



**Politecnico
di Torino**

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Algoritmi Machine Learning per la
stima delle proprietà meccaniche di
componenti prodotti in Additive
Manufacturing**

**Relatori:
Davide Salvatore Paolino
Andrea Tridello
Alberto Ciampaglia
Carlo Boursier Niutta**

**Candidato:
Salvatore Tondi**

Anno Accademico 2024/2025

Sommario

Lo scopo dell'attività di tesi è quello di allenare algoritmi di Machine Learning, al fine di stimare le proprietà meccaniche di componenti prodotti tramite additive manufacturing. In particolare, il processo produttivo considerato per l'attività è il processo FFF, che sta per Fused Filament Fabrication, ovvero Fabbricazione per Filamento Fuso.

Le proprietà meccaniche di un componente prodotto con tale processo sono molto sensibili ai parametri di stampa. In base alla scelta dei parametri, come ad esempio temperatura di stampa, velocità di stampa, velocità delle ventole di raffreddamento ed altri, le proprietà meccaniche variano sensibilmente, nasce quindi l'esigenza di prevedere tali proprietà al variare dei valori scelti per i parametri di processo.

Queste previsioni risultano essere molto onerose in termini di tempo se si ricorre a delle simulazioni FEM; da qui l'esigenza e l'idea di utilizzare tecniche di Machine Learning.

Lo studio prevede una prima parte sperimentale, nella quale si analizza il processo di stampa e si cerca un modo per collegare i parametri di processo alla struttura risultante del componente.

Successivamente si procede numericamente ricreando la geometria interna all'interno di un ambiente CAE. Oltre alla geometria della struttura interna, si analizza la perdita di rigidità del materiale dovuta alla presenza di porosità, che condiziona il modulo elastico risultante del componente stampato.

Dopo aver ricreato la geometria sulla base dei parametri di processo, si procede a effettuare delle simulazioni di una prova di trazione al FEM. Queste simulazioni vengono confrontate poi con delle prove di trazione su provini reali al fine di verificare la validità della modellazione nel CAE.

Sulla base di questa validazione si impostano diverse simulazioni FEM, al fine di creare un database contenente le proprietà meccaniche di diverse configurazioni di stampa.

Su questo database si allena una rete che dovrà essere in grado di prevedere le caratteristiche meccaniche del componente ricevendo in input i parametri di processo.

Indice

1	Introduzione	3
1.1	Tecnologia FFF, caratteristiche del processo e della struttura interna dei componenti prodotti	3
1.1.1	Processo di slicing	4
1.1.2	Processo di stampa	4
1.1.3	Struttura interna del componente	5
1.2	Tecnologia micro-CT, una breve descrizione	6
1.2.1	La macchina e il processo	6
1.2.2	Output scansione e analisi risultati	8
1.3	Algoritmi Machine Learning	8
1.3.1	Perchè Machine Learning	8
1.3.2	Tipi di modelli ML	9
1.4	Motivazione, obiettivo e organizzazione dell'attività	9
1.4.1	Strumentazione e programmi utilizzati	11
2	Studio della struttura interna del componente	12
2.1	Geometria di stampa ideale e reale	13
2.2	Influenza dei parametri di stampa sulla larghezza della bead	15
2.2.1	Scelta dei parametri di studio	16
2.2.2	Influenza della temperatura di stampa	16
2.2.3	Influenza della velocità delle ventole di raffreddamento	17
2.2.4	Influenza del rapporto u/v	19
2.3	Criticità dell'approccio e riorganizzazione dello studio	23
2.3.1	Riorganizzazione dello studio	23
2.4	Risultati del piano fattoriale	25
2.5	Studio dei difetti irregolari	27
2.5.1	Analisi delle porosità	27
2.5.2	Risultati analisi porosità	30
3	Modello numerico per la previsione delle proprietà meccaniche al variare della strategia di stampa	32
3.1	Geometria reale con difetti di stampa	32
3.2	Materiale polimerico rinforzato con fibre corte	36
3.3	Modellazione della porosità	38
3.3.1	RVE per modellare l'effetto della porosità	39
3.3.2	Simulazioni dell'RVE e risultati	42
3.4	Prova di trazione di un campione stampato: modellazione numerica e validazione sperimentale	45

3.4.1	Provini stampati e prove di trazione	45
3.4.2	Modello numerico della geometria di stampa	47
3.4.3	Risultati numerici e confronto sperimentale	50
3.4.4	Considerazioni sulla larghezza dei wall laterali	56
4	Algoritmi ML per la previsione delle proprietà meccaniche	60
4.1	Introduzione al Machine Learning ed ai metodi utilizzati	60
4.1.1	Regressione lineare	60
4.1.2	Perdita	61
4.1.3	Discesa del gradiente	62
4.1.4	Iperparametri	62
4.1.5	Reti Neurali	63
4.1.6	K-Fold cross validation	65
4.2	Preparazione dei database per allenare il modello	66
4.2.1	Piano sperimentale per le simulazioni	66
4.2.2	Estrazione dei valori d'interesse	67
4.2.3	Creazione del database	67
4.3	Preparazione e analisi dei dati di input	68
4.4	Sviluppo e addestramento del modello	72
4.5	Implementazione del metodo e parametri di input	72
4.6	Validazione del modello	75
5	Conclusioni e sviluppi futuri	80
5.1	Sviluppi futuri	81

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Tecnologia FFF, caratteristiche del processo e della struttura interna dei componenti prodotti

La tecnologia del Fused Filament Fabrication è uno dei processi di fabbricazione additiva più utilizzati; in particolare trova largo impiego nella produzione di componenti in materiale polimerico.

In primo luogo, la sua vasta applicazione è dovuta all'ampia libertà concessa in fase di progettazione, intesa come la possibilità per il progettista di non scendere a compromessi sulla geometria da utilizzare per il componente, a differenza di quanto avviene con la produzione tradizionale (per asportazione di materiale) che limita fortemente la creatività e l'impiego di determinate soluzioni, che siano esse funzionali o estetiche.

In secondo luogo, la sua larga diffusione anche in ambiti non industriali, come quelli puramente amatoriali, è dovuta alla sua semplicità e praticità d'impiego.

Il punto di partenza per la produzione di un componente è il file CAD dello stesso, questo viene importato in formato STL in uno slicer, cioè un programma con lo scopo di produrre un file GCODE, contenente tutte le istruzioni necessarie alla stampante per produrre l'oggetto. Una volta importato il file STL nello slicer, è necessario impostare i vari parametri di stampa, fatto ciò, si genera il GCODE e si avvia il processo di stampa. Uno schema con gli step del processo è riportato in Figura 1.1

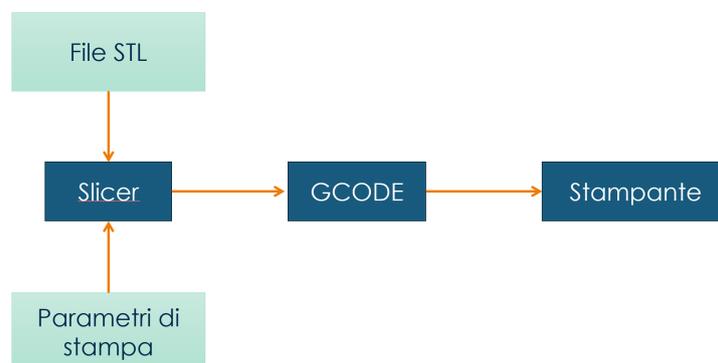


Figura 1.1: Step del processo

1.1.1 Processo di slicing

Lo slicer è il software che permette di impostare, in base alle proprie esigenze, tutti i parametri di stampa, oltre a disporre l'oggetto sul piatto di stampa e valutare la creazione e il posizionamento di eventuali supporti.

Tra i vari parametri quelli che influenzano maggiormente la qualità del componente stampato sono:

- Altezza del layer di stampa
- Larghezza della linea di stampa
- Densità di riempimento
- Configurazione di riempimento
- Velocità di stampa
- Temperatura di estrusione
- Temperatura del piatto di stampa
- Velocità delle ventole di raffreddamento

La variazione di questi parametri condiziona direttamente la qualità dell'oggetto stampato. Più avanti nella discussione verranno opportunamente approfonditi.

1.1.2 Processo di stampa

Una volta generato il GCODE, ha inizio il processo di stampa vero e proprio. La stampante legge il GCODE e inizia ad eseguire le istruzioni presenti al suo interno. Procedo quindi a riscaldare l'estrusore e il piatto di stampa e, una volta raggiunti i valori di temperatura target, inizia a depositare il materiale comandando opportunamente gli assi.

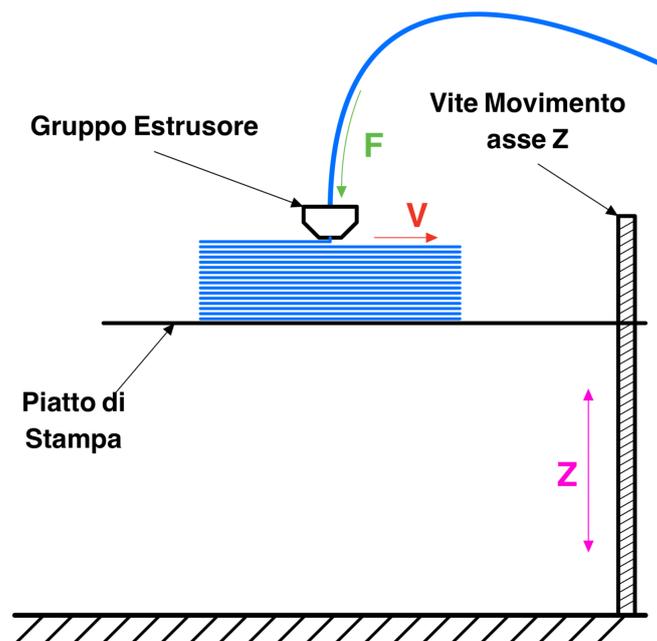


Figura 1.2: Schema processo di stampa

Il materiale viene depositato progressivamente sul piatto di lavoro. Completato uno strato, la vite viene azionata per muovere l'asse Z (convenzionalmente asse verticale della macchina), che si sposta della quantità impostata, permettendo all'estrusore di ricominciare a depositare materiale; il componente cresce quindi lungo l'asse Z. In Figura 1.2 è rappresentato uno schema per visualizzare il processo. Nell'immagine la lettera F in verde rappresenta l'avanzamento del filamento che alimenta il gruppo estrusore, la lettera V in rosso indica la velocità di stampa, ovvero la velocità con cui il gruppo estrusore si muove mentre deposita il materiale e la lettera Z indica la direzione di crescita del pezzo.

1.1.3 Struttura interna del componente

Una volta prodotto, il componente presenta una struttura interna influenzata dai parametri di stampa scelti; in particolare si evidenzia una forte presenza di vuoti.

Si consideri, ad esempio, la produzione di un componente impostando nello slicer un valore di riempimento pari al 100%. Nonostante ciò se si va a investigare l'interno del componente, risulta subito evidente che la struttura interna è ben diversa da quella che ci si aspetterebbe da un componente con un riempimento del 100%, ossia totalmente pieno. Infatti questo sarà caratterizzato da una forte presenza di vuoti, come mostrato in Figura 1.3

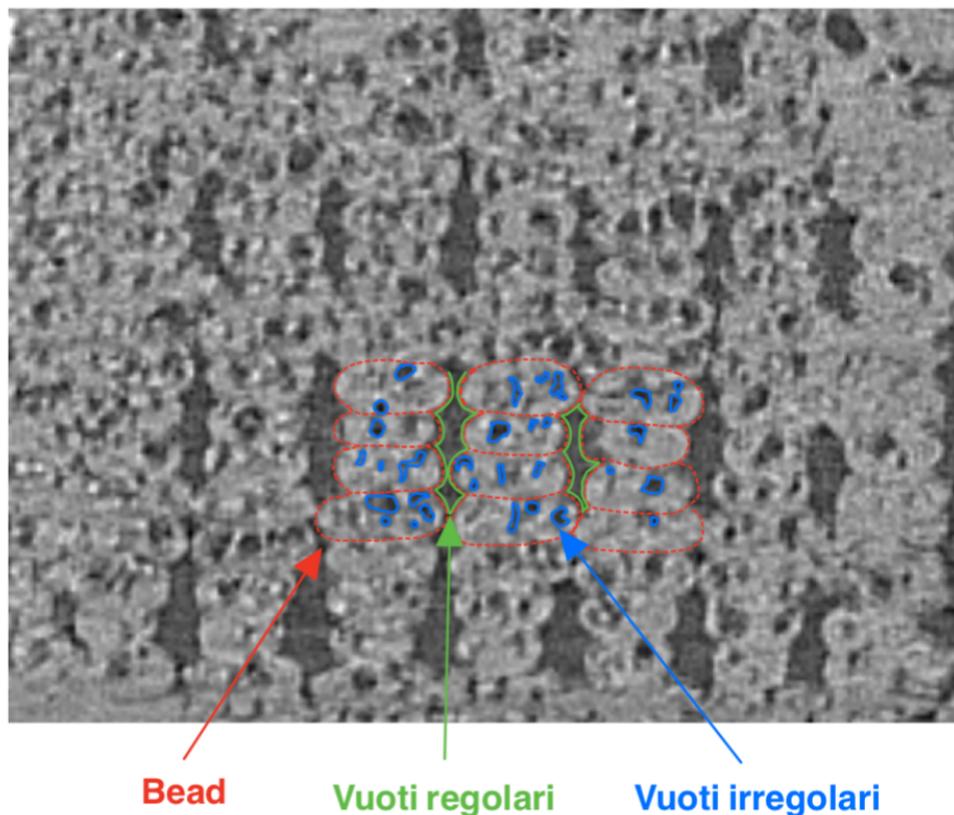


Figura 1.3: Esempio scansione micro-CT della struttura interna; vista trasversale alla direzione di stampa, immagine ottenuta durante lo svolgimento dell'attività

In particolare nella struttura interna del componente si possono distinguere tre elementi che la caratterizzano:

- **Bead:** sono le zone più chiare evidenziate in rosso, ovvero i vari segmenti di materiale depositato durante il processo di stampa. Queste, viste in sezione trasversale alla direzione di stampa, si presentano come ellissi appiattiti nella parte superiore e inferiore.
- **Difetti Regolari:** man mano che il processo di stampa avanza, le varie bead vengono deposte una a fianco all'altra, strato su strato. Questo porta alla formazione di zone prive di materiale adiacenti ai profili delle bead, le zone più scure evidenziate in verde. Si ha quindi un pattern di difetti che chiameremo "regolari", in quanto seguono una disposizione ordinata, determinata dai parametri di stampa scelti.
- **Difetti Irregolari:** sono quelli evidenziati in blu. Li identificheremo così sia per distinguerli dai difetti regolari, sia per evidenziare che non seguono una disposizione ben definita, ma sono distribuiti casualmente nel componente.

Questa morfologia della struttura interna influenza fortemente le proprietà meccaniche del componente finale. Per di più, essendo questa struttura fortemente dipendente dai parametri di stampa, le caratteristiche meccaniche sono anch'esse dipendenti dai parametri.

1.2 Tecnologia micro-CT, una breve descrizione

La microtomografia computerizzata (micro-CT) è una tecnologia utilizzata in vari campi. Nell'ambito della meccanica dei materiali permette di ispezionarne la struttura interna senza danneggiare il componente, può essere quindi considerata un controllo non distruttivo.

In questo contesto è lo strumento ideale per analizzare la struttura interna del componente stampato, al fine di effettuare le opportune valutazioni.

1.2.1 La macchina e il processo

Cuore della tomografia è il tomografo, uno schema di funzionamento della macchina è riportato in Figura 1.4.

Questo è composto da un emettitore di raggi X, i raggi vengono emessi tramite un filamento di tungsteno che viene attraversato da una corrente ad altissimo voltaggio, in particolare la macchina utilizzata ha una potenza massima di 50 Watt.

I raggi emessi si distribuiscono nello spazio formando un cono. L'oggetto da scansionare viene investito da questo fascio di raggi X che lo attraversano. La tecnologia si basa sul diverso assorbimento dei raggi da parte delle varie zone di materiale, in base alla loro densità. Le zone con densità maggiore assorbono maggiormente i raggi rispetto a quelle con densità più bassa. In questo modo si crea un'impronta del materiale sul pannello rilevatore, posto dietro l'oggetto, che è sensibile all'intensità del raggio che lo colpisce. Questa impronta non è altro che una fotografia dell'interno del materiale, il pannello restituisce quindi un'immagine 2D dell'interno del componente.

Il piatto rotante viene attivato durante tutto il processo. Vengono quindi rilevate e memorizzate una serie di immagini del componente interno, ogni immagine rappresenta la struttura interna da una certa angolazione.

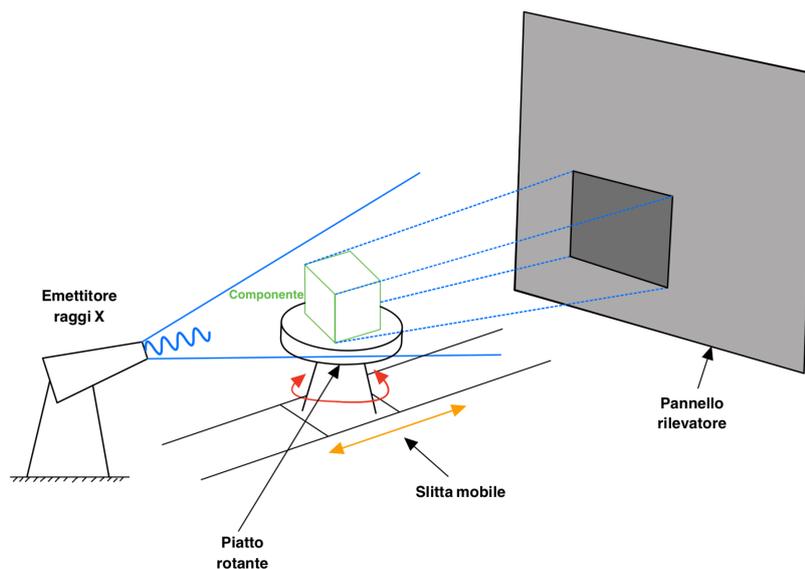


Figura 1.4: Schema funzionamento tomografo (immagine non in scala)

La slitta su cui è posizionato il piatto rotante serve a gestire correttamente la distanza tra l'emettitore, l'oggetto scansionato e il rivelatore. In primo luogo per assicurarsi che l'oggetto cada correttamente nel cono di raggi generato, in secondo luogo la slitta è utile anche per andare a catturare le immagini ad una risoluzione più o meno alta in base alle esigenze del caso. Una distanza minore dall'emettitore permette di catturare immagini a una risoluzione maggiore, ma può introdurre del rumore nella scansione dovuto alle vibrazioni della macchina durante il suo funzionamento, che per quanto ridotte vanno comunque a condizionare il risultato finale. Una distanza maggiore dall'emettitore, invece, permette di ridurre notevolmente il rumore della scansione a costo di una minore risoluzione.

1.2.2 Output scansione e analisi risultati

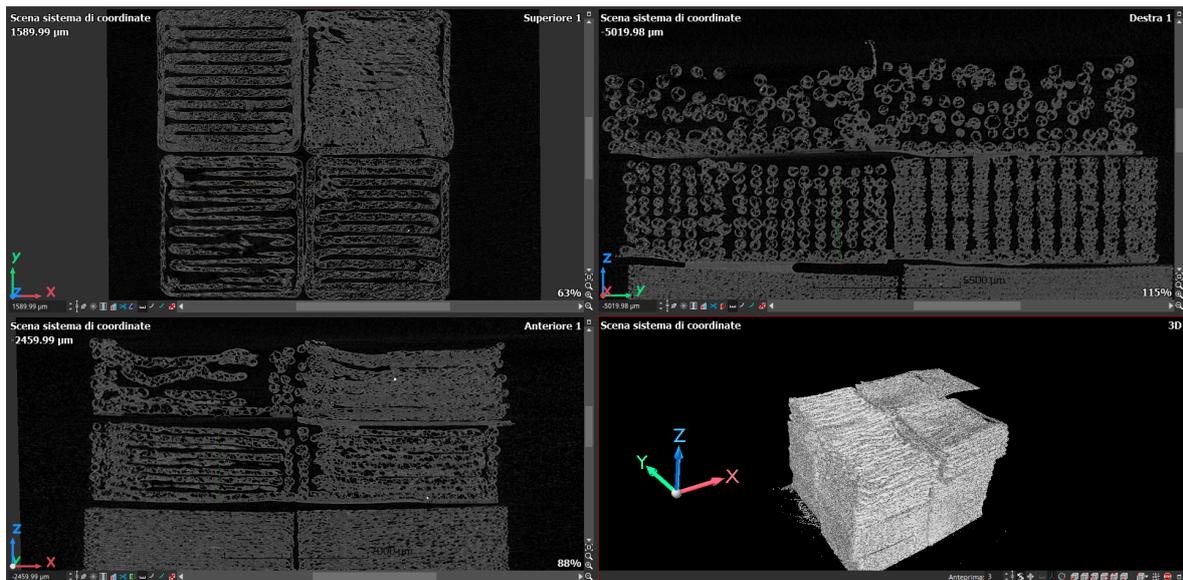


Figura 1.5: Esempio del risultato di una scansione

Il risultato della scansione è una serie di immagini che vengono caricate su un apposito software. Questo elabora ogni immagine 2D e ricrea un file 3D del volume scansionato, includendo tutte le caratteristiche interne rilevate dalla scansione. Il risultato è quindi un CAD 3D, sul quale si possono condurre analisi delle porosità, delle inclusioni e altri tipi di studi. Inoltre, si ha una visualizzazione completa del componente, dalla superficie alla struttura interna. Un esempio è riportato in Figura 1.5

1.3 Algoritmi Machine Learning

Il machine learning è la tecnologia che troviamo alla base di gran parte delle applicazioni utilizzate ogni giorno, sia in ambito professionale che nella vita privata. È uno strumento potente e versatile, che cambia radicalmente l'approccio utilizzato per risolvere problemi e per indagare una vasta varietà di contesti.

Il sito Google[6] riporta la seguente definizione:

"In termini di base, il machine learning è il processo di addestramento di un software, chiamato modello, per fare utili previsioni o generare contenuti da dati."

1.3.1 Perché Machine Learning

La differenza sostanziale che distingue questo metodo rispetto a uno classico utilizzato fino ad ora, è l'approccio al contesto che si vuole studiare.

Un esempio di approccio machine learning in ambito meccanico può essere quello utilizzato in [11].

Nell'articolo citato si utilizza un approccio machine learning per studiare le proprietà meccaniche di lamiere d'acciaio laminate a caldo.

Come riporta l'introduzione dell'articolo, correlare le proprietà meccaniche della lamiera prodotte ai parametri di processo e alla composizione del materiale risulta molto complicato.

Con un approccio tradizionale, bisognerebbe simulare le varie fasi del processo produttivo, descrivendo matematicamente la meccanica del materiale in ciascuna di esse.

Un approccio machine learning, permette di correlare i parametri di processo alle proprietà meccaniche del prodotto realizzato, senza la necessità di descrivere matematicamente le varie fasi di produzione. Questo è possibile in quanto un modello viene sviluppato e addestrato su dati raccolti dalla linea produttiva, al fine di cogliere le relazioni tra i vari parametri di processo e le proprietà meccaniche delle lamiere prodotte.

L'approccio machine learning risulta più versatile e adattabile a qualsiasi tipo di contesto. Da questo momento in poi ci si riferirà ai termini machine learning con la sigla ML.

1.3.2 Tipi di modelli ML

I modelli ML si differenziano in base a come imparano a fare previsioni o generare contenuti. Si suddividono in:

- **Apprendimento supervisionato:** il modello impara a fare delle previsioni su un set di dati contenenti le risposte "corrette". I modelli ad apprendimento supervisionato utilizzano principalmente due tecniche:
 - **Regressione,** prevedono valori numerici
 - **Classificazione,** prevedono la probabilità che un elemento faccia parte o meno di una classe predefinita.
- **Apprendimento non supervisionato:** il modello fa delle previsioni su una base di dati a disposizione. In questo caso l'obiettivo del modello è quello di cercare e mettere in evidenza correlazioni tra i vari elementi presenti nel set di dati. La tecnica utilizzata in questo caso è quella del clustering, così si individuano raggruppamenti naturali nei set di dati. A differenza della classificazione, in questo caso le varie categorie non sono predefinite ma sono l'obiettivo da individuare con l'algoritmo
- **Reinforcement learning:** il modello impara ricevendo premi o sanzioni in base alle decisioni prese. Si genera così una serie di regole da seguire per ricevere il maggior numero di premi. Questo tipo di apprendimento è utilizzato ad esempio per addestrare robot .
- **AI generativa:** è una classe di modelli che genera contenuti sulla base degli input degli utenti[6]

L'apprendimento supervisionato è quello che verrà utilizzato in questo studio.

1.4 Motivazione, obiettivo e organizzazione dell'attività

Come già spiegato nel paragrafo 1.1.3, le proprietà meccaniche di un componente stampato sono dipendenti dai parametri di stampa. Nasce quindi l'esigenza di provare a stimare quali saranno le caratteristiche meccaniche di un componente prodotto con tale processo, al variare dei parametri utilizzati.

Per stimare le proprietà ci sarebbero essenzialmente due opzioni che potrebbero essere adottate:

- A) Ricreare la struttura interna del componente in ambiente CAE e simulare una prova di trazione per stimare le proprietà meccaniche
- B) Sviluppare un algoritmo ML ed allenarlo a prevedere le proprietà meccaniche al variare dei parametri di stampa.

Con l'opzione **A)** si presenta il problema dei lunghi tempi di simulazione. Ricreare la geometria di stampa ogni volta che vengono variati i parametri di processo e simulare una prova di trazione sulla stessa, richiede un costo computazionale molto alto. Si è optato quindi per l'opzione **B)** che risulta essere molto più performante in termini di tempo.

Tuttavia le simulazioni CAE non vengono eliminate del tutto nell'ambito dello studio. Il modello ML necessita di essere allenato e testato e i dati necessari all'allenamento e al test del modello possono provenire sostanzialmente da due strade:

- a) Risultati ottenuti da prove sperimentali
- b) Risultati ottenuti da una simulazione FEM di prove di trazione

Scegliere di procedere con l'opzione **a)** implicherebbe andare prima a produrre un vasto numero di provini, variando per ognuno i parametri di stampa, successivamente condurre una prova di trazione per ogni provino, analizzarne i risultati e prepararli per allenare il modello.

Con l'opzione **b)** invece ci si risparmiano i lunghi tempi di produzione dei provini, andando a simulare la struttura interna e la prova di trazione per ottenere i risultati necessari. Lo strumento CAE quindi viene quindi utilizzato in una sola fase di questo studio, per produrre i dati necessari all'allenamento del modello. In questo modo si ottimizzano i tempi e la logistica per l'utilizzo delle macchine e dei laboratori.

Nella Figura 1.6 è illustrato un diagramma che vuole schematizzare il flusso di lavoro dell'attività.

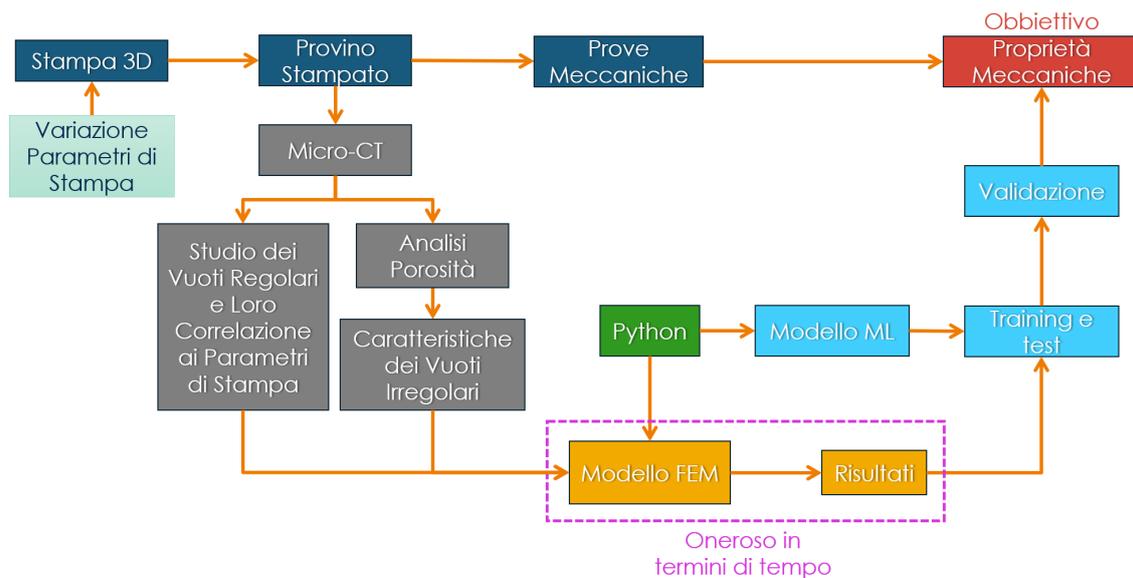


Figura 1.6: Organizzazione dell'attività

L'attività è divisa in quattro macro fasi:

1. Studio del processo di stampa e della struttura interna dei componenti
2. Modellazione della struttura interna nel FEM e simulazioni di prove di trazione
3. Sviluppo e allenamento del modello ML
4. Validazione del modello ML

Ognuna di queste verrà discussa nel dettaglio nei capitoli successivi.

1.4.1 Strumentazione e programmi utilizzati

La stampante utilizzata è una **Ultimaker 2+ Connect**.

<https://ultimaker.com/it/3d-printers/s-series/ultimaker-2-connect/>

Come slicer è stato utilizzato **Cura**, software gratuito di **ULTIMAKER**.

<https://ultimaker.com/it/software/ultimaker-cura/>

Il materiale è prodotto da **Fabbrix** e le caratteristiche dichiarate dal produttore sono riportate nel data sheet.

https://www.fabbrix.com/download/datasheet_fabbrix_carbon.pdf

Una descrizione approfondita del materiale verrà fatta nel paragrafo 3.2.

Capitolo 2

Studio della struttura interna del componente

In questo capitolo verranno illustrati i passaggi fatti per correlare la struttura interna del componente ai parametri di stampa scelti.

Per analizzare i risultati delle micro-CT, fare le misurazioni sulla struttura interna e condurre le analisi delle porosità, è stato utilizzato **VGStudio Max**, software sviluppato da **HEXAGON**.

<https://www.volumegraphics.com/en/products/vgsm.html>

In particolare, si analizzerà prima l'approccio utilizzato per collegare i parametri alla larghezza della bead e ottenere un'equazione che ne preveda il valore, che, come spiegato nel paragrafo 1.1.3, è la grandezza che va a caratterizzare forma e dimensioni dei difetti regolari.

Successivamente ci si concentrerà sulle analisi della porosità in VGStudioMax, necessarie a caratterizzare i difetti irregolari presenti nel materiale.

I parametri considerati nello studio sono i seguenti e da questo punto in poi verrà usata la notazione riportata in Tabella 2.1 come riferimento

Simbolo	Unità di misura	Descrizione
H	mm	altezza layer di stampa
W	mm	larghezza linea di stampa impostata nello slicer
W'	mm	larghezza reale della linea di stampa
Du	mm	diametro dell'ugello di estrusione
v	$\frac{mm}{s}$	velocità di stampa
u	$\frac{mm}{s}$	velocità di uscita del fuso dall'ugello
T	°C	temperatura di stampa del materiale
Tp	°C	temperatura del piatto di stampa
F	%	velocità delle ventole di raffreddamento
ol	%	overlap tra la linee di stampa
$fill$	%	riempimento del volume di stampa

Tabella 2.1: Notazione dei parametri usata in questo studio

2.1 Geometria di stampa ideale e reale

Come anticipato nell'introduzione, il primo passo per la produzione di un componente stampato è l'importazione di un file CAD nello slicer, dove vengono scelti i parametri di processo in base alle esigenze produttive.

Durante il processo di stampa, l'ugello deposita il materiale fuso sul piano di stampa. Questa fase può essere schematizzata come mostra la Figura 2.1

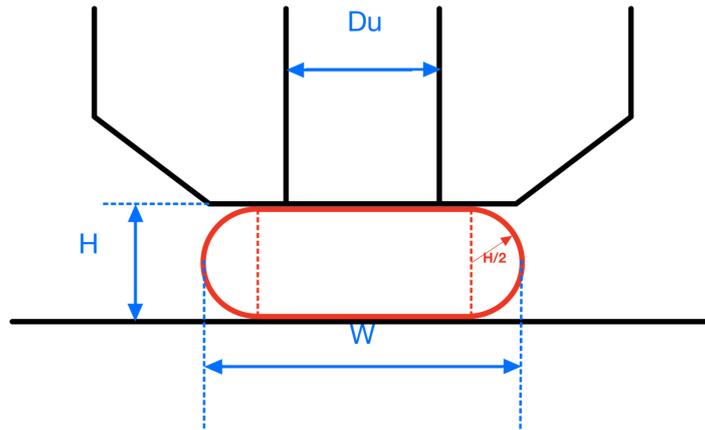


Figura 2.1: Estrusione del materiale, fonte [3]

La sezione di materiale depositato (bead) può essere idealmente approssimata da una forma come quella in rosso mostrata in figura. Il materiale fuso, fuoriuscendo, si schiaccia tra l'ugello e il piano di stampa, riempiendo la distanza H e espandendosi lateralmente. Avendo impostato una certa larghezza W all'interno dello slicer, la stampante calibra il flusso di materiale al fine di garantire il valore di larghezza impostato.

Assumendo di aver scelto un riempimento del 100% e ripetendo questo ragionamento sui vari piani di stampa, il componente prodotto ha una struttura interna come quella mostrata in Figura 2.2



Figura 2.2: Geometria interna ideale

Nella realtà questo non accade, a causa delle imperfezioni del processo e dell'influenza dei parametri di stampa stessi.

Si considera ora come esempio uno dei campioni stampati durante l'attività, per il quale sono stati scelti i parametri mostrati in Tabella 2.2.

Tabella 2.2: Parametri Campione 12

Du	H	W	v	T	F
mm	mm	mm	mm	°C	%
0.4	0.2	0.8	30	245	100

Facendo una scansione al tomografo, la geometria reale interna al componente è molto diversa da quella ideale, come si evidenzia con la Figura 2.3

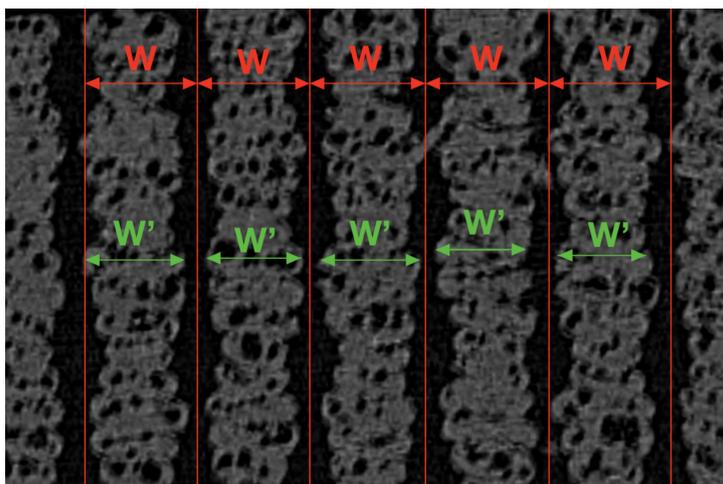


Figura 2.3: Geometria interna reale

In Figura 2.3 si evidenzia in rosso la larghezza W scelta come parametro, in verde invece è riportata la larghezza reale W' che si forma effettivamente. La scansione mostra una forte differenza tra la geometria ideale attesa e quella che effettivamente si ritrova e fine stampa.

Le zone nere, isolate nella Figura 2.4 dalla linea arancione, sono quelle zone del componente che non sono state riempite e che comportano una perdita di proprietà meccaniche dello stesso.

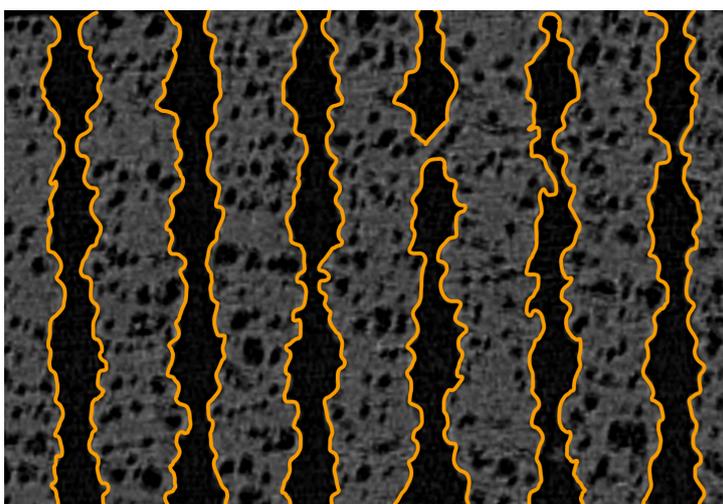


Figura 2.4: Vuoti regolari

Come detto nell'introduzione chiamiamo questi vuoti "difetti regolari", per sottolineare

il fatto che sono determinati dalla configurazione di stampa e per distinguerli da quelli "irregolari" che invece sono attribuibili maggiormente al materiale.

L'idea è quindi quella di studiare come varia la larghezza reale della bead in funzione dei parametri impostati, al fine di prevederne il valore.

2.2 Influenza dei parametri di stampa sulla larghezza della bead

Per comprendere come i parametri di processo influenzano la larghezza della bead W' , è stato necessario da prima individuare quali fossero gli effetti dei vari parametri sulla grandezza W' .

A tal fine è stato necessario fare delle prove di stampa prendendo nota dei parametri utilizzati per ogni campione, successivamente su ognuno di essi condurre una scansione al tomografo per fare le opportune misurazioni.

Per valutare l'influenza di ogni parametro si è proceduto nel seguente modo:

1. Scelta del parametro di studio
2. Produzione dei campioni
3. Organizzazione delle scansioni al tomografo
4. Misure sulle scansioni
5. Analisi dei risultati

In particolare si precisa che:

- Una volta scelto il parametro di studio, questo è stato fatto variare mantenendo costanti tutti gli altri parametri.
- I campioni prodotti per fare le misurazioni sulla larghezza del materiale depositato, sono tutti prodotti con un riempimento inferiore al 100%, questo per evitare l'eventuale sovrapposizione laterale del materiale tra una passata di stampa e l'altra, permettendo quindi di fare le misurazioni in modo accurato.
- Prodotti i campioni sono stati posti l'uno vicino all'altro per poterli scansionare tutti in una volta sola. Un esempio dell'oggetto inserito nel tomografo è riportato in Figura 2.5.
- Un esempio di come sono state prese le misure è riportato in Figura 2.5.

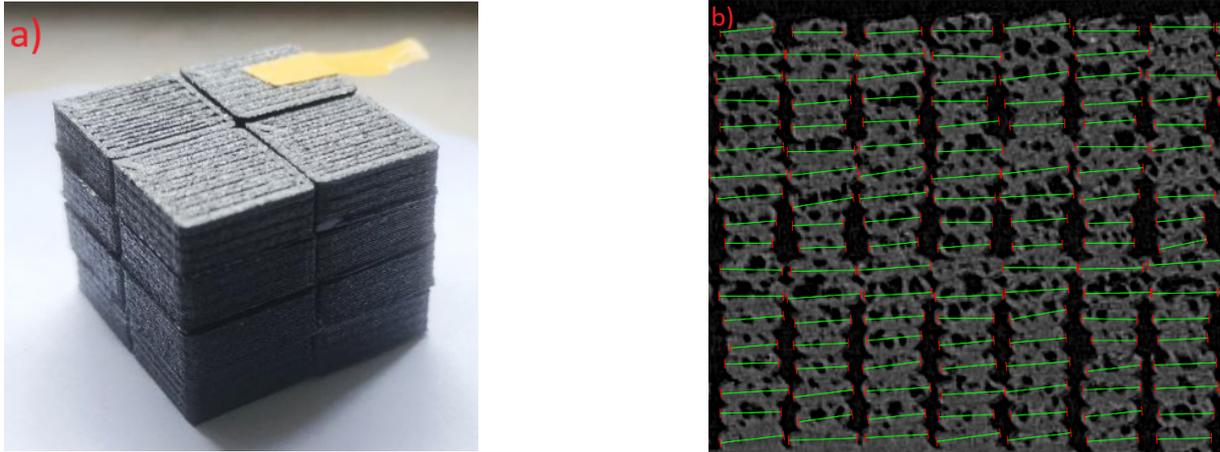


Figura 2.5: a) Blocchetto campioni per tomografia ,b) esempio misurazioni

2.2.1 Scelta dei parametri di studio

Sulla base di alcuni studi trovati in letteratura [9], [2], [7] e [8], sono stati selezionati i parametri da considerare nello studio.

Tra i parametri a disposizione all'interno dello slicer sono stati scelti:

- temperatura di stampa T ,
- velocità delle ventole di raffreddamento F ,
- rapporto u/v

Il rapporto u/v è il rapporto tra la velocità di uscita del filamento fuso dall'ugello e la velocità di stampa.

2.2.2 Influenza della temperatura di stampa

Per valutare l'effetto della temperatura di stampa sono stati prodotti dei campioni con i parametri riportati in Tabella 2.3

Tabella 2.3: Campioni per variazione temperatura

Campione	H mm	W mm	v mm/s	T °C	F %
32	0,2	0,6	30	235	100
31	0,2	0,6	30	240	100
11	0,2	0,6	30	245	100
33	0,2	0,6	30	250	100
34	0,2	0,6	30	255	100

Come mostrato in tabella, per studiare l'effetto della temperatura, gli altri parametri di stampa sono stati mantenuti costanti ed è stata fatta variare solo T.

Prese le misurazioni per ogni campione si è calcolato un valore medio. Si riportano in Tabella 2.4 i valori ideali e quelli medi delle misurazioni per ogni campione

Nella Figura 2.6 è riportato un grafico con i dati della tabella.

Tabella 2.4: Valori medi larghezza bead

Campione	W	W'_{media}	W'_{std}
	mm	mm	mm
32	0,6	0,404	0,058
31	0,6	0,441	0,058
11	0,6	0,496	0,062
33	0,6	0,487	0,063
34	0,6	0,520	0,052

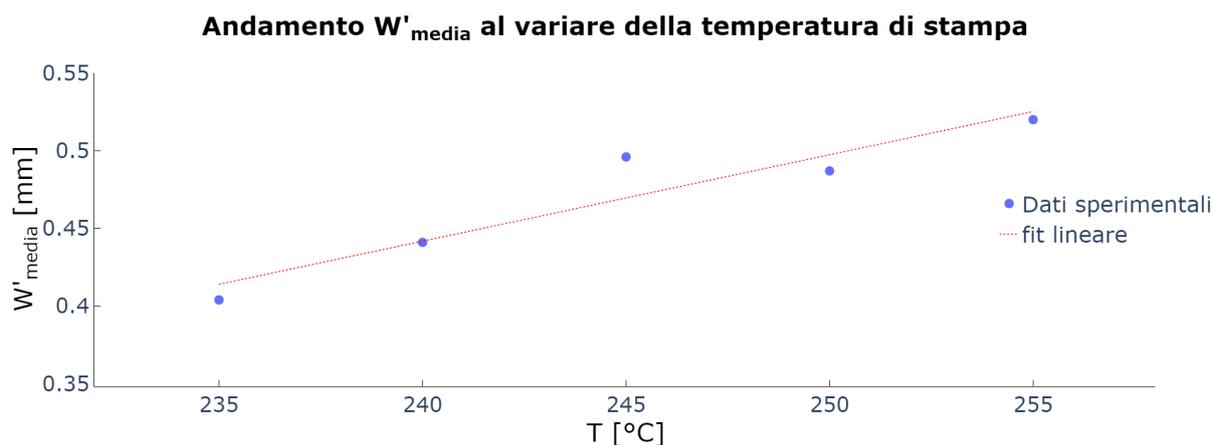


Figura 2.6: Influenza della temperatura di stampa

Come mostra il grafico, aumentando la temperatura di stampa del materiale la tendenza è quella di avere una larghezza W' maggiore. Questo ha senso nella fisica del processo, in quanto aumentando la temperatura il materiale tende a fluidificare maggiormente durante l'estrusione, comportando una maggiore espansione laterale dello stesso.

2.2.3 Influenza della velocità delle ventole di raffreddamento

Per valutare l'effetto della velocità delle ventole sono stati prodotti dei campioni con i parametri riportati in Tabella 2.5

Tabella 2.5: Campioni per variazione velocità ventole

Campione	H	W	v	T	F
	mm	mm	mm/s	°C	%
64	0,2	0,6	30	250	0
65	0,2	0,6	30	250	20
66	0,2	0,6	30	250	30
67	0,2	0,6	30	250	40
45	0,2	0,6	30	250	50
41	0,2	0,6	30	250	60
42	0,2	0,6	30	250	70
43	0,2	0,6	30	250	80
44	0,2	0,6	30	250	90
33	0,2	0,6	30	250	100

Anche in questo caso l'unico parametro che è stato fatto variare è la velocità delle ventole.

Prese le misurazioni per ogni campione si è calcolato un valore medio. Si riportano in Tabella 2.6 i valori ideali e quelli medi delle misurazioni per ogni campione

Tabella 2.6: Valori medi larghezza bead

Campione	W	W' _{media}	W' _{std}
	mm	mm	mm
64	0,6	0,678	0,027
65	0,6	0,628	0,056
66	0,6	0,624	0,019
67	0,6	0,623	0,027
45	0,6	0,562	0,049
41	0,6	0,566	0,049
42	0,6	0,531	0,053
43	0,6	0,532	0,045
44	0,6	0,530	0,050
33	0,6	0,487	0,063

Riportando anche per questi campioni le misurazioni su un grafico, si ottiene il risultato mostrato in Figura 2.7

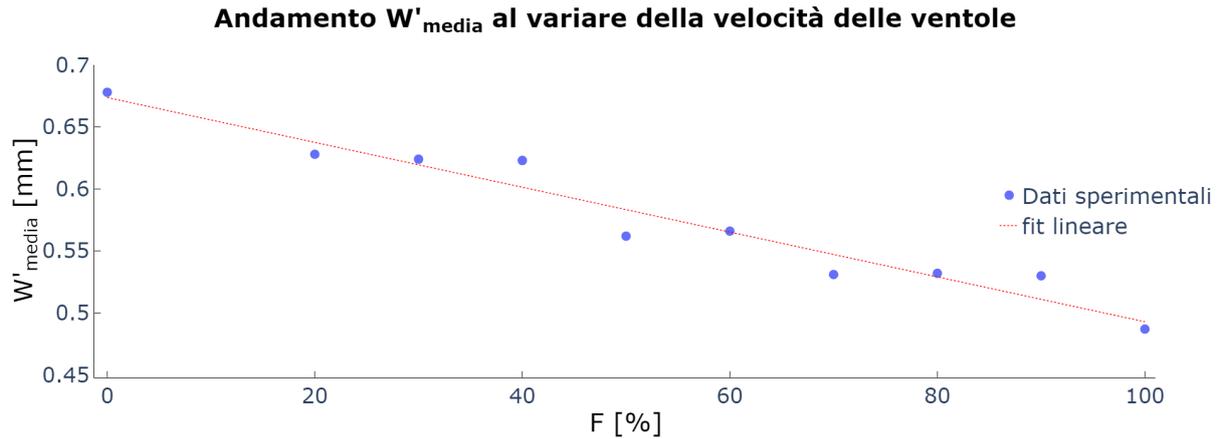


Figura 2.7: Influenza della velocità delle ventole di raffreddamento

Anche in questo caso la tendenza delle misurazioni risulta coerente con la fisica del processo: a parità degli altri parametri, aumentando il raffreddamento durante la stampa, la larghezza W' diminuisce. Questo è intuitivo in quanto il materiale fluido in uscita dall'ugello viene fatto solidificare prima, limitandone l'espansione laterale.

Si nota tuttavia una divisione in classi dei valori trovati, come se variare la velocità a incrementi del 10% non avesse influenza entro certi range di velocità.

2.2.4 Influenza del rapporto u/v

Andando avanti con lo studio dei parametri, l'ultimo analizzato è il rapporto u/v . Per calcolare il valore di u/v , nasce l'esigenza di stimare il valore di u , essendo una grandezza che non viene impostata dall'utente a differenza di v .

Stima della velocità u

Per stimare il valore della velocità di uscita del fuso dall'ugello, è stato necessario analizzare il GCODE che viene creato durante il processo di slicing.

A questo fine è stato utilizzato uno script Python, che viene eseguito per ogni GCODE necessario a produrre i campioni. Le operazioni eseguite dallo script sono schematizzate in Figura 2.8.

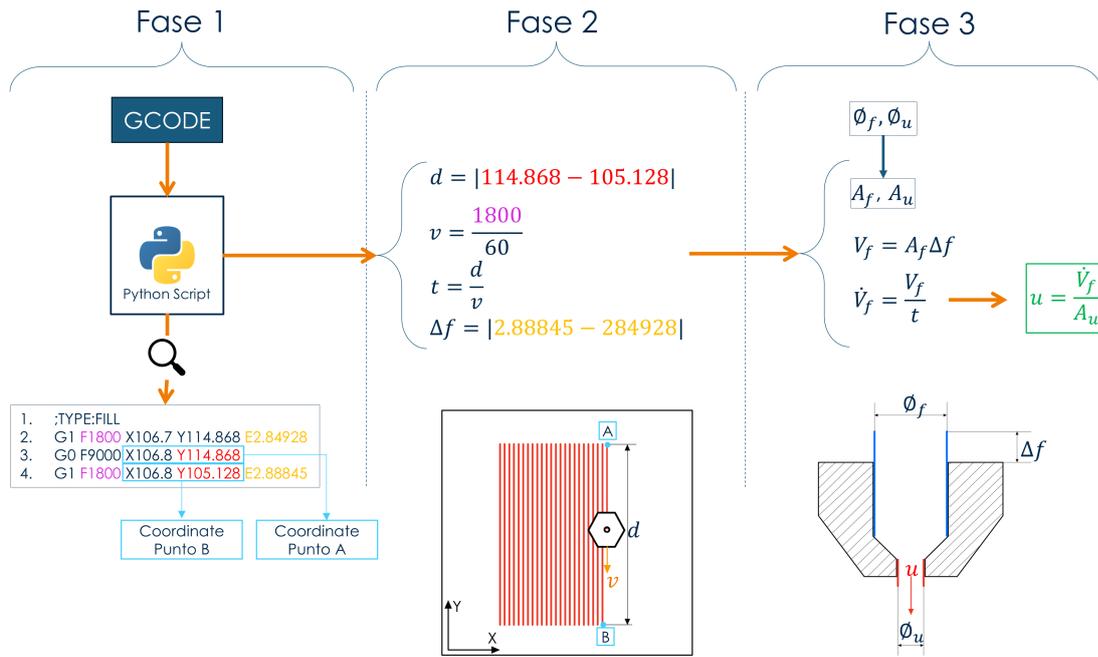


Figura 2.8: Fasi stima u da GCODE

Facendo riferimento alle grandezze nella figura 2.8:

- v = velocità di stampa
- d = segmento di materiale depositato
- t = tempo di deposizione materiale
- Δf = avanzamento filamento
- Φ_f = diametro filamento
- Φ_u = diametro ugello
- A_f = sezione filamento
- A_u = sezione ugello
- V_f = volume di filamento entrante
- \dot{V}_f = portata volumetrica
- u = velocità di uscita del fuso

Nelle tre colonne della figura 2.8 sono rappresentati:

- Fase 1: un estratto del GCODE
- Fase 2: uno schema del processo di stampa, in vista dall'alto sul piatto di stampa
- Fase 3: una vista in sezione dell'ugello e del filamento

Per una migliore comprensione le fasi verranno commentate di seguito:

- Fase 1: identificazione dei comandi caratteristici del processo di stampa
 - lettura del GCODE e ricerca di un blocco di istruzioni come quello mostrato nell'immagine. In particolare questo blocco identifica l'inizio della fase di riempimento del componente (TYPE FILL)
 - ricerca all'interno del blocco dei comandi **F**, che imposta la velocità di stampa, **E**, che imposta l'avanzamento del filamento, e delle coordinate di due punti che identificano l'inizio e la fine di un segmento di materiale depositato d

- Fase 2: in questa fase vengono calcolate le grandezze necessarie a stimare u
 - viene calcolata d come differenza in valore assoluto tra le coordinate del punto A e del punto B
 - si calcola poi la velocità di stampa v e il tempo t necessario a percorrere la distanza d a quella velocità
 - si calcola in fine la porzione di filamento Δf inserita nell'estrusore durante lo spostamento dello stesso dal punto A al punto B
- Fase 3: dalle caratteristiche geometriche dell'ugello e del filamento, applicando una conservazione di portata volumetrica e trascurando la variazione di densità nell'estrusore, si calcola la velocità u .
 - calcolo della sezione del filamento e dell'ugello
 - si calcola la porzione di filamento che entra nell'estrusore durante questa deposizione di materiale
 - dividendo per il tempo si ottiene la portata volumetrica entrante nell'estrusore
 - si stima la velocità u dividendo questa portata per la sezione dell'ugello

Parametri variati per lo studio del rapporto $\frac{u}{v}$

Risulta opportuno precisare che, per cogliere la variazione di u/v , non è stato sufficiente variare solo la velocità di stampa v . Questo perchè aumentando, o diminuendo, la velocità di stampa si avrà un conseguente aumento, o diminuzione, della velocità u , producendo sempre un rapporto u/v costante. Il programma di stampa cercherà sempre di soddisfare il volume di materiale necessario all'estrusione.

Riportando le equazioni utilizzate nella figura 2.8

$$t = \frac{d}{v} \qquad \dot{V}_{entrante} = \frac{V_f}{t} \qquad \dot{V}_{uscite} = A_u u \qquad (2.1)$$

si ricorda che t è il tempo necessario a depositare materiale lungo il segmento d alla velocità di stampa v , $\dot{V}_{entrante}$ è il volume di materiale entrante nell'estrusore durante il tempo t , allo stesso modo $\dot{V}_{uscite} = A_u u$ è il volume di materiale depositato dall'ugello. Considerando la portata di volume in entrata e uscita dall'estrusore costante si può quindi scrivere

$$\dot{V}_{entrante} = \dot{V}_{uscite} \qquad A_u u = \frac{V_f}{d} v \qquad (2.2)$$

Quindi

$$\frac{u}{v} = \frac{V_f}{d A_u} = \text{costante} \qquad (2.3)$$

L'equazione 2.3 mostra che il rapporto delle velocità risulta essere costante durante la deposizione di materiale lungo il segmento d , considerando solo v come parametro da far variare.

Per capire come varia il rapporto, ci si può concentrare sulla bead depositata e il volume in uscita dall'ugello. Facendo riferimento alla Figura 2.1, si può esprimere il volume della

bead, nel tempo di stampa t , in funzione dei parametri H , W e v .
Il volume depositato è

$$\dot{V}_{bead} = \left(\left(W - 2\frac{H}{2} \right) H + \pi \left(\frac{H}{2} \right)^2 \right) v \quad (2.4)$$

Il volume della bead depositato deve essere fornito in uscita dall'ugello, quindi

$$\dot{V}_{ugello} = A_u u \quad (2.5)$$

I due volumi devono essere uguali

$$\left(\left(W - 2\frac{H}{2} \right) H + \pi \left(\frac{H}{2} \right)^2 \right) v = A_u u \quad (2.6)$$

con $A_u = \pi \left(\frac{D_u}{4} \right)^2$, dove D_u si ricorda essere il diametro dell'ugello. A parità di D_u quindi il rapporto u/v risulta essere in funzione dei parametri H e W

$$\frac{u}{v} = \frac{\left(\left(W - 2\frac{H}{2} \right) H + \pi \left(\frac{H}{2} \right)^2 \right)}{\pi \left(\frac{D_u}{4} \right)^2} \quad (2.7)$$

Come mostra l'equazione 2.7, per cambiare il rapporto u/v bisogna agire sui parametri H e W . Motivo per cui sono stati variati tra un campione e l'altro, a differenza del caso studio della temperatura e della velocità delle ventole, dove venivano mantenuti costanti tra i vari campioni.

Ottenuta la stima di u è stato possibile valutare anche in questo caso la variazione di W' stampando diversi campioni, riportati in Tabella 2.7.

Tabella 2.7: Campioni per studio rapporto $\frac{u}{v}$

Campione	H	W	F	H/D_u	u/v	W'	W'_{std}
	mm	mm	%	/	/	mm	mm
6	0,1	0,8	100	0,25	0,6	0,59	0,022
53	0,1	0,2	100	0,25	0,13	0,35	0,023
54	0,1	0,3	100	0,25	0,24	0,39	0,033
55	0,1	0,6	100	0,25	0,47	0,56	0,018
57	0,2	0,2	100	0,5	0,32	0,26	0,041
58	0,2	0,3	100	0,5	0,47	0,36	0,032
59	0,2	0,4	100	0,5	0,63	0,41	0,018
11	0,2	0,6	100	0,5	0,91	0,49	0,062
12	0,2	0,8	100	0,5	1,2	0,566	0,084
17	0,4	0,6	100	1	1,8	0,428	0,071
18	0,4	0,8	100	1	2,4	0,472	0,079
61	0,4	0,2	100	1	0,64	0,326	0,040
62	0,4	0,3	100	1	0,95	0,419	0,046
63	0,4	0,4	100	1	1,27	0,478	0,058

Anche in questo caso si riporta il grafico che descrive W' in funzione del rapporto u/v .

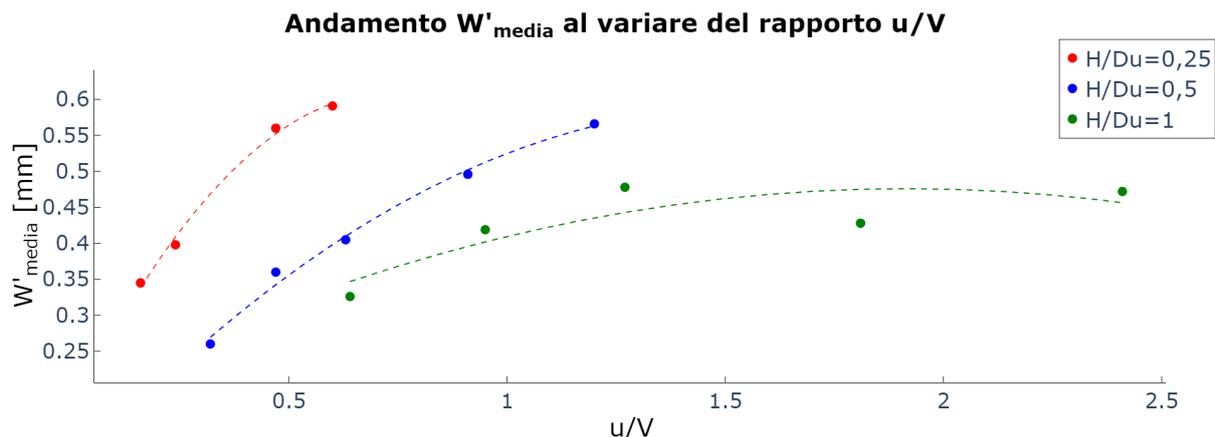


Figura 2.9: Influenza del rapporto u/v

Il grafico riportato in Figura 2.9 mette in evidenza due cose:

- esiste effettivamente una dipendenza di W' dal rapporto u/v . In particolare W' cresce al crescere di u/v e i dati vengono interpolati bene da un polinomio di secondo grado.
- la seconda è che vengono a crearsi differenti tendenze al variare del rapporto H/D_u , questo rapporto è stato considerato valutando l'approccio utilizzato in [9] e [2].

2.3 Criticità dell'approccio e riorganizzazione dello studio

I risultati ottenuti e riportati nella sezione precedente, mettono in evidenza che c'è effettivamente una correlazione tra i parametri scelti e la grandezza studiata.

Tuttavia, ricordando che l'obiettivo è correlarli alla larghezza W' , l'approccio utilizzato fin ora non risulta adatto a trovare un'equazione che stimi W' inserendo i parametri di stampa utilizzati. Questo perchè le grandezze analizzate sono tutte indipendenti, non è quindi possibile prendere i fit dei singoli parametri e unirli in un'unica equazione. Inoltre, avere tre fit diversi nel caso del rapporto u/v complica ulteriormente questo passaggio.

Si ipotizzi di voler conoscere la larghezza W' essendo a conoscenza di un valore u/v , se questo valore cade ad esempio nell'intorno di $u/v = 0,5$ il valore di W' potrebbe essere sia nell'intorno di 0,55 (linea rossa) che nell'intorno di 0,35 (linea blu). Per questo parametro quindi non c'è una corrispondenza univoca con la variabile dipendente W' .

2.3.1 Riorganizzazione dello studio

Per arrivare ad avere una singola equazione, che prenda in input i parametri di stampa e stimi la larghezza W' , si è riorganizzato il piano sperimentale dei campioni.

Se fino ad ora si è utilizzato con un piano classico, che prevedere di tenere costanti tutti i parametri e far variare solo quello che si sta studiando, si è passati a un piano fattoriale completo.

Un piano fattoriale[10] prevede di selezionare dei fattori, che sono le variabili indipendenti,

e dei livelli, ovvero dei valori su cui impostare i vari fattori. Scelto il numero di fattori e il numeri di livelli da considerare, bisogna produrre un numero di campioni pari a

$$N.campioni = l^n \quad (2.8)$$

Dove l è il numero di livelli e n è il numero di fattori. Questo consente di considerare tutte le combinazioni tra i vari livelli dei fattori e poterne così considerare anche le interazioni. Per interazioni si intende l'effetto combinato tra due o più fattori sulla variabile dipendente.

Il numero di livelli da impostare è stato scelto pari a 3, questo per avere una buona descrizione della variazione di ogni parametro.

A questo punto, per sapere quanti campioni produrre, è necessario scegliere i fattori. Per quanto visto fino ad ora si hanno quattro parametri che sono influenti, T , H , W e F , scegliendoli tutti e quattro e impostandoli su 3 livelli, si avrebbero 81 campioni da produrre e da analizzare.

Nell'ambito di quest'attività lo studio risulterebbe oneroso in termini di tempo e di scansioni al tomografo, la scelta ricade quindi necessariamente su un piano fattoriale a tre fattori su tre livelli.

Il piano scelto è riportato in Tabella 2.9

Tabella 2.8: Piano fattoriale

		FATTORI		
		H	W	F
Livelli	1	0.1	0.4	0
	2	0.2	0.6	50
	3	0.3	0.8	100

In questo modo è necessario produrre 27 campioni. È stato scelto di tenere fuori dal piano la temperatura, settandola a un valore costante per tutti e 27 i campioni. Questa scelta trova motivo nel fatto che, solitamente, la temperatura è un parametro su cui si agisce meno quando si scelgono i parametri di stampa, essendo quest'ultima consigliata dal produttore del materiale.

La temperatura quindi è stata mantenuta costante a 250 °C, così come la velocità di stampa a 15 mm/s .

I campioni prodotti sono riportati in Tabella 2.9

Tabella 2.9: Campioni piano fattoriale

Campione	H	W	FAN	Campione	H	W	FAN
\	mm	mm	%	\	mm	mm	%
1	0,1	0,4	0	15	0,2	0,6	100
2	0,1	0,4	50	16	0,2	0,8	0
3	0,1	0,4	100	17	0,2	0,8	50
4	0,1	0,6	0	18	0,2	0,8	100
5	0,1	0,6	50	19	0,3	0,4	0
6	0,1	0,6	100	20	0,3	0,4	50
7	0,1	0,8	0	21	0,3	0,4	100
8	0,1	0,8	50	22	0,3	0,6	0
9	0,1	0,8	100	23	0,3	0,6	50
10	0,2	0,4	0	24	0,3	0,6	100
11	0,2	0,4	50	25	0,3	0,8	0
12	0,2	0,4	100	26	0,3	0,8	50
13	0,2	0,6	0	27	0,3	0,8	100
14	0,2	0,6	50				

Su questi campioni si prenderanno le nuove misurazioni della larghezza W' . Successivamente verrà fatto un fitting considerando queste misurazioni.

2.4 Risultati del piano fattoriale

Sono stati prodotti i campioni e sono state fatte le misurazioni sulle scansioni, nella stessa modalità utilizzata fino ad ora.

Una volta effettuate le misurazioni, sono stati organizzati i dati per permettere il fit di un modello di tipo additivo, avente la forma riportata nell'equazione 2.9

$$W' = \mu + aH + bW + cF + dHW + eHF + fWF + gHWF \quad (2.9)$$

dove i vari coefficienti indicano:

- μ : termine costante
- a : coefficiente moltiplicativo di H
- b : coefficiente moltiplicativo di W
- c : coefficiente moltiplicativo di F
- d : coefficiente moltiplicativo dell'interazione tra H e W
- e : coefficiente moltiplicativo dell'interazione tra H e F
- f : coefficiente moltiplicativo dell'interazione tra W e F
- g : coefficiente moltiplicativo dell'interazione tra H, W e F

Ogni coefficiente indica il peso che il relativo fattore ha sulla variabile dipendente W' . In particolare sono stati individuati i seguenti valori per i coefficienti:

- $\mu = 0,033$
- $a = 0,120$
- $b = 0,848$
- $c = -0,039$
- $d = -0,486$
- $e = 0,344$
- $f = -0,049$
- $g = -0,459$

L'equazione del modello risulta quindi la 2.10

$$W' = 0,033 + 0,120H + 0,848W - 0,039F - 0,486HW + 0,344HF - 0,049WF - 0,459HWF \quad (2.10)$$

e fitta i dati con $R^2 = 0,846$.

Per verificarne la validità sono stati stampati dei campioni di test oltre a quelli usati per fittare il modello.

Tabella 2.10: Campioni test modello

Campione	H	W	FAN
	mm	mm	%
28	0,1	0,5	0,4
29	0,15	0,4	0,5
30	0,2	0,6	1
31	0,3	0,6	0
32	0,25	0,5	0

Si riporta in Figura 2.10 un grafico che mostra il test del modello.

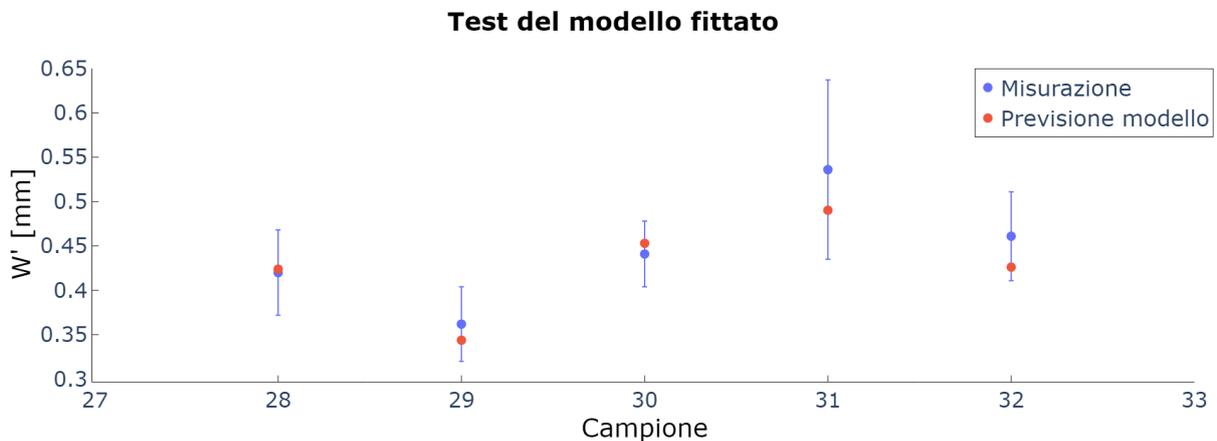


Figura 2.10: Test del modello

Dal grafico si può quindi affermare che il modello stima correttamente la grandezza W' . A questo punto, inserendo nell'equazione i valori dei parametri usati per stampare un componente, è possibile stimare, con un certo margine di errore, quale sarà la larghezza della linea generata da tali parametri.

In particolare il modello considera gli effetti geometrici del processo, H e W , e una parte degli effetti termici, F , avendo trascurato la temperatura.

Si precisa che il modello funziona nei limiti e nelle condizioni di stampa specificate nell'ambito di quest'attività.

2.5 Studio dei difetti irregolari

I passaggi svolti fino ora permettono di avere una descrizione della geometria di stampa reale, in termini di larghezza reale della bead.

Questa larghezza reale, combinata successivamente con altri parametri come l'altezza layer, l'orientamento dei layer e il riempimento, permette di descrivere e modellare quelli che sono i difetti regolari del componente stampato.

2.5.1 Analisi delle porosità

Le analisi descritte nelle seguenti sezioni sono state fatte per stimare il valore della porosità del materiale. Un esempio di componente scansionato è riportato in Figura 2.11



Figura 2.11: Esempio dell'output di una scansione

Per assicurarsi che durante l'analisi venissero individuati solo i difetti irregolari, escludendo quindi i difetti regolari, è stato necessario isolare una porzione di volume all'interno della scansione, detta **ROI**¹, che contenesse solo **voxel**² facenti parte della bead.

In Figura 2.12 è riportato un esempio di come è stata isolata la ROI.

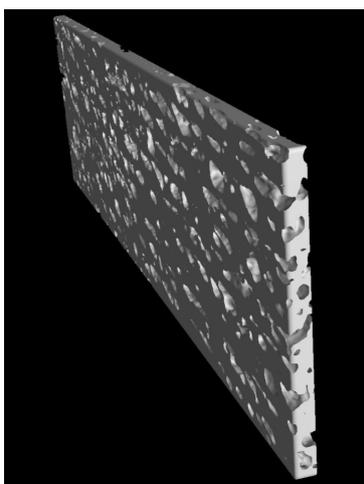


Figura 2.12: ROI del materiale facente parte delle bead estruse

¹Region of Interest, è una regione 3D appositamente isolata nella ricostruzione della scansione

²Voxel, sono le unità elementari in una scansione 3D, possono essere visti come l'equivalente dei pixel in un'immagine 2D

Per effettuare l'analisi dei difetti irregolari è stato usato il modulo "Porosity Analysis from defect ROI ". Il modulo opera su una ROI di materiale e richiede in input:

- una ROI contenente voxel indistinti tra materiale e vuoti che chiameremo ROI_MV
- una ROI contenente voxel che rappresentano solo vuoti che chiameremo ROI_V

Attraverso la **surface determination**³ è possibile comunicare al programma quali sono i voxel che rappresentano materiale e quali sono i voxel che rappresentano l'aria. Si procede quindi come di seguito:

1. Si esegue la procedura "surface determination", calibrando al scala di grigi in modo da includere vuoti e materiale.
2. Si estrae la ROI_MV dalla surface determination, che conterrà quindi tutto il volume della ROI iniziale (materiale + vuoti)
3. Si rifà la surface determination ma questa volta si calibra la scala di grigi per distinguere vuoti e materiale.
4. Si estrae la ROI dalla surface determination, questa conterrà però solo i voxel associati al materiale, essendo la procedura standard di VGStudio.
5. Si inverte la ROI appena creata ottenendo così la complementare ROI_V, avente le informazioni dei vuoti.

Si riporta un esempio di surface determination in Figura 2.13, sia per il caso in cui sono inclusi sia vuoti che materiale, che per il caso in cui vuoti e materiale sono distinti

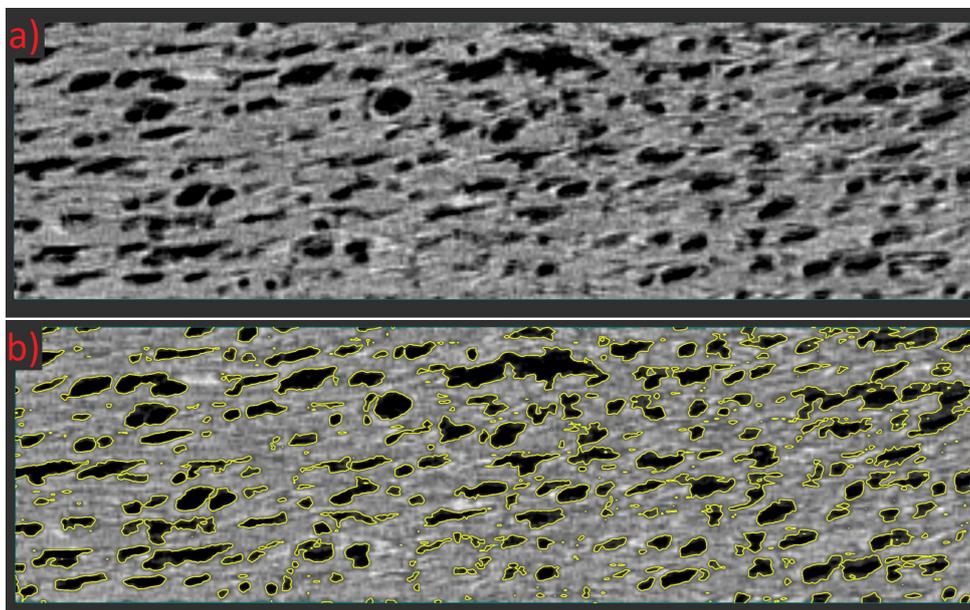


Figura 2.13: Surface determination: a) vuoti e materiale, b) solo materiale

A questo punto il programma ha tutte le informazioni per eseguire l'analisi della porosità.

³Surface determination, è una funzione di VG Studio che calcola il confine tra il materiale e ciò che non ne fa parte (inclusioni o aria)

Lanciato il modulo e svolta l'analisi si possono apprezzare i risultati.
 In Figura 2.14 si riporta un esempio della visualizzazione grafica dei risultati ottenuti

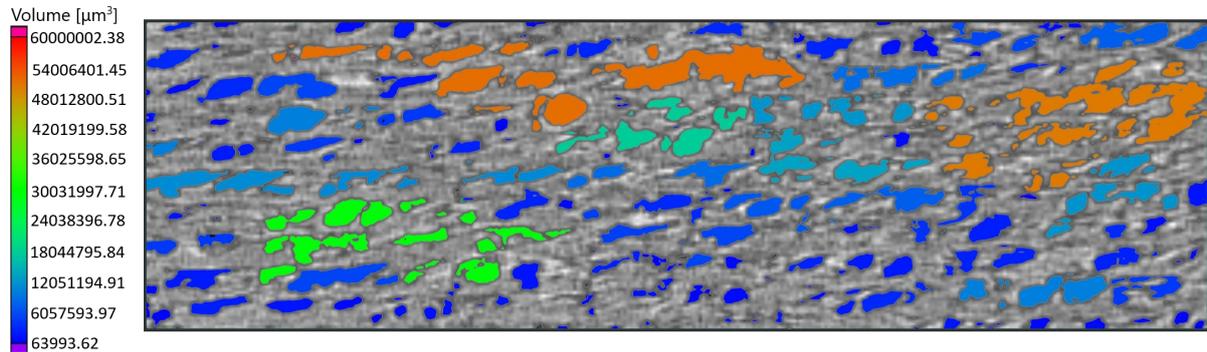


Figura 2.14: Vuoti risultanti dall'analisi

Oltre alla visualizzazione grafica dell'analisi, che permette di apprezzare la distribuzione dei vuoti sulla ROI, è possibile anche consultare una tabella che riporta le caratteristiche dei vuoti trovati come in figura 2.15

Probability	Diameter [µm]	Equivalent diameter [µm]	Volume [µm³]	
1	38.64	206	113	752005.32
2	34.30	110	80	272000.15
3	33.67	128	74	216000.66
4	32.47	165	73	200000.30
5	31.72	117	67	160006.22
6	31.49	161	83	303997.54
7	30.45	380	160	2144017.72
8	29.85	204	87	344010.01
9	29.51	447	201	4256034.74
10	29.17	659	202	4336015.79
11	29.04	249	143	1544009.08
12	28.85	281	116	815990.15
13	28.40	126	65	144002.49
14	28.26	795	203	4392031.11
15	28.22	85	57	96000.44
16	28.17	144	91	392001.94
17	28.13	533	160	2136006.72
18	27.69	471	171	2632037.74
19	27.33	144	83	303998.53
20	27.15	147	89	368002.10
21	27.14	161	82	288005.92
22	27.07	867	217	5360031.50
23	26.97	1547	268	10112075.14
24	26.83	2054	383	29304184.02
25	26.11	158	113	752003.22
26	26.09	221	89	367993.43
27	25.92	148	97	472006.16
28	25.83	342	125	1024012.69
29	25.60	412	160	2136024.65
30	25.47	1682	275	10928075.76
31	25.12	1029	277	11104089.21

Figura 2.15: Tabella con informazioni sui vuoti

Come si nota nelle Figura 2.14, nel materiale sono presenti molti difetti irregolari. La forma e la distribuzione all'interno del materiale sono totalmente casuali e non seguono alcun tipo di ordine.

Visualizzando in 3D la ROI, in Figura 2.12, si nota ancora meglio la presenza degli stessi lungo la porzione di materiale depositato, a sottolineare l'imperfezione del processo di stampa.

2.5.2 Risultati analisi porosità

I risultati delle analisi sono stati elaborati esternamente al programma esportando i dati necessari.

In particolare ci si concentra sui risultati della porosità relativi al campione 14, essendo prodotto con dei parametri di stampa che verranno utilizzati successivamente per una validazione del modello FEM.

Si è infine creato un grafico che rappresenta l'andamento della percentuale della porosità al variare del volume dei difetti. Questo è necessario per identificare ed eliminare eventuali outlier dovuti a imperfezioni del processo di stampa, che non sono quindi statisticamente descrittivi della popolazione di difetti trovati.

Il grafico in questione è riportato in figura 2.16

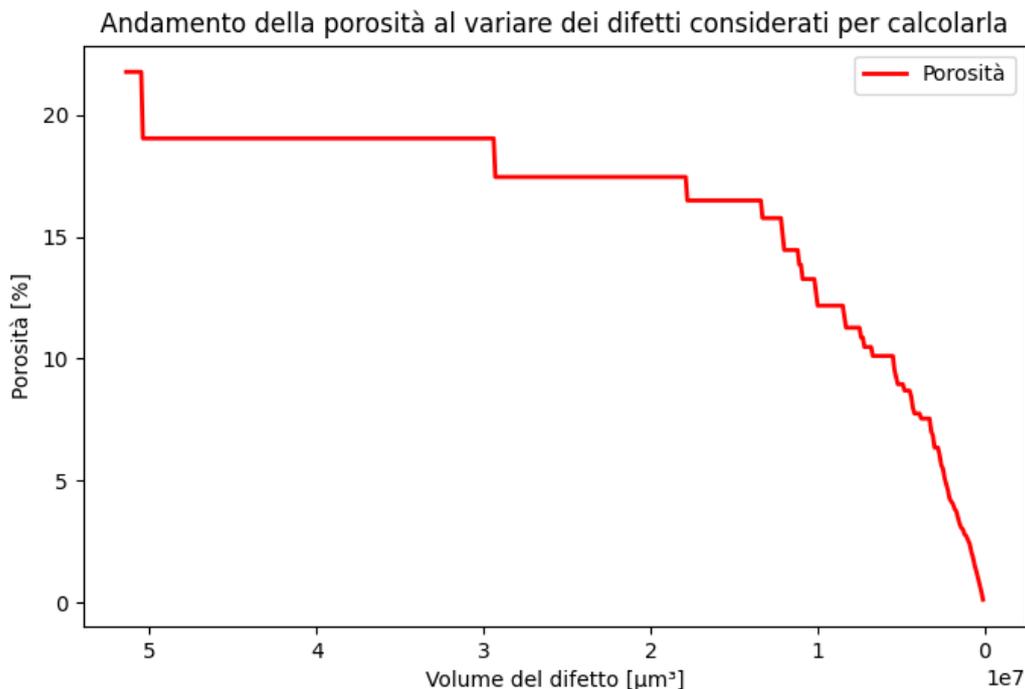


Figura 2.16: Andamento porosità al variare del volume utilizzato per filtrare i difetti considerati per il calcolo

La procedura per identificare gli outlier è la seguente:

- si inizia calcolando la porosità considerando tutti i difetti trovati,
- si considerano iterativamente sempre meno difetti per calcolarla. Lo si fa riducendo il valore soglia, in termini di volume, sotto il quale un difetto deve essere considerato,
- si ottiene il grafico riportato in figura 2.16,
- ogni tratto orizzontale prolungato della curva, indica che quel valore di porosità è dovuto principalmente a un solo difetto, che verrà escluso dal calcolo al salto successivo. Più il tratto costante si prolunga, più è grande il volume del difetto,
- ogni salto sulla curva è dovuto a un difetto che viene escluso dal calcolo della porosità

Quando la curva inizia a presentare sempre meno tratti orizzontali costanti, indica che i difetti considerati per calcolarla pesano sempre meno sul valore di porosità, non sono quindi considerabili outlier.

Analizzando il grafico in figura 2.16, si è ottenuto un valore di porosità pari al 10% per il campione 14, non essendoci più tratti orizzontali costanti al di sotto di questo valore.

Capitolo 3

Modello numerico per la previsione delle proprietà meccaniche al variare della strategia di stampa

In questo paragrafo viene descritta la procedura per generare un modello numerico della parte stampata in ambiente Abaqus. Nel contesto di questo lavoro, la modellazione numerica ha principalmente due obiettivi:

- Calibrare e validare le proprietà meccaniche del materiale su una base sperimentale
- Successivamente creare un database di simulazioni su cui addestrare un modello ML

La procedura per la generazione della geometria utilizza l'equazione 2.10, che permette di stimare la larghezza della bead al variare dei parametri di stampa, da dare in input allo script di generazione del codice Abaqus.

Lo script è stato sviluppato in ambiente Python utilizzando le librerie Abaqus per creare i layer di stampa presenti nell'oggetto stampato.

3.1 Geometria reale con difetti di stampa

Lo script prende in input i parametri necessari a ricreare la geometria interna del componente, riportati in tabella 3.1.

Tabella 3.1: Parametri input script

Parametro	Unità di misura	Descrizione
W	mm	Larghezza bead impostata nello slicer
W'	mm	Larghezza bead reale (stimata dal modello)
W_{wall}	mm	Larghezza dei wall laterali
t	mm	Altezza layer
fill	%	Percentuale di riempimento
ol	%	Percentuale di overlap
θ_0	deg	Orientamento del pattern rispetto all'asse x
angle_shift	deg	Angolo di orientamento tra due layer consecutivi
L_RVE	mm	Lato del volume di stampa ricostruito

n.layers / Numero dei layer di stampa
n.beads / Numero delle bead per ogni layer

Lo script ricostruisce quindi il volume di interesse seguendo i passaggi elencati nel diagramma in Figura 3.1

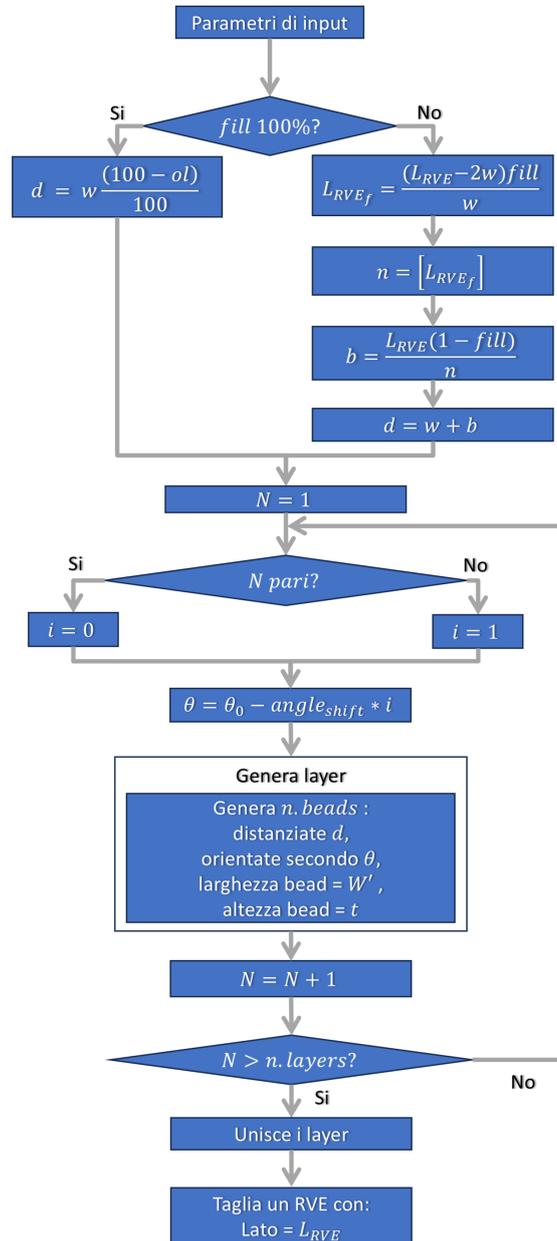


Figura 3.1: Passaggi dello script per ricreare la geometria

Ottenuto un RVE con le dimensioni scelte si aggiungono i wall laterali. I wall vengono generati sovrapponendo e unendo delle bead create con:

- larghezza pari a W_{wall} ,
- altezza pari a t ,

- e lunghezza pari a L_{RVE} .

Il numero delle bead sovrapposte è pari a $n.layers$. Un esempio di wall è riportato in Figura 3.2

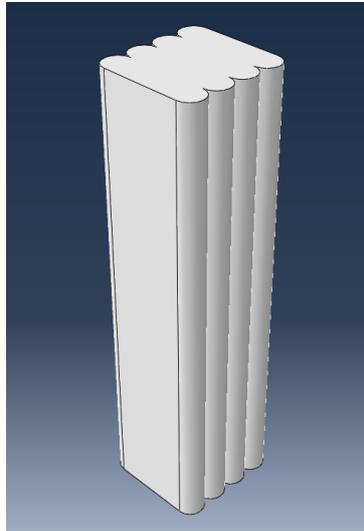


Figura 3.2: Esempio di wall generato

Una volta generati, i wall vengono orientati lungo i lati dell'RVE. Unendo le due geometrie si ottiene l'RVE completo.

Si riportano di seguito alcuni esempi di geometria di stampa ricreata variando i parametri in input.

Il primo esempio in Figura 3.3 è riportato per evidenziare la differenza tra geometria ideale ($W' = W$) e geometria reale ($W' \neq W$)

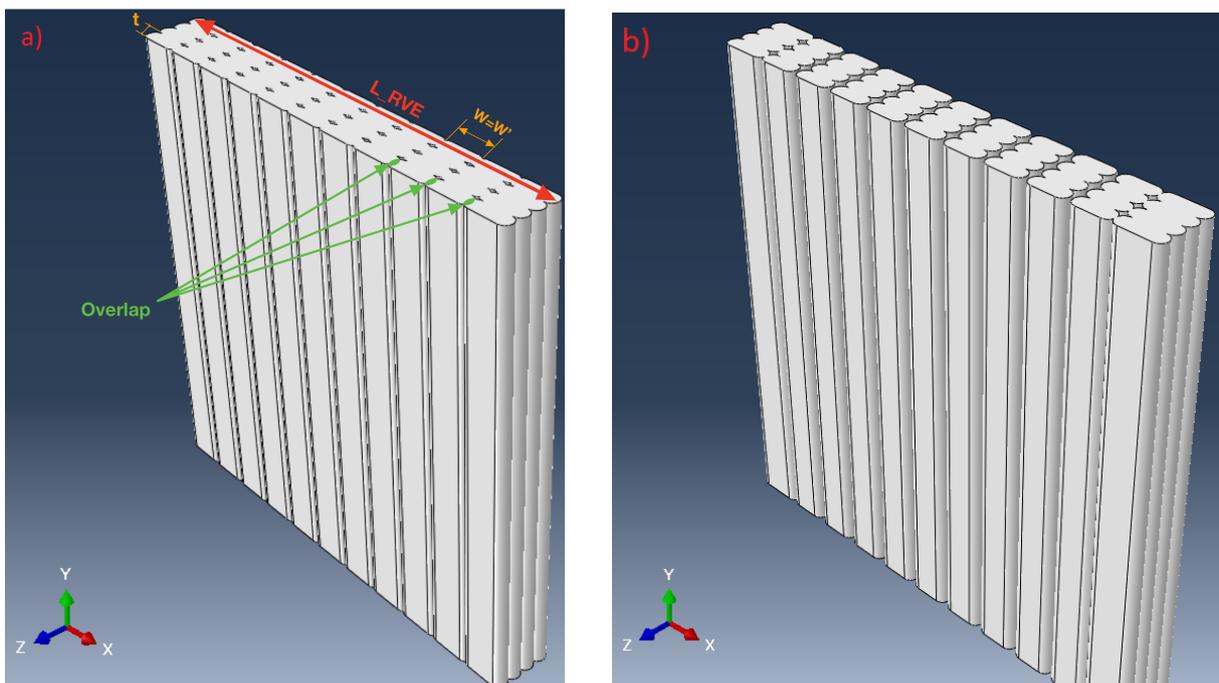


Figura 3.3: Geometria ideale ($W' = W$) a), geometria reale ($W' \neq W$) b)

Cambiando i parametri che orientano il riempimento e i vari layer (θ_0 e angle_shift) si possono ottenere le geometrie di stampa necessarie allo studio, un esempio è riportato in Figura 3.4

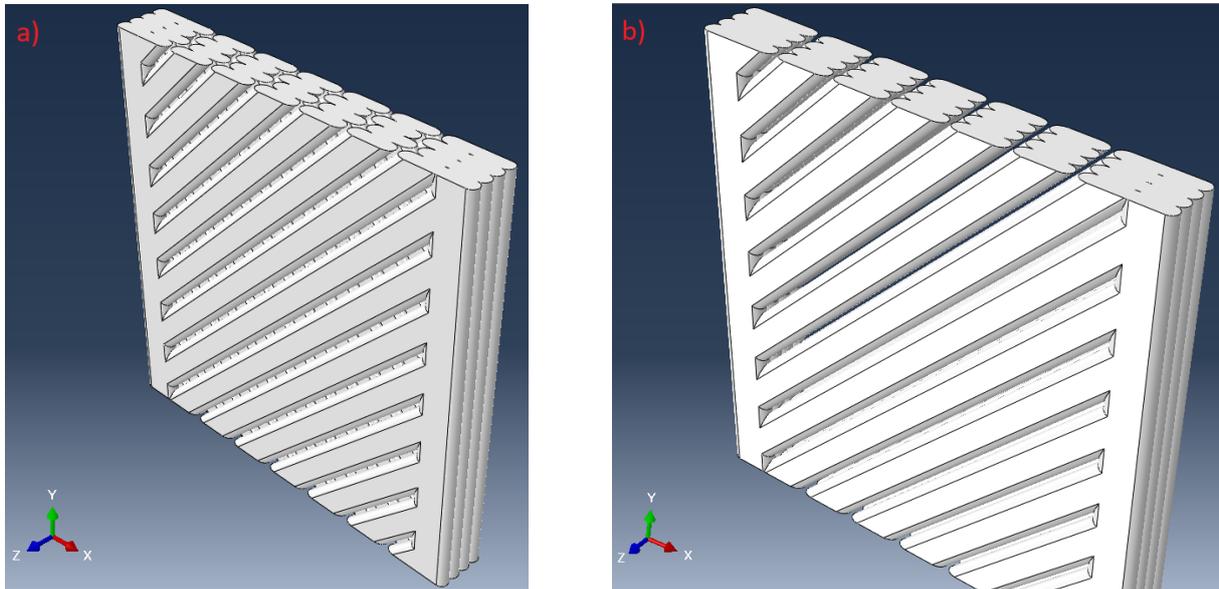


Figura 3.4: Riempimento 45° alternato a), riempimento solo 45° b)

Le geometrie mostrate in Figura 3.3 e 3.4, sono rappresentative di una porzione di un provino a osso di cane che verrà stampato e utilizzato per la validazione sperimentale della modellazione numerica, in particolare l'area del provino rappresentata è quella in Figura 3.5

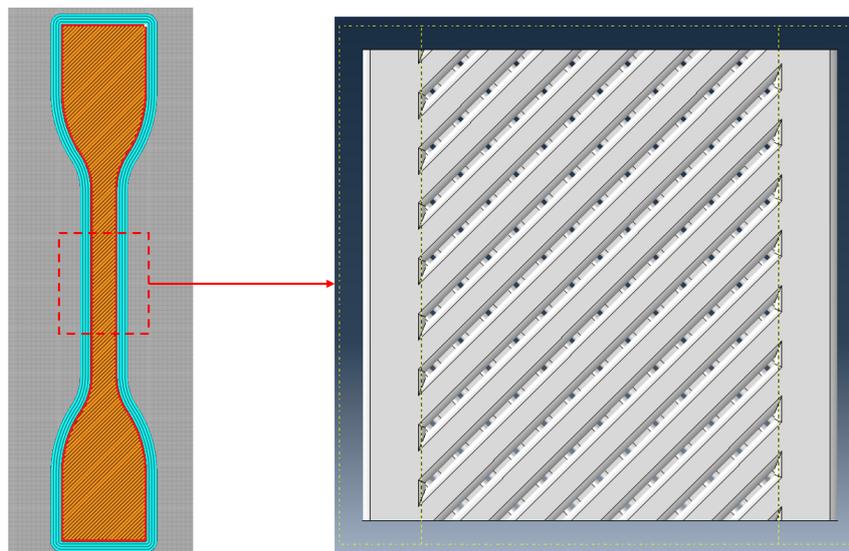


Figura 3.5: Porzione di provino rappresentata

Ci si limita a riprodurre la geometria centrale del provino, essendo quella che andrà a resistere alle sollecitazioni durante la prova di trazione.

3.2 Materiale polimerico rinforzato con fibre corte

Come anticipato nell'introduzione il materiale utilizzato è un filamento di nylon carbon prodotto da **Fabbrix**. Ovvero un filamento di nylon 6,12 (Polyamide 6,12), arricchito con fibra di carbonio corta allineata lungo la direzione di estrusione del filamento.

Le proprietà del materiale non sono fornite nel datasheet del produttore, motivo per il quale sono state stimate da uno studio sulla microstruttura del materiale, condotto precedentemente dal gruppo di ricerca, come riportato di seguito.

Lo studio in questione utilizza dei modelli numerici per andare a ricreare la microstruttura e stimarne le proprietà meccaniche.

Come prima cosa è stata modellata la distribuzione delle fibre corte all'interno della matrice polimerica

A tal fine si è assunto un diametro della fibra costante, mentre la lunghezza della fibra è stata descritta attraverso una funzione di probabilità normale $P(l)$ creata su un set di misurazioni sulla lunghezza della fibra.

L'orientamento della fibra nel materiale è stato descritto con un vettore unitario $p(\theta, \phi)$, con θ angolo polare e ϕ angolo azimutale.

Attraverso un algoritmo è stata creata la microstruttura del materiale, aggiungendo in maniera iterativa fibre corte di diametro costante con la lunghezza e l'orientamento generato casualmente dalle funzioni di probabilità $P(l)$ e $\Psi(p(\theta, \phi))$, un esempio di volume ricreato è riportato in Figura 3.6.

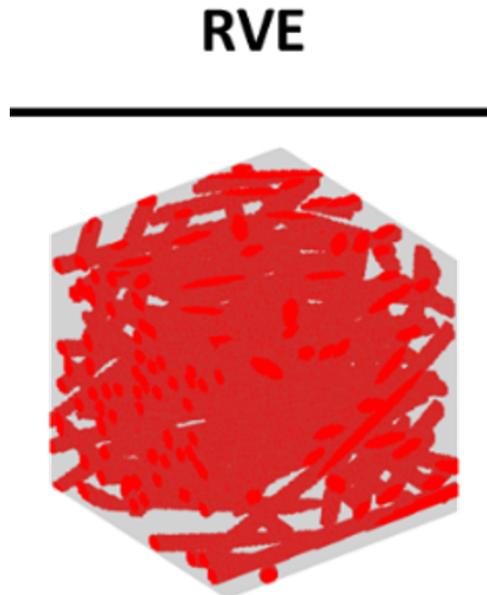


Figura 3.6: RVE generato dall'algoritmo, disposizione delle fibre.

La risposta meccanica dell'RVE (Representative Volume Element) è stata studiata utilizzando l'algoritmo FFT (Fast Fourier Transform), modellando la fibra come un materiale trasversalmente isotropo, con isotropia nel piano trasversale alla direzione orientata della fibra, e la matrice come un materiale elasto-plastico isotropo.

Nel complesso quindi il materiale che costituisce la nostra bead è modellato come un materiale elasto-plastico trasversalmente isotropo, con le costanti elastiche stimate dal modello numerico sulla risposta meccanica dell'RVE. La risposta evidenzia in oltre una

plasticità anisotropa, modellata con il potenziale di Hill e con la seguente funzione di snervamento:

$$f(\sigma, \sigma_y) = \phi(\sigma) - \sigma_y(\epsilon^p) = 0 \quad (3.1)$$

dove σ_y è la legge di incrudimento e $\phi(\sigma)$ è lo stress equivalente secondo Hill calcolato come

$$\phi(\sigma) = \sqrt{F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2} \quad (3.2)$$

dove σ_i sono gli stress lungo le direzioni principali e F, G, H, L, M, e N sono i potenziali di Hill e sono definiti come segue

$$\begin{aligned} F &= \frac{\sigma_0^2}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{22}^2} + \frac{1}{\sigma_{33}^2} - \frac{1}{\sigma_{11}^2} \right), & G &= \frac{\sigma_0^2}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{33}^2} + \frac{1}{\sigma_{11}^2} - \frac{1}{\sigma_{22}^2} \right), & H &= \frac{\sigma_0^2}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{22}^2} + \frac{1}{\sigma_{11}^2} - \frac{1}{\sigma_{33}^2} \right) \\ L &= \frac{3}{2} \left(\frac{\tau_0}{\tau_{23}} \right)^2, & M &= \frac{3}{2} \left(\frac{\tau_0}{\tau_{13}} \right)^2, & N &= \frac{3}{2} \left(\frac{\tau_0}{\tau_{12}} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

con σ_{ii} carichi di snervamento lungo ogni direzione e τ_{ij} carichi di snervamento a taglio tra le direzioni ij .

I moduli elastici, i moduli di Poisson e i potenziali di Hill sono stati stimati dalla risposta meccanica dell'RVE, ottenendo i risultati riportati in Tabella 3.2:

Tabella 3.2: Stima parametri del materiale

Costanti Elastiche					
E1	E2	E3	G12(=G13)	$\nu_{12}(=\nu_{13}=\nu_{23})$	G23
2.31 GPa	1.78 GPa	1.83 GPa	0.7 GPa	0.21	0.77 GPa
Poterziali di Hill					
F	G	H	L	M	N
2.31	0.84	0.39	11.2	7.08	8.32

Nel software Abaqus i potenziali sono definiti come segue

$$\begin{aligned} F &= \frac{\sigma_0^2}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{22}^2} + \frac{1}{\sigma_{33}^2} - \frac{1}{\sigma_{11}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right), \\ G &= \frac{\sigma_0^2}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{33}^2} + \frac{1}{\sigma_{11}^2} - \frac{1}{\sigma_{22}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right), \\ H &= \frac{\sigma_0^2}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{22}^2} + \frac{1}{\sigma_{11}^2} - \frac{1}{\sigma_{33}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right), \\ L &= \frac{3}{2} \left(\frac{\tau_0}{\tau_{23}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{23}^2}, \\ M &= \frac{3}{2} \left(\frac{\tau_0}{\tau_{13}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{13}^2}, \\ N &= \frac{3}{2} \left(\frac{\tau_0}{\tau_{12}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{12}^2} \end{aligned} \quad (3.4)$$

e richiede in input per la descrizione del materiale i vari R .

Conoscendo i valori di F, G e H si mettono a sistema le tre equazioni e si calcolano i valori

dei vari R_{ij} . Applicando la formula inversa sui valori di L,M e N si stimano i valori degli R_{ij} .

In definitiva quindi per modellare il materiale all'interno di Abaqus saranno usati i parametri riportati in Tabella 3.3

Tabella 3.3

Costanti Elastiche					
E1	E2(=E3)	G12(=G13)	$\nu_{12}(=\nu_{13}=\nu_{23})$	G13	
2.3 GPa	1.8 GPa	0.7 GPa	0.2	0.77 GPa	
Potenzi di Hill (Abaqus)					
R11	R22	R33	R23	R13	R12
0.9	0.6	0.56	0.42	0.46	0.37

assumendo come piano di isotropia quello trasversale alla direzione 1.

3.3 Modellazione della porosità

Il modello CAD della geometria di stampa, ricreato in Abaqus, riproduce i difetti regolari dovuti alla scelta dei parametri di stampa. Per avere una rappresentazione completa della geometria interna, è necessario considerare i difetti irregolari.

In una prima versione dello script, i difetti vengono aggiunti al CAD della geometria precedentemente generato inserendo dei vuoti con diametro e volume dei difetti analizzati. Lo script genera iterativamente i difetti fino al raggiungimento di una porosità target, definita sulla base delle analisi sperimentali.

Un esempio della geometria con i difetti aggiunti è riportato in Figura 3.7.

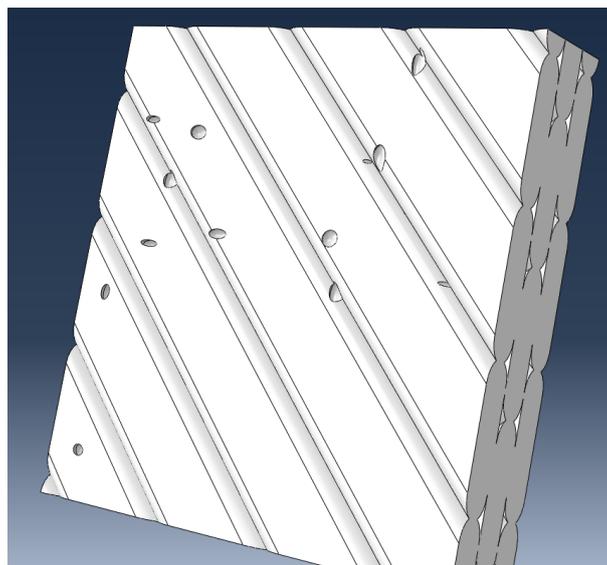


Figura 3.7: Geometria ricreata con vuoti

Quest'approccio genera una geometria troppo complicata per creare una mesh regolare, rendendo necessaria la generazione di un numero di elementi troppo elevato. Le analisi risultano quindi troppo dispendiose dal punto di vista computazionale.

Per risolvere questo problema, è stata sviluppata una seconda versione dello script descritta nel paragrafo seguente.

3.3.1 RVE per modellare l'effetto della porosità

Il fine di considerare i difetti irregolari, è quello di studiare l'effetto della loro presenza sulle proprietà meccaniche del materiale.

L'approccio utilizzato per raggiungere quest'obbiettivo segue gli step di seguito:

- Creare un RVE con le proprietà meccaniche del materiale - fornite dallo studio di cui si è parlato nel paragrafo precedente;
- riempire l'RVE con i difetti irregolari;
- eseguire delle simulazioni per valutare la riduzione dei moduli elastici.

Dall'analisi della porosità condotta sul campione 14 si ottengono le informazioni riportate nella Tabella 3.4.

Si è scelto di studiare questo campione perchè condivide i parametri di stampa con i provini impiegati nelle prove di trazione, sulla base delle quali verrà poi validato il modello FEM.

Tabella 3.4: Descrizione vuoti

	Diametro	Volume	Porosità
	μm	μm^3	/
Media	232,2	790155,6	10%
Dev.St	116,9	1143495,6	/

I valori di media e deviazione standard, del diametro e del volume dei difetti, indicano una forte dispersione dei valori trovati con le scansioni, come si può vedere meglio negli istogrammi riportati in Figura 3.8

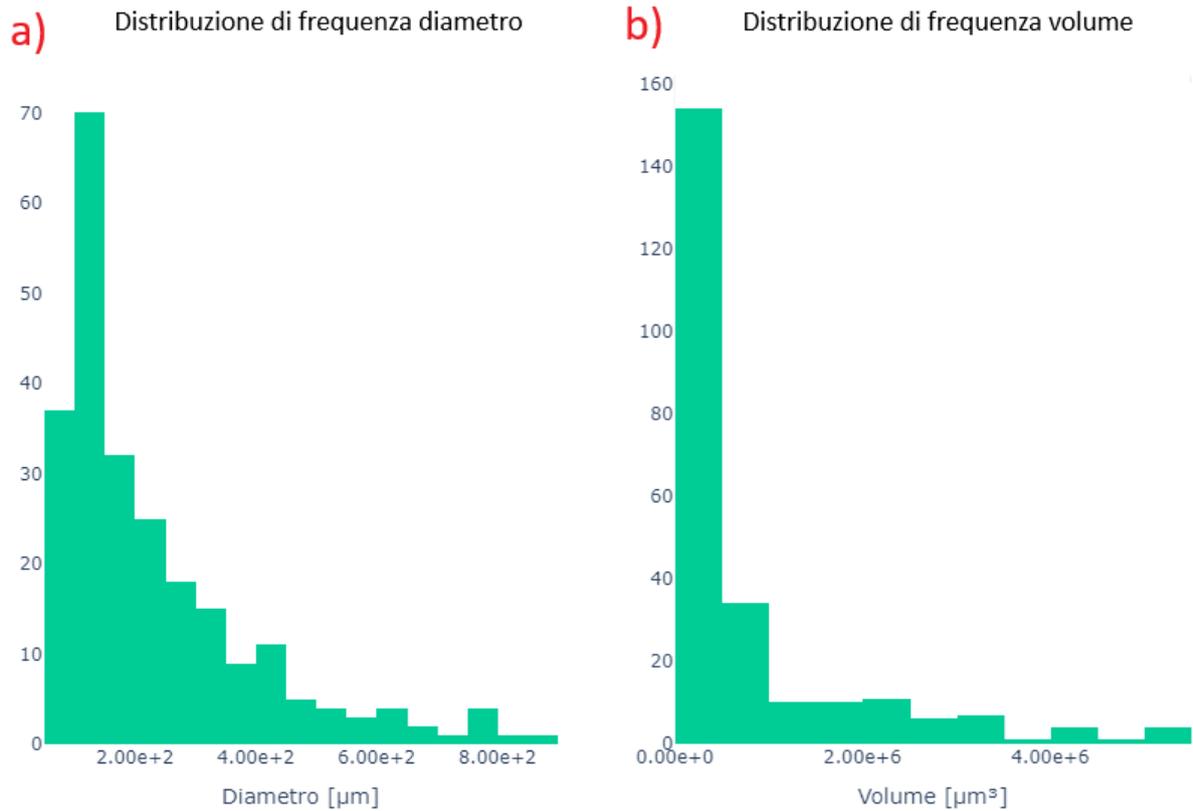


Figura 3.8: a) distribuzione di frequenza del diametro, b) distribuzione di frequenza del e del volume

Avendo i valori per descrivere i difetti si è passati alla creazione dell'RVE. A questo punto però è emersa un'altra criticità, i valori di diametro e volume dei difetti, inseriti nello script che li crea, vanno a creare una geometria troppo complicata per la generazione della mesh, questa volta a causa della forma dei vuoti. Il problema, è che vengono a crearsi dei vuoti molto schiacciati sull'asse di estrusione del materiale e allungati lungo la direzione di stampa, come si mostra in Figura 3.9

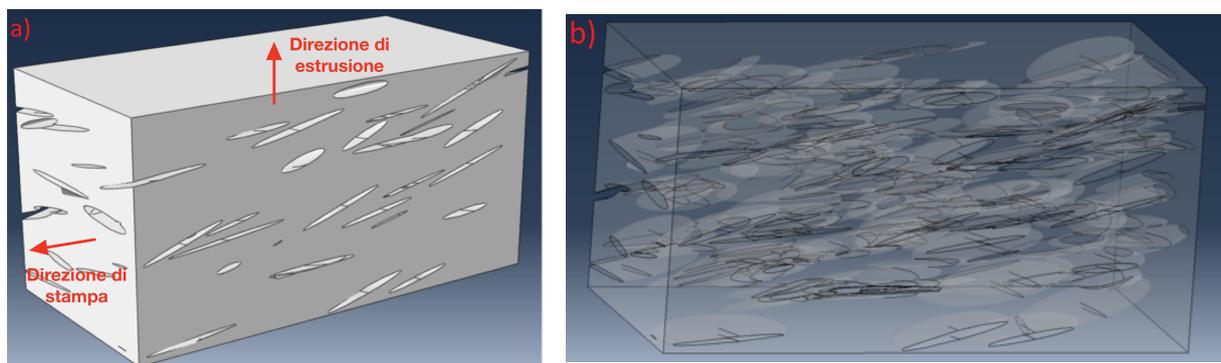


Figura 3.9: Vuoti modello; a) vista esterna, b) vista interna

Questa forma e disposizione dei vuoti ha senso nella fisica del processo, il materiale viene estruso e schiacciato tra l'ugello e il piano di stampa lungo la direzione di estrusione, mentre viene spalmato lungo la direzione di stampa. Tuttavia, le geometrie così generate presentano angoli molto acuti tra due superfici e

spigoli vivi all'interno, come si mostra nella Figura 3.9.

Oltre alla complessità nel generare una mesh della geometria come quella mostrata, sorge un vero e proprio problema di compenetrazione delle superfici e conseguenti errori di costruzione del modello durante l'aggiunta dei vuoti. Gli errori di costruzione in questione sono riportati in Figura 3.10

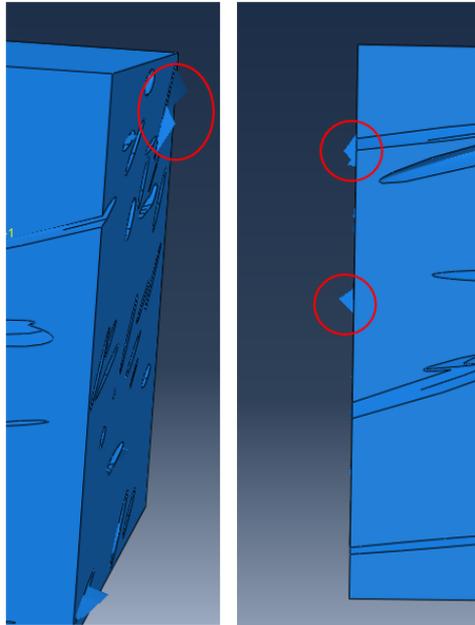


Figura 3.10: Errori di costruzione del modello

Per risolvere questo problema e poter procedere con le simulazioni, si è deciso di non utilizzare i valori di diametro e volume dei vuoti, ma di utilizzare solo il valore di porosità come target, questo per fare in modo di avere una geometria che permettesse la creazione della mesh e la simulazione sull'RVE.

Impostando una porosità del 10% nello script si è ottenuta la geometria riportata in Figura 3.11

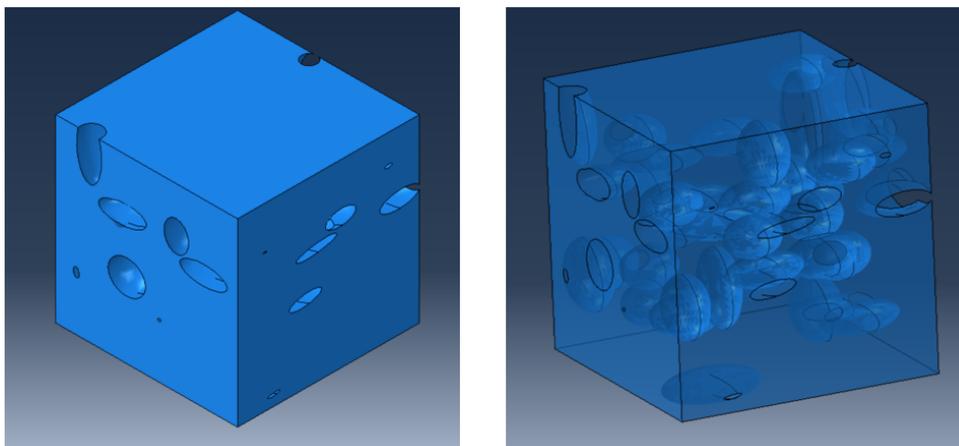


Figura 3.11: RVE porosità 10%

Si fa notare con la Figura 3.12 che la geometria generata descrive sufficientemente la direzione e l'orientamento dei vuoti.



Figura 3.12: RVE porosità 10%, orientamento vuoti

L'approssimazione fatta sulle dimensioni dei vuoti, intese come diametro e volume, è comunque accettabile nel caso studio, in quanto non si è interessati a conoscere lo stato di tensione del materiale intorno al difetto e a studiare come questo perturba la deformazione localmente, l'attenzione invece è più rivolta verso la risposta complessiva del materiale affetto da porosità.

3.3.2 Simulazioni dell'RVE e risultati

A questo punto si è proceduto a impostare le simulazioni.

Le simulazioni consistono in una prova di trazione lungo le tre direzioni principali, questo per valutare la riduzione dei moduli elastici in tutte e tre le direzioni. Anche se il materiale è trasversalmente isotropo lungo la direzione 1, ha quindi lo stesso modulo elastico lungo 2 e 3 come riportato in Tabella 3.3, è necessario comunque condurre una prova di trazione sia lungo 2 che lungo 3, per cogliere l'effetto dell'orientamento dei vuoti.

Per come sono disposti infatti, Figura 2.4, ci si aspetta che una prova di trazione lungo la direzione 3 riveli una riduzione di modulo elastico maggiore rispetto a una prova di trazione in direzione 1 o 2.

Per ogni direzione sono state assegnate le condizioni al contorno mostrate in Figura 3.13

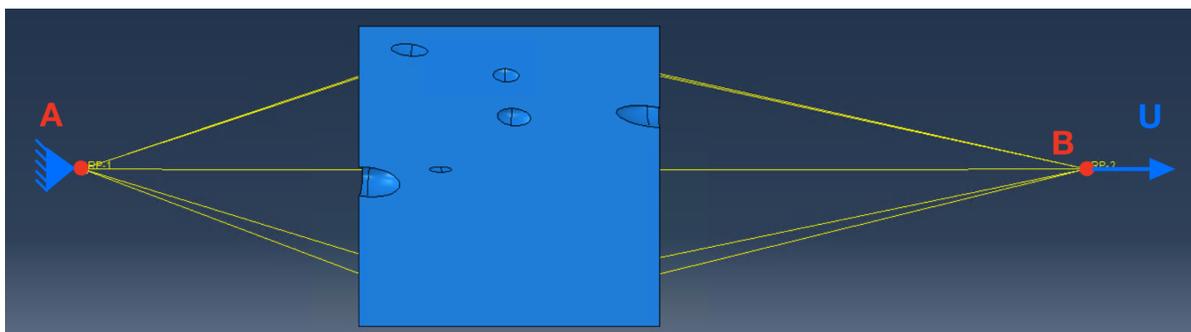


Figura 3.13: Esempio condizioni al contorno

quindi tutti gli spostamenti vincolati nel nodo **A** e uno spostamento U nel nodo **B**. I nodi A e B sono accoppiati cinematicamente alle facce del cubo trasversali alla direzione di trazione, questo è un tipo di interazione presente in Abaqus e permette di ridurre le condizioni al contorno, che si dovrebbero applicare a ogni nodo della faccia del cubo, a un solo nodo di riferimento.

Al modello è assegnato un materiale avente le caratteristiche riportate in Tabella 3.3. Per la descrizione del tratto plastico, oltre alla scelta del criterio, è necessario assegnare una curva "Plastic Stress-Plastic Strain", la curva assegnata è riportata in tabella 3.5

Tabella 3.5

Plastic Stress MPa	Plastic Strain
50	0
53	0.08
55	0.1
56	0.13
56.5	0.2
56.8	0.5

Il primo valore della tabella rappresenta il carico di snervamento σ_y assegnato al materiale, cioè l'inizio della plasticità, anche questo valore proviene dallo studio di cui si è parlato nel paragrafo 3.2.

Si precisa inoltre che le prove di trazione nelle tre direzioni sono state ripetute per tre RVE aventi tutti la stessa porosità, questo è stato fatto per considerare gli effetti della casualità dei vuoti distribuiti all'interno dell'RVE.

Lanciate le simulazioni e ottenuti i risultati, sono stati creati i grafici di trazione.

Per farlo, è stato estratto il valore della reazione vincolare nel nodo **B** e il valore di spostamento nel nodo **A**. Si è poi diviso il valore della reazione vincolare F per la sezione del cubo S e il valore di spostamento U per la lunghezza del lato L Figura 3.14, ottenendo tensione e deformazione

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad \epsilon = \frac{U}{L} \quad (3.5)$$

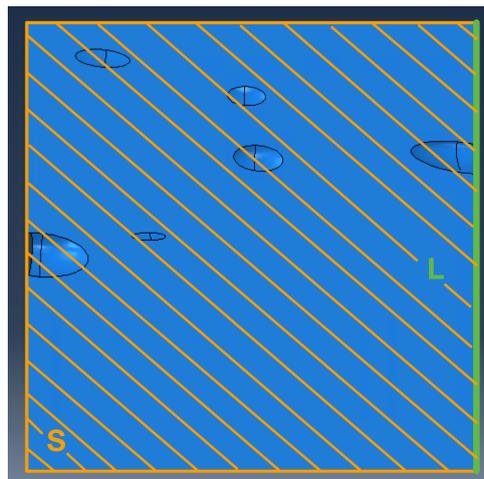


Figura 3.14: Lato e sezione del cubo

I grafici delle prove di trazione simulate nelle tre direzioni sono riportati nelle Figure 3.15, 3.16 e 3.17.

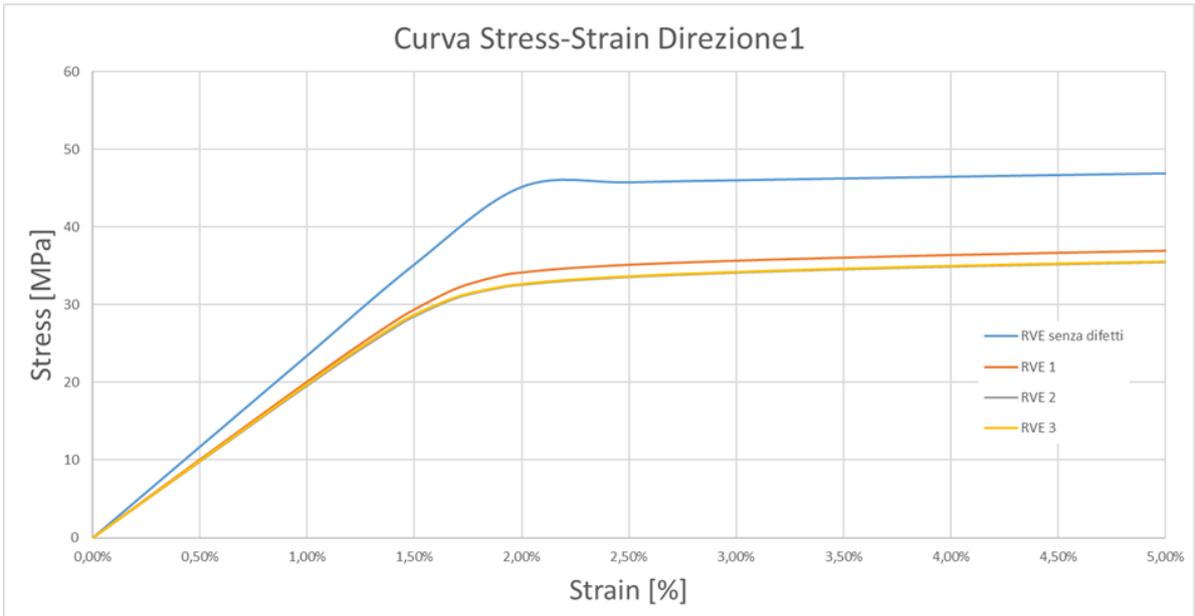


Figura 3.15: Curva di trazione direzione 1

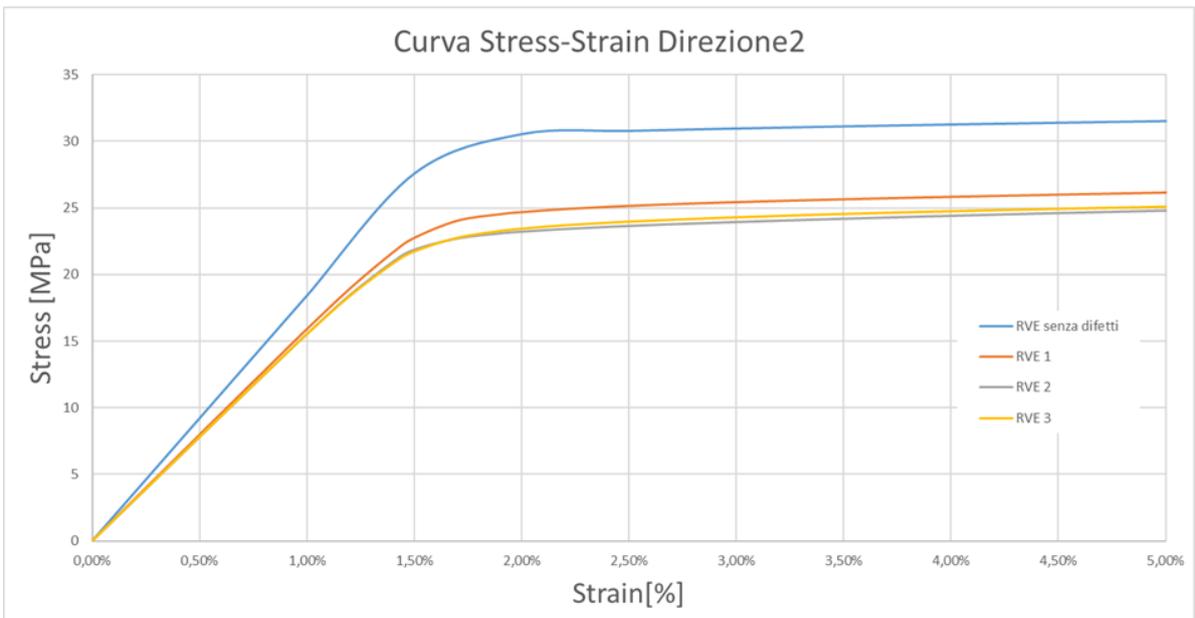


Figura 3.16: Curva di trazione direzione 2

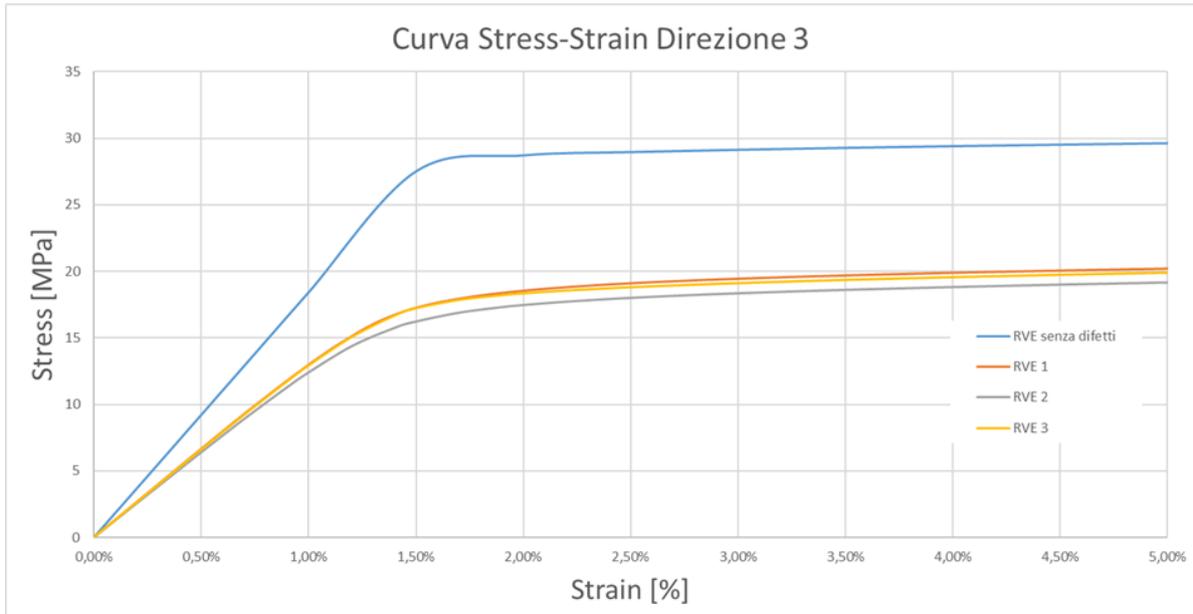


Figura 3.17: Curva di trazione direzione 3

Ottenute le curve, è stato possibile valutare la riduzione dei moduli elastici nelle tre direzioni dovuta alla porosità, si riportano i risultati in Tabella 3.6

Tabella 3.6: Riduzione moduli elastici

	Direzione 1	Direzione 2	Direzione 3
E MPa	2300	1800	1800
E* MPa	1985	1570	1310
ΔE	-13,7%	-12,7%	-27,2%

In Tabella 3.6, i valori E* fanno riferimento ai moduli elastici degli RVE con i difetti, in particolare per ogni direzione è stato preso un modulo elastico medio tra i tre RVE. Dai risultati ottenuti si nota come quanto ci si aspettava lungo la direzione 3 accada effettivamente, ovvero una riduzione del modulo elastico maggiore rispetto alla direzione 2, questo dovuto alla disposizione e all'orientamento dei vuoti, che condiziona il modo in cui risponde il materiale alla sollecitazione.

L'idea a questo punto, è utilizzare questi moduli elastici ridotti per caratterizzare il materiale all'interno dei modelli che ricreano le geometrie di stampa.

3.4 Prova di trazione di un campione stampato: modellazione numerica e validazione sperimentale

Per validare il modello FEM della geometria di stampa, calibrando i parametri che modellano il materiale in Abaqus, sono state fatte delle prove di trazione su dei componenti stampati.

3.4.1 Provini stampati e prove di trazione

I provini stampati hanno la geometria mostrata in Figura 3.18

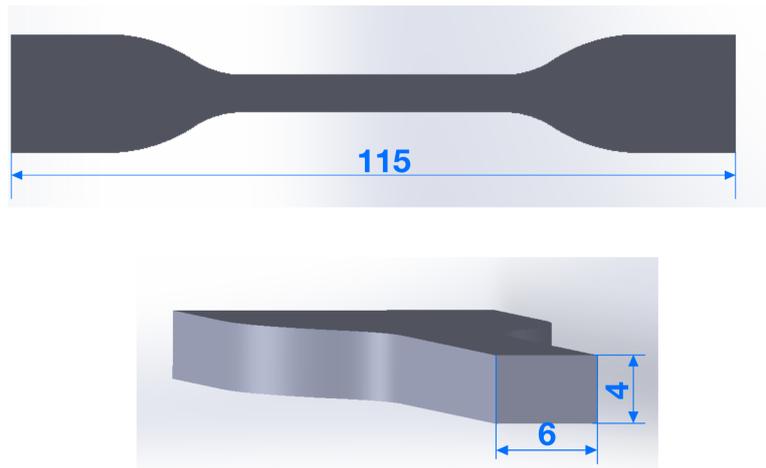


Figura 3.18: Provino prove di trazione, le misure riportate sono in mm

Sono stati stampati quattro provini con i parametri di stampa riportati in Tabella 3.7.

Tabella 3.7: Provini stampati

Provino	H	W	F	Pattern di riempimento
1	0.2	0.6	0.5	45° alternato
2	0.2	0.6	0.5	90° alternato
3	0.2	0.6	0.5	45°
4	0.2	0.6	0.5	0°

Stampati i provini sono state prese le misure effettive della larghezza e dello spessore della sezione centrale del provino riportate in Tabella 3.8.

Tabella 3.8: Provini stampati, dimensioni sezione centrale

Provino	Spessore	Larghezza	Sezione
/	mm	mm	mm ²
1	4	6.5	26
2	4	6.5	26
3	3.9	6.2	24.18
4	3.9	6.1	23.79

E' stato possibile procedere con le prove di trazione. Tutti i provini sono stati afferrati sulla zona di afferraggio superiore e inferiore. Si riporta in Figura 3.19 un esempio di posizionamento dei provini

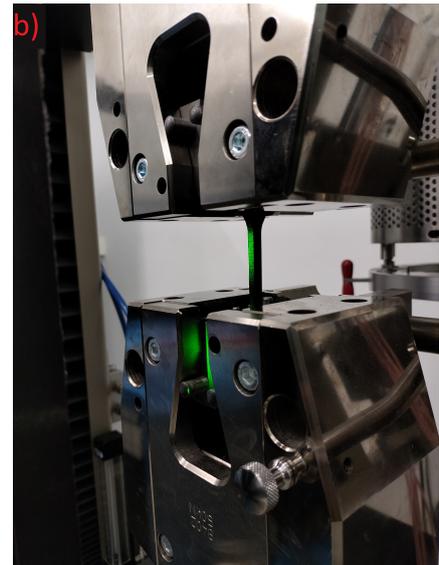
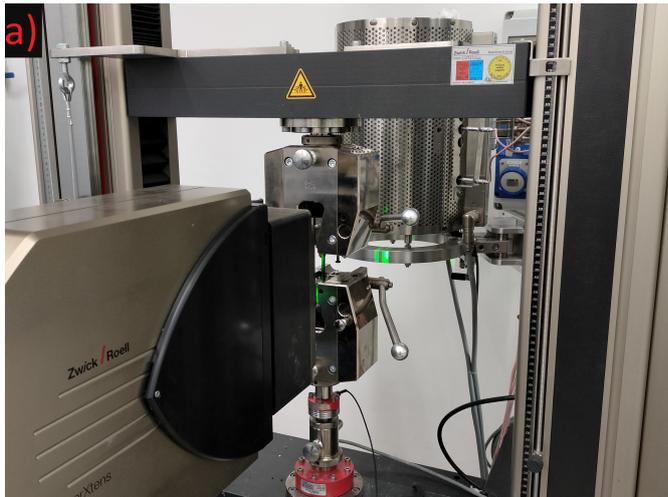


Figura 3.19: Setup prova di trazione: a) posizionamento laser, b) afferraggio provino

Nelle due figure la luce verde sul provino proviene dal laser, utilizzato per leggere il valore di deformazione sulla superficie del provino.

La prova di trazione è controllata in velocità, si impone quindi lo spostamento e si legge il valore di forza restituito dalla cella di carico posizionata sotto la pinza inferiore (cilindro rosso nella figura a sinistra).

La cella di carico ha carico massimo di 5 kN, la prova di trazione è stata condotta ad una velocità pari a 1 mm/min per rimanere in campo statico, ed è stato applicato un pre-carico di 5 N al provino.

I risultati delle prove verranno mostrati insieme a quelli delle simulazioni numeriche per un confronto.

3.4.2 Modello numerico della geometria di stampa

Inserendo i parametri di stampa nell'equazione 2.10 è stata stimata la larghezza reale della bead, la larghezza reale stimata è $W' = 0.4802$, il valore è stato utilizzato nello script su Abaqus per ricreare la geometria dei 4 provini, si mostrano le geometrie modellate in Figura 3.20

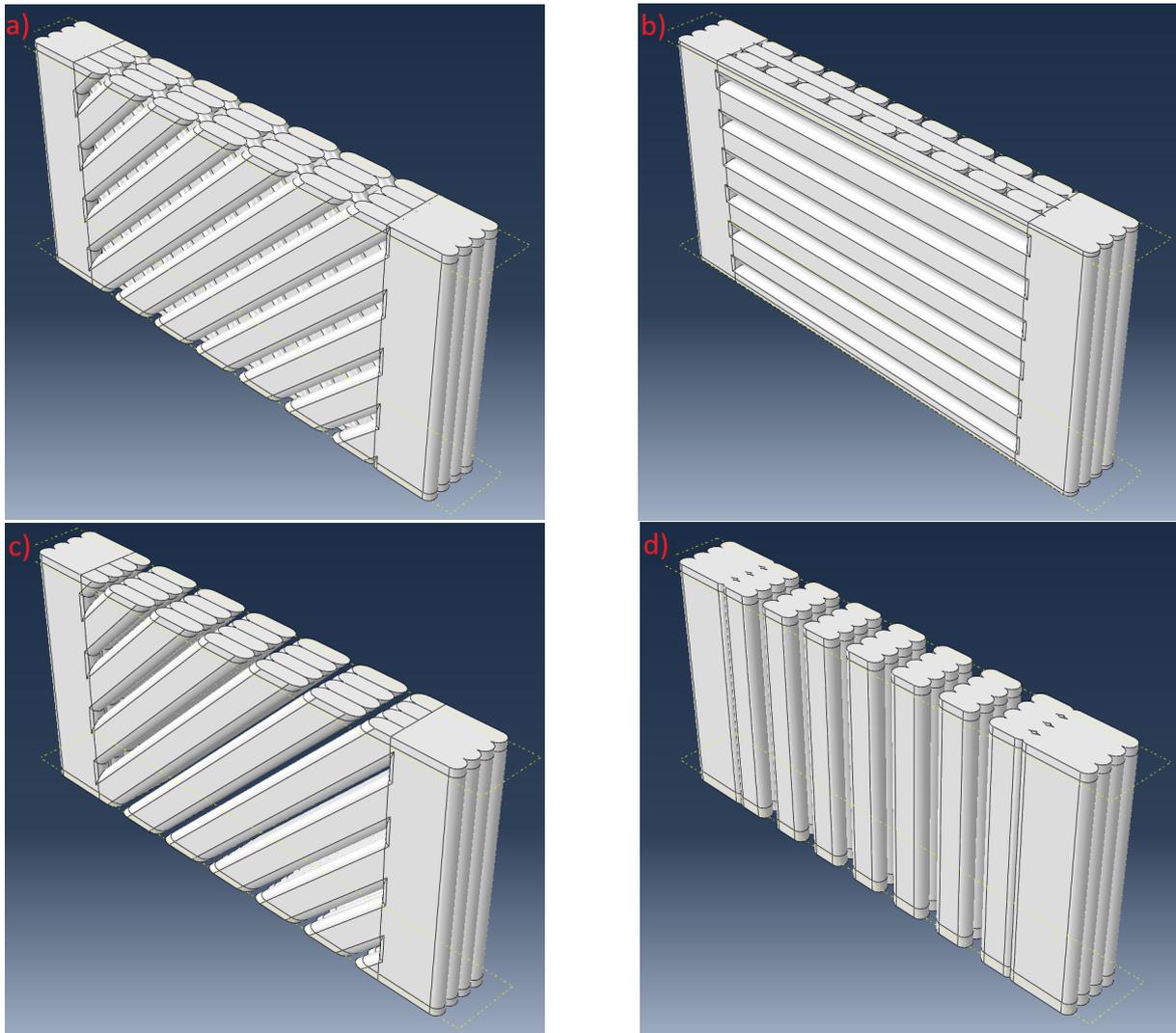


Figura 3.20: Geometrie di stampa provini di trazione; a) provino 1 , b) provino 2, c) provino 3, d) provino 4

Sono state assegnate le condizioni al contorno per simulare la prova di trazione, così come fatto con gli RVE nelle simulazioni precedenti.

In Figura 3.21 si riporta uno schema della condizioni al contorno assegnate, valido per tutte le simulazioni fatte

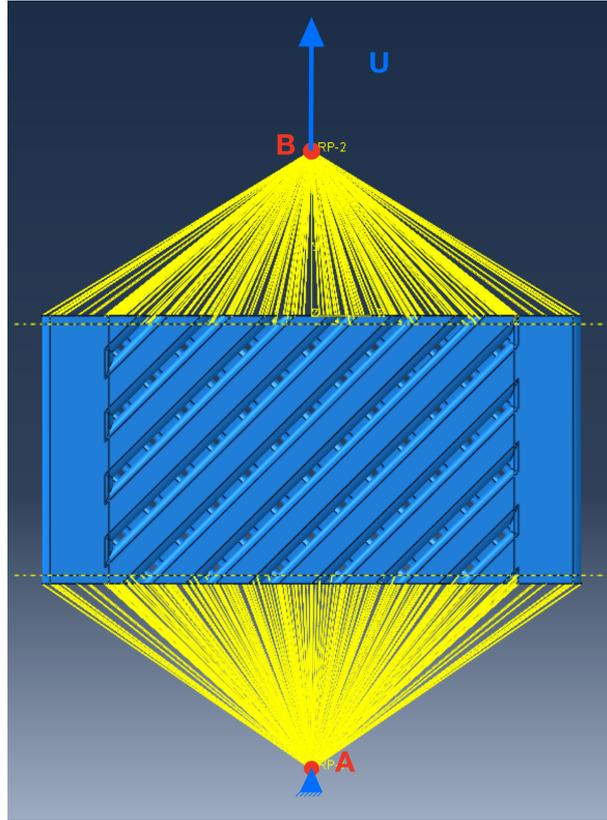


Figura 3.21: Condizioni al contorno su geometria di stampa

Anche in questo caso un'estremità del modello è stata completamente incastrata, nodo A, mentre all'altra estremità è stato imposto uno spostamento U , nodo B.

Si riportano di seguito alcune assunzioni fatte per il setup delle simulazioni:

- non sono stati simulati tutti i layer di stampa del provino reale, per ridurre la complessità del modello e i tempi di simulazione. Sono stati ricreati solo 4 layer, rispetto ai 20 presenti nel componente stampato, curandosi di avere lo stesso numero di layer in entrambe le direzioni, quindi, prendendo come esempio il provino 1, due layer stampati a 45° e due stampati a -45° .
- i parametri utilizzati per modellare il materiale sono quelli riportati in Tabella 3.3. Non sono stati utilizzati i moduli elastici E^* influenzati dalla porosità. Questo perché, come si vedrà nei grafici dei risultati, utilizzando i moduli elastici "puliti" si va comunque a sottostimare la curva sperimentale nel tratto elastico. Questo potrebbe significare che i moduli elastici forniti sono già comprensivi degli effetti della porosità. Resta comunque valida la trattazione fatta sugli RVE e la metodologia applicata.
- i nodi A e B sono stati usati per applicare le condizioni al contorno e per leggere i valori della reazione vincolare F durante tutta la simulazione, in modo da poter ricreare un grafico Stress-Strain.
- nel calcolo dello stress durante il post processing si è utilizzata la sezione S riportata in Figura 3.22.

- dopo il tratto plastico non è stato simulato il danneggiamento del materiale.

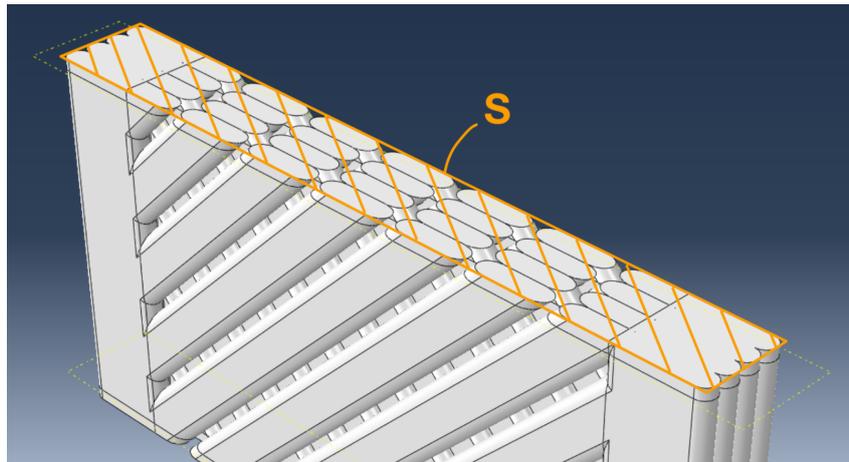


Figura 3.22: Sezione considerata per il calcolo dello stress

Altra considerazione importante sul setup della simulazione riguarda l'assegnazione dell'orientamento degli elementi del modello.

A ogni layer è stato assegnato un orientamento degli elementi coerente con le proprietà del materiale. Si ha quindi la direzione 1 allineata con la direzione di stampa, la direzione 2 contenuta nel piano di stampa e trasversale alla direzione di stampa, la direzione 3 uscente dal piano si stampa e trasversale alla direzione 2. Essendo le fibre di carbonio all'interno del materiale allineate lungo la direzione di stampa, nel modello questa direzione corrisponderà alla direzione 1.

In Figura 3.23 si riporta uno schema rappresentativo

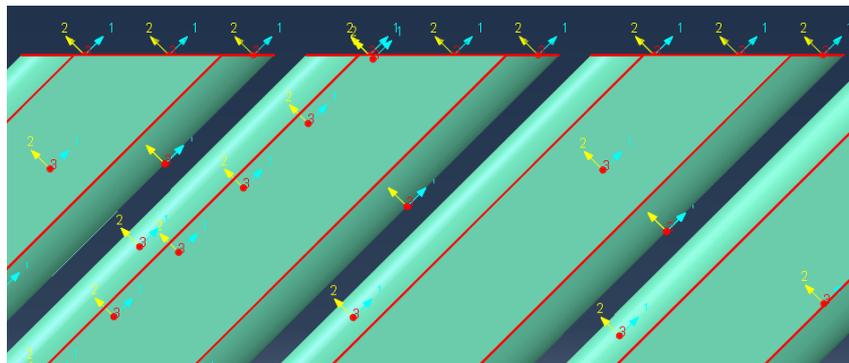


Figura 3.23: Assegnazione orientamento degli elementi

3.4.3 Risultati numerici e confronto sperimentale

Utilizzando i parametri del materiale riportati in tabella 3.3 si sono ottenute queste prime curve di trazione

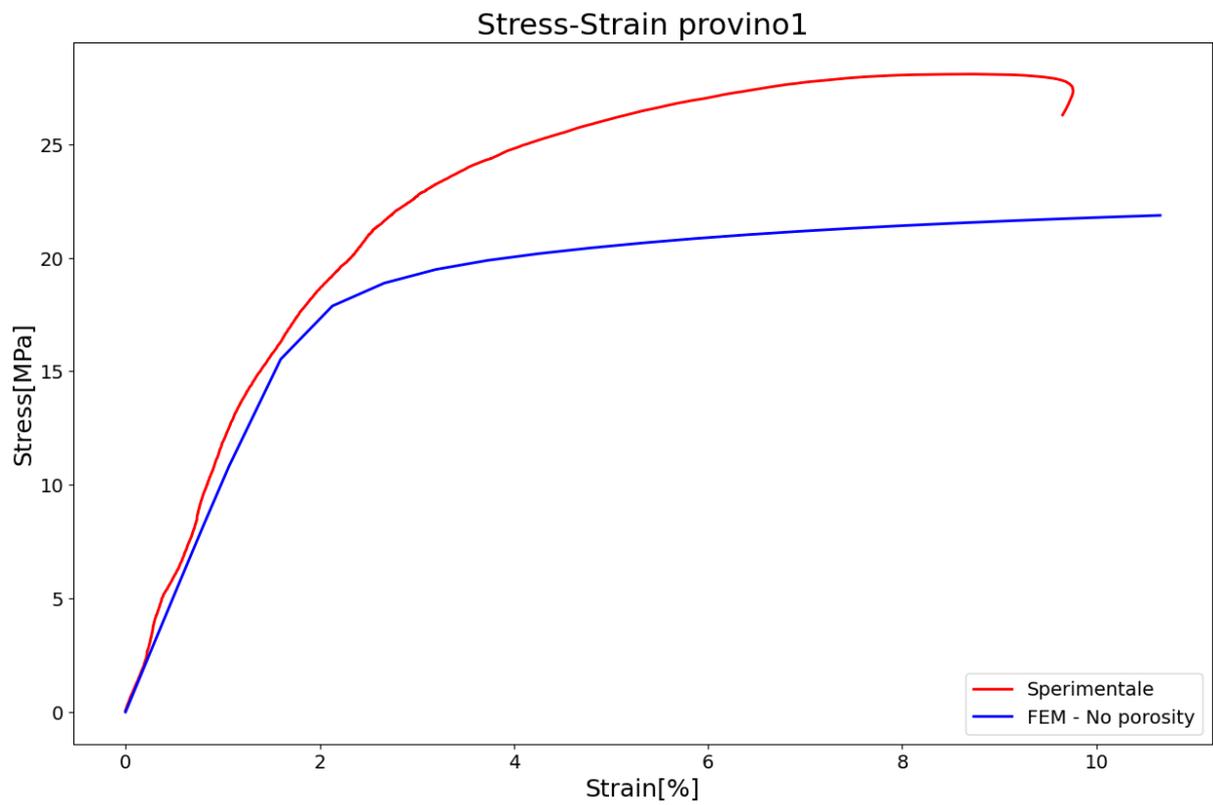


Figura 3.24: Curva di trazione provino 1

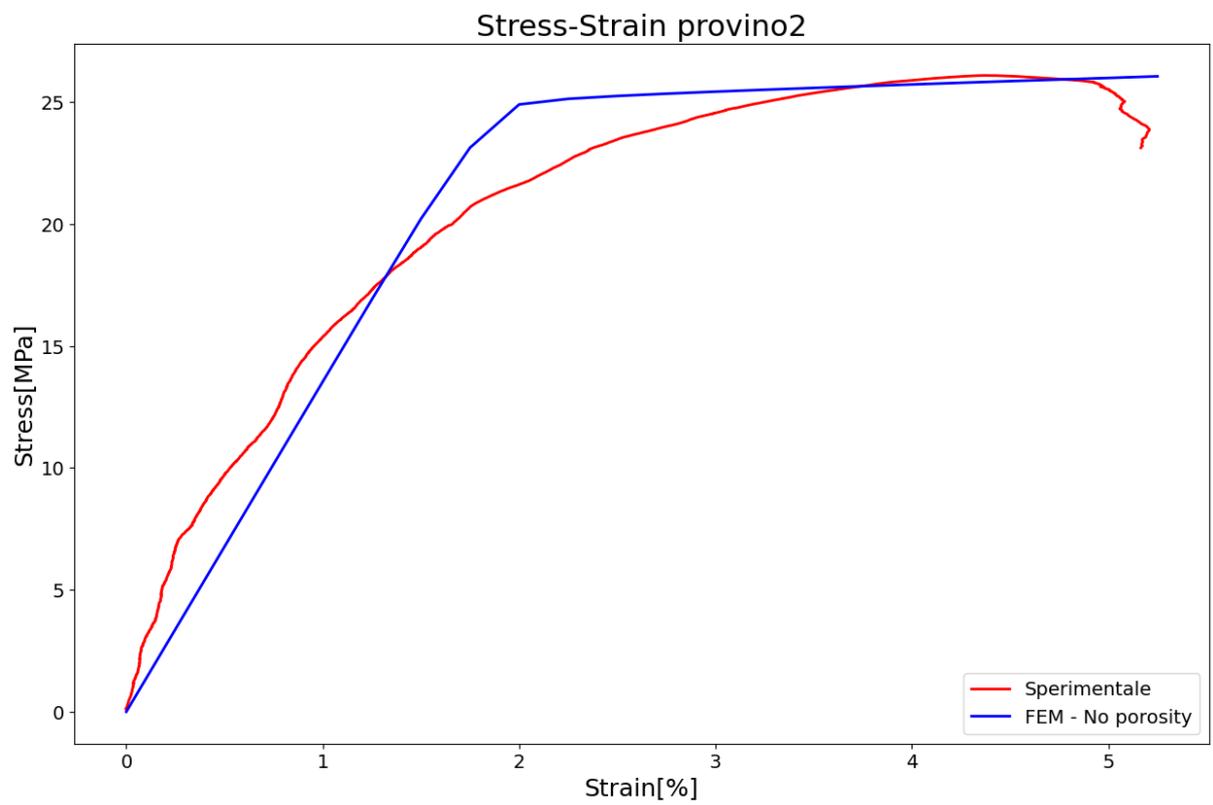


Figura 3.25: Curva di trazione provino 2

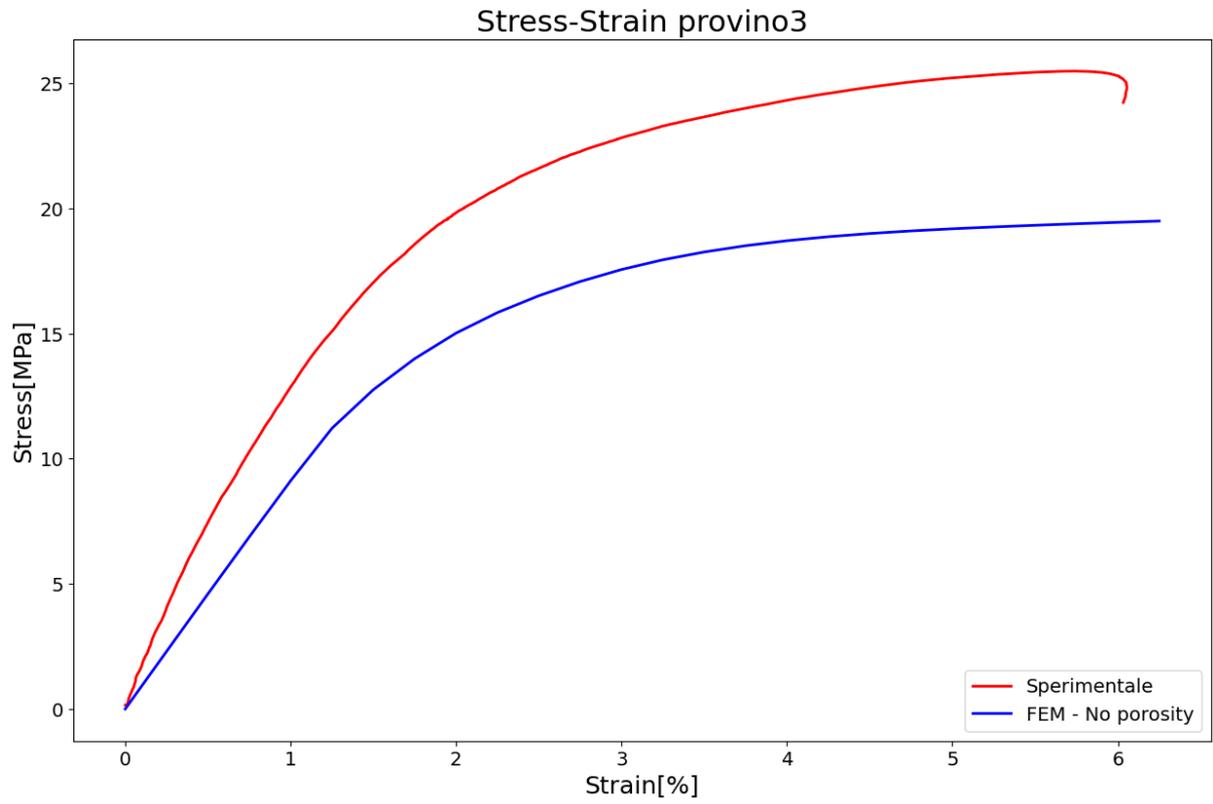


Figura 3.26: Curva di trazione provino 3

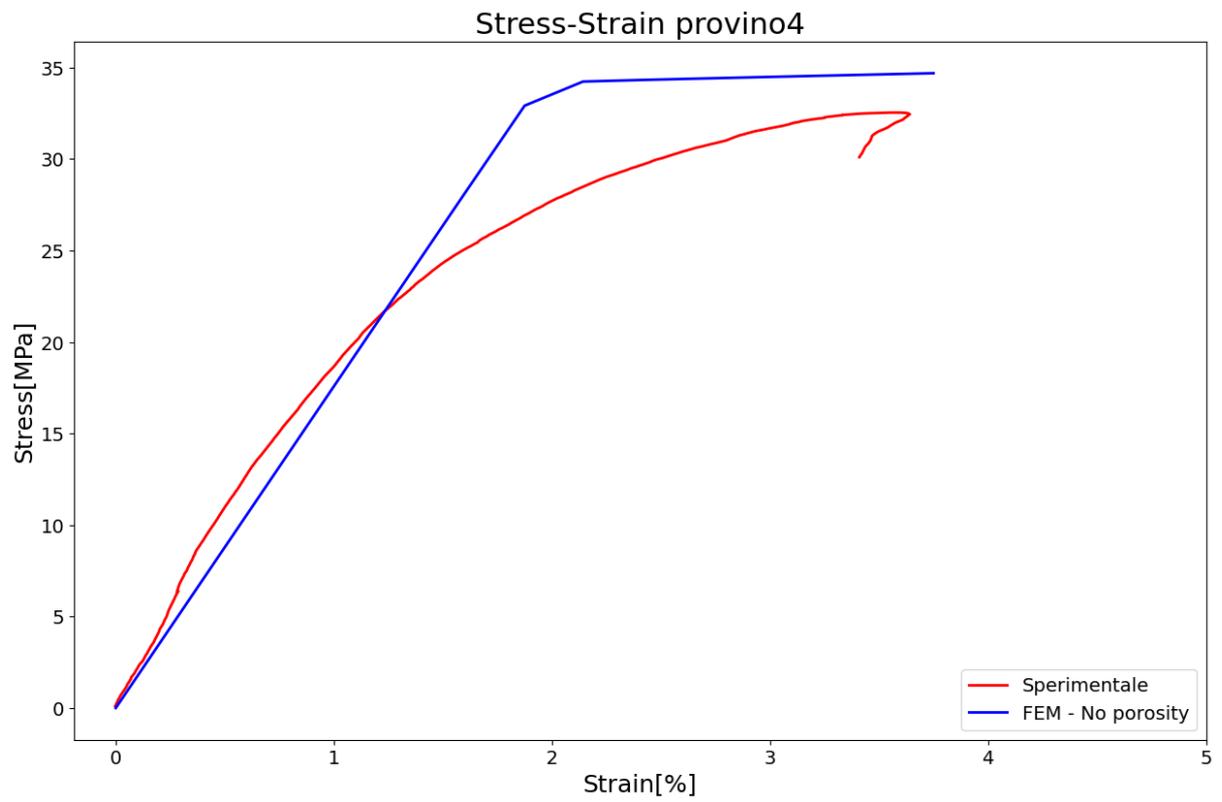


Figura 3.27: Curva di trazione provino 4

Queste prime curve evidenziano una buona modellazione del materiale nel tratto elastico. Come anticipato precedentemente le proprietà "pulite" descrivono sufficientemente bene il tratto elastico, tendenzialmente questo viene anche sottostimato, non risulta quindi utile usare i moduli elastici ridotti E^* .

A questo punto è stato necessario effettuare una calibrazione dei parametri che descrivono la plasticità, per ottenere una descrizione più accurata della curva dopo lo snervamento.

Si è arrivati a una calibrazione ottimale con i parametri riportati in Tabella 3.9

Tabella 3.9

Potenziali di Hill (Abaqus)					
R11	R22	R33	R23	R13	R12
0.55	0.3	0.56	0.42	0.46	0.8

In particolare sono stati variati i valori di R_{11} , R_{22} e R_{12} con quelli riportati nella tabella, oltre a questi è stata aumentato il valore del carico di snervamento ad un valore di 65 MPa.

Un confronto con i risultati ottenuti con la calibrazione è riportato nelle figure che seguono

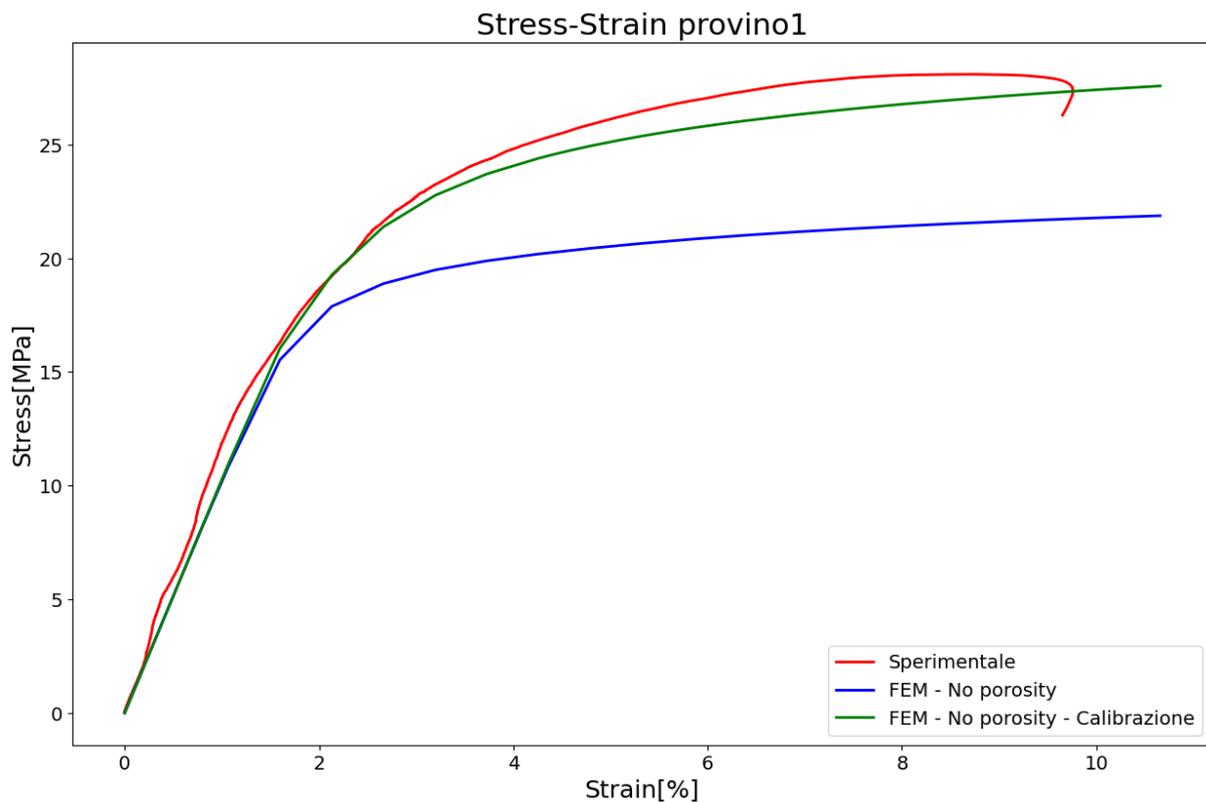


Figura 3.28: Curva di trazione provino 1 dopo calibrazione

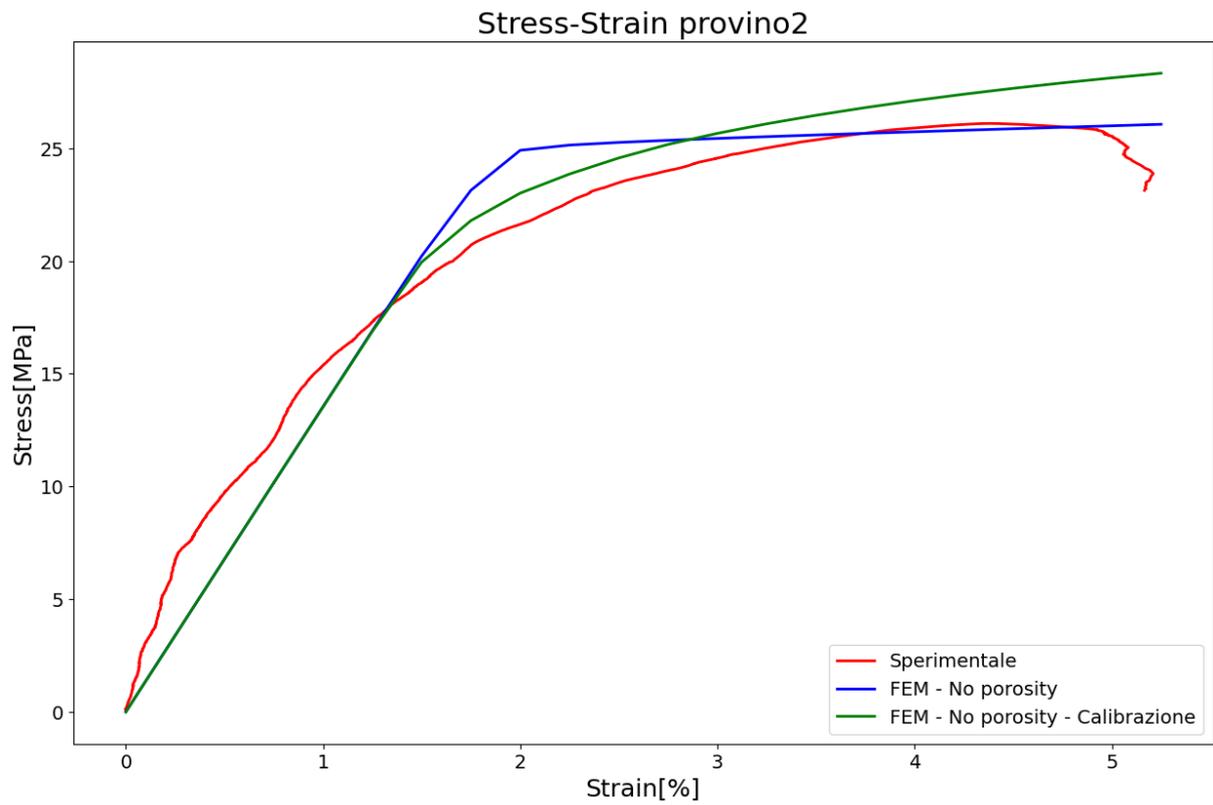


Figura 3.29: Curva di trazione provino 2 dopo calibrazione

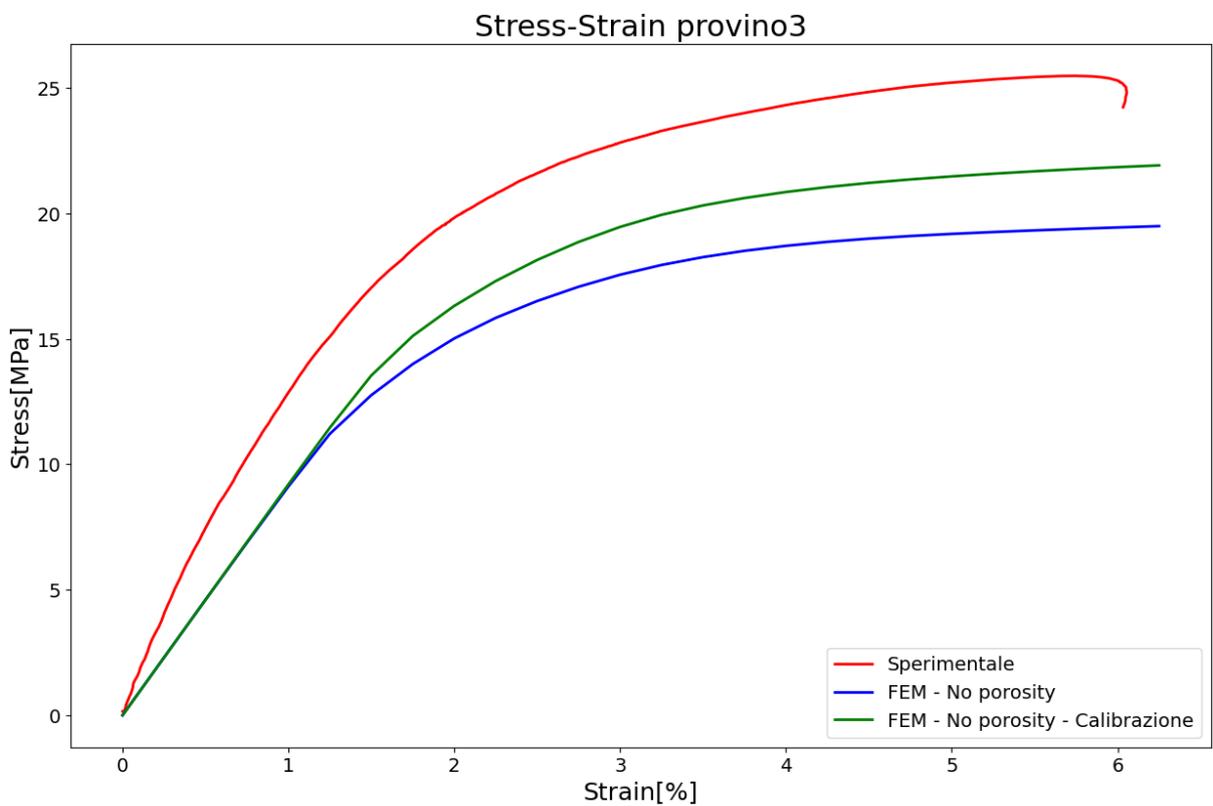


Figura 3.30: Curva di trazione provino 3 dopo calibrazione

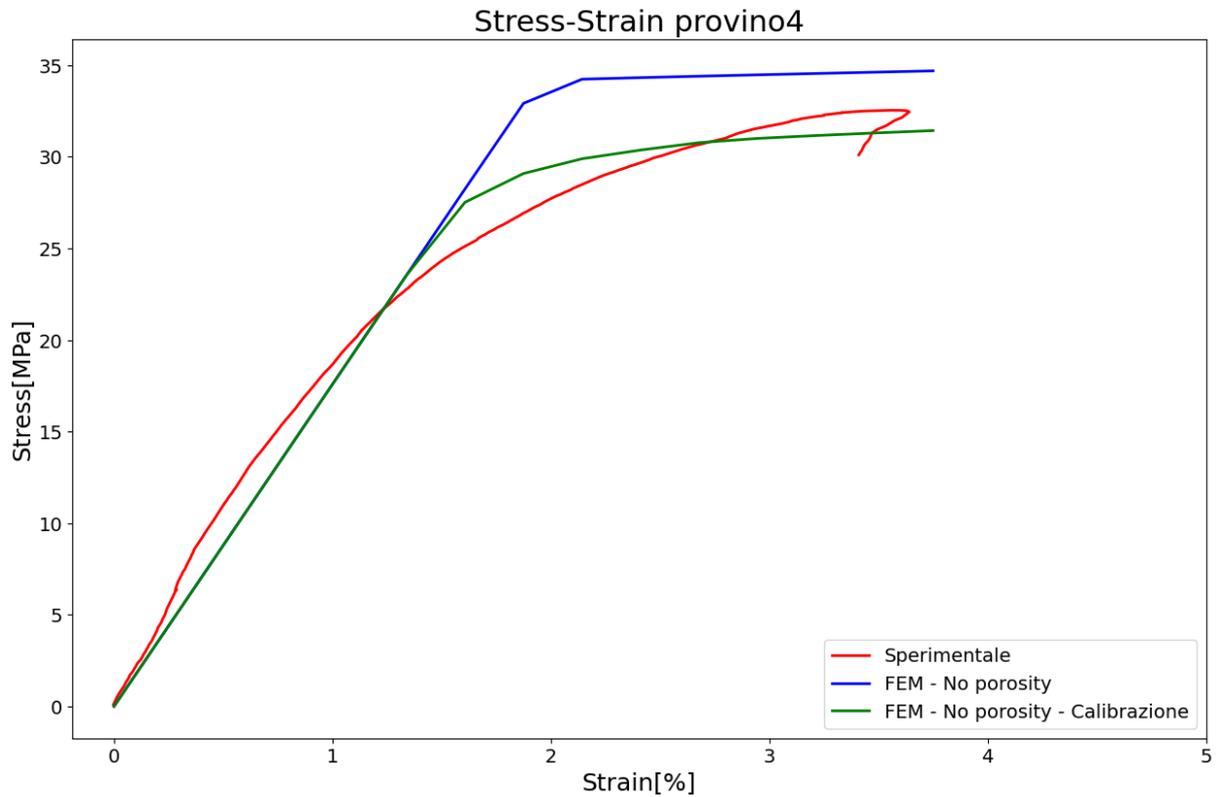


Figura 3.31: Curva di trazione provino 4 dopo calibrazione

Come si nota dalle figure la calibrazione dei parametri ha migliorato la rappresentazione numerica della curva sperimentale in tutti i casi. Nel paragrafo seguente verrà mostrato anche l'errore medio di ogni curva numerica rispetto alla sperimentale e l'errore sulla tensione di rottura.

3.4.4 Considerazioni sulla larghezza dei wall laterali

In Figura 3.32 sono riportate le distribuzioni delle tensioni per il provino 1 e per il provino 3

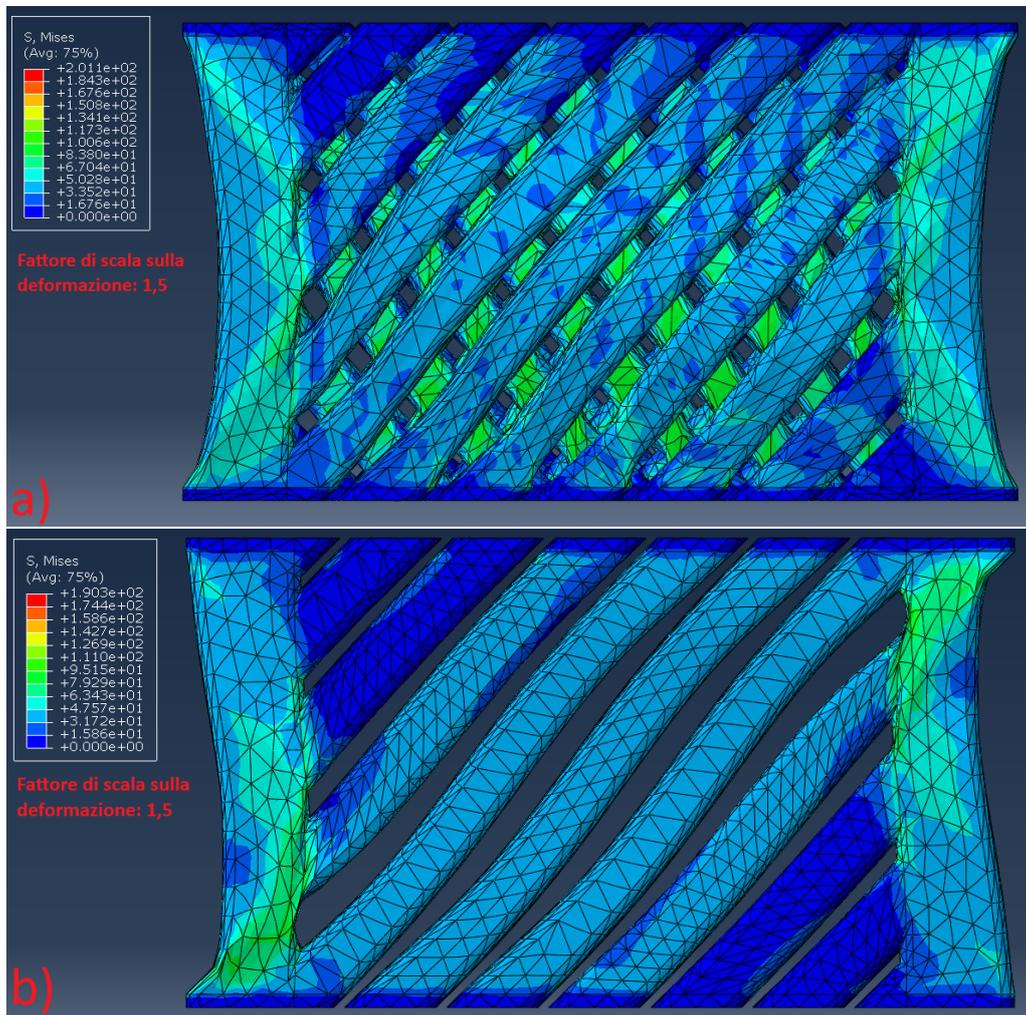


Figura 3.32: Distribuzione delle tensioni su: a) provino 1, b) provino 3

come risulta evidente dalle immagini la maggior parte del carico si va a scaricare sui wall laterali che contengono il pattern di stampa.

I wall laterali sono stati modellati con una larghezza maggiore rispetto a quella delle bead di riempimento, questo perchè, quando sono stampati i provini, i wall avevano dei parametri di stampa diversi da quelli dello riempimento.

Sono state prese quindi le misure sulle bead dei wall che venivano a crearsi con quei parametri di stampa, è stata fatta una media ed è stato usato questo valor medio per modellare la larghezza dei wall nel modello.

Dato che, come già detto, sono i wall a prendere la maggior parte della distribuzione del carico sul componente, si è ritenuto opportuno simulare altri due modelli per ogni provino, uno con i wall aventi una larghezza minore e uno con i wall aventi la larghezza maggiore. Questo al fine di valutare l'influenza della larghezza dei wall sulla curva di trazione finale del componente.

Si riportano in Tabella 3.10 le misure usate per i wall

Tabella 3.10: Larghezza bead dei wall

	$\overline{W_{wall}}$ mm
media	0.858
max	0.928
min	0.765

Nelle figure che seguono si riportano dei grafici per mostrare l'errore medio (RMSE) della curva numerica su quella sperimentale e l'errore sulla tensione di rottura tra curva numerica e sperimentale. Come tensione di rottura della curva sperimentale è stata assunta la tensione massima raggiunta.

Si aggiungono in oltre due curve che mostrano la variazione della curva numerica al variare della larghezza dei wall. Le curve sono state troncate fino alla tensione massima e gli errori riportati nelle immagini fanno riferimento alla curva con i wall aventi larghezza media

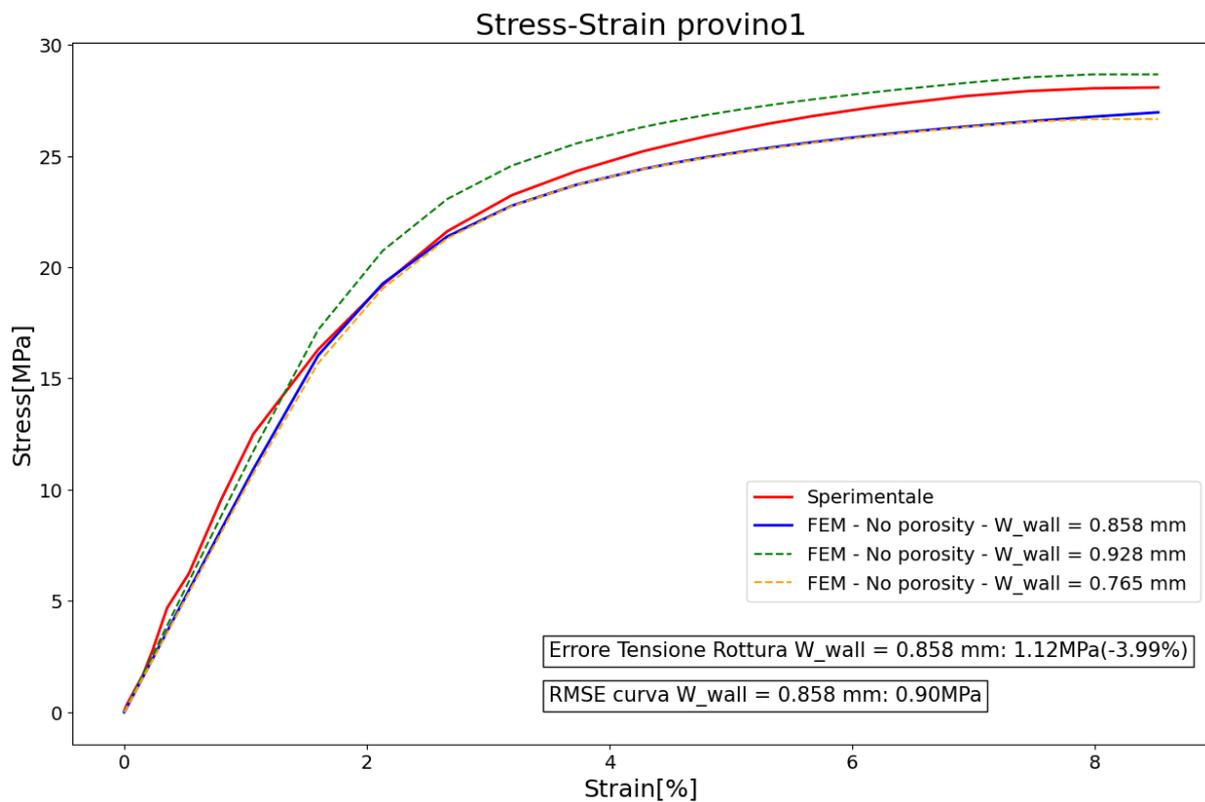


Figura 3.33: RMSE numerica-sperimentale, errore su tensione di rottura

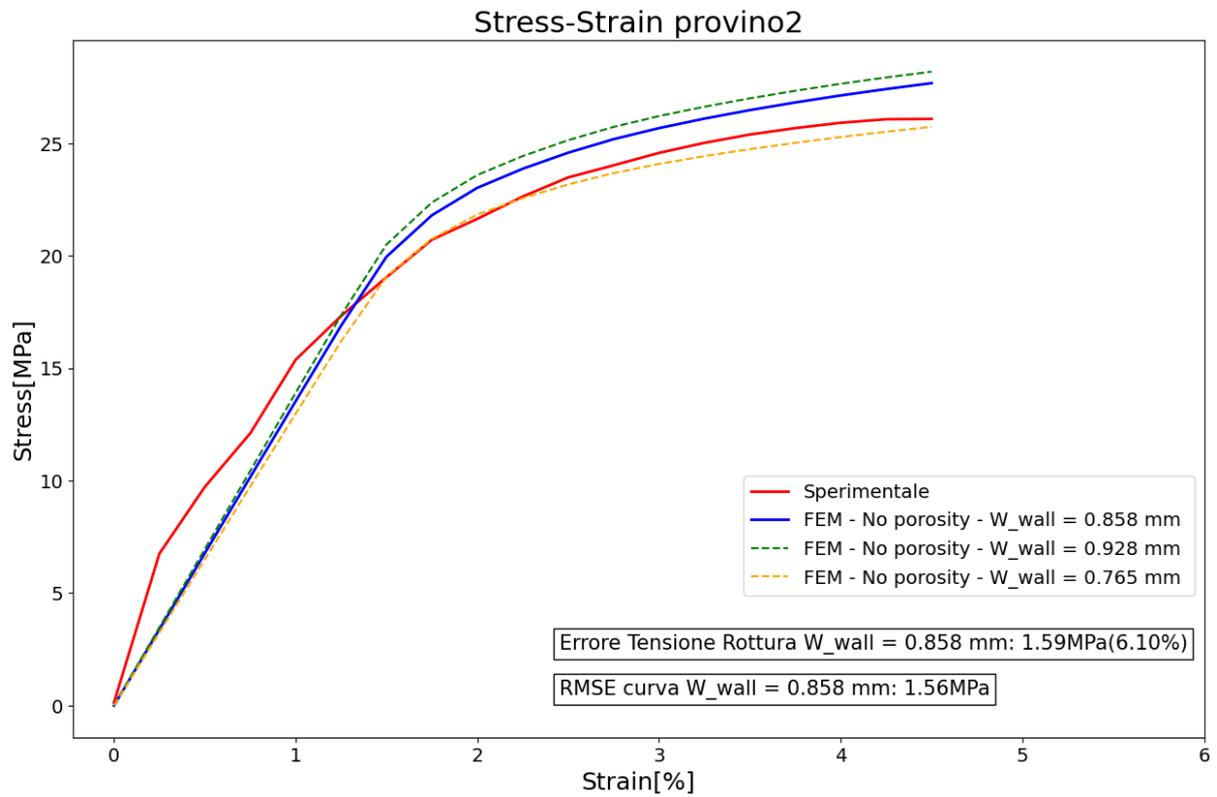


Figura 3.34: RMSE numerica-sperimentale, errore su tensione di rottura

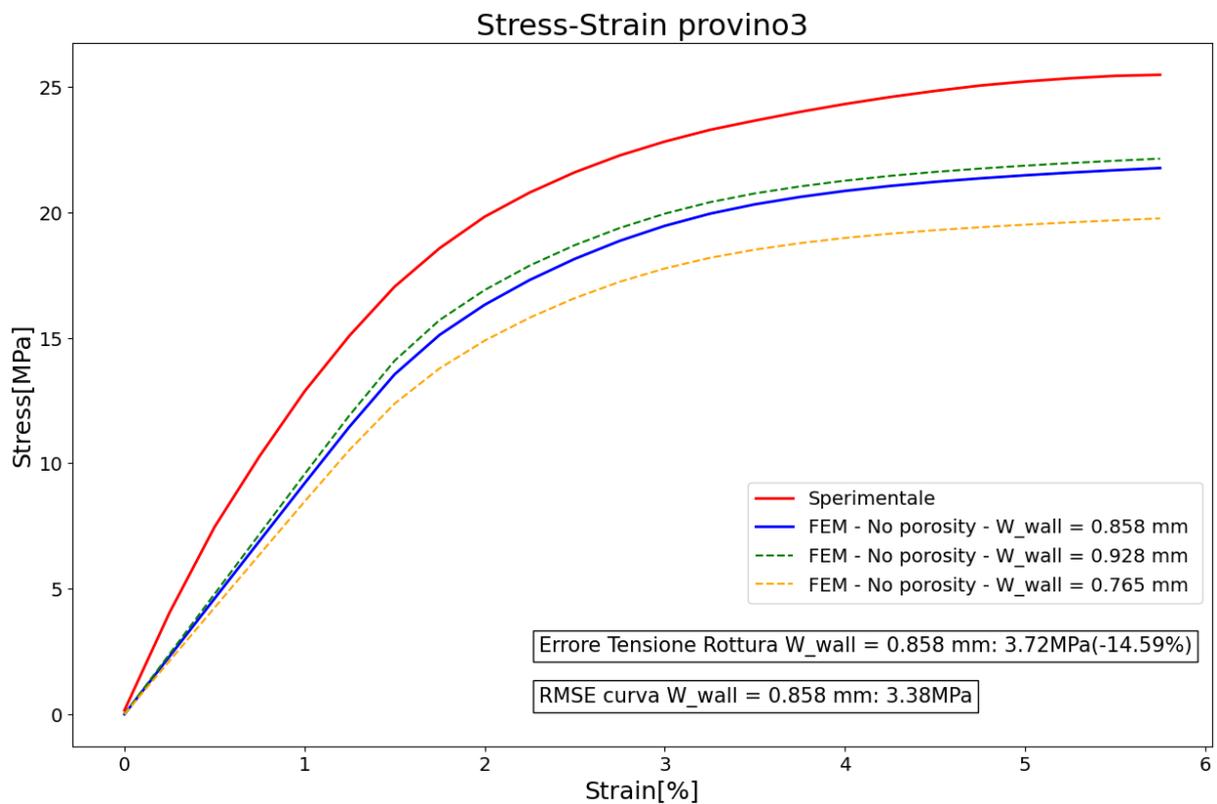


Figura 3.35: RMSE numerica-sperimentale, errore su tensione di rottura

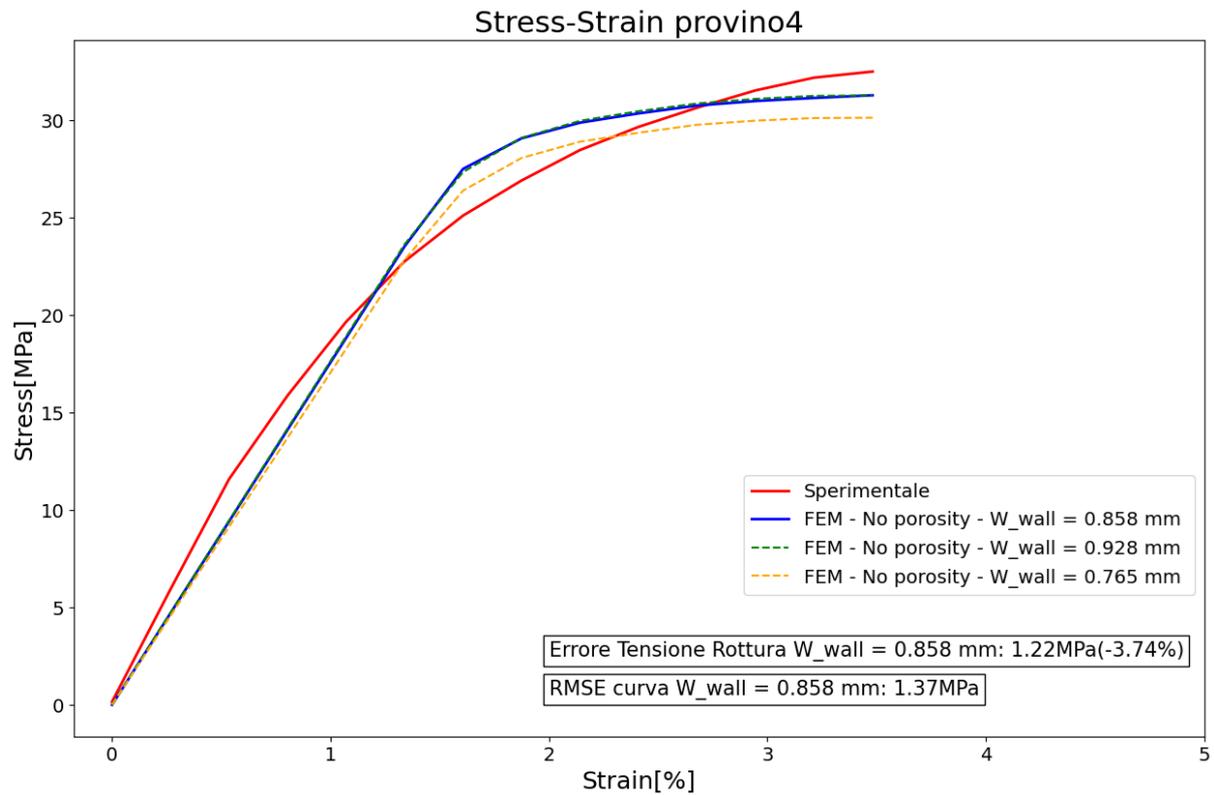


Figura 3.36: RMSE numerica-sperimentale, errore su tensione di rottura

Le curve numeriche descrivono sufficientemente bene il comportamento del materiale e della geometria di stampa, accettando il margine di errore che si commette sui casi sperimentali, si ritiene valida la modellazione al fine di descrivere le proprietà meccaniche di un componente stampato.

Capitolo 4

Algoritmi ML per la previsione delle proprietà meccaniche

Questo capitolo descrive le metodologie di machine learning utilizzate per prevedere le proprietà meccaniche del materiale stampato.

Per apprendere i concetti e il funzionamento dei modelli ML è stata utilizzata la risorsa [5], alla quale si fa riferimento per un'introduzione al funzionamento dei modelli ML nel paragrafo seguente.

4.1 Introduzione al Machine Learning ed ai metodi utilizzati

Prima di procedere con lo sviluppo del modello si ritiene opportuno fare una descrizione generale di come funziona un modello ML.

4.1.1 Regressione lineare

Come anticipato nell'introduzione del testo, il modello ML che è stato utilizzato è un modello supervisionato, in particolare si tratta di un modello di regressione.

La regressione lineare è la tecnica statistica alla base del funzionamento del modello, questa permette di trovare una relazione matematica tra una caratteristica (variabile indipendente) e un'etichetta (variabile dipendente).

In ambito ML la regressione è espressa tramite l'equazione 4.1

$$y' = b + w_1x_1 \quad (4.1)$$

l'equazione è quella di una retta, dove:

- y' è l'etichetta da prevedere (output del modello)
- b è detto bias, matematicamente è il valore intercettato dalla retta di regressione sull'asse delle y
- x_1 è la caratteristica (input del modello)
- w_1 è il peso della caratteristica, matematicamente rappresenta il coefficiente angolare della retta di regressione

è opportuno specificare che nel caso di più caratteristiche (modello multi input), l'equazione diventa:

$$y' = b + w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3... + w_nx_n \quad (4.2)$$

il valore dell'etichetta da prevedere è quindi funzione di più caratteristiche.

In un modello ML con apprendimento supervisionato vengono forniti i valori "corretti" (o valori reali) y delle etichette y' , l'obiettivo dell'addestramento è quello di andare a calcolare la miglior combinazione di pesi w e bias b al fine di ottenere la migliore stima del valore y' rispetto al valore y reale.

4.1.2 Perdita

Per stimare la combinazione migliore di pesi e bias per il modello viene definita una funzione di perdita, la funzione di perdita permette di stimare l'errore del modello calcolato su un insieme di previsioni.

In particolare la perdita misura la differenza tra le previsioni di un modello e i valori reali. Si riporta la Figura 4.1 per una migliore comprensione.

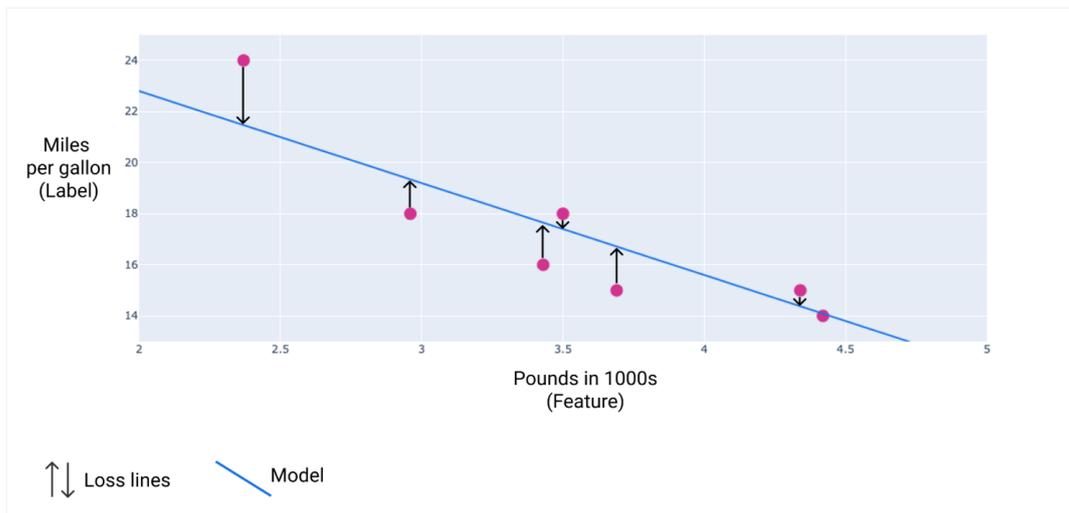


Figura 4.1: Rappresentazione della perdita sul grafico di regressione, fonte[5]

La figura riporta un esempio fatto in [5] per visualizzare il perdita tra valori stimati dal modello e valori reali.

In particolare l'esempio riportato mostra le perdite (freccie nere nel grafico) delle previsioni del modello sulla distanza percorsa da un veicolo.

Le funzioni di perdita sono principalmente due:

$$\text{Errore Assoluto Medio (MAE)} \quad \frac{1}{N} \sum |valore \text{ effettivo} - valore \text{ previsto}| \quad (4.3)$$

$$\text{Errore Quadratico Medio (MSE)} \quad \frac{1}{N} \sum (valore \text{ effettivo} - valore \text{ previsto})^2 \quad (4.4)$$

L'equazione 4.4 a differenza della 4.3 stima una perdita maggiore quando la differenza tra previsione e valore effettivo è elevata, mentre stima una perdita minore quando la differenza è piccola.

4.1.3 Discesa del gradiente

L'obiettivo dell'allenamento è quindi stimare i pesi e i bias che riducono la perdita. Per farlo viene utilizzata la discesa del gradiente, una tecnica che in modo iterativo testa pesi e bias fino a trovare la combinazione migliore.

Il modello inizia con dei pesi e dei bias casuali, successivamente ripete iterativamente i seguenti step:

1. Calcolo della perdita con i pesi e i bias attuali
2. Scelta della direzione in cui spostare pesi e bias per ridurre la perdita
3. Aggiorna i pesi e i bias di una piccola quantità nella direzione scelta
4. Riparte dal punto 1 e itera fino a quando la perdita non è al minimo

è opportuno precisare che la perdita non è mai ridotta a 0 alla fine dell'addestramento, ma può essere solo portata a un valore minimo.

Quando viene sviluppato e addestrato un modello è importante valutare la convergenza della curva di perdita. Questa curva riporta la variazione della perdita del modello durante l'addestramento e fornisce una stima di come e se il modello sta convergendo a una perdita sempre minore e quanto velocemente lo stia facendo.

Un esempio di curva di perdita è riportato in Figura 4.2

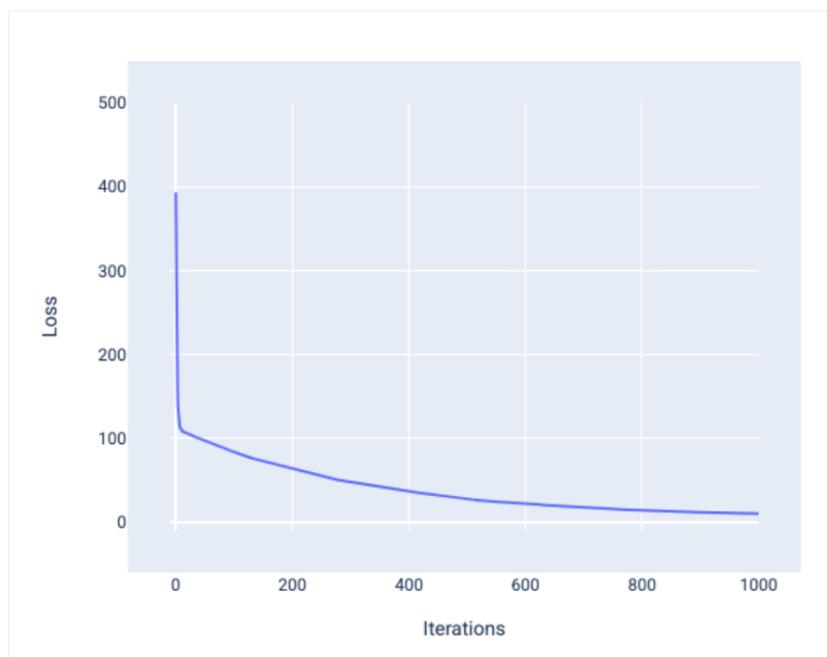


Figura 4.2: Curva di perdita durante l'addestramento, fonte[5]

4.1.4 Iperparametri

Gli iperparametri sono delle variabili del modello che condizionano e regolano l'addestramento dello stesso. I tre più influenti sono:

- tasso di apprendimento: è un numero che viene impostato dall'utente e che influisce sulla velocità di addestramento del modello. Un tasso di apprendimento troppo

basso implica che il modello ha bisogno di molte iterazioni per convergere, un tasso troppo alto invece potrebbe non far convergere mai il modello. In particolare il tasso di apprendimento è quella piccola quantità di cui si parla nel metodo della discesa del gradiente, che va a modificare pesi e bias durante l'addestramento.

- dimensione del batch: è un numero che specifica su quanti esempi del set completo viene calcolata la perdita prima di aggiornare i pesi e i bias. La scelta di questo parametro varia a seconda delle dimensioni del set di addestramento. Si può optare per un approccio full batch, quindi il modello aggiorna i pesi e i bias dopo aver calcolato la perdita su tutti gli esempi, oppure un approccio con mini-batch in cui il modello aggiorna pesi e bias dopo aver calcolato la perdita su un campione di esempi presi dal dataset.
- epoche: un'epoca indica che tutti gli esempi del dataset sono stati elaborati almeno una volta durante l'addestramento. Se ad esempio si utilizza un set con 100 esempi, con un approccio minibatch da 20 esempi, per completare un'epoca servono 5 iterazioni, in ogni iterazione il modello aggiorna pesi e bias.

Lo scopo dell'utente che sviluppa e addestra il modello è quindi trovare la giusta combinazione degli iperparametri al fine di avere un modello ben addestrato.

4.1.5 Reti Neurali

Le reti neurali sono un tipo di architettura per i modelli ML, progettate per evidenziare la non linearità nei dati. Per non linearità si intende che non è possibile cogliere una relazione tra le caratteristiche e le etichette utilizzando una relazione lineare, come quella riportata nell'equazione 4.1.

Il nome "Rete Neurale" viene dal fatto che la struttura del modello simula la connessione tra i neuroni del cervello umano.

Il modello più semplice di rete neurale che si può costruire è riportato in Figura 4.3

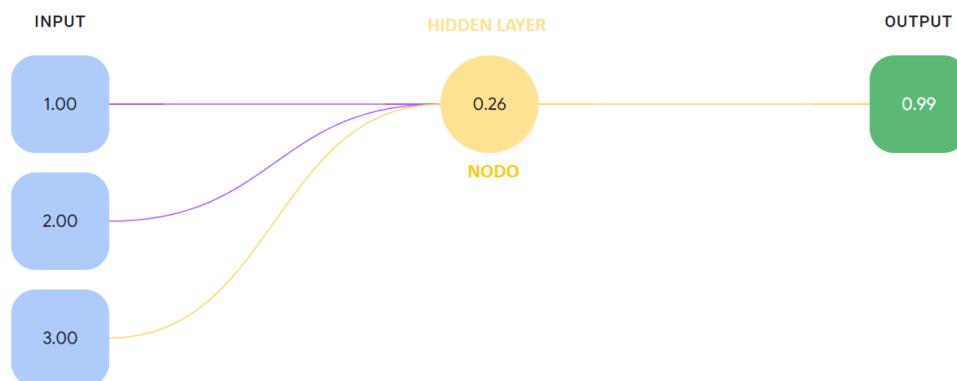


Figura 4.3: Esempio di rete neurale, fonte[5]

nella figura si evidenziano:

- input layer, riceve in input i valori delle n caratteristiche
- hidden layer, sono gli strati intermedi tra input layer e output layer, i nodi in questi strati sono detti neuroni

- output layer, calcola i valori di output delle etichette

Un modello si dice multi input se riceve più caratteristiche sul layer di input, multi output se stima più etichette nel layer di output.

Analizzando le fasi necessarie a ottenere l'output si evidenzia il primo passo in Figura 4.4

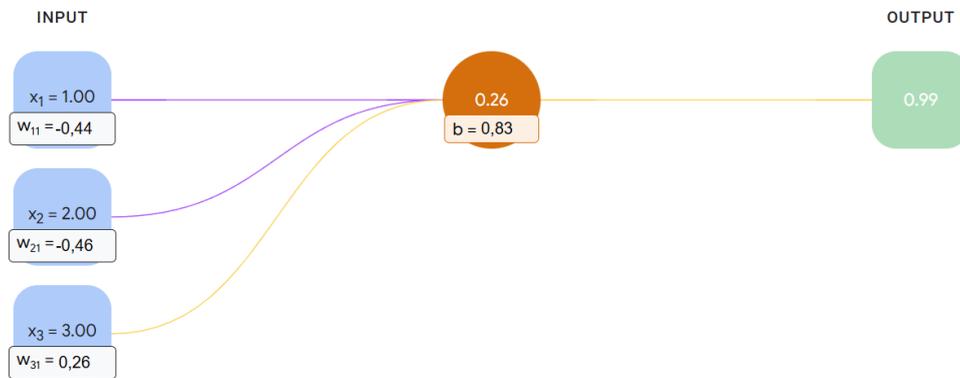


Figura 4.4: Primo step per il calcolo dell'output, fonte [5]

Nel primo step il valore del nodo dell'hidden layer, è calcolato utilizzando l'equazione 4.1, il valore 0.26 è quindi la y' calcolata con le caratteristiche in input, si evidenziano nell'immagine i valori dei pesi trovati per gli input e il bias per il nodo dell'hidden layer. Lo step successivo è riportato in Figura 4.5

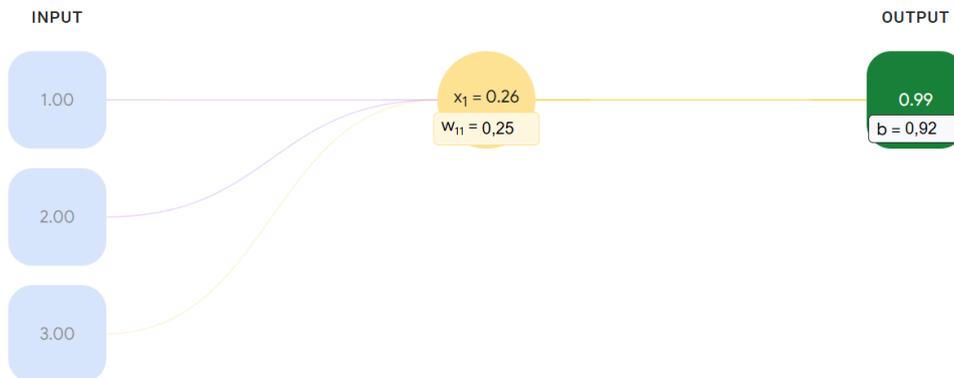


Figura 4.5: Secondo step per il calcolo dell'output, fonte [5]

Durante il secondo step la caratteristica in input diventa il valore del nodo, anche in questo step viene moltiplicato il peso stimato e sommato il bias del nodo di output, ottenendo la stima y' del nodo di output, pari a 0.99 nell'esempio.

Durante la costruzione di una rete, si deve trovare la miglior combinazione di layer e nodi per ottenere il miglior risultato possibile, in particolare il numero di layer e nodi dipenderà dalla complessità delle relazioni tra le caratteristiche e le etichette.

Questo però non basta a cogliere le non linearità.

Per cogliere le non linearità è necessario utilizzare una funzione di attivazione tra i vari layer.

Una funzione di attivazione applica una trasformazione non lineare al valore di output di

un neurone, prima che questo venga passato come input allo strato successivo. Una funzione di attivazione comunemente usata è la funzione ReLU (rectified linear unit), può essere rappresentata matematicamente con l'equazione 4.5

$$f(z) = \max(0, z) \quad (4.5)$$

Se il valore in input z è maggiore di 0, allora la funzione restituisce il valore, se invece è minore di 0 restituisce 0.

Ogni output prima di essere passato al layer successivo viene dato come input a questa funzione.

Come funzione di attivazione per la rete sviluppata è stata scelta la funzione ReLU.

4.1.6 K-Fold cross validation

La K-Fold cross validation è una tecnica utilizzata per costruire modelli generalizzabili. In particolare prevede di dividere il database in un set di training e un set di test. La particolarità del metodo sta nel fatto che la divisione del database in set di training e di test, viene effettuata un numero K di volte, per ognuna di queste K volte i set di training e di test cambiano. In questo modo vengono valutate le performance medie del modello sui vari test set dei K-Fold.

Nella Figura 4.6 si illustra uno schema del metodo



Figura 4.6: Esempio metodo K-Fold, fonte [4]

Nella figura è rappresentato un caso con $K = 5$

1. si settano gli iperparametri
2. si fa partire il codice
3. inizia lo Split 1, il modello si allena sui fold 2,3,4,5 e viene testato sul fold 1
4. viene estratto il valore di perdita sui dati di test del fold 1

5. si allena e testa il modello sui restanti split, estraendo per ognuno il valore di perdita sui dati di test
6. si ottiene un valore medio di perdita tra i vari split
7. si cambiano gli iperparametri e si ripetono le fasi

Alla fine di questa procedura si avranno un certo numero di perdite medie, tante quante sono state le iterazioni sugli iperparametri.

Si sceglie quindi la combinazione di iperparametri che ha la perdita media minore.

Tra i 5 modelli addestrati nei vari split con gli iperparametri ottimali viene scelto quello migliore. Il modello salvato sarà quello definitivo per fare le previsioni.

4.2 Preparazione dei database per allenare il modello

Il modello di machine learning ha il fine di prevedere la risposta meccanica del materiale stampato utilizzando i parametri di stampa come input. Per l'addestramento del modello è stato creato un database di proprietà del materiale, al variare dei principali parametri descritti nel capitolo 2 e utilizzando il modello numerico descritto nel capitolo 3. Per garantire che il dataset di addestramento descrivesse efficientemente il dominio di applicazione dell'algoritmo, è stato definito un piano sperimentale per la generazione dei dati.

4.2.1 Piano sperimentale per le simulazioni

Avendo già fatto un piano sperimentale per valutare la larghezza delle bead nel capitolo 2, si è utilizzato lo stesso piano sperimentale come base di partenza per organizzare le simulazioni.

Quindi sono state utilizzate le misurazioni di W' per ognuna delle combinazioni dei parametri in Tabella 4.1

Tabella 4.1: Valori parametri simulazioni

		Caratteristica		
		H	W	F
		mm	mm	%
Livelli	0.1	0.4	0	
	0.2	0.6	50	
	0.3	0.8	100	

A questo piano sperimentale, che in tutto prevede 27 simulazioni, sono stati aggiunti altri 2 parametri per creare le combinazioni totali per generare il database con le simulazioni: il riempimento percentuale ed il pattern di stampa, come riportato in Tabella 4.2

Tabella 4.2: Valori riempimento e pattern simulazioni

Livelli	Caratteristica	
	riempimento	pattern
	%	/
	50	45° alternato
	100	0°

Combinando tutti i parametri scelti per generare la geometria si sono create in tutto 108 geometrie diverse.

4.2.2 Estrazione dei valori d'interesse

Per ogni combinazione quindi, si è utilizzato lo script per generare la geometria in Abaqus, dando in input i relativi parametri, e sono state fatte le simulazioni di una prova di trazione.

Per ognuna delle 108 simulazioni sono state estratte le curve di trazione risultanti.

Dalle curve di trazione sono stati estratti il modulo elastico E , la tensione di snervamento σ_s e la tensione di rottura σ_R .

Si precisa che:

- il valore di E è stato estratto da ogni curva calcolando la pendenza del tratto lineare della curva tensione-deformazione;
- il valore σ_s è stato definito come il valore di tensione in cui l'errore tra la curva puramente elastica - con modulo E stimato in precedenza - e la curva tensione-deformazione raggiunge il 5%;
- il valore σ_R è stato stimato da ogni curva di trazione prendendo il valore di tensione corrispondente a un valore di deformazione ϵ del 6.25%. Non avendo modellato il danneggiamento del materiale non si conosce il valore della percentuale a rottura, che varia da una configurazione di stampa all'altra, si è scelto quindi questo valore di deformazione per estrarre la tensione di rottura. Questa è un'approssimazione ritenuta accettabile, in quanto le curve simulate tendono a stabilizzarsi su un valore nel tratto plastico, l'errore commesso sulla scelta della deformazione di rottura, per estrarre il valore σ_R , risulta quindi trascurabile.

4.2.3 Creazione del database

Una volta ottenuti i tre valori di interesse per ogni combinazione del piano sperimentale è stato organizzato un database. Una visualizzazione parziale è riportata in Figura 4.7

# H	# W	# F	Δ pattern	# fill	# E	# snervamento	# rottura
0	0.1	0.4	0.0 4Salternato	100	1835.94644199692	47.3350429534912	64.2555491129557
1	0.1	0.4	0.0 4Salternato	50	551.9037767428608	9.050584081014	14.2671283086141
2	0.1	0.4	0.0 0	100	2257.0246565173934	42.3731009165446	73.2961336771647
3	0.1	0.4	0.0 0	50	1171.2119046373057	18.9610973993937	21.7381461461385
4	0.1	0.4	0.5 4Salternato	100	1107.6960016520632	20.9905529022217	35.3613313039144
5	0.1	0.4	0.5 4Salternato	50	482.1395187061508	7.89951642354329	12.4691192309062
6	0.1	0.4	0.5 0	100	2022.0125968211005	32.710288365682	37.447757209473
7	0.1	0.4	0.5 0	50	1076.0356825697652	17.4144299825033	19.9488321940104
8	0.1	0.4	1.0 4Salternato	100	1111.2843602934672	21.0615746180216	35.462525067139
9	0.1	0.4	1.0 4Salternato	50	483.8883587938095	7.93110052744548	12.6197830835978
10	0.1	0.4	1.0 0	100	2027.4067378209888	32.7988465627035	37.5263786315918
11	0.1	0.4	1.0 0	50	1078.9149843410728	17.4607690175374	19.9800316492716
12	0.1	0.6	0.0 4Salternato	100	1347.4534653800004	25.2804104487101	40.4375807444255
13	0.1	0.6	0.0 4Salternato	50	653.69528063308	10.8118359247843	16.120711962382

Figura 4.7: Visualizzazione del database

Il database è organizzato per righe e colonne. Ogni riga rappresenta una simulazione, quindi un esempio per addestrare il modello, le colonne rappresentano le caratteristiche (dati di input del modello) che in questo caso sono:

- H, altezza layer di stampa
- W, larghezza della linea di stampa
- F, velocità delle ventole di raffreddamento
- fill, percentuale di riempimento
- pattern, pattern di riempimento scelto

e le etichette (variabili di output del modello) che invece sono:

- E, modulo elastico del componente
- snervamento, tensione di snervamento del componente
- rottura, tensione di rottura del componente

Il modello sviluppato prevede queste proprietà meccaniche al variare dei parametri di stampa scelti ed è quindi un modello multi input multi output.

4.3 Preparazione e analisi dei dati di input

Prima di addestrare il modello è necessario effettuare delle operazioni di pre-processing sul database per ottimizzare l'addestramento.

In particolare sono state applicate le seguenti modifiche ai dati:

- Codifica dei dati categorici: i dati di tipo categorico, come il pattern di stampa, necessitano una codifica per essere dati in input al modello. È stata applicata una codifica "One-Hot", in questo modo i valori "45alternato" e "0" nel database diventano una combinazione di 0 e 1, a seconda della configurazione assunta dal pattern di stampa.
- Normalizzazione dei dati: quando si addestra un modello, per agevolare l'allenamento, è opportuno che non ci sia una grande differenza tra gli ordini di grandezza dei dati. Nel caso del database creato, le caratteristiche sono tutte comprese tra 0 e 1, a parte la velocità delle ventole, mentre le etichette hanno ordini di grandezza molto più grandi. Per portare i dati tutti sullo stesso ordine di grandezza viene applicata una normalizzazione, in questo modo tutti i dati, sia caratteristiche che etichette sono comprese tra 0 e 1. La caratteristica F è stata semplicemente divisa per 100 essendo una percentuale. Le etichette invece, sono state normalizzate utilizzando una scalabilità lineare. Il valore scalato con quest'approccio è definito come segue

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (4.6)$$

dove:

- x' è il valore scalato
- x è il valore originale
- x_{max} è il valore massimo dell'etichetta nel database
- x_{min} è il valore minimo dell'etichetta nel database

Congiuntamente al pre-processing descritto in precedenza, si procede alla valutazione della presenza di outlier nel database.

Gli outlier sono valori nelle etichette del database molto distanti dalla distribuzione generale dei dati. La loro presenza nel database di addestramento condiziona e complica la riuscita dello stesso. Una volta individuati, può essere opportuno eliminarli per evitare un mal condizionamento del modello addestrato.

Durante quest'attività sono stati individuati due outlier nel database, si riportano su un grafico in Figura 4.8 .

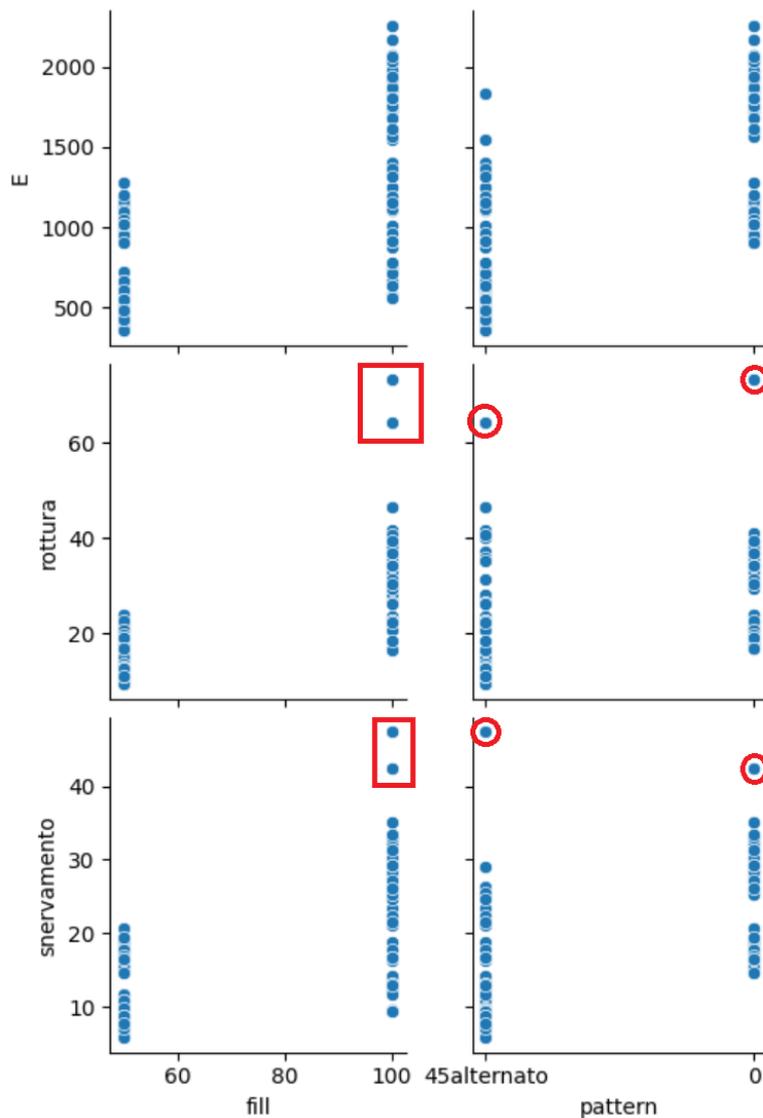


Figura 4.8: Valori outlier su snervamento e rottura

nel grafico sono evidenziati in rosso i valori anomali, in particolare sono due valori di snervamento e rottura.

Risalendo alle simulazioni da cui vengono estratti questi due valori, si trova che provengono da due simulazioni con delle geometrie di stampa uniche nel database.

L'unicità sta nel fatto che sono le sole due simulazioni, tra le 108 create, che hanno una geometria di stampa con le bead che si toccano lateralmente, in particolare sono le simulazioni 1 e 3.

Si riporta un immagine in Figura 4.9

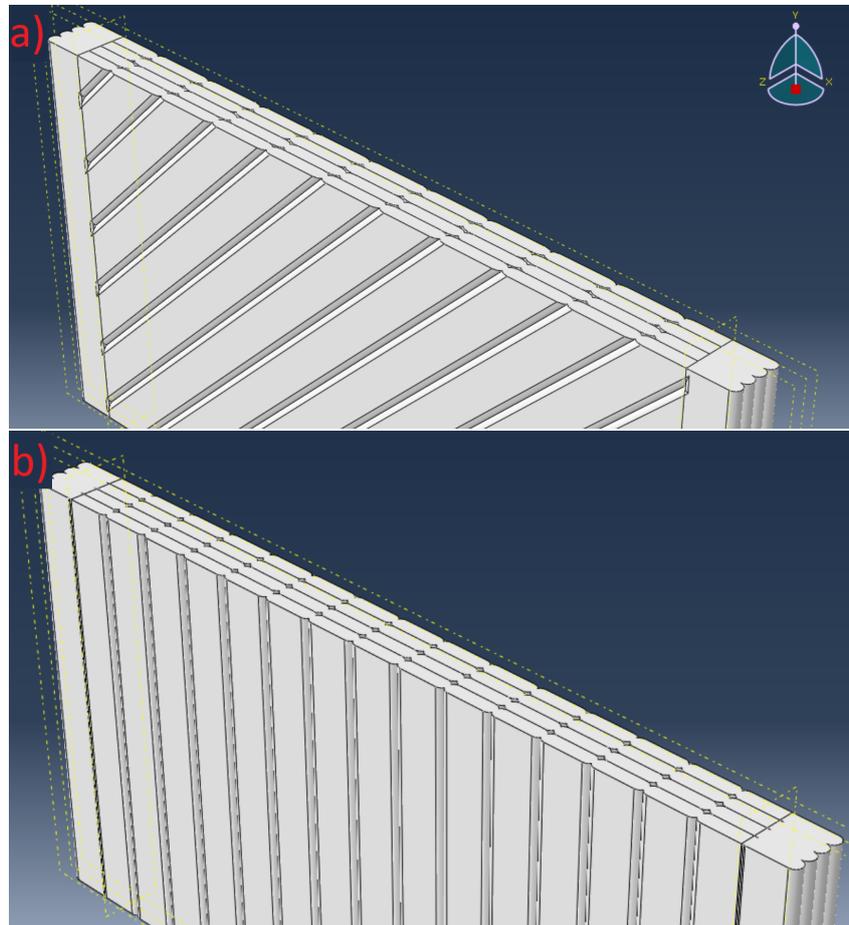


Figura 4.9: Geometrie di stampa con contatto tra le bead

Tutte le bead che fanno parte dello stesso layer sono in contatto lateralmente, questo porta a una riduzione dei difetti regolari dovuti al pattern di stampa, quindi a un aumento della sezione resistente su cui viene ripartito il carico. Come conseguenza di ciò si hanno dei valori di rottura e snervamento superiori rispetto agli altri casi, in cui il contatto laterale tra le bead non avviene.

Anche se i casi delle due simulazioni hanno senso dal punto di vista della meccanica del materiale, per allenare il modello è stato ritenuto opportuno rimuovere i due esempi dal database.

Con questo non si vuole intendere che i due esempi non siano validi, ma che non è opportuno utilizzarli con questo database, essendo gli unici due su 108 che descrivono questo caso particolare di contatto tra le bead.

Ampliando il database con altre combinazioni dei parametri di stampa, e quindi con altre simulazioni, si potrebbe arrivare ad avere un numero di casi in cui le bead si toccano sufficiente per essere incluso nel database di addestramento, ma in questo caso sono da considerare outlier.

Prima di rimuoverli è stato fatto un test per verificare che effettivamente condizionassero l'addestramento.

Un modello di prova è stato creato ed addestrato, prima sui dati contenenti i due esempi sopra citati e poi su dei dati senza questi esempi. I risultati ottenuti sono riportati in figura 4.10

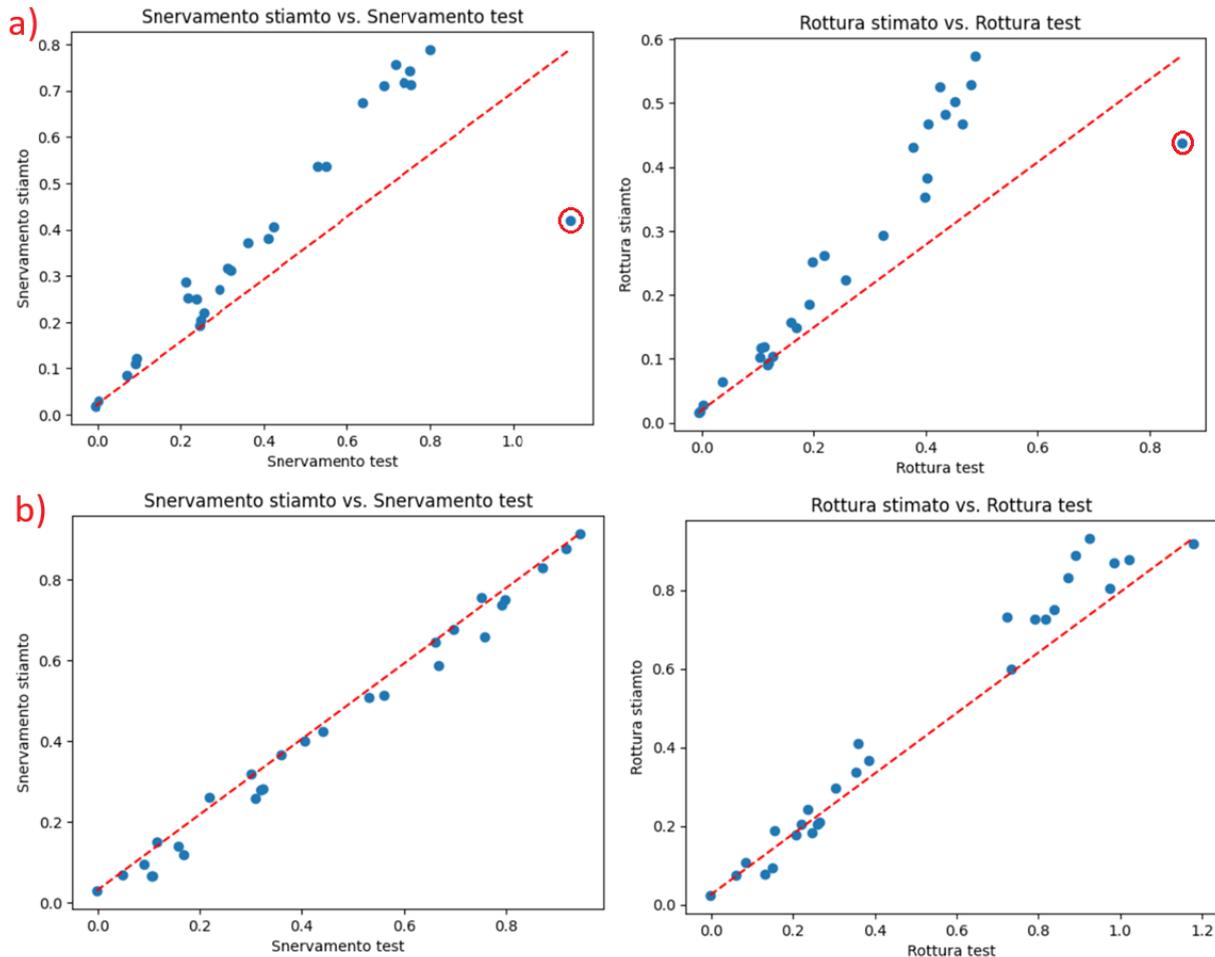


Figura 4.10: a) previsioni del modello addestrato con outlier, b) previsioni del modello addestrato senza outlier

Provando a fare una stima di rottura e snervamento su un set di dati di test, si ottengono i risultati riportati nella Figura 4.10, per lo stesso modello addestrato con e senza outlier.

Dai grafici si vede chiaramente che la presenza dei due valori condiziona il risultato dell'addestramento del modello, nel caso in cui questi non vengono considerati il modello stima molto meglio i valori di rottura e snervamento.

Procedendo quindi con l'addestramento del modello vero e proprio è stato utilizzato il database senza il primo e il terzo esempio.

Prima di procedere con la creazione e l'addestramento, si mostra una matrice di correlazione che mette in evidenza quanto e come le caratteristiche e le etichette sono correlate. La matrice è rappresentata in Figura 4.11

	H	W	F	pattern	fill	E	snervamento	rottura
H	1.00	-0.03	-0.03	-0.00	0.02	-0.22	-0.25	-0.29
W	-0.03	1.00	-0.03	0.00	0.02	0.16	0.17	0.19
F	-0.03	-0.03	1.00	-0.00	0.02	-0.08	-0.08	-0.09
pattern	-0.00	0.00	-0.00	1.00	-0.00	-0.69	-0.62	-0.33
fill	0.02	0.02	0.02	-0.00	1.00	0.61	0.66	0.80
E	-0.22	0.16	-0.08	-0.69	0.61	1.00	0.99	0.88
snervamento	-0.25	0.17	-0.08	-0.62	0.66	0.99	1.00	0.93
rottura	-0.29	0.19	-0.09	-0.33	0.80	0.88	0.93	1.00

Figura 4.11: Matrice di correlazione

i segni meno a fianco ai coefficienti indicano una proporzionalità inversa tra le variabili considerate.

In particolare si vuole evidenziare come ci sia una forte dipendenza delle proprietà meccaniche dal pattern e dal riempimento scelto (riquadro rosso), un'influenza importante sulle proprietà meccaniche è data anche da H e W (riquadro verde), mentre è presente una dipendenza minima delle proprietà meccaniche dalla velocità delle ventole di raffreddamento F (riquadro blu).

4.4 Sviluppo e addestramento del modello

Come spiegato nel paragrafo 4.1.4, l'obiettivo è trovare la giusta combinazione degli iperparametri affinché il modello funzioni.

Il modello è stato sviluppato e addestrato utilizzando la libreria Keras [1].

La procedura seguita per sviluppare e addestrare il modello è riportata di seguito:

1. scelta degli iperparametri
2. implementazione nel codice del metodo K-Fold cross validation che prevede in modo iterativo:
 - (a) costruzione del modello utilizzando la libreria keras
 - (b) addestramento del modello sui vari Fold
 - (c) valutazione delle performance medie dei modelli tra i vari Fold
 - (d) aggiornamento degli iperparametri e della struttura della rete (layer e nodi)
3. raggiunte delle performance medie ritenute valide, salvataggio del modello migliore tra quelli dei vari fold nella configurazione migliore

4.5 Implementazione del metodo e parametri di input

L'architettura della rete neurale utilizzata in questo studio - e la strategia di addestramento - sono caratterizzate dai seguenti iperparametri:

- Learning rate;
- epoche;
- numero di nodi;
- numero di layer.

Il modello usa la Mean Squared Error (MSE) come funzione di perdita, equazione 4.4. Per valutare le performance medie per ogni combinazione degli iperparametri, è stato valutato il valore medio della perdita tra i vari modelli dei K-Fold.

Una volta minimizzata la perdita media, si è scelto il modello con il miglior RMSE sulla tensione di rottura, addestrato con gli iperparametri che minimizzano la perdita media dei modelli.

Si precisa che per tutte le prove è stato utilizzato un approccio full batch essendo le dimensioni del database limitate.

Si è partiti con i seguenti iperparametri:

- learning rate = 0.002
- epoche = 600
- numero di nodi = 1
- numero di layer = 1

questa configurazione per gli iperparametri produce una curva di perdita come quella riportata in Figura 4.12

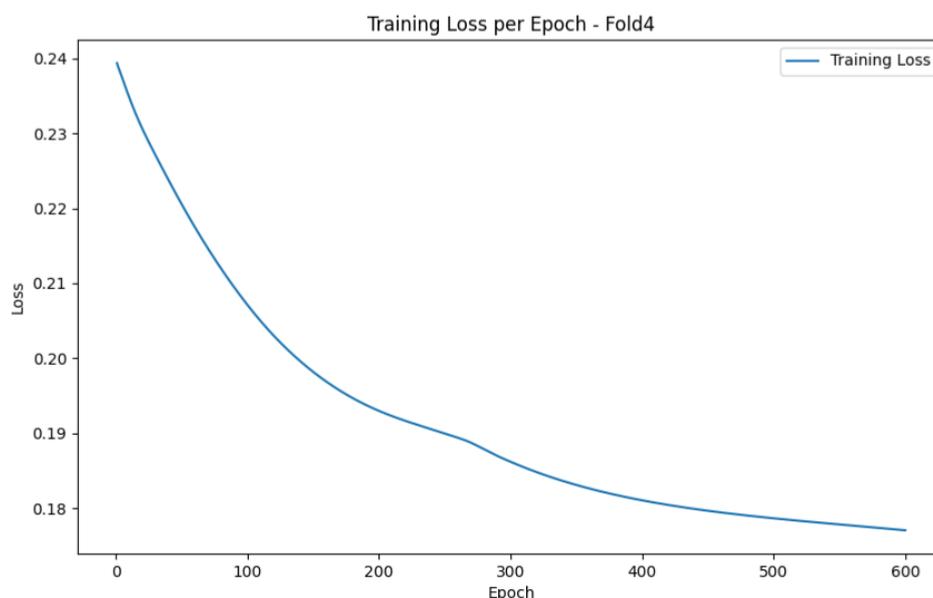


Figura 4.12: Curva di perdita, prima combinazione iperparametri

la curva di perdita mostrata è quella del modello addestrato nel fold 4, il migliore tra i K-Fold con questi iperparametri. Come si vede non arriva minimamente a convergenza con i parametri scelti.

Con questi iperparametri si ottengono queste prime prestazioni dalla rete

- $MSE_{media} = 0.192$
- $RMSE_{rottura} = 16,4$ MPa

si ricorda che la MSE_{media} è la perdita media dei vari modelli addestrati durante la cross validation, stimata su un set di test diverso per ogni modello. Il valore $RMSE_{rottura}$, invece, è l'errore sulla tensione di rottura stimata, commesso dal modello migliore tra quelli dei vari K-Fold sul set di test.

Partendo da questa prima configurazione, che non produce ovviamente dei risultati accettabili, sono stati fatti variare gli iperparametri iterativamente.

Prendendo nota del valore $RMSE_{rottura}$ del modello migliore per ogni combinazione si genera la curva riportata in Figura 4.13

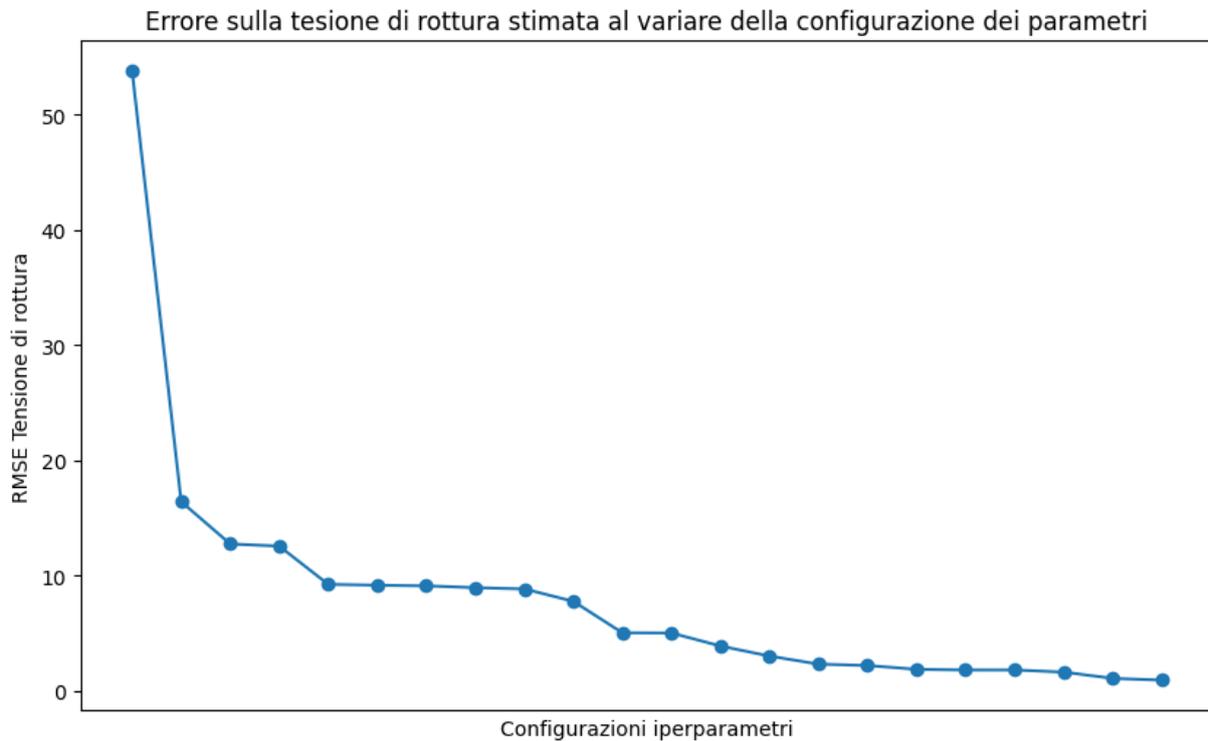


Figura 4.13: Andamento $RMSE_{rottura}$ al variare degli iperparametri

Il grafico riportato ha il solo obiettivo di mostrare come la modifica iterativa degli iperparametri porti a ridurre il valore RMSE.

La configurazione migliore, l'ultimo punto riportato sul grafico, è stata trovata con i seguenti parametri

- learning rate = 0.01
- epoche = 450
- numero di nodi = 20
- numero di layer = 2

il modello migliore tra quelli addestrati tra i vari K-Fold ha le seguenti prestazioni

- $MSE_{media} = 0.033$
- $RMSE_{rottura} = 0,907$ MPa

4.6 Validazione del modello

Su un set di dati di validazione, completamente esterno ai dati utilizzati per testare e modificare gli iperparametri, è stato fatto un ulteriore test per avere una validazione delle prestazioni della rete.

Sono state fatte altre 10 simulazioni con i parametri riportati in Tabella 4.3

Tabella 4.3: Parametri set di validazione

Prova	H	W	F	fill	pattern	W'
1	0.15	0.5	0.2	0.6	0°	0.411
2	0.15	0.45	0.4	0.4	0°	0.384
3	0.15	0.7	0.3	0.8	0°	0.538
4	0.15	0.6	0.7	1	45° alternato	0.458
5	0.3	0.5	0.8	0.4	0°	0.409
6	0.25	0.5	0.6	0.9	45° alternato	0.395
7	0.25	0.4	1	1	45° alternato	0.335
8	0.25	0.4	1	1	0°	0.335
9	0.2	0.65	0	0.5	45° alternato	0.514
10	0.2	0.55	0	0.8	0°	0.432

il valore di W' è stato calcolato utilizzando l'equazione 2.10 stimata nel paragrafo 2.4. Partendo dalle simulazioni è stato creato il database di validazione, con le stesse procedure usate per quello di trainig (normalizzazione e codifica).

Il modello stima le caratteristiche con gli errori riportati in Tabella 4.4

Tabella 4.4: Errori modello

	E	Tensione Snervamento	Tensione Rottura
RMSE	118,6 MPa	2,1 MPa	3,7 MPa

Le stime della rete sul set di validazione sono visualizzate sui grafici in Figura 4.14, 4.15 e 4.16.

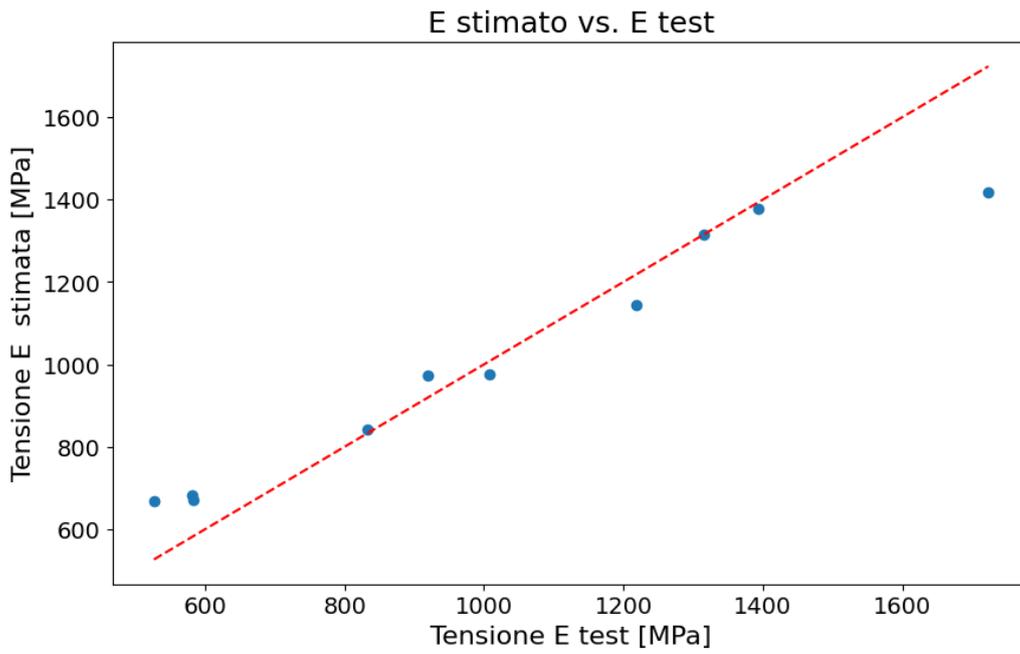


Figura 4.14: Accuracy plot modulo elastico

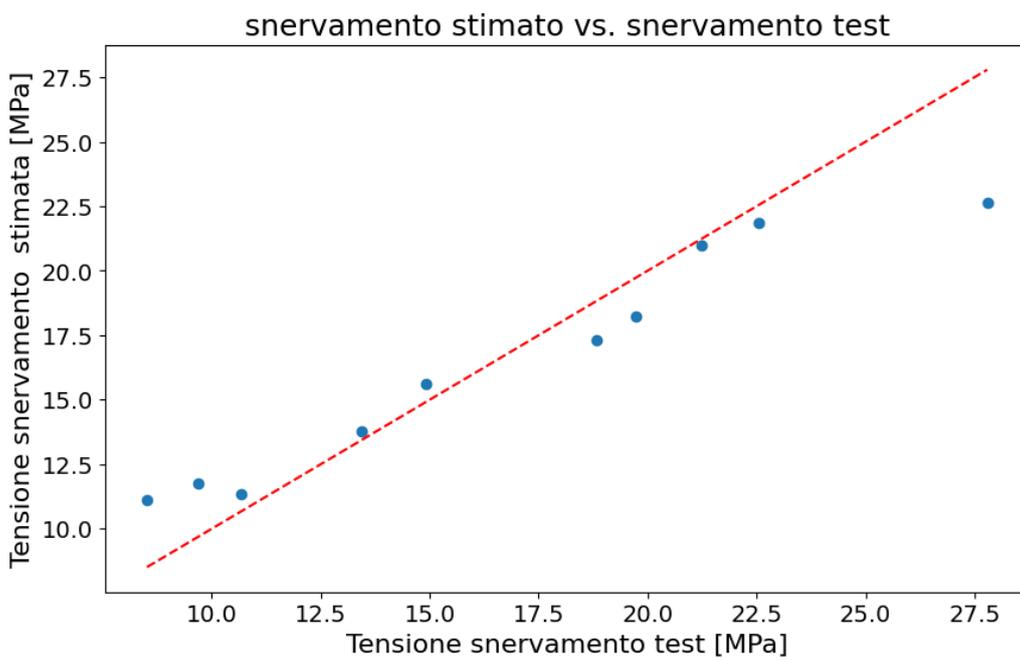


Figura 4.15: Accuracy plot tensione di snervamento

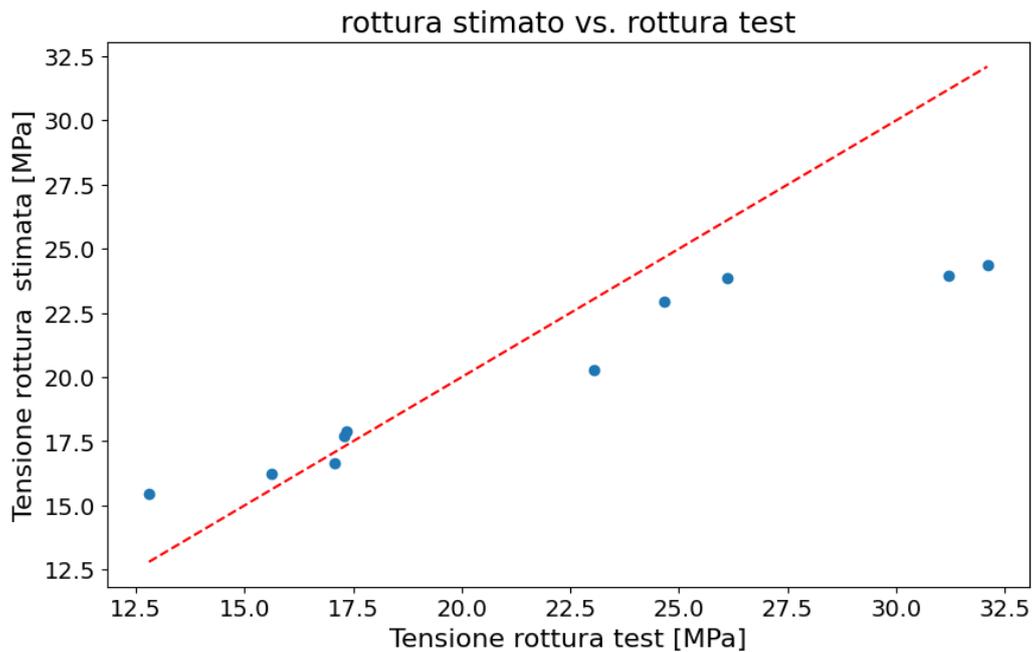


Figura 4.16: Accuracy plot tensione di rottura

Dai risultati riportati in tabella e dai grafici mostrati si evidenzia che il modello fornisce delle buone stime in termini di modulo elastico e di tensione di snervamento, perde precisione nella stima della tensione di rottura sulla quale si ha un errore maggiore.

Si riporta un confronto tra la curva numerica e i valori stimati dal modello. Il confronto è riportato nel caso di errore maggiore, Figura 4.17, e nel caso di errore minore, Figura 4.18, sulla tensione di rottura.

Il caso peggiore e il caso migliore sono rispettivamente le prove 8 e 7 riportate in Tabella 4.3.

Gli errori sulla stima della tensione di rottura sono riportati in Tabella 4.5

Tabella 4.5: Errori su tensione di rottura

Prova	Errore Assoluto	Errore Relativo
7	0.41 MPa	2.3 %
8	7.73 MPa	-24.1 %

Confronto curva numerica vs valori stimati dalla rete - Caso di stima peggiore

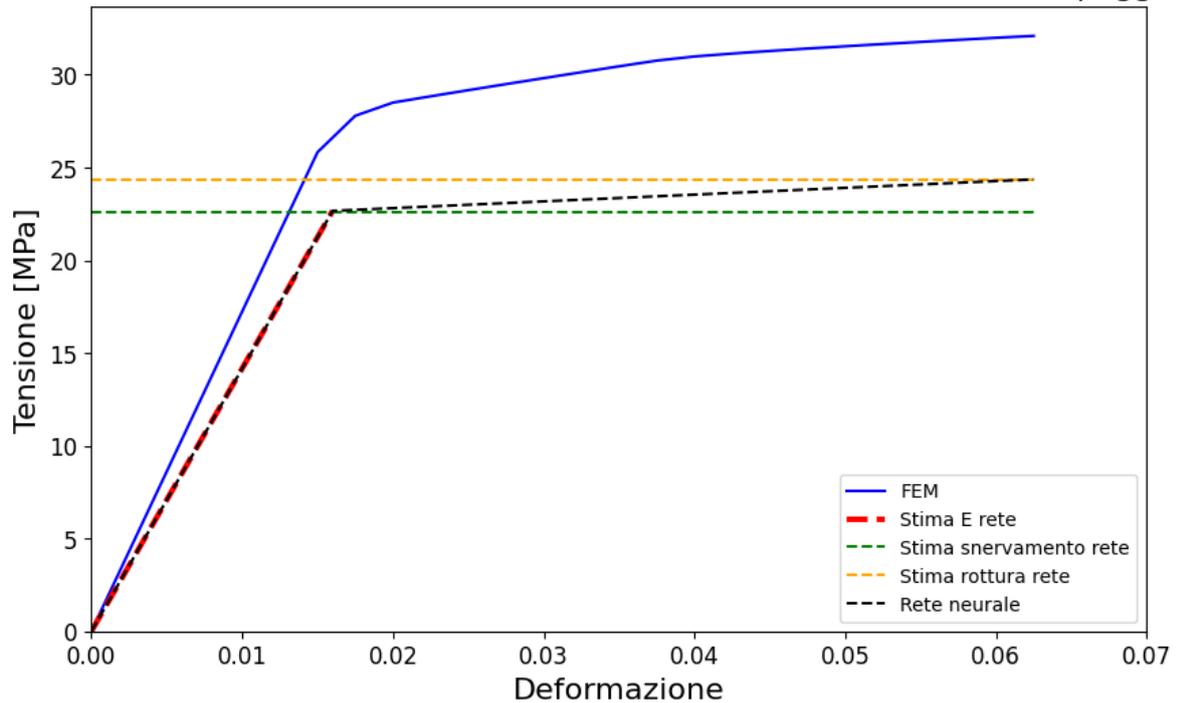


Figura 4.17: Caso peggiore

Confronto curva numerica vs valori stimati dalla rete - Caso di stima migliore

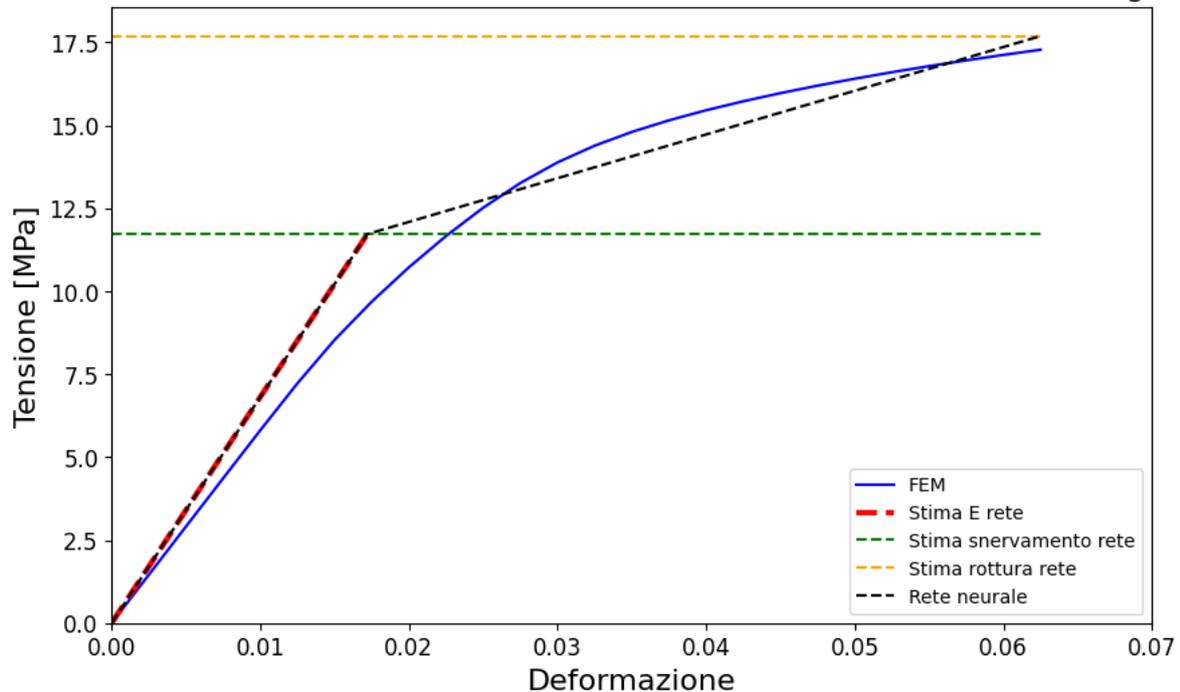


Figura 4.18: Caso migliore

Dai risultati ottenuti e mostrati nei grafici la rete risulta portare a una buona approssimazione delle proprietà del materiale. Nel caso peggiore ovviamente l'errore che si accetta stimando le proprietà è più alto,

tuttavia, considerando anche il caso migliore, mediamente la rete restituisce dei buoni risultati sulla stima delle proprietà.

Capitolo 5

Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro di tesi svolto risulta quindi motivato dall'esigenza di avere una stima delle proprietà meccaniche di un componente stampato con processo FFF.

Volendo fare un sunto l'attività svolta può essere schematizzata nei seguenti punti:

- Analisi del processo di stampa FFF;
- Correlazione tra parametri di stampa e geometria interna del componente prodotto;
- Studio della porosità del materiale e della conseguente riduzione di rigidità;
- Modellazione e validazione numerica del materiale e della geometria di stampa;
- Sviluppo di un modello di Machine Learning per la previsione delle proprietà meccaniche del componente.

Lo sviluppo dei punti sopra riportati ha portato ai seguenti risultati:

- Stima di un'equazione per calcolare la larghezza reale della bead di materiale depositato al variare dei parametri di stampa. Lo studio del processo di stampa ha condotto alla formulazione dell'equazione 2.10, necessaria per ricreare la geometria in ambiente CAE. Tale equazione si è dimostrata sufficientemente valida per l'ambito di questa attività. Inoltre, l'analisi condotta sui parametri di stampa lascia spazio all'inclusione di ulteriori variabili, ampliando così l'applicabilità dell'equazione.
- L'analisi della porosità (difetti irregolari) ha evidenziato le difficoltà nella sua modellazione in ambiente CAE, in particolare la complessità della mesh e l'elevato costo computazionale del modello FEM. La soluzione adottata, basata sullo studio di un RVE per rappresentare gli effetti della porosità, si è rivelata un approccio valido, consentendo di stimare la riduzione delle proprietà meccaniche dovuta ai vuoti irregolari. I risultati ottenuti sono riportati in tabella 3.6
- La modellazione numerica della geometria di stampa e il confronto con le prove di trazione sperimentali hanno permesso di valutare l'applicabilità dei risultati precedenti, ovvero l'equazione 2.10 e la Tabella 3.6. In particolare, la stima della geometria interna del componente stampato, ottenuta con l'equazione 2.10, si è rivelata accurata. Tuttavia, la riduzione di rigidità stimata con l'approccio RVE ha mostrato che i parametri forniti dallo studio preliminare di questa attività potrebbero già tenere conto dell'effetto della porosità. Per questo motivo, i moduli elastici ridotti E^* non sono stati utilizzati nella modellazione del materiale.

Oltre a ciò, il modello numerico ha evidenziato, attraverso la calibrazione dei parametri, la validità del criterio di snervamento scelto per modellare la plasticità del materiale.

Dal confronto tra le curve sperimentali e quelle numeriche, il modello FEM si è dimostrato adeguato per la modellazione di un componente prodotto mediante processo FFF.

- L'approccio di Machine Learning si è rivelato efficiente nella stima delle proprietà meccaniche considerate. Sulla base dei risultati del FEM, è stato possibile addestrare la rete e utilizzarla per stimare il modulo elastico E , la tensione di snervamento e la tensione di rottura del componente. L'uso della rete neurale risulta vantaggioso in quanto consente di evitare i lunghi tempi di costruzione e simulazione del modello FEM.

I risultati ottenuti permettono di affermare che gli obiettivi preposti a monte dell'attività sono sviluppabili e raggiungibili.

L'idea di stimare le proprietà meccaniche di un componente, al variare dei parametri di stampa con l'utilizzo di una rete neurale, è effettivamente valida e realizzabile.

Si precisa che i risultati ottenuti sono frutto di un primo approccio al problema.

La metodologia e le valutazioni fatte possono essere approfondite e migliorate, al fine di avere previsioni migliori delle proprietà meccaniche.

5.1 Sviluppi futuri

Partendo i risultati ottenuti in questa tesi, gli sviluppi potrebbero essere i seguenti

- inclusione di altri parametri all'interno del piano sperimentale per stimare l'equazione 2.9, in particolare includere lo studio dell'influenza di
 - diametro dell'ugello di estrusione
 - velocità di stampa
 - temperatura di stampa
- approfondire lo studio sulla porosità dovuta ai difetti irregolari, in particolare concentrarsi nel capire come questa varia con i parametri di processo,
- rivalutare le stime delle proprietà meccaniche fatte nello studio a monte della tesi, per capire se si sta tenendo già conto della porosità,
- condurre altre prove di trazione sperimentali, per migliorare la validazione del modello FEM e la calibrazione dei parametri che lo caratterizzano,
- modellare il danneggiamento del materiale nel modello FEM, avere una descrizione del danneggiamento e della rottura del materiale nelle simulazioni numeriche, permetterebbe di stimare anche le tensioni di rottura in maniera più precisa, non condizionate dalle assunzioni fatte per estrarle dalle curve,
- aumentare il numero di esempi presenti nel database di training, avere più dati su cui addestrare la rete porterebbe sicuramente ad avere prestazioni migliori del modello, in termini di stime sulle proprietà meccaniche,
- approfondire e migliorare l'architettura e l'addestramento della rete

Bibliografia

- [1] URL: <https://keras.io/>.
- [2] Michael Hebda Claire McIlory Ben Whiteside Fin Caton Rose Phil Coates. “A method for predicting geometric characteristics of polymer deposition during fused-filament-fabrication”. In: *Additive Manufacturing* (2019).
- [3] Prof. Federico Colombo. “Le stampanti 3D a deposito di filamento (FDM)”. In: *Slide del corso "Progettazione per la fabbricaione additiva" - Politecnico di torino* (2024).
- [4] Andrea D’Agostino. *Cosa è la cross-validazione nel machine learning*. URL: <https://www.diariodiunanalista.it/posts/cosa-e-la-cross-validazione-nel-machine-learning/>.
- [5] Google. *Machine Learning Crash Course*. URL: <https://developers.google.com/machine-learning/crash-course?hl=it>.
- [6] Google. *What is Machine Learning?* URL: <https://developers.google.com/machine-learning/intro-to-ml/what-is-ml>.
- [7] Anis A. Ansari M. Kamil. “Effect of print speed and extrusion temperature on properties of 3D printed PLA using fused deposition modeling process”. In: *Materials Today: Proceedings* (2021).
- [8] Chun-Ying Lee Chung-Yin Liu. “The influence of forced-air cooling on a 3D printed PLA part manufactured by fused filament fabrication”. In: *Additive Manufacturing* (2019).
- [9] D. Xu J. -F Agassant F. Pigeonneau. “Dimensions of the deposited strand in the material extrusion process:Experimental and numerical investigations”. In: *Additive Manufacturing* (2022).
- [10] Prof.ssa Cristiana Delprete Prof. Davide Salvatore Paolino. “Piani fattoriali completi”. In: *Slide del corso "Design of Experiment" - Politecnico di torino* (2024).
- [11] Qian Xie Manu Suvarna Jiali Li Xinzhe Zhu Jiajia Cai Xiaonan Wang. “Online prediction of mechanical properties of hot rolled steel plate using machine learning”. In: *Materials and Design* (2021).