei provini, precisamente a causa della poca omogeneità nella distribuzione dei due acciai: ferro-silicio e AISI 316L, a causa del fatto che i campioni sono ricavati da un parallelepipedo bi-materiale, e quindi risulta complicato la creazione di provini con percentuali dei due acciai controllate. Come già descritto nei capitoli precedenti, il FeSi è un materiale più fragile rispetto al 316L, il quale presenta un allungamento a rottura significativamente superiore, rendendolo un materiale duttile. Questa differenza nelle proprietà meccaniche si riflette sui risultati delle tensioni di snervamento, rottura e soprattutto negli allungamenti. Una percentuale di ferro-silicio superiore, renderà il provino più fragile e meno resistente a trazione, mentre una presenza maggiore di AISI lo renderà più duttile.

La conseguenza di una distribuzione non omogenea delle due leghe influisce sui risultati sperimentali, introducendo una variabile che non può essere controllata, perciò ne verrà tenuto conto durante l'analisi. Per una caratterizzazione più precisa sarà necessario svolgere studi ed analisi per conoscere le composizioni dei singoli provini. Tuttavia, nell'ambito di questo elaborato, si è scelto un approccio basato sulla media dei risultati ottenuti, integrando successivamente un'analisi via software per verificare la coerenza dei dati.

Analizzando i campioni, è stata rivolta attenzione particolare al secondo provino, che ha mostrato tramite i dati delle prove di trazione, un allungamento a rottura significativamente superiore rispetto agli altri. L'allungamento misurato tramite la pressa, risulta pari al 43,52%, valore che si discosta rispetto agli altri. In un primo momento, tale risultato è stato considerato errato, ipotizzando che possa esser stato alterato da un problema tecnico, ovvero la mancata apertura dell'estensometro. Successivamente, dopo l'analisi condotta con la DIC, si è riscontrato nuovamente un allungamento superiore al 40%, precisamente pari al 49,15%, rendendo quindi valida la misurazione fatta inizialmente. L'unica spiegazione che momentaneamente può spiegare questa differenza di comportamento, è la composizione del campione, nel quale probabilmente era predominante l'AISI

316L. Infatti, confrontando i risultati ottenuti tramite la prova sperimentale e i risultati ottenuti eseguendo prove di trazione su provini di acciaio inossidabile, gli allungamenti sono coerenti, confermando quindi la possibile presenza di una quantità maggiore di AISI.

Valutando gli altri risultati, i dati sono coerenti tra loro, con variazioni di entità ridotte che permettono di confermare la validità delle misure ottenute inizialmente. Le discrepanze osservate sono causate dalla modalità di acquisizione delle immagini. Infatti, ad ogni fotografia scattata, in un file di testo viene raccolto il valore di carico in quell'istante. Il problema sorge dal fatto che le foto non sono scattate in maniera continua, ma a intervalli di tempo discreti, comportando una possibile differenza tra i valori delle prove sperimentali e quelli dell'analisi DIC. Per migliorare la precisione occorrerebbe scattare un numero molto elevato di foto, rendendo però troppo pesante il file, e risulterebbe complicata la rielaborazione. È necessario trovare il giusto compromesso di foto che permetta di ottenere un file il più attendibile possibile, ma allo stesso tempo, limitare il numero di foto da elaborare successivamente.

Un esempio di questa differenza si osserva nel primo provino, relativamente alla tensione di rottura. Nell'analisi DIC il valore indicato risulta inferiore rispetto a quello ottenuto dalla prova di trazione, quando in realtà dovrebbero coincidere questi due valori. Tale differenza è dovuta al fatto della campionatura dei valori durante le acquisizioni delle immagini, ovvero, l'immagine con il massimo carico scattata prima della rottura riporta il valore di 735,42 MPa, mentre in realtà c'è stato un altro istante in cui il carico ha raggiunto il picco di 768,75 MPa, ma durante quel momento la fotocamera non ha acquisito nessuna immagine.

Anche i valori di snervamento presentano una differenza rispetto a quelli delle prove sperimentali. Questo fenomeno è dovuto alla determinazione del modulo elastico, ovvero a una differente pendenza del tratto elastico. Questa variazione è causata dal valore di allungamento determinato dall'estensimetro posizionato nella superficie ROI durante l'analisi DIC. Infatti, si è notata una variazione, seppur minima, dei valori rilevati dagli estensimetri, i quali sono stati posizionati in diverse posizioni. Questa variazione si ripercuote sulla pendenza del tratto elastico, variando quindi i valori delle tensioni di snervamento.

Per consentire un confronto dei risultati, in Tabella 3.7 sono riportati i valori delle analisi, affiancando ai dati ottenuti dalla prova di trazione, i corrispondenti valori ottenuti tramite la DIC.

	Tensione di snervamento [MPa]		Tensione di rottura [MPa]		Allungamento a rottura [%]	
	Trazione	DIC	Trazione	DIC	Trazione	DIC
Provino 1	441,39	437,03	768,75	735,42	19,52	20,82
Provino 2	463,29	367,72	653,75	642,87	43,52	49,15
Provino 3	445,68	444,53	784,58	787,82	30,11	31,79
Provino 4	373,73	385,37	672,5	673,19	28,37	29,87
Media	431,02	408,66	719,9	709,83	30,38	32,908

*Tabella 2.7 Tabella di confronto dei risultati delle prove di trazione e dell'analisi DIC*

# 4

## Conclusioni

L'obiettivo di questo elaborato era quello di analizzare quattro provini, realizzati tramite tecnologia additiva DED (Direct Energy Deposition), tramite prove di trazione, per eseguire successivamente una caratterizzazione meccanica. I provini sono stati prodotti tramite la combinazione di due acciai: FeSi<sub>2,9</sub> e AISI 316L. In seguito ai test fisici, è seguita un'analisi DIC (Digital Image Correlation) con la quale sono stati verificati i valori ottenuti precedentemente.

I risultati dei campioni sono tra loro coerenti, permettendo di realizzare una media dei dati, e ottenere un valore unico per le tensioni di snervamento, rottura e per l'allungamento a rottura.

A causa della variazione della composizione tra i diversi campioni, i valori delle tensioni e deformazioni presentano delle fluttuazioni attorno al valor medio. Ciò è dovuto alla diversa concentrazione di ferro-silicio e di 316L nei singoli provini, che in funzione della prevalenza di uno dei due, i valori finali risulteranno influenzati. La composizione dei campioni non è nota in questo elaborato, dato che saranno necessarie ulteriori analisi per completare in maniera efficace lo studio.

L'unico campione che ha attirato particolarmente l'attenzione è il secondo, distinguendosi per un allungamento maggiore rispetto agli altri tre. Questo fattore, è sicuramente causato da una presenza preponderante di 316L, che è risultato tramite altri studi, un materiale duttile, ed andrà ad influenzare le caratteristiche del campione.

Infine è stata svolta l'analisi DIC su tutti i provini, con la quale, tramite la funzione estensimetro presente all'interno del programma ZEISS Quality Suite, è stato possibile ricreare la curva tensione-deformazioni, basandosi sulle deformazioni rilevata dal programma. I valori ottenuti dai grafici realizzati tramite la DIC, sono in linea con quelli ottenuti dai grafici delle prove di trazione, determinando così una correlazione tra i valori delle prove fisiche, con i valori delle analisi digitali.



# Ringraziamenti

Eccoci qua alla fine di questo percorso che sembrava infinito.

Il mio più grande ringraziamento va ai miei genitori, che mi hanno sempre supportato e sopportato fin dal primo giorno, soprattutto nei momenti più duri, come a novembre del primo anno, che dissi “io sta sessione la faccio, ma poi a marzo mi ritiro dagli studi eh...”.

E invece mi hanno convinto a continuare, facendomi ragionare... hanno fatto bene, perché alla fin dei conti, le forze e le capacità per affrontare l'università le avevo.

Un grazie va a mia sorella, che mi ha sempre dato consigli, che io puntualmente ascoltavo e poi non applicavo, riducendomi così sempre con l'acqua alla gola... fino all'ultimo momento. E soprattutto grazie per avermi spronato nell'ultimo periodo, per riuscirmi a laureare entro la tua partenza. È stato un periodo duro, ma ce l'ho fatta.

Grazie alla nonna, che anche se non parliamo molto dell'università, so che ha sempre creduto in me, sostenendomi nei momenti giù, facendomi ridere con le nostre scenette.

Un grazie va alla mia Nora, che era come una sorella per me, mi capiva sempre al volo, restandomi vicino nei momenti difficili.

E un grazie anche a Tea, che mi strappa un sorriso distruggendo casa, o peggio, distruggendo me.

Un ringraziamento va alla mia relatrice Erica Liverani, che si è dimostrata disponibile fin dal primo momento, seguendomi con pazienza nel mio percorso. Mi ha permesso di svolgere una tesi anche se richiesta un po' tardi, facendomi crescere sia a livello di conoscenze, ma anche a livello personale, facendomi fare un passo in avanti, e per questo la ringrazio infinitamente.

Tengo a ringraziare Paolo Proli, per la disponibilità, professionalità e gentilezza mostrata in laboratorio.

Ringrazio tutti i miei amici, che mi hanno sempre strappato un sorriso, rendendo indimenticabili questi anni della mia vita. Non dimenticherò mai l'ultimo anno nelle prime file, con le nostre risate e scherzi. Un grazie immenso va a coloro che mi sono stati sempre vicino, aiutandomi e credendo in me.

E un piccolo ringraziamento a me, che durante i tre anni non mi sono impegnato sempre al 100%, lasciandomi un po' andare durante le lezioni, e dovermi poi spaccar la testa appena arrivava la sessione. Però sono comunque felice così, perché in questi anni ho fatto tante esperienze che mi hanno fatto crescere, conosciuto persone nuove, con alcune delle quali ho stretto grande amicizia, fatto viaggi indimenticabili e tanto altro. Però non vuol dire che ora alla magistrale dovrà essere uguale.

Questa parte finale, dove mentre la sto scrivendo mi stanno passando per la mente mille ricordi e pensieri in questa notte passata in bianco, è un messaggio per il me del futuro. Basterà questa frase per farmi tornare in mente tutti questi momenti passati, momenti felici ma anche tristi di questi tre anni, che mi permetteranno di dare sempre il massimo.

Francesco



# Bibliografia

- [1] Chiara Gianassi, Erica Liverani, Alessandro Ascari, Andrea Tonoli, Andrea Cavagnino, Alessandro Fortunato, « Characterization of FeSi<sub>2.9</sub> and SS 316l produced by directed energy deposition for bimetallic high-speed rotors »
- [2] Syed A.M. Tofail, Elias P. Koumoulos, Amit Bandyopadhyay, Susmita Bose, Lisa O'Donoghue, Costas Charitidis, « Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities »
- [3] Longfei Zhou , Jenna Miller, Jeremiah Vezza, Maksim Mayster, Muhammad Raffay, Quentin Justice, Zainab Al Tamimi, Gavyn Hansotte, Lavanya Devi Sunkara and Jessica Bernat, « Additive Manufacturing: A Comprehensive Review »
- [4] UNI EN ISO/ASTM 52900:2015
- [5] David Svetlizky, Mitun Das, Baolong Zheng, Alexandra L. Vyatskikh, Susmita Bose, Amit Bandyopadhyay, Julie M. Schoenung, Enrique J. Lavernia, Noam Eliaz, « Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications »
- [6] Israt Zarin Eraa, Mojtaba A. Farahania, Thorsten Wuesta, Zhichao Liu, « Machine Learning in Directed Energy Deposition (DED) Additive Manufacturing: A State-of-the-art Review »
- [7] Norma ASTM 3413-19e1
- [8] Dante Newman, Patrick Faue, Behzad Rankouhi, Frank E. Pfefferkorn, Dan J. Thoma, Eric Severson, « Solid High-Speed Synchronous Reluctance Rotor Enabled by Multi-Material Additive Manufacturing »
- [9] Aleksandra L. Vyatskikh, Xin Wang, James Haley, Baolong Zheng, Lorenzo Valdevit, Enrique J. Lavernia, Julie M. Schoenung, « Residual stress mitigation in directed energy deposition »
- [10] K. Sun, F. Li, C. Rong, and L. Zuo, "Direct energy deposition applied to soft magnetic material additive manufacturing", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 84 (2022) pp. 162-173 doi: 10.1016/j.jmapro.2022.10.004

- [11] M. Garibaldi, I. Ashcroft, M. Simonelli, and R. Hague, “Metallurgy of high-silicon steel parts produced using Selective Laser Melting,” *Acta Materialia*, vol. 110 (2016) pp. 207–216 doi: 10.1016/j.actamat.2016.03.037
- [12] A. Ascari, A. H. Lutey, E. Liverani, and A. Fortunato, “Laser Directed Energy Deposition of Bulk 316L Stainless Steel,” *Lasers Manuf. Mater. Process.*, vol. 7, no. 4 (2020) pp. 426–448 doi: 10.1007/s40516-020-00128-w
- [13] Sabrina A. Khan, Pornthep Chivavibul, Petr Sedlak, Satoshi Arai, and Manabu Enoki, « Analysis of Acoustic Emission Signals during Tensile Deformation of Fe-Si Steels with Various Silicon Contents »
- [14] Jeongwoo Lee, Akanksha Parmar, Yung C. Shin, and Leyi Zhu, « Enhanced magnetic properties and Goss texture development of FeSi<sub>3.5</sub> by direct energy deposition »
- [15] Donati L., 2023, Prove di Caratterizzazione dei Materiali [diapositiva 14]. Università di Bologna, corso di Tecnologia Meccanica A
- [16] Norma BS EN ISO 6892
- [17] M. Garibaldi, I. Ashcroft, J. N. Lemke, M. Simonelli e R. Hague, « Effect of annealing on the microstructure and magnetic properties of soft magnetic Fe-Si produced via laser additive manufacturing »
- [18] Q. Xiao, J. Chen, H. B. Lee, C. Jang, and K. Jang, « Effect of heat treatment on corrosion behaviour of additively manufactured 316L stainless steel in high-temperature water »
- [19] M. Rahmankhah, Kh. Gheisari, K. Ranjbar, S.M. Leri Baghal, « Characterization of 316L stainless steel alloyed with 70S-6 mild steel via dual wire GTAW additive manufacturing »