



UNIVERSITÀ  
POLITECNICA  
DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

---

**Simulazione del processo di Directed Energy  
Deposition tramite il software Ansys:  
Validazione tramite un caso reale.**

**Simulation of the Directed Energy Deposition  
process using Ansys software: Validation  
through a real case.**

Relatore:

*Prof. Marco Mandolini*

Tesi di laurea di:

Alessio Cameli

Correlatore:

*Prof. Eleonora Santecchia*

---

Anno Accademico 2023-2024

*Alla mia famiglia*

# I. Ringraziamenti

*Prima di proseguire, sento di dover sinceramente ringraziare per l'insegnamento offerto e per la loro disponibilità a collaborare il Prof. Ing. Marco Mandolini, Prof. Ing. Eleonora Santecchia, l'Ing. Simone Gallozzi, l'Ing. Gabriele Grima, l'Ing. Alberto Santoni con i quali ho avuto modo di relazionarmi nel corso del tirocinio e nello sviluppo di questa tesi.*

*Ringrazio tutti i miei familiari e la mia ragazza per il sostegno, la vicinanza e la comprensione mostrati durante questo percorso.*

*Grazie ai miei amici per il confronto ed i bei momenti che abbiamo condiviso e che divideremo.*

# II. Sommario

<b>Introduzione:</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Stato dell'arte</b> .....	<b>8</b>
<b>1.1 Nascita e sviluppo dell'Additive Manufacturing</b> .....	<b>8</b>
<b>1.2 Processo AM</b> .....	<b>10</b>
1.2.1 Classificazione delle tecnologie di AM:.....	11
<b>1.3 Polvere metallica</b> .....	<b>12</b>
1.3.1 Atomizzazione a gas.....	13
1.3.2 Caratteristiche e proprietà delle polveri .....	14
1.3.3 Usi e applicazioni:.....	15
<b>1.4 Directed Energy Deposition (DED)</b> .....	<b>16</b>
1.4.1 Parametri DED .....	18
1.4.2 Proprietà Meccaniche e difetti .....	20
1.4.3 Vantaggi e Svantaggi:.....	22
1.4.4 Usi ed Applicazioni .....	22
<b>2 Metodo</b> .....	<b>24</b>
<b>2.1 Ansys</b> .....	<b>24</b>
2.1.1 Metodo degli Elementi Finiti (FEM) .....	25
<b>2.2 Metodologia e workflow per la simulazione DED su Ansys</b> .....	<b>26</b>
<b>2.3 Scansione 3D</b> .....	<b>27</b>
<b>3 Caso studio</b> .....	<b>29</b>
<b>3.1 Componente</b> .....	<b>29</b>
<b>3.2 Gcode</b> .....	<b>31</b>
<b>3.3 Processo di simulazione:</b> .....	<b>32</b>
<b>4 Risultati e discussione</b> .....	<b>35</b>
<b>4.1 Analisi termiche</b> .....	<b>35</b>
<b>4.2 Analisi Strutturali</b> .....	<b>36</b>
4.2.1 Analisi della deformazione con sistema riferimento cilindrico del campione con mesh 0,4mm .....	36
4.2.2 Analisi tensioni residue sul campione con mesh 0,4mm .....	40
4.2.3 Analisi delle deformazioni con sistema riferimento cilindrico del campione con mesh 4mm.....	41
4.2.4 Analisi tensioni residue sul campione con mesh 4mm .....	44
<b>4.3 Confronto deformazioni su provino reale e simulato</b> .....	<b>45</b>
4.3.1 Confronto con provino mesh 0,4mm.....	45
4.3.2 Confronto con provino mesh 4mm .....	47
4.3.3 Confronto risultati provini con mesh diverse e discussione.....	49
<b>5 Conclusione</b> .....	<b>50</b>
<b>6 Bibliografia</b> .....	<b>51</b>

### III. Elenco delle figure

Figura 1.1-Stampante SLA-1	8
Figura 1.2 - Processo AM[4]	10
Figura 1.3- Tipologie AM [6]	12
Figura 1.4-Processo di Atomizzazione a gas [8]	13
Figura 1.5- Schema DED	16
Figura 1.6-Classificazione tipologie Directed Energy Deposition [9]	16
Figura 1.7-Testa deposizione DED [11]	17
Figura 1.8- Esempio provino con strati a composizione variabile[12]	17
Figura 1.9- Influenza della Diluizione sul materiale depositato[14]	19
Figura 1.10- Relazione tra Velocità di Scansione (v) e Potenza Laser (P) [10]	19
Figura 1.11- Correlazione GED e Diluizione [14]	20
Figura 1.12-Andamento Temperatura all'aumentare degli strati [14]	20
Figura 1.13 a) porosità interstrato b) porosità intrastrato [14]	22
Figura 1.14- (a) componente nuovo (b) componente rotto (c) componente riparato [20]	23
Figura 2.1-scanner Go! Scan Spark	27
Figura 3.1 - modello cilindro cavo	29
Figura 3.2- modello cilindro cavo e base di stampa	29
Figura 3.3- AISI 316L Powder [22]	30
Figura 3.4- Prima Additive LASERDYNE 430 BD	31
Figura 3.5- Scrittura del Gcode in Excel	32
Figura 3.6- Gcode in file.txt	32
Figura 3.7-Ansys Workbench Project	32
Figura 3.8-Ansys Mechanical	33
Figura 3.9-Parametri di stampa	33
Figura 3.10-Percorso testa deposizione	34
Figura 3.11- Analisi Termica	34
Figura 3.12-Analisi Strutturale	34
Figura 4.1-Risultati Analisi termica	35
Figura 4.2- sezione ZY con Probe	36
Figura 4.3- Sezione 1	37
Figura 4.4-Sezione 2	38
Figura 4.5-Sezione 3	39
Figura 4.6-Risultati corpo intero	40
Figura 4.7-Sezione	40
Figura 4.8-Sezione 1	41
Figura 4.9-Sezione 2	42
Figura 4.10-Sezione 3	43
Figura 4.11-Risultati corpo intero	44
Figura 4.12-Sezione corpo	45
Figura 4.13-Confronto geometrie	46
Figura 4.14-Deviazione 3D geometria mesh 0,4mm	46
Figura 4.15-Piani di taglio geometria mesh 0,4mm	47
Figura 4.16-Deviazione 2D geometria mesh 0,4mm	47
Figura 4.17-Confronto geometria mesh 4mm	48
Figura 4.18-Deviazione 3D geometria mesh 4mm	48
Figura 4.19- Deviazione 2D geometria mesh 4mm (A)	49
Figura 4.20-Deviazione 2D geometria mesh 4mm (B)	49

## IV. Elenco delle tabelle

Tabella 1.1- Categorie ASTM	11
Tabella 1.2- Processi di produzione della polvere metallica	13
Tabella 1.3-Caratteristiche tipiche DED [10]	16
Tabella 1.4-Vantaggi e Svantaggi DED	22
Tabella 3.1- Elementi AISI 316L	30
Tabella 3.2- Parametri di Processo	31
Tabella 4.1-probe sezione 1	37
Tabella 4.2-probe sezione 2	38
Tabella 4.3-probe sezione 3	39
Tabella 4.4-probe sezione 1	42
Tabella 4.5-probe sezione 2	43
Tabella 4.6-probe sezione 3	44

## V. Elenco delle formule

Equazione 1.1- Diluizione	18
Equazione 1.2-GED	19

# Introduzione:

Il lavoro di tesi di seguito presentato, svolto presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM), ha come obiettivo lo studio del modulo Ansys per la simulazione del processo di stampa 3D "Directed Energy Deposition".

Ansys è un software di simulazione ingegneristica molto diffuso, tra i suoi vari moduli aggiuntivi è stato introdotto recentemente il modulo "AM DED Process" che permette di simulare processi di Additive Manufacturing realizzati in Directed Energy Deposition ed ottenere dati importanti tramite analisi strutturali e termiche.

L'obiettivo di questa tesi è quello di validare un workflow per simulare tramite il software Ansys il processo di stampa 3D di un pezzo tramite la tecnologia DED, avendo così risultati dalle analisi termiche e strutturali. Per stabilire la bontà dei risultati forniti dal software e quindi certificare il suo corretto utilizzo in casi del genere, i risultati ottenuti sulla deformazione verranno confrontati con la misurazione della deformazione effettiva effettuata su un caso reale (componente cilindrico cavo) stampato in Directed Energy Deposition all'interno dei laboratori del DIISM.

Il componente reale è stato scansionato tramite lo scanner "Go! SCAN SPARK" di Creaform, in modo da ottenere un modello CAD da confrontare con il modello ricavato dalle simulazioni in Ansys.

La tesi si articola in cinque capitoli: stato dell'arte, metodo, caso studio, risultati e discussione e conclusioni.

Il primo capitolo è volto ad introdurre il lettore all'Additive Manufacturing, dalla sua storia al suo funzionamento, per poi focalizzarsi sulla Directed Energy Deposition, descrivendola a fondo e spiegandone il funzionamento, i parametri e le proprietà. Viene poi fatta una presentazione riguardo i materiali da utilizzare.

Il secondo capitolo tratta la metodologia usata per il lavoro di tesi. Verrà quindi approfondito il software Ansys mostrando come il software di simulazione elabora i dati. Inoltre, verrà descritto il funzionamento di uno scanner 3D, poi utilizzato all'interno del caso studio per ricreare la forma cilindrica del componente analizzato in quanto per effettuare misurazioni post stampa il componente era stato tagliato a metà.

Il terzo capitolo illustra il caso studio. Viene inizialmente presentato, il componente reale e viene spiegato come esso sia stato realizzato nel laboratorio del DIISM. Successivamente viene esposto il processo di simulazione adoperato e gli step per arrivare ai risultati finali di questo elaborato.

Nel quarto capitolo vengono esposti e discussi i risultati ricavati dal processo di simulazione in Ansys, mentre nell'ultimo capitolo si riportano le conclusioni e i pensieri finali basati sui risultati ottenuti e sul confronto con il caso reale.

# 1 Stato dell'arte

Per decenni, per la realizzazione di un componente tridimensionale si sono usate solamente le tecniche classiche di costruzione, ossia le tecnologie sottrattive e formative. Tecniche di questo tipo sono, ad esempio, la fresatura, la tornitura, e la foratura. Tutte queste tecniche vengono definite tecnologie sottrattive perché hanno in comune un aspetto molto importante, ossia quello di iniziare il processo da un semilavorato per poi rimuovere materiale in eccesso per ricavare il componente finito o quasi.

Negli ultimi anni però, accanto a queste lavorazioni tradizionali, si è sviluppato un nuovo modo di realizzare un oggetto tridimensionale. Infatti, nel mondo ingegneristico, si sta sempre più diffondendo quella tecnologia manifatturiera che viene definita Additive Manufacturing, o più comunemente Stampa 3D.

La differenza sostanziale con le usuali tecnologie sottrattive è che l'Additive Manufacturing è una tecnologia additiva. Questo significa che, non si parte più da un semilavorato a cui si asporta materiale, ma l'oggetto desiderato si ottiene aggiungendo materiale strato su strato tramite un processo di giunzione, realizzato secondo vari tipi di tecniche.

## 1.1 Nascita e sviluppo dell'Additive Manufacturing

Sebbene la popolarità e diffusione dell'Additive Manufacturing sia un fatto di recente data, in realtà questa tecnologia è stata concepita e sviluppata molti anni fa fino ad affermarsi in era moderna.

Le origini dell'Additive Manufacturing risalgono al 1981 quando Hideo Kodama, designer automobilistico giapponese registrò il primo brevetto della prototipazione rapida. Negli anni successivi Charles Hull, considerato l'inventore della tecnologia additiva, creò la prima parte stampata in 3D in assoluto, inventando di fatto la stereolitografia (SLA). La stereolitografia si basa sull'uso di una sorgente di luce all'interno di una vasca di resina, l'azione della luce fa sì che la resina si indurisca e che si generi così, strato dopo strato, l'oggetto 3D voluto.

L'anno dopo, nel 1984, Hull deposita il suo brevetto per il sistema di stereolitografia e nel 1986 collabora a fondare la 3D Systems, di cui ancora oggi è vicepresidente. L'azienda nel 1987 rilascia sul mercato la prima stampante 3D, ovvero la stampante per stereolitografia SLA-1 (Figura 1.1.1)[1]



*Figura 1.1-Stampante SLA-1*

Un altro step importante per lo sviluppo dell'Additive Manufacturing è il brevetto da parte di Carl Deckard, nel 1989, del Selective Laser Sintering (SLS), processo nel quale si fa uso di un laser per



fondere o, sinterizzare polveri di diversi materiali.[2] In seguito, la macchina stende strato dopo strato le polveri su una tavola, con il laser che ha la funzione di saldare tra loro le piccole particelle solide.

L'evoluzione di questa tecnica ha portato alla Direct Metal Sintering (DMLS), una delle migliori tecniche di Additive Manufacturing e alla Selective Laser Melting (SLM), una delle tecniche più precise e accurate. Queste due tecnologie vengono principalmente adoperate con materiali metallici e, allo stato attuale dello sviluppo tecnologico, i due termini sono sostanzialmente sovrapponibili.

Negli anni successivi vennero sviluppate altre tecniche, come la rivoluzionaria Fused Deposition Modeling (FDM) che si basa sull'uso di un filamento di polimero che viene riscaldato da una resistenza e fatto passare attraverso un ugello, affinché avvenga la solidificazione strato dopo strato.

Una altra tappa importante per lo sviluppo dell'Additive manufacturing è stata nel 2005, quando Adrian Bowyer inventò la prima stampante 3D autoreplicante.

Nella prima metà degli anni 2000 si è discusso sulla terminologia corretta da impiegare per identificare sotto un unico termine tutte queste nuove tecniche che si erano brevettate. I termini precedentemente usati per descrivere queste tecniche (Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing e Rapid Tooling) sottolineavano tutti la caratteristica additiva del processo, che prevede infatti la realizzazione strato dopo strato dell'oggetto finale, a differenza delle classiche tecnologie sottrattive nelle quali il prodotto finale era ottenuto tramite asportazione di materiale. Inoltre, le tecnologie additive permettono la realizzazione di un componente senza ricorrere all'uso di utensili e stampi, ma partendo direttamente da un modello 3D del componente stesso, rendendo possibile realizzare forme complesse e predisponendo la digitalizzazione dei processi di produzione, che è alla base dell'Industria 4.0.

Queste discussioni hanno quindi portato alla definizione di Additive Manufacturing, come definito nella norma ASTM F2792-12a (Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies). [3] Questo termine è quindi di valenza universale e ufficiale e indica tutte quelle applicazioni costruttive che prevedono l'uso di una tecnologia il cui processo fondamentale è unire uno o più materiali, partendo da un modello 3D, per realizzare tramite sovrapposizione di uno strato sopra l'altro, l'oggetto finale.

## 1.2 Processo AM

Il processo di additive manufacturing prevede diversi step, in Figura 1.2 è riportato il processo di fabbricazione di un componente realizzato in AM.



Figura 1.2 - Processo AM[4]

Questo processo parte dalla realizzazione di un modello CAD (Computer Aided Design), ossia un file che rappresenti la geometria tridimensionale del componente da fabbricare. Durante la realizzazione del modello CAD è importante tenere conto del tipo di tecnologia AM che si utilizzerà in quanto ogni tipologia ha fattori e limiti da tener presente durante la progettazione. Nella progettazione meccanica si vanno ad usare dei software di tipo parametrico, ossia software che siano in grado tramite la regolazione di alcuni parametri e dati di modificarne le caratteristiche principali, i vari vincoli e relazioni tra diversi elementi del modello.

Il modello CAD verrà inviato al software della stampante 3D in formato file.stl, dopodiché si procede con lo "slicing" del modello, ovvero si va a tradurre il modello 3D del componente in una successione di strati di spessore uguale allo spessore di deposizione della macchina.

Una volta impostati tutti i parametri di stampa, inserito il file in macchina e selezionato il materiale con cui si vuole realizzare il componente, si può procedere con l'avvio del processo di stampa.

Dopo il completamento del componente questo viene prelevato dal piano di stampa e viene sottoposto ad eventuali rifiniture e/o trattamenti di post-produzione che dipendono dal tipo di stampa e dal tipo di componente che si sta realizzando, come ad esempio: [5]

- Rimozioni di eventuali supporti
- Sabbiatura
- Verniciatura
- Trattamenti termici
- Rifiniture alle macchine utensili

## 1.2.1 Classificazione delle tecnologie di AM:

Le fasi di un processo di AM sono le stesse per tutte le sue tipologie; tuttavia, la tecnica di realizzazione del componente varia in base alla tipologia di Additive manufacturing scelta. Le principali tipologie di AM secondo le categorie ASTM (American Society for Testing and Materials) si possono vedere in tabella 1.1.

Tabella 1.1- Categorie ASTM

Categorie ASTM	Tecnologie Principali	Materiale	Processo
<b>Vat photopolymerization</b>	Stereolithography (SLA)	Plastica	Polimerizzato con laser
	Digital light Processing (DLP)	Plastica	Polimerizzato con proiettore
<b>Material Extrusion</b>	Fused Deposition Modeling (FDM)	Plastica-Compositi	
<b>Material Jetting</b>	Material Jetting (MJ)	Plastica	
	Photopolymer Jetting (PJ)	Plastica	Polimerizzato con luce UV
<b>Binder Jetting</b>	Binder Jetting (BJ)	Sabbia-Plastica-Metallo	Unito con agente legante
<b>Powder Bed Fusion</b>	Selective Laser Sintering (SLS)	Plastica	Fuso con laser
	Direct Metal laser Sintering (DMLS)	Metallo	Fuso con laser
	Selective laser Melting (SLM)	Metallo	Fuso con laser
	Electron Beam Melting (EBM)	Metallo	Fuso con fascio di elettroni
<b>Direct Energy Deposition</b>	Laser Metal Deposition (LDM)	Metallo	Fuso con laser
	Laser Engineering Net Shape (LENS)	Metallo	Fuso con laser
	Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)	Metallo	Fuso con fascio di elettroni
<b>Sheet Lamination</b>	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Carta-Compositi	

Le tipologie si possono dividere principalmente in base al tipo di materia prima adoperata:

- **Polvere:** Utilizzata principalmente in tecnologie come la sinterizzazione laser selettiva (SLS), la fusione laser selettiva (SLM) e la fusione a fascio di elettroni (EBM). Materiali come metalli (alluminio, titanio, acciaio, ecc.), ceramiche e polimeri possono essere utilizzati in forma di polvere.

- **Filamento:** Utilizzato nelle stampanti FDM (Fused Deposition Modeling) o FFF (Fused Filament Fabrication). Il filamento è una corda continua di materiale (solitamente plastico, come PLA, ABS, PETG, o materiali compositi) che viene fuso e depositato strato su strato.
- **Resina liquida:** Utilizzata nella stereolitografia (SLA) e nella Digital Light Processing (DLP). La resina fotopolimerica liquida viene solidificata strato su strato mediante un laser (SLA) o una sorgente di luce UV (DLP).
- **Laminati:** Utilizzati nel Laminated Object Manufacturing (LOM). Fogli di materiale (che possono essere carta, plastica o metallo) vengono tagliati e incollati insieme per creare l'oggetto desiderato.

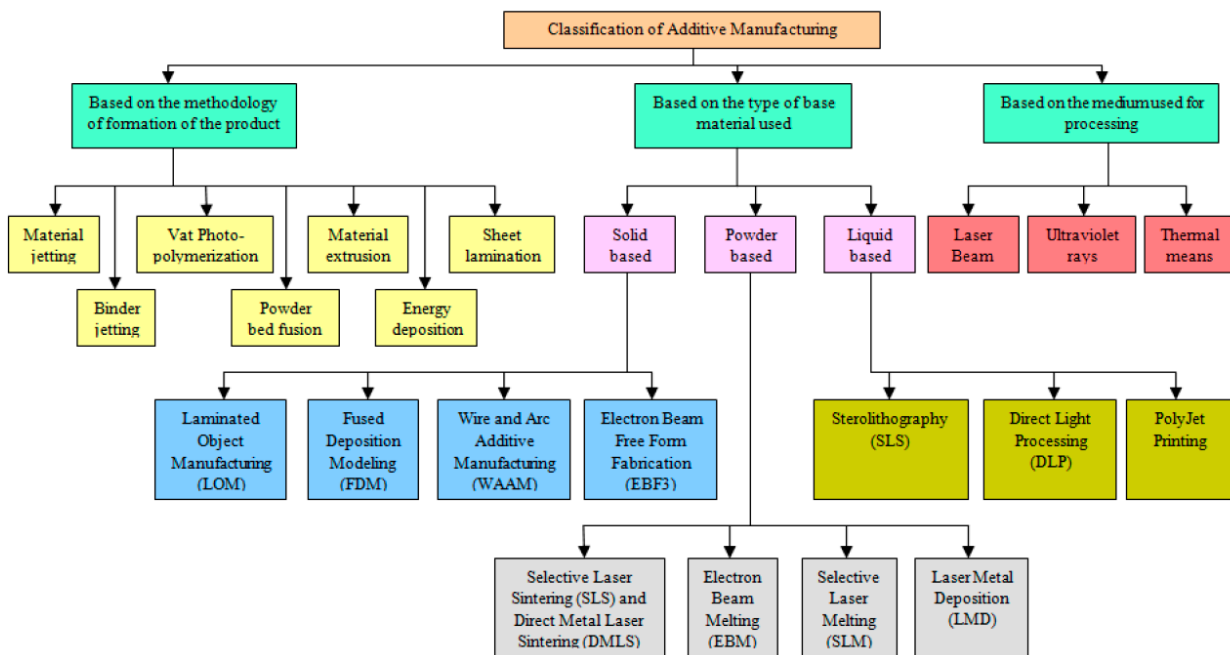


Figura 1.3- Tipologie AM [6]

## 1.3 Polvere metallica

Ai fini della nostra trattazione ci concentriamo sulla polvere metallica come materia prima, in quanto usata nella Directed Energy Deposition.

I principali processi di produzione delle polveri AM sono l'atomizzazione a gas, l'atomizzazione a barra fusa a induzione (EIGA), il filo atomizzato al plasma (PAW) e l'atomizzazione ad elettrodo rotante al plasma (PREP).[7]

Le tecniche per l'ottenimento della polvere metallica si basano sulla sinterizzazione tramite laser, fascio di elettroni oppure sulla deposizione di un legante chimico su un letto di polvere omogeneo.

Le polveri metalliche utilizzate vengono anche chiamate polveri pre-legate in quanto hanno già la composizione chimica della lega da ottenere. Il processo più diffuso ed utilizzato per l'ottenimento di polvere metalliche è l'atomizzazione a gas.

### 1.3.1 Atomizzazione a gas

Rappresenta una delle più diffuse tecnologie per la creazione di polvere metallica, con questa tecnologia si riesce ad avere una buona qualità delle particelle ad un costo contenuto. Il processo consiste nell'immissione di flusso di metallo fuso che viene disintegrato in goccioline da un getto di gas ad alta pressione. Le goccioline cadono liberamente all'interno di una torre e si solidificano durante la caduta, dove la tensione superficiale del metallo ha il tempo di tirare la goccia in una sfera. Per proteggere il metallo dall'ossidazione, viene generalmente utilizzato un gas nebulizzatore, in genere Azoto o Argon.

Dal processo di atomizzazione si ottengono particelle sferiche, una composizione chimica omogenea e granulometrie tipiche a seconda del processo, in particolare granulometrie maggiori nel caso del fascio di elettroni e minori per sorgenti laser.

In genere la dimensione delle particelle di polvere metallica per un processo di Direct Energy Deposition si aggira sulle 45-150 micron.

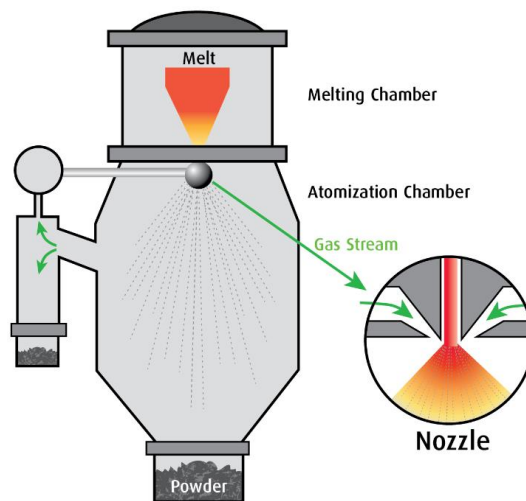


Figura 1.4-Processo di Atomizzazione a gas [8]

Sistemi alternativi e meno diffusi usano il plasma al posto dei gas, ma comunque il principio rimane identico.

La Tabella 1.3 riassume i processi di produzione della polvere metallica.

Tabella 1.2- Processi di produzione della polvere metallica

Processo	Vantaggi	Svantaggi
Atomizzazione a gas (GA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Qualità metallurgiche eccellenti</li> <li>- Alte velocità di flusso della polvere</li> <li>- Ampia varietà di leghe</li> <li>- Basso costo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Leghe reattive non processabili</li> </ul>
Plasma Atomised Wire Process (PAW)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Qualità metallurgiche eccellenti</li> <li>- Leghe reattive processabili</li> <li>- Polvere con buona sfericità</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costo elevato</li> <li>- Materia prima disponibile sotto forma di filo</li> </ul>
Atomizzazione Barra Fusa per Induzione (EIGA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Qualità metallurgiche elevate</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costo elevato</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alte velocità di flusso della polvere</li> <li>- Alta produzione</li> <li>- Leghe di titanio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materia prima sotto forma di barra</li> </ul>
Plasma Rotating Electrode Process (PREP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Qualità metallurgiche elevate</li> <li>- Alte velocità di flusso della polvere</li> <li>- Polvere con perfetta sfericità</li> <li>- Leghe di titanio</li> <li>- Leghe reattive e ad alta temperatura di fusione processabili</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costo elevato</li> <li>- Barre di alta qualità richieste</li> </ul>
Atomizzazione ad acqua	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Basso costo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bassa qualità metallurgica</li> <li>- Polvere non sferica</li> </ul>

### 1.3.2 Caratteristiche e proprietà delle polveri

Su circa 5500 leghe metalliche esistenti, solo poche sono possibili da stampare in 3D perché durante il processo additivo le dinamiche di fusione e solidificazione, a causa di velocità troppo elevate di circa  $10^5\text{K/s}$ , portano a microstrutture non tollerabili con grani grossi e colonnari e cricche periodiche.

Le polveri vengono solitamente testate per trovare i seguenti dati; distribuzione granulometrica (PSD), densità apparente (AD), densità di impaccettamento (PD) e portata Hall.[7]

**Chimica:** La chimica di una polvere è fondamentale poiché definisce la lega. L'analisi è specificata definendo un intervallo per ciascun elemento. Nella maggior parte delle leghe esistono elementi maggiori, minori e oligoelementi. Ad esempio, l'acciaio inossidabile 316L ha Cr, Ni, Mo come elementi principali, Si e Mn come elementi minori e C, P, S, N e O come oligoelementi, il resto è Fe. Gli elementi principali determinano le proprietà della lega. Va notato che per alcune leghe gli elementi interagiscono e devono essere mantenuti in proporzione.

**Portata Hall:** indicatore del tempo necessario alla polvere per passare attraverso un orifizio

**Densità apparente (AD):** viene determinata versando un peso noto di polvere in un contenitore graduato

**Densità di impaccettamento (PD):** si riferisce alla frazione di volume occupato dai solidi metallici in una data quantità di polvere., questa grandezza è importante perché influisce sulle proprietà fisiche e sul comportamento della polvere durante il processo di lavorazione e formatura.

**Sfericità:** una buona sfericità è richiesta per i processi AM in quanto una forma sferica migliora sia la portata che la densità relativa, entrambe desiderabili per la maggior parte dei processi AM

**Conducibilità termica:** influenza le dinamiche di solidificazione delle polveri

**Distribuzione granulometrica (PSD):** Tutte le polveri metalliche AM sono specificate con una distribuzione dimensionale delle particelle (PSD). La PSD è solitamente descritta in percentuali: D10, D50 e D90. D10 indica che il 10% della polvere in peso è più fine di questa dimensione micron. La dimensione D90 indica che il 10% della polvere in peso è più grossolana della dimensione del micron.

### **1.3.3 Usi e applicazioni:**

La produzione additiva trova uso in una moltitudine di settori che vanno dall'automobilistico, aeronautico, e medico, e viene tipicamente usata per Rapid Manufacturing (creazione di particolari senza i vincoli delle tecnologie tradizionali), Rapid Tooling (creazione rapida di stampi per ottenere altri particolari) e Rapid Prototyping.[5]

Con il termine Rapid Prototyping si indica l'insieme delle tecniche industriali necessarie alla realizzazione fisica del prodotto in tempi relativamente brevi e a partire da un progetto CAD.

Con Rapid Tooling, invece, si intende la tecnica che consente, in tempi molto più veloci, di realizzare attrezzature per la creazione di prototipi in alternativa del classico stampo metallico.

Infine, il termine Rapid Manufacturing, indica la produzione rapida di prodotti personalizzati per il cliente e in questo caso non viene realizzato alcun modello, come invece accade con il Rapid Prototyping, ma prodotti finali per l'utilizzo in condizioni reali.

L'utilizzo dell'Additive Manufacturing per la produzione di componenti, è giustificata dai seguenti vantaggi e limitati svantaggi:

#### **Vantaggi**

- capacità di realizzazione di geometrie complesse
- processo economico
- ecosostenibile
- costo di realizzazione minore
- libertà di progettazione
- ottimizzazione topologica
- diminuzione TTM (Time To Market)
- flessibilità

#### **Svantaggi**

- qualità superficiale peggiore
- trattamenti post-produzione
- quantità e dimensione dei componenti realizzabili
- presenza di leghe non processabili

## 1.4 Directed Energy Deposition (DED)

La tecnologia Direct Energy Deposition (deposizione diretta di energia), il cui schema è mostrato in Figura 1.5, crea strutture fondendo il materiale metallico, polvere o filo, tramite una fonte di calore concentrata (laser, fascio di elettroni o arco), mentre viene depositato in un punto preciso.

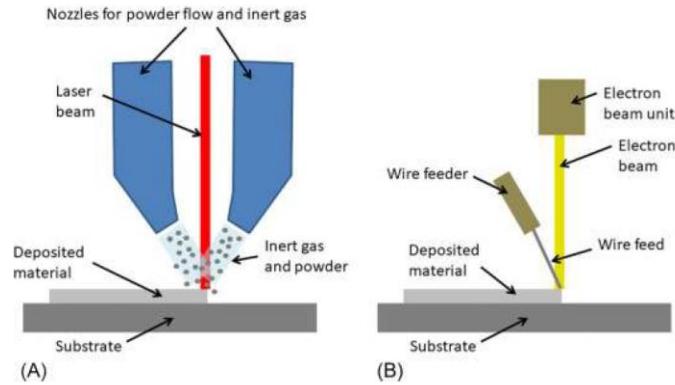


Figura 1.5- Schema DED

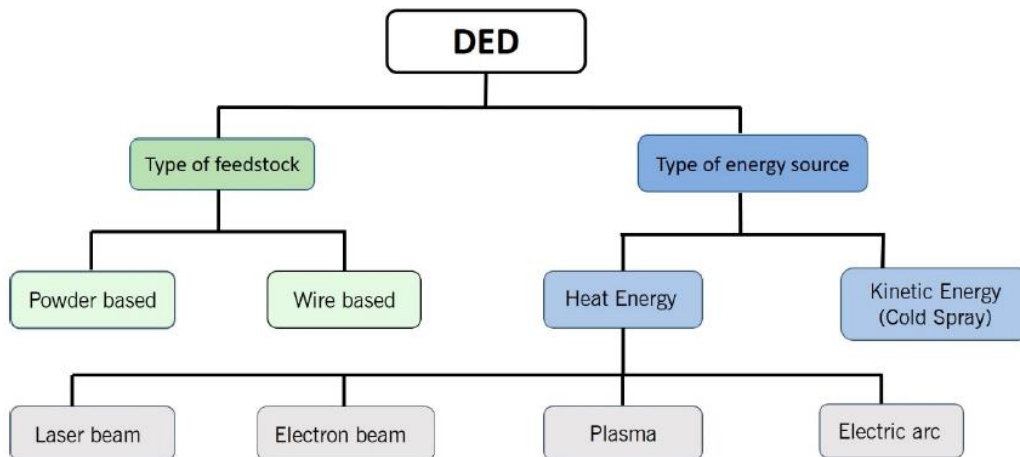


Figura 1.6-Classificazione tipologie Directed Energy Deposition [9]

Tabella 1.3-Caratteristiche tipiche DED [10]

Materiale	Polvere metallica
Tolleranze tipiche	$\pm 0.02$ mm
Spessore minimo del layer	0.02 mm
Finitura superficiale	40 $\mu$ m RA
Densità	Fino al 99%

Fra queste varie tipologie la più utilizzata e diffusa è la Laser Powder Deposition; infatti, molto spesso quando si fa riferimento alla tecnologia DED si sottintende proprio tale tipologia.

Le sue applicazioni sono già numerose in molti settori ma, mentre altri processi di AM in metallo sono stati studiati e testati da molto tempo la DED è una tecnologia relativamente giovane, per cui il suo potenziale non è stato ancora pienamente sfruttato.



Il sistema DED è costituito da una sorgente laser che provvede alla fusione di un flusso di polvere metallica distribuito per mezzo di un ugello andando così a formare il pool di fusione che solidificando forma la traccia. Il processo di legame e fusione della polvere metallica parte prima da una parziale fusione mediante energia laser, per poi avere una completa fusione quando le particelle entrano in contatto con il bagno di fusione, quindi ottenendo la creazione di un legame metallico tra la polvere e substrato. [10]

La testa di deposizione di tale tecnologia è l'elemento cruciale del processo in quanto:

- provvede alla deposizione della polvere metallica trasportata da un gas inerte ed iniettata nel percorso focale del laser
- In essa è contenuto il raggio laser focalizzato su un punto per fondere la polvere solo in prossimità di quella porzione

Il gas all'interno della testa di deposizione ha uno scopo duale in quanto deve incanalare le polveri metalliche verso il fuoco del raggio laser (funzione di trasporto), ed evitare fenomeni di ossidazione sul bagno fuso (funzione protettiva). Per ottenere geometrie complesse e per sfruttare a pieno le potenzialità di tale tecnologia la testa di deposizione è installata su centri di lavoro a cinque o più assi.

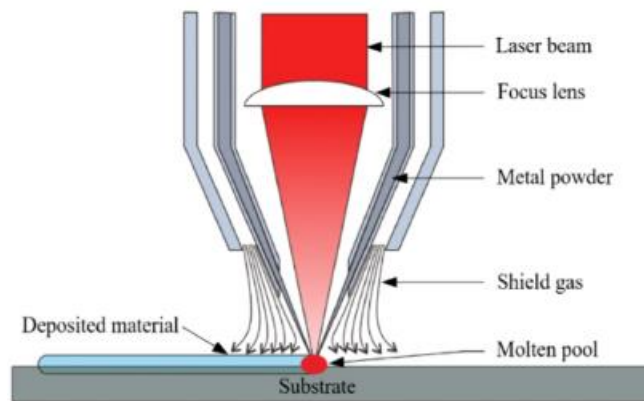


Figura 1.7-Testa deposizione DED [11]

Grazie alle elevate velocità di avanzamento del processo ed alle ridotte dimensioni del bagno fuso si vanno ad ottenere elevate velocità di raffreddamento ( $\sim 10^3-10^5$  °C/s). Una particolarità e possibilità che si può sfruttare con la tecnologia DED è la capacità di modificare la composizione del materiale in fase d'opera, in quanto la testa di deposizione può essere munita con più ugelli per la deposizione materiale. [10]

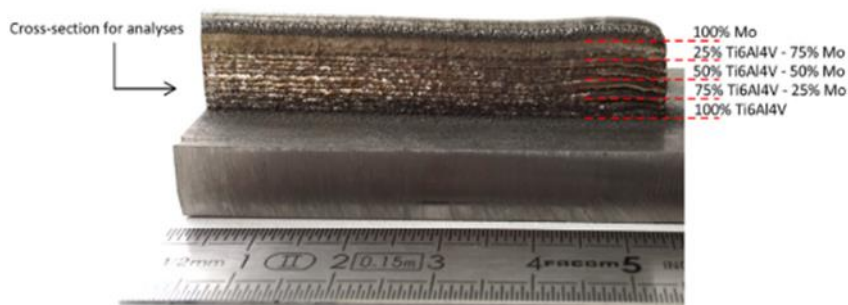


Figura 1.8- Esempio provino con strati a composizione variabile [12]

Le velocità di alimentazione degli ugelli possono essere regolate per generare materiali con proprietà microstrutturali e composizioni chimiche distinte, la deposizione laser diretta fornisce inoltre tassi di deposizione elevati e una finestra di processo relativamente ampia per fabbricare componenti più grandi rispetto ad altri metodi AM a base metallica. La procedura di stampa prevede una zona termicamente alterata (HAZ) relativamente piccola sulla parte durante la lavorazione, densità e legame metallurgico eccellenti, effetto minimo sul componente e deposizione precisa, rendendolo un ottimo strumento per riparare componenti di alto valore. Alcuni svantaggi attuali dell'utilizzo del DED per la produzione additiva o la riparazione sono l'efficienza della polvere relativamente bassa e la finitura superficiale ruvida post processo. Inoltre, la temperatura delle parti durante la DED avrà un impatto diretto sulla loro omogeneità microstrutturale e le caratteristiche meccaniche post fabbricate. [13]

Nella DED i principali materiali usati per la stampa sono leghe di acciaio, leghe di nichel, leghe di cromo-cobalto, leghe di rame e leghe di titanio.

- **Leghe di acciaio:** eccezionale resistenza termica, alta resistenza alla corrosione, notevole durabilità e resistenza all'usura, buon rapporto qualità/costo
- **Leghe di nichel:** alta resistenza all'usura, proprietà ottime in ambienti corrosivi ed ossidanti, integrità e funzionalità inalterate anche ad alte
- **Leghe cromo-cobalto:** resistenza eccezionale all'usura meccanica soprattutto ad alte temperature, alta resistenza alla corrosione, molto adoperate nell'AM in quanto caratterizzate da buone proprietà generali
- **Leghe di rame:** resistenti alla corrosione, ottime proprietà meccaniche ed ideali per applicazioni che richiedono conducibilità elettrica o dissipazione del calore
- **Leghe di alluminio:** offrono ottime conducibilità termiche ed elettriche ed elevata resistenza alla corrosione, caratterizzate da un peso ridotto

### 1.4.1 Parametri DED

I parametri che devono essere considerati quando si tratta della DED sono tanti, e ciascuno influisce in modo particolare sul processo di deposizione e quindi sul componente finale. Alcuni degli più importanti sono elencati in seguito:

- Diluizione
- Potenza laser
- Velocità scansione
- Densità di energia globale (GED)

#### **Diluizione:**

Durante la deposizione dei vari strati di materiale si viene a creare un accumulo di calore, il quale cambierà la microstruttura e le proprietà finali delle parti stampate. È richiesto un livello minimo di legame metallurgico tra gli strati successivi, che può essere quantificato utilizzando un parametro adimensionale chiamato diluizione.

*Equazione 1.1- Diluizione*

$$D = \frac{d}{h + d}$$

$d$  è la profondità del bagno di fusione al di sotto del livello del substrato e  $h$  è l'altezza del materiale depositato al di sopra del livello del substrato.

Esiste un valore ottimale per la diluizione che corrisponde ad un buon legame metallurgico, la Figura 1.8b mostra il livello di diluizione ottimale in un sistema metallo-substrato generalmente compreso tra il 10% e il 30%. [14]

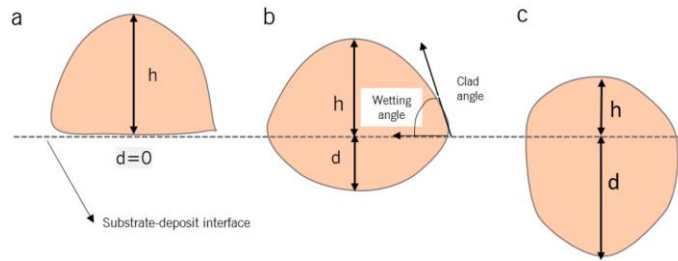


Figura 1.9- Influenza della Diluizione sul materiale depositato [14]

### Potenza Laser e Velocità di Scansione

La potenza laser in una macchina DED rappresenta un parametro principale del processo, direttamente legato all'energia, ha impatto sulla presenza dei difetti e sul loro ammontare nel prodotto finito, generalmente variabile tra 100 e 6000 W.

La velocità di scansione ha un effetto diretto sul tempo di produzione del componente, come la potenza laser questo parametro incide sulla presenza e quantità di difetti del prodotto finito, variabile tra 1 e 20 mm/s.

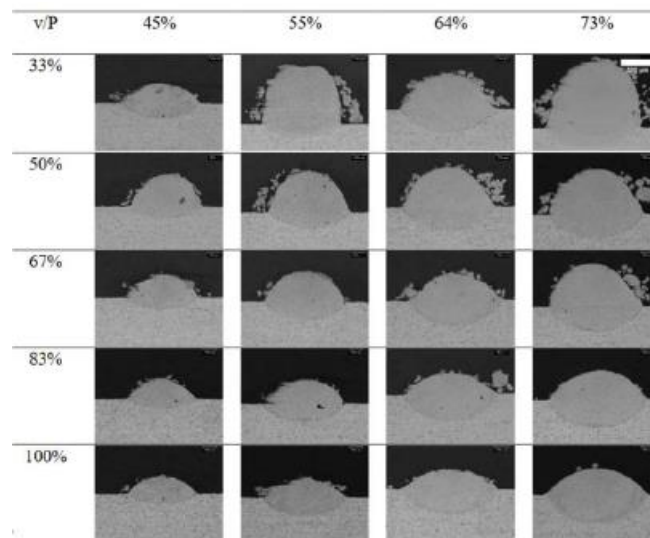


Figura 1.10- Relazione tra Velocità di Scansione ( $v$ ) e Potenza Laser ( $P$ ) [10]

### Densità di energia globale (GED):

La densità di energia globale (GED), stabilisce una relazione tra la porosità interstrato e porosità intrastrato:

Equazione 1.2-GED

$$GED = \frac{P}{v \cdot d}$$

$P$  è la potenza del laser,  $v$  è la velocità di scansione, e  $d$  è la dimensione del raggio laser.

La diluizione e la GED sono legate fra loro come si può vedere in figura; infatti, bassi valori di GED comportano bassi valori di diluizione (pendenza negativa) e quindi ciò comporta una minore presenza di difetti di fusione, mentre valori più alti di GED portano a un'elevata diluizione (la pendenza positiva), il che significa una maggiore tendenza a formare porosità del buco della serratura.

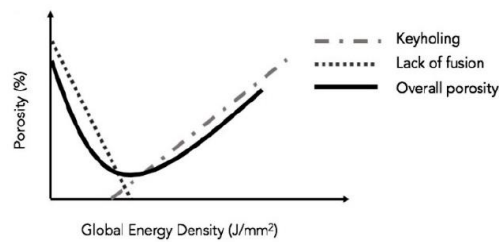


Figura 1.11- Correlazione GED e Diluizione [14]

La Figura 1.12 mostra schematicamente la complessa storia termica durante il processo DED multistrato e l'andamento di una temperatura di picco in aumento con un numero di strati crescente a causa dell'accumulo di calore nel sistema

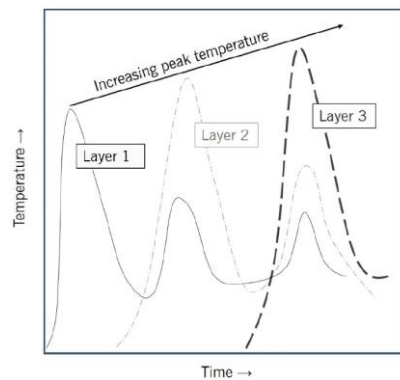


Figura 1.12-Andamento Temperatura all'aumentare degli strati [14]

## 1.4.2 Proprietà Meccaniche e difetti

### Durezza:

I valori di microdurezza possono cambiare lungo la direzione di costruzione a causa delle variazioni nella microstruttura. La microdurezza è maggiore in prossimità del primo e dell'ultimo strato e relativamente minore negli strati centrali; questa variazione potrebbe essere attribuita alla storia termica ciclica durante il processo DED, si verifica un maggiore accumulo di calore negli strati centrali, con conseguenti valori di microdurezza inferiori [13]. In letteratura è stata riscontrata una maggiore durezza e una microstruttura più fine aumentando lo spessore del substrato (una maggiore massa del substrato agisce come un dissipatore di calore più veloce). L'aumento della temperatura del substrato riduce la durezza, a causa di una diminuzione dei gradienti termici e delle velocità di raffreddamento, che possono portare a una microstruttura più grossolana.[14]

### Fatica:

La fatica è un criterio importante per determinare l'integrità strutturale dei materiali stampati tramite DED, essa è influenzata significativamente dalla presenza di porosità e dalla microstruttura. La durata a fatica può essere stimata determinando la crescita delle cricche da fatica e il numero di probabili zone di inizio della fatica. Un altro fattore scatenante della fatica sono le polveri non fuse, che potrebbero successivamente ridurre la durata a fatica di un ordine di grandezza.[9]

## Stress residuo:

Lo stress residuo è definito come “la tensione in un corpo che è a riposo, in equilibrio e a temperatura uniforme in assenza di forze esterne e di massa”. [13]

Lo stress residuo (RS) viene generato durante la DED o qualsiasi altra tecnica AM metallica a causa della presenza di forti gradienti termici tra la fonte di calore e il materiale circostante, questo ha la capacità di danneggiare le parti stampate, a causa di distorsioni e cricche. Lo stress è diverso in punti diversi del metallo stampato. Gli studi hanno dimostrato che le tensioni residue vicino alla superficie sono di natura tensivo, mentre quelle al centro sono tensioni di compressione. L'RS tende ad essere più elevato quando si è in presenza di materiali diversi. [15] Il massimo stress residuo è stato osservato all'interfaccia substrato-deposito. [9]

La storia termica durante il processo DED può comportare la creazione e l'evoluzione di una microstruttura anisotropa e la presenza di tensioni residue in tutta la parte, altre proprietà del materiale come la resistenza alla trazione e alla fatica sono direttamente correlate alle caratteristiche microstrutturali della parte e possono essere influenzato negativamente in presenza di tensioni residue di trazione. La relazione tensione-deformazione del materiale e il disadattamento della deformazione durante la fase di raffreddamento influiscono sull'entità delle tensioni residue risultanti durante il processo DED. I materiali con modulo di Young (modulo di elasticità) e tensione di snervamento più elevati di solito favoriscono la formazione di tensioni residue di entità maggiore. [13]

È possibile utilizzare diversi metodi per alleviare o ridurre le tensioni residue, le tecniche più comuni sono il preriscaldamento del substrato o il preriscaldamento della materia prima iniziale per ridurre i forti gradienti termici [9].

## Porosità

La porosità è uno dei difetti più importanti, legato alle proprietà meccaniche delle parti trattate con DED. La porosità dipende anche dalle caratteristiche iniziali e dall'uniformità della polvere. Se le polveri iniziali non hanno una distribuzione granulometrica uniforme, ciò darà luogo a una maggiore porosità nella costruzione finale. La porosità intrinseca all'interno delle particelle di polvere comporta anche difetti nella parte finale. Tenendo conto di tutte queste modalità di porosità, è importante controllare la gamma di forme e dimensioni delle polveri e anche mantenere parametri di processo ottimali durante la deposizione.

Esistono due tipi principali di porosità:

- **porosità interstrato:** si verifica a causa della mancanza di energia sufficiente per fondere il materiale di riempimento (polvere o filo), portando a regioni non fuse, questo avviene vicino al substrato o tra tracce non fuse, quando l'apporto di calore lineare (energia della fonte di calore/velocità di scansione) viene ridotto o la portata di massa viene aumentata oppure una combinazione dei due. Questo tipo di porosità si mostrano solitamente grandi, di forma irregolare e si verificano a causa delle velocità di raffreddamento della solidificazione più elevate, bassi valori di diluizione causano anche la comparsa di porosità interstrato.
- **porosità intrastrato:** è collegata all'uso di gas di protezione inerte durante il processo DED, che favorisce l'intrappolamento del gas. I pori sono generalmente di forma sferica e si verificano in posizioni casuali, a causa della vaporizzazione che porta a porosità intrappolate dal gas e osservati all'interno di regioni con velocità di raffreddamento di solidificazione inferiori. L'elevata diluizione si riferisce alla presenza di porosità intrastrato. [14]

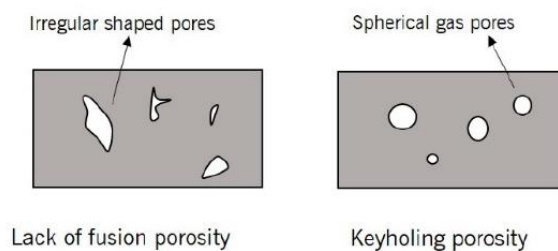


Figura 1.13 a) porosità interstrato b) porosità intrastrato [14]

### 1.4.3 Vantaggi e Svantaggi:

Tra i vantaggi della Directed Energy Deposition spicca la possibilità di realizzazione di grandi strutture metalliche senza i vincoli del letto di polvere. Non è necessario che l'intera camera sia in atmosfera protettiva, ma si lavora con un gas di protezione locale (Shield gas). Capacità di realizzazione di strutture con geometrie complesse, di forma quasi netta e senza necessità del supporto molto spesso.

Possibilità di realizzare componenti in multi-materiale, passando da una lega all'altra senza alcuna saldatura o di realizzare leghe direttamente in macchina, apportando materiali diversi da ciascun ugello di deposizione.

Tra gli svantaggi principali ci sono, la bassa qualità superficiale e quindi necessarie operazioni di post-processing, e l'impossibilità di lavorare i materiali metallici alto-riflettenti, poiché riflettono eccessivamente la radiazione laser.

I metalli che possono essere stampati in 3D con la tecnica di fabbricazione additiva DED includono in particolare alluminio, rame, titanio, acciaio inossidabile, acciaio per utensili, rame, leghe di nichel e diverse leghe di acciaio. Ogni sotto-tecnica della sezione Directed Energy Deposition ha le proprie limitazioni e compatibilità.

Tabella 1.4-Vantaggi e Svantaggi DED

Vantaggi	Svantaggi
Volume del componente elevato	Bassa qualità superficiale
Assenza gas protettivo in camera	Necessità trattamenti e lavorazioni post-processo
Strutture di geometrie complesse	Impossibilità lavorazione materiali alto-riflettenti
Assenza di supporti	
Multimateriale	

### 1.4.4 Usi ed Applicazioni

Ad ogni modo, da oggi, il processo DED trova la sua principale applicazione nella riparazione: infatti, il modo in cui funziona il processo consente di riparare molti componenti di varie dimensioni e materiali.[16]

La DED è una tecnica di riparazione ben nota, le cui parti possiedono un buon legame metallurgico e mostra buone proprietà meccaniche post-riparazione. Alcuni studi che stabiliscono la DED come tecnica di riparazione standard nelle industrie includono: riparazione di una pala di turbina a gas utilizzando la superlega a base Ni erogata tramite un alimentatore polvere coassiale[17], riparazione di parti del circuito del vapore nelle centrali termoelettriche, utilizzando la deposizione di leghe a base di

Co per mantenere alta la temperatura proprietà meccaniche;[18] e riparazione di parti di motori aeronautici Ti-6Al-4V utilizzando polveri Ti-6Al-4V. [19]

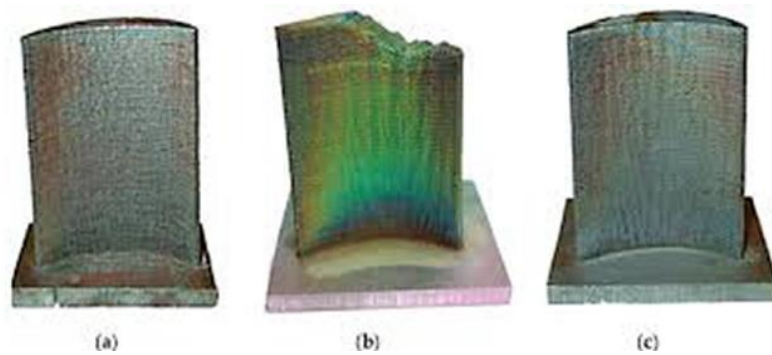


Figura 1.14- (a) componente nuovo (b) componente rotto (c) componente riparato [20]

Tuttavia, le aziende mostrano grande interesse per la sua ricerca e sviluppo, rendendo questa tecnologia una delle nuove frontiere della stampa 3D industriale.

Un ulteriore campo di uso della DED è il Near Net Shape; infatti, si riescono a produrre parti molto vicine alle dimensioni pianificate. Ciò è molto utile quando si producono materiali particolari e costosi o materiali molto difficili da tagliare e lavorare.[21]

Inoltre, grazie alla presenza di più ugelli di deposizione si possono produrre parti composite o ibride, nell'articolo stampato può essere introdotta una miscela di materiali compatibili e la sua composizione può anche variare nel corso della stampa.[21]

## 2 Metodo

Per questo lavoro di tesi si è usato il software di simulazione ingegneristica Ansys per ricavare i risultati simulati, in particolar modo le deformazioni del modello del componente reale. Per confrontare il modello ricavato in Ansys con quello ottenuto nel caso reale è stato utilizzato lo scanner 3D Go! Scan Spark presente in dipartimento.

### 2.1 Ansys

Ansys rappresenta per l'ingegneria moderna un supporto importante in quanto consente di svolgere simulazioni e offre strumenti di modellazione. Consente agli ingegneri di prevedere e valutare il comportamento dei prodotti in condizioni di lavoro reali, fornendo loro le informazioni necessarie per prendere decisioni fondamentali nel processo di progettazione e sviluppo. Ansys può essere impiegato in vari settori, dall'aerospazio all'automotive come dall'energetico all'elettronica.

All'interno di Ansys si procede con tutte le fasi necessarie per l'ingegnerizzazione del prodotto, partendo dalla modellazione 3D del componente per poi definire materiali ed eventuali carichi applicati al componente, dopodiché si sottopone il pezzo a simulazioni come, ad esempio, simulazioni termiche e strutturali, a fine simulazione Ansys offre vari grafici e mappe di colori per visualizzare i dati di simulazione ricavati.

Alla base del funzionamento di ANSYS ci sono diversi algoritmi avanzati che consentono di effettuare simulazioni precise e affidabili in base a ciò che si vuole analizzare.

Ecco una panoramica degli algoritmi principali che stanno alla base del funzionamento di ANSYS:

**1-Metodo degli Elementi Finiti (FEM - Finite Element Method)**

**2-Metodi di Risoluzione Numerica**

**3-Metodi di Ottimizzazione**

**4-Analisi Modale**

**5-Computational Fluid Dynamics (CFD)**

**6-Elettromagnetismo**

**7-Analisi Termica**

Questi algoritmi lavorano in sinergia per fornire simulazioni accurate e affidabili, permettendo agli ingegneri di testare e ottimizzare i loro progetti in un ambiente virtuale prima della produzione fisica.

Il software Ansys utilizza principalmente il metodo degli elementi finiti (FEM, Finite Element Method) per la simulazione ingegneristica e l'analisi.

I principali obiettivi di simulazione in Ansys prevedono:

- prevedere a livello macro, le sollecitazioni e le distorsioni indotte dalla temperatura nei componenti
- prevenire errori di costruzione
- prevedere e fornire dati riguardanti le temperature durante la fase di processo
- fornire dati per migliorare i progetti per la produzione additiva, compresi l'orientamento delle parti e l'ordine di costruzioni delle parti



## 2.1.1 Metodo degli Elementi Finiti (FEM)

Il Metodo degli Elementi Finiti (FEM) è una tecnica numerica svolta a cercare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali, riducendo quest'ultime ad un sistema di equazioni algebriche. Questo è un metodo di simulazione numerica che viene utilizzato per risolvere problemi di natura fisica, quali la deformazione, la vibrazione, il flusso di fluido e il trasferimento di calore. Queste sono le fasi di cui si compone il Metodo degli Elementi Finiti (FEM):

### 1. Discretizzazione del dominio:

- Il primo passo consiste nel suddividere il dominio continuo (ad esempio, una struttura o un componente meccanico) in un numero finito di sotto-domini più piccoli chiamati elementi finiti. Questi elementi possono essere triangolari, quadrilateri, tetraedrici, ecc., a seconda della geometria del problema.
- I punti di congiunzione vengono chiamati nodi e rappresentano i punti nei quali vengono calcolate le variabili del problema (ad esempio, spostamenti, temperature, pressioni).

### 2. Definizione delle funzioni di forma:

- All'interno di ciascun elemento, le variabili del problema (come lo spostamento nel caso dell'analisi strutturale) vengono approssimate mediante funzioni di forma. Queste sono funzioni matematiche che interpolano le variabili nodali all'interno dell'elemento.

### 3. Formulazione delle equazioni agli elementi:

- Per ogni elemento, vengono formulate le equazioni che descrivono il comportamento fisico del sistema (ad esempio, le equazioni di equilibrio per l'analisi strutturale, o le equazioni di conduzione del calore per l'analisi termica). Queste equazioni sono tipicamente derivate utilizzando il principio dei lavori virtuali o il principio di minimo dell'energia potenziale, a seconda del tipo di problema.

### 4. Assemblaggio del sistema globale:

- Le equazioni degli elementi vengono assemblate in un sistema di equazioni globale che rappresenta l'intero dominio. Questo sistema di equazioni è generalmente espresso in forma matriciale come  $K \cdot U = F$ , dove  $K$  è la matrice di rigidezza globale,  $U$  è il vettore delle incognite (spostamenti nodali, temperature nodali, ecc.) e  $F$  è il vettore delle forze o delle sorgenti applicate.

### 5. Applicazione delle condizioni al contorno:

- Le condizioni al contorno e le condizioni iniziali vengono applicate al sistema globale di equazioni, queste possono includere vincoli di spostamento, carichi applicati, temperature specificate, ecc.

### 6. Risoluzione del sistema di equazioni:

- Il sistema di equazioni lineari risultante viene risolto utilizzando metodi numerici per ottenere le variabili nodali. Per problemi lineari, si utilizzano tipicamente metodi diretti come l'eliminazione di Gauss o metodi iterativi come il metodo del gradiente coniugato. Per problemi non lineari, possono essere necessari metodi iterativi come il metodo di Newton-Raphson.

## 7. Post-elaborazione dei risultati:

- Una volta ottenute le soluzioni nodali, si procede alla post-elaborazione dei risultati. Questo può includere il calcolo di grandezze derivate (ad esempio, tensioni e deformazioni nell'analisi strutturale), la visualizzazione dei risultati (contour plots, deformazioni, ecc.) e l'analisi di sensibilità o ottimizzazione.

## 2.2 Metodologia e workflow per la simulazione DED su Ansys

Nell'impostazione della simulazione DED, Ansys richiede la definizione di un ordine cronologico delle impostazioni e procedure, di seguito viene mostrato il workflow:

- **Geometria parte:** per avviare la simulazione Ansys richiede il modello geometrico tridimensionale del componente da mettere sotto esame, il modello può essere "creato" all'interno del modulo SpaceClaim di Ansys, oppure se realizzato in un altro software importato in un formato adatto alla sua lettura. Nella geometria oltre al componente da simulare è necessario anche inserire il "base plate" della macchina DED
- **Superfici di scambio:** durante l'impostazione Ansys richiederà di selezionare le superfici di applicazione di calore nel caso di piatto di stampa riscaldato e le varie superfici di contatto tra corpo e base
- **Materiali:** Assegnazione delle proprietà termomeccaniche dei materiali utilizzati nel processo di deposizione, questi includono proprietà come la conduttività termica, la capacità termica, la densità, il coefficiente di espansione termica e le proprietà meccaniche a diverse temperature.
- **Mesh:** la mesh permette di dividere la geometria in elementi più piccoli, la tipologia di mesh può essere selezionata tra le varie disponibili, così come la sua dimensione. Una mesh adeguata è essenziale per catturare accuratamente i fenomeni termici e meccanici durante il processo di deposizione
- **Parametri processo:** per avere un'analisi accurata devono essere inseriti i dati di processo impostate nella macchina.
  - *Material Deposition Rate:* misurata in  $[\text{mm}^3/\text{sec}]$  rappresenta la velocità del flusso di materiale depositato
  - *Preheat temperature:* la temperatura a cui è stato preriscaldato il base plate
  - *Heating method:* metodo con cui il materiale viene fuso, può essere di tipo:
    - 1) *Power Based:* fusione basata sulla potenza del laser e dalla assorbenza del materiale
    - 2) *Temperature Based:* la fusione si basa sulla temperatura di processo
  - *Room Temperature:* la temperatura della camera di stampa durante il processo di stampa
  - *Gas Convection Coefficient Build:* coefficiente di convezione tra la parte ed i gas presenti nella camera di stampa durante il processo
  - *Gas Convection Coefficient base plate:* coefficiente di convezione tra il base plate ed i gas presenti nella camera di stampa durante il processo
  - *Radiation:* effetto radiante tra la parte e l'ambiente esterno (generalmente impostato su off)
  - *Emissivity build:* emissività della parte durante il processo
  - *Emissivity base plate:* emissività del base plate durante il processo
  - *Cluster cooling time ratio:* compreso tra 0 ed 1

- *Cooldown room temperature*: temperatura presente nella camera di stampa durante il raffreddamento della parte
- *Cooldown time*: tempo di raffreddamento della parte
- **Gcode**: durante la simulazione viene riprodotto il processo di stampa e quindi il percorso della testa di deposizione. Il Gcode rappresenta un linguaggio di scrittura per la definizione del percorso macchina su macchine a controllo numerico, tra cui anche le macchine di stampa additiva
- **Clustering**: dopo l'inserimento del Gcode vengono creati i cluster, ossia gli elementi che simulano la parte depositata dalla testa di deposizione durante il processo; i cluster vengono definiti tramite volume [mm<sup>3</sup>], minore è il volume più accurata sarà l'analisi
- **Analisi Termica**: consente di ricavare le temperature a cui è soggetto il componente durante il processo di deposizione e raffreddamento. Ansys Workbench utilizza principalmente il metodo degli elementi finiti (FEM, Finite Element Method) per effettuare le analisi termiche, questo metodo è implementato attraverso una serie di algoritmi specifici che consentono di risolvere le equazioni di trasferimento del calore. La storia termica del processo di deposizione è di fondamentale importanza per la simulazione strutturale.
- **Analisi strutturale**: tramite i dati termici ricavati, si riescono a simulare le distorsioni e tensioni generate durante il processo di deposizione.
- **Visualizzazione dei risultati**: I risultati dell'analisi vengono visualizzati per comprendere meglio il comportamento del componente durante il processo di deposizione. Questo può includere mappe di distribuzione della temperatura, profili di tensione residua, e deformazioni.

## 2.3 Scansione 3D

Dopo il processo di stampa del componente reale, ci si è resi conto che il componente aveva problemi dimensionali, problemi causati da errori di calibrazione e impostazioni di macchina. Quindi per ottenere un confronto della geometria ottenuta dalla simulazione in Ansys ed il caso reale, è stato necessario scansionare il componente reale tramite lo scanner 3D Go! Scan Spark presente in laboratorio. Ottenendo la geometria reale del componente si riesce ad ottenere un confronto più preciso e veritiero.



Figura 2.1-scanner Go! Scan Spark

Questo tipo di scanner rientra nella categoria degli scanner a luce strutturata. In termini pratici, la luce strutturata è una griglia di luce bianca o blu calibrata con precisione che uno scanner 3D proietta sull'oggetto che sta scansionando. Di solito questa griglia è una serie di linee parallele e incrociate.

Quando la luce strutturata colpisce l'oggetto, la griglia di luce viene distorta dalle curve, depressioni o aree rialzate della superficie.

Nel frattempo, la fotocamera dello scanner acquisisce questi modelli di luce distorti fotogramma dopo fotogramma, mentre il software di scansione analizza la griglia e la utilizza per ricostruire accuratamente in 3D digitale tutte le superfici dell'oggetto scansionato.

Gli algoritmi di riconoscimento e ricostruzione del modello del software di scansione sono in grado di comprendere quando una striscia di luce è più spessa o più sottile in alcuni punti, capendo che quei punti sulla superficie sono rispettivamente più vicini o più lontani dalla fotocamera, mentre altre forme e strutture sono determinate da vari tipi di deformazioni nella griglia di luce strutturata.

Dopo che i fotogrammi sono stati catturati, vengono trasformati in un modello 3D. Se i frame delle texture sono stati catturati durante la scansione, verranno successivamente "mappati" sul modello 3D, aprendo la strada a un modello 3D finale che può sembrare quasi identico e rispecchiare le dimensioni del suo originale del mondo reale.

### 3 Caso studio

Lo studio ha come obiettivo la simulazione del processo di stampa Directed Energy Deposition svolta sul software di simulazione ingegneristica Ansys Workbench e il confronto dei risultati con un caso reale. Il fine di questo confronto è determinare se il software di simulazione può elaborare risultati simulati affidabili e veritieri, basando la verifica su quelle che sono le deformazioni durante il processo di deposizione.

L'importanza del progetto presentato è data dalla simulazione del comportamento del componente dopo la fase di processo. L'analisi svolta in Ansys si ritiene importante in quanto consente, tramite una notevole riduzione del costo e spreco di fonti, materiale e tempo, una anteprima delle deformazioni, difetti e problematiche che si possono presentare durante il processo di deposizione.

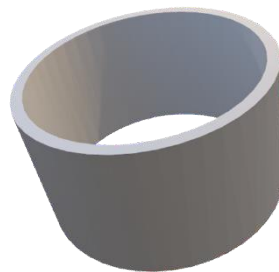
Impostando la simulazione con dei parametri adeguati si riesce ad ottenere un tempo di calcolo ragionevole ottenendo comunque dei buoni responsi ed una buona accuratezza dei risultati.

Il progetto propone una comparazione dei dati ricavati dalla simulazione e dal processo di stampa reale, in modo da fornire un indice della precisione di tale simulazione.

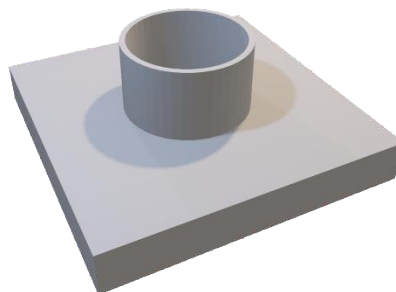
#### 3.1 Componente

Per errori di calibrazione durante il processo di stampa Directed Energy Deposition in laboratorio, le dimensioni reali del componente si sono rivelate diverse da quelle previste inizialmente ( $d=40.0\text{mm}$   $D=44\text{mm}$  ed  $h=24.8\text{mm}$ ), per cui dopo aver scansionato il componente, per avere un confronto con le simulazioni in Ansys si è scelto quindi di adoperare le seguenti dimensioni:  $D=41.9\text{mm}$   $d=37.2\text{mm}$   $h=24.8\text{mm}$ .

Il componente è stato depositato su una base di stampa di dimensioni  $101.6\text{mm} \times 101.6\text{mm} \times 14.8\text{mm}$ .



*Figura 3.1 - modello cilindro cavo*



*Figura 3.2- modello cilindro cavo e base di stampa*

Il materiale utilizzato per la realizzazione del componente è polvere di AISI 316L, si tratta di un acciaio inossidabile al Cromo-Nichel-Molibdeno, induribile mediante deformazione a freddo resistente alla corrosione di tipo austenitico quindi, la sua struttura cristallina è di tipo cubico a facce centrate, caratterizzato da una buona saldabilità quindi adatto a processi AM.

Nella nomenclatura AISI, la serie 300 va ad indicare gli acciai alto legati, mentre la lettera "L" (low carbon) indica una ridotta presenza di carbonio, inferiore allo 0,03%. La bassa percentuale di carbonio è determinante per far fronte a problemi di corrosione intercristallina, che tendono a sorgere nei processi di saldatura. L'acciaio 316 è utilizzato nell'industria petrolifera, chimica, alimentare, tessile, nautica, in parti per forni e attrezzature navali, ma in condizioni più critiche.

**Cromo:** dona al materiale resistenza alla corrosione e all'ossidazione, inoltre aumenta la resistenza all'usura e all'attacco degli agenti chimici

**Nichel:** aumenta la tenacità e la duttilità del materiale, riduce la sensibilità al surriscaldamento e dona la temprabilità

**Molibdeno:** aumenta la temprabilità, elimina fragilità da rinvenimento, aumenta la resistenza meccanica a caldo

Tabella 3.1- Elementi AISI 316L

	C%≤	Mn%≤	P%≤	S%≤	Si%≤	Cr%≤	Ni%≤	Mo%≤	N%≤
AISI 316L	0,03	2	0,045	0,015	1	16,5÷18,5	10÷13	2÷2,5	0,11

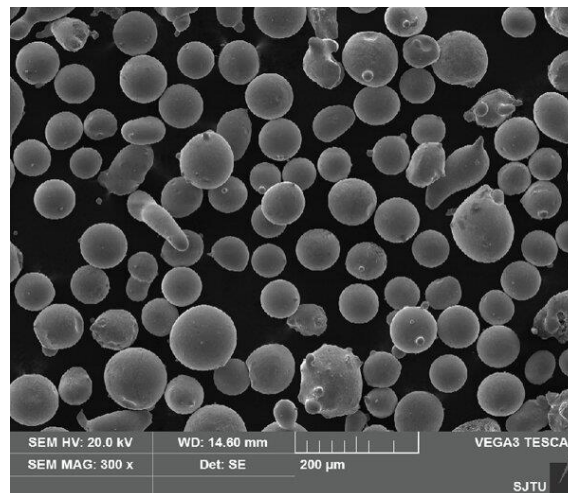


Figura 3.3- AISI 316L Powder [22]

Il componente sotto esame è stato stampato con il processo Directed Energy Deposition realizzato dalla Prima Additive LASERDYNE 430 BD presente nel Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM) dell'Università Politecnica Delle Marche.

Questa macchina usa la tecnologia Directed Energy Deposition, che utilizza l'energia termica focalizzata generata da una sorgente laser per fondere il metallo depositato in forma di polvere micrometrica nel punto focale del raggio laser tramite la testa di deposizione. Il laser fonde la polvere depositata direttamente sul componente. Il laser è coassiale alla testa di deposizione che si muove in 3 assi, la tavola rotante installata nella macchina permette inoltre di aggiungere 2 assi, ovvero rotazione

e inclinazione. Questa capacità rende il processo particolarmente adatto all'aggiunta di forme a parti esistenti, nonché alle riparazioni e alla deposizione di rivestimenti.

Tabella 3.2- Parametri di Processo

Parametri Stampa	
Laser IR	Ytterbium IR single mode
Potenza Laser	850 W
Lunghezza d'onda	1070-1080 nm
Diametro Spot Laser	2.0 mm
Volume Lavoro	585 x 408 x508 mm
Accuratezza Deposizione	±0.2 mm
Spessore Layer	0.4mm
Tempo Raffreddamento	900 sec
Tasso Deposizione	72mm <sup>3</sup> /sec

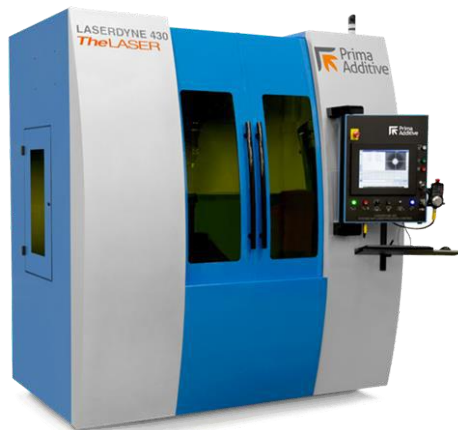


Figura 3.4- Prima Additive LASERDYNE 430 BD

## 3.2 Gcode

Nel corso della simulazione in Ansys il software richiede l'inserimento di un Gcode, in modo tale da simulare l'andamento della testa di deposizione durante il processo. Il Gcode utilizzato dalla macchina presente nei laboratori del DIISM non era disponibile; quindi, è stato scritto un nuovo Gcode realizzato tramite l'utilizzo di Excel in maniera tale da rendere la sua scrittura molto più scalabile e rapida.

I comandi che si utilizzando all'interno del Gcode di una macchina DED, sono i seguenti:

- G0: comando indicante l'arresto della procedura di stampa da parte della testa di deposizione
- G1: comando indicante l'avvio del processo di stampa e quindi la conseguente deposizione
- CIP: consente di realizzare archi specificando i punti iniziali e finali tramite X, Y, Z mentre il punto medio con I,J,K
- X, Y, Z, I, J, K: utilizzati per inserire le coordinate dei movimenti necessari alla testa di deposizione

Il Gcode del componente sotto esame è stato realizzato tramite l'utilizzo del comando CIP impostando una discretizzazione di 1° per ogni layer e quindi realizzando 360 archi lungo la circonferenza del componente.





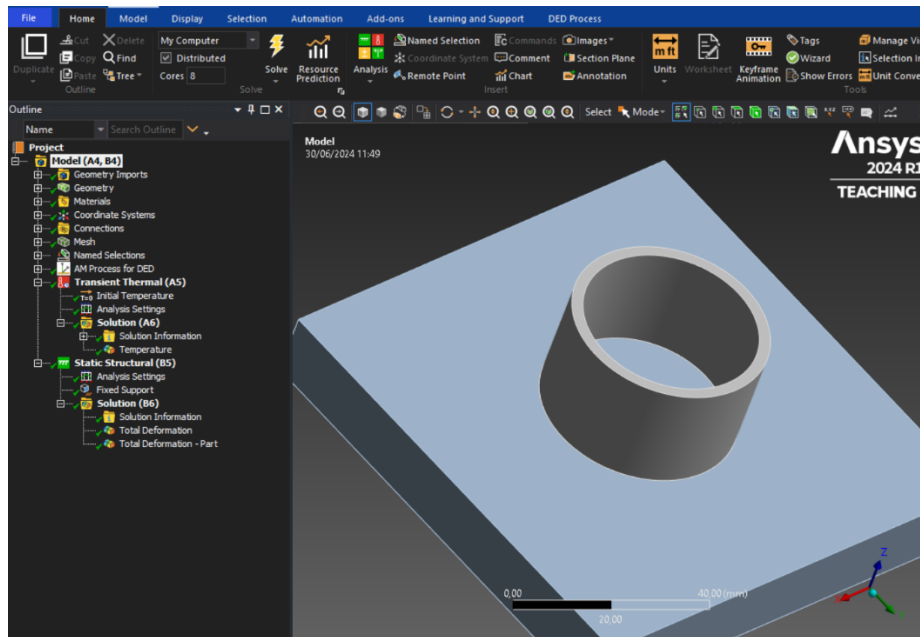


Figura 3.8-Ansys Mechanical

- **Step 2:** selezione del DED Process dalla pagina degli “Add-ons” e apertura della pagina “Open Wizards” che consente una impostazione di simulazione semplificata e cronologica
- **Step 3:** selezione delle parti di geometria facente parte della base e del corpo
- **Step 4:** selezione della tipologia mesh “Sweep” e impostazione della dimensione di mesh 0,4 mm per il corpo e 2,0 mm per la base per il campione con mesh fine. Mentre una dimensione di mesh 4,0 mm per il corpo e 8,0 mm per la base per il campione con mesh grossolana.
- **Step 5:** importazione del file.txt del Gcode e impostazione di 4 mm<sup>3</sup> come dimensione di Cluster
- **Step 6:** scelta del 316 Stainless Steel come materiale dei componenti
- **Step 7:** impostazione dei parametri di stampa

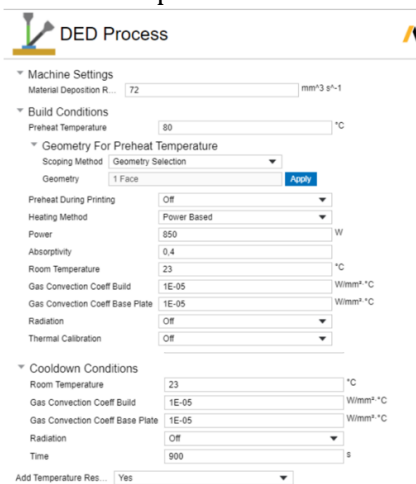


Figura 3.9-Parametri di stampa

I parametri modificati rispetto a quelli generali di sistema sono i seguenti:

Material deposition Rate: 72 mm<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>

Preheat Temperature: 80°C

Heating Method: Power Based

Power: 850 W

Cooldown Time: 900 s

- **Step 8:** selezione delle superfici di separazione tra base e corpo (in modo da simulare la separazione del corpo dal piatto di stampa a fine processo)
- **Step 9:** avvio della generazione dei "Cluster" e verifica della corretta esecuzione della simulazione della procedura di deposizione

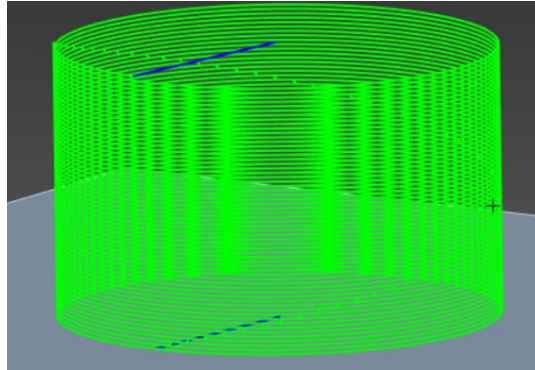


Figura 3.10-Percorso testa deposizione

- **Step 10:** selezione della tipologia "by Body" nella "Reference Temperature" per base e corpo, ed impostazione della "Reference Temperature Value" di 19,85°C per la base e 1370°C per il corpo
- **Step 11:** avvio dell'analisi termica
- **Step 12:** osservazione risultati analisi termica

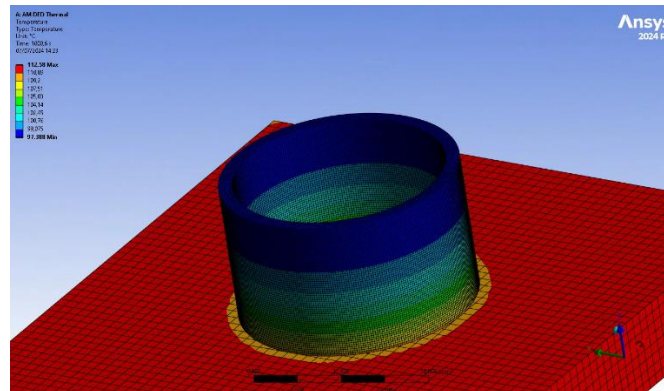


Figura 3.11- Analisi Termica

- **Step 13:** avvio analisi strutturale
- **Step 14:** osservazione risultati analisi strutturale

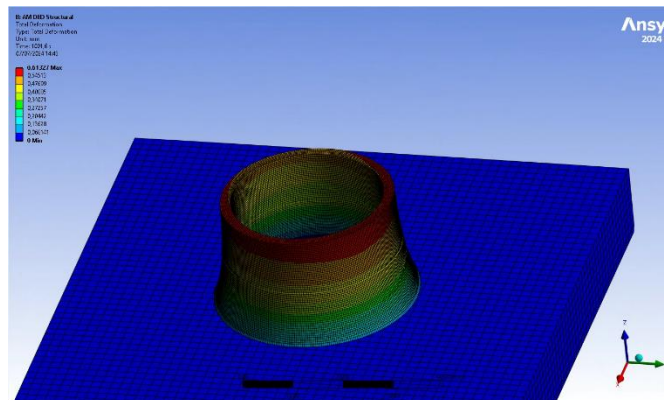


Figura 3.12-Analisi Strutturale

A questo punto è possibile effettuare l'analisi dei risultati ottenuti.

## 4 Risultati e discussione

La simulazione del processo di deposizione in Directed Energy Deposition nel software Ansys del provino cilindrico cavo si basa su analisi termiche e strutturali per prevederne il comportamento reale.

Il componente trattato possiede dimensioni nominali:  $D=41,9$  mm  $d=37,2$ mm  $h=24,8$ mm

I risultati delle analisi verranno discussi e confrontati con il componente reale stampato presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM) dell'Univpm, per definire se il software può essere uno strumento utile ed efficace in un processo di progettazione di un componente da realizzare tramite Directed Energy Deposition.

Per effettuare un confronto tra i risultati ricavati dalla simulazione ed il componente reale si sono discussi diversi dati:

1. Analisi termica
2. Deformazione totale sistema di riferimento cilindrico
3. Tensioni residue
4. Confronto deformazioni su provino reale e simulato

### 4.1 Analisi termiche

La simulazione delle temperature durante il processo di deposizione mostra una temperatura omogenea lungo il profilo del componente. La temperatura risulta essere maggiore in prossimità del piatto di stampa riscaldato, per poi diminuire con il crescere dell'altezza del componente. L'analisi termica inoltre rappresenta un dato fondamentale e necessario per lo svolgimento delle analisi strutturali precedenti.

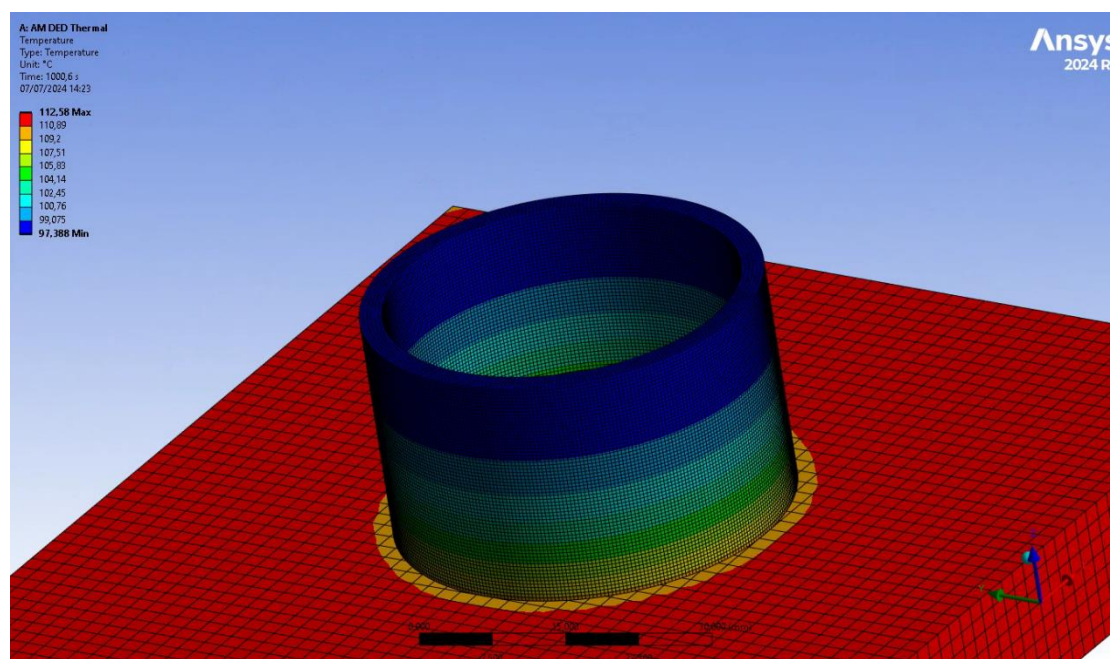


Figura 4.1-Risultati Analisi termica

Dalla figura 4.1 si nota una distribuzione della temperatura omogenea.

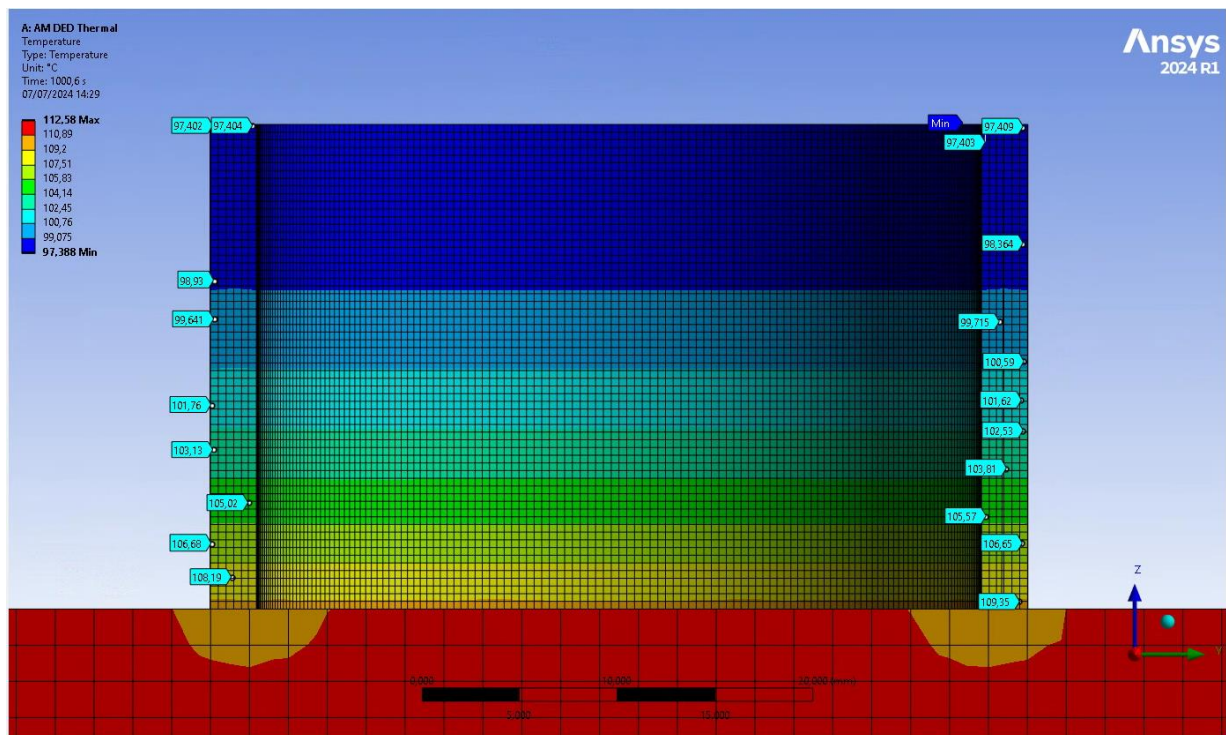


Figura 4.2- sezione ZY con Probe

Dall'immagine 4.2 si nota una diminuzione di temperatura nel piatto di stampa in prossimità del materiale depositato, probabilmente a causa dello scambio di calore che avviene con il materiale del cilindro cavo.

## 4.2 Analisi Strutturali

Per esaltare le deformazioni del provino si è impostata una scala 0.5x in modo da mostrare in modo più evidente tutte le difformità, in quanto con l'impostazione di una scala veritiera sono di difficile visualizzazione e chiarezza. Verranno prima discusse le analisi sul campione con mesh 0,4 mm e poi quelle sul campione con mesh 4 mm per poi confrontare i risultati e vedere quanto differiscono i valori impostando una mesh più grossolana che sicuramente rende l'analisi meno precisa ma decisamente più veloce.

### 4.2.1 Analisi della deformazione con sistema riferimento cilindrico del campione con mesh 0,4mm

Per avere risultati maggiormente visualizzabili è stato impostato un sistema di riferimento cilindrico coincidente con il piano della base ed una dimensione di scala ridotta (0,5x) in modo da rendere maggiormente visibili gli effetti delle deformazioni.

Sono mostrate 3 immagini, con la relativa tabella dei valori, della sezione con la divisione dei Probe su 3 linee, per ottenere una visualizzazione dei dati più chiara e pulita.

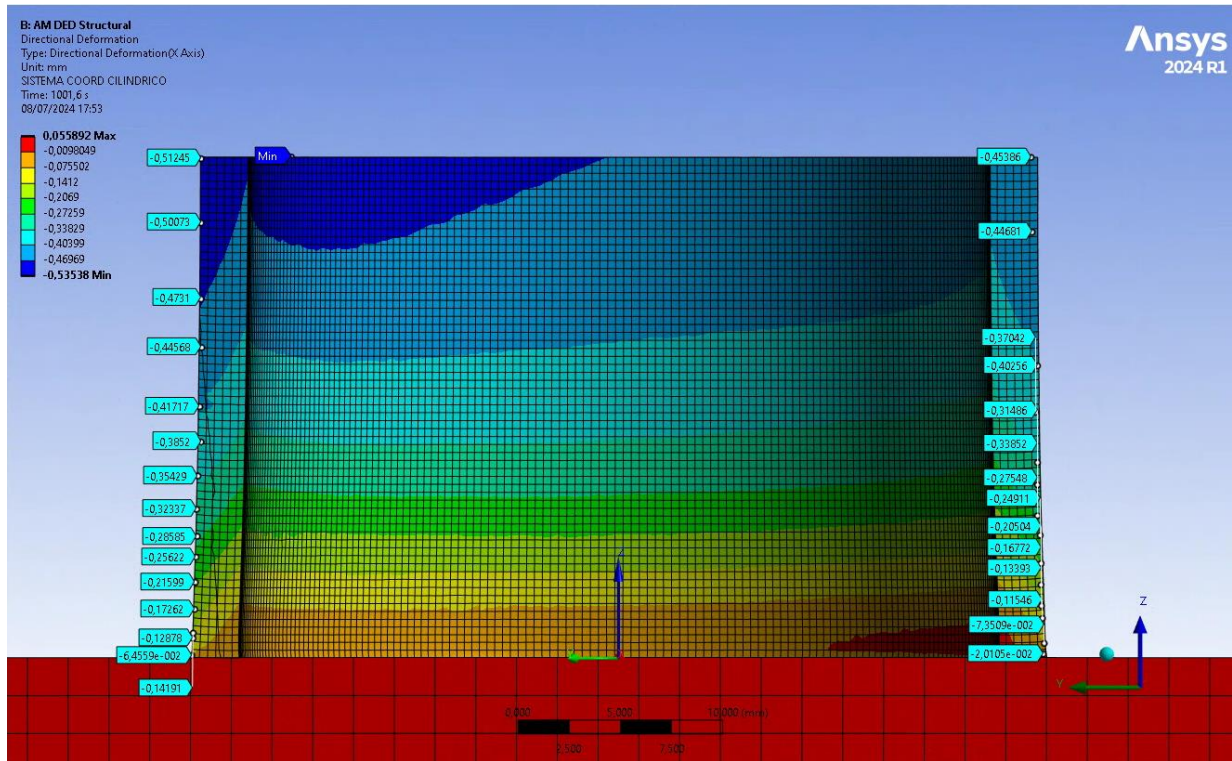


Figura 4.3- Sezione 1

La figura 4.3 mostra i valori presenti nella parte più esterna del cilindro cavo, si notano valori maggiori nella parte inferiore del pezzo per poi andare ad avere valori negativi all'aumentare dell'altezza, con valori estremi di -0,1419 mm e -0,512 mm.

Tabella 4.1-probe sezione 1

Type	Value	Note	Unit	Location X	Location Y	Location Z
Result	-0,51245		mm	-0.680685	20.399034	24.422187
Result	-0,50073		mm	-0.680566	20.399034	21.284945
Result	-0,4731		mm	-0.680685	20.399034	17.563315
Result	-0,44568		mm	-0.680685	20.368276	15.195007
Result	-0,41717		mm	-0.680685	20.460548	12.303823
Result	-0,3852		mm	-0.680685	20.399034	10.581415
Result	-0,35429		mm	-0.680566	20.552821	8.920522
Result	-0,32337		mm	-0.680685	20.614335	7.290387
Result	-0,28585		mm	-0.680685	20.583577	5.967824
Result	-0,25622		mm	-0.680685	20.645093	4.952835
Result	-0,21599		mm	-0.680685	20.675849	3.722544
Result	-0,17262		mm	-0.680566	20.706607	2.399981
Result	-6,4559e-002		mm	-0.680566	20.853950	0.146230
Result	-0,12878		mm	-0.680566	20.792717	0.984852
Result	-0,14191		mm	-0.680447	20.784730	1.240433
Result	-2,0105e-002		mm	-0.680566	-20.765116	0.216202
Result	-7,3509e-002		mm	-0.680566	-20.808723	0.739494
Result	-0,11546		mm	-0.680566	-20.721508	1.960509
Result	-0,13393		mm	-0.680566	-20.677902	2.571016
Result	-0,16772		mm	-0.680566	-20.656098	3.595796
Result	-0,20504		mm	-0.680447	-20.656098	4.642380
Result	-0,24911		mm	-0.680566	-20.612489	6.016022
Result	-0,27548		mm	-0.680566	-20.481667	6.975390
Result	-0,33852		mm	-0.680566	-20.481667	9.570046
Result	-0,31486		mm	-0.680447	-20.481667	8.479855
Result	-0,40256		mm	-0.680447	-20.481667	14.301479
Result	-0,37042		mm	-0.680566	-20.372648	12.033880
Result	-0,45386		mm	-0.680566	-20.164583	24.488561
Result	-0,44681		mm	-0.680566	-20.219937	20.835293

La tabella 4.1 indica le coordinate dei punti usati per ricavare i dati, anche da qui si nota un incremento costante dei valori.

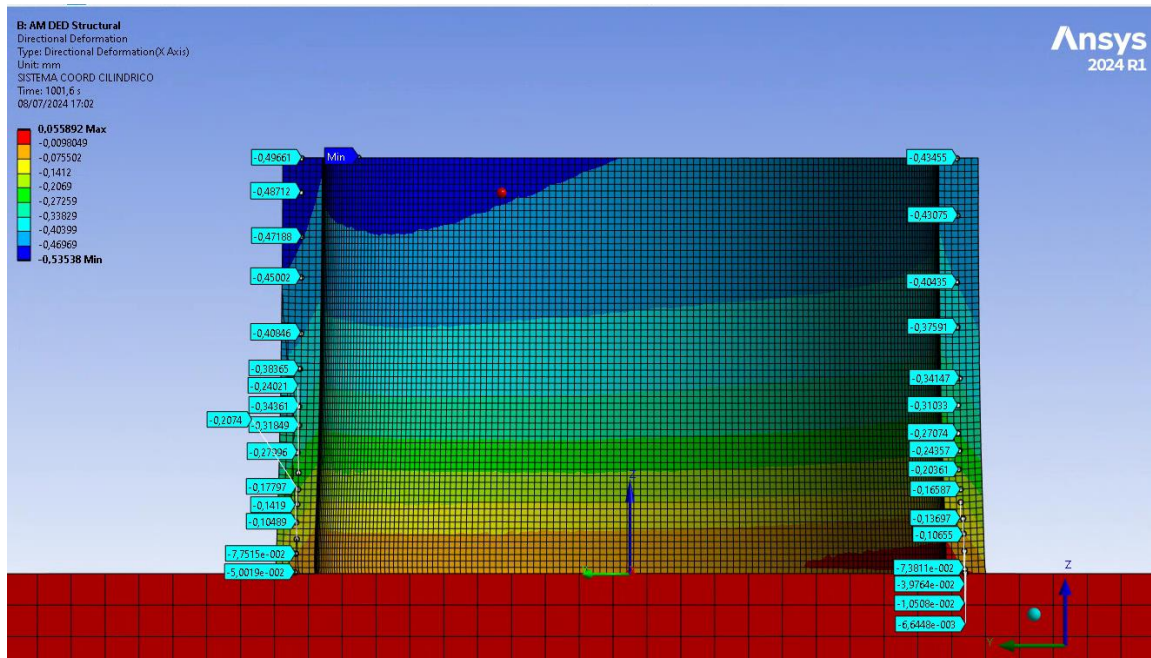


Figura 4.4-Sezione 2

La figura 4.4 mostra i valori presenti nella parte centrale del corpo, i dati riportano valori che aumentano al diminuire dell'altezza del provino, con valori estremi di -0,496 mm e 0,10 mm.

Tabella 4.2-probe sezione 2

Graphics Annotations						
Type	Value	Note	Unit	Location X	Location Y	Location Z
Result	-0,47188		mm	-0.680566	19.314229	19.852610
Result	-0,49661		mm	-0.680447	19.314229	24.463352
Result	-0,48712		mm	-0.680566	19.336184	22.465365
Result	-0,45002		mm	-0.680447	19.336184	17.459415
Result	-0,40846		mm	-0.680566	19.358141	14.166027
Result	-0,38365		mm	-0.680447	19.424008	12.080216
Result	-0,34361		mm	-0.680447	19.467920	9.862668
Result	-0,31849		mm	-0.680447	19.467920	8.764872
Result	-0,27996		mm	-0.680447	19.555744	7.162090
Result	-5,0019e-002		mm	-0.680447	19.709822	0.115019
Result	-7,7515e-002		mm	-0.680566	19.664908	1.210921
Result	-0,10489		mm	-0.680447	19.611012	2.064287
Result	-0,1419		mm	-0.680566	19.637961	3.052395
Result	-0,17797		mm	-0.680447	19.575080	4.121349
Result	-0,2074		mm	-0.680566	19.530166	4.992681
Result	-0,24021		mm	-0.680566	19.503219	5.971806
Result	-0,43455		mm	-0.680566	-19.236784	24.464376
Result	-0,43075		mm	-0.680566	-19.268487	21.103743
Result	-0,40435		mm	-0.680447	-19.236784	17.172439
Result	-0,37591		mm	-0.680566	-19.268487	14.541002
Result	-0,34147		mm	-0.680447	-19.395305	11.529115
Result	-0,31033		mm	-0.680566	-19.300191	9.943911
Result	-0,27074		mm	-0.680566	-19.300191	8.295299
Result	-0,24357		mm	-0.680447	-19.395305	7.280769
Result	-0,20361		mm	-0.680566	-19.331897	6.171126
Result	-0,16587		mm	-0.680447	-19.458711	4.998076
Result	-0,13697		mm	-0.680566	-19.458711	4.237178
Result	-0,10655		mm	-0.680566	-19.602774	3.274291
Result	-7,3811e-002		mm	-0.680447	-19.628085	2.382115
Result	-3,9764e-002		mm	-0.680566	-19.678704	1.369716
Result	-1,0508e-002		mm	-0.680447	-19.697687	0.294042
Result	-6,6448e-003		mm	-0.680566	-19.725770	0.070831

In tabella 4.2 vengono riportate le coordinate dei punti usati per ricavare i dati.

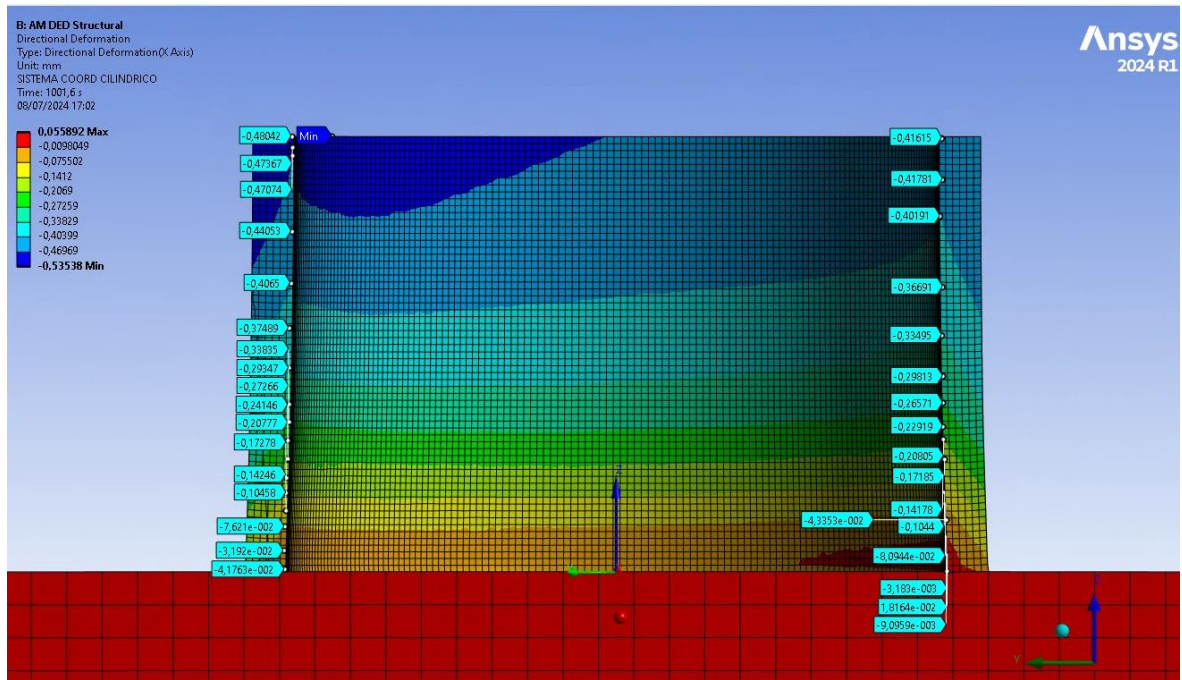


Figura 4.5-Sezione 3

La figura 4.5 mostra i valori nei punti presi nella parte più interna del componente, a ridosso del diametro interno. Andamento dei dati omogeneo, con valori estremi di -0,48 mm ed -0,104 mm.

Tabella 4.3-probe sezione 3

Type	Value	Note	Unit	Location X	Location Y	Location Z
Result	-0.48042		mm	-0.680566	18.217456	24.488607
Result	-0.47367		mm	-0.680566	18.184666	23.882000
Result	-0.47074		mm	-0.680447	18.184666	23.422945
Result	-0.44053		mm	-0.680566	18.217456	19.160300
Result	-0.4065		mm	-0.680566	18.266639	16.242027
Result	-4.1763e-002		mm	-0.680566	18.635942	0.175977
Result	-3.192e-002		mm	-0.680566	18.681930	1.233749
Result	-7.621e-002		mm	-0.680566	18.635942	2.582792
Result	-0.10458		mm	-0.680566	18.559290	3.471934
Result	-0.14246		mm	-0.680685	18.559290	4.468386
Result	-0.17278		mm	-0.680685	18.528631	5.311538
Result	-0.20777		mm	-0.680685	18.451981	6.384641
Result	-0.24146		mm	-0.680685	18.451981	7.411753
Result	-0.27266		mm	-0.680566	18.375332	8.454195
Result	-0.29347		mm	-0.680566	18.375332	9.450647
Result	-0.33835		mm	-0.680566	18.375332	11.504872
Result	-0.37489		mm	-0.680566	18.375657	13.732342
Result	-0.41615		mm	-0.680327	-18.294876	24.391863
Result	-0.41781		mm	-0.680447	-18.328976	22.073071
Result	-0.40191		mm	-0.680447	-18.192576	20.027077
Result	-0.36691		mm	-0.680327	-18.328976	16.037390
Result	-0.33495		mm	-0.680327	-18.294876	13.309400
Result	-0.29813		mm	-0.680447	-18.363075	11.024708
Result	-0.26571		mm	-0.680327	-18.363075	9.524312
Result	-0.22919		mm	-0.680447	-18.363075	8.194417
Result	-0.20805		mm	-0.680447	-18.397177	7.478320
Result	-0.17185		mm	-0.680447	-18.465376	6.353023
Result	-0.14178		mm	1.869440	-18.363075	5.466426
Result	-0.1044		mm	1.057386	-18.465376	4.511630
Result	-8.0944e-002		mm	0.829339	-18.499475	3.863732
Result	-3.183e-003		mm	-0.680566	-18.601287	0.070373
Result	1.8164e-002		mm	0.773072	-18.601287	1.022786
Result	-9.0959e-003		mm	0.757456	-18.574739	2.024977
Result	-4.3353e-002		mm	-0.680447	-18.563764	2.947655

La tabella 4.3 indica le coordinate dei probe utilizzati per ricavare i dati.

Nelle figure mostrate si osserva un andamento delle deformazioni omogenee al variare dell'altezza del componente, con valori estremi di -0,5535 mm ed +0,05589 mm. C'è da osservare un aumento dei valori al diminuire del diametro.

## 4.2.2 Analisi tensioni residue sul campione con mesh 0,4mm

In questa sezione vengono mostrati i risultati riguardo l'analisi sulle tensioni residue.

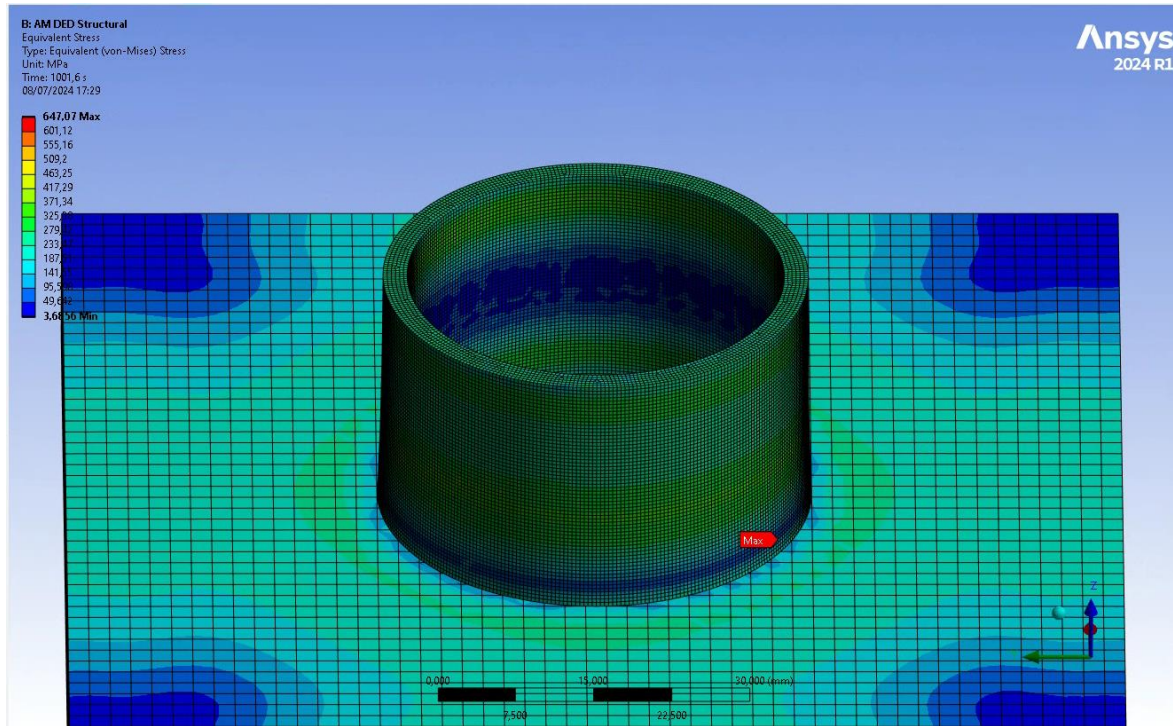


Figura 4.6-Risultati corpo intero

Nella figura 4.6 si nota un andamento omogeneo nella parte esterna con valori maggiori nella parte prossima alla base, invece un accumulo di valori minori per la parte più interna.

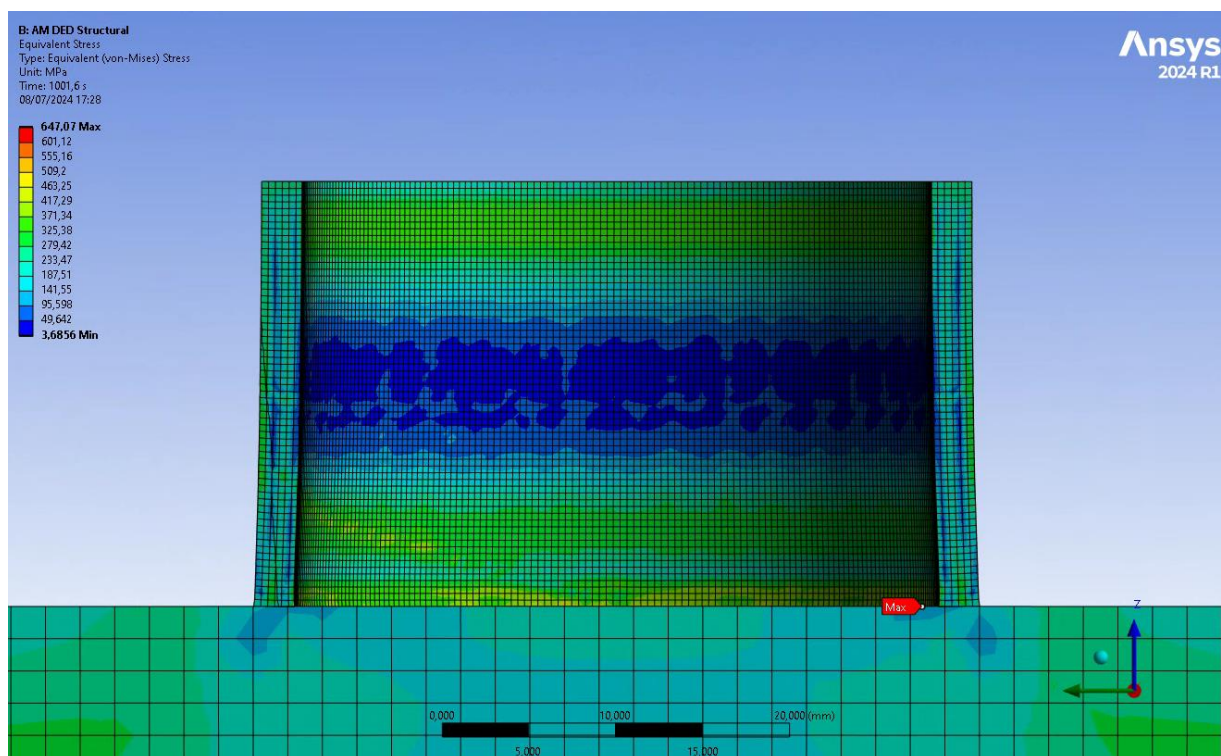


Figura 4.7-Sezione



Nella figura 4.7 Si nota un andamento diverso da quello osservato con mesh 4mm. In questo caso rimane un picco di tensioni in prossimità del piatto di stampa con un picco di 647 Mpa, ma in questo caso non si ha un andamento omogeneo con diminuzione delle tensioni all'aumentare dell'altezza del componente. In prossimità del centro del componente si ha una diminuzione delle tensioni, con un valore minimo di 3,68 Mpa.

Dai risultati di queste analisi sulle tensioni residue si evince un accumulo delle tensioni nella zona a contatto con il piatto di stampa, il che è ragionevole. Si nota inoltre un andamento a clessidra dei valori con la diminuzione dei valori in prossimità della parte centrale per poi aver un nuovo aumento aumentando l'altezza.

### 4.2.3 Analisi delle deformazioni con sistema riferimento cilindrico del campione con mesh 4mm

Per avere risultati maggiormente visualizzabili è stato impostato un sistema di riferimento cilindrico coincidente con il piano della base ed una dimensione di scala maggiorata (0,5x) in modo da rendere maggiormente visibili gli effetti delle deformazioni.

Sono mostrate 3 immagini, con le relative tabelle dei valori, della sezione con la divisione dei Probe su 3 linee, per ottenere una visualizzazione dei dati più chiara e pulita.

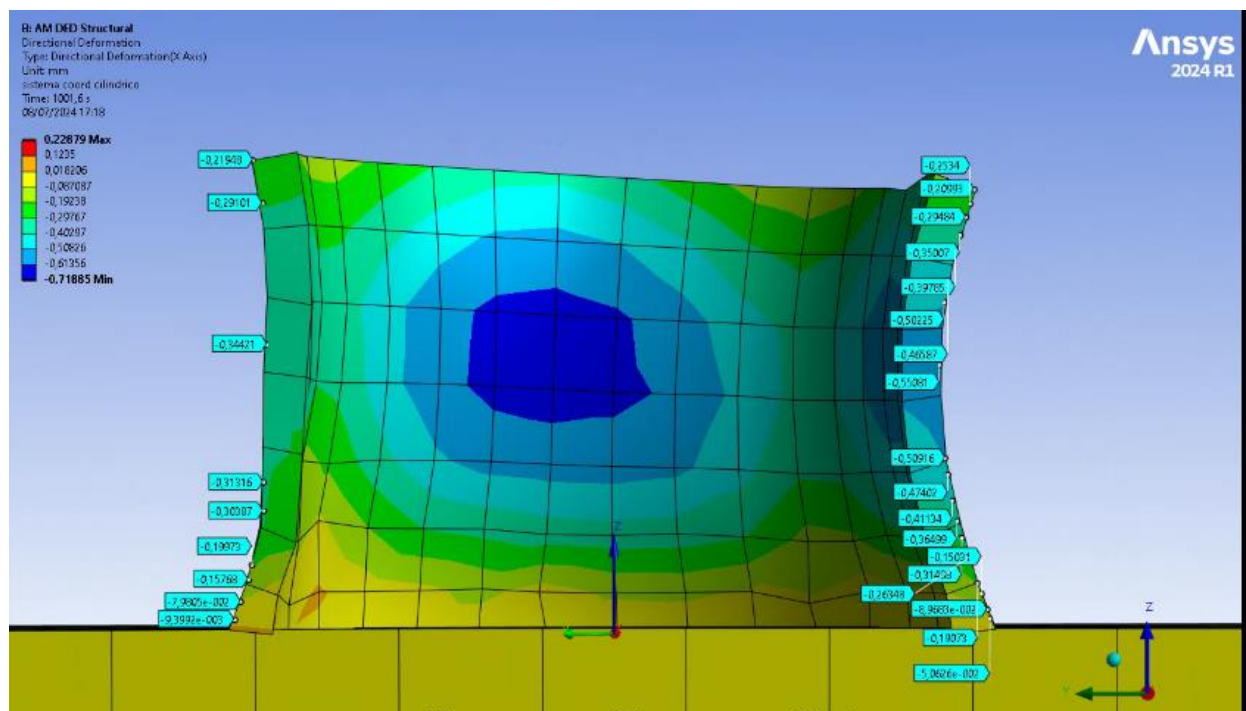


Figura 4.8-Sezione 1

La figura 4.8 illustra i dati presenti nella parte più esterna del provino, si notano andamenti non omogenei lungo l'altezza del componente, con la zona intermedia del pezzo che presenta valori minori, invece nelle parti estreme valori che tendono ad aumentare.

Tabella 4.4-probe sezione 1

Graphics Annotations						
Type	Value	Note	Unit	Location X	Location Y	Location Z
Result	-0,29101		mm	0.417344	19.121666	23.540670
Result	-9,3992e-003		mm	0.140883	20.677965	0.814938
Result	-7,9805e-002		mm	0.145006	20.363646	1.796826
Result	-0,15768		mm	0.128018	19.914756	3.001931
Result	-0,19973		mm	0.058224	19.734029	3.805981
Result	-0,30387		mm	-0.144085	19.101642	6.753812
Result	-0,31316		mm	-0.202283	19.098300	8.317251
Result	-0,34421		mm	-0.007107	18.908134	15.817845
Result	-0,21948		mm	0.619126	19.655332	25.862221
Result	-0,20993		mm	0.675541	-19.665314	24.208942
Result	-0,29484		mm	0.537792	-19.208387	22.702580
Result	-0,2534		mm	0.607338	-19.430650	23.434220
Result	-0,35007		mm	0.442165	-18.895356	21.727217
Result	-0,39785		mm	0.362797	-18.644894	20.883651
Result	-0,50225		mm	0.311217	-18.016271	18.065106
Result	-0,46587		mm	0.290738	-18.188026	19.251050
Result	-0,50916		mm	0.343739	-18.039605	9.561509
Result	-0,55081		mm	0.360426	-17.744094	14.654644
Result	-0,47402		mm	0.330383	-18.204004	8.649485
Result	-0,41134		mm	0.300795	-18.435100	7.228016
Result	-0,36499		mm	0.283092	-18.709078	6.124585
Result	-0,31488		mm	0.266521	-18.962171	5.212102
Result	-8,9683e-002		mm	0.210883	-20.337600	1.313615
Result	-0,19073		mm	0.209623	-19.788770	2.728297
Result	-0,15031		mm	0.210452	-20.018660	2.157692
Result	-5,0626e-002		mm	0.209473	-20.472627	0.802302
Result	-0,26348		mm	0.242958	-19.381860	4.125007

Dalla tabella 4.4 si nota un andamento dei dati non omogeneo con una diminuzione dei valori nella parte centrale, con valori di picco -0,509 mm ed -0,150 mm.

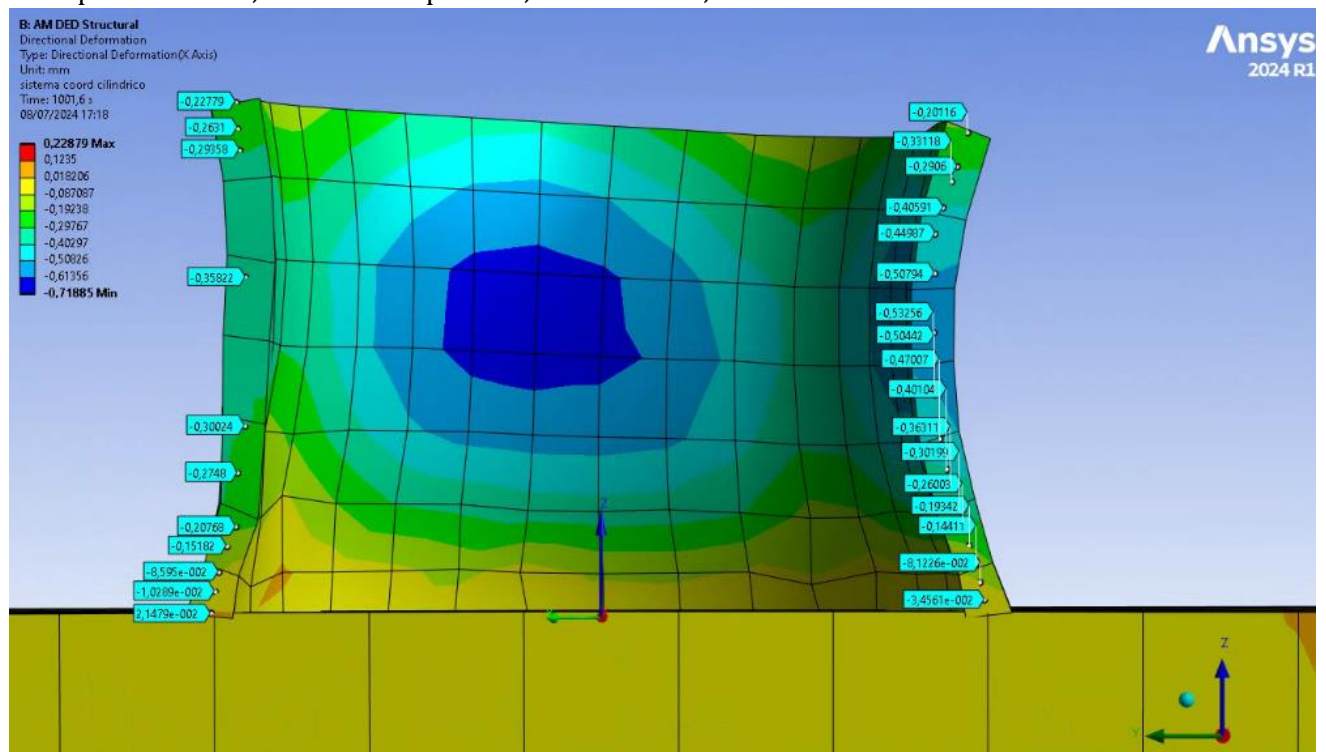


Figura 4.9-Sezione 2

La figura 4.9 illustra i valori presenti nei punti più interni della parete del provino, accumulo dei valori positivi nelle parti estreme del provino e diminuzione nella parte centrale.

Tabella 4.5-probe sezione 2

Graphics Annotations						
Type	Value	Note	Unit	Location X	Location Y	Location Z
Result	-0,2631		mm	0.564580	18.328285	24.755452
Result	-0,22779		mm	0.688762	18.414574	26.096378
Result	-0,29358		mm	0.464807	18.241758	23.676846
Result	-0,35822		mm	-0.015314	17.956970	17.263066
Result	-0,30024		mm	-0.233566	17.997492	9.739468
Result	-0,2748		mm	-0.117365	18.365568	7.368252
Result	-0,20768		mm	0.006885	18.470040	4.644204
Result	2,1479e-002		mm	0.133302	19.717850	0.264066
Result	-1,0289e-002		mm	0.166856	19.519685	1.357352
Result	-8,595e-002		mm	0.167895	19.332528	2.343369
Result	-0,15182		mm	0.066934	18.907335	3.651538
Result	-3,4561e-002		mm	0.191008	-19.385166	0.879341
Result	-8,1226e-002		mm	0.178984	-19.160939	1.758346
Result	-0,14411		mm	0.185484	-18.961590	2.612068
Result	-0,19342		mm	0.208273	-18.611750	3.616528
Result	-0,26003		mm	0.222099	-18.262127	4.696358
Result	-0,30199		mm	0.230264	-18.137619	5.298930
Result	-0,36311		mm	0.242950	-17.688008	6.604848
Result	-0,40104		mm	0.251906	-17.488679	7.483652
Result	-0,47007		mm	0.235077	-17.140154	9.015528
Result	-0,50442		mm	0.248154	-16.867904	11.249872
Result	-0,53256		mm	0.231625	-16.848559	14.387637
Result	-0,50794		mm	0.173847	-16.904682	17.400086
Result	-0,40591		mm	0.133870	-17.323956	20.716917
Result	-0,44987		mm	0.096050	-16.921362	19.395947
Result	-0,2906		mm	0.314274	-18.047033	22.797380
Result	-0,33118		mm	0.266365	-17.765712	22.037104
Result	-0,20116		mm	0.369038	-18.570364	24.518605

Dalla tabella 4.5 si notano valori estremi di -0,53 mm ed -0,14 mm.

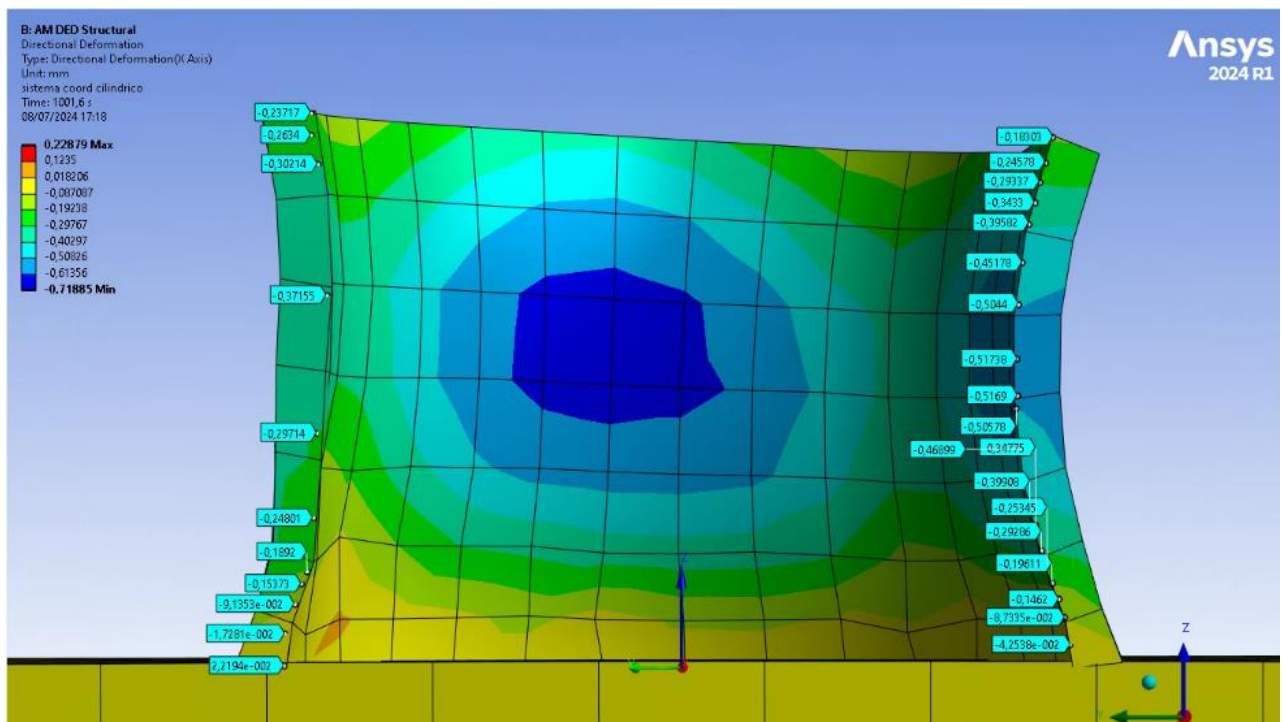


Figura 4.10-Sezione 3

La figura 4.10 mostra i dati ricavati dalla parte più interna del cilindro, i valori mostrano un andamento non omogeneo lungo l'altezza del provino.

Tabella 4.6-probe sezione 3

Graphics Annotations						
Type	Value	Note	Unit	Location X	Location Y	Location Z
Result	2,2194e-002		mm	0,127395	18,738810	0,140065
Result	-1,7281e-002		mm	0,176489	18,706378	1,649778
Result	-9,1353e-002		mm	0,134662	18,220251	3,038594
Result	-0,15373		mm	0,081701	17,915992	4,004967
Result	-0,1892		mm	0,055028	17,642884	4,578556
Result	-0,24801		mm	-0,078008	17,335063	7,116080
Result	-0,29714		mm	-0,212837	17,145449	11,103555
Result	-0,37155		mm	-0,013083	16,682710	17,594850
Result	-0,30214		mm	0,518677	17,099554	23,783095
Result	-0,23717		mm	0,733944	17,424731	26,175266
Result	-0,2634		mm	0,636371	17,425636	25,150204
Result	-0,18303		mm	0,068715	-17,532464	25,008112
Result	-0,24578		mm	0,037814	-17,192995	23,797046
Result	-0,29337		mm	0,011120	-16,923260	22,880143
Result	-0,3433		mm	-0,001612	-16,696585	21,911118
Result	-0,39582		mm	-0,030588	-16,400736	20,899059
Result	-0,45178		mm	-0,017747	-16,080646	19,096933
Result	-0,5044		mm	0,038087	-15,911903	17,115112
Result	-0,5169		mm	0,110237	-15,852634	12,812311
Result	-0,51738		mm	0,077973	-15,820513	14,553726
Result	-4,2538e-002		mm	0,183838	-18,304219	1,074465
Result	-8,7335e-002		mm	0,152072	-18,050179	2,358278
Result	-0,1462		mm	0,158841	-17,783361	3,221883
Result	-0,19611		mm	0,160815	-17,481383	3,968937
Result	-0,29286		mm	0,166271	-16,970797	5,497867
Result	-0,25345		mm	0,167637	-17,226188	4,809193
Result	-0,39908		mm	0,137035	-16,403714	7,867029
Result	-0,34775		mm	0,154008	-16,704781	6,711563
Result	-0,50578		mm	0,098007	-15,782550	12,216542
Result	-0,46899		mm	0,121878	-16,059021	10,273453

La tabella 4.6 mostra le coordinate dei punti usati per ricavare i valori, si notano valori estremi di -0,517 mm ed -0,146 mm.

Dalle figure riportate si vede un andamento non omogeneo lungo il componente, con punti di accumulo delle deformazioni. In particolare, si vedono deformazioni principalmente nella parte intermedia del componente.

#### 4.2.4 Analisi tensioni residue sul campione con mesh 4mm

In questa sezione vengono mostrati i risultati riguardo l'analisi sulle tensioni residue.

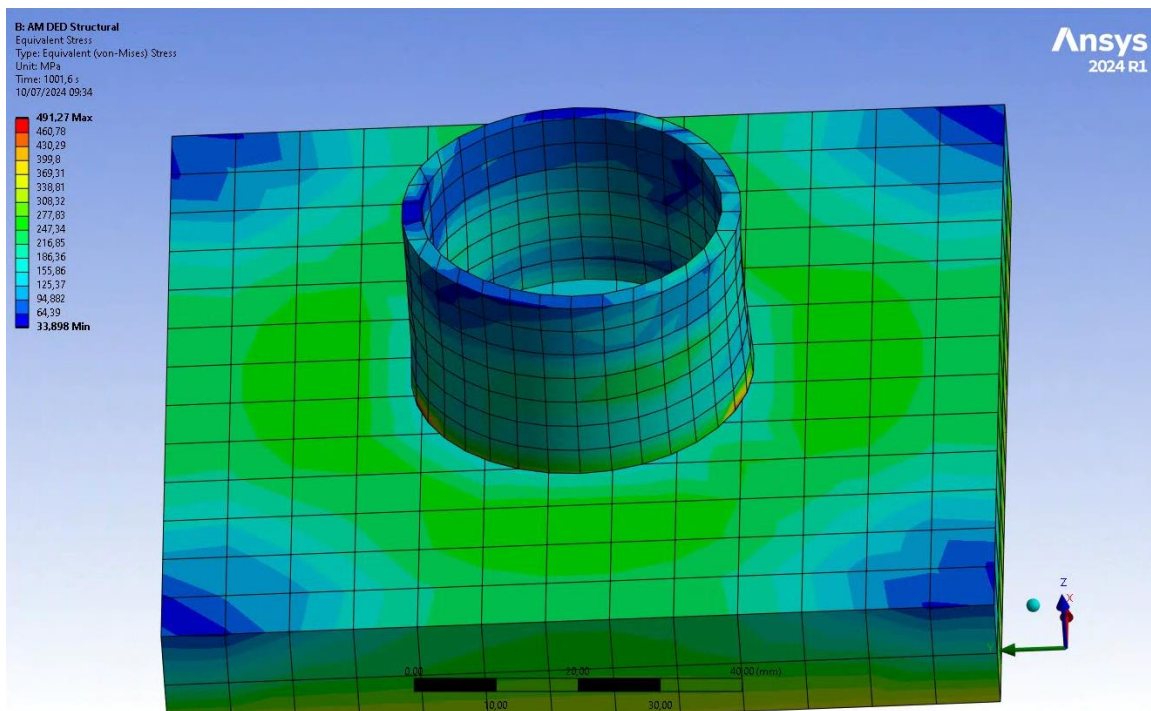


Figura 4.11-Risultati corpo intero

In figura 4.11 viene mostrata il risultato delle analisi con mesh grossolana, con valori abbastanza omogenei lungo l'altezza del provino.

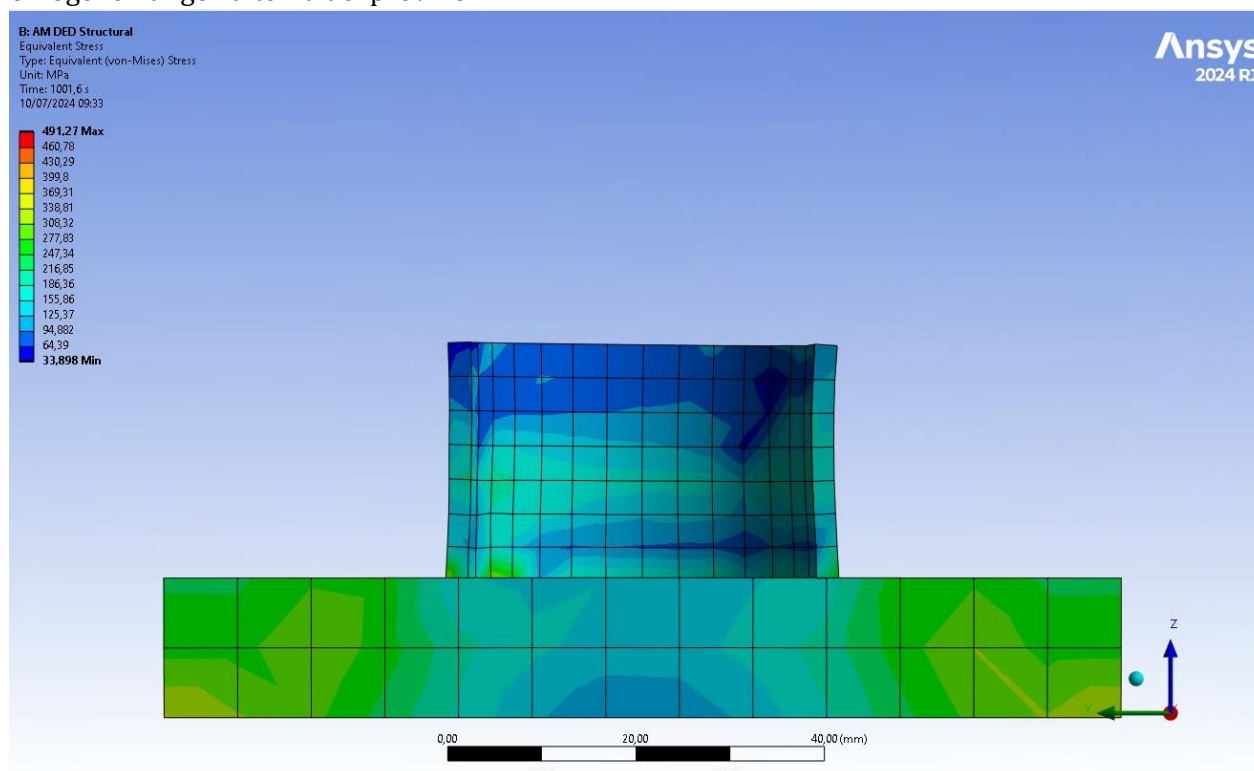


Figura 4.12-Sezione corpo

In figura 4.12 si nota un picco di 491,27 MPa in prossimità del piatto di stampa, per poi avere un andamento a diminuire all'aumentare dell'altezza del componente, con un minimo di 33,89 Mpa. L'analisi delle tensioni residue con mesh di 4mm riporta una concentrazione dei valori più elevati nella parte inferiore del componente per poi avere valori minori nella parte superiore.

## 4.3 Confronto deformazioni su provino reale e simulato

Il componente stampato in laboratorio, che è stato tagliato a metà per altri studi è stato scansionato tramite uno scanner 3D. Il risultato della scansione e i risultati dati dalle simulazioni delle analisi strutturali fatte sulle diverse mesh sono state confrontate tramite sovrapposizione delle geometrie grazie al software Geomagic Qualify per notare eventuali difformità.

### 4.3.1 Confronto con provino mesh 0,4mm

Il primo confronto viene effettuato tramite la sovrapposizione delle due geometrie come si può vedere in figura 4.13.

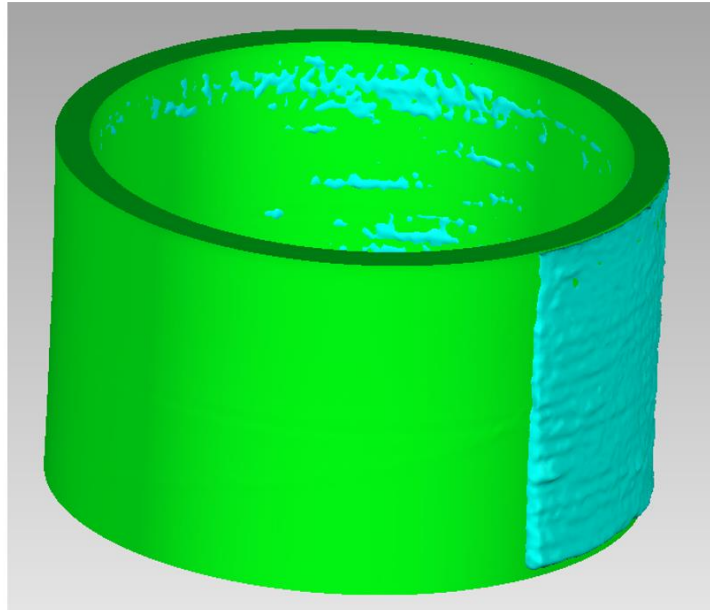


Figura 4.13-Confronto geometrie

In figura 4.13 si nota una differenza tra le 2 geometrie soprattutto nella parte inferiore, mentre nella parte alta le 2 geometrie sono abbastanza coincidenti.

Per quanto riguarda la deviazione 3D in figura 4.14 si nota che le geometrie sono coincidenti per quel che riguarda la parte alta, però con uno scostamento che aumenta al diminuire dell'altezza con valori massimi di 2.051.

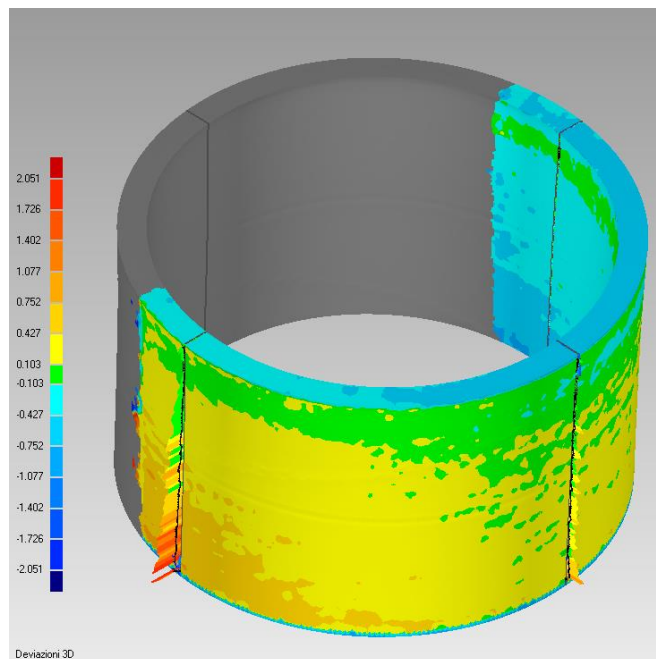


Figura 4.14-Deviazione 3D geometria mesh 0,4mm

Considerando i piani di taglio, dalla figura 4.15 si vede bene l'andamento dello scostamento delle due geometrie.

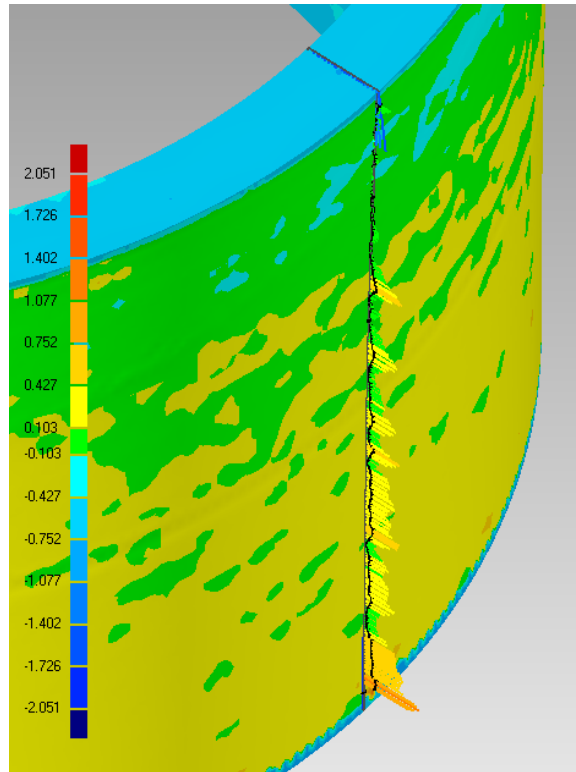


Figura 4.15-Piani di taglio geometria mesh 0,4mm



Figura 4.16-Deviazione 2D geometria mesh 0,4mm

Per la deviazione 2D come si può vedere in figura 4.16 si individuano valori massimi di 0.699 nella parte inferiore della geometria.

Dalle figure 4.15 della deviazione 3D e 4.16 per la deviazione 2D si notano scostamenti che diminuiscono all'aumentare dell'altezza del provino.

### 4.3.2 Confronto con provino mesh 4mm

Nella figura 4.17 viene mostrata la sovrapposizione della geometria reale e la geometria simulata con mesh di 4 mm.

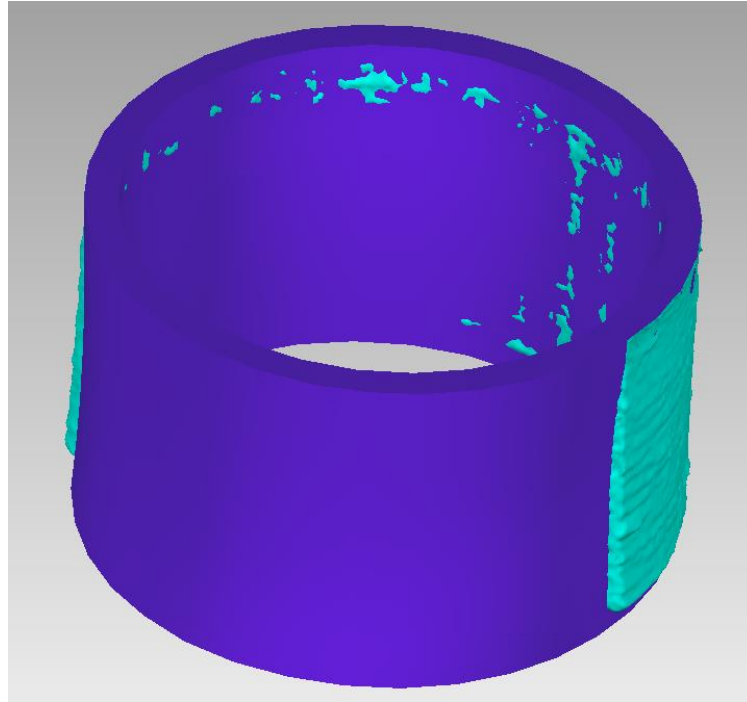


Figura 4.17-Confronto geometria mesh 4mm

In figura 4.17 si notano delle disformità nella parte bassa del provino, per poi avere un andamento simile aumentando l'altezza del provino.

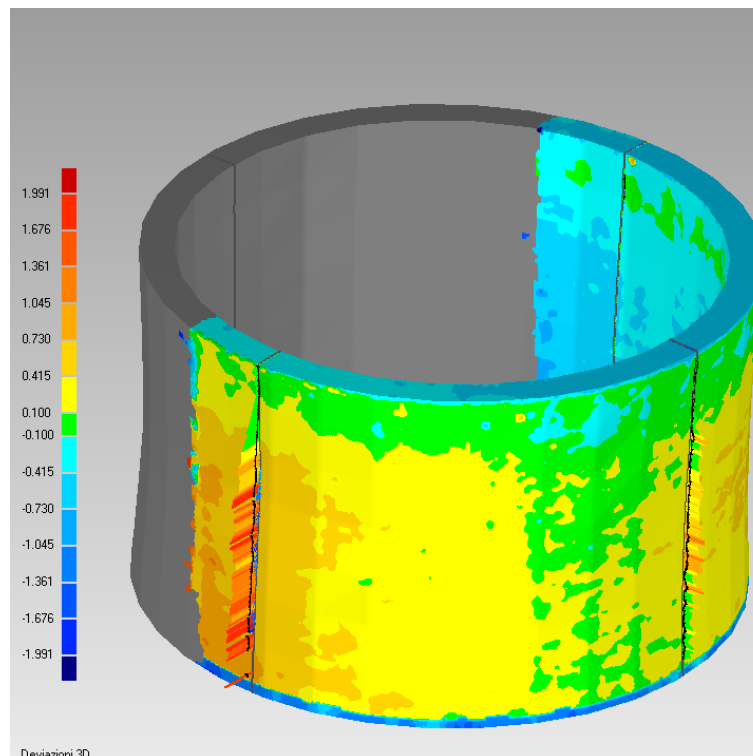


Figura 4.18-Deviazione 3D geometria mesh 4mm

Dalla figura 4.18 per la deviazione 3D si nota un andamento delle due geometrie più simile nella parte superiore per poi avere un aumento degli scostamenti al diminuire dell'altezza del componente.



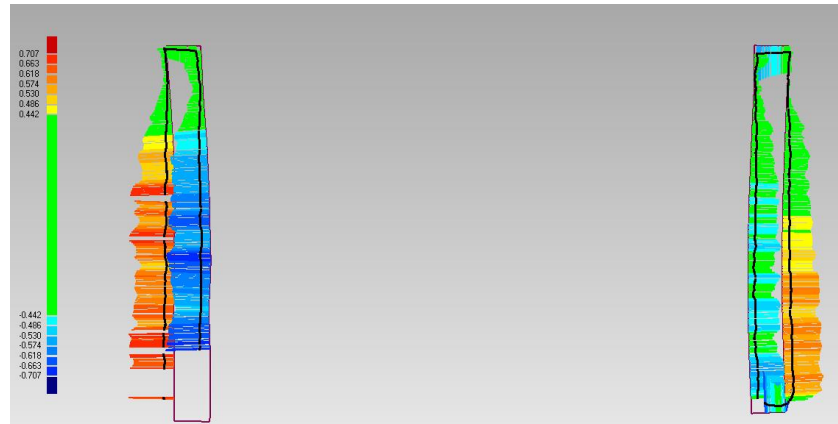


Figura 4.19- Deviazione 2D geometria mesh 4mm (A)

Per la deviazione 2D, in figura 4.19 si nota che le due geometrie sono associabili nella parte alta, ma nella parte bassa vanno ad avere andamenti discostanti.



Figura 4.20-Deviazione 2D geometria mesh 4mm (B)

Il calcolo delle deviazioni 3D e 2D conferma un maggior discostamento dei risultati delle simulazioni dal componente reale nella parte bassa del provino.

### 4.3.3 Confronto risultati provini con mesh diverse e discussione

Dal confronto si nota che le due simulazioni effettuate con mesh diverse alla fine ottengono risultati simili rispetto al componente reale, con però un maggior scostamento dalla geometria reale per la geometria ricavata con mesh 4mm.

Le deformazioni risultanti dalle simulazioni sono congruenti con quello che si è riscontrato nella realtà.

Nel confronto delle geometrie simulate e quella reale, effettuato sovrapponendo le geometrie, si nota che in entrambe le simulazioni si vanno ad avere delle geometrie congruenti nella parte superiore per poi avere un aumento degli scostamenti nelle parti inferiori.

Il provino simulato tende ad avere una forma rientrante lungo la circonferenza dovuto al ritiro termico dell'acciaio e si notano valori di deformazione, temperatura e tensioni plausibili.

I valori delle tensioni residue simulate sono in linea con quello che è il punto di vista teorico e pratico, con un accumulo nelle parti a contatto con il piatto di stampa.

## 5 Conclusione

L'obiettivo di questa tesi è quello di valutare la precisione di simulazione del software Ansys, in particolare del suo modulo "AM DED Process", tramite l'analisi di un provino cilindrico cavo, per poi confrontare i risultati con il caso reale. Il provino reale è stato realizzato tramite l'utilizzo di una stampante 3D Directed Energy Deposition, presente all'interno dei laboratori del DIISM.

Per eseguire un confronto diretto tra le geometrie simulate e quella reale, è stata eseguita la scansione del provino tramite l'uso di uno scanner 3D presente in dipartimento.

Per eseguire la simulazione del componente all'interno di Ansys, è stato necessario procedere con lo svolgimento di diversi step, che vanno dalla realizzazione della geometria CAD del provino alla realizzazione del suo Gcode fino all'impostazione dei vari parametri di stampa e criteri di simulazione.

Simulare il processo di deposizione di un componente e la possibilità di avere dati riguardanti il componente finito, come la sua deformazione e tensioni residue, consentono in ambito progettuale e manifatturiero un risparmio di tempo e risorse in fase di realizzazione.

Analizzando i risultati della simulazione di Ansys si è visto che tramite l'impostazione di mesh fini, quindi con maggior precisione di simulazione, si ottengono dati molto più congrui rispetto a ciò che accade nel processo reale, ma si è osservato che, anche con una dimensione di mesh più grossolana, si riescono a ricavare dati comparabili e non troppo discostanti dal reale processo di deposizione.

La simulazione con mesh di 4mm ha impiegato un tempo di calcolo pari ad un'ora mentre diminuendo la mesh fino a 0,4mm il tempo di calcolo è stato di 135 ore. Per sfruttare a pieno le potenzialità e vantaggi del software di simulazione soprattutto in ambito progettuale ed industriale, è necessario trovare il giusto compromesso tra precisione dei dati e tempo di calcolo.

Durante le varie prove di simulazione sono stati riscontrati alcuni bug/errori di Ansys, variando qualche parametro o impostazione di simulazione gli errori sparivano. Questi bug sono molto probabilmente dovuti al modulo DED di Ansys che è stato da poco rilasciato e quindi probabilmente non ancora del tutto ottimizzato.

In conclusione, si può stabilire che Ansys si è dimostrato uno strumento affidabile nella simulazione di stampa del provino in Directed Energy Deposition e che i risultati delle deformazioni sono congruenti con i risultati ottenuti nel caso reale.

## 6 Bibliografia

- [1] 3D systems, “our story.”
- [2] www.Tecnologia&Design, “SLS sinterizzazione Laser Selettiva.”
- [3] www.ilprogettistaindustriale.it Stefano Vinto, “Additive Manufacturing:una storia di brevetti.”
- [4] www.internet4things.it, “Additive manufacturing: cos’è e come funziona la manifattura additiva.”
- [5] Meccanica News, “Tutto sull’Additive Manufacturing: una risorsa anche in produzione.”
- [6] S. Saleh Alghamdi, S. John, N. Roy Choudhury, and N. K. Dutta, “polymers Additive Manufacturing of Polymer Materials: Progress, Promise and Challenges,” 2021, doi: 10.3390/polym13.
- [7] T. T. Metal AM Magazine, “An introduction to metal powders for AM: Manufacturing processes and properties.”
- [8] Akin Malas, “Additive Manufacturing and Gas Technology Applications.”
- [9] A. Dass and A. Moridi, “State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design,” *Coatings*, vol. 9, no. 7. MDPI AG, 2019. doi: 10.3390/COATINGS9070418.
- [10] Prof.ssa Michela Simoncini and DIISM UNIVPM, “Tecnologie di Fabbricazione Additiva di Componenti in Materiale Metallico: processi puntuali di deposizione di materiale.”
- [11] K. Hu, Y. Wang, W. Li, and L. Wang, “CNN-BiLSTM enabled prediction on molten pool width for thin-walled part fabrication using Laser Directed Energy Deposition,” *J Manuf Process*, vol. 78, pp. 32–45, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.04.010.
- [12] C. Schneider-Maunoury, L. Weiss, P. Acquier, D. Boisselier, and P. Laheurte, “Functionally graded Ti6Al4V-Mo alloy manufactured with DED-CLAD ® process,” *Addit Manuf*, vol. 17, pp. 55–66, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.addma.2017.07.008.
- [13] N. Shamsaei, A. Yadollahi, L. Bian, and S. M. Thompson, “An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control,” *Additive Manufacturing*, vol. 8. Elsevier B.V., pp. 12–35, Oct. 01, 2015. doi: 10.1016/j.addma.2015.07.002.
- [14] M. Poggi, E. Atzeni, L. Iuliano, and A. Salmi, “State-of-the-art of numerical simulation of laser powder Directed Energy Deposition process,” in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2022, pp. 376–381. doi: 10.1016/j.procir.2022.09.012.
- [15] I. ; R. D. ; S. B. Gibson, “Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, 2nd ed.,Springer:New York, NY, USA, 2015 .”
- [16] A. Saboori, A. Aversa, G. Marchese, S. Biamino, M. Lombardi, and P. Fino, “Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 16. MDPI AG, Aug. 01, 2019. doi: 10.3390/app9163316.
- [17] G. Bi and A. Gasser, “Restoration of nickel-base turbine blade knife-edges with controlled laser aided additive manufacturing,” in *Physics Procedia*, Elsevier B.V., 2011, pp. 402–409. doi: 10.1016/j.phpro.2011.03.051.

- [18] E. Díaz, J. M. Amado, J. Montero, M. J. Tobar, and A. Yáñez, "Comparative Study of Co-based Alloys in Repairing Low Cr-Mo steel Components by Laser Cladding," in *Physics Procedia*, Elsevier B.V., 2012, pp. 368–375. doi: 10.1016/j.phpro.2012.10.050.
- [19] R. Raju, M. Duraiselvam, V. Petley, S. Verma, and R. Rajendran, "Microstructural and mechanical characterization of Ti6Al4V refurbished parts obtained by laser metal deposition," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 643, pp. 64–71, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.msea.2015.07.029.
- [20] T. Pasang *et al.*, "Additive manufacturing of titanium alloys – Enabling re-manufacturing of aerospace and biomedical components," *Microelectron Eng*, vol. 270, p. 111935, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.MEE.2022.111935.
- [21] Xometry, "Direct Energy Deposition (DED): Definition, Examples, How Does It Work, Advantages and Disadvantages."
- [22] J. Gu, R. Li, Y. Qiu, H. Yue, B. Liu, and H. Gu, "Microstructure, Mechanical Properties, and Residual Stress Distribution of AISI 316L Stainless Steel Part Fabricated by Laser Metal Deposition," *Scanning*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/4831798.