

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Chimica e dei Materiali

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Chimica e dei Processi Sostenibili**

Tesi di Laurea Magistrale

Previsione di stress termici e deformazioni di parti e supporti in Inconel 718 nella tecnologia del Powder Bed Fusion



Relatori

Prof. Luca Iuliano
Prof. Paolo Fino
Prof. Alessandro Salmi
Prof.ssa Mariangela Lombardi

Candidato

Alessandro Asaro

Tutor

Paolo Calefati

Marzo 2020

Indice

1. Introduzione	1
2. Additive Manufacturing	3
2.1 Additive Manufacturing: evoluzione storica e principali caratteristiche	3
2.2 Principali Applicazioni	6
2.3 Vantaggi e svantaggi	9
2.4 Come la simulazione può ridurre tempi e costi	10
3. Additive Manufacturing in ambito metallico - State of Art	13
3.1 Directed Energy Deposition	14
3.2 Powder Bed Fusion	15
3.3 Selective Laser Melting	16
3.3.1 Parametri di processo nella tecnologia SLM	17
3.3.2 Strutture di supporto nella tecnologia SLM	19
3.3.3 Sviluppo di stress termici residui nella tecnologia SLM	20
3.4 Materiali, polveri e metodi di produzione	23
3.4.1 Atomizzazione a gas	24
3.4.2 Atomizzazione ad acqua	25
3.4.3 Atomizzazione centrifuga	26
3.4.4 Atomizzazione al plasma	28
3.4.5 Inconel 718: caratteristiche chimico-fisiche e campi di applicazione	29
3.5 Stato dell'arte sulla modellazione termo-meccanica del processo SLM	31
4. Caso studio - Procedura sperimentale	39
4.1 Fasi dell'Additive Manufacturing	39
4.2 Progettazione del pezzo in CAD	40
4.2.2 Caratteristiche del componente: geometria e materiale	40
4.2.3 Caratteristiche del supporto: geometria e materiale	41
4.3 DoE: Design of Experiment	42
4.3.1 Scelta dei parametri di processo	43
4.4 Macchinario di stampa: Print Sharp 250	44
4.5 Processo di stampa: dal file STL al componente finito	46
4.6 Misure di distorsione	47
5. Caso studio - Modellazione numerica	49
5.1 Software utilizzato: Abaqus/CAE	49
5.2 Condizioni di simulazione	50
5.2.1 Geometria e parametri di processo	50
5.2.2 Proprietà del materiale	51

5.3 Simulazione termo-meccanica	53
5.3.1 Costruzione della mesh	53
5.3.2 Analisi termica	54
5.3.3 Analisi strutturale	58
6. Risultati della simulazione e convalida del modello	61
6.1 Risultati della simulazione numerica	61
6.1.1 Risultati dell'analisi termica	61
6.1.2 Risultati dell'analisi strutturale	63
6.2 Confronto tra i valori di misura e i valori della prima simulazione	64
6.3 Risultati di ulteriori simulazioni	68
7. Conclusione e discussione	71
7.1 Conclusioni dei risultati e punti salienti importanti	71
7.2 Prossimi passi e lavori futuri - connessi a nuove tesi	72
Lista degli acronimi	75
Bibliografia	77
Appendice A	I
Appendice B	III
Ringraziamenti	

1. Introduzione

Negli ultimi anni, nell'ambito del processo Industria 4.0, si sta assistendo allo sviluppo e alla diffusione di tecnologie innovative, aventi lo scopo di conseguire una produzione industriale sempre più digitalizzata, automatizzata ed interconnessa, caratterizzata da una maggiore produttività e atta a minimizzare gli sprechi. Tra le tecnologie chiave, riconosciute come potenzialmente responsabili della concretizzazione di questa "quarta rivoluzione industriale", vi è l'Additive Manufacturing (AM). Con quest'ultimo termine ci si riferisce a un insieme di tecniche manifatturiere in cui il componente finito, a differenza delle metodologie tradizionali, viene realizzato senza il bisogno di utilizzare stampi in cui fondere il materiale utilizzato o di asportare quest'ultimo da una forma grezza. Il processo di produzione additiva parte, infatti, dalla realizzazione di un modello 3D virtuale del prodotto desiderato il quale, dopo essere stato suddiviso in strati da appropriati software, viene realizzato mediante la generazione e l'aggiunta di strati successivi di materiale da parte di opportuni macchinari, le cosiddette "stampanti 3D".

Mentre negli scorsi decenni l'utilizzo delle stampanti 3D era limitato alla realizzazione rapida di prototipi, al giorno d'oggi, grazie anche a una diminuzione dei costi associati, si sta sempre di più affermando come un metodo innovativo di produzione, interessando diversi settori industriali quali aeronautico, automotive, medicale e architettonico. L'AM interessa due principali classi di materiali, ovvero i polimeri e i metalli; se ai primi sono associate tecnologie di stampa più semplici ed economiche, i metalli permettono, tuttavia, di realizzare componenti dalle prestazioni di gran lunga migliori e su di essi è stata focalizzata l'attenzione.

Lo studio condotto e illustrato nel seguito della presente tesi è orientato all'utilizzo di un modello termo-meccanico in macroscale, al fine di effettuare la previsione degli stress termici residui gravanti su componenti in lega metallica "Inconel 718" e realizzati attraverso la tecnologia di stampa tridimensionale denominata "Selective Laser Melting" (SLM). La minimizzazione di tali tensioni residue sui componenti finiti è di fondamentale importanza, in quanto essi possono causare problemi durante il processo di fabbricazione, deformare il pezzo e altresì aumentarne il costo di produzione. Di conseguenza, risulta di grande interesse simulare adeguatamente il comportamento dei pezzi e dei relativi supporti durante il processo di stampa, con lo scopo di conseguire l'ottimizzazione dei principali parametri aventi la capacità di influenzare l'insorgenza dei suddetti stress termici.

Tale studio è stato realizzato in collaborazione con Prima Industrie S.p.A., società leader nello sviluppo, produzione e commercializzazione di sistemi laser per applicazioni industriali, macchinari per la lavorazione della lamiera, elettronica industriale e sistemi laser. In particolare, la sperimentazione è stata svolta nell'ambito della divisione Prima Additive, azienda leader nella realizzazione di processi, sistemi e soluzioni per applicazioni metalliche di Additive Manufacturing e caratterizzata da una presenza globale.

Nella prima parte del presente lavoro di tesi viene delineato un quadro generale riguardante le principali caratteristiche e l'attuale sviluppo della tecnologia di Additive Manufacturing (AM), includendo le relative sfaccettature e i maggiori campi di applicazione. Vengono, quindi, illustrate le due principali tecniche dell'AM in ambito metallico, ovvero la metodologia "Powder Bed Fusion" (PBF) e la metodologia "Direct Energy Deposition" (DED), i materiali costituenti le polveri in uso e i principali metodi di produzione di quest'ultime. Successivamente, l'attenzione viene focalizzata su uno dei metodi di fabbricazione appartenente alla macroarea delle tecnologie PBF, ossia il processo di Selective Laser Melting, di cui sono descritti le principali peculiarità e l'attuale stato dell'arte.

Nel corso della seconda parte viene descritto il modello termo-meccanico utilizzato per la simulazione assistita del processo di stampa tridimensionale. Quest'ultimo modello viene, quindi, applicato a un componente dalla geometria a L realizzato in CAD. In particolare, nel corso della sperimentazione svolta, sono state effettuate diverse simulazioni, variando, di volta in volta, i principali parametri di processo. Al fine di ottenere un riscontro pratico di quanto simulato e, di conseguenza, validare il suddetto modello, si procede con lo svolgimento di un caso studio sperimentale. Mediante l'utilizzo

della macchina di stampa 3D “Print Sharp 250”, basata sulla tecnologia SLM, è stato realizzato il suddetto componente a L in Inconel 718; quest’ultimo è stato sottoposto successivamente a misurazione, al fine di quantificare le distorsioni gravanti sul pezzo.

Nella parte conclusiva viene effettuata una comparazione tra i risultati ottenuti dalla simulazione assistita e i dati ricavati dalle prove sperimentali. Le osservazioni derivanti da tale confronto e le relative conclusioni portano allo sviluppo di significative linee guida, utili per la progettazione e la stampa di pezzi meccanici e delle necessarie strutture di supporto. Queste, se correttamente applicate, potrebbero comportare una notevole riduzione dei costi, in termini di tempo e di denaro, derivanti dall’applicazione di un approccio semplicistico del tipo “prova e sbaglia” al processo di stampa mediante tecnologia SLM. Infine, vengono proposti eventuali ulteriori approfondimenti e studi che potranno essere svolti in futuro.

2. Additive manufacturing

Così come suggerito dall'ASTM (American Society for Testing and Materials), con il termine *Additive Manufacturing* (AM) si intende il “processo di integrazione dei materiali per la realizzazione di oggetti a partire da modelli tridimensionali computerizzati, usualmente strato su strato, in opposizione alle metodologie di produzione sottrattive” [1]. Si tratta, dunque, di tecnologia innovativa che, a differenza delle metodologie tradizionali, non richiede l'utilizzo di particolari strumenti meccanici, nata dall'esigenza di realizzare oggetti di geometria complessa minimizzando, parallelamente, il tempo necessario, la quantità di materia prima impiegata ed il fabbisogno energetico [2]. Uno dei principali punti di forza dell'AM deriva dal fatto che essa può essere utilizzata per numerose applicazioni; è possibile, infatti, sfruttare tale metodologia per il processo manifatturiero di un'ampia gamma di oggetti, da componenti polimerici a metallici, da ceramici a compositi. Bisogna, tuttavia, sottolineare che, nel seguito, ci si concentrerà sull'applicazione di essa nella costituzione di parti metalliche.

2.1 Additive Manufacturing: evoluzione storica e principali caratteristiche

Ripercorrendone brevemente l'evoluzione storica, l'AM affonda le sue radici nel diciannovesimo secolo nel campo della topografia e della fotoscultura [3]. In realtà, come riportato in [4], fu il ricercatore giapponese Hideo Kodama del Nagoya Municipal Industrial Research Institute, nel 1981, a presentare la prima domanda di brevetto relativa a un dispositivo in grado di polimerizzare polimeri fotosensibili mediante l'utilizzo della luce ultravioletta, secondo un approccio di costruzione stratificato. Egli, tuttavia, a causa di problemi legati ai finanziamenti, non fu in grado di depositare la specifica completa del proprio brevetto entro la scadenza di un anno e tale dispositivo non venne mai realizzato.

Spesso il merito di aver inventato la stampa 3D, nell'accezione moderna del termine, viene attribuita all'ingegnere americano Charles Hull [5]. Nel 1983 Hull era impiegato presso la società Ultraviolet Product, azienda impegnata nel rivestimento di tavoli e mobili con sottili strati in resina mediante l'utilizzo della radiazione UV. Egli, non soddisfatto dalla situazione per cui la prototipazione di nuovi oggetti personalizzati potesse richiedere fino a due mesi per la propria azienda, iniziò a pensare a una nuova tecnica di utilizzo degli strumenti a sua disposizione. Ebbe, quindi, l'intuizione di realizzare prototipi sovrapponendo strati sottili di resina liquida (la medesima utilizzata per realizzare i rivestimenti) e far indurire tali strati in un unico blocco tridimensionale mediante l'utilizzo della radiazione ultravioletta. Hull continuò a lavorare per lo sviluppo di tale tecnologia a cui, in definitiva, diede il nome di “Stereolitografia” (SLA) nel suo brevetto dal titolo “Apparatus for Production of Three-Dimensional Object by Stereolithography”, depositato nel 1984. Il dispositivo, ideato dall'ingegnere americano e descritto nel suo brevetto [6], consiste in una vasca (Figura 2.1) contenente una superficie sulla quale viene progressivamente versata una resina termosensibile liquida. Un fascio di luce ultravioletta concentrata, opportunamente movimentata da un computer, colpisce lo strato di resina presente sulla superficie che, solidificandosi, costituisce ciascuno strato dell'oggetto desiderato.

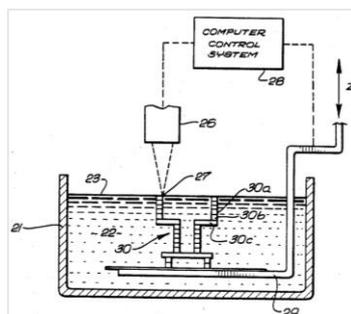


Figura 2.1: Primo prototipo di stampante 3D, ideato da Chuck Hull e presentato nel suo brevetto del 1986. Figura tratta da [6].

A Hull bisogna riconoscere un ulteriore merito, di fondamentale importanza nell'ambito dell'AM, ovvero l'invenzione del formato di file STL (STereoLitography interface format), ancora oggi ampiamente utilizzato da numerosi software impiegati nel campo della stampa tridimensionale. Nel 1986 Hull fondò la prima azienda mondiale attiva nell'ambito della stampa tridimensionale, denominata "3D Systems", società responsabile della commercializzazione, nel 1987, del primo esemplare di stampante 3D, la SLA-1 [7].

Il passo successivo fu compiuto da Carl Deckard, Joe Beamen e Paul Forderhase presso l'Austin's Department of Mechanical Engineering della Texas University, nell'ambito di un progetto finanziato dall'agenzia militare americana DARPA. A partire dal 1984, essi incominciarono a lavorare per lo sviluppo di una nuova metodologia, la Selective Laser Sintering (SLS), che si differenziava dalla precedente per l'utilizzo di polimeri termoplastici in forma polverulenta e non liquida [8]. In questo caso, un sottile strato di polvere viene depositato su una superficie e un apposito laser provoca la sinterizzazione delle particelle laddove necessario, creando così uno strato di materiale solido. Nel 1987 essi fondarono la DTM Corporation, società acquisita dalla 3D Systems nel 2001.

Due anni dopo, fu la volta dell'ingegnere meccanico Scott Crump, nel suo tentativo di elaborare un metodo semplice per la realizzazione di una rana giocattolo per il proprio figlio. Mediante l'utilizzo di una pistola per colla a caldo, fuse un filamento polimerico, distribuendolo successivamente in strati sottili su una superficie piana. In questo modo, avvenne l'ideazione di una nuova metodologia denominata Fusion Deposition Modelling (FDM) [9]. Nel 1992, in seguito all'ottenimento del brevetto, Crump realizzò la prima stampante 3D funzionante basata sulla tecnologia FDM, la 3D Modeler (Figura 2.2), e fondò la società Stratasys.

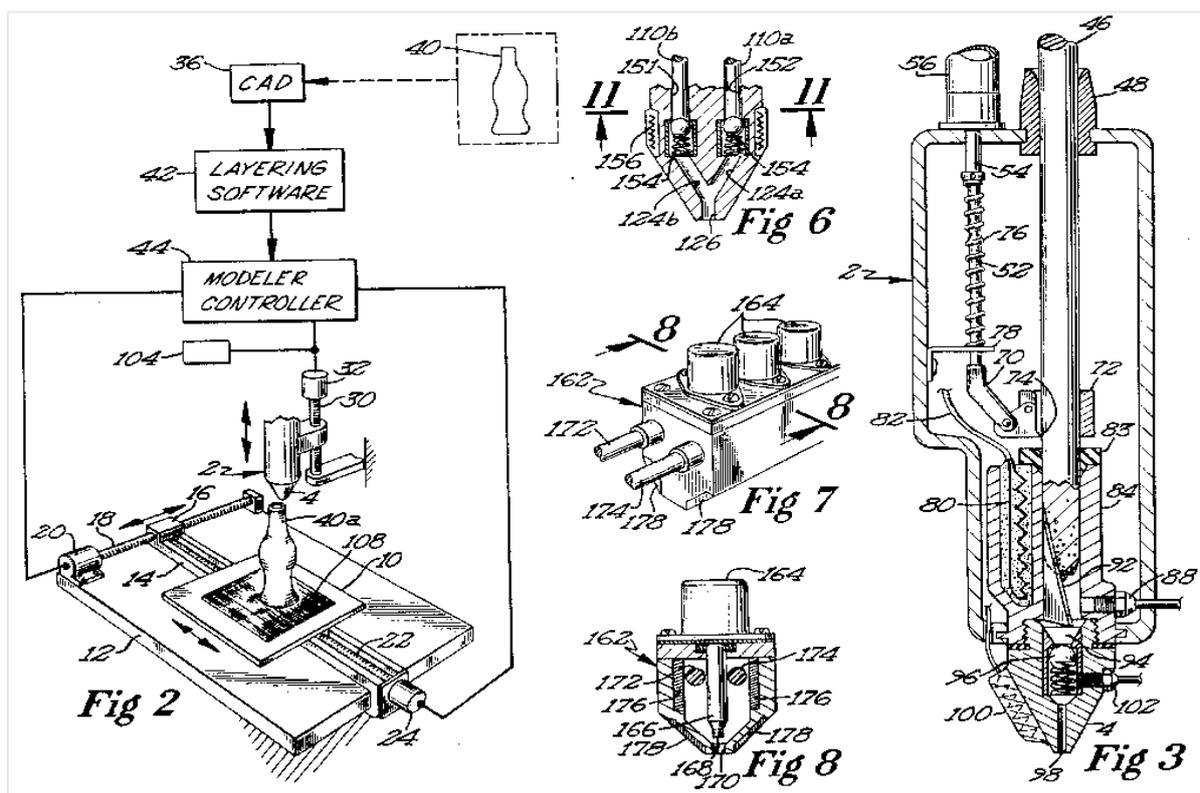


Figura 2.2: Schema illustrativo del funzionamento dei vari componenti del dispositivo di stampa 3D basato sulla tecnologia FDM e presentato da Crump nel suo brevetto del 1992. Figura tratta da [9].

Il 1995 segnò l'introduzione del metodo "Selective Laser Melting" (SLM) in seguito agli studi condotti dai ricercatori del Fraunhofer Institute for Laser Technology, ILT, di Aquisgrana, studi che sfociarono nella pubblicazione di un nuovo brevetto risalente al 1996 [10]. In questo modo, fu possibile, per la

prima volta, utilizzare della polvere metallica fusa per la realizzazione di componenti aventi densità comparabile a quella ottenibile con i metodi di produzione tradizionali. La prima macchina in grado di sfruttare tale tecnologia fu sviluppata, in collaborazione con l'ILT, da parte dei ricercatori tedeschi Matthias Fockele e Dieter Schwarze nel 1998.

Negli stessi anni, in Svezia, furono compiuti ulteriori studi per la ricerca di un metodo alternativo al laser in grado di provocare la fusione della polvere metallica. Il primo brevetto, in questo senso, venne presentato nel 1993, in collaborazione con la Chalmers University of Technology di Gothenburg, dalla società Arcam che, in questo modo, diede vita a una nuova tecnica di lavorazione additiva denominata Electron Beam Melting (EBM) [11]. Quest'ultima consiste nel fondere un sottile strato di materiale metallico sotto forma di polvere, in una camera sottovuoto, mediante un fascio di elettroni. Il primo modello di stampante 3D basato su tale tecnologia fu il macchinario EBM S12, commercializzato dalla società Arcam a partire dalla fine del 2002 (**Figura 2.3**).

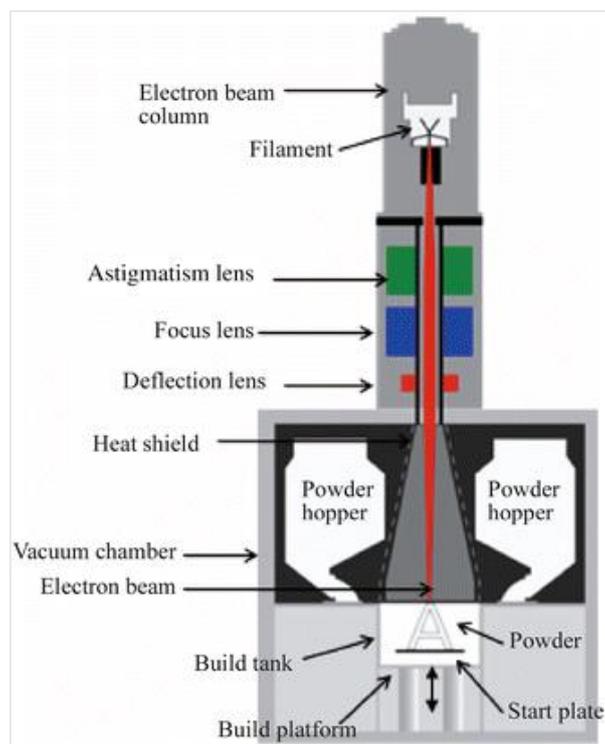


Figura 2.3: Rappresentazione illustrativa del macchinario EBM S12 sviluppata dalla società Arcam nel 2002. Figura tratta da [10].

Durante i primi anni, la tecnologia dell'AM è stata adoperata prevalentemente nell'ambito del "rapid prototyping", ovvero per la realizzazione di modelli aventi scopo valutativo. Fu solamente a partire dagli anni 2000 che, grazie allo sviluppo della scienza dei materiali e del potere computazionale degli strumenti elettronici, si cercò sempre di più di usufruire di questa metodologia per l'ottenimento di prodotti finiti [12].

Negli anni 2000 si è anche assistito alla "liberalizzazione" delle conoscenze legate al settore manifatturiero basato su logica additiva. Nel 2005 Adrian Bowyer, ingegnere e matematico britannico, ha dato vita al "Replicating Rapid Prototyper", ovvero "RepRap Project", iniziativa open-source per la realizzazione di una stampante 3D in grado di stampare la maggioranza dei suoi componenti. La prima stampante di questo tipo, denominata "Darwin", fu rilasciata nel maggio del 2007 (**Figura 2.4**).

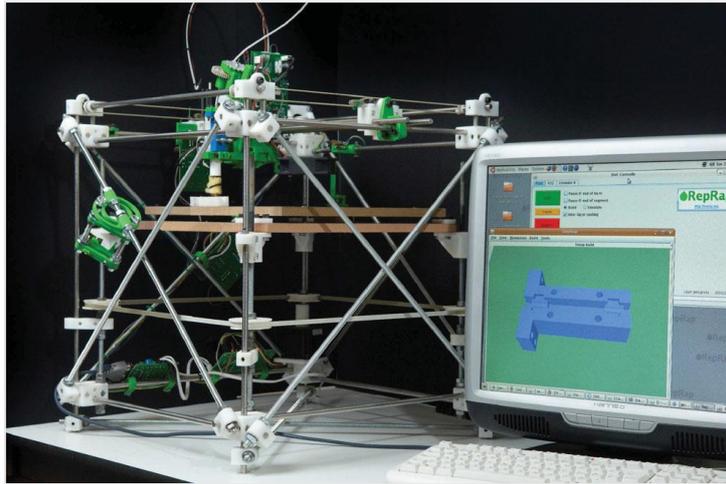


Figura 2.4: Prima versione della macchina RepRap chiamata “Darwin”, costruita nel maggio 2007.
Figura tratta da [13].

Nel 2009 il brevetto legato alla tecnologia FDM di Scott Crump ha raggiunto la data di scadenza, diventando di pubblico dominio, e nel 2014 la stessa sorte è toccata al brevetto di Deckard relativo alla SLS. L’insieme di questi eventi ha provocato un notevole acceleramento nella diffusione dei dispositivi di stampa 3D, generando un incremento del numero di società coinvolte nella loro produzione e, conseguentemente, un rapido crollo dei prezzi. Oggi quello dell’AM è un settore in continua espansione grazie al miglioramento delle tecniche utilizzate e alla notevole riduzione dei costi associati. Il 12 gennaio 2019 è stato perfino inaugurato a Shanghai il più grande ponte pedonale in cemento stampato in 3D e lungo ben 26.3 m.

In linea generale, il processo di AM consta di due fasi: una “fase virtuale”, di modellazione e simulazione, e una “fase fisica” di produzione [14]. Partendo dal modello tridimensionale in CAD del pezzo da costruire, uno specifico software suddivide quest’ultimo in un certo numero di sezioni trasversali. A questo punto entra in gioco il macchinario AM che realizza, depositando le materie prime solo dove richieste e facendo uso di una specifica fonte energetica, il prodotto desiderato strato dopo strato. Lo spessore dei suddetti strati dipende dal tipo di materia prima usata e dalla particolare procedura di AM impiegata nel processo produttivo. Il componente creato può essere successivamente sottoposto a processi di post-trattamento al fine di modificarne la rugosità superficiale e/o eliminare le tensioni residue conseguenti al processo di stampaggio.

2.2 Principali Applicazioni

Senza dubbio, la principale applicazione dell’AM è tutt’oggi il “rapid prototyping”, intendendo con tale termine la progettazione e la realizzazione di oggetti, spesso in materiale plastico, che fungono da prototipi utili per ottimizzare il processo manifatturiero del prodotto finale. Analizzando tali prototipi, il designer ha, infatti, la possibilità di valutarne le caratteristiche e implementare eventuali modifiche prima dell’esecuzione del vero e proprio prodotto finito, con conseguente riduzione dei costi di fabbricazione. L’utilizzo di una metodologia di questo genere ha la potenzialità di ridurre i costi correlati alla produzione di un nuovo prodotto fino al 70% e il tempo necessario all’introduzione di quest’ultimo sul mercato fino al 90% [15].

In ogni caso, negli ultimi anni, grazie alla raffinazione delle tecniche adoperate e all’aumento della gamma di materiali a disposizione (polimeri, acciai, leghe metalliche a base di nichel, cromo, alluminio e titanio, biomateriali), l’AM ha notevolmente ampliato i suoi possibili campi di applicazione, venendo sempre più adoperata per la produzione di prodotti finiti (**Figura 2.5**).

Come si evince dalla figura sottostante, tra il 2003 e il 2011 il tasso di crescita relativo alla fabbricazione diretta di prodotti finiti è aumentato dal 3.9% al 24%.

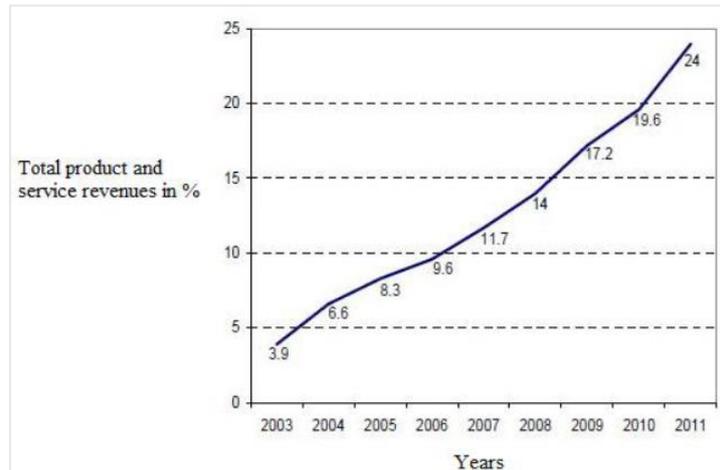


Figura 2.5: Andamento del tasso di crescita dell'utilizzo dell'AM per la realizzazione di prodotti finiti, derivante dall'analisi condotta dalla società Wholers Associates nel 2012. Figura tratta da [16].

La tecnologia AM viene spesso applicata nell'ambito della "Small Batch Production" [17], ovvero per fare in modo che le aziende possano sviluppare e produrre volumi limitati di prodotti di nicchia, aventi cioè un mercato ristretto, rendendo comunque questo processo economicamente sostenibile. In questo caso, si parla di "rapid manufacturing" e di "rapid tooling" [16]. L'AM si sta, quindi, sviluppando in tutti quei settori industriali che risentono di elevati costi di produzione, bassi volumi produttivi e difficoltà nel reperire materie prime a basso prezzo, ovvero:

- Industria aerospaziale, automotive e marina. L'AM consente in tal campo di integrare più parti in un unico componente e di realizzare parti metalliche in leghe di titanio e, in generale, pezzi dalla geometria complessa, con elevate performance e affidabilità, e caratterizzati da un minore peso rispetto a quelli ottenibili con le metodologie tradizionali, quali parti di turbine, componenti del motore, sistemi di raffreddamento e sistemi di scarico [18].
- Industria medicale. In questo settore le tecnologie di manifattura additiva possono essere utilizzate sia per la realizzazione di prototipi in campo medico (utili nel campo nella formazione o nella pianificazione e simulazione di interventi chirurgici particolarmente complessi) che per la produzione di protesi altamente customizzate, impianti dentali, strumenti medici, apparecchi acustici, sistemi per il rilascio controllato di farmaci, scaffold per la rigenerazione di tessuti danneggiati e altri dispositivi biomedicali [19].
- Industria dell'arte, dell'architettura e della moda. L'AM viene impiegata per la costruzione di prototipi molto accurati che consentono di ridurre notevolmente i tempi di ideazione e fabbricazione di modelli architettonici elaborati, gioielli, abbigliamento, calzature e complementi d'arredo.
- Industria dell'elettronica. Negli ultimi anni sono state compiute numerose ricerche aventi lo scopo di valutare le potenzialità di utilizzo della stampa 3D per la realizzazione di componenti elettronici sia di tipo attivo che di tipo passivo, come resistori, capacitori, induttori, antenne, transistor, LEDs e batterie [20].

Il Gartner Institute, società di consulenza impegnata nell'analisi dei trend industriali, ha recentemente pubblicato una ricerca raffigurante l'Hype Cycle relativo all'AM, ovvero una curva che mostra le previsioni riguardanti la diffusione nel mercato mondiale delle diverse applicazioni della stampa 3D per il 2019 (**Figura 2.6**).

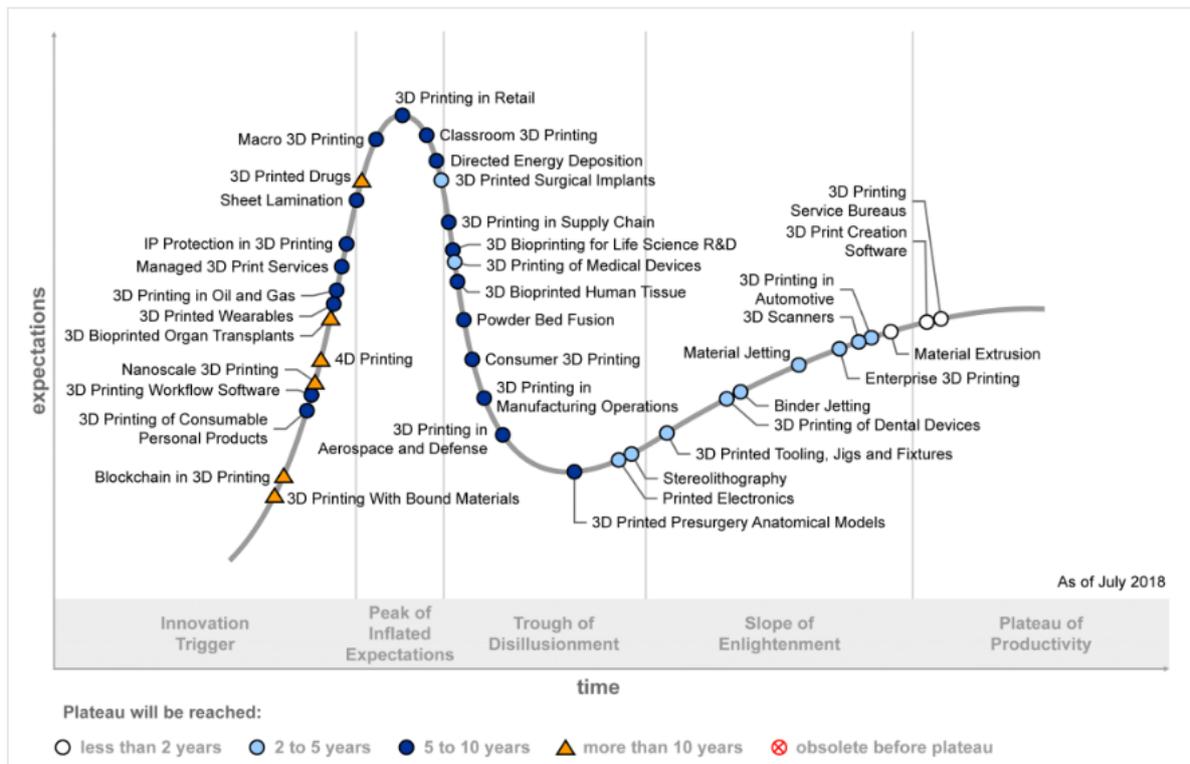


Figura 2.6: Hype Cycle di Gartner relativo alla stampa 3D del 2019. Figura tratta da <https://www.3dnatives.com/en/gartner-hype-cycle-3dprintingpredictions-150120194/>.

Secondo tale società, infatti, l'evoluzione di una tecnologia innovativa si articola, in generale, in cinque fasi. Dapprima vi sono le fasi di "Innovation Trigger" e "Peak of Inflated Expectations", durante le quali la tecnologia viene presentata: la pubblicità e l'attenzione dei mass media fanno sì che si sviluppino elevate aspettative circa essa che, pian piano, esce dalla fase prototipale e diviene acquistabile. A esse segue la fase di decrescita "Trough of Disillusionment" in cui, in seguito ai fallimenti nella sperimentazione e nella messa a punto della suddetta tecnologia, ci si incomincia a rendere conto dei limiti di essa e delle difficoltà nell'implementarla realmente a causa degli alti costi necessari per il suo miglioramento. Le ultime due fasi "Slope of Enlightenment" e "Plateau of Productivity", sanciscono una risalita della popolarità anche se non paragonabile a quella avuta in precedenza. Incomincia a diffondersi una maggiore consapevolezza riguardo le effettive potenzialità della tecnologia e i miglioramenti necessari. Grazie al processo di perfezionamento continuo, la tecnologia incomincia a dare risultati utili alle esigenze di mercato e gli investitori si avvicinano nuovamente ad essa, sino al raggiungimento del plateau di produttività.

Osservando la **Figura 2.6** si può, innanzitutto, notare come l'utilizzo della stampa 3D per la produzione di beni di consumo è ancora ben lontana da un effettivo sviluppo, in quanto ancora non economicamente conveniente. Applicazioni come la stampa 3D medica e la stampa 3D consumer si trovano attualmente nel "baratro della disillusione", avviandosi, quindi, verso un'introduzione effettiva nel mercato mondiale. Infine, si possono osservare le applicazioni che hanno ormai raggiunto, o perlomeno stanno raggiungendo, la fase di stabilizzazione, quali i software per la modellazione 3D di parti fisiche, le applicazioni in ambito automotive, i servizi dentali, le scansioni industriali 3D e la stereolitografia.

In **Figura 2.7** vengono mostrati i dati dei ricavi relativi al settore della produzione additiva (hardware, software, materiali e servizi) tra il 2014 e il 2018, dati derivanti dall'analisi di mercato condotta dalla società SmartTech Publishing alla fine del 2018. In tale grafico è possibile anche osservare le previsioni relative al periodo 2019-2027. Come si evince da essa, nel 2018 il valore del mercato AM ha superato la soglia di 9 miliardi di dollari con un tasso di crescita del 24% rispetto all'anno precedente [21]. È comunque evidente che per ottenere un ampliamento dei campi di applicazione della tecnologia AM sono necessarie ulteriori ricerche e studi, in modo da ridurne i costi (in termini di tempo e denaro) e utilizzare i materiali più adatti per ciascuna particolare applicazione.

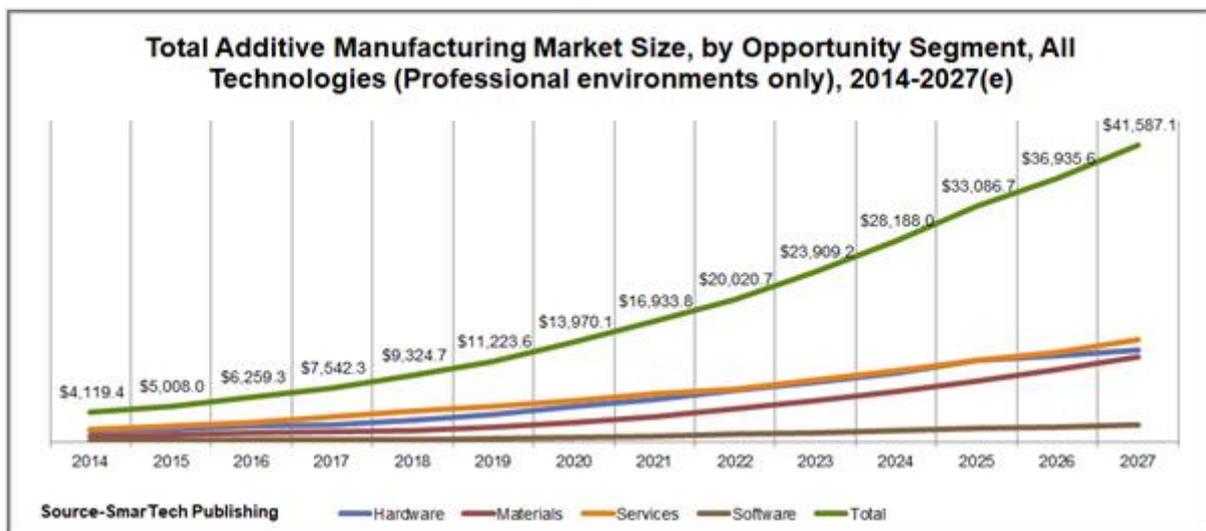


Figura 2.7: Andamento dei ricavi legati al settore della produzione additiva. Figura tratta da [21].

2.3 Vantaggi e svantaggi

Tra i vantaggi principali derivanti dall'uso della tecnologia AM si possono annoverare:

- Elevate potenzialità di innovazione; grazie alle procedure impiegate, l'AM consente di ottenere prodotti caratterizzati da elevate performance e funzionalità, atti a soddisfare le particolari esigenze di ciascun cliente. Uno dei più importanti vantaggi dell'AM consiste proprio nella capacità di produrre oggetti caratterizzati da notevoli proprietà meccaniche e termiche, e conseguentemente di elevata complessità, con pochi vincoli legati alla geometria del pezzo (**Figura 2.8**). Allo stesso modo, permette di integrare più parti in un unico componente, riducendo i problemi e i costi legati all'assemblaggio.



Figura 2.8: Geometria complessa realizzata mediante tecnica additiva. Figura tratta da <https://www.metal-am.com/potential-for-metal-additive-manufacturing-in-construction-steelwork-industry-highlighted-at-arup/> con modifiche.

- Minore quantità di prodotti di scarto; poiché, a differenza dei metodi tradizionali, il materiale viene depositato strato su strato solamente dove necessario per la costruzione del pezzo, la quantità di materie prime impiegate può essere ridotta fino al 40% rispetto a quella necessaria nell'ambito dei processi sottrattivi [14]. Nel caso di tecniche utilizzanti materie prime in polvere, quest'ultima, al termine del processo di stampa, ha la possibilità di essere setacciata e riutilizzata per stampe successive fino all'esaurimento della sua efficienza.
- Minor tempo di fabbricazione del pezzo e di introduzione di quest'ultimo nel mercato; il pezzo metallico, una volta realizzato il modello 3D computerizzato, può essere rapidamente ottenuto e ciò permette di evitare i problemi, i costi e il consumo di tempo legati all'approvvigionamento delle apparecchiature necessarie alla fabbricazione del pezzo e alla realizzazione di prototipi derivanti da un approccio del tipo "prova e sbaglia". Spesso, peraltro, grazie al continuo sviluppo dei software utilizzati, è possibile ottenere immediatamente una stima iniziale del tempo necessario per la costruzione del componente desiderato.
- Minore dispendio energetico; ciò viene realizzato minimizzando gli step e i materiali richiesti per la produzione del pezzo, rendendo possibile la fabbricazione di pezzi più leggeri e il riutilizzo dei sottoprodotti ottenuti. Nelle applicazioni in cui l'AM è competitiva, è possibile ridurre i consumi energetici fino al 50% rispetto ai metodi tradizionali [22].
- Flessibilità e rapidità. Ad esempio, le macchine di AM possono essere poste all'interno di stabilimenti produttivi e usate, quando necessario, per la produzione di pezzi di ricambio, permettendo di ridurre le complicazioni derivanti dallo stoccaggio di quest'ultime e dall'implementazione di complesse strategie di supply-chains.

Essendo una metodologia nata da pochi decenni, l'AM presenta alcune criticità tipiche delle nuove tecnologie emergenti che, nel tempo, si sta cercando di risolvere con lo scopo di trasformare quest'ultima in una tecnologia di avanguardia. In particolare, al fine di raggiungere un campo di applicazione maggiormente ampio, è necessario risolvere alcune problematiche legate a:

- Dimensioni del pezzo. La grandezza dei componenti realizzabili è limitata dalle dimensioni della macchina utilizzata per lo stampaggio.
- Costi elevati, legati sia ai macchinari e ai materiali impiegati che alla presenza di un limitato numero di acquirenti.
- Bassa produttività dei macchinari utilizzati. Comparando le stampanti 3D con le macchine CNC, è possibile affermare che quest'ultime, generalmente, rimuovono materiale con una velocità maggiore rispetto alla velocità con cui le prime aggiungono il medesimo volume di materiale. Se si ambisce a una produzione in massa dei componenti è necessario, almeno per il momento, utilizzare più stampanti 3D in parallelo.
- Anisotropia dei componenti realizzati e presenza di porosità residue interne. Ne consegue un peggioramento delle proprietà meccaniche del pezzo finito.
- Presenza di stress termici residui e deformazioni sul pezzo dovute ai gradienti termici che si hanno durante la stampa; queste potrebbero far sì che il pezzo non abbia le proprietà meccaniche desiderate e necessarie all'uso finale. Per ovviare a ciò, nella fase di realizzazione del pezzo, è possibile inserire delle strutture di supporto, in modo da dissipare in maniera ottimale il flusso di calore, oppure preriscaldare la piastra in cui viene progressivamente depositato il materiale.
- Maggiore rugosità superficiale dei componenti prodotti rispetto a quella usualmente ottenuta con le metodologie tradizionali. Poiché alcune applicazioni richiedono pezzi caratterizzati da un'elevata accuratezza su scala microscopica, spesso i prodotti realizzati mediante AM necessitano successivi trattamenti di finitura superficiale, capaci di migliorare la resistenza dell'oggetto alla corrosione e all'usura.
- Necessità di utilizzo di strutture di supporto nel processo di fabbricazione. L'uso di tali supporti deve essere minimizzato selezionando una direzione di costruzione ottimale, in quanto il materiale utilizzato per la realizzazione dei supporti non può essere riciclato ed inoltre, talvolta, essi hanno la potenzialità di influenzare negativamente le caratteristiche qualitative del pezzo finito [14].

2.4 Come la simulazione può ridurre tempi e costi

Come detto precedentemente, uno dei principali svantaggi derivanti dall'utilizzo dell'AM, risiede nel fatto che il prodotto ottenuto possiede caratteristiche meccaniche difficilmente prevedibili. Durante il processo di stampa, il componente in costruzione è, infatti, soggetto, sia durante la fase di riscaldamento che durante quella di raffreddamento, a gradienti termici non trascurabili [23]; quest'ultimi fanno sì che il pezzo realizzato sia caratterizzato da stress termici residui e deformazioni in grado di alterarne le proprietà meccaniche, nonché il grado di finitura.

Un metodo molto efficace per ridurre i tempi e i costi, conseguenti alla necessità di testare le proprietà meccaniche del prodotto finale mediante prove sperimentali e misurazioni in laboratorio, è la modellazione termo-meccanica di tale processo. Per mezzo di opportuni software, è possibile simulare il processo di stampaggio e quindi ottenere una previsione degli stress termici residui e delle deformazioni che caratterizzeranno il componente una volta terminata la stampa. Inoltre, procedendo in questa direzione, si ha la possibilità di stabilire utili relazioni tra le principali variabili di processo (es. potenza e diametro del laser, spessore degli strati) e i principali KPIs (microstruttura, rugosità superficiale, proprietà meccaniche, dimensione e costo del prodotto finito, produttività) [24] e, in ultima analisi, ottenere un'ottimizzazione di quest'ultimi, evitando inutili sprechi di tempo e denaro derivanti da un approccio puramente del tipo "sbaglia e prova".

A causa della complessità del fenomeno trattato spesso, per la sua simulazione, si adoperano modelli numerici agli Elementi Finiti (FEM). In generale, si parte dalla modellazione tridimensionale in CAD del pezzo, della piastra e di eventuali supporti e si procede con la creazione di una mesh adeguata allo scopo. Successivamente, è necessario scegliere il modello termico più adatto, fissare le condizioni al contorno e specificare potenziali vincoli e interazioni tra le parti. Terminata la simulazione, è possibile confrontare i risultati ottenuti con eventuali dati ricavati da test sperimentali a cui il pezzo reale viene sottoposto, con lo scopo di evidenziare le aree dell'oggetto maggiormente colpite da fenomeni di stress e deformazioni. Le informazioni ricavate possono, così, aiutare il progettista nell'implementare tutte le modifiche atte a migliorare la qualità del prodotto finito, quali cambiamenti nel design di quest'ultimo, variazioni dei parametri chiave del processo e introduzione di supporti [24].

3. Additive Manufacturing in ambito metallico - State of Art

Al fine di realizzare componenti metallici mediante un processo manifatturiero di tipo additivo, è possibile servirsi di diverse tecnologie di AM, le quali si differenziano tra loro in base alla natura delle materie prime, alla fonte energetica in uso e al meccanismo attraverso cui gli strati di materiale si uniscono fra di loro portando alla formazione di un unico pezzo (**Figura 3.1**).

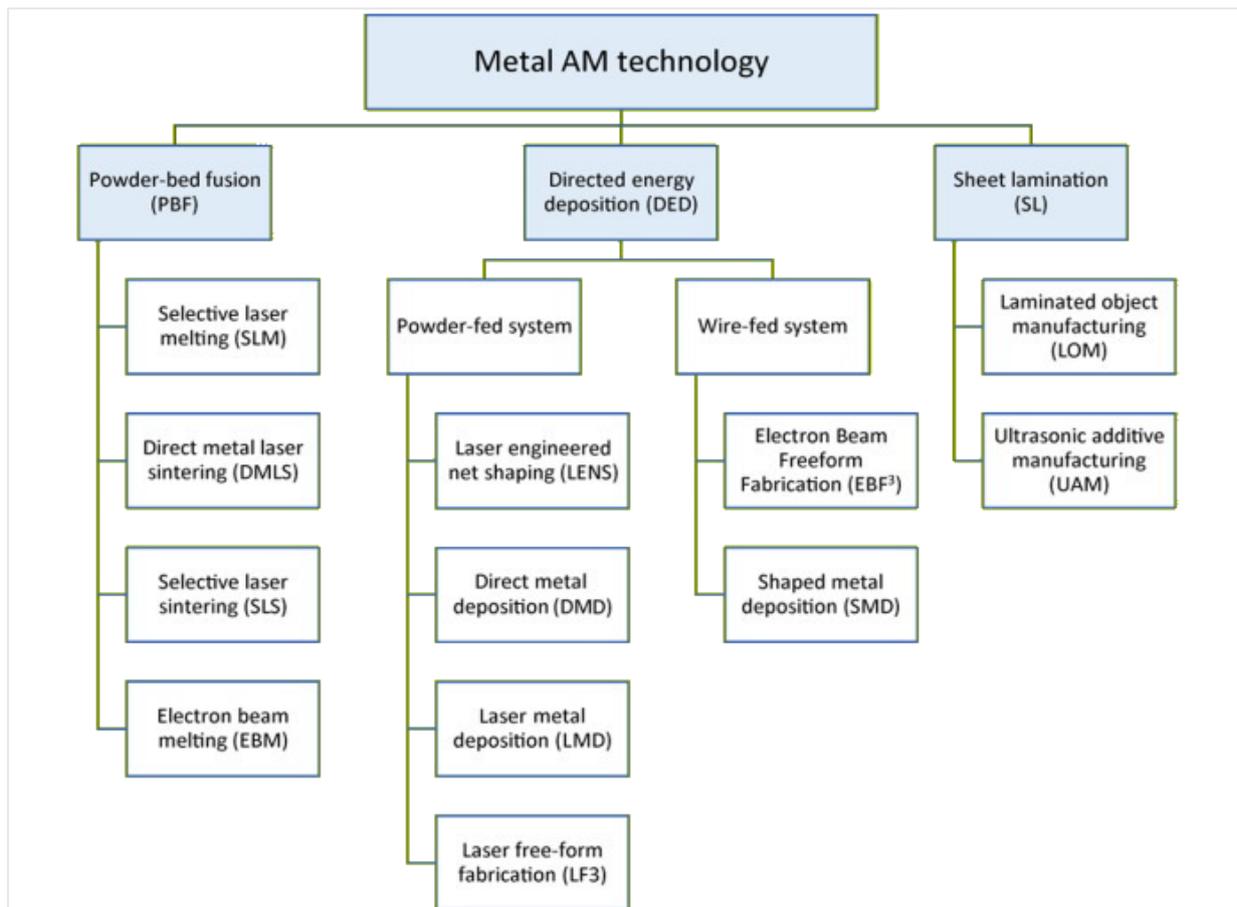


Figura 3.1: Classificazione delle tecniche di Additive Manufacturing utilizzate in ambito metallico. Figura tratta da [25] con modifiche.

Come si evince dalla **Figura 3.1**, il materiale metallico di partenza si può trovare sottoforma di lamina, filo o polvere. Poiché quest'ultimo è il caso più diffuso nelle applicazioni industriali, nel seguito, ci si concentrerà solo su di esso. Tale polvere viene, in generale, fusa attraverso l'utilizzo di un laser e di un fascio di elettroni, andando a costituire, strato dopo strato, un oggetto solido. Le due principali tecniche di AM usate in ambito metallico risultano, quindi, essere:

- *Directed Energy Deposition (DED)*.
- *Powder Bed Fusion (PBF)*, quest'ultima si suddivide a sua volta nelle due sottocategorie LPBF (Laser Powder Bed Fusion) e EBM (Electron Beam Melting) che, come precedentemente affermato, si distinguono tra loro per la sorgente energetica utilizzata.

Si precisa che tra esse verrà trattata in dettaglio solamente la seconda tecnologia, mentre della prima verranno descritte soltanto le principali caratteristiche.

3.1 Directed Energy Deposition

Facendo nuovamente riferimento alle definizioni suggerite dall'ASTM, con il termine Directed Energy Deposition (DED) si intende "il processo di manifattura additiva in cui dell'energia termica concentrata (sotto forma di laser, fascio elettronico o arco a plasma) viene adoperata per fondere i materiali, non appena questi ultimi vengono depositati" [1]. Esistono varie tipologie di DED ma, senza dubbio, la variante più comune è la tecnologia L-DED (Laser Directed Energy Deposition) in cui il calore fornito da un laser viene impiegato per la fusione di polvere metallica, introdotta nella camera mediante l'utilizzo di un ugello (**Figura 3.2**). I processi DED utilizzando fili metallici sono caratterizzati da una maggiore velocità di deposizione e da una maggiore capacità di produrre oggetti di grande dimensione rispetto alla tecnologia L-DED [26]. Tuttavia, i componenti prodotti con quest'ultima metodologia risultano, in generale, qualitativamente migliori e da ciò dipende la sua più ampia diffusione [27]. Sebbene nel seguito venga descritta solo tecnica, è comunque importante sottolineare che il principio di funzionamento delle ulteriori varianti è essenzialmente il medesimo.

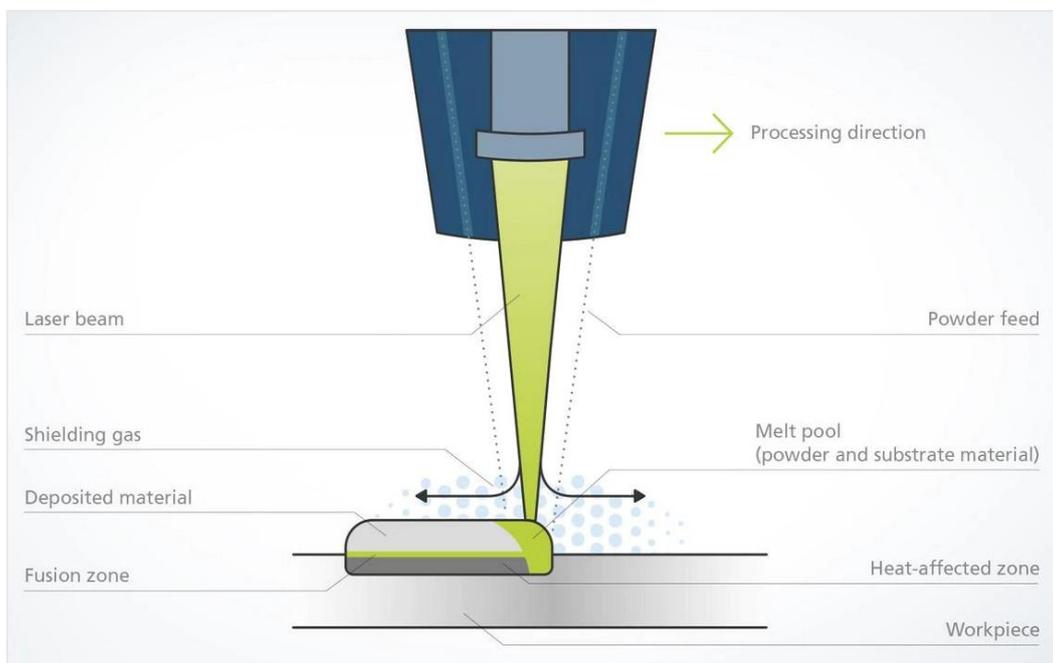


Figura 3.2: Schema di funzionamento della tecnologia L-DED. Figura tratta da https://www.trumpf.com/it_IT/applicazioni/additive-manufacturing/laser-metal-deposition-lmd/.

Come mostrato in **Figura 3.2**, ciascun macchinario basato sulla tecnica DED consta di una testa di deposizione comprendente usualmente una sorgente laser, uno o più ugelli montati su un braccio a più assi ed utilizzati per l'introduzione della polvere, un ugello per l'ingresso del gas di protezione e, talvolta, alcuni sensori.

In tale processo il fascio laser viene focalizzato su un'area ristretta, colpendo il substrato nella zona in cui la polvere viene depositata. In questo modo, viene generato su di esso un bagno di fusione, caratterizzato normalmente da un diametro di 0.25-1 mm e da una profondità compresa tra 0.1-0.5 mm. Il contatto con il fascio laser e con il bagno provoca la fusione della polvere che, in seguito all'allontanamento del laser e, quindi, al processo di raffreddamento, va a costituire una piccola zona rialzata di materiale solido (traccia). È importante sottolineare che, con il termine "substrato", si può intendere sia la piastra su cui deve essere realizzato un nuovo componente che un pezzo preesistente su cui devono essere depositati strati successivi di materiale. La sovrapposizione successiva di più tracce porta allo sviluppo di un unico strato, solitamente caratterizzato da uno spessore variabile tra 0.25 e 0.5 mm [28]. La polvere utilizzata viene depositata solo dove necessario, grazie al movimento relativo della

testa di deposizione e del substrato. Talvolta, vengono impiegati sistemi a quattro o a cinque assi, facenti uso di bracci robotici, al fine di rendere possibile il processo di deposizione da ogni direzione per la costruzione di pezzi particolarmente complessi. Bisogna, tuttavia, sottolineare che non tutta la polvere immessa è soggetta a fusione; per tale motivo è necessario prevedere dei meccanismi di recupero, sia per poterla riutilizzare in seguito che per evitare problematiche legate alla sicurezza.

Il processo appena descritto avviene in una camera chiusa in cui, in prossimità del punto in cui avviene la formazione del bagno, viene erogata in maniera continua una corrente di gas inerte (tipicamente Argon), con il duplice scopo di evitare fenomeni di ossidazione e veicolare la polvere verso lo spot del laser. I macchinari sono spesso dotati di sistemi di controllo in retroazione, aventi la funzione di monitorare ed eventualmente modificare i principali parametri di processo, quali portata di polvere, velocità di spostamento del laser, velocità di deposizione e potenza del laser, al fine di mantenere le condizioni di deposizione desiderate.

Mediante la tecnica DED è possibile realizzare componenti funzionali di elevata densità (prossima al 99.9%), composizione variabile lungo le tre direzioni e dalle caratteristiche microstrutturali altamente controllabili. Nel caso in cui siano presenti più ugelli per la distribuzione della polvere, è possibile introdurre all'interno della camera di lavoro diversi tipi di metallo e ciò consente la creazione diretta di leghe metalliche sulla parte in lavorazione. Inoltre, è possibile la manipolazione e la creazione di componenti più grandi, in quanto i macchinari DED presentano un volume interno (fino a 1 m³) maggiore rispetto ai dispositivi di stampa 3D basati su altre metodologie. Gli svantaggi provenienti dal suo utilizzo derivano dalla bassa risoluzione ottenibile (accuratezza inferiore a 0.25 mm), dall'elevata rugosità dei pezzi (maggiore di 25 µm) e dalla bassa velocità di deposizione (compresa tra 25-40 g/h) [28].

Infine, per quanto riguarda l'ambito di applicazione, la DED può essere efficacemente impiegata per la riparazione di componenti meccanici (es. pale delle turbine), per l'aggiunta di particolari ad oggetti preesistenti o per la deposizione di sottili strati di materiali densi e resistenti alla corrosione, con lo scopo di aumentare le performance e la durabilità di altri componenti (es. alberi di trasmissione o impianti biomedicali).

3.2 Powder Bed Fusion

Con il termine "Powder Bed Fusion" (PBF) ci si riferisce ad un insieme di tecnologie in ambito AM in cui una sorgente di energia viene utilizzata per fondere in maniera selettiva alcune aree di un letto di polvere [1] in modo da realizzare, strato dopo strato, il componente desiderato. Come si evince dalla **Figura 3.1**, essa comprende diverse varianti:

- Direct Metal Laser Sintering (DMLS), in cui l'energia termica fornita da uno o più laser viene adoperata per provocare la sinterizzazione, ovvero la fusione della sola parte periferica, delle particelle di polvere metallica costituenti il letto. In tal modo queste ultime si legano insieme, dando vita alla formazione dello strato desiderato.
- Selective Laser Melting (SLM), sviluppatasi dall'evoluzione della tecnica DMSL. Questa variante consiste nell'impiego di uno o più laser in grado di emettere un fascio ad alta densità energetica. La potenza di quest'ultimo è tale da provocare la completa fusione delle particelle metalliche distribuite sul substrato che, in questo modo, hanno la possibilità di legarsi tra loro minimizzando la presenza di porosità.
- Electron Beam Melting (EBM). Come precedentemente detto, tale tecnica è sostanzialmente simile alla SLM, ma si distingue da essa in quanto, come sorgente energetica, viene utilizzato un fascio di elettroni emessi da un filo di tungsteno riscaldato [2].

Tra le diverse tecniche di PBF, nel successivo paragrafo, l'attenzione verrà focalizzata sulla tecnologia SLM, di cui verranno descritte le principali caratteristiche e le maggiori problematiche associate.

3.3 Selective Laser Melting

La tecnologia SLM, oggetto dei successivi studi sperimentali, implica l'utilizzo di un macchinario comprendente generalmente un laser, un sistema di movimentazione e focalizzazione del fascio, una piastra di supporto e un sistema per lo stoccaggio e la distribuzione della polvere metallica (**Figura 3.3**).

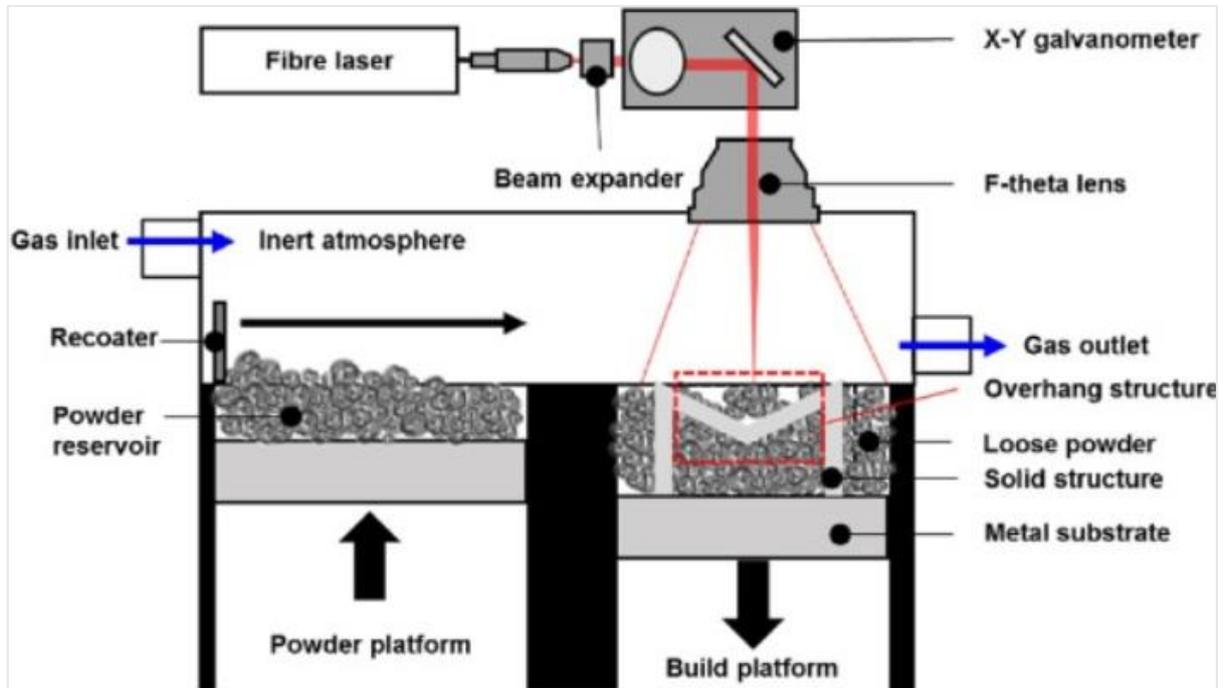


Figura 3.3: Schema di funzionamento della tecnologia SLM. Figura tratta da [29].

Come mostrato in **Figura 3.3**, il processo avviene in una camera chiusa nella quale la concentrazione di ossigeno viene costantemente monitorata, al fine di limitare i fenomeni ossidativi ai danni della polvere metallica e fornire una protezione al bagno di metallo fuso. Per tale motivo, a monte del processo di stampa, un gas inerte, tipicamente azoto o argon, viene insufflato al suo interno per ridurre il quantitativo di ossigeno al di sotto del valore desiderato (tipicamente 500 ppm). Tale camera è suddivisa in due zone: una “building chamber”, in cui avviene la costruzione del pezzo, e una “powder chamber” che, come suggerito dal nome, contiene la polvere metallica. Nella parte sottostante di ciascuna zona è presente un pistone che fa in modo che ciascuna di esse possa muoversi in direzione ascendente o discendente.

La tecnica SLM implica un processo ciclico in cui, ad ogni ciclo, è possibile distinguere due fasi [9]. Nella prima fase, parte della polvere contenuta nella “powder chamber” viene prelevata da un “recoater” che la distribuisce in maniera uniforme all’interno della “building chamber”. È importante dosare in maniera opportuna il quantitativo di polvere depositata, in quanto quest’ultima deve essere sufficiente per coprire in maniera completa il substrato ma, contemporaneamente, non essere eccessiva in modo da evitare inutili sprechi di materiale. Nella seconda fase, entra in gioco la sorgente di energia che, in base alle caratteristiche della sezione trasversale del pezzo in costruzione ricavate dal modello tridimensionale in CAD e alla particolare strategia di scanning, scansiona la superficie di polvere metallica attraverso un gioco di specchi. Quest’ultima viene, così, portata a fusione solamente in quelle aree che andranno a costituire il prodotto finito. Una volta terminata la costruzione dello strato bidimensionale, la “powder chamber” è soggetta a un movimento ascendente e la “building chamber” a un movimento discendente, il cui cammino corrisponde allo spessore dello strato desiderato (solitamente nel range 20-100 μm). A questo punto, sarà possibile ripetere il ciclo per la realizzazione di un nuovo strato, fino alla costruzione completa del pezzo.

In linea generale, le forze di taglio agenti sullo strato precedentemente realizzato e dovute all'azione del rullo mobile sono trascurabili, per cui non inducono un peggioramento qualitativo del pezzo. L'unico accorgimento che deve essere tenuto in considerazione è quello di evitare la presenza di superfici del componente perpendicolari alla direzione di movimentazione del recoater, al fine di evitare eventuali impatti che andrebbero a provocare un danneggiamento del pezzo.

È importante specificare che il laser utilizzato possiede una potenza tale da provocare la fusione completa di uno strato di materiale metallico avente spessore maggiore di quello dello strato di polvere metallica depositata sul substrato. Ciò significa che una porzione di substrato, precedentemente solidificata, viene rifulsa, permettendo l'aggregazione tra strati successivi e la realizzazione di pezzi caratterizzati da una densità prossima al 100% (**Figura 3.4**).

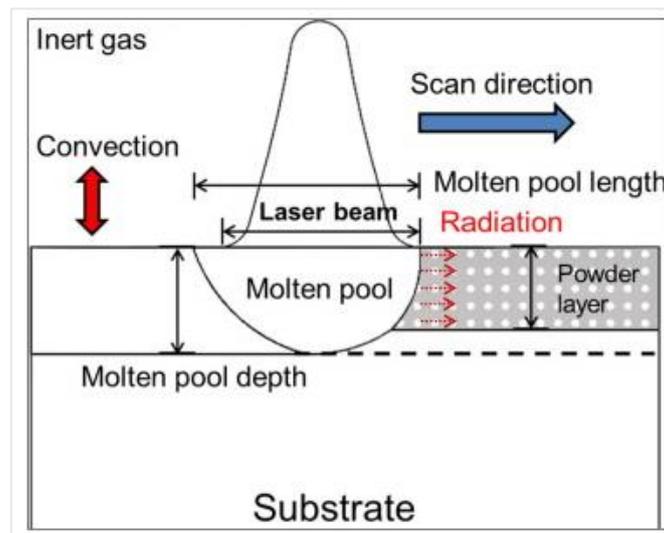


Figura 3.4: Rappresentazione schematica del bagno di fusione metallico nel processo SLM.
Figura tratta da [31] con modifiche.

Una volta terminata la stampa, il componente costruito deve essere separato sia dalle strutture di supporto utilizzate che dalla polvere non sottoposta a fusione e può essere soggetto ad eventuali post-trattamenti per ottenere un miglioramento delle proprietà meccaniche. Al fine di ottimizzare il costo legato ai materiali, è, infine, possibile filtrare la polvere in eccesso, in modo che essa possa successivamente essere riutilizzata per la fabbricazione di nuovi prodotti. Di frequente, prima di rimuovere il componente dalla macchina, è buona norma attendere un periodo di raffreddamento in quanto, se esso e la polvere circostanti ancora caldi fossero improvvisamente esposti all'atmosfera, potrebbero degradarsi a causa della presenza di ossigeno. In questo modo, il pezzo potrebbe deformarsi irreversibilmente e la polvere in eccesso potrebbe non essere più riutilizzabile.

Grazie al rapido sviluppo di tale tecnologia, oggi è possibile realizzare componenti usufruendo di una vasta gamma di materiali metallici quali leghe in alluminio, leghe in titanio, cobalto-cromo, Inconel e acciaio inossidabile [2].

3.3.1 Parametri di processo nella tecnologia SLM

Nell'ambito della SLM i principali parametri in grado di influenzare le proprietà del prodotto finito possono essere classificati in quattro principali categorie [28]:

- Parametri legati al laser: tipologia, potenza, diametro del fascio, durata e frequenza dell'impulso.
- Parametri legati al processo di scansione: velocità, distanza di hatch, strategia di scansione.

- Parametri legati alla polvere: dimensione, forma e distribuzione delle particelle, densità e spessore del letto, proprietà del materiale.
- Parametri legati alla camera di costruzione: temperatura di alimentazione della polvere, temperatura del letto, flusso del gas inerte.

È evidente come tali parametri siano strettamente connessi tra loro. Ad esempio, la potenza del laser necessaria all'ottenimento della completa fusione della polvere dipende dalla temperatura del letto, dalla temperatura di fusione della polvere metallica, dalle caratteristiche della polvere, dallo spessore dello strato, ma anche dalla velocità di scansione. Quest'ultimo, in particolare, è un parametro particolarmente critico: al fine di ottenere un incremento della produttività del processo manifatturiero, è evidentemente necessario aumentare la velocità di scansione. Tuttavia, se la velocità di scansione è eccessivamente elevata il quantitativo di energia trasferita dal laser alla polvere diviene insufficiente e ciò provoca la formazione di una maggiore porosità. D'altro canto, se la velocità di scansione è troppo bassa, il quantitativo di energia trasferita alla polvere aumenta e ciò potrebbe provocare l'evaporazione di parte della polvere e conseguente diminuzione della densità del pezzo.

Di norma è necessario, quindi, condurre numerose sperimentazioni per ottimizzare tali parametri, con lo scopo di produrre componenti dalle ottime proprietà meccaniche, con una buona accuratezza dimensionale e finitura superficiale, nel minor tempo possibile.

In **Tabella 3.1**, sono mostrati i valori tipicamente assunti dai principali parametri di processo nel caso della SLM. Come si evince da essa, il volume della camera a disposizione per la costruzione del pezzo è, in genere, limitato e ciò consente solamente la costruzione di componenti di piccole dimensioni. Inoltre, anche il tempo necessario alla costruzione del pezzo è piuttosto elevato. Bisogna, tuttavia, sottolineare che, mediante la tecnica SLM, è possibile realizzare oggetti contraddistinti da una elevata complessità e finitura superficiale caratteristica che provoca una riduzione dei costi legati ai post trattamenti a cui i prodotti devono essere sottoposti.

Tabella 3.1: Parametri caratteristici del processo di SLM. Tabella tratta da [2] con modifiche.

Sorgente termica	Laser con potenza da 200 a 1000 W
Gas di flussaggio	Argon o Azoto
Metodo per il preriscaldamento della polvere	Riscaldamento della piastra
Temperatura di preriscaldamento piastra [°C]	100 - 200
Massimo volume di costruzione [mm]	500 x 350 x 300
Massima velocità di costruzione [cm³/hr]	20 - 35
Spessore dello strato [µm]	20 - 100
Dimensione della pozza fusa [mm]	0.1 - 0.5
Finitura superficiale [Ra]	4 - 11
Tolleranza geometrica [mm]	±0.05 - 0.1
Accuratezza [µm]	40 - 200

Oltre ai fattori precedentemente citati, anche il posizionamento dell'oggetto metallico sulla piastra di supporto e il suo orientamento durante la fase di costruzione hanno una notevole influenza sulla buona riuscita del prodotto finale e sui costi associati [32]. A causa dell'anisotropia del pezzo realizzato, le proprietà meccaniche saranno diverse lungo gli assi x, y e z ed inoltre, tenendo in considerazione il fenomeno dello "stair-stepping" [28], a seconda dell'orientamento si otterrà una diversa finitura superficiale. Perfino il tempo di manifattura e il numero di strutture di supporto necessarie dipendono dall'orientamento di costruzione del componente. Ad esempio, è preferibile minimizzare la lunghezza

del componente lungo l'asse z, in modo da ridurre il numero di strati e quindi il tempo complessivo necessario per le operazioni di recoating.

3.3.2 Strutture di supporto nella tecnologia SLM

Uno dei punti critici legati alla tecnologia SLM è la necessità di utilizzare supporti realizzati con lo stesso materiale del pezzo desiderato, i quali devono essere separati da quest'ultimo, durante le fasi di post-processing (**Figura 3.5**). In generale, in fase di progettazione, i supporti necessari per la manifattura del pezzo vengono suggeriti dal software utilizzato; spetta poi al progettista implementare le modifiche necessarie all'ottimizzazione del processo di costruzione.

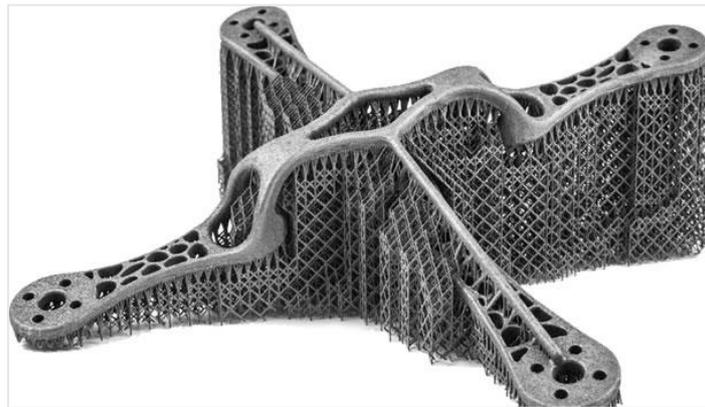


Figura 3.5: Particolare esempio in è cui necessario l'utilizzo di strutture di supporto. Figura tratta da <https://www.3dz.it/products/materialise-e-stage/> con modifiche.

I principali motivi per cui l'utilizzo di supporti in ambito SLM è indispensabile sono [33]:

- Evitare un'eccessiva movimentazione del pezzo all'interno del macchinario. In tal senso, è di fondamentale importanza ancorare rigidamente la parte inferiore del componente a una piastra di supporto posizionata alla base della building chamber; peraltro, ciò consente anche una più rapida estrazione del prodotto finito dall'interno della macchina.
- Prevenire eccessivi fenomeni deformativi conseguenti agli elevati gradienti termici a cui il componente metallico viene sottoposto in fase di costruzione [28]. Tale punto verrà discusso in maggiore dettaglio nel **Paragrafo 3.3.3**.
- Impedire il collasso del materiale fuso durante la fabbricazione di componenti dalla geometria particolare quali pezzi a sbalzo, ponti, pezzi caratterizzati da pareti particolarmente sottili, componenti con parti inclinate o con fori in direzione verticale (**Figura 3.6**).

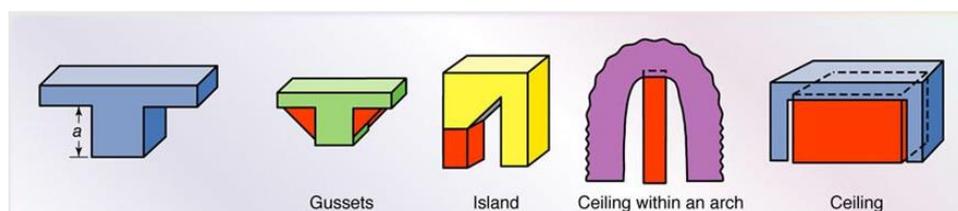


Figura 3.6: Esempi di componenti che necessitano di strutture di supporto. Figura tratta da [34] con modifiche.

Nonostante l'imprescindibilità del loro impiego, è sempre una buona idea cercare di minimizzare il numero di strutture di supporto impiegate, in quanto il loro uso comporta [33]:

- Maggior dispendio di materia prima e di energia necessarie per la stampa dei supporti. La polvere adoperata per la realizzazione dei supporti non è più riutilizzabile ed è destinata allo smaltimento.
- Maggior dispendio di tempo, necessario per la progettazione e la stampa delle strutture di supporto e per la rimozione delle stesse al termine del processo.
- Peggioramento della finitura superficiale nelle zone a contatto con i supporti, a seguito dell'operazione di rimozione. Per evitare ciò le aree di contatto tra il componente e la struttura di supporto devono essere quanto più piccole possibile.

3.3.3 Sviluppo di stress termici residui nella tecnologia SLM

Nonostante i recenti sviluppi, la tecnologia SLM presenta ancora una serie di aspetti critici la cui risoluzione è di fondamentale importanza per permetterne una più ampia diffusione. Come precedentemente accennato, una delle principali problematiche connesse ai processi di produzione additiva è la presenza di stress residui all'interno del prodotto finito. Gli stress residui rappresentano degli sforzi di trazione o compressione a risultante nulla, presenti all'interno di materiali a cui non risulta applicato alcun carico esterno (forza o gradiente termico) e che, quindi, si trovano in equilibrio con l'ambiente circostante. Tali sforzi si originano a seguito di una deformazione plastica non omogenea derivante dall'applicazione di un carico esterno, da un rapido processo di contrazione o dilatazione termica o da un cambiamento di fase durante il processo manifatturiero [35]. È importante cercare di minimizzare tali sollecitazioni in quanto esse tendono a ridurre le prestazioni meccaniche del materiale, favoriscono l'insorgenza di fratture fragili e fenomeni di usura e, in generale, compromettono la forma e l'accuratezza dimensionale del prodotto finito.

Durante il processo di SLM, il metallo utilizzato come materia prima è soggetto a un rapido ciclo di riscaldamento e raffreddamento e, di conseguenza, ad elevati gradienti termici. Dapprima, la polvere viene fusa dal raggio laser ad elevata energia, raggiungendo così una temperatura pari a circa due volte la temperatura di fusione del materiale, e successivamente, a seguito dell'allontanamento della fonte energetica, si raffredda velocemente ritornando allo stato solido; questo ciclo si ripete più volte portando all'insorgenza di stress residui in tutto il pezzo attraverso due distinti meccanismi [36]:

- “Temperature Gradient Mechanism”. Durante la fase di riscaldamento, lo strato irradiato dal laser tende ad espandersi a causa della temperatura elevata (**Figura 3.7**); quest'espansione viene però limitata dallo strato freddo sottostante appena solidificatosi e ciò si traduce in una condizione di deformazione/sforzo di compressione in corrispondenza della zona irradiata. Nel caso in cui lo sforzo di compressione superi il limite di snervamento del materiale, le conseguenti deformazioni saranno parzialmente elastiche e parzialmente plastiche.

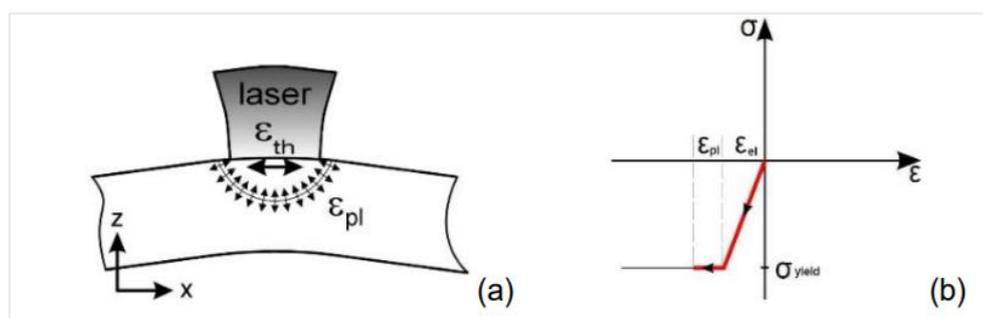


Figura 3.7: Stress e deformazioni indotti durante la fase di riscaldamento. Figura tratta da [36] con modifiche.

- “Cool-down phase model”. In seguito all’allontanamento del laser, lo strato superiore si raffredda e tende a contrarsi (**Figura 3.8**); il restringimento è però ostacolato dal campo di deformazione plastica stabilitosi in precedenza e ciò si traduce in uno stato di trazione residua nella regione irradiata e in uno stato di compressione residua nel materiale sottostante.

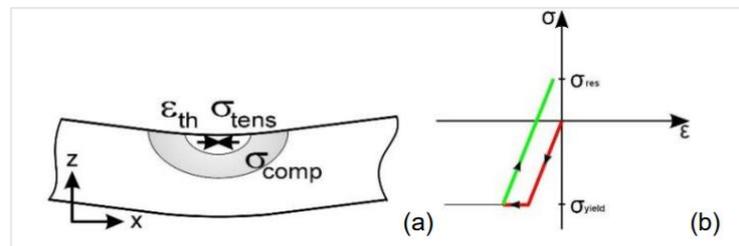


Figura 3.8: Stress e deformazioni indotti durante la fase di raffreddamento. Figura tratta da [36] con modifiche.

I principali fattori che influenzano l’insorgenza e l’entità degli stress residui sono [37]:

- Geometria del componente. Gli stress residui risultano strettamente correlati allo spessore del pezzo; in particolare, in presenza di particolari caratteristiche geometriche, quali smussi o angoli acuti, quest’ultimi tendono ad intensificarsi.
- Proprietà del materiale. Le caratteristiche termo-fisiche del materiale di base, quali dimensione della polvere, densità, conducibilità termica, diffusività e coefficiente di dilatazione termica influenzano notevolmente la formazione di sollecitazioni residue. Ad esempio, nei materiali caratterizzati da un’elevata conducibilità e diffusività termica il calore generato dal raggio laser viene trattenuto meno a lungo e ciò scoraggia lo sviluppo di stress residui.
- Geometria dei supporti. Per quanto riguarda la piastra, sono stati condotti diversi studi che hanno dimostrato come, sia lo spessore della piastra che il posizionamento del pezzo su di essa, comportano una variazione dell’intensità delle sollecitazioni residue. Inoltre, anche la presenza di eventuali supporti influisce sul trasferimento di calore attorno alla parte in costruzione e, di conseguenza, sull’insorgenza dei suddetti stress.
- Strategia di scansione. Con il termine “strategia di scansione” ci si riferisce sia al percorso seguito dal raggio laser, durante la scansione del letto di polvere, che al valore assunto da alcuni parametri critici quali potenza del laser, velocità di scansione, spessore dello strato, lunghezza di scansione e distanza di hatch. In generale, è possibile affermare che velocità di scansione e potenze del laser più elevate implicano maggiori gradienti termici e sollecitazioni residue. Per quanto riguarda il percorso del laser, è stato dimostrato come sia preferibile suddividere l’area di scansione in piccoli segmenti, poiché in questo modo il raggio laser esegue la scansione di linee successive in un intervallo di tempo molto breve, minimizzando i gradienti di temperatura tra linee di scansione adiacenti.
- Temperatura dell’ambiente di stampa. Le sollecitazioni residue sono proporzionali alla differenza tra la temperatura della pozza fusa e la temperatura ambiente [37]; una maggiore temperatura dell’ambiente di stampa implica una diminuzione dei gradienti termici e, di conseguenza, dei difetti relativi alle sollecitazioni residue.

D’altro canto, le maggiori conseguenze derivanti dalla presenza dei suddetti sforzi residui sono:

- Formazioni di cricche che traggono origine dalla scarsa finitura superficiale, ma che si propagano grazie alle sollecitazioni applicate e residue.
- Distorsioni geometriche. Una volta terminato il processo di stampa, i prodotti finiti vengono separati dalla piastra e dalle strutture di supporto; a seguito di ciò gli sforzi residui tendono a rilassarsi, provocando l’insorgenza di distorsioni macroscopiche.

- Peggioramento della resistenza a fatica del pezzo.
- Delaminazione del componente dalla piastra.

Da quanto appena esposto, è evidente l'importanza di implementare strategie efficaci, in grado di ridurre il più possibile la presenza di distorsioni e difetti in pezzi prodotti tramite SLM, sia durante che dopo il processo di stampa. Attualmente, i metodi più semplici e utilizzati per perseguire tale scopo sono:

- Preriscaldamento del letto di polvere, della camera di lavoro o della piastra. Ad esempio, è possibile porre dei riscaldatori ad infrarossi o delle resistenze attorno la piastra, al fine di mantenere la camera ad una data temperatura più elevata ma al di sotto della temperatura di fusione del materiale. Un'altra possibilità è quella di preriscaldare la polvere a monte della sua distribuzione sulla piastra. In **Figura 3.9** viene mostrato l'effetto del preriscaldamento della camera di lavoro sulle sollecitazioni residue longitudinali di un componente in Ti_6Al_4V .

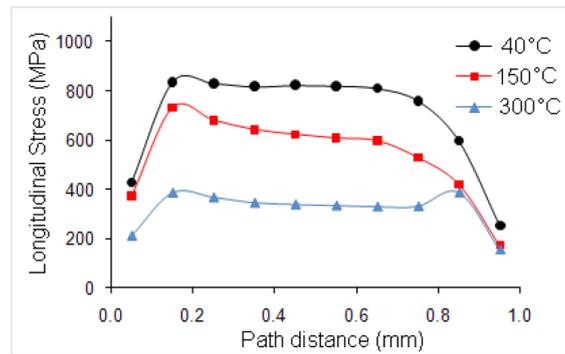


Figura 3.9: Grafico che mostra l'effetto del preriscaldamento della camera di lavoro sugli stress termici residui. Figura tratta da [37].

- Ottimizzazione della strategia di scansione. Per le ragioni esposte in precedenza, risulta di fondamentale importanza suddividere l'area di scansione in piccoli strisce o quadrati. Inoltre, una scansione random di questi quadrati (piuttosto che la scansione successiva di quadratini adiacenti) e il cambiamento della direzione di scansione da un quadratino all'altro permette di ridurre lo sviluppo di stress residui secondo una direzione preferenziale (**Figura 3.10**). Similmente, nel caso di scansione a strisce, il cambiamento dell'angolo di tali strisce tra uno strato e l'altro ha un effetto positivo.

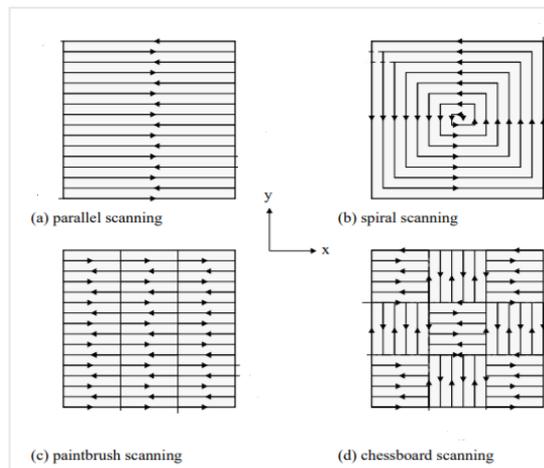


Figura 3.10: Diverse strategie di scansione: (a) Scansione parallela, (b) Scansione a spirale, (c) Scansione a pennello, (d) Scansione a scacchiera. Figura tratta da [38] con modifiche.

- Realizzazione di post-trattamenti termici. Tra i trattamenti maggiormente diffusi è possibile citare la ricottura e l'operazione di Laser Surface Remelting (LSR). Quest'ultima, sebbene abbia un effetto insignificante sulle sollecitazioni residue interne al pezzo, consente di migliorare in maniera significativa le caratteristiche superficiali di esso.

3.4 Materiali, polveri e metodi di produzione

Uno dei componenti fondamentali del processo di SLM è rappresentato dalla polvere metallica (Figura 3.11), utilizzata come materia prima.



Figura 3.11: Polvere metallica. Figura tratta da <https://www.epma.com/epma-free-publications/product/introduction-to-additive-manufacturing-brochure> con modifiche.

La scelta di quest'ultima raffigura uno step critico nel processo manifatturiero in quanto, secondo diversi studi [36, 37], essa ha una grande influenza sulla qualità del prodotto finito e sui costi associati (Figura 3.12).

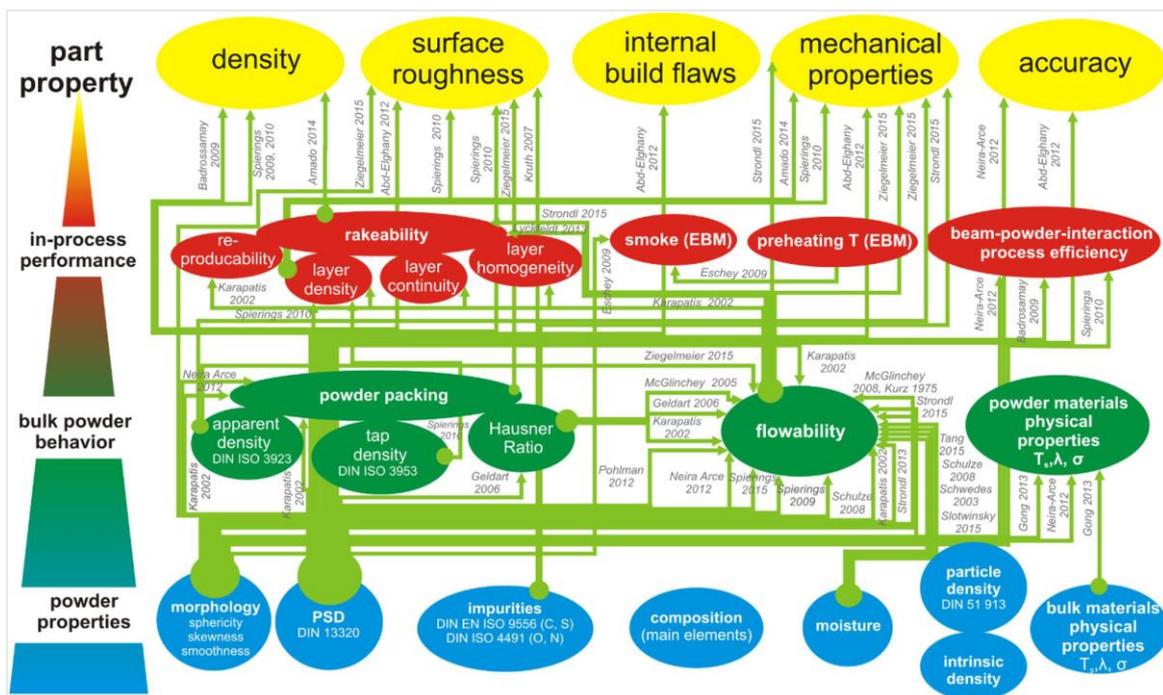


Figura 3.12: Relazione tra proprietà della polvere e caratteristiche del prodotto finito. Figura tratta da [41] con modifiche.

Come si evince dalla **Figura 3.12**, le proprietà del prodotto finito dipendono dal comportamento della polvere durante il processo di stampa, a sua volta influenzato dalle proprietà globali e dalle proprietà intrinseche della polvere (morfologia, distribuzione granulometrica, contenuto di umidità). Le interazioni tra tali parametri sono molto complesse e, anche in questo caso, è difficile trovare delle regole di validità generale. Ad esempio, l'utilizzo di particelle di dimensione maggiore migliora la "flowability" ovvero la facilità di scorrimento della polvere, proprietà estrinseca di fondamentale importanza durante la fase di distribuzione del letto di polvere sul substrato [42]. Allo stesso tempo, particelle più grandi aumentano la rugosità del componente finito e portano alla formazione di uno strato di polvere di minore densità; ciò riduce la quantità di energia che arriva agli strati sottostanti causando una fusione incompleta delle particelle e un peggioramento delle proprietà meccaniche lungo la direzione di crescita [41].

Le polveri metalliche vengono normalmente ottenute mediante un processo che prende il nome di "atomizzazione". In generale, per atomizzazione si intende il processo chimico-fisico mediante il quale del metallo fuso è suddiviso in piccole particelle da un fluido ad alta velocità (liquido o gassoso) o da un fluido dotato di forza centrifuga e, successivamente, solidificato in forma di polvere [43]. Ne esistono diverse varianti, le cui più importanti sono, di seguito, elencate.

3.4.1 Atomizzazione a gas

Una delle tecnologie maggiormente utilizzate per l'ottenimento di polveri metalliche è rappresentata dall'atomizzazione a gas, basata sull'interazione tra un metallo fuso e un gas atomizzante. Si tratta di una metodologia che può essere applicata per la produzione di una vasta gamma di polveri metalliche quali rame, ferro, alluminio, magnesio, cobalto, leghe di questi metalli, acciaio, leghe a base di nichel e titanio e superleghe. D'altro canto, come gas atomizzante è possibile utilizzare aria, azoto, argon o elio. Solitamente gli ultimi due vengono impiegati per l'atomizzazione di metalli particolarmente reattivi, quali leghe a base di titanio e superleghe, che impongono la presenza di una bassa concentrazione di ossigeno [44].

La configurazione tipica di un atomizzatore a gas è mostrata in **Figura 3.13**. Una corrente di metallo, precedentemente fuso in una fornace, viene fatta colare attraverso un ugello all'interno della camera di atomizzazione. In corrispondenza dell'ugello, il metallo entra in contatto con il gas ad alta pressione, la cui energia cinetica è funzionale a nebulizzare il metallo in minute goccioline. Durante la loro caduta lungo la camera di atomizzazione, queste ultime sono soggette a un rapido processo di raffreddamento che ne induce la solidificazione. La polvere metallica viene, infine, raccolta in un contenitore posto sul fondo mentre il gas, separato dalla polvere mediante un ciclone, può essere ricircolato all'interno della camera o immesso in atmosfera.

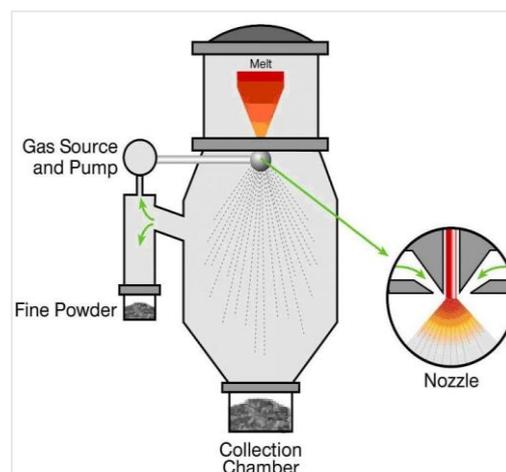


Figura 3.13: Rappresentazione illustrativa di un atomizzatore a gas. Figura tratta da <https://www.carpenteradditive.com/technical-library/> con modifiche.

Questa metodologia, peraltro impiegata per la produzione della polvere utilizzata nel presente lavoro di tesi, permette l'ottenimento di particelle metalliche con dimensione normalmente compresa tra 50 e 300 μm , lisce e dalla forma sferoidale; queste ultime garantiscono una buona flowability e una densità del letto di polvere ottimale. Talvolta, però, a causa delle collisioni tra le gocce di metallo nebulizzato, si può avere la formazione di "satelliti", ovvero particelle più piccole incorporate in prossimità della superficie esterna delle particelle più grandi (**Figura 3.14**); queste determinano una deviazione dalla configurazione sferoidale e, di conseguenza, un peggioramento delle caratteristiche microstrutturali del prodotto finito. Inoltre, talvolta può accadere che tracce del gas atomizzante vengano inglobate all'interno delle gocce metalliche, originando la comparsa di microporosità.

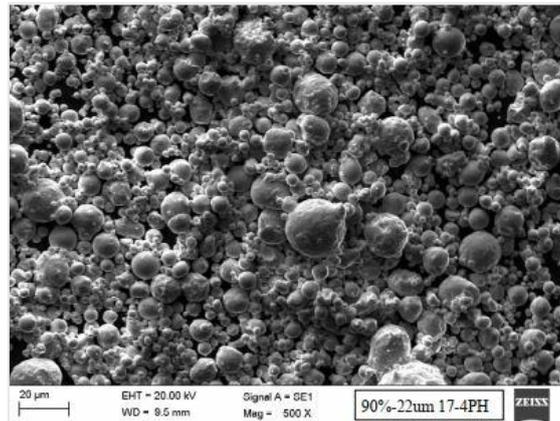


Figura 3.14: Polvere metallica ottenuta tramite il metodo di atomizzazione in gas vista al SEM. Figura tratta da <https://additivemanufacturingindia.blogspot.com/2018/>.

3.4.2 Atomizzazione ad acqua

Un'alternativa alla tecnologia precedentemente descritta è rappresentata dall'atomizzazione ad acqua, utilizzata soprattutto per la produzione di polveri a base di ferro, rame, leghe di rame e acciaio inossidabile (**Figura 3.15**).

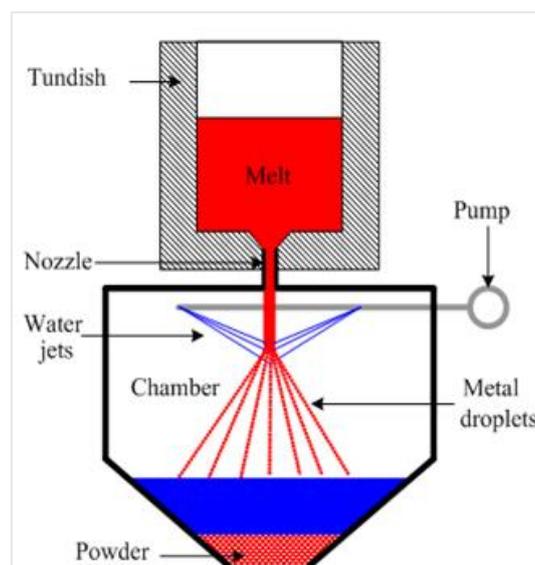


Figura 3.15: Rappresentazione illustrativa di un atomizzatore ad acqua. Figura tratta da https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=powder_preparation con modifiche.

Il suo principio di funzionamento, sostanzialmente simile a quello dell'atomizzazione a gas, è basato sull'interazione tra il metallo fuso e acqua ad elevata pressione (5.5 - 21 MPa) [44]. Anche in questo caso, del metallo fuso fluisce da un ugello e, in prossimità di esso, impatta con un getto di acqua in pressione che ne provoca la nebulizzazione. Le gocce di metallo fuso, durante il loro moto discendente, sono soggette a un rapido raffreddamento grazie anche all'interazione con l'acqua che, rispetto al gas, è caratterizzata da una conducibilità termica superiore. La polvere ottenuta viene successivamente inviata ad un sistema di decantazione ed essiccazione, funzionale alla separazione tra la polvere e l'acqua nebulizzante. In generale, tale metodologia consente di ottenere una polvere dall'ampia distribuzione dimensionale (10 - 1000 μm) e caratterizzata da una forma irregolare, per via del celere raffreddamento e della presenza di ossidi (**Figura 3.16**). Tuttavia, rispetto all'atomizzazione a gas (ad eccezione di quella condotta con aria) comporta un impatto economico inferiore a causa dell'utilizzo dell'acqua e alla relativamente bassa energia necessaria per metterla in pressione.

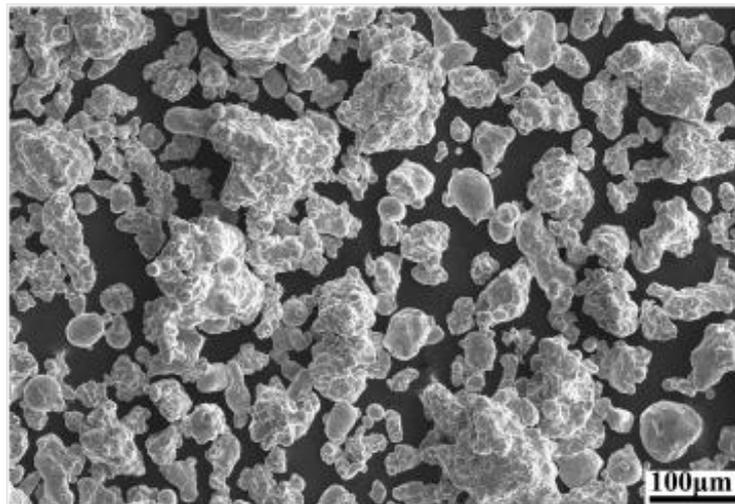


Figura 3.16: Polvere metallica ottenuta tramite il metodo di atomizzazione ad acqua vista al SEM.

Figura tratta da <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.biblio.polito.it/science/article/pii/S0032591015301285?via%3Dihub>.

3.4.3 Atomizzazione centrifuga

Nel caso dell'atomizzazione centrifuga, si fa per l'appunto uso della forza centrifuga per formare le gocce di metallo fuso, con conseguente diminuzione del fabbisogno energetico e l'ottenimento di una distribuzione dimensionale molto più ristretta rispetto al caso precedente.

Ne esistono diverse varianti, tra cui:

- *Rotating Disk Atomization*. In questo caso, del metallo fuso viene versato al centro di un disco rotante ad elevata velocità (2500 rad/s) e contenuto all'interno di una camera in cui viene fatto fluire dell'elio (**Figura 3.17**). Non appena avviene l'impatto tra il disco rotante e il metallo fuso, quest'ultimo viene proiettato esternamente sotto forma di minute goccioline, che solidificano rapidamente grazie al flusso del gas inerte [44]. Si tratta di una tecnica applicata per la produzione di polvere di superleghe di nichel, leghe di alluminio, rame, berillio, molibdeno, titanio e acciaio. Solitamente, le polveri ottenute sono lisce e sferiche e non si ha presenza di satelliti.

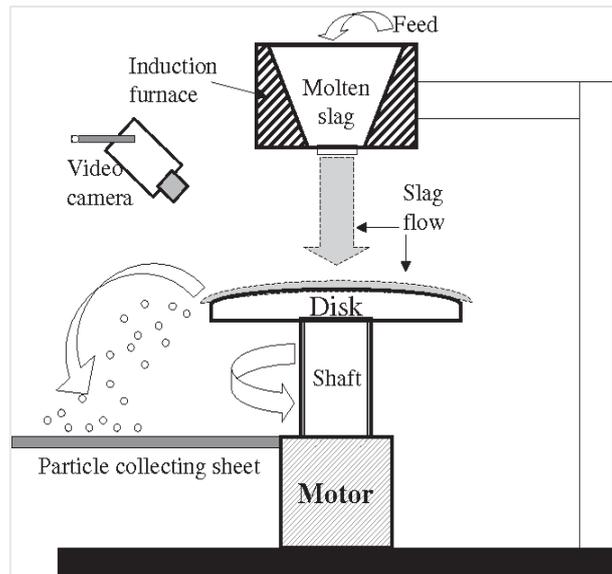


Figura 3.17: Rappresentazione illustrativa di un atomizzatore centrifugo. Figura tratta da [45].

- Plasma Rotating Electrode Process.* Nel caso in cui siano necessarie un'elevata purezza e una perfetta forma sferica delle polveri, il metodo più adatto è l'atomizzazione al plasma o PREP (Plasma Rotating Electrode Process), usata per la produzione di polveri di acciaio al carbonio, cobalto-cromo e leghe al titanio e, in generale, di metalli altofondenti. Come si evince dalla **Figura 3.18**, l'apparato è costituito da una barra di metallo o lega che ruota ad alta velocità (circa 1570 rad/s) attorno al proprio asse [44]. Simultaneamente, una sorgente energetica (arco, torcia al plasma o fascio elettronico) sottopone a fusione una delle estremità e, grazie al movimento centrifugo, si ottiene la formazione di gocce di metallo fuso proiettate verso l'esterno.

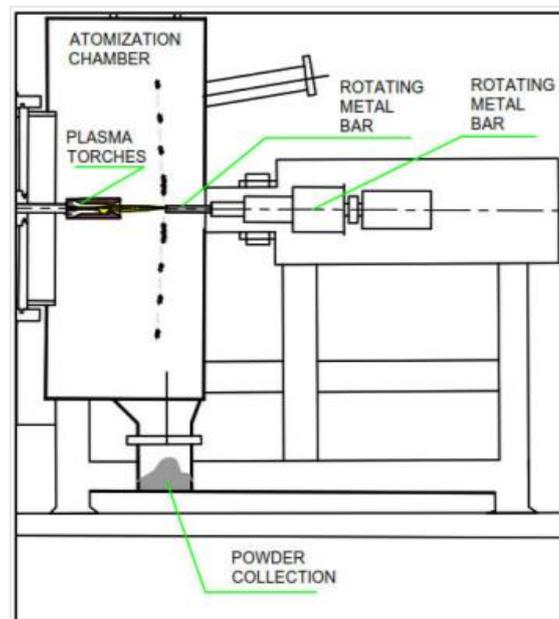


Figura 3.18: Rappresentazione illustrativa di un atomizzatore centrifugo al plasma o PREP. Figura tratta da [46].

L'atomizzazione viene normalmente condotta in atmosfera inerte mediante l'uso di elio o argon. Tale tecnica permette di ottenere polveri lisce con dimensioni inferiori a 100 μm (**Figura 3.19**) e non necessita di strutture di contenimento di metallo fuso in ingresso (fattore che limita i fenomeni di contaminazione). Tuttavia, in questo caso, la produttività è limitata ed inoltre la produzione dell'elettrodo comporta costi elevati.

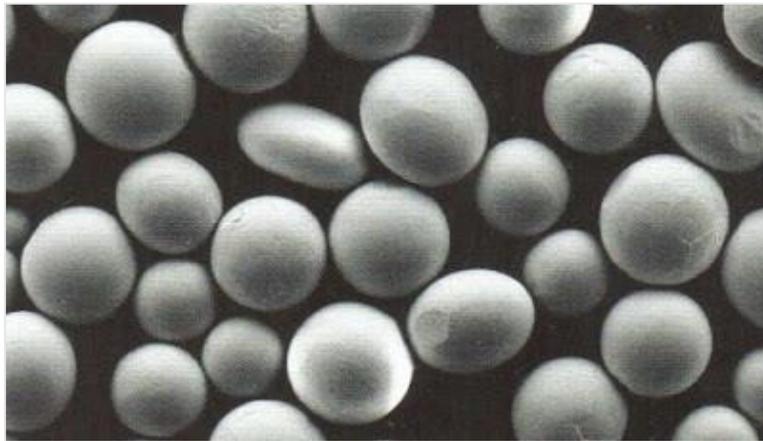


Figura 3.19: Polvere metallica ottenuta tramite il metodo di atomizzazione centrifuga vista al SEM.
Figura tratta da <https://additivemanufacturingindia.blogspot.com/2018/>.

3.4.4 Atomizzazione al plasma

L'atomizzazione al plasma è una tecnologia recente, indicata per il trattamento di metalli particolarmente reattivi e leghe caratterizzate da un'elevata temperatura di fusione, tra i quali tungsteno, molibdeno, zirconio, tantalio, superleghe di nichel e leghe di titanio [46]. In questo caso, le materie prime vengono introdotte all'interno della camera di atomizzazione sotto forma di un filo (**Figura 3.20**); quest'ultimo, esposto alla torcia a plasma (la cui temperatura può raggiungere i 10000 $^{\circ}\text{C}$), è soggetto a un rapido processo di fusione e, contemporaneamente, viene atomizzato mediante i gas caldi del plasma.

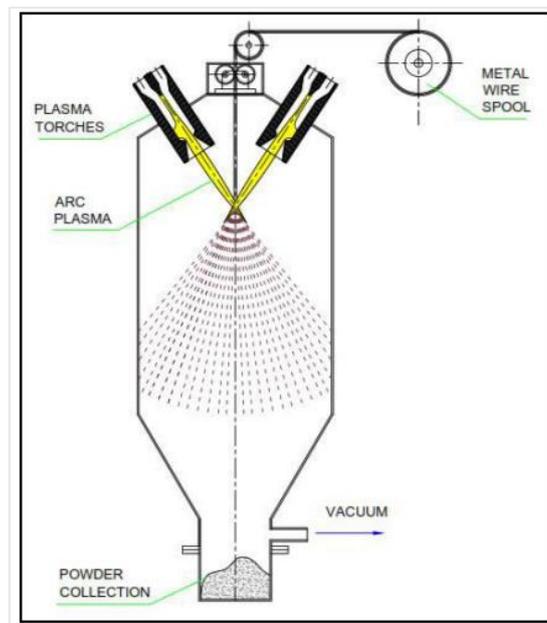


Figura 3.20: Rappresentazione illustrativa di un atomizzatore al plasma. Figura tratta da [46].

Mediante tale metodologia è possibile la produzione di polveri aventi diametri inferiori ai 200 μm e caratterizzate da una ristretta distribuzione dimensionale. Osservando la **Figura 3.21** si può notare come le particelle metalliche ottenute siano perfettamente sferiche, di dimensione uniforme, prive di impurezze e dalla superficie liscia.

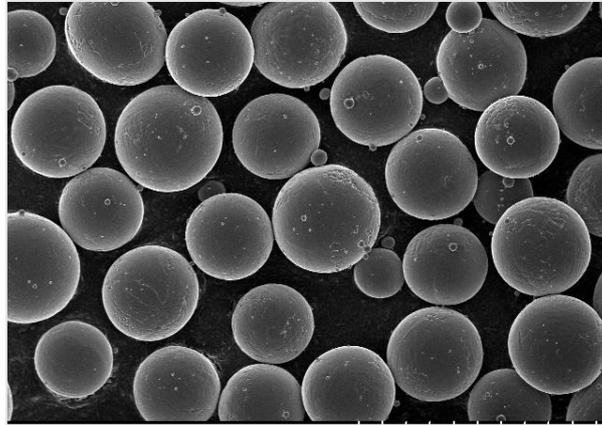


Figura 3.21: Polvere metallica ottenuta tramite il metodo di atomizzazione al plasma vista al SEM. Figura tratta da <https://www.3dprintingmedia.network/new-apc-metal-powder-atomization-plant-progressing-plan/>.

3.4.5 Inconel 718: caratteristiche chimico-fisiche e campi di applicazione

Le stampanti 3D ideate e fabbricate dalla società Prima Industrie S.p.A. permettono di lavorare con svariati tipi di leghe metalliche, come quelle in alluminio, in titanio e in nichel. In particolare, il materiale impiegato per lo svolgimento del presente lavoro di tesi è rappresentato dalla superlega Inconel 718 prodotta attraverso il processo di atomizzazione a gas (**Figura 3.22**).



Figura 3.22: Foto della superlega Inconel 718 sottoforma di polvere. Figura tratta da <https://www.directindustry.it/prod/auroralabs/product-197072-1961462.html>.

Si tratta di una lega a struttura austenitica a base di nichel e cromo caratterizzata da un'ottima resistenza alla trazione, alla fatica, all'usura e alla rottura, da un'elevata robustezza e da una buona resistenza alla corrosione, grazie alla formazione di uno strato di ossido passivante che svolge una funzione protettiva. Essa, inoltre, può essere utilizzata a temperature comprese tra $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, in quanto la sua temperatura di fusione è pari a $1336\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La sua composizione tipica è particolarmente complessa e viene, qui di seguito, riportata (**Tabella 3.2**). Dal punto di vista microstrutturale, l’Inconel 718 consiste principalmente in una matrice γ contenente precipitati del tipo γ' , γ'' , δ e, in aggiunta, alcuni carburi [48]. È proprio la presenza di questi precipitati, in particolare quelli del tipo γ'' , che ne determinano le ottime proprietà meccaniche.

Tabella 3.2: Composizione chimica della lega Inconel 718. Tabella tratta da [47].

Elemento	% minima (w/w)	% massima (w/w)	Elemento	% minima (w/w)	% massima (w/w)
Nichel	50	55	Carbonio	-	0.08
Cromo	17	21	Manganese	-	0.35
Ferro	-	17	Silicio	-	0.35
Niobio	4.75	5,5	Fosforo	-	0.015
Molibdeno	2.8	3.3	Zolfo	-	0.015
Titanio	0.65	1.15	Boro	-	0.006
Alluminio	0.2	0.8	Rame	-	0.3
Cobalto	-	1			

Grazie alle suddette proprietà, l’Inconel 718 si presta ad un’ampia gamma di applicazioni sia ad alta che a bassa temperatura. In particolare, viene ampiamente impiegato nei settori aerospaziale e petrolchimico e nell’industria nucleare, chimica ed energetica per la produzione di parti di motore, turbine a gas, serbatoi criogenici, pompe, valvole e scambiatori di calore.

La realizzazione di componenti in Inconel 718 mediante le metodologie tradizionali non è di facile attuazione, a causa sia dell’alta resistenza al taglio e alla bassa duttilità di questo materiale che alla complessità geometrica degli oggetti desiderati. Per tale motivo, è preferibile utilizzare le tecnologie di AM per la manifattura di questa tipologia di prodotti [47]; in particolare, i componenti in Inconel 718 prodotti mediante tecnologia SLM sono caratterizzati da un’elevata densità ma, solitamente, devono essere sottoposti ad ulteriori trattamenti termici per ottenere un miglioramento delle proprietà meccaniche.

Le caratteristiche e le proprietà meccaniche tipiche dei componenti in Inconel 718 realizzati dalla società Prime Industrie S.p.A. tramite SLM sono mostrate in **Tabella 3.3**. Bisogna sottolineare che i valori si riferiscono a componenti as-build, ovvero non ancora sottoposti a processi di post-trattamento.

Tabella 3.3: Proprietà meccaniche tipiche di componenti in Inconel 718.

Accuratezza	Componente piccolo	$\pm 40-60 \mu\text{m}$	Resistenza alla trazione	$1060 \pm 50 \text{ MPa}$, (X-Y)
	Componente grande	$\pm 0,2 \%$		$980 \pm 50 \text{ MPa}$, (Z)
Spessore pareti		min. 0.3-0.4 mm	Resistenza allo snervamento	$780 \pm 50 \text{ MPa}$, (X-Y)
Rugosità	Originale	Ra $17 \mu\text{m}$, Rz $32 \mu\text{m}$		$634 \pm 50 \text{ MPa}$, (Z)
	Dopo la sabbiatura	Ra $4-6.5 \mu\text{m}$, Rz $20-50 \mu\text{m}$	Allungamento	$27 \pm 5\%$ (X-Y)
	Dopo la lucidatura	Rz $< 0.5 \mu\text{m}$		$31 \pm 5\%$ (Z)
Densità		8.1 g/cm^3	Modulo di Young	$160 \pm 20 \text{ GPa}$, (X-Y)
Durezza		30 HRC		$130 \pm 20 \text{ GPa}$, (Z)

3.5 Stato dell'arte sulla modellazione termo-meccanica del processo SLM

Sebbene l'uso della tecnologia SLM per la produzione di oggetti in Inconel 718 consenta di superare i limiti correlati alla progettazione e alla realizzazione di componenti caratterizzati da geometrie complesse e da proprietà meccaniche ottimali, ad oggi non sono presenti molti studi che si focalizzano sulla simulazione assistita al PC per la previsione degli stress termici e delle deformazioni originatisi in questo tipo di componenti e sulla convalida sperimentale dei risultati ottenuti. Negli ultimi anni sono stati sviluppati diversi metodi numerici agli elementi finiti (FEM), ognuno dei quali basato su diverse ipotesi semplificative, in grado di modellare il comportamento termomeccanico delle parti prodotte mediante AM. In generale, la modellazione del processo manifatturiero mediante FEM si divide in due step [49]:

- Analisi termica, che permette di ottenere la temperatura nodale e l'evoluzione termica del componente.
- Analisi strutturale, che permette di valutare il comportamento meccanico del componente tenendo conto dell'evoluzione termica modellata in precedenza e, infine, ottenere gli stress e le deformazioni residue gravanti su esso.

Nel caso in cui l'analisi strutturale venga eseguita in successione all'analisi termica, per ciascuno step temporale si parla di "analisi termo-meccanica accoppiata" (coupled thermomechanical analysis). Se, invece, l'analisi strutturale viene condotta al termine dell'analisi termica di tutto il processo allora si parla di "analisi termo-meccanica disaccoppiata" (decoupled thermomechanical analysis). In generale, il secondo approccio è quello più diffuso, in quanto implica un costo computazionale molto inferiore e, allo stesso tempo, non comporta un'eccessiva variazione dei risultati ottenuti. Qui di seguito, vengono presentati alcuni studi svolti in quest'ambito, accomunati dal tipo di tecnologia utilizzata (SLM) e dallo scopo (predizione di deformazioni e stress termici residui).

Una prima ricerca, avente come argomento primario la valutazione degli stress residui, è quella realizzata da Ahmed et al. nel 2018 [50]. Nello studio da essi condotto, è stato fatto uso di due provini realizzati mediante tecnica SLM, di cui uno in lega di titanio (Ti_6Al_4V) e uno in Inconel 718 (**Figura 3.23**).

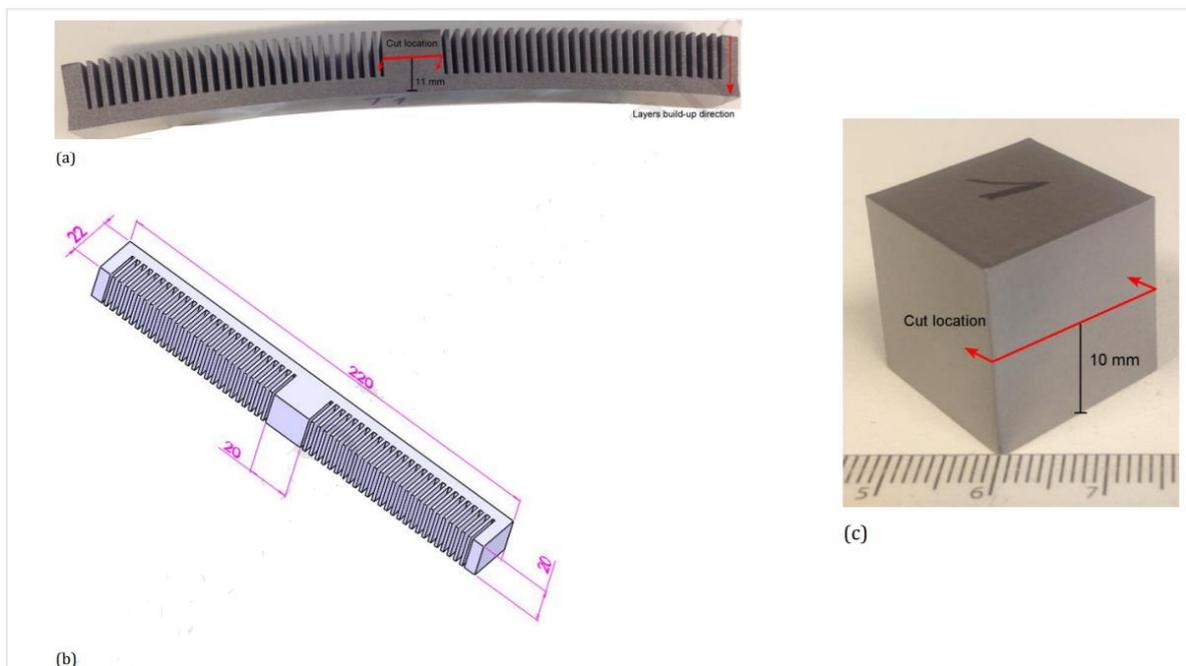


Figura 3.23: Caratteristiche geometriche dei provini analizzati. (a) Campione in Ti_6Al_4V , (b) dimensioni in mm del campione in Ti_6Al_4V , (c) campione in Inconel 718. Figura tratta da [50] con modifiche.

Una volta stabiliti i parametri di processo ottimali, essi non sono mai stati più variati e l'analisi è stata orientata verso la ricerca di un metodo in grado di predire con buona approssimazione gli stress residui gravanti sui diversi campioni. Per la simulazione del processo di stampa, è stato utilizzato un modello termomeccanico agli elementi finiti semplificato e implementato mediante il software commerciale Abaqus. Successivamente, al fine di ottenere una convalida del precedente modello, la componente degli stress residui lungo la direzione di costruzione dei diversi provini è stata valutata sperimentalmente attraverso il cosiddetto "contour method", in corrispondenza della sola superficie situata a metà altezza di ciascun campione.

In **Figura 3.24** viene effettuata la comparazione tra i risultati della simulazione e i dati ottenuti sperimentalmente. Dalla visualizzazione delle immagini è possibile pervenire alle seguenti conclusioni:

- A metà altezza dei provini, in seguito al processo di SLM e indipendentemente dal materiale utilizzato, si ha lo sviluppo di elevate tensioni residue verticali di trazione in corrispondenza dei bordi e di compressione nella parte interna.
- Esiste una buona convergenza tra i risultati sperimentali e quelli ottenuti dalla simulazione soprattutto nelle zone interne della superficie analizzata. In prossimità dei bordi, i due metodi danno risultati leggermente differenti in quanto la simulazione numerica mostra il valore più elevato delle tensioni di trazione al centro dei bordi, mentre secondo i risultati sperimentali tali tensioni assumono valore massimo in corrispondenza degli spigoli.

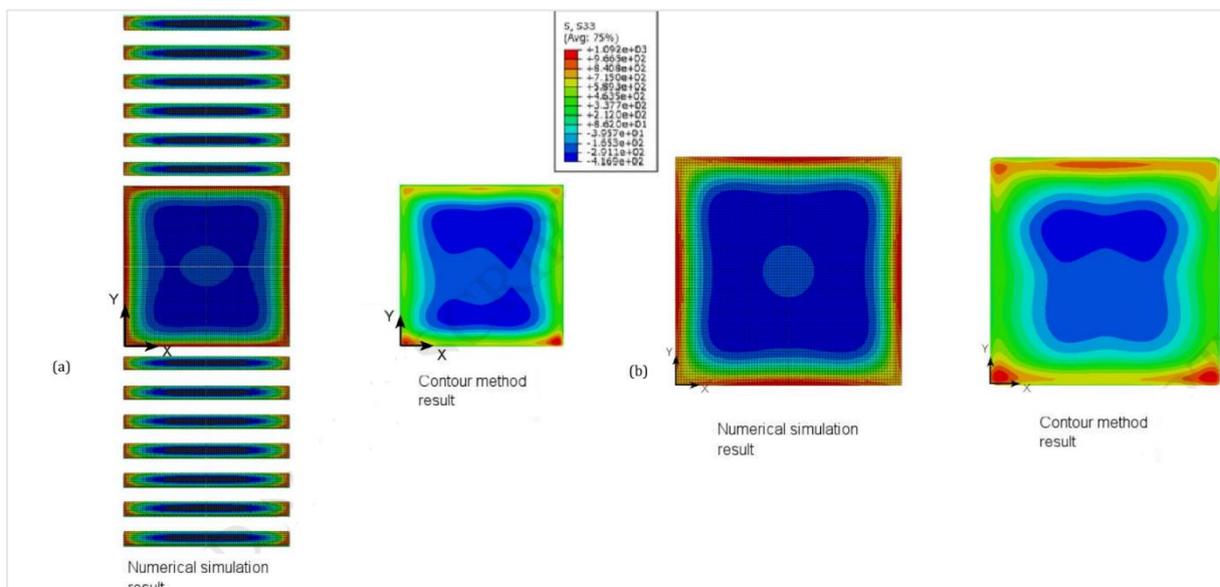


Figura 3.24: Comparazione tra i risultati numerici e i risultati sperimentali per il campione in Ti_6Al_4V (a) e per il campione in Inconel 718 (b). Figura tratta da [50] con modifiche.

I ricercatori Li et al. hanno condotto un ulteriore studio [51] avente come obiettivo lo sviluppo di un modello in grado di predire gli stress residui e le deformazioni di oggetti realizzati mediante tecnologia SLM, minimizzando altresì il costo computazionale. Per fare ciò, essi si sono serviti di un approccio multiscale. Dapprima, hanno simulato a livello microscopico il processo di fusione della polvere e della conseguente solidificazione attraverso l'utilizzo del software ABAQUS, fissando i principali parametri di processo. Da questa modellazione sono stati ricavati i carichi termici a cui il pezzo è sottoposto durante il processo manifatturiero, carichi responsabili degli stress residui e dei fenomeni di distorsione del componente. Si tratta, quindi, ancora una volta di un modello termo-meccanico disaccoppiato.

Quest'ultimo è stato applicato alla trave a sbalzo in $AlSi_{10}Mg$, mostrata in **Figura 3.25**.

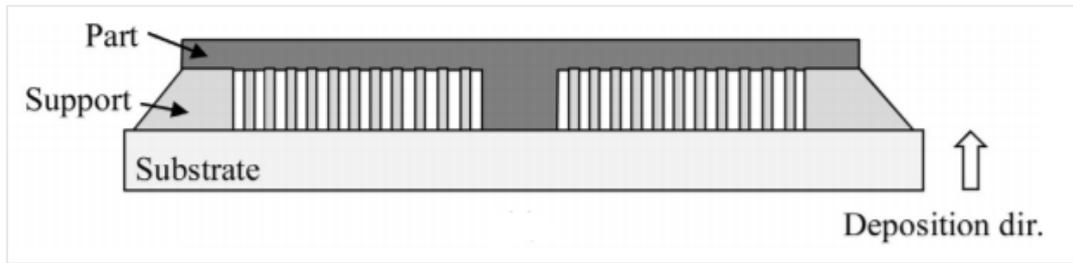


Figura 3.25: Caratteristiche geometriche del campione analizzato. Figura tratta da [51] con modifiche.

I risultati della simulazione, prima e dopo la rimozione del supporto dalla piastra, sono mostrati in **Figura 3.26**. Dall'osservazione di quest'ultima è possibile ricavare le seguenti conclusioni:

- Gli stress di von Mises, a monte dell'operazione di rimozione, assumono valore massimo in corrispondenza della superficie superiore del campione e dell'interfaccia tra quest'ultima e la piastra. In seguito al taglio, si ha una diminuzione di tali sforzi che si concentrano soprattutto in corrispondenza dell'angolo di contatto tra la trave e la piastra.
- È evidente la presenza di elevati stress residui di trazione lungo la direzione x nella parte superiore della trave. In seguito al taglio, tuttavia, a causa di fenomeni di deformazione plastica, tali stress diventano di compressione.
- Il gradiente degli sforzi assume valore massimo lungo l'asse verticale (asse y) poiché è proprio lungo tale asse che, in fase di costruzione, si hanno i più elevati gradienti di temperatura.

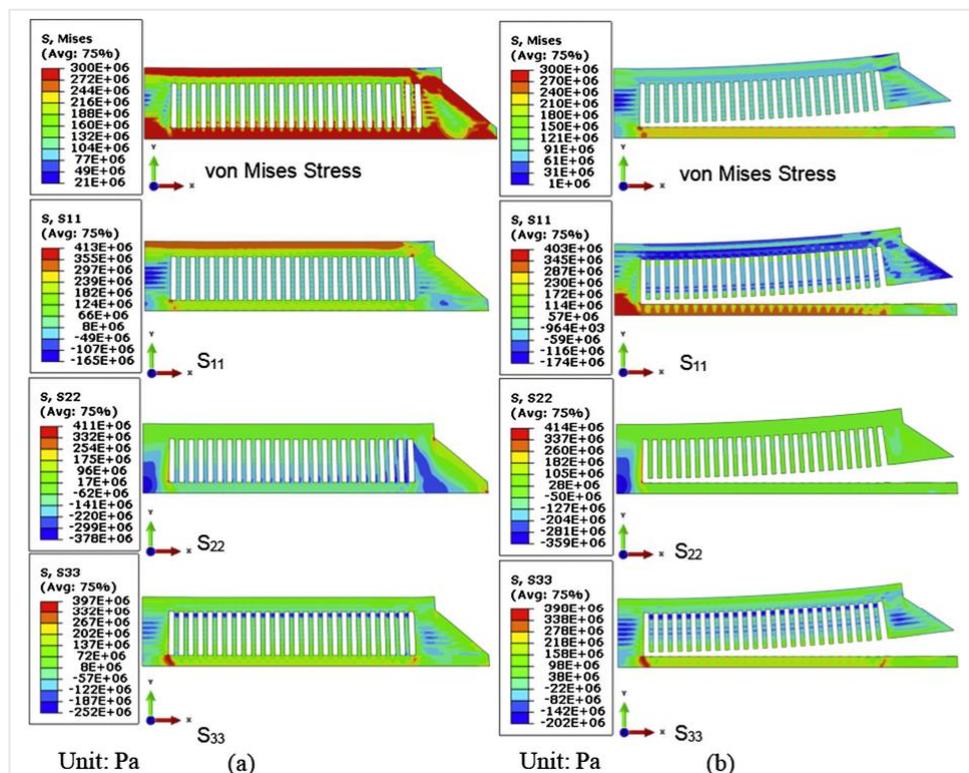


Figura 3.26: Stress residui gravanti sul campione analizzato prima (a) e dopo (b) la rimozione del supporto dalla piastra. Figura tratta da [51].

Al fine di ottenere un riscontro pratico di quanto simulato, il campione è stato, quindi, realizzato per mezzo della stampante EOSINT M270 SLM. In seguito al processo di stampa, l'interfaccia tra piastra e supporto è stata sottoposta a taglio ed è stata misurata la distorsione in senso verticale di alcuni punti periferici del componente. In **Figura 3.27** viene mostrata la comparazione tra i risultati ottenuti. L'errore massimo esistente tra i risultati sperimentali e teorici risulta essere pari al 28%. Ciò implica che il modello utilizzato, nonostante le semplificazioni su cui si basa, possa essere ritenuto con buona approssimazione valido.

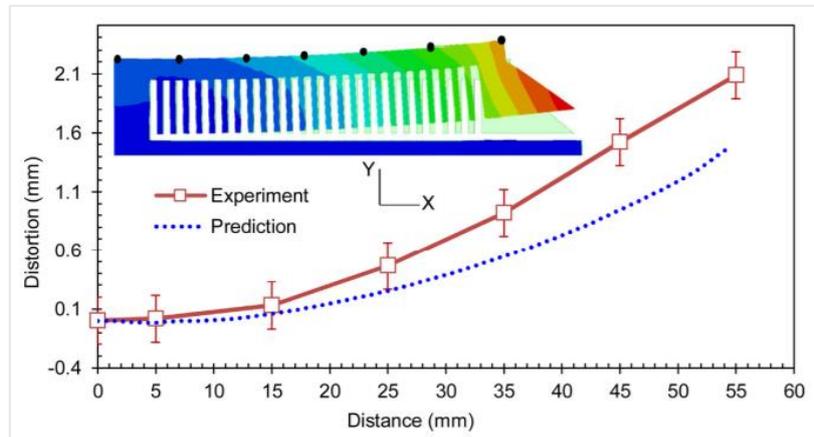


Figura 3.27: Comparazione tra i risultati numerici e i risultati sperimentali riguardanti la distorsione del campione in esame. Figura tratta da [51].

Una ricerca interessante è stata condotta negli USA da Tran et al. [52]. Quest'ultima si concentra su una delle possibili conseguenze derivanti dalla insorgenza degli stress residui in componenti in Inconel 718 realizzati mediante tecnica SLM, ovvero l'accadimento di fenomeni di cracking all'interfaccia tra il solido in costruzione e il supporto. Al fine di evitare fenomeni di questo genere, tale studio si propone di stimare il valore critico dell'integrale J (espressione della densità energetica di deformazione all'apice della cricca) all'interfaccia tra il componente as-built e il supporto reticolato, al di sopra del quale hanno luogo fenomeni di propagazione di cricche preesistenti. Per fare ciò, i ricercatori hanno combinato l'utilizzo di simulazioni assistite al PC e prove sperimentali in situ. Nella prima parte della ricerca, sono stati realizzati una serie di provini in Inconel 718 (**Figura 3.28**) costituiti da un supporto reticolato di altezza fissa sormontato da un componente solido di altezza variabile da provino a provino, compresa tra 6.5 mm e 13.5 mm.

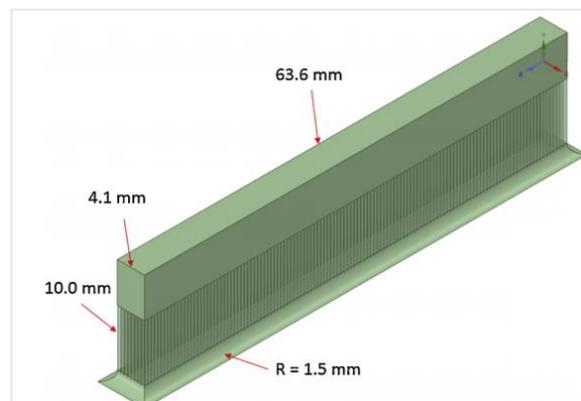


Figura 3.28: Caratteristiche geometriche del campione analizzato. Figura tratta da [52] con modifiche.

In seguito al processo di stampaggio, i ricercatori sono pervenuti alla conclusione che l'altezza critica della parte solida, al di sopra della quale si hanno fenomeni di cracking, è pari a 8.2 mm. A questo punto, quest'ultimo provino è stato modellato in CAD ed è stato sottoposto a una simulazione termo-meccanica disaccoppiata agli elementi finiti, attraverso l'utilizzo di ANSYS, per la valutazione degli stress residui e dell'integrale J in corrispondenza dell'interfaccia. In fase di simulazione, sono stati scelti dei valori di parametri di processo coerenti a quelli utilizzati in fase di stampa. In **Figura 3.29** vengono mostrate la distribuzione degli stress residui. Il valore critico dell'integrale J, ricercato e strettamente correlato ai parametri di processo impiegati, è risultato essere pari a 7196 J/m².

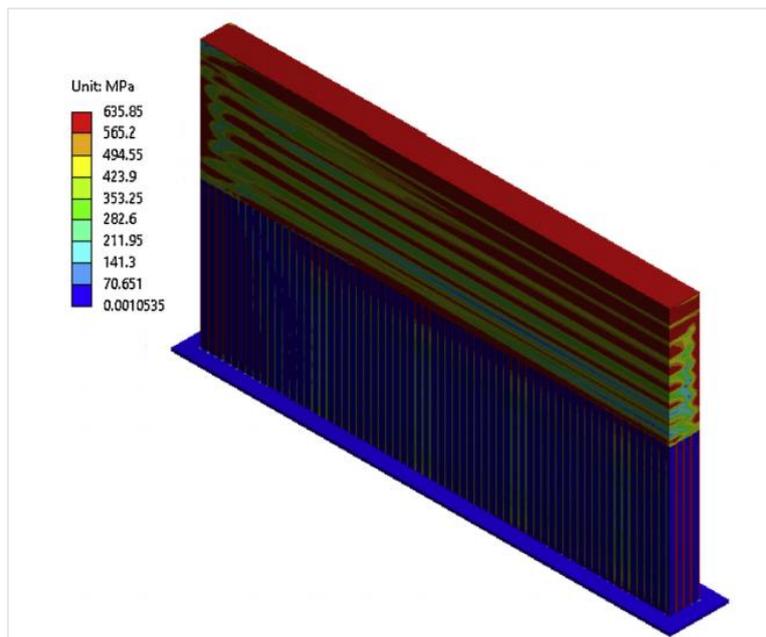


Figura 3.29: Stress di von Mises gravanti sul campione analizzato. Figura tratta da [52].

Nell'ultima fase della ricerca, gli autori hanno cercato di ottenere una convalida sperimentale dei risultati ottenuti dalla modellazione applicandola a due campioni differenti (**Figura 3.30**), realizzati in Inconel 718, utilizzando i medesimi parametri di processo impiegati in precedenza.

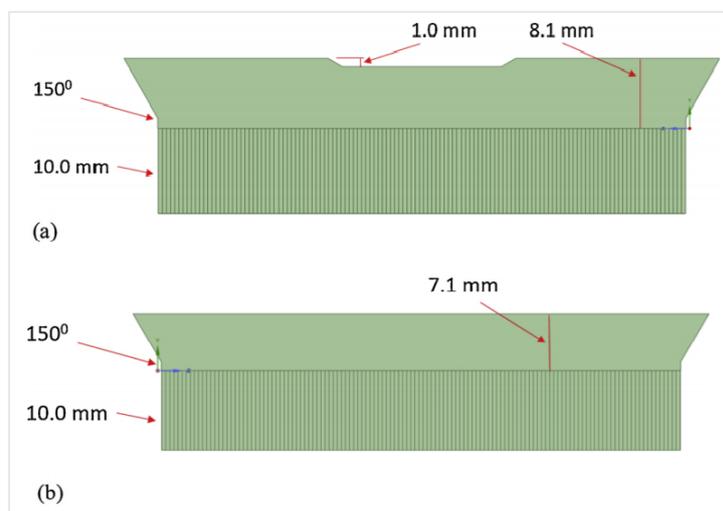


Figura 3.30: Caratteristiche geometriche dei campioni utilizzati per la convalida sperimentale del modello. (a) Campione A, (b) Campione B. Figura tratta da [52] con modifiche.

Terminata la simulazione, il valore dell'integrale J per il campione A è risultato essere superiore al valore critico ($J=7288 \text{ J/m}^2$) suggerendo, quindi, la tendenza di tale campione a dare origine a fenomeni di cracking. Per il campione B, invece, il valore dell'integrale J è risultato inferiore al valore critico ($J=7167 \text{ J/m}^2$). I risultati ricavati sono stati, infine, convalidati sperimentalmente: a seguito del processo di stampaggio del campione A, la rottura in corrispondenza dell'interfaccia componente/supporto è effettivamente avvenuta, episodio non verificatosi nel caso della stampa del provino B (**Figura 3.31**).

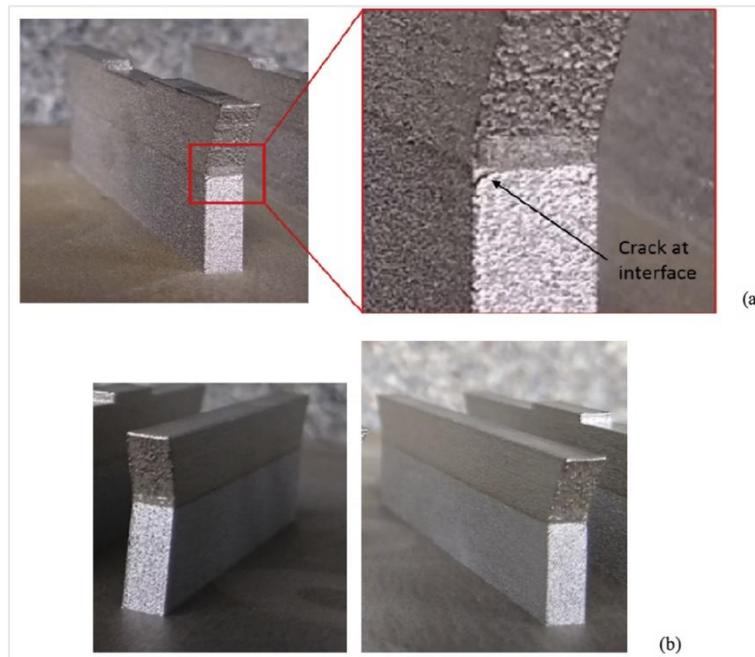


Figura 3.31: Risultati della prova sperimentale. Il campione A è soggetto a fenomeni di rottura all'interfaccia solido-supporto (a). Il campione B non evidenzia alcuna rottura (b). Figura tratta da [52] con modifiche.

Infine, nello studio condotto da Poyraz e Kushan [53], è stato utilizzato un modello termo-meccanico agli elementi finiti particolarmente semplificato per la valutazione degli stress residui e delle conseguenti distorsioni gravanti su alcuni campioni realizzati in Inconel 718. Come si evince dalla **Figura 3.32**, si tratta di due provini, ciascuno dei quali contenenti delle parti a sbalzo disposte a 120° tra loro. Nel primo campione (C1) tutti e tre i rami sono caratterizzati da una configurazione a pettine, mentre nel secondo (C2) solo due di essi presentano una configurazione di tal genere, originando una situazione di asimmetria geometrica.

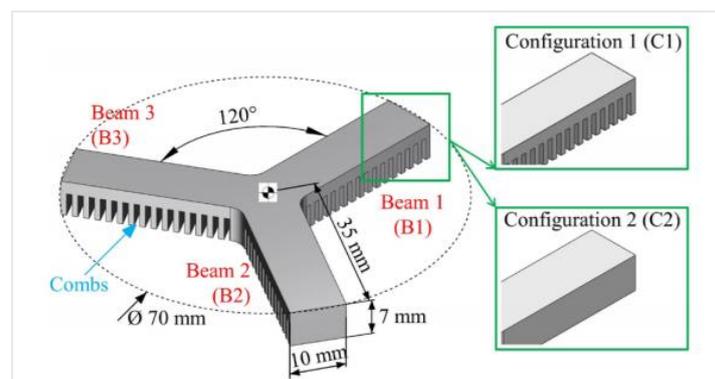


Figura 3.32: Caratteristiche geometriche dei campioni analizzati. Figura tratta da [53].

Simultaneamente, al fine di validare i risultati ottenuti dal modello sviluppato, le due geometrie sono state realizzate attraverso la stampante tridimensionale EOS M290 utilizzando i medesimi parametri di processo impiegati in fase di simulazione. A questo punto, in seguito alla rimozione dei componenti dalla piastra, è stata effettuata una comparazione tra i risultati della modellazione e i risultati sperimentali, considerando come riferimento l'altezza dello spigolo presente all'estremità di ciascun ramo. In **Figura 3.33** vengono mostrati i risultati della modellazione numerica e il confronto tra quest'ultimi e i dati ottenuti sperimentalmente.

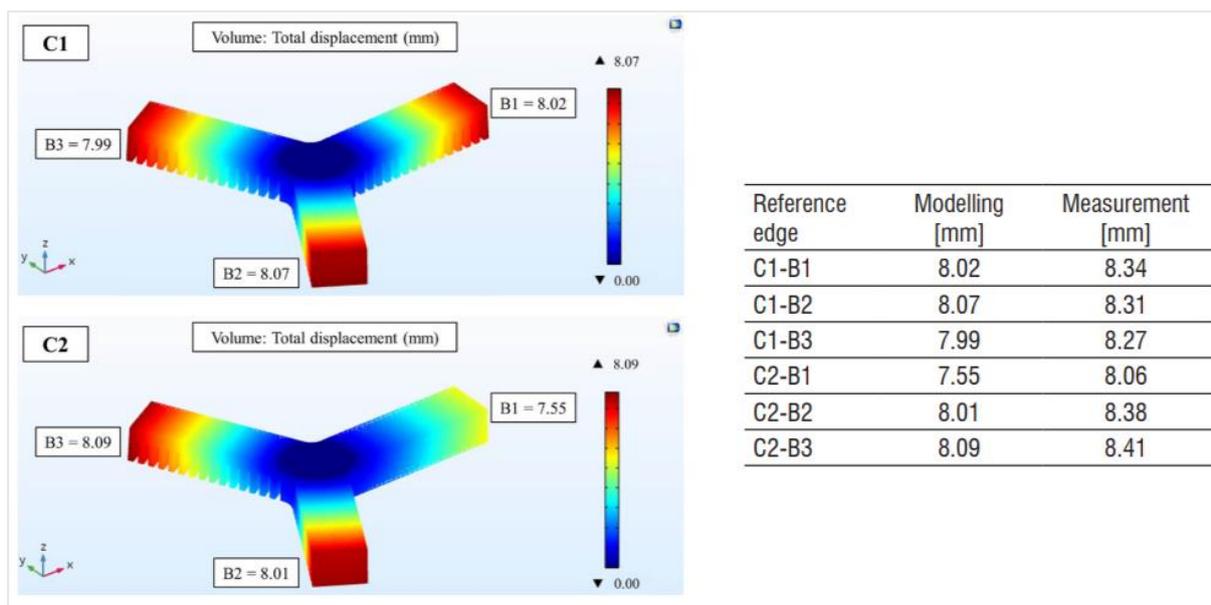


Figura 3.33: Risultati ottenuti dalla simulazione FEM e comparazione tra essi e i risultati sperimentali. Figura tratta da [53] con modifiche.

Dalla suddetta comparazione i ricercatori sono pervenuti alle seguenti conclusioni:

- Il modello utilizzato risulta valido, data la buona convergenza tra i risultati della simulazione e i risultati sperimentali.
- Nel processo SLM le caratteristiche geometriche del componente hanno una notevole influenza sulle distorsioni gravanti sul pezzo finito. Dai risultati si può, infatti, osservare come le entità delle distorsioni in ciascun ramo del provino C1 siano sostanzialmente simili. Nel caso del provino C2, invece, l'entità della distorsione nel ramo B1 risulta essere decisamente inferiore rispetto a quella riscontrata nei restanti due rami.

4. Caso studio - Procedura sperimentale

Nel seguente capitolo ci si propone di illustrare l'iter sperimentale condotto per la realizzazione pratica di un componente in Inconel 718 tramite tecnologia SLM. La medesima geometria è stata, successivamente, utilizzata per la conduzione di una simulazione assistita al PC tramite il software commerciale Abaqus/CAE, al fine di validare sperimentalmente il modello numerico utilizzato. Prima, però, di occuparci della descrizione della sperimentazione condotta e del modello utilizzato, risulta essere utile presentare i diversi step della stampa 3D, in modo da delineare il quadro generale all'interno del quale si inserisce la ricerca svolta.

4.1 Fasi dell'Additive Manufacturing

L'intero processo di AM, a partire dalla progettazione del pezzo in CAD fino ad arrivare all'ottenimento del prodotto finito, non è così immediato come si potrebbe credere. Esso si articola in ben otto step (Figura 4.1), ovvero:

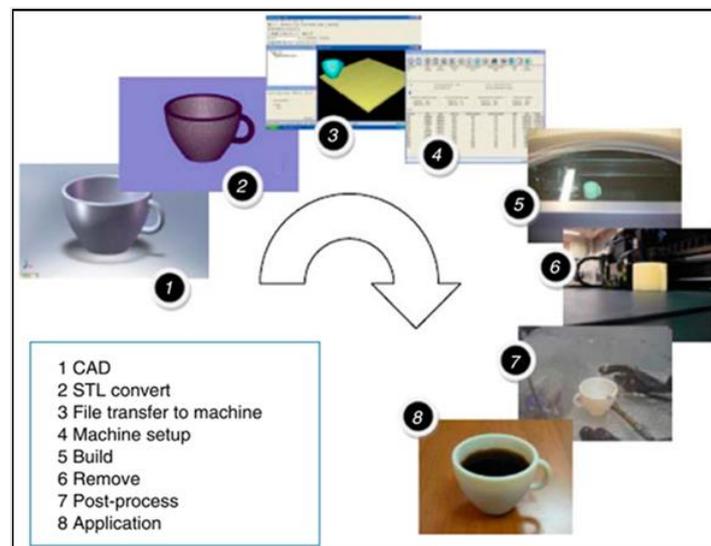


Figura 4.1: Step del processo produttivo tramite AM. Figura tratta da [28].

- 1) Progettazione del pezzo tramite CAD. Il primo passo è, di norma, la modellazione tridimensionale del componente desiderato per mezzo di software quali Autocad, Inventor, SolidWorks e Catia. Nel caso di geometrie particolarmente semplici, è possibile utilizzare per tale scopo lo stesso Abaqus.
- 2) Conversione del modello CAD in formato STL. Il termine "STL" (Standard Triangulation Language) si riferisce al formato standard, usato dalla maggior parte delle macchine di stampa 3D. Si tratta di un file in grado di descrivere la superficie esterna del modello e rappresenta la base per il calcolo degli strati trasversali in cui il modello viene suddiviso. In tale formato la superficie esterna del pezzo è approssimata con un insieme di triangoli, ciascuno dei quali identificato dalle tre coordinate dei vertici e dal versore normale alla superficie.
- 3) Trasferimento del file STL alla stampante 3D ed eventuali aggiustamenti. Una volta ottenuto il file STL, quest'ultimo viene trasferito al software che gestisce il macchinario di stampa. In questo step vengono fissati il posizionamento del pezzo sulla piastra, l'orientamento di costruzione e l'eventuale aggiunta di supporti, qualora necessari. Ciò può essere realizzato mediante l'ausilio di software come Materialise Magics.

- 4) **Settaggio del macchinario.** Affinché il pezzo possa essere stampato in maniera corretta in tale fase, è necessario fissare alcuni parametri di processo fondamentali quali la potenza del laser o lo spessore dello strato; ciò viene realizzato attraverso il software di Post-Processor, integrato nel macchinario di stampa. Contestualmente, bisogna assicurarsi che vi sia abbastanza materiale prima per eseguire la stampa e che la piastra sia correttamente posizionata all'interno del macchinario.
- 5) **Stampaggio.** Si tratta del momento maggiormente critico, durante il quale il pezzo ed eventuali supporti incominciano a prendere forma. Dopo aver verificato la corretta esecuzione dei primi strati ed eventualmente modificato alcuni parametri, l'operatore avvia il processo di stampaggio vero e proprio, monitorando la sua corretta esecuzione.
- 6) **Rimozione del componente.** Terminato il processo di stampa, l'operatore può estrarre il prodotto con le dovute precauzioni. Sebbene le tecniche di estrazione dipendano dalla particolare tecnica di AM, prima della rimozione del pezzo è, in genere, consigliabile verificare che la temperatura all'interno della camera sia sufficientemente bassa e che non vi siano parti in movimento.
- 7) **Operazioni di post-processing.** Al fine di rendere il pezzo adatto al suo uso finale, quest'ultimo deve essere sottoposto ad una serie di operazioni. Dapprima, è importante eseguire la pulizia del pezzo per rimuovere la polvere in eccesso, la quale eventualmente può essere riciclata. Successivamente, il pezzo può essere sottoposto a trattamenti termici con lo scopo di migliorare le proprietà meccaniche e ottenere un rilassamento delle tensioni residue. A questo punto, mediante le diverse tecniche di taglio, è necessario separare il componente dalla piastra di sostegno e da eventuali supporti. Infine, è possibile sottoporre il pezzo ad operazioni in grado di migliorare la finitura superficiale e diminuirne il grado di rugosità.
- 8) **Utilizzo finale.** Il pezzo è finito e come tale è pronto per l'uso a cui è destinato.

4.2 Progettazione del pezzo in CAD

Qui di seguito, vengono descritte le caratteristiche della parte realizzata, distinguendo il componente vero e proprio dal supporto necessario al processo di costruzione.

4.2.1 Caratteristiche del componente: geometria e materiale

Il componente utilizzato per la conduzione delle prove sperimentali possiede le caratteristiche geometriche raffigurate in **Figura 4.2**.

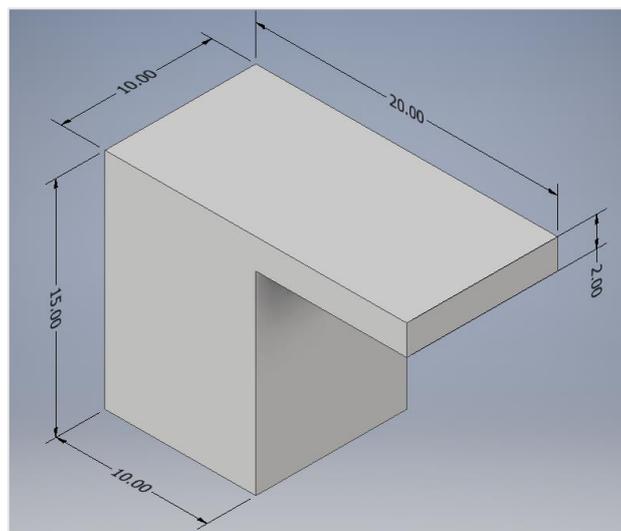


Figura 4.2: Caratteristiche geometriche del componente in Inconel 718.

Come si evince dalla precedente figura, si tratta di un provino a L, caratterizzato da una geometria abbastanza semplice, in maniera tale da non implicare un processo di stampa troppo lungo ed un eccessivo costo computazionale. Si noti che tutte le misure mostrate sono espresse in mm.

Come precedentemente accennato, il materiale utilizzato per la realizzazione del campione di interesse è la superlega Inconel 718, sotto forma di particelle sferoidali. In particolare, la polvere impiegata durante il processo di stampa è stata prodotta attraverso la tecnica di atomizzazione a gas dalla società specializzata Oerlikon. In **Tabella 4.1** viene illustrata la composizione chimica della polvere, mentre in **Tabella 4.2** ne vengono evidenziate le principali caratteristiche fisiche.

Tabella 4.1: Composizione chimica della polvere utilizzata.

MetcoAdd 718C	Percentuale in peso							
	Ni	Cr	Fe	Nb+Ta	Mo	Al	Ti	altro
da bilancio	18	18	5	3	0.6	1	< 0.5	

Tabella 4.2: Caratteristiche fisiche della polvere utilizzata.

Metcoadd 718C	Range nominale [μm]	D90 [μm]	D50 [μm]	D10 [μm]	Scorrevolezza [s/50 g]	Densità apparente [g/cm ³]	Morfologia
	-45 - +15	46	30	18	< 18	4-5	Sferoidale

4.2.3 Caratteristiche del supporto: geometria e materiale

Come già scritto precedentemente, l'impiego di strutture di supporto è di fondamentale importanza per attenuare gli stress termici residui e le deformazioni gravanti sul prodotto finito, nonché per sostenere componenti con delle forme geometriche a sbalzo, come quella in questione. In questo caso, si è scelto di utilizzare un supporto di tipo reticolare (lattice support), in quanto caratterizzato da un'elevata area specifica e relativamente semplice da progettare e realizzare. L'insieme del componente e del supporto è mostrato in **Figura 4.3**.

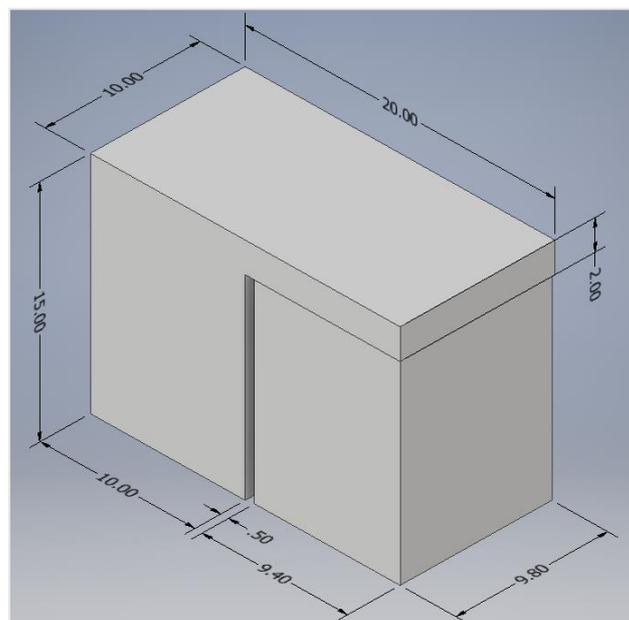


Figura 4.3: Caratteristiche geometriche del componente e del supporto in Inconel 718.

Come si evince dalla precedente figura, il supporto possiede la forma di un parallelepipedo di dimensioni 9.4 mm (lunghezza) x 9.8 mm (profondità) x 13 mm (altezza). La distanza del supporto dalla parete verticale del pezzo è stata impostata pari a 0.5 mm, mentre la distanza del supporto dai restanti bordi del componente è stata assunta pari a 0.1 mm. Considerando tali misure, ciascuna sezione trasversale del supporto possiede un'area pari a 92.12 mm².

Infine, per quanto riguarda il materiale, anche la struttura di supporto è stata realizzata a partire da Inconel 718 in forma polverulenta.

4.3 DoE: Design of Experiment

Con il termine “Design of Experiment” (DoE) si intende l’insieme di parametri di input impiegati per la conduzione di una determinata prova sperimentale. Per quanto riguarda i processi di Additive Manufacturing, esiste una vasta gamma di parametri (precedentemente evidenziati nel **Paragrafo 3.3.1**) la cui ottimizzazione è di fondamentale importanza per assicurare elevati standard qualitativi del prodotto finito e, allo stesso tempo, un valore di produttività sufficientemente competitivo. Date le evidenti difficoltà nella considerazione di tutti i possibili parametri, si è scelto di concentrare l’analisi solo su quelli ritenuti maggiormente influenti ai fini della conduzione del processo di stampa, ovvero:

- Spessore dello strato.
- Potenza laser incidente sul componente.
- Potenza laser incidente sul supporto.
- Velocità di scansione del componente.
- Velocità di scansione del supporto.
- Distanza di hatch del componente.
- Distanza di hatch del supporto.

Dalla combinazione di tali parametri dipende il valore assunto da due grandezze di grande rilievo nel processo SLM, ovvero la Densità di Energia Volumetrica (**Equazione 4.1**) e la Produttività (**Equazione 4.2**):

$$VED = \frac{P}{v \cdot l \cdot h} \quad (4.1)$$

$$Prod = v \cdot l \cdot h \quad (4.2)$$

Dove:

- VED è la densità di energia volumetrica [$\frac{J}{mm^3}$].
- $Prod$ è la produttività [$\frac{mm^3}{s}$].
- P è la potenza del laser [$\frac{J}{s}$].
- v è la velocità di scansione [$\frac{mm}{s}$].
- l è lo spessore dello strato [mm].
- h è la distanza di hatch [mm].

Infine, oltre a quelli sopracitati, il processo di stampa è direttamente influenzato da ulteriori due parametri inerenti al supporto reticolato, ovvero:

- L'intervallo di frammentazione (fragmentation interval), ovvero la dimensione di ciascun blocco che costituisce il supporto reticolato.
- La distanza di separazione (separation width), ovvero la distanza tra due blocchi adiacenti.

Per meglio comprendere il significato fisico di tali parametri, in **Figura 4.4** vengono mostrate le caratteristiche geometriche tipiche di un supporto reticolato.

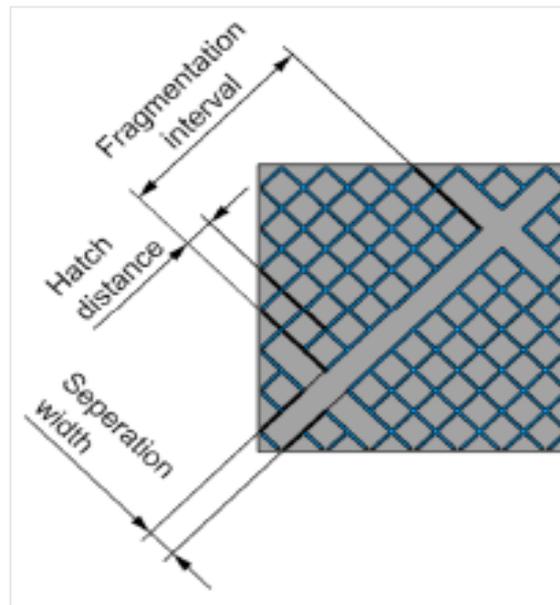


Figura 4.4: Parametri geometrici tipici di supporto reticolato. Figura tratta da [54].

4.3.1 Scelta dei parametri di processo

Durante il periodo di studio presso la società Prima Industrie, integrando le conoscenze dell'azienda con i dati riportati in letteratura, sono state condotte diverse prove al fine di determinare la migliore combinazione dei parametri sopracitati. Per ragioni di tempo e spazio vengono, qui di seguito, riportate solo le principali conclusioni.

Per quanto riguarda i parametri di processo legati al componente da realizzare, a seguito di diverse prove sperimentali, si è giunti alla conclusione che il valore ottimale di tali parametri, al fine di ottenere una densità del componente finito maggiore del 98%, massimizzare le proprietà meccaniche dei pezzi e aumentare la produttività dell'intero processo, è quello mostrato in **Tabella 4.3**.

Tabella 4.3: Parametri di processo e caratteristiche geometriche ottimali per il componente.

Spessore dello strato [mm]	Potenza laser [W]	Velocità di scansione [mm/s]	Densità di energia volumetrica [J/mm ³]	Distanza di hatch [mm]
0.02	195	850	104.27	0.11

Inerentemente alla strategia di scansione, dapprima, è stato scansionato il contorno di ciascuno strato e, successivamente, la parte interna mediante linee trasversali parallele. Inoltre, il percorso di scansione è

stato ruotato di 67° da uno strato all'altro al fine di evitare lo sviluppo di stress in una direzione preferenziale. La velocità del recoater è stata impostata a un valore di 25.33 mm/s.

D'altro canto, per quanto riguarda le caratteristiche geometriche e i parametri di processo inerenti al supporto, si è pervenuti alla conclusione che il set di parametri ottimali, al fine di evitare il distacco del supporto dal componente e di minimizzare i fenomeni deformativi, è quello mostrato in **Tabella 4.4**.

Tabella 4.4: Parametri di processo e caratteristiche geometriche ottimali per il supporto.

Spessore dello strato [mm]	Potenza laser [W]	Velocità di scansione [mm/s]	Densità di energia volumetrica [J/mm^3]	Distanza di hatch [mm]	Intervallo di frammentazione [mm]	Distanza di separazione [mm]
0.02	130	1200	10.833	0.5	3.5	0.5

I valori mostrati nelle precedenti tabelle sono stati, quindi, scelti durante la conduzione della procedura sperimentale per la stampa del componente a L e del relativo supporto.

4.4 Macchinario di stampa: Print Sharp 250

Il macchinario di stampa utilizzato nella pratica per l'ottenimento del campione in esame è la stampante 3D "Print Sharp 250", ideata e realizzata dalla società Prima Industrie S.p.A. (**Figura 4.5**).

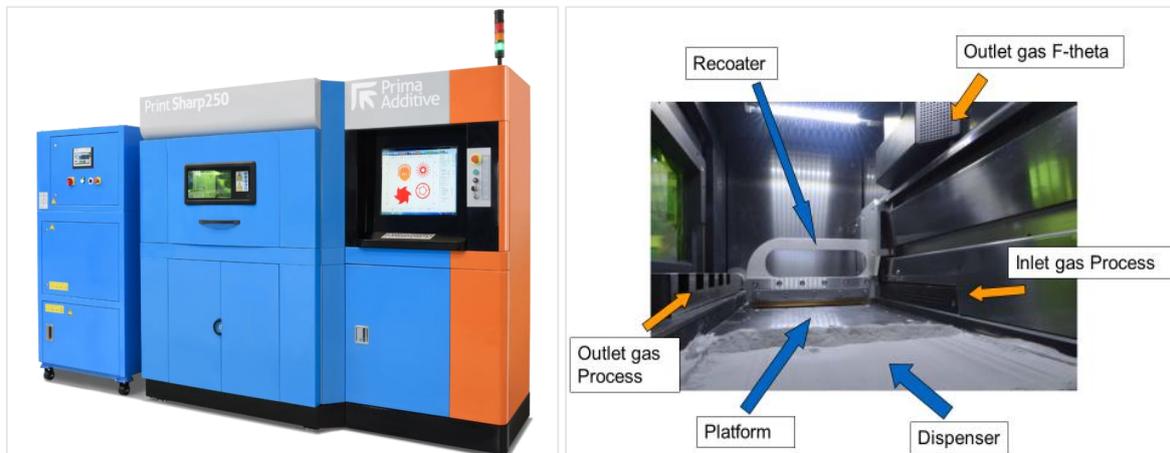


Figura 4.5: Struttura esterna (a sinistra) e camera di costruzione interna (a destra) del macchinario Print Sharp 250.

La macchina, basata sulla tecnologia SLM, è caratterizzata da un volume di 250 mm x 250 mm x 300 mm. Essa consente, quindi, di stampare componenti di medie dimensioni, attraverso l'utilizzo di un singolo laser con potenza compresa tra 200 e 500 W e con una velocità di costruzione variabile tra 12 e 30 cm^3/h . Il laser generato passa attraverso un sistema galvanometrico, utilizzato per indirizzare e controllare il movimento del fascio laser all'interno della camera di costruzione (**Figura 4.6**). Le specifiche tecniche della "Print Sharp 250" sono riportate in dettaglio in **Appendice A**.

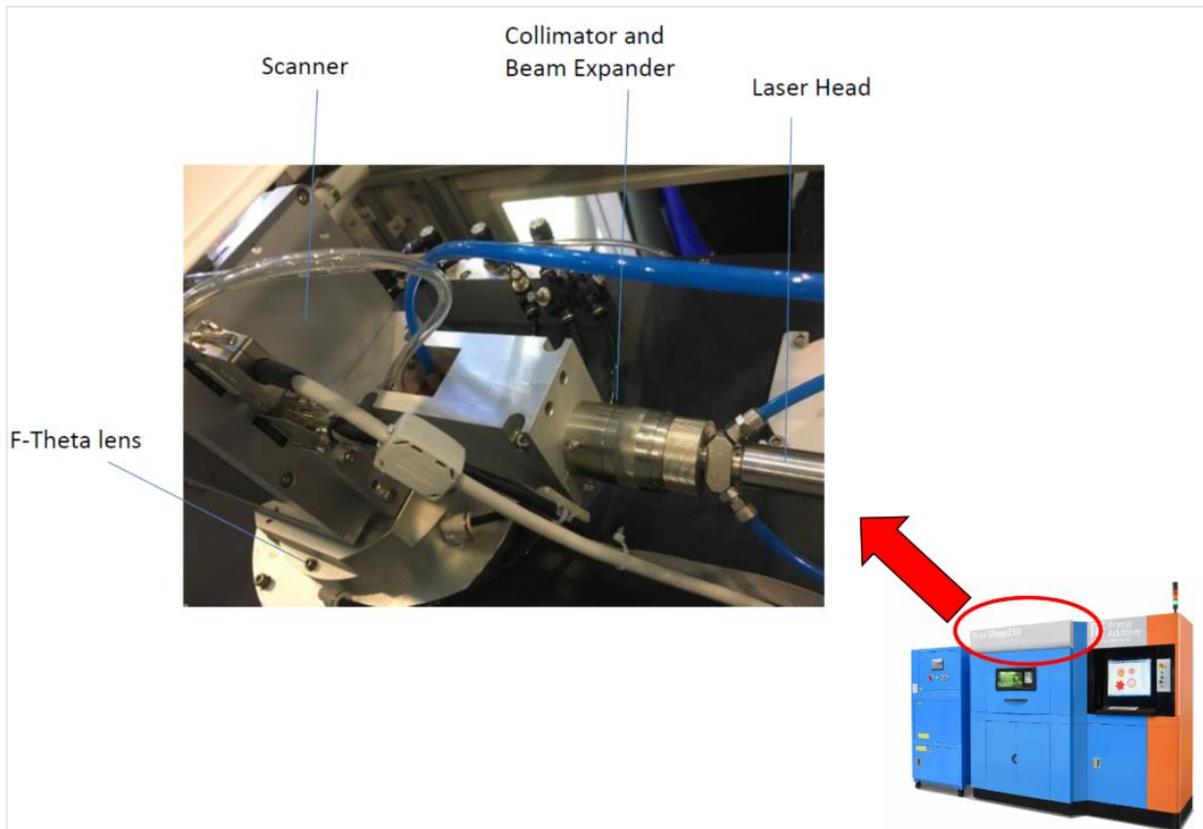


Figura 4.6: Sistema ottico del macchinario Print Sharp 250.

Durante il processo di stampa, il consumo di gas inerte (azoto o argon) è minimizzato in quanto il dispositivo è dotato di un filtro (**Figura 4.7**) che permette il ricircolo del flusso gassoso.

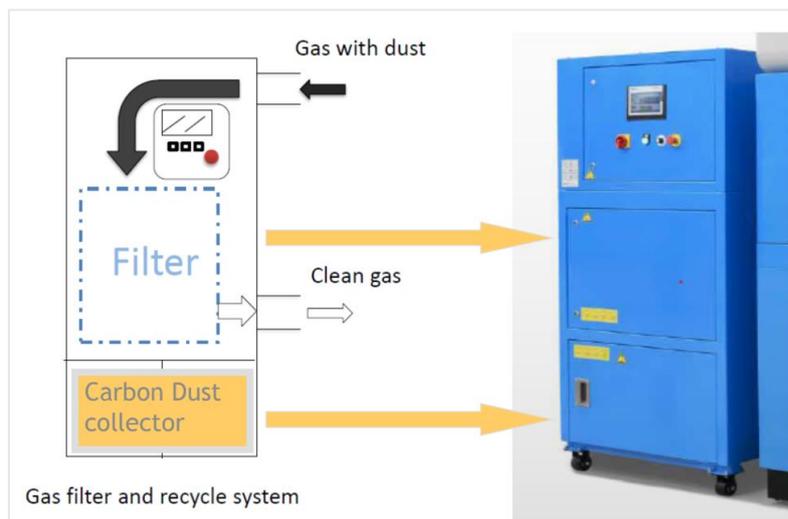


Figura 4.7: Sistema di purificazione e di ricircolo del gas inerte del macchinario Print Sharp 250.

La macchina è, infine, equipaggiata di un sistema di controllo intelligente (PLC) e di un software che consente di settare i principali parametri di processo e ottimizzare la posizione e l'orientamento del componente all'interno della camera di costruzione.

4.5 Processo di stampa: dal file STL al componente finito

Una volta fissato il set di parametri ottimali, è stato effettuato il processo di stampaggio vero e proprio. Innanzitutto, il campione e il relativo supporto sono stati modellati mediante il software Materialise Magics. Attraverso quest'ultimo è stato, inoltre, impostato preliminarmente il posizionamento del componente sulla piastra all'interno della camera di costruzione della stampante 3D. In particolare, il pezzo è stato orientato in modo da ottenere un angolo di 5° rispetto alla direzione di movimentazione del recoater (asse x), onde evitare problemi di collisione tra questo e il componente in costruzione (**Figura 4.8**).

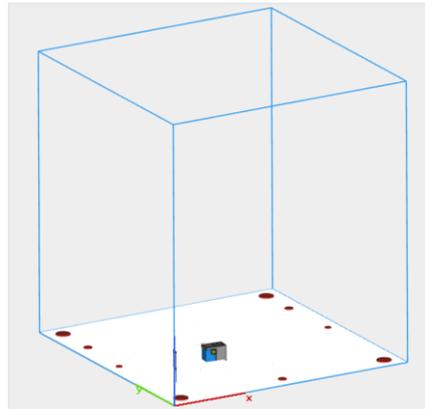


Figura 4.8: Posizionamento del pezzo e del relativo supporto all'interno della camera di lavoro mediante il software Materialise Magics.

A questo punto, sia il componente che il supporto sono stati soggetti al processo di "slicing", ancora una volta, mediante l'uso di un'apposita funzione di Materialise Magics. In entrambi i casi, come menzionato nelle precedenti tabelle (**Tabella 4.3** e **Tabella 4.4**) è stato impostato uno spessore di ciascuno strato pari a $20\ \mu\text{m}$.

Al termine della fase di slicing, sono stati settati tutti i principali parametri di processo ed è stata effettuata la preparazione della camera di costruzione. In particolare, la piastra situata alla base è stata preriscaldata a $60\ ^\circ\text{C}$ così da evitare, per quanto possibile, l'insorgenza di stress residui alla base del pezzo ed assicurare una corretta aderenza tra questo e la piastra. Inoltre, attraverso il flussaggio di azoto, è stato ridotto il contenuto di ossigeno ad un valore inferiore all'1% al fine di realizzare un'atmosfera inerte all'interno della camera. Solo a conclusione di tali step preliminari è stata realizzata la stampa vera e propria del pezzo. In **Figura 4.9** è possibile osservare la camera di costruzione durante la fase di stampa, mentre in **Figura 4.10** viene mostrato il campione realizzato.

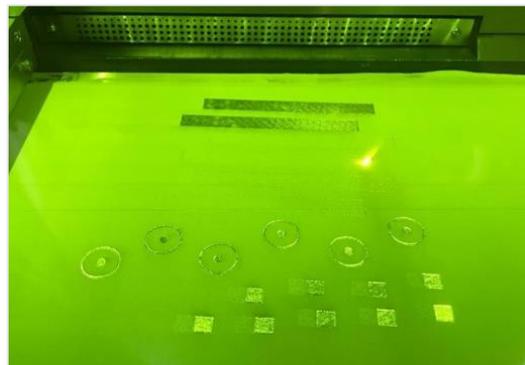


Figura 4.9: Foto della camera di costruzione durante il processo di stampa.



Figura 4.10: Foto del campione in esame al termine del processo di stampa.

4.6 Misure di distorsione

Una volta terminato il processo di costruzione, il campione realizzato è stato estratto dalla camera di costruzione, separandolo dalla polvere non soggetta a fusione. A questo punto, al fine di misurare le distorsioni gravanti sul componente, sono state misurate mediante un calibro digitale le lunghezze mostrate in **Figura 4.11**, ovvero:

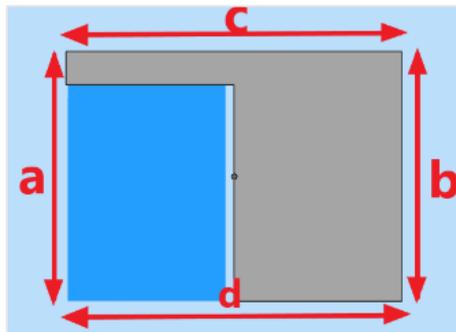


Figura 4.11: Schema raffigurante le misure effettuate su pezzo e supporto.

- a) l'altezza della parte dal lato supportato;
- b) l'altezza della parte dal lato non supportato;
- c) la lunghezza della superficie superiore;
- d) la lunghezza totale (componente + supporto) della superficie inferiore.

I risultati delle misurazioni sono mostrati in **Tabella 4.5**.

Tabella 4.5: Riassunto delle misure effettuate su pezzo e supporto.

Misura a [mm]	Misura b [mm]	Misura c [mm]	Misura d [mm]
14.84	14.93	19.99	19.99

Si sottolinea che tali misure sono state effettuate a monte della separazione tra la piastra e l'insieme del componente e del supporto. Quest'ultime saranno, nel seguito, confrontate con i valori di distorsione ottenuti attraverso la simulazione numerica.

5. Caso studio - Modellazione numerica

La modellazione dei processi di AM risulta alquanto complessa, in quanto implica una vasta gamma di fenomeni (termici, meccanici, fluidodinamici) ed è caratterizzata da una natura multi-scala sia in termini di spazio che in termini di tempo. D'altro canto, se impostata in maniera ottimale, la simulazione numerica dei processi additivi è di grande importanza, in quanto consente di:

- Predire il profilo termico durante il processo di stampa e gli stress residui gravanti sul componente.
- Minimizzare lo scarto esistente tra il componente progettato e quello effettivamente ottenuto mediante un processo di ottimizzazione.
- Valutare le performance della parte realizzata, simulando le condizioni di carico a cui è destinata ad essere sottoposta.

In questo capitolo vengono descritti il modello numerico e i parametri utilizzati al fine di simulare il processo di stampa tramite SLM del componente a L, le cui principali caratteristiche sono state mostrate nel precedente **Capitolo 4**.

5.1 Software utilizzato: Abaqus/CAE

In ambito additive, l'utilizzo di software è, in generale, di fondamentale importanza al fine di realizzare una corretta attuazione del processo manifatturiero. Tra le diverse possibilità, in tale lavoro di tesi, si è scelto di utilizzare il software Abaqus/CAE, realizzato dalla società europea Dassault Systèmes "The 3DEXPERIENCE Company". In generale, questo programma consente all'utente di creare o importare geometrie in CAD concepite per mezzo di altri software, effettuare differenti tipologie di analisi, tra le quali analisi termiche e meccaniche, e visualizzare i relativi risultati in modo tale da poterli comparare con casi studio reali (**Figura 5.1**).

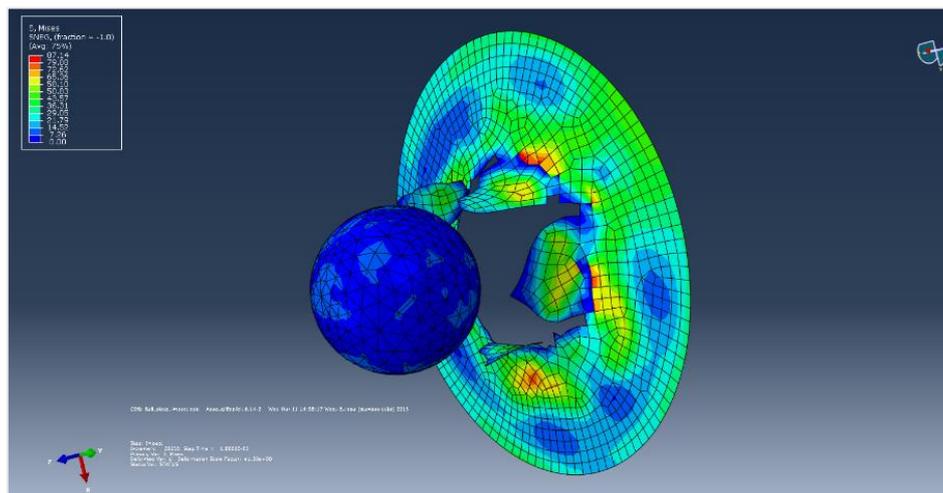


Figura 5.1: Risultati dell'analisi meccanica applicata a una pipeline sottomarina ed eseguita tramite il software Abaqus. Figura tratta da <https://chesssubseaengineering.org/onshore-subsea-pipeline-stress-fatigue-analysis-with-abaqus-ospfa-level-1-level-2/>.

Mediante l'utilizzo congiunto di Abaqus e del plug-in "AM Modeler", è possibile definire in maniera appropriata le caratteristiche chimico-fisiche dei materiali impiegati, le condizioni di carico, le condizioni al contorno e i principali parametri di processo (potenza del laser, spessore dello strato, strategia di scansione etc.), in modo tale da modellare il processo additivo nella maniera più aderente possibile alla realtà. In particolare, è possibile condurre due differenti tipologie di modellazione:

- Simulazione termomeccanica, caratterizzata da un'elevata precisione ma anche da un alto costo computazionale. Si precisa che nel compiere la simulazione è stato utilizzato esclusivamente questo metodo di cui, nel seguito, verranno descritte le principali peculiarità.
- Simulazione del tipo "inherent strain", che permette di ottenere informazioni relative alle distorsioni e agli stress residui in tempi più brevi ma con un grado di accuratezza inferiore.

Infine, Abaqus può essere potenzialmente impiegato per la simulazione delle operazioni di post-processing a cui il pezzo stampato viene sottoposto al fine di migliorarne le proprietà meccaniche e superficiali, quali trattamenti termici, trattamenti superficiali e tecniche di taglio.

5.2 Condizioni di simulazione

Nel seguito verranno descritti gli input di base scelti in fase preliminare per il compimento della simulazione e l'eventuale presenza di semplificazioni necessarie al fine di diminuire, nel modo più efficiente possibile, il costo computazionale della modellazione.

5.2.1 Geometria e parametri di processo

Come primo passo per l'effettuazione della simulazione, è stato necessario importare all'interno dell'ambiente di modellazione la geometria del componente a L e del relativo supporto, precedentemente modellati in CAD (**Figura 5.2**).

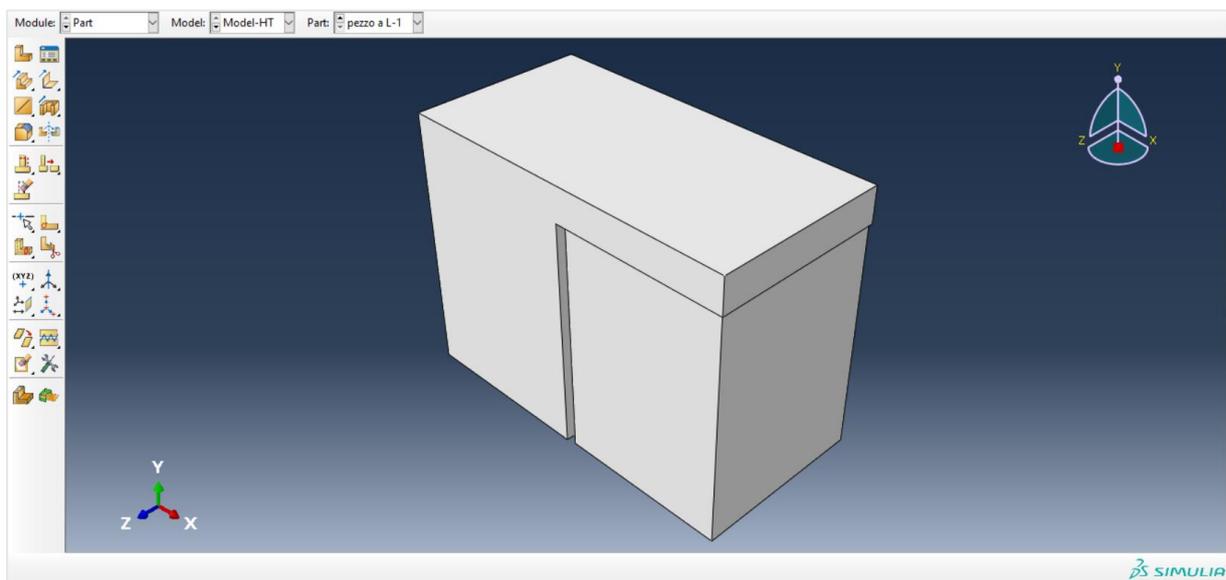


Figura 5.2: Raffigurazione del componente a L e del relativo supporto all'interno del software Abaqus.

Bisogna, tuttavia, sottolineare come la geometria effettivamente importata ed utilizzata all'interno del programma è quella mostrata in **Figura 5.3**, in cui il supporto sostiene totalmente la zona a sbalzo del componente a L e in cui il tutto appare come un unico blocco. Viene, tuttavia, mantenuto il gap di 0.5 mm esistente tra il supporto e la parete verticale del componente. Tale scelta è da imputarsi alla volontà di eliminare problematiche legate alla creazione della mesh nella zona di contatto pezzo-supporto e, quindi, di ridurre il costo computazionale complessivo. In ogni caso, le differenze geometriche tra le due parti sono state tenute in considerazione nel momento in cui è stata inserita la strategia di scansione all'interno del plug-in AM Modeler; questo file di testo contiene, infatti, valori di tempi, coordinate e potenza del laser diversi in base alla zona colpita dalla fonte energetica.

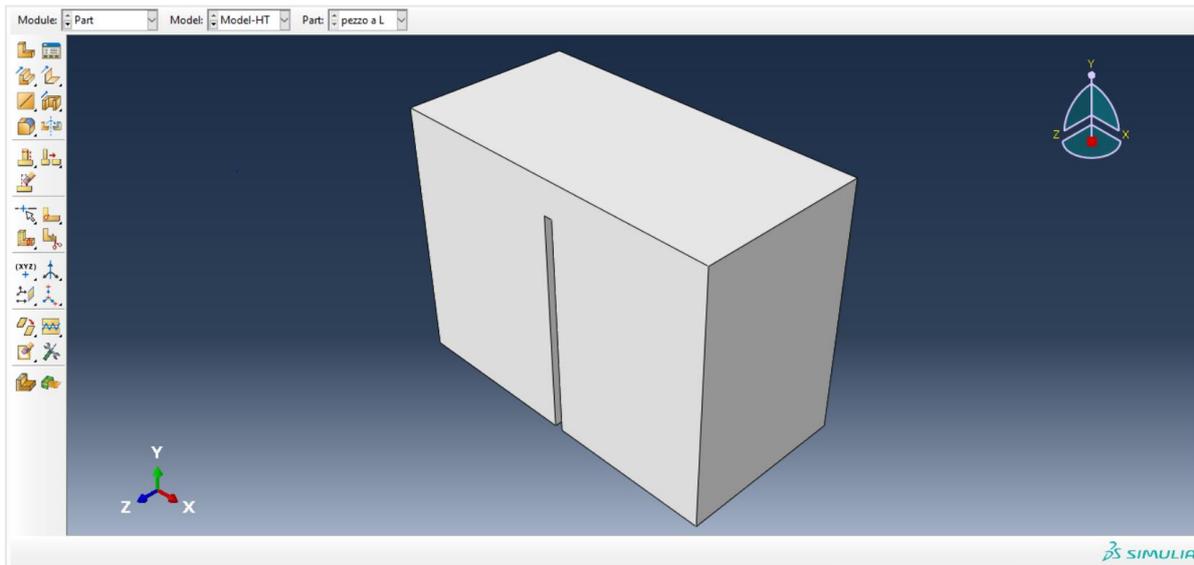


Figura 5.3: Raffigurazione del componente a L e del relativo supporto effettivamente utilizzati in fase di simulazione.

I parametri di processo utilizzati sono i medesimi adoperati durante la procedura di stampa sperimentale e riportati nel precedente **Capitolo 4** (Tabelle 4.3 e 4.4).

5.2.2 Proprietà del materiale

Poiché Abaqus non include una libreria contenente le proprietà del materiale in esame, è stato necessario inserire quest'ultime manualmente nel campo "Materials" a monte della modellazione (**Figura 5.4**).

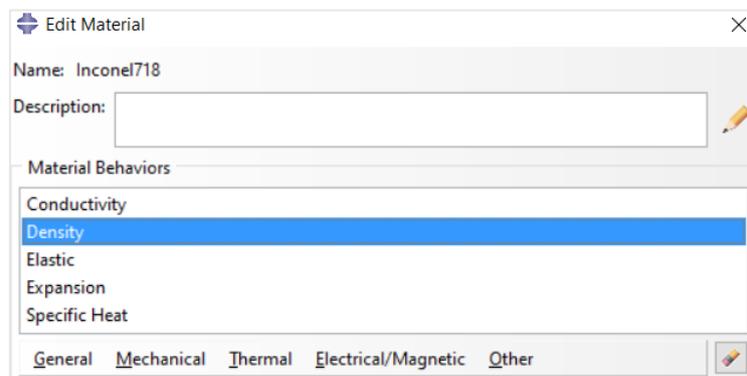


Figura 5.4: Campo Materials su Abaqus per l'inserimento delle proprietà del materiale.

Dato che il processo di SLM implica notevoli gradienti termici, affinché la simulazione sia il più possibile aderente alla realtà è importante considerare la variazione del valore assunto dalle proprietà del materiale al variare della temperatura. Le proprietà fisiche dell'Inconel 718 dipendenti dalla temperatura e ricavate dalla letteratura [55] sono mostrate in **Tabella 5.1**. In particolare, si assume che le proprietà meccaniche del materiale (conduttività termica, modulo di Young, coefficiente di Poisson e coefficiente di espansione termica) siano isotropiche, e che il valore di densità sia uniforme. Si noti che il valore della tensione di snervamento non è stato immesso in quanto è stato considerato il comportamento del materiale esclusivamente in campo elastico. Inoltre, è necessario sottolineare che le suddette proprietà si riferiscono all'Inconel 718 allo stato solido. Infatti, secondo la metodologia proposta, il modello termomeccanico predice le tensioni residue e le distorsioni utilizzando le proprietà del materiale al di sotto della temperatura di fusione e non tiene in considerazione né il cambiamento di fase né le caratteristiche della polvere.

Tabella 5.1: Variazione delle proprietà meccaniche della superlega Inconel 718 con la temperatura.

Temperatura [°C]	Densità [g/cm ³]	Conducibilità termica [W/m/°C]	Modulo di Young [GPa]	Coefficiente di Poisson [-]	Coefficiente di espansione termica [μm/m/°C]	Calore specifico a volume costante [J/kg/°C]
20	8.195	10.31		0.294	13	362
21			290	0.291		
37.78			288	0.288		
93.33			284	0.28		
100		11.88		0.28		378
148.89			280			
200		13.6		0.275		400
204.44			276	0.272		
260			271	0.273		
315.56			267	0.271		
371.11			262	0.272		
400	8.1	16.6		0.271	14.8	412
426.67			258	0.276		
482.22			253	0.283		
537.78			248			
593.33			242			
600	8	20.1			16.6	460
648.889			237			
800		26.3				1073
1300		30.75				1573

Per temperature intermedie a quelle mostrate nella precedente tabella il software utilizzato è in grado di calcolare il valore corrispondente delle diverse proprietà fisiche attraverso un processo di interpolazione.

5.3 Simulazione termo-meccanica

Per la modellazione del processo di SLM è stato utilizzato un modello termo-meccanico disaccoppiato o sequenziale, indicato in Abaqus come “sequential thermal-stress analysis”. Esso consta di due fasi:

- Un’analisi di trasferimento di calore transitoria, per la modellazione dei carichi termici a cui il componente è sottoposto durante il processo di stampa.
- Un’analisi strutturale statica, che trae origine dal campo di temperatura risultante dall’analisi termica.

Un approccio di questo tipo può essere usato ogniqualvolta il campo di stress residui e deformazioni è correlato all’evoluzione del campo di temperatura, mentre quest’ultimo è solo debolmente influenzato dal primo. Si tratta, senza dubbio, di una semplificazione che consente, tuttavia, di ottenere un buon compromesso tra costo computazionale e precisione dei risultati.

Rispetto alla modellazione di altri fenomeni, la simulazione dei processi additivi di PBF presenta differenti aspetti critici. In particolare, essa deve tenere in considerazione:

- I dettagli dei dati inerenti al processo di deposizione della polvere e al percorso del laser utilizzato come fonte energetica.
- Il meccanismo di trasferimento del calore attraverso la superficie esterna del pezzo in continua evoluzione che ne determina il progressivo raffreddamento.

Nel seguito verrà descritto l’approccio utilizzato per la risoluzione ottimale di tale problematiche.

5.3.1 Costruzione della mesh

Come in tutti i programmi di simulazione basati sul metodo degli elementi finiti, anche in Abaqus vi è una sezione che permette la discretizzazione del componente in esame mediante la creazione di una mesh. La mesh è una griglia che suddivide l’oggetto tridimensionale in piccoli elementi di forma codificata, in genere esaedri e tetraedri, ciascuno dei quali caratterizzato da un certo numero di nodi. La dimensione caratteristica di questi elementi, o element size, deve essere tale per cui i risultati della risoluzione numerica siano indipendenti dalla particolare discretizzazione spaziale.

A causa della semplicità geometrica del componente in esame, quest’ultimo e il relativo supporto sono stati discretizzati con elementi di forma esaedrica (elementi di tipo DC3D8 in Abaqus) di dimensione 0.5 mm x 0.5 mm x 0.5 mm e in cui ciascuno degli otto vertici rappresenta un nodo (**Figura 5.5**). Nel compimento della simulazione è stata, inoltre, utilizzata la medesima mesh sia per l’analisi termica che per l’analisi meccanica, con lo scopo di facilitare il trasferimento del campo di temperatura dalla prima alla seconda.

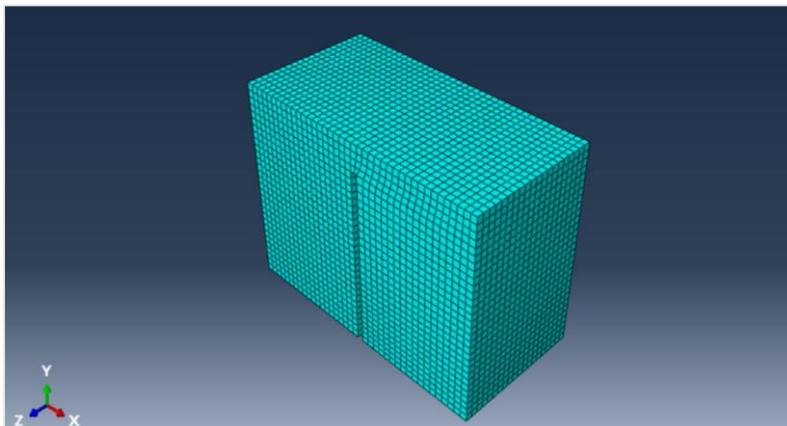


Figura 5.5: Mesh con elementi esaedrici applicata al componente e al supporto.

La natura additiva del processo viene comunemente modellata usando la tecnica “element birth and death”. In seguito alla creazione della mesh, tutti gli elementi che la compongono sono disattivati; successivamente, essi vengono nuovamente riattivati in maniera sequenziale in modo da mimare la costruzione strato su strato del componente. La logica sottostante al processo di riattivazione degli elementi verrà descritto nel successivo **Sottoparagrafo 5.3.2**.

5.3.2 Analisi termica

Per quanto riguarda l’analisi termica, come precedentemente detto, la presente simulazione in macroscale ignora i complessi meccanismi correlati alla pozza fusa e al processo di solidificazione, focalizzandosi, invece, sulla scala della dimensione della parte e permettendo, in questo modo, una mesh più ampia e uno step temporale più grande.

Uno degli strumenti più efficaci di cui Abaqus è dotato è il cosiddetto “tool path-mesh intersection module”. Questo riceve come input i dati relativi al percorso del recoater e al cammino di scansione della fonte energetica e incrocia questi ultimi con la mesh precedentemente creata. L’andamento spazio-temporale della sequenza di deposizione della polvere e del laser vengono immessi nel programma mediante due distinti file di testo che prendono il nome di “event series”. In particolare:

- L’event series relativo al recoater deve contenere i dati di tempo (t), coordinate spaziali (x,y,z) e condizione (“on/off”). Un estratto del file utilizzato per la simulazione è mostrato in **Figura 5.6**.

Event Series

Name : RecoaterPath

Event Series Type : Roller_OnAndOff

Time Span : TOTAL TIME

Event Series Data

From File D:/Esempi abaqus/temp/Recoater_1200-130.ir

From Table (recommended if data < 1 MB)

File Info

Selected file : "Recoater_1200-130.inp"

Data:

0.00000,-260,74.95,0.00,1

10.00000,340,74.95,0.00,0

.

.

9114.18598,340,74.95,14.98,0

Start time of the event Series = 0.0

End time of the event Series = 9114.18598

Figura 5.6: Campo “Event Series” del software Abaqus per l’inserimento dei dati relativi al percorso del recoater.

- L'event series relativo al percorso del laser deve contenere i dati di tempo (t), coordinate spaziali (x,y,z) e potenza (P). Un estratto del file utilizzato per la simulazione è mostrato in **Figura 5.7**.

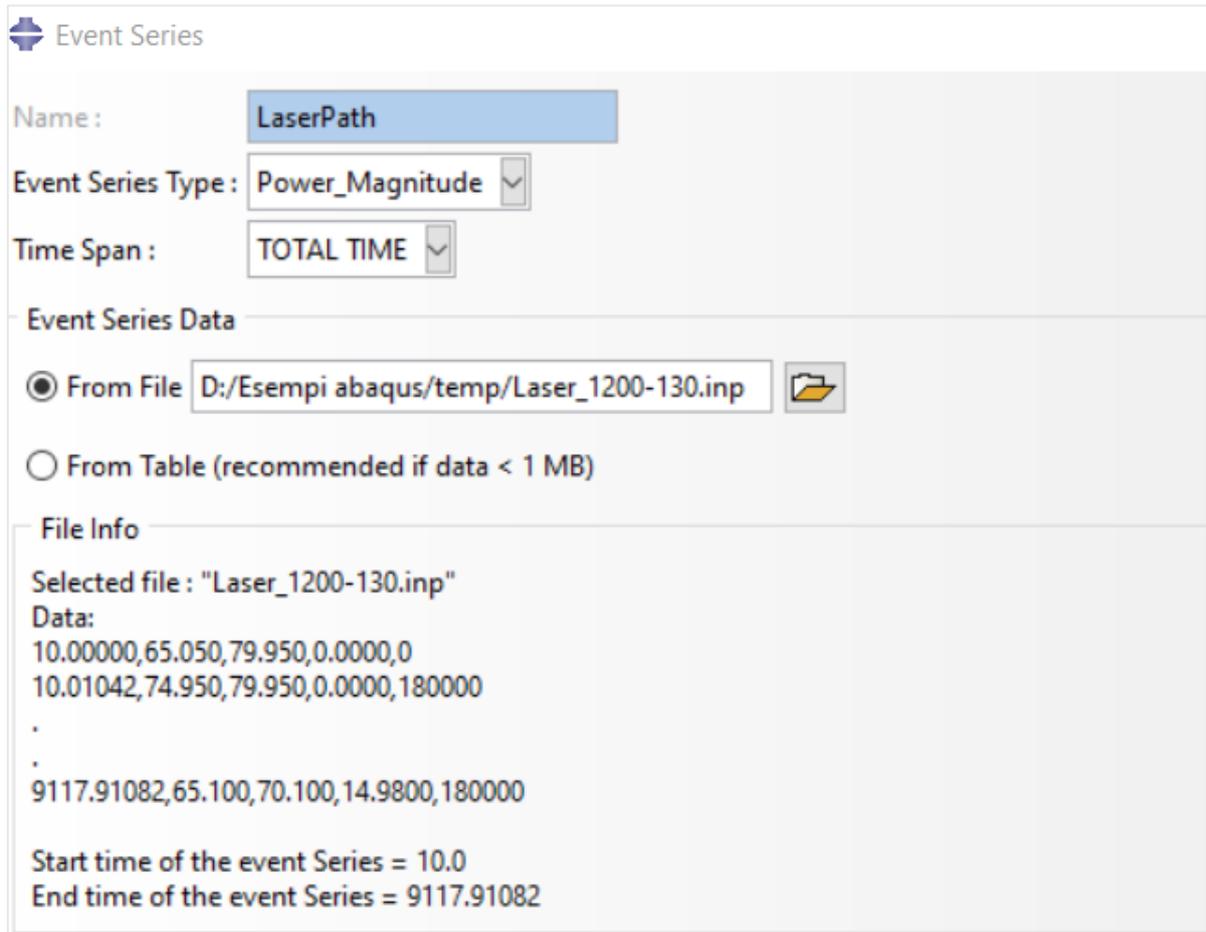


Figura 5.7: Campo “Event Series” del software Abaqus per l’inserimento dei dati relativi al percorso del laser.

Il toolpath-mesh intersection module confronta l’event series del recoater con la mesh, provocando l’attivazione progressiva degli elementi interessati dal movimento del recoater. Successivamente, ai soli elementi attivi, applica la fonte energetica in modo automatico secondo la traiettoria di scansione specifica nell’event series relativa al laser. Inoltre, per i soli elementi attivi il programma tiene traccia delle cosiddette “free surfaces”, le quali riflettono la forma momentanea dell’oggetto in costruzione e attraverso cui avviene il raffreddamento del componente per irraggiamento e convezione.

Per un corpo di densità costante e calore specifico isotropico, l’analisi termica è governata dall’equazione di equilibrio termico al transitorio (**Equazione 5.1**):

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{q}(\mathbf{r}, t) + Q(\mathbf{r}, t) \quad (5.1)$$

Dove:

- ρ è la densità [$\frac{Kg}{m^3}$].
- c_p è il calore specifico [$\frac{J}{Kg \cdot ^\circ C}$].

- T è la temperatura [$^{\circ}\text{C}$].
- t è il tempo [s].
- ∇ è la divergenza.
- \mathbf{q} è il flusso di calore [$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$].
- \mathbf{r} è la posizione relativa.
- Q è la sorgente di calore volumica [$\frac{\text{W}}{\text{m}^3}$].

Poiché la pozza fusa e i fenomeni associati non vengono presi in considerazione, la modalità dominante con cui il flusso di calore avviene nel componente è la conduzione. Per tale motivo, la distribuzione di calore attraverso la parte è descritta dall'equazione di Fourier che assume la forma (**Equazione 5.2**):

$$\mathbf{q} = -k\nabla T \quad (5.2)$$

Dove k è la conducibilità termica del componente [$\frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}$], considerata isotropica.

Affinché il software possa risolvere la precedente equazione, si rende necessario specificare le condizioni iniziali, il modello di input termico e le condizioni al contorno. In particolare, nella modellazione condotta sono state scelte le seguenti condizioni iniziali:

- Temperatura della polvere depositata pari a 25°C . Il valore iniziale di temperatura è definito assegnando esso ai nodi degli elementi attivi della mesh della parte da costruire.
- Temperatura di preriscaldamento della piastra di base pari a 60°C .

L'input di energia termica è stato modellato in termini di un flusso di calore volumetrico secondo la distribuzione ellissoidale di Goldak (**Figura 5.8**), rappresentata dal set di **Equazioni 5.3 e 5.4**:

$$\dot{Q}_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f\eta_{abs}P}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} e^{-\left(\frac{3x^2}{a_f^2} + \frac{3y^2}{b^2} + \frac{3z^2}{c^2}\right)} \quad (5.3)$$

$$\dot{Q}_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r\eta_{abs}P}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} e^{-\left(\frac{3x^2}{a_r^2} + \frac{3y^2}{b^2} + \frac{3z^2}{c^2}\right)} \quad (5.4)$$

Dove:

- $\dot{Q}(x,y,z)$ è il flusso di calore volumetrico [$\frac{\text{W}}{\text{m}^3}$].
- P è la potenza del laser [W].
- η_{abs} è il coefficiente di assorbimento della polvere, assunta pari a 0.45.
- a_f, a_r, b, c rappresentano i semiassi dell'ellissoide, il cui valore dipende dalle caratteristiche geometriche della sorgente [m].
- $f_f = 0.6$.
- $f_r = 1.4$.
- x, y, z rappresentano le coordinate del modello, in cui x è la direzione di scansione del laser e z è la direzione di costruzione.

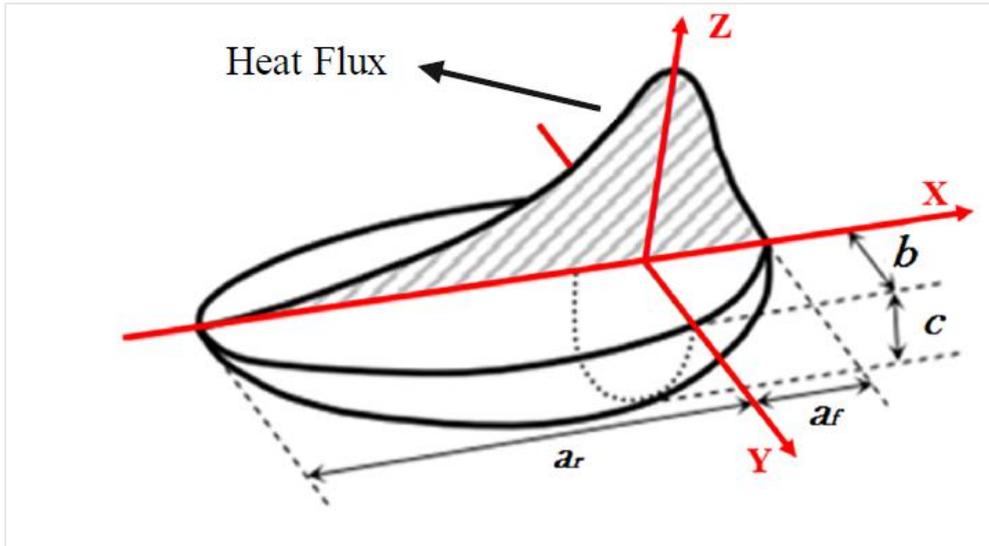


Figura 5.8: Flusso di calore volumetrico secondo la distribuzione ellissoidale di Goldak. Figura tratta da [56].

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, si assume che la superficie inferiore del componente mantenga durante tutto il processo la temperatura di preriscaldamento della piastra, ovvero 60 °C (**Equazione 5.5**). Inoltre, si ipotizza che il raffreddamento del pezzo avvenga attraverso le superfici libere del pezzo in evoluzione tramite meccanismo convettivo e radiativo (**Equazione 5.6**):

$$T(x, y, 0, t) = T_{piastra} \quad (5.5)$$

$$-k \frac{\delta T}{\delta n} = h(T - T_{\infty}) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_e^4) \quad (5.6)$$

Dove:

- \mathbf{n} è il versore normale alla superficie esterna.
- h è il coefficiente di film, considerato pari a $18 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right]$.
- T è la temperatura [°C].
- T_{∞} è la “sink temperature” che rappresenta la temperatura di ingresso del gas inerte immesso all’interno della camera. Il valore ipotizzato è di 26 °C.
- ε è il valore di emissività del pezzo, considerato costante e pari a 0.25.
- σ , pari a $5.67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$, è la costante di Stefan-Boltzmann.
- T_e è la temperatura ambiente, considerata pari a 26 °C.

Il tempo necessario per la realizzazione del componente è di 9118 secondi, ovvero circa 2 ore e 32 minuti. Tuttavia, dopo l’ultimo istante di tempo in cui avviene il riscaldamento (corrispondente per l’appunto a 9118 secondi dopo l’avvio del processo), nel compimento della simulazione, sono stati aggiunti circa ulteriori 60 secondi per modellare il completo raffreddamento del pezzo al termine del processo di stampa; ciò implica che il processo simulato ha una durata complessiva di 9178 secondi. Come output dell’analisi termica è stata ottenuta la temperatura dei nodi a ciascuno step temporale.

5.3.3 Analisi strutturale

Al termine dell'analisi termica l'evoluzione della temperatura in corrispondenza dei nodi è stata importata all'interno dell'analisi meccanica (**Figura 5.9**). Il processo di riattivazione sequenziale della mesh tramite il "toolpath-mesh intersection module" è identico a quello illustrato nel precedente **Sottoparagrafo 5.3.2**.

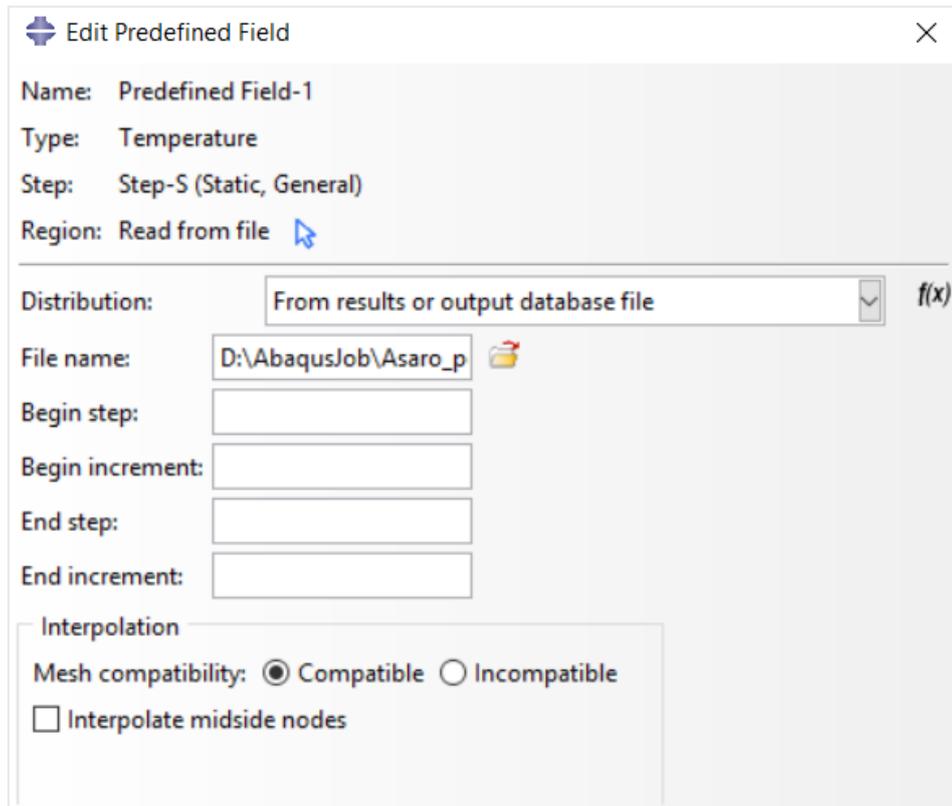


Figura 5.9: Campo "Edit Predefined Field" su Abaqus per l'inserimento dei dati relativi all'andamento della temperatura in corrispondenza dei nodi.

L'analisi strutturale è governata dall'equazione di equilibrio (**Equazione 5.7**):

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0 \quad (5.7)$$

Dove $\boldsymbol{\sigma}$ è il tensore degli sforzi.

Gli stress sono correlati alle deformazioni e alle proprietà del materiale tramite la relazione (**Equazione 5.8**):

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbb{C} \boldsymbol{\varepsilon}_{el} \quad (5.8)$$

Dove:

- \mathbb{C} rappresenta la matrice di rigidezza.
- $\boldsymbol{\varepsilon}_{el}$ è il tensore delle deformazioni elastiche.

Sappiamo, inoltre, che per deformazioni sufficientemente piccole la deformazione totale $\boldsymbol{\varepsilon}$ è data dalla somma delle deformazioni elastiche ($\boldsymbol{\varepsilon}_{el}$), plastiche ($\boldsymbol{\varepsilon}_{pl}$) e termiche ($\boldsymbol{\varepsilon}_{th}$) (**Equazione 5.9**):

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_{pl} + \boldsymbol{\varepsilon}_{el} + \boldsymbol{\varepsilon}_{th} \quad (5.9)$$

Nel caso in esame si assume che le deformazioni plastiche possano essere trascurate e che le deformazioni termiche siano pari a (**Equazione 5.10**):

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{th} = \alpha \Delta T \quad (5.10)$$

Dove:

- α è il coefficiente di espansione termica del materiale [$\frac{1}{^\circ\text{C}}$].
- ΔT è la variazione di temperatura associata allo step temporale.

Infine, come condizione al contorno dell'analisi strutturale, si assume che lo spostamento \boldsymbol{u} dei punti appartenenti alla superficie inferiore del componente e del supporto siano nulli (**Equazione 5.11**):

$$\boldsymbol{u}(x, y, 0, t) = 0 \quad (5.11)$$

In **Figura 5.10** è possibile vedere come viene visualizzata su Abaqus la precedente condizione al contorno.

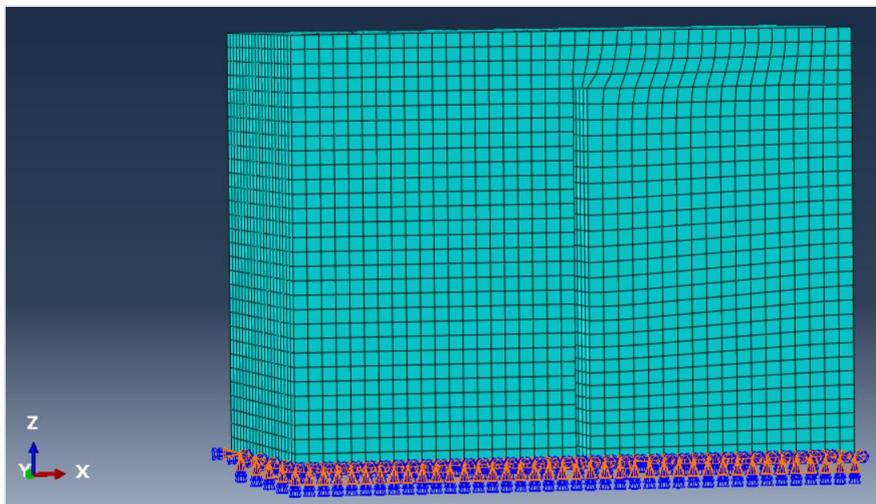


Figura 5.10: Condizione al contorno relativa allo spostamento nullo dei punti appartenenti alla superficie inferiore del pezzo e della piastra.

6. Risultati della simulazione e convalida del modello

Nel seguente capitolo vengono mostrati i risultati ottenuti dall'applicazione del modello termo-meccanico per il calcolo degli stress residui e delle deformazioni caratterizzanti il componente a L al termine del processo costruttivo. Successivamente, al fine di validare il suddetto modello, viene effettuata una comparazione tra le misure ricavate dalla simulazione e quelle ottenute dalla procedura sperimentale di stampa. Infine, vengono illustrati i dati ottenuti dall'effettuazione di ulteriori otto simulazioni numeriche, compiute, variando di volta in volta, il valore assunto dalla potenza e dalla velocità di scansione del laser applicate sul supporto.

6.1 Risultati della simulazione numerica

I dati di input immessi per la realizzazione della simulazione sono stati ampiamente illustrati nei capitoli precedenti. Si ricorda comunque che, per la costituzione del supporto, sono stati utilizzati un valore di potenza del laser pari a 130 W e un valore di velocità di scansione di 1200 mm/s.

La modellazione è stata realizzata mediante l'uso di una workstation con 4 processori. Per quanto riguarda lo step temporale scelto per la conduzione della simulazione numerica, in seguito a diversi tentativi e con lo scopo di non rendere il costo computazionale eccessivamente gravoso, si è ritenuto soddisfacente eseguire le analisi termiche e strutturali con un incremento temporale pari a 0.5 secondi. Un'ulteriore conferma dell'accuratezza e della precisione dei dati, ottenuti utilizzando il suddetto intervallo temporale, è deducibile dalle tempistiche di calcolo, rispettivamente di 8 ore e 10 ore, e dalla dimensione dei file contenenti i risultati, rispettivamente di 55 GB e di 32 GB.

6.1.1 Risultati dell'analisi termica

In **Figura 6.1** e in **Figura 6.2** vengono riportate, a titolo esemplificativo, le distribuzioni di temperatura caratterizzanti il pezzo (a destra) e il supporto (a sinistra) in fase costruzione a due differenti istanti temporali. I gradienti termici visibili sono di entità tale da giustificare l'insorgenza degli stress residui e delle deformazioni secondo il modello Temperature Gradient Mechanism. Si precisa che la scala termica in vista è riferita ai valori di temperatura globali ai nodi della mesh, in quanto localmente vengono di norma raggiunte temperature più elevate.

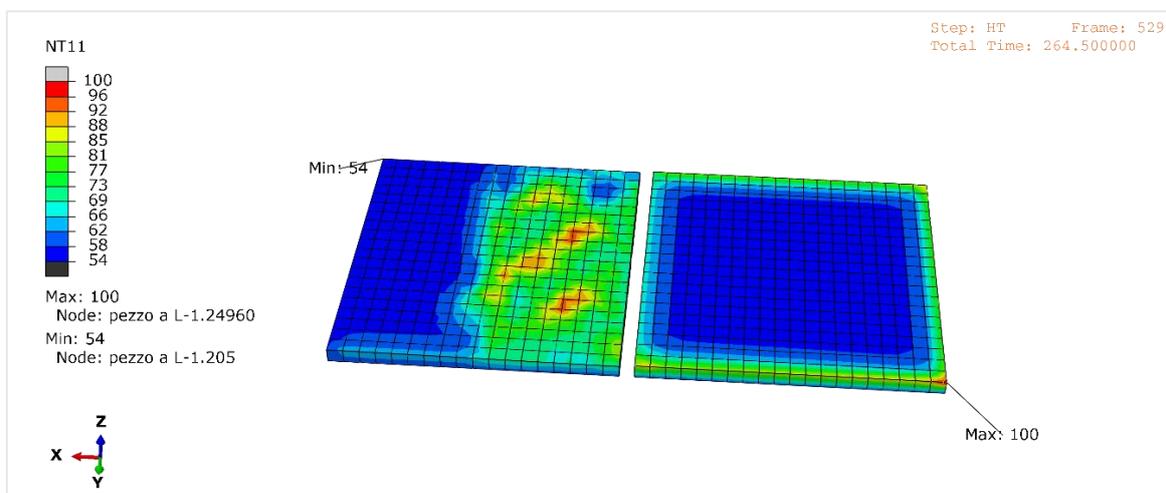


Figura 6.1: Profilo termico del componente a L (a destra) e del supporto (a sinistra) all'istante temporale di 264.5 s.

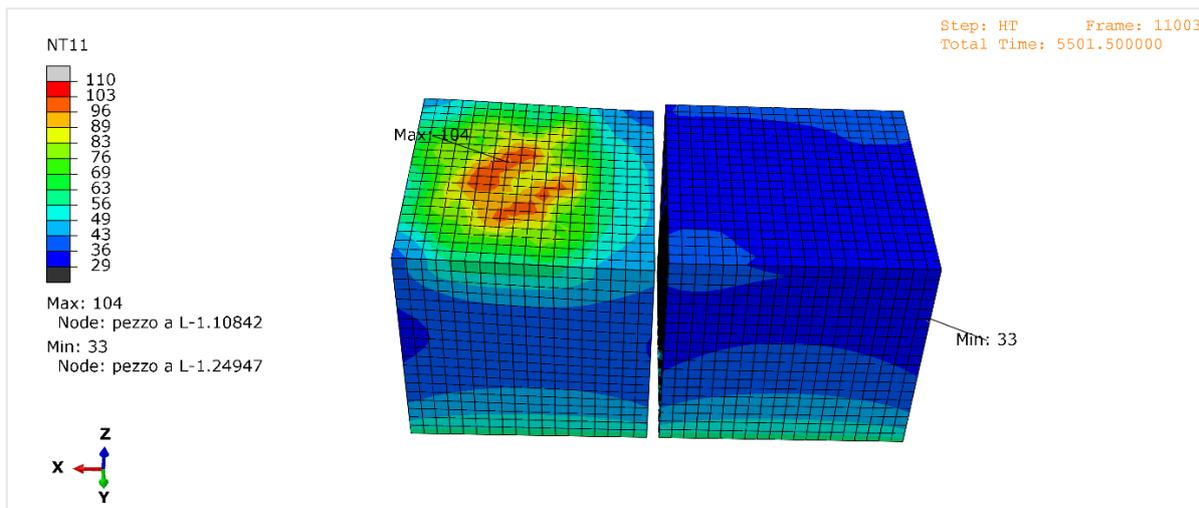


Figura 6.2: Profilo termico del componente a L (a destra) e del supporto (a sinistra) all'istante temporale di 5501.5 s.

Infine, in **Figura 6.3** viene riportato il profilo termico caratterizzante il componente al termine della sua realizzazione. Dalla ripartizione dei colori sulla griglia è possibile notare come la condizione al contorno, relativa alla temperatura della superficie inferiore del componente e del supporto a contatto con la piastra (che ricordiamo essere pari a 60 °C), influenzi la distribuzione dei gradienti di temperatura dall'inizio alla fine del processo di stampa.

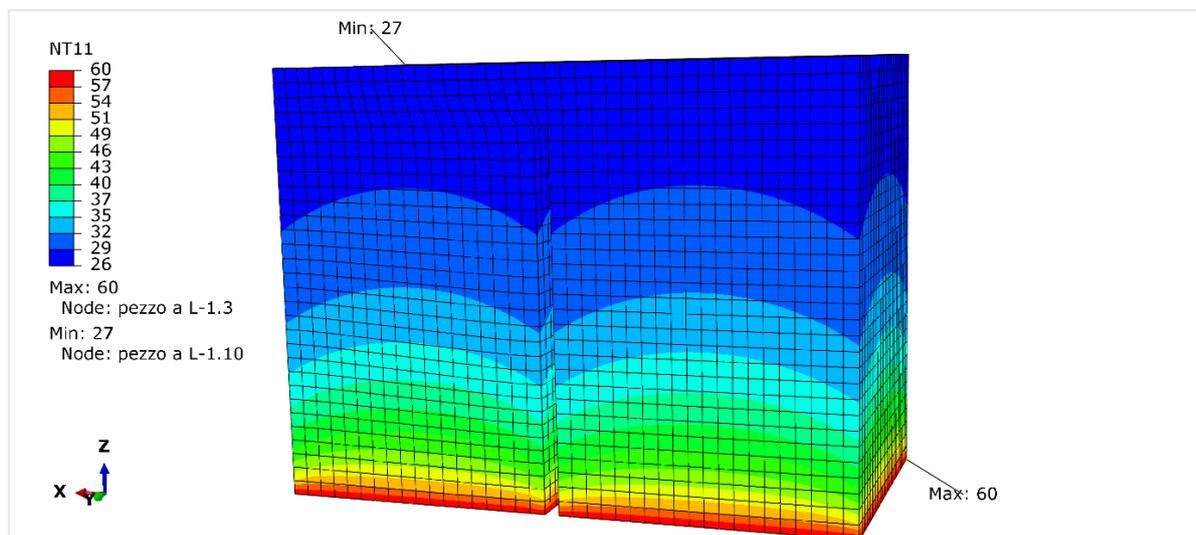


Figura 6.3: Profilo termico del componente a L (a destra) e del supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

Procedendo dal basso verso l'alto, si osserva una progressiva diminuzione di temperatura: al termine del processo di costruzione, il valore massimo di temperatura si registra in corrispondenza dei nodi situati sulla superficie inferiore del pezzo, ed è pari a 60 °C, mentre il valore minimo, pari a 27 °C, si registra in corrispondenza di alcuni nodi situati sulla superficie superiore. In senso longitudinale è, invece, possibile osservare come, sia nel componente che nel supporto, si abbia un andamento della temperatura a forma di arco, con un picco in corrispondenza della zona centrale di ciascuno strato e una differenza

tra tale temperatura e quella dei nodi di estremità di circa 2 °C. Questo duplice andamento termico è dovuto anche alla condizione al contorno relativa al raffreddamento delle superfici laterali a contatto con la polvere, tramite meccanismo conduttivo, e con il gas inerte, tramite meccanismo radiativo e convettivo. Il fatto che nessun nodo raggiunga la temperatura dell'ambiente di stampa, uguale a 26 °C, è indice del fatto che i 60 secondi aggiunti al termine del processo siano insufficienti per permettere un completo raffreddamento del pezzo.

6.1.2 Risultati dell'analisi strutturale

Passando alla visualizzazione dei dati ricavati dall'analisi strutturale, vengono esibiti, qui di seguito, i risultati relativi alla distribuzione degli stress e alle distorsioni gravanti sul componente finito e sul relativo supporto. Per la presentazione dei risultati, si è scelto di mantenere la medesima vista indicata precedentemente in **Figura 4.11**, in maniera tale da consentire una maggiore facilità di comparazione. Si precisa che i tutti i valori di tensione riportati sono espressi in MPa.

In **Figura 6.4** viene riportata la distribuzione degli stress di Von Mises lungo l'intero blocco. Da essa è possibile pervenire alle seguenti conclusioni:

- Per entrambe le entità, le tensioni maggiori sono localizzate in corrispondenza degli spigoli inferiori in quanto, a causa della condizione strutturale di incastro della superficie inferiore su un ipotetica piastra, essi tenderanno a deformarsi ma invano.
- Il componente a L è soggetto a tensioni di entità maggiore rispetto a quelle gravanti sul supporto. Ciò è dovuto alla differente strategia di scansione utilizzata per la loro realizzazione, alla maggiore superficie specifica del supporto che consente a quest'ultimo di dissipare in maniera più rapida il calore in eccesso e, soprattutto, al fatto che la densità di energia volumetrica (VED), che interessa il pezzo, è di un ordine di grandezza superiore rispetto a quella che interessa il supporto.

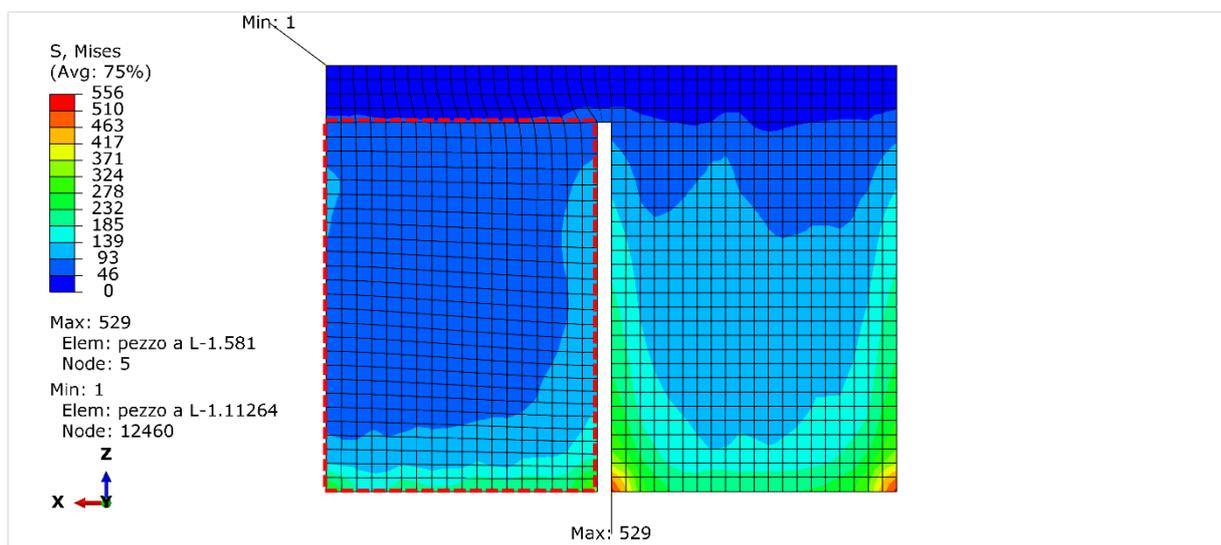


Figura 6.4: Distribuzione degli stress di von Mises gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

Al fine di comprendere in dettaglio le zone interessate da fenomeni di trazione e quelle interessate da fenomeni di compressione, vengono in aggiunta mostrati i dati di distribuzione delle tensioni relative agli assi x (S11), y (S22) e z (S33).

Per quanto riguarda la distribuzione degli stress lungo l'asse x (S11), dalla **Figura 6.5** è possibile osservare la presenza di tensioni di trazione di entità elevata in corrispondenza del gap presente tra il

pezzo e il supporto. Si tratta dell'area in cui avviene la modifica della sezione trasversale del componente a L e dove è maggiormente evidente la transizione dei parametri di processo che interessano il pezzo e il supporto. D'altro canto, le tensioni di compressione assumono valore massimo in corrispondenza della zona di contatto tra il blocco e l'ipotetica piastra per via della presenza dell'incastro.

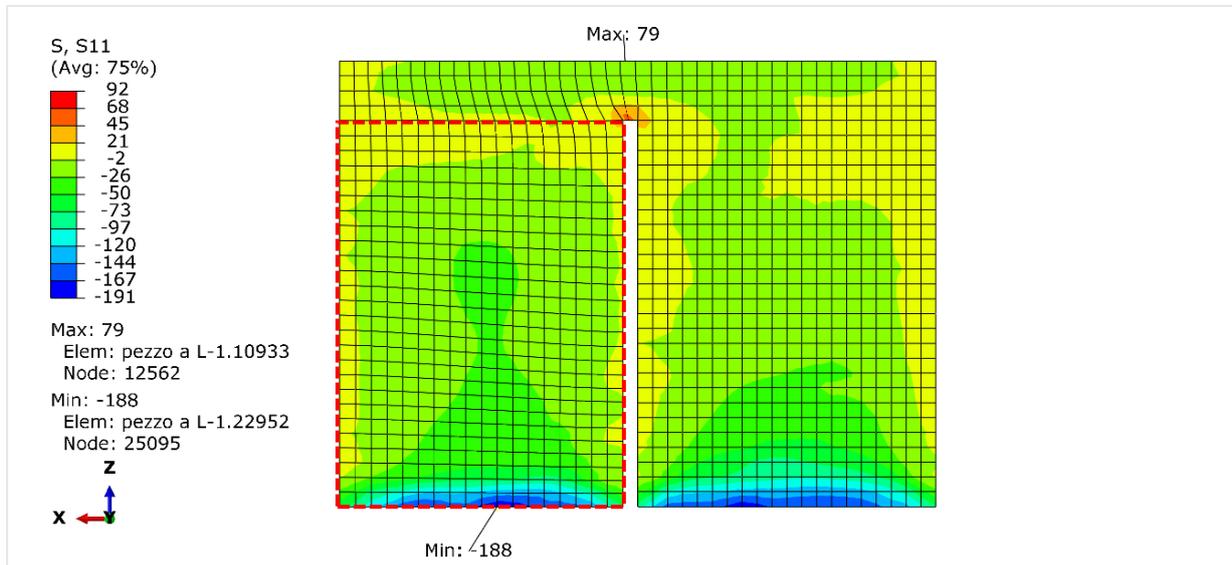


Figura 6.5: Distribuzione degli stress S11 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

La distribuzione delle tensioni lungo l'asse y (S22) viene mostrata in **Figura 6.6**. Anche in questo caso la presenza di tensioni di compressione nella zona di contatto tra il blocco e l'ipotetica piastra può essere giustificata facendo riferimento alla condizione di incastro. Inoltre, la presenza di tensioni di trazione di modesta entità normali al piano x-z è dovuta al fatto che i diversi strati sono riscaldati e raffreddati alternativamente e tale processo non consente la corretta distensione del componente.

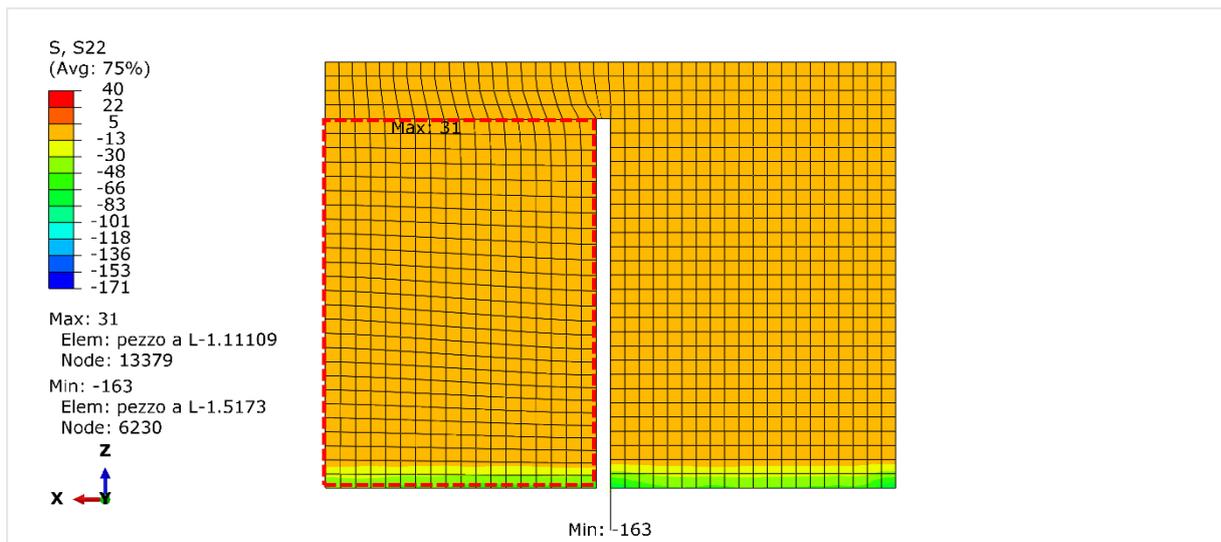


Figura 6.6: Distribuzione degli stress S22 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

Certamente di maggiore interesse risulta essere la distribuzione delle tensioni lungo l'asse z (S33), illustrata in **Figura 6.7**. Man mano che ci si sposta dal basso verso l'alto, si passa da valori elevati di tensioni di compressione a valori elevati di tensione di trazione, risultati in accordo ai dati ottenibili dalla letteratura. Come precedentemente detto, infatti, il gradiente degli sforzi assume valore massimo lungo l'asse verticale (asse z) poiché è proprio lungo tale asse che, in fase di costruzione, si hanno i più elevati gradienti di temperatura.

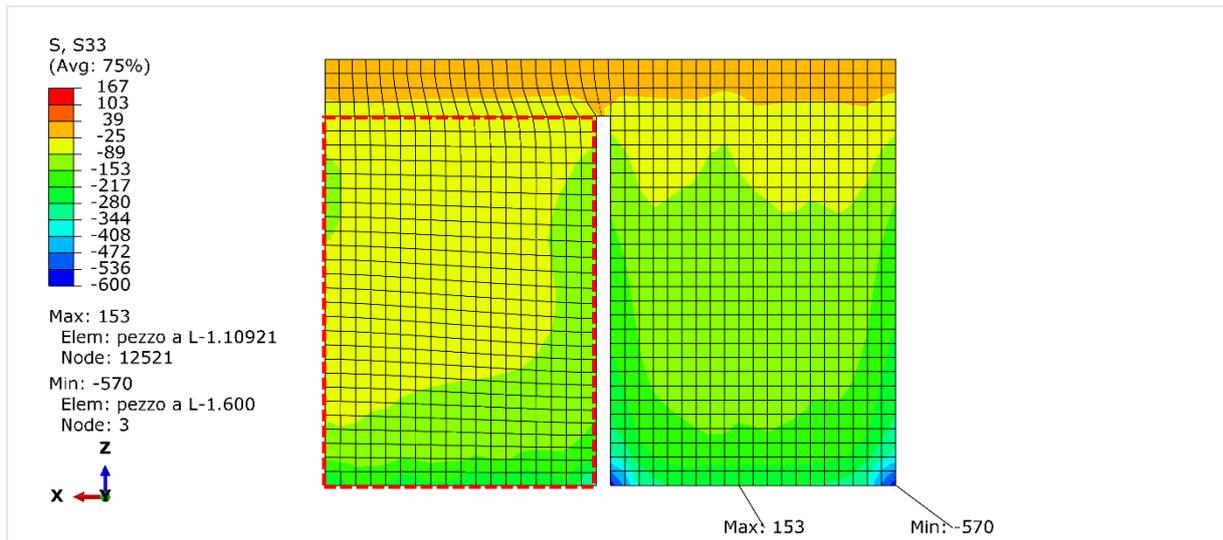


Figura 6.7: Distribuzione degli stress S33 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

Inoltre, come visibile in **Figura 6.8**, sono presenti tensioni di trazione S33 di notevole entità nell'intera zona di contatto tra il pezzo e la piastra, proprio come se il blocco venisse "tirato" verso l'alto lungo l'asse z.

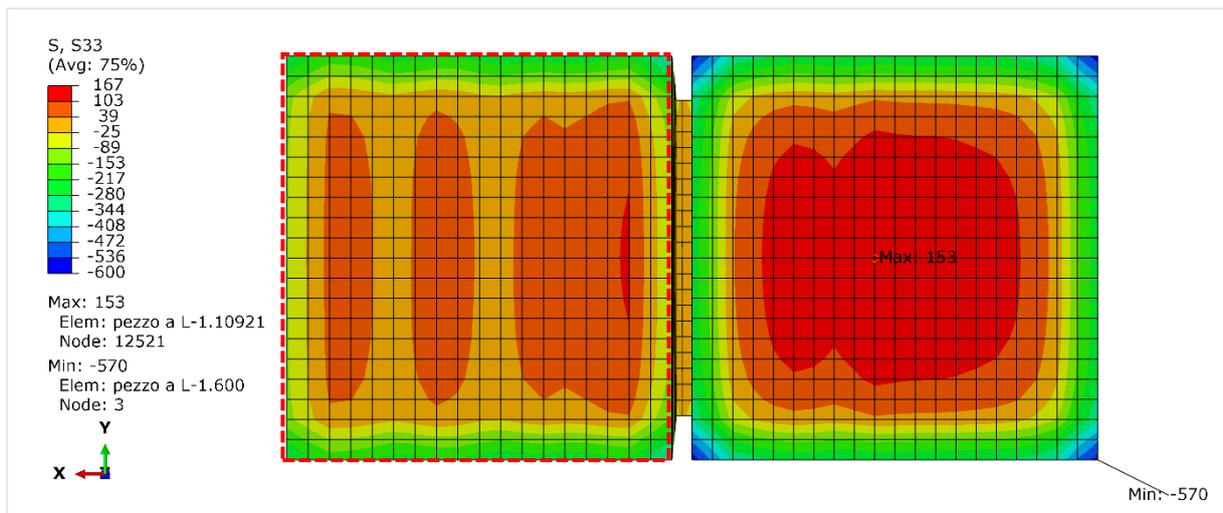


Figura 6.8: Distribuzione degli stress S33 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

Infine, in **Figura 6.9**, è possibile attenzionare la distribuzione delle distorsioni globali U gravanti sulle diverse zone del componente e del supporto. Si precisa che i tutti i valori di distorsione riportati sono espressi in mm. In accordo a quanto ottenuto dalla procedura sperimentale, esse si concentrano soprattutto in corrispondenza di metà altezza del pezzo, causando l'ingrossamento di quest'ultimo lungo la direzione x e la conseguente diminuzione della distanza di gap tra il pezzo e supporto. Rimangono quasi del tutto invariate le dimensioni relative alla lunghezza della superficie superiore e alla lunghezza totale (componente più supporto) della superficie inferiore grazie alla condizione di incastro sull'ipotetica piastra, il che provoca il suddetto ingrossamento.

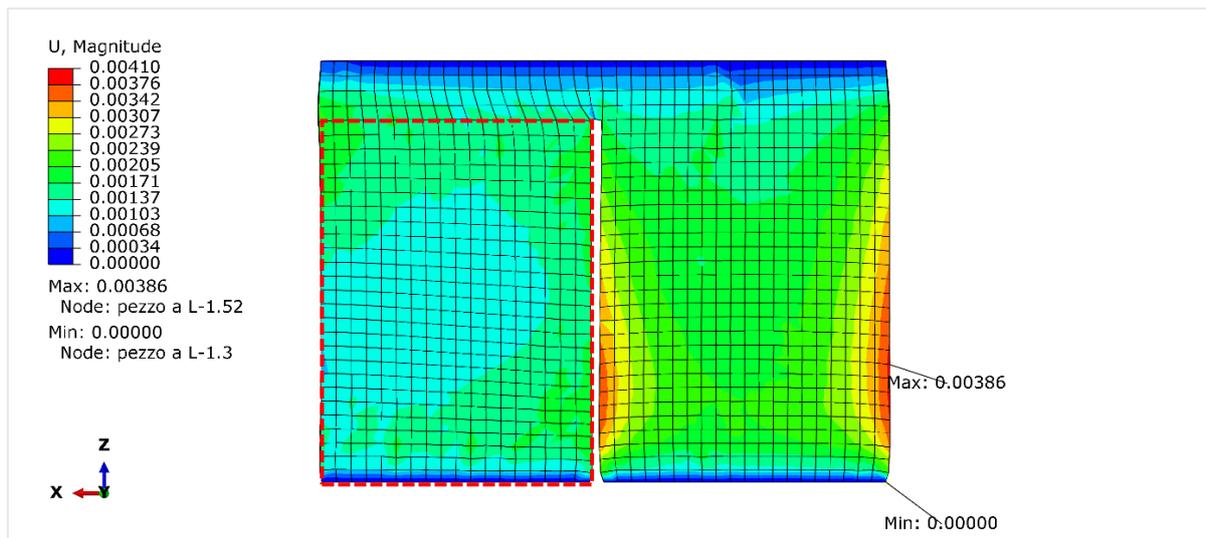


Figura 6.9: Distribuzione delle distorsioni gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

Al fine di visualizzare al meglio e in dettaglio le distorsioni gravanti sull'intero blocco, in **Figura 6.10** è stata sovrapposta la mesh relativa all'oggetto non deformato (in grigio) con quella relativa all'oggetto deformato (in verde).

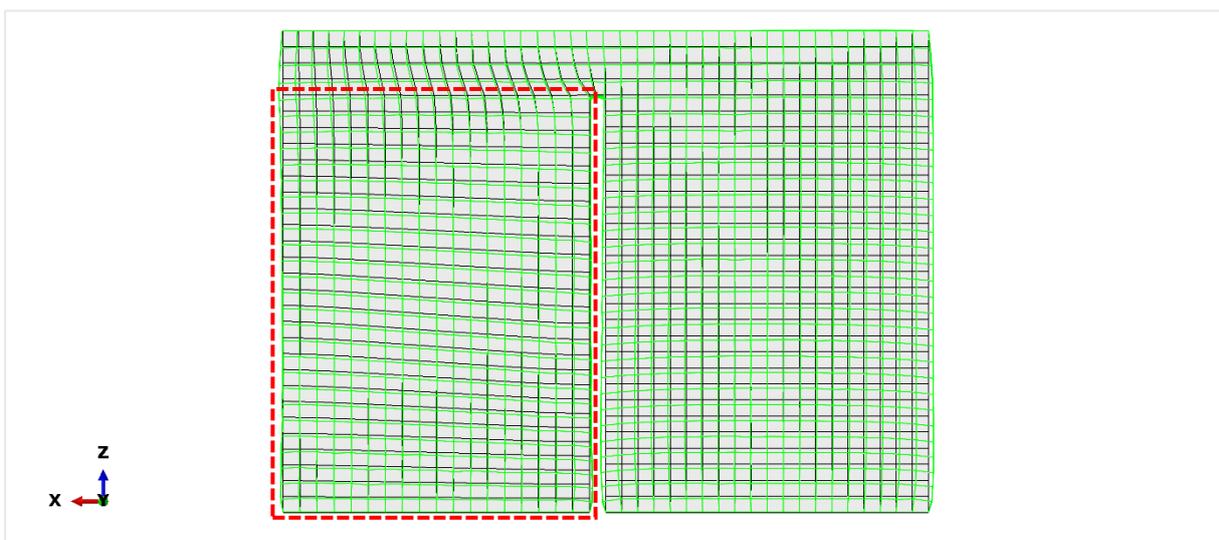


Figura 6.10: Sovrapposizione della mesh relativa all'oggetto non deformato (in grigio) con quella relativa all'oggetto deformato (in verde).

6.2 Confronto tra i valori di misura e i valori della prima simulazione

Affinché il modello numerico utilizzato possa essere ritenuto valido, si rende necessario confrontare i dati da esso ottenuti con quelli ricavati nella pratica. A tale scopo, si riporta la **Figura 6.11**, già introdotta nel **Capitolo 4**.

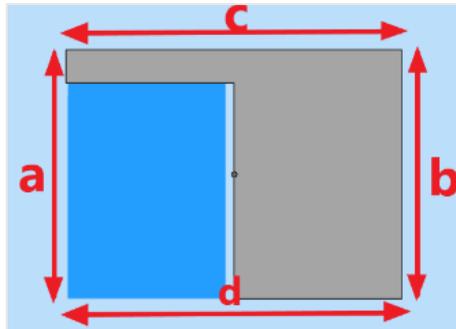


Figura 6.11: Schema raffigurante le misure effettuate su pezzo e supporto.

Nonostante le distorsioni risultanti siano di lieve entità a causa sia della natura del materiale in esame che del carattere inevitabilmente approssimativo del modello utilizzato, esiste un trend generale che accomuna queste con le misurazioni effettuate durante la procedura sperimentale. Come si evince dalla **Tabella 6.1**, a causa del rigonfiamento del pezzo, si ha una diminuzione delle due altezze “a” e “b”, con “a” che assume un valore inferiore rispetto a “b”. In corrispondenza della zona supportata si hanno, in generale, maggiori deformazioni e un più accentuato abbassamento del componente, per via delle differenze strutturali tra il supporto e il pezzo. La quantità di materiale richiesto per la realizzazione del supporto è inferiore a quella richiesta per la realizzazione della parte, per cui, nel momento in cui viene depositato sul supporto il primo strato di polvere appartenente al componente a L, questa sarà a contatto con una superficie irregolare e con capacità ridotta di dissipare calore; questi fattori tenderanno ad acuire le deformazioni.

Per quanto riguarda le distorsioni in senso longitudinale, esse sono quasi del tutto trascurabili. Sia nel caso della procedura sperimentale che nel caso della simulazione, le due lunghezze “c” e “d” rimangono pressoché invariate rispetto al valore desiderato, ovvero 20 mm.

Tabella 6.1: Riassunto delle misure e del loro relativo errore assoluto.

Dimensione di riferimento	Misure reali [mm]	Misure ottenute dalla simulazione [mm]	Errore assoluto [mm]
a)	14.84	14.99	0.15
b)	14.93	14.99	0.07
c)	19.99	20	0.01
d)	19.99	20	0.01

Come si evince dalla precedente tabella, il valore di errore assoluto più critico risulta essere quello riferito alla misura “a”. Nonostante ciò, si ritiene che il modello impiegato possa essere considerato corretto.

6.3 Risultati di ulteriori simulazioni

Allo scopo di valutare l'influenza della potenza del laser e della velocità di scansione sulle caratteristiche del supporto, sono state compiute ulteriori otto simulazioni variando di volta in volta il valore assunto da questi due parametri di processo e, di conseguenza, la VED insistente sul supporto.

Il pezzo sottoposto a simulazione possiede le medesime caratteristiche geometriche del componente utilizzato nella precedente simulazione. Inoltre, i restanti parametri di processo, sia quelli relativi al supporto che quelli relativi al pezzo, sono stati mantenuti invariati rispetto al caso base.

A causa dello scarso tempo a disposizione per l'ultimazione del presente lavoro, si è deciso di aumentare l'incremento temporale della simulazione precedente, passando da 0.5 secondi a 10 secondi. Tuttavia, prima di procedere con questa operazione, si è ritenuto opportuno verificare l'attendibilità di tale scelta valutando la differenza delle temperature nodali risultanti da due analisi termiche (di cui la prima condotta con Δt pari a 0.5 secondi e la seconda con Δt pari a 10 secondi) applicate al caso base. Queste differenze di temperatura sono state calcolate su alcuni nodi scelti in maniera casuale a tre diversi istanti temporali, ovvero t_1 pari a 50 s, t_2 pari a 4500 s e t_3 pari a 9130 s. I risultati di tale analisi sono mostrati in **Tabella 6.2**.

Tabella 6.2: Confronto delle temperature nodali risultanti dalle due analisi termiche caratterizzate rispettivamente da uno step temporale di 0.5 secondi e di 10 secondi.

Istante temporale [s]	Potenza laser supporto [W]	Velocità di scansione supporto [mm/s]	Temperatura con $\Delta t = 0.5s$ [°C]	Temperatura con $\Delta t = 10s$ [°C]	Nodo di riferimento	Errore assoluto [°C]
$t_1 = 50$	130	1200	57.2429	57.293	18196	0.0501
			57.5421	57.7412	18663	0.1991
			57.6795	57.8193	7466	0.1398
			57.4531	57.4817	6976	0.0286
$t_2 = 4500$	130	1200	43.3311	43.2902	14525	0.0409
			37.3719	37.3548	4557	0.0171
			36.9757	35.2777	20404	1.698
			37.3037	36.4991	10457	0.8046
$t_3 = 9130$	130	1200	27.3156	27.4691	27.165	0.1535
			27.3156	27.4691	27.9271	0.1535
			27.2701	27.4221	28.058	0.152
			27.3156	27.4691	27.3878	0.1535

Dall'osservazione della precedente tabella, si nota come le suddette differenze siano di gran lunga trascurabili, aggirandosi attorno a un valore dell'ordine di $10^{-1}/10^{-2}$. Il valore più elevato si attesta nel caso del nodo numero 20404 all'istante temporale t_2 pari a 1.698 °C. Pertanto, nonostante si perda un po' di precisione e accuratezza, si può ritenere soddisfacente la decisione presa in relazione alla variazione dell'incremento temporale. In media le nuove analisi termiche e strutturali hanno richiesto un tempo computazionale rispettivamente di 30 minuti e di 1 ora, con una dimensione media di file contenenti i risultati rispettivamente di 2.76 GB e di 1.56 GB.

In **Tabella 6.3** vengono riportate le caratteristiche geometriche e i parametri di processo inerenti al supporto per le ulteriori otto simulazione compiute.

Tabella 6.3: Parametri di processo e caratteristiche geometriche del supporto sottoposto a simulazione.

Caso	Potenza laser supporto [W]	Velocità di scansione supporto [mm/s]	Spessore dello strato [mm]	Densità di energia volumetrica [J/mm ³]	Distanza di hatch [mm]	Intervallo di frammentazione [mm]	Distanza di separazione [mm]
1	130	1200	0.02	10.833	0.5	3.5	0.5
2	50	1200	0.02	4.167	0.5	3.5	0.5
3	80	1200	0.02	6.667	0.5	3.5	0.5
4	140	1200	0.02	11.667	0.5	3.5	0.5
5	170	1200	0.02	14.167	0.5	3.5	0.5
6	110	800	0.02	13.75	0.5	3.5	0.5
7	110	1000	0.02	11	0.5	3.5	0.5
8	110	1400	0.02	7.857	0.5	3.5	0.5
9	110	1600	0.02	6.875	0.5	3.5	0.5

Le simulazioni dalla 2 alla 5 sono state eseguite mantenendo costante il valore della velocità di scansione e variando la potenza del laser incidente sul supporto da 50 W a 170 W, mentre le restanti sono state condotte mantenendo fisso il valore di potenza del laser e variando la velocità di scansione da 800 mm/s fino a 1600 mm/s.

In **Appendice B** vengono mostrati i profili termici, le distribuzioni degli stress residui e le deformazioni ottenute in seguito al compimento delle diverse simulazioni in esame. In **Tabella 6.4** vengono riportati alcuni dei principali risultati, compresi quelli relativi alla prima simulazione, al fine di permettere un rapido confronto.

Tabella 6.4: Riassunto dei risultati di stress e distorsioni per ciascuna simulazione.

Caso	Valore massimo stress di von Mises [MPa]	Valore minimo stress di von Mises [MPa]	Valore massimo deformazione globale U [mm]	Valore minimo deformazione globale U [mm]	Intervallo temporale Δt [s]
1-a	529	0.8	0.0039	0	0.5
1-b	554	1.2	0.0040	0	10
2	554	1.2	0.0040	0	10
3	554	1.2	0.0040	0	10
4	554	1.2	0.0040	0	10
5	554	1.2	0.0040	0	10
6	549	2	0.0040	0	10
7	549	2.1	0.0040	0	10
8	555	1.5	0.0041	0	10
9	551	1.7	0.0040	0	10

Comparando i valori assunti da tensioni e distorsioni, nonché le mappe di colore in **Appendice B**, è possibile effettuare le seguenti osservazioni:

- Mantenendo costante la velocità di scansione e variando la potenza del laser, le grandezze relative agli stress di von Mises e alle distorsioni rimangono pressoché invariate. Ciò è dovuto all'incremento temporale scelto (10 secondi) che genera una bassa precisione e accuratezza dei risultati ma è anche indice del fatto che, almeno per quanto riguarda l'intervallo di potenza scelto, la potenza del laser influenza solo debolmente lo sviluppo di tensioni residue e di deformazioni.
- Mantenendo costante la potenza del laser e variando la velocità di scansione, si osserva che, per velocità di scansione maggiori, il valore assunto dalle tensioni tende ad aumentare. Ciò è dovuto alla conseguente riduzione del tempo di raffreddamento, il quale non garantisce una dispersione del calore ottimale. Nel caso della simulazione 9, tale andamento non viene più rispettato e si osserva una diminuzione della tensione. È probabile che, per velocità di scansione così elevate, ovvero 1600 mm/s, il laser si muove così velocemente da trasferire un'energia talmente limitata da non consentire la completa fusione della polvere in corrispondenza del supporto. L'effetto della velocità di scansione sulle distorsioni è scarsamente visibile sia per le ragioni di precisione e accuratezza precedentemente citate che per la natura intrinseca del materiale, caratterizzato da una bassa tendenza a deformarsi.

7. Conclusione e discussione

Come precedentemente detto, l'obiettivo del presente lavoro di tesi è stato quello di studiare ed applicare un modello in grado di prevedere le tensioni residue e deformazioni caratterizzanti un componente a L in Inconel 718, realizzato tramite la tecnologia additiva di Selective Laser Melting. A tale scopo, si è fatto uso del software Abaqus, in grado di simulare il processo di stampa attraverso il compimento di un'analisi termica e una conseguente analisi meccanica. Tenendo in considerazione i risultati acquisiti dalla simulazione e l'ottenimento della convalida sperimentale del modello utilizzato, è possibile affermare che l'obiettivo preposto è stato ampiamente raggiunto. Sicuramente c'è ancora molto lavoro da eseguire per migliorare questo tipo di approccio, ma è stato perlomeno compiuto un primo passo che verosimilmente in futuro porterà all'eliminazione, o quantomeno alla drastica riduzione, di un approccio del tipo "prova e sbaglia", ancora oggi largamente impiegato in campo additive, consentendo in questo modo una riduzione del tempo e dei costi associati al processo reale di stampa.

7.1 Conclusioni dei risultati e punti salienti importanti

Dalla comparazione dei dati ottenuti dalle nove simulazioni effettuate emerge un risultato molto interessante: è, infatti, evidente come i risultati migliori si ottengono scegliendo parametri di processo differenti da quelli considerati ottimali. Le tensioni residue inferiori sono state, difatti, ottenute per i casi 6 e 7, facenti uso di una potenza del laser sul supporto di 110 W e di una velocità di scansione del supporto rispettivamente pari a 800 mm/s e 1000 mm/s. Ciò è dovuto al fatto che, fornendo meno potenza con una velocità di scansione inferiore, si trasferisce una quantità di energia ancora in grado di provocare la fusione della polvere ma in un tempo superiore. Poiché la temperatura ha un lasso di tempo superiore, per aumentare e permanere sul supporto ne consegue l'ottenimento di un supporto di migliore qualità e lo sviluppo di tensioni di minore entità sull'intero blocco. Peraltro, sebbene per ragioni di spazio i risultati non siano stati qui riportati, l'applicazione di questo nuovo set di parametri di processo durante il processo reale di stampa del componente a L ha effettivamente portato all'ottenimento di pezzi di qualità migliore rispetto a quelli ottenuti precedentemente con il set di parametri considerati ottimali. Ne emerge come la simulazione condotta si sia rivelata di notevole utilità anche all'atto pratico.

Infine, sebbene non si siano potute ricavare informazioni consistenti riguardanti il legame tra velocità di scansione e potenza del laser sul supporto e incidenza delle distorsioni, soprattutto in relazione alle due altezze "a" e "b", sulla base degli studi realizzati e dei risultati della letteratura, è possibile effettuare alcune previsioni che potranno essere confermate da futuri studi sperimentali e simulazioni:

- Una riduzione della potenza rispetto a quella ottimale fa sì che la VED sul supporto sia insufficiente per permettere una completa fusione della polvere costituente il supporto. Poiché la costruzione di quest'ultima non avviene correttamente esso tenderà a dare vita a fenomeni di distacco e a generare un abbassamento dell'altezza del pezzo dal lato supportato.
- Un aumento della potenza rispetto al valore ottimale fa sì che la VED sul supporto sia così elevata da permettere una corretta fusione della polvere ma impedire un'ottimale dissipazione del calore. Ciò ovviamente tenderà a generare maggiori tensioni residue sul supporto. Per quanto riguarda le distorsioni, ci si aspetta che la crescita lungo la direzione di costruzione sia superiore rispetto al caso in cui viene utilizzata una potenza inferiore. Ciò implicherà una minore difformità tra le altezze "a" e "b".
- Anche una diminuzione della velocità di scansione provoca un aumento della VED sul supporto in quanto il laser tende a colpire la medesima area per un intervallo di tempo più lungo. I maggiori stress residui tenderanno a originare fenomeni di cracking sul supporto quando l'intero blocco verrà separato dalla piastra. Inoltre, poiché come evidenziato dalle simulazioni l'effetto della diminuzione della velocità di scansione è maggiore rispetto a quello dell'aumento di potenza del

laser, è possibile che la crescita in direzione verticale della parte supportata sia tale da generare un'inversione di tendenza con "a" maggiore di "b".

- Infine, un aumento della velocità di scansione avrà un effetto comparabile a quello ottenibile con una diminuzione della potenza con insorgenza di una depressione dell'altezza del lato supportato.

7.2 Prossimi passi e lavori futuri - connessi a nuove tesi

Il modello utilizzato ai fini dello svolgimento del presente lavoro di tesi è sicuramente alquanto semplicistico, in quanto, per il compimento della simulazione, sono state considerate valide ipotesi approssimative rispetto al caso reale. Ciò si è reso necessario dall'esigenza di ottenere dei risultati il più possibile aderenti alla realtà minimizzando, tuttavia, il costo computazionale. Per tale motivo, si prospettano molti lavori futuri riguardo tale argomento, i quali potranno consentire di migliorare l'accuratezza e la precisione del modello in questione.

In particolare, gli aspetti che meritano un successivo approfondimento sono:

- Separazione e individualizzazione dei blocchi di pezzo e supporto. Si potrebbero creare mesh con elementi di dimensione differente per ciascun blocco al fine di tenere in considerazione le differenze costitutive dei due oggetti. La zona di contatto tra quest'ultimi dovrà essere opportunamente modellata, mediante utili funzionalità del software Abaqus, con lo scopo di simulare in maniera ottimale i fenomeni di trasferimento di calore e sviluppo degli stress residui in tale area.
- Modellazione della piastra. È stato più volte detto che nel processo di stampa il componente viene realizzato su di una piastra, solitamente di alluminio o acciaio, che risulta essere fondamentale ai fini strutturali e di scambio termico. Si potrebbe, quindi, pensare di modellare la piastra a contatto con la base di pezzo e supporto, avente una propria mesh e sul cui volume può essere applicata la condizione al contorno di preriscaldamento. Anche in questo caso la zona di contatto tra essa e i restanti oggetti dovrà essere opportunamente modellata.
- Modellazione della polvere metallica. Si potrebbe effettuare la simulazione tenendo in considerazione la presenza della polvere metallica che circonda il pezzo e il supporto in fase di costruzione. Essa, infatti, possiede proprietà chimico-fisiche peculiari rispetto a quest'ultimi (il materiale è lo stesso ma è come se fosse in un altro stato di aggregazione). La temperatura della polvere "fredda" dovrà essere definita come condizione al contorno applicata alle superfici libere di pezzi e supporti durante il processo di stampa.
- Considerazione e modellazione dei fenomeni fisico-chimici in microscala. Ci si riferisce, in particolare, ai fenomeni che avvengono a livello microscopico, ovvero i cambiamenti di stato e di fase cristallina da solido (precipitazione metallica) a liquido (pozza fusa) a gassoso (fumi di combustione) durante la fusione e la successiva solidificazione della lega metallica.
- Introduzione e simulazione della corrente di gas inerte. Nel presente lavoro di tesi è stato impostato il raffreddamento statico dei componenti metallici tramite il gas di flussaggio, ma non è stata considerata una vera e propria corrente gassosa che, come nel processo reale, permette il raffreddamento del componente e l'eliminazione dei fumi di combustione.
- Approfondimento degli aspetti legati al posizionamento e all'orientamento del pezzo all'interno della camera di costruzione. Poiché tali aspetti hanno una notevole influenza sulle caratteristiche meccaniche del prodotto finito, è importante prestare attenzione al loro corretto settaggio.
- Miglioramento dell'accuratezza dell'analisi. A questo scopo, è consigliabile diminuire l'element size della mesh, in modo tale che l'altezza degli elementi attivati che compongono uno strato di mesh sia paragonabile allo spessore dello strato reale. Inoltre, è necessario ridurre il più possibile l'intervallo temporale delle analisi termiche e strutturali, al fine di prendere in considerazione tutti i fenomeni che avvengono in termini di millesimi di secondo.

- Modifica dei parametri geometrici del supporto. Esistono svariati tipi di supporto, ognuno dei quali adatto a una particolare applicazione. Di conseguenza, per comprendere quale supporto sia maggiormente indicato al fine di minimizzare stress e deformazioni gravanti sul pezzo finito, è consigliabile effettuare diverse simulazioni con differenti tipologie di supporto.
- Modellazione della stampa contemporanea di più componenti. Solitamente, quando si decide di usare una stampante 3D, si realizzano più pezzi all'interno della camera di costruzione con lo scopo di massimizzare la produttività del processo. Si potrebbe pensare di simulare tale condizione mediante un software, in modo da tenere in considerazione l'influenza vicendevole dei componenti per quanto riguarda i fenomeni di scambio termico.
- Modellazione degli stress residui e delle deformazioni in seguito alla separazione tra il pezzo, il supporto e la piastra e ai processi di post-trattamento. Il software Abaqus possiede diverse funzionalità che consentono di simulare i suddetti trattamenti e ottenere le caratteristiche vere e proprie del componente finale.

Lista dei simboli

ABBREVIAZIONE	DEFINIZIONE
AM	Additive Manufacturing
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
DED	Directed Energy Deposition
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DoE	Design of Experiment/Experimental Design
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modelling
FEM	Finite Element Method
KPIs	Key Performance Indicators
L-DED	Laser Directed Energy Deposition
LPBF	Laser Powder Bed Fusion
LSR	Laser Surface Remelting
PBF	Powder Bed Fusion
PC	Personal Computer
PLC	Programmable Logic Controller
PREP	Plasma Rotating Electrode Process
SEM	Scanning Electron Microscope
SLA	Stereolithography
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Stereolithography/ Standard Triangulation Language
UV	Ultraviolet Light

Bibliografia

- [1] ASTM F2792-10, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, *ASTM International*. West Conshohocken, PA, 2010.
- [2] Bhavar V., Kattire P., Patil V., Khot S., Gujar K., Singh R., A review on powder bed fusion technology of metal additive manufacturing. *The 4th International Conference and Exhibition on Additive Manufacturing Technologies-AM-2014*. Bangalore, India, 1-2 September 2014.
- [3] Bourell D.L., Beaman J.J., Leu M.C., Rosen D.A., Rosen D.W., A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead. *RapidTech 2009 US-TURKEY Workshop on Rapid Technologies*.
- [4] Matias E., Rao B., 3D printing: on its historical evolution and the implications for business. *2015 Proceedings of PICMET '15: Management of the Technology Age*. New York, USA.
- [5] Prinz F.B., Atwood C.L., Aubin R.F., Beaman J.J., Brown R.L., Fussell P.S., et al., Rapid prototyping in Europe and Japan. *JTEC/WTEC Panel Japanese and World Technology Evolution Centers*. March 1997.
- [6] Hull C.W., 1986, *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. U.S. Patent Appl. No. US 1986/4575330 A.
- [7] Wohlers T., Gornet T., History of additive manufacturing. *Wohlers Report 2014 - 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry*, Vol. 24, pp. 1-34. 2014.
- [8] Deckard C.R., 1989, *Method and apparatus for producing parts by selective sintering*. U.S. Patent Appl. No. US 1989/4863538 A.
- [9] Crump S.S., 1992, *Apparatus and method for creating three-dimensional objects*. U.S. Patent Appl. No. US 1992/5121329 A.
- [10] Meiners W., Wissenbach K., Gasser A., 1998, *Shaped body especially prototype or replacement part production*, DE Patent Appl. No DE 1998/19649865 C1.
- [11] Mohammadhosseini A., Masood S.H., Fraser D., Jahedi M., Dynamic compressive behaviour of Ti-6Al-4V alloy processed by electron beam melting under high strain rate loading. *Advances in Manufacturing*, Vol. 3, Iss. 3, pp. 232-243. Shanghai, 11 September 2015.
- [12] Dr. Koptyug A., Dr. Rännar L.E., Dr. Bäckström M., M. Sc. Fager Franzén S., DDS Dérand P., Additive manufacturing technology applications targeting practical surgery. *International Journal of Life Science and Medical Research*, Vol. 3, Iss. 1, pp. 15-24. Östersund, Sweden, February 2013.
- [13] Jones R., Haufe P., Sells E., Iravani P., Olliver V., Palmer C., Bowyer A., RepRap - the replicating rapid prototyper. *Robotic Self-X Systems*, Vol. 29, Iss. 1, pp. 177-191. Cambridge, UK, 14 January 2011.
- [14] Mousa A.A. Bashir M.O., Additive Manufacturing: A New Industrial Revolution-A review. *Journal of Scientific Achievement*, Vol. 2, Iss. 3, pp. 19-31. Libya, March 2017.

- [15] Pham D.T., Gault R.S., A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 38. Iss. 10-11, pp. 1257-1287. UK, October 1998.
- [16] Negi S., Dhiman S., Sharma R.K., Basics, Applications and future of additive manufacturing technologies: a review. *Journal of Manufacturing Technology Research*, Vol. 5, Iss. 1-2. India, March 2013.
- [17] Atzeni E., Iuliano L., Marchiandi G., Minetola P., Salmi A., Bassoli E., Denti L., Gatto A., Additive manufacturing as a cost-effective way to produce metal parts. *High Value Manufacturing by Bártolo et al.*, pp. 3-8. Italy, January 2014.
- [18] Singamneni S., Yifan L.V., Hewitt A., Chalk R., Thomas W., Additive manufacturing for the aircraft industry: A review. *J. Aeronaut. Aerosp. Eng.*, Vol. 8, Iss. 1. New Zealand, February 2019
- [19] Ahangar P., Cooke M.E., Weber M.H., Rosenzweig D.H., Current biomedical applications of 3D printing and additive manufacturing. *Appl. Sci.*, Vol. 9, Iss. 8, pp. 1713. Canada, 25 April 2019.
- [20] Espera A.H.Jr., Dizon J.R.C., Chen Q., Advincola R.C., 3D-printing and advanced manufacturing for electronics. *Progress in Additive Manufacturing*, Vol. 4, pp. 245-267. 4 February 2019.
- [21] Issues 2019 Additive Manufacturing Market Outlook and Summary Report, Estimates AM. *SmartTech Markets Publishing*. Crozet, France, 13 December 2018.
- [22] U.S. Department of Energy, Additive manufacturing: pursuing the promise. [DOE/EE-0776]. August 2012.
- [23] Gibson I., Rosen D., Stucker B., Springer (2014), Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing. *Johnson Matthey Technology Review*, Vol. 59, Iss. 3, pp. 193–198, 2015.
- [24] Foteinopoulos P., Papacharalampopoulos A., Stavropoulos P., On thermal modelling of additive manufacturing processes. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 20, pp. 66–83. Greece, 2018.
- [25] Kok Y., Tan X.P., Wang P., Nai M.L.S., Loh N.H., Liu E., Tor S.B., Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing. *Materials & Design*, Vol. 139, pp. 565–586. 2018.
- [26] Greer C., Nycz A., Noakes M., Richardson B.S., Post B.K., Kurfess T., Love L.J., Introduction to the design rules for Metal Big Area Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*, Vol. 27, pp. 159 - 166. 2019.
- [27] Dass A., Moridi A., State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design. *Coatings*, Vol. 9, Iss. 7, pp. 418. Ithaca, 2019.
- [28] Gibson I., Rosen D., Stucker B., Additive Manufacturing Technologies, Second Edition, Springer, pp. 245-267. New York, 2015.
- [29] Leung C.L.A., Marussi S., Towrie M., Garcia J.d.V., Atwood R.C., Bodey A.J., Jones J.R., Lee P.D., Laser-matter interactions in additive manufacturing of stainless steel SS316L and 13-93 bioactive glass revealed by in situ X-ray imaging. *Additive Manufacturing*, Vol. 24, pp. 647-657. December 2018.

- [30] Sabina L., Campanelli S., Contuzzi N., Angelastro A., Ludovico A.D., Capabilities and performances of the selective laser melting process. *New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems*. Italy, November 2010.
- [31] Zhuang J.R., Lee Y.T., Hsieh W.H., Yang A.S., Determination of melt pool dimensions using DOE-FEM and RSM with process window during SLM of Ti₆Al₄V powder. *Optics & Laser Technology*, Vol. 103, pp. 59-76. July 2018.
- [32] Bastien G., Gardan N., Wahu G., Methodology for Part Building Orientation in Additive Manufacturing. *Computer-Aided Design & Application*, Vol. 16, Iss. 1, pp. 113-128. 2019.
- [33] Jiang J., Xu X., Stringer J., Support Structures for Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, Vol. 2, Iss. 64. Auckland, September 2018.
- [34] Jacobs P.F., Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography. *Society of Manufacturing Engineers*. California, July 1992.
- [35] Withers P. J., Residual stress and its role in failure. *Reports on Progress in Physics*, Vol. 70, pp. 2211–2264. Manchester, November 2007.
- [36] Kruth J.P., Deckers J., Yasa E., Wauthlé R., Assessing and comparing influencing factors of residual stresses in selective laser melting using a novel analysis method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 226, Iss. 6, pp. 980-991. Belgium, June 2012.
- [37] Mugwagwa L., Dimitrov D., Matope S., Muvunzi R., Residual stresses and distortions in selective laser melting - a review. *Conference paper*. South Africa, November 2016.
- [38] Jhabvala J., Boillata E., Antignac T., Glardona R., On the effect of scanning strategies in the selective laser melting process. *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 5, Iss. 2, pp. 99-109. Paris, June 2010.
- [39] Slotwinski J.A., Garboczi E.J., Metrology needs for metal additive manufacturing powders. *JOM: the Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 67, pp 538-534. South Africa, March 2015.
- [40] Wohlers TT, Wohlers report 2017: 3D printing and additive manufacturing state of the industry. Annual worldwide progress report. Fort Collins USA, April 2017.
- [41] Vock S., Kloden B., Kirchner A., Weibgarber T., Kieback B., Powders for powder bed fusion: a review. *Progress in Additive Manufacturing*, Vol. 4, pp. 383-397. February 2019.
- [42] Schulze D., Powders and Bulk Solids: behavior, characterization, storage and flow, Springer. Berlin, July 2007.
- [43] Liu P.S., Chen G.F., Porous Metals, First Edition, Butterworth-Heinemann. USA, 2014.
- [44] Liu H., Science and Engineering of Droplet: Fundamentals and Applications, Noyes Publications. USA, 1999.
- [45] Purwanto H., Mizuochi T., Akiyama T., Prediction of Granulated Slag Properties Produced from Spinning Disk Atomizer by Mathematical Model. *Materials Transactions*, Vol. 46, No. 6, pp. 1324-1330. Japan, 15 June 2015.

- [46] Baskoro A.S., Supriadi S., Review on Plasma Atomizer Technology for Metal Powder. *MATEC Web of Conferences*. Indonesia, January 2019.
- [47] Popovich A.A., Sufiiarov V.S., Polozov I.A., Borisov E.V., Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 produced by SLM and subsequent heat treatment. *Key Engineering Materials*, Vol. 651-653, pp. 665-670. Switzerland, February 2015.
- [48] Gong, X., Wang, X., Cole, V., Jones, Z., Cooper, K., and Chou, K., Characterization of Microstructure and Mechanical Property of Inconel 718 From Selective Laser Melting. *Proc. ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference*. Charlotte, North Carolina, USA, 8-12 June 2015.
- [49] Hajjalizadeh, F., Ince A., Short review on modeling approaches for metal additive manufacturing process. *Material Design & Processing Communications*. 12 March 2019.
- [50] Ahmed B., Van der Veen S., Fitzpatrick M., Guo H., Residual Stress Evaluation in Selective Laser-Melting Additively Manufactured Titanium (Ti-6Al-4V) and Inconel 718 using the Contour Method and Numerical Simulation. *Additive Manufacturing*, Vol. 22, pp. 571-582. Coventry, UK, 6 June 2018.
- [51] Li C., Liu J.F., Fang X.Y., Guo Y.B., Efficient predictive model of part distortion and residual stress in selective laser melting. *Additive Manufacturing*, Vol. 17, pp. 157-168. China, October 2017.
- [52] Tran H.T., Chem Q., Mohan J., To A.C., A new method for predicting cracking at the interface between solid and lattice support during laser powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, Vol. 32. USA, 10 January 2020.
- [53] Poyraz Ö., Kuşhan M.C., Residual Stress-induced Distortions in Laser Powder Bed Additive Manufacturing of Nickel-based Superalloys. *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 65, Iss. 6, pp. 343-350. Turkey, June 2019.
- [54] Ameen W., Mohammed M.K., Al-Ahmari A., Evaluation of Support Structure Removability for Additively Manufactured Ti₆Al₄V Overhangs via Electron Beam Melting. *Metals*, Vol. 9, pp. 1211. 11 November 2019.
- [55] Special Metal Corporation, INCONEL alloy 718, SPECIAL METALS. September 2007.
- [56] De Moraes D.A., Czekanski A., Thermal Modeling of 304L Stainless Steel for Selective Laser Melting: Laser Power Input Evaluation. *Proceedings of ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2017*. Tampa, Florida, USA, November 2017.

Appendice A

In **Tabella A.1** è riportata la specifica tecnica della stampante 3D Print Sharp 250.

Tabella A.1: Specifica tecnica della stampante 3D Print Sharp 250.

Dimension (LxWxH)	3500 (L) – 1100 (W) – 2450 (H)
Weight	2000 kg
Power Supply	380 V / 50 Hz / 8 kW
Type of Laser	Yb (Ytterbium) Fiber laser IR single mode
Laser Power	200 W / 500 W (Optional)
Laser Focus Diameter	70 – 100 µm
Beam Wavelength	1060 – 1080 nm
Building Volume	250 x 250 x 300 mm
Beam Deflection Speed	8 m/s
Positioning Speed	10 m/s
Build Rate	12 – 30 cm ³ /h
Layer Thickness	0.02 mm – 0.1 mm
Layer Width	0.1 mm (single line width)
Recoater Specs	Travel: 380 mm / Speed: max 500 mm/s
Building Platform Z-axis	Travel: 350 mm / Speed: max 6 mm/s / Res: 0,01 mm
Heating Platform	Up to 200°C
Monitoring Of O ₂ Level	Below 100 ppm (0.01%)
Permissible Room Temperatures	15 – 30°C
Gas (Consumption – running / filling)	7 L/min (running)
System Fill Consumption	20 L/min (up to filling)
Cam Software	Materialise Magics
Control & Other software	Eplus control software (EPC)
Industrial Interfaces	Ethernet

Size & Power

Laser

Machine and Additive process details

Peripheral & auxiliaries – Software

Appendice B

Caso 1-B

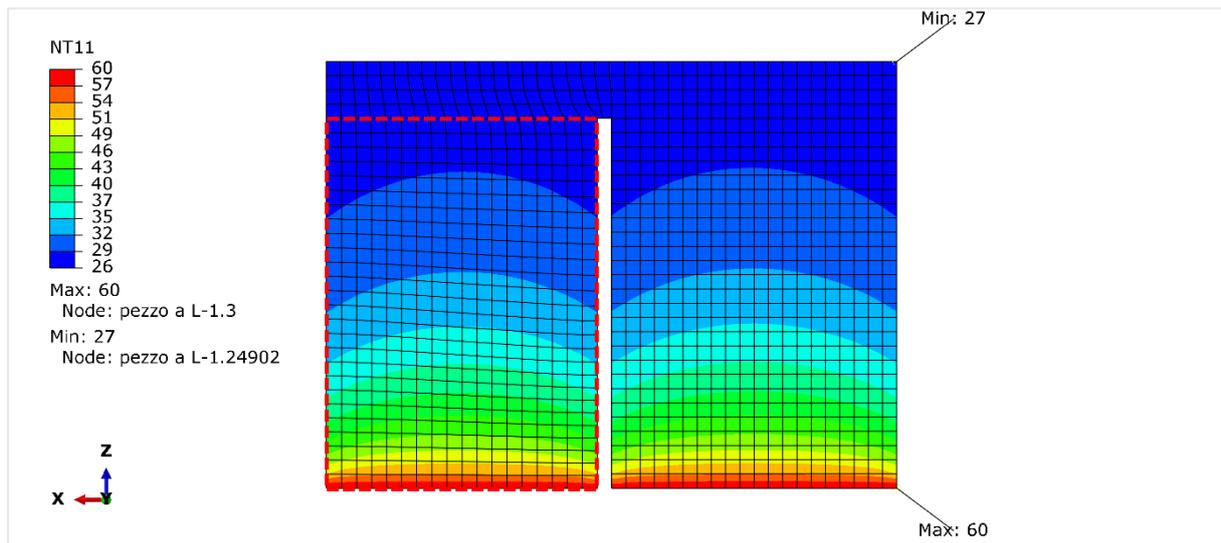


Figura B.1: Profilo termico del componente a L (a destra) e del supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

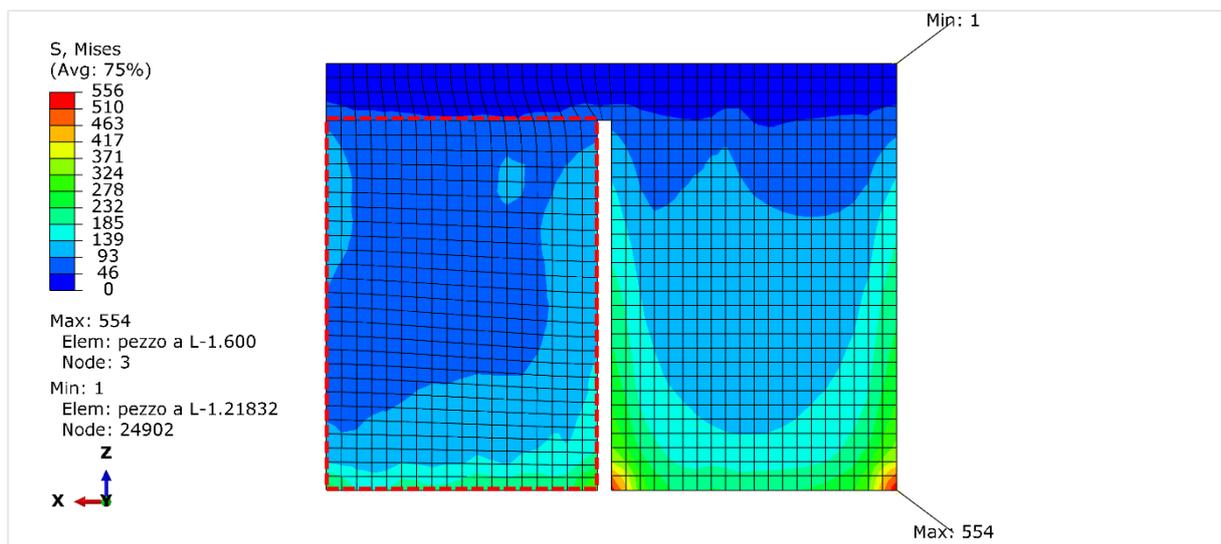


Figura B.2: Distribuzione degli stress di von Mises gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

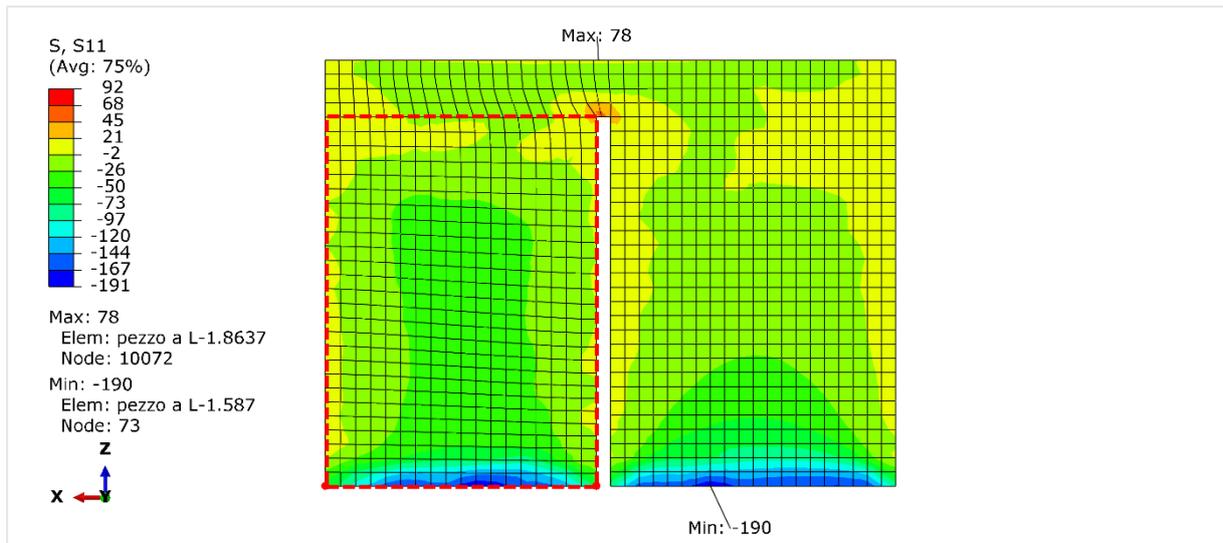


Figura B.3: Distribuzione degli stress S11 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

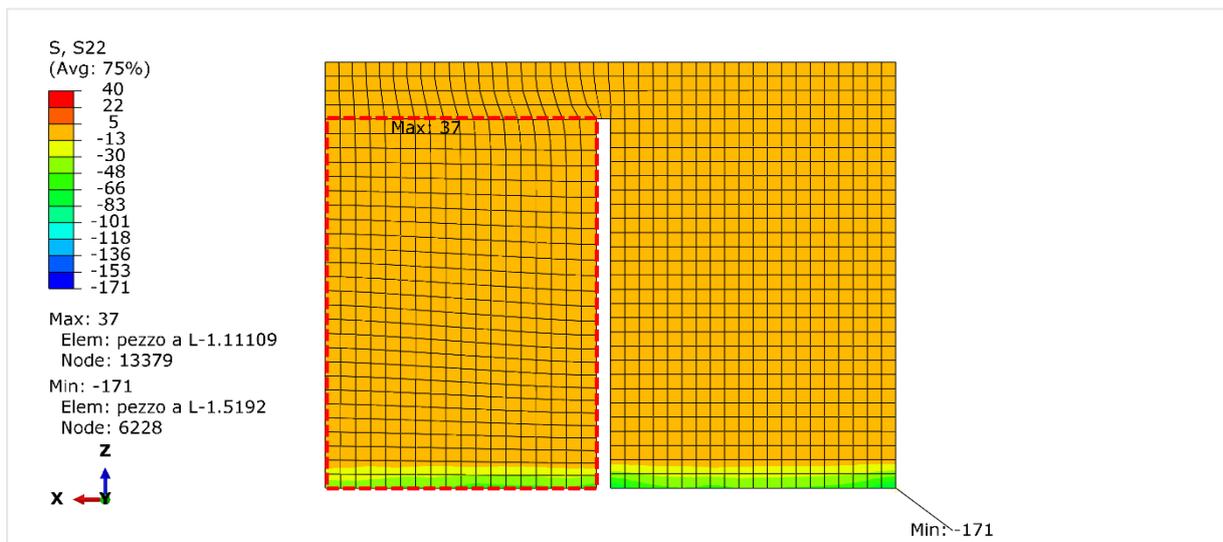


Figura B.4: Distribuzione degli stress S22 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

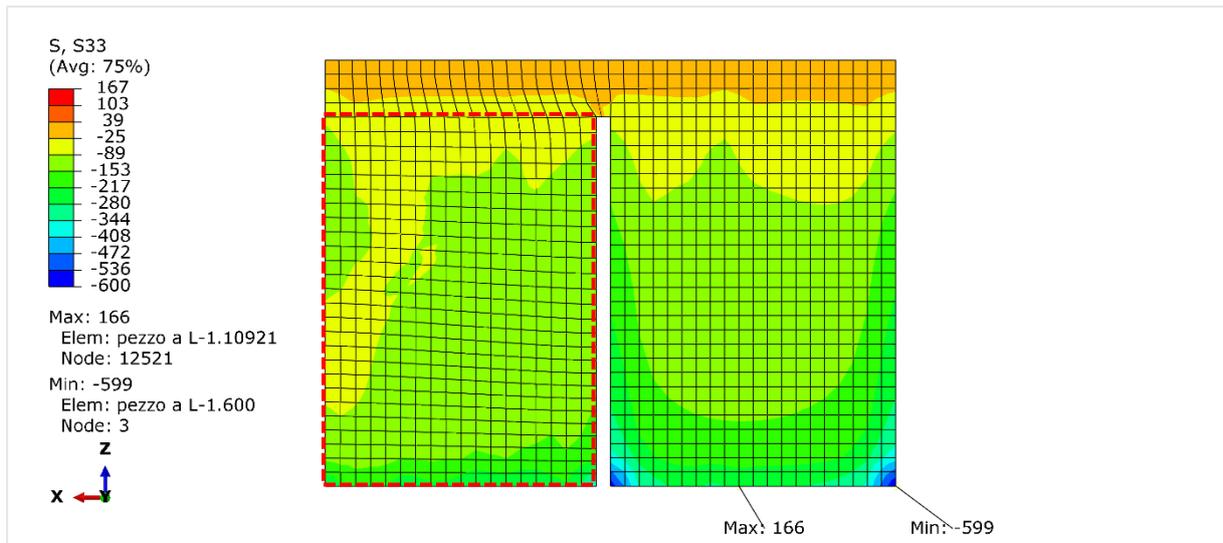


Figura B.5: Distribuzione degli stress S33 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

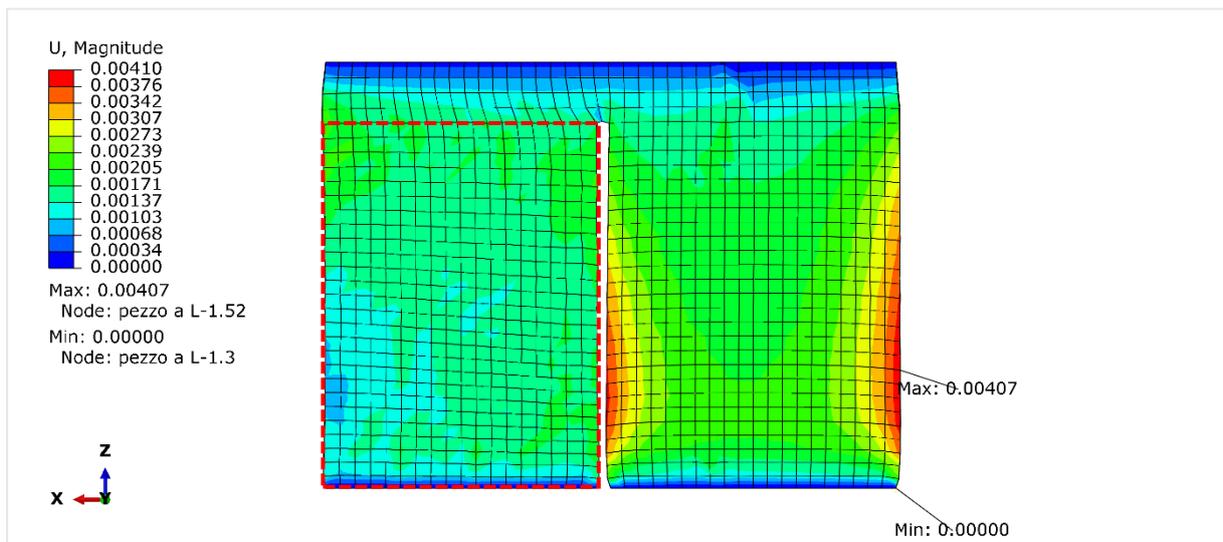


Figura B.6: Distribuzione delle distorsioni gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

Caso 2

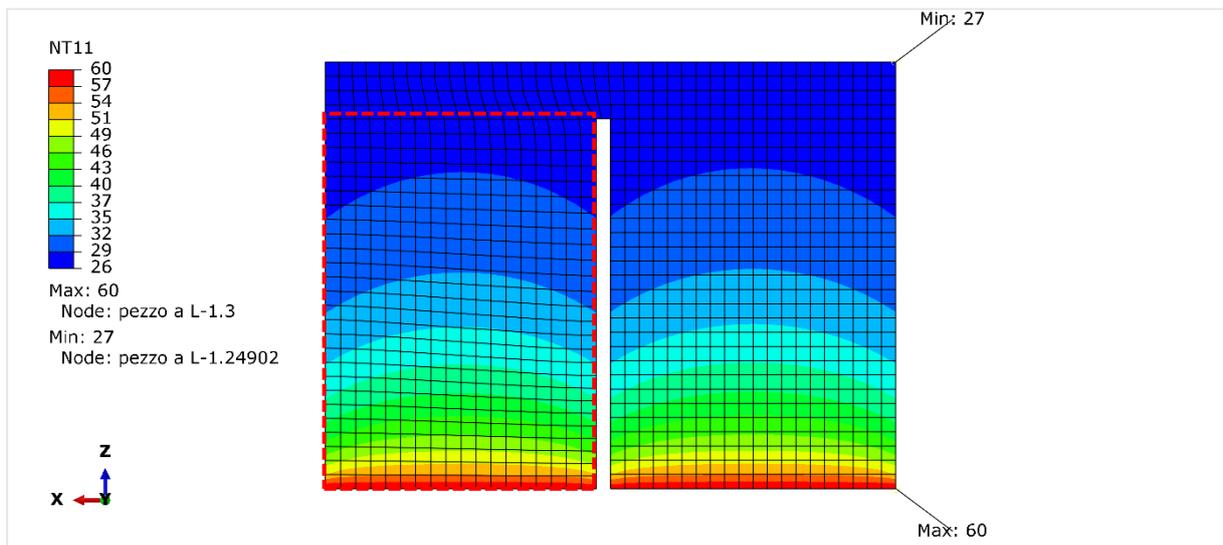


Figura B.7: Profilo termico del componente a L (a destra) e del supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

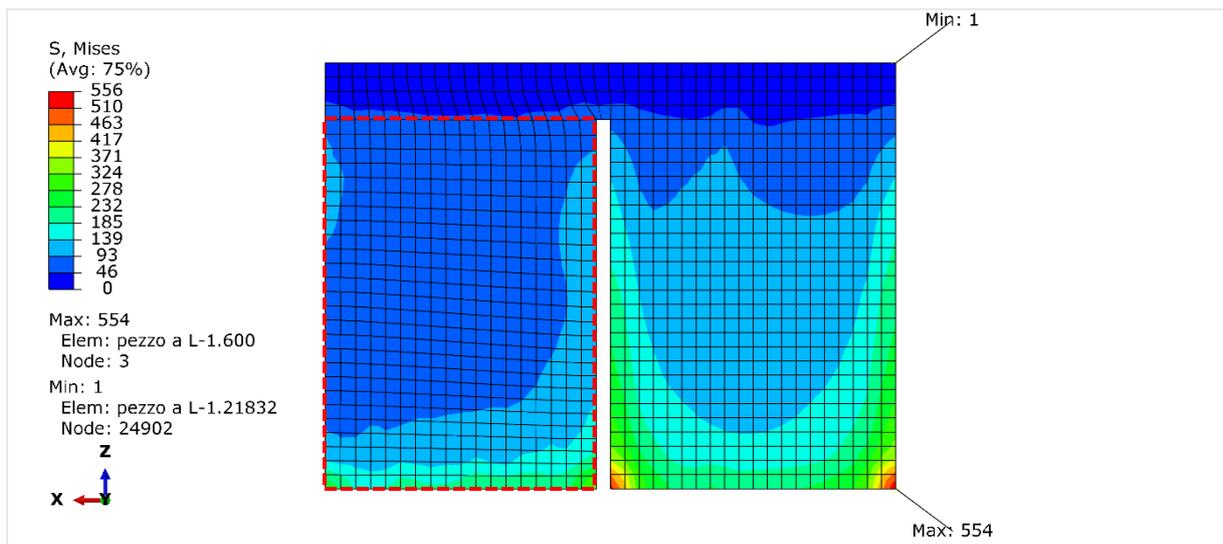


Figura B.8: Distribuzione degli stress di von Mises gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

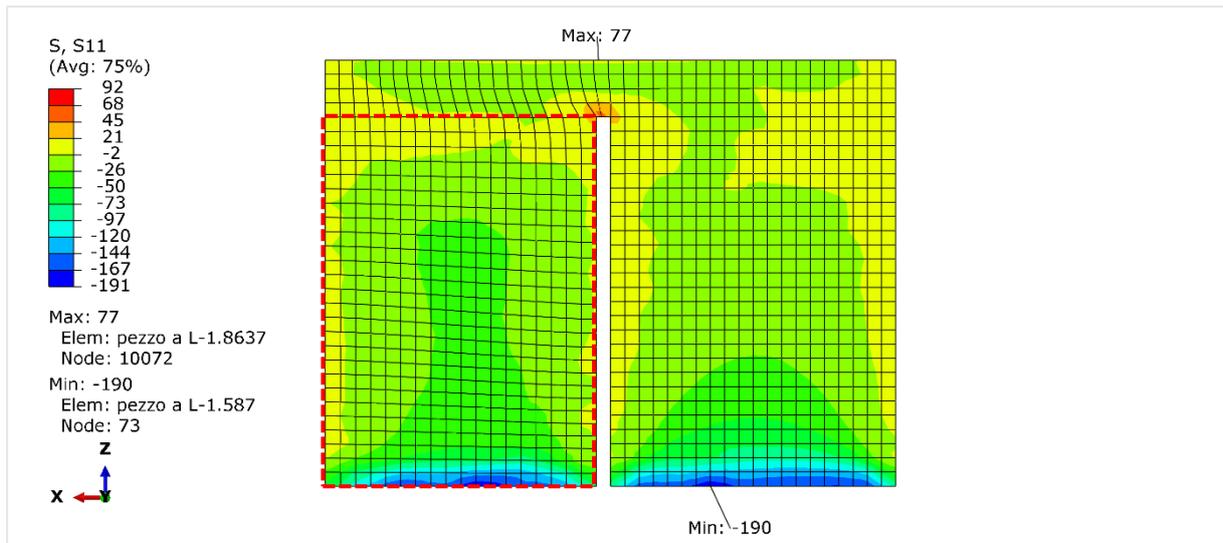


Figura B.9: Distribuzione degli stress S11 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

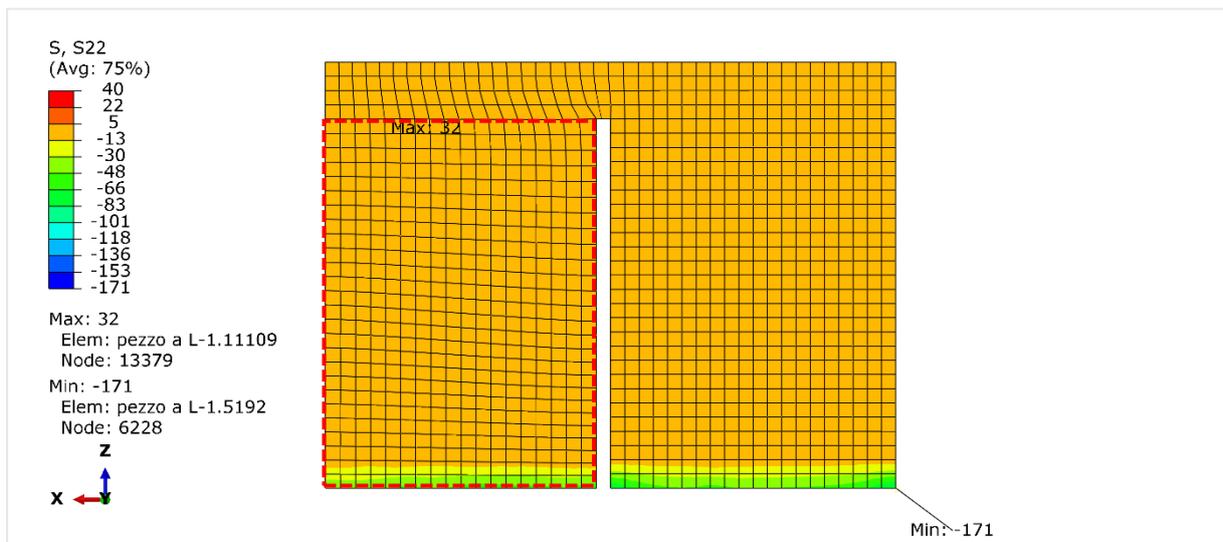


Figura B.10: Distribuzione degli stress S22 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

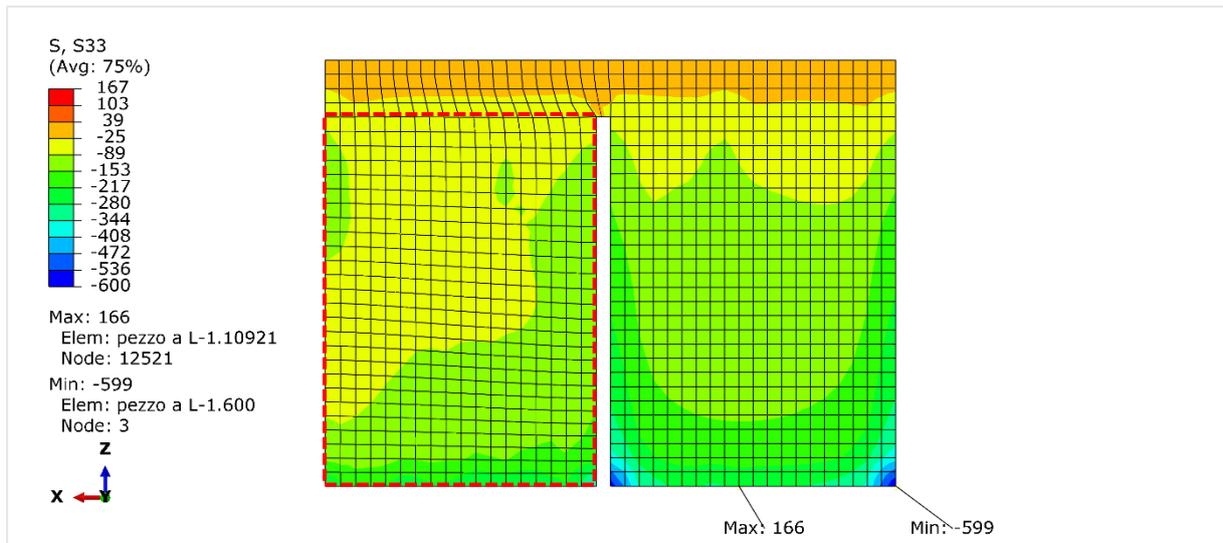


Figura B.11: Distribuzione degli stress S33 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

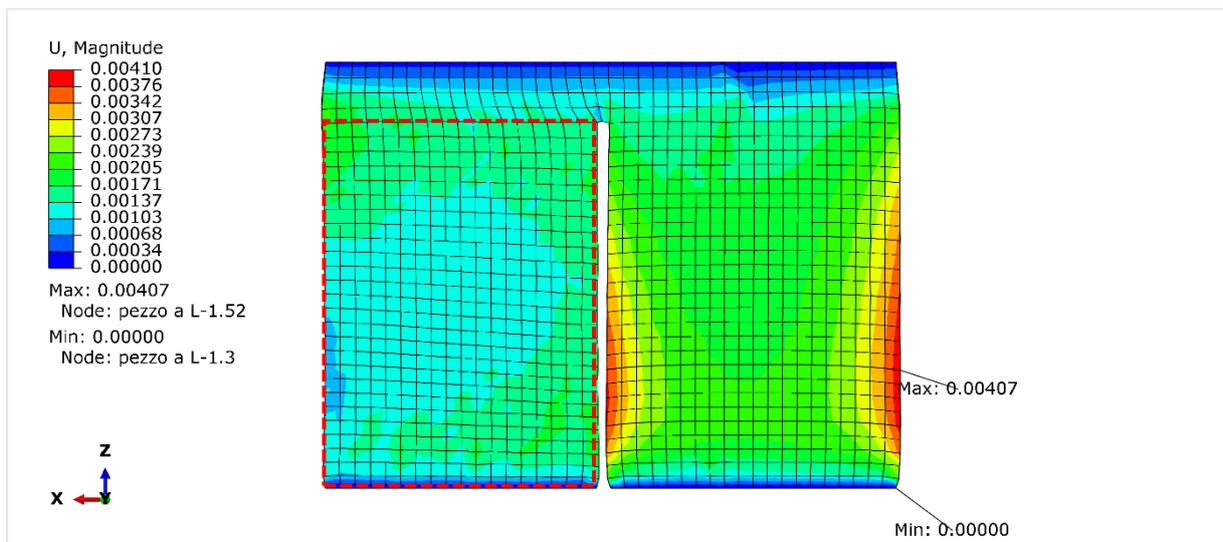


Figura B.12: Distribuzione delle distorsioni gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

Caso 3

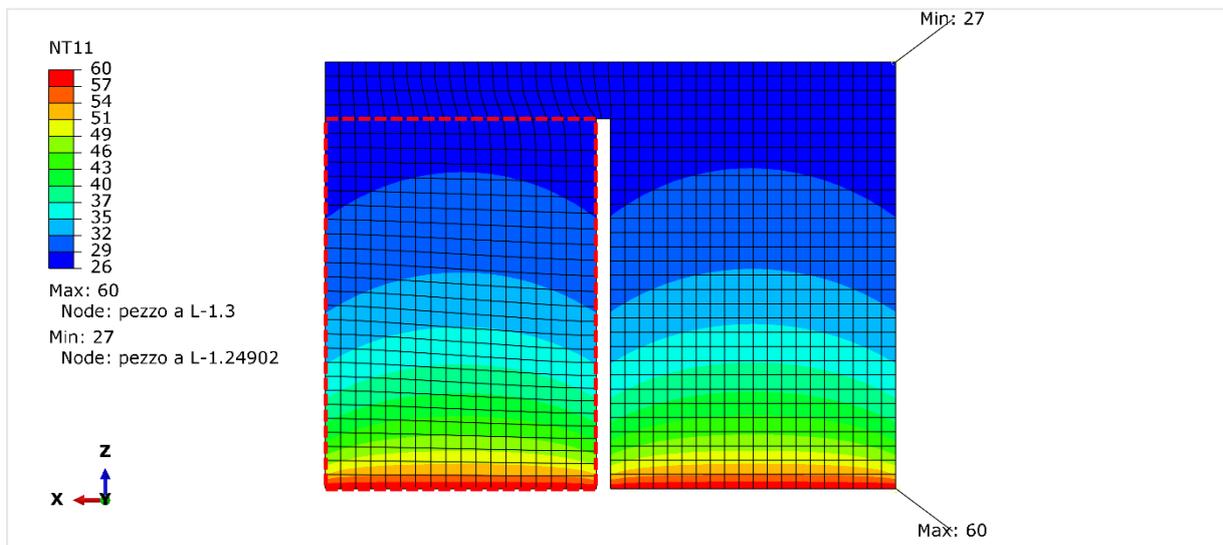


Figura B.13: Profilo termico del componente a L (a destra) e del supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

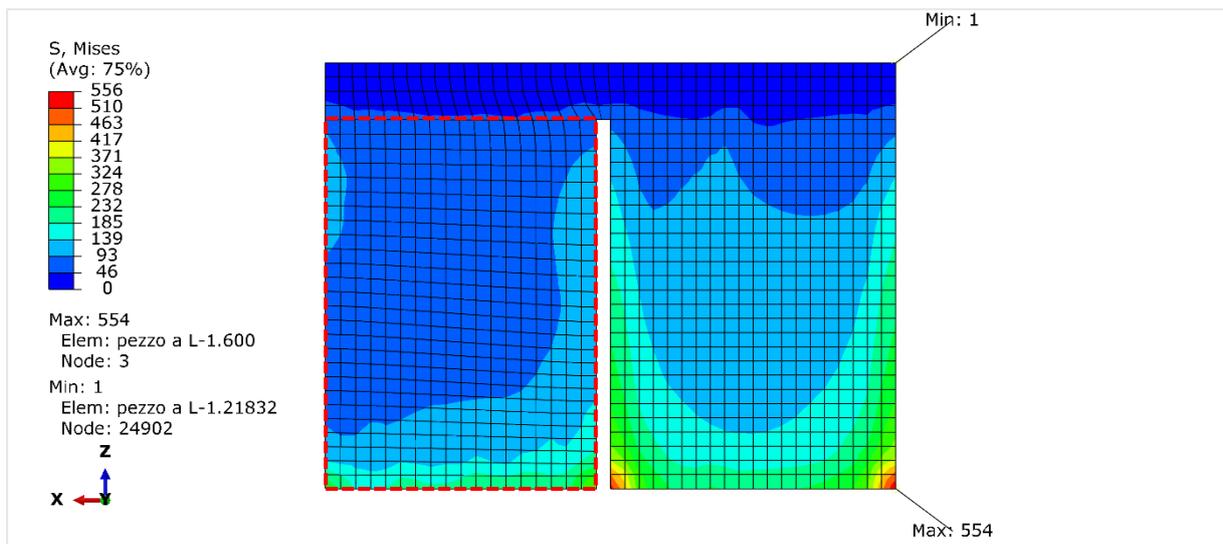


Figura B.14: Distribuzione degli stress di von Mises gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

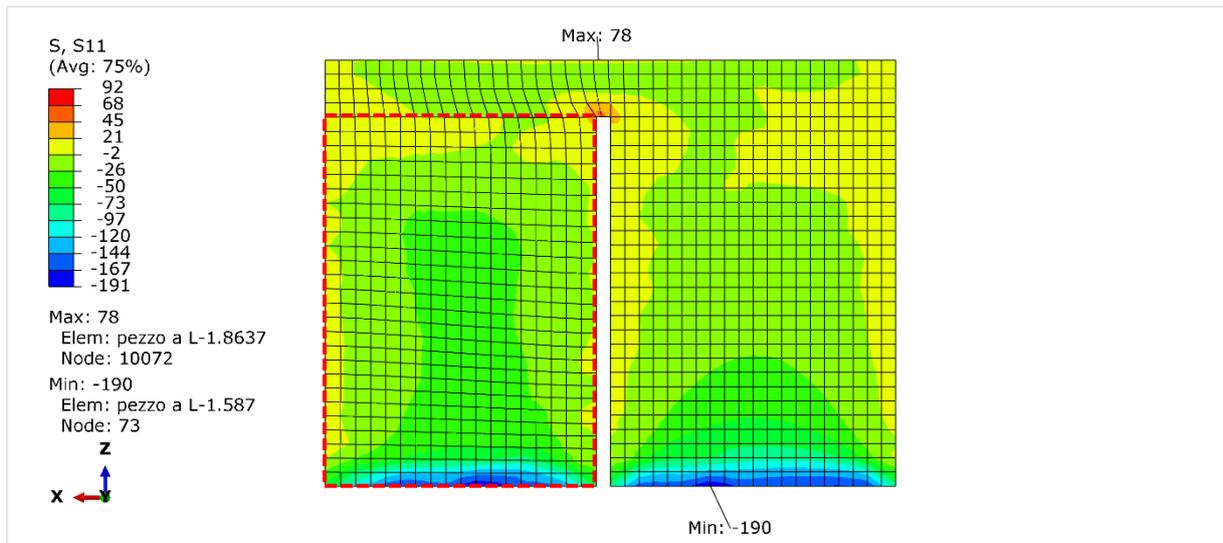


Figura B.15: Distribuzione degli stress S11 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

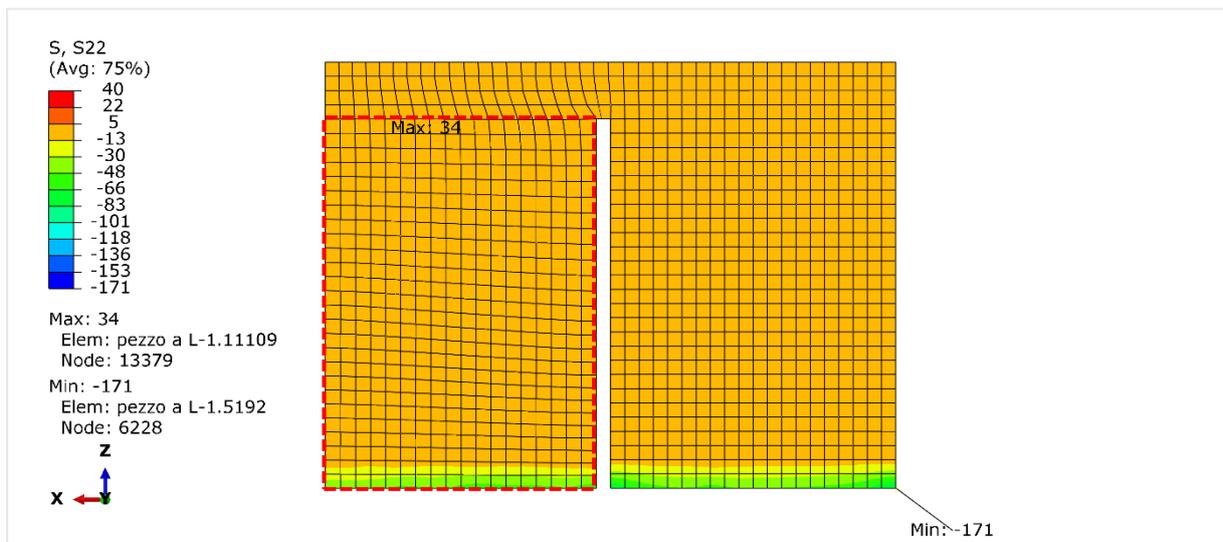


Figura B.16: Distribuzione degli stress S22 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

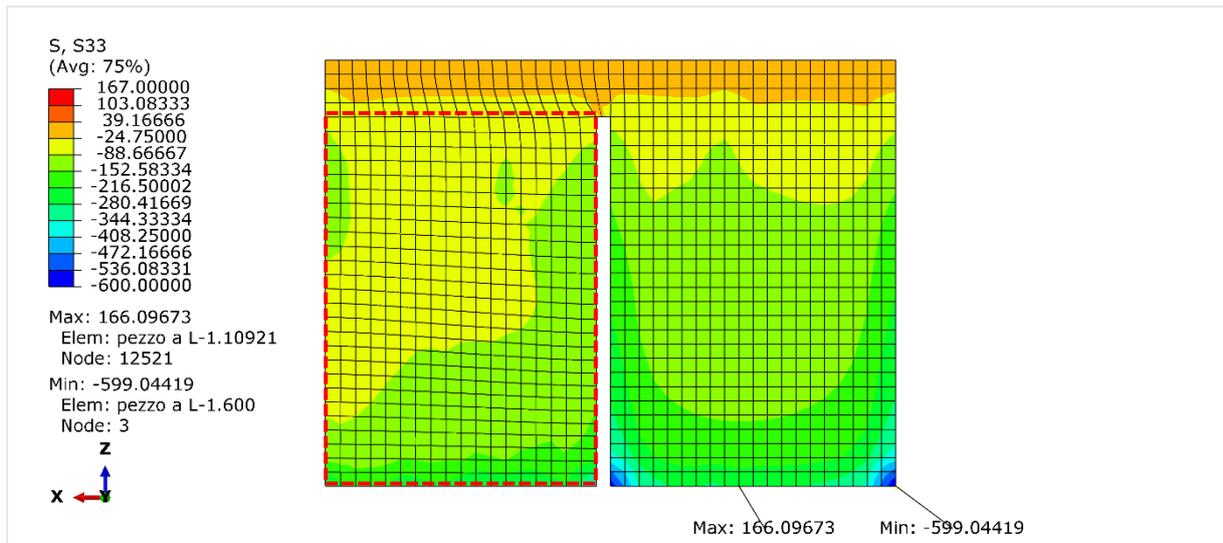


Figura B.17: Distribuzione degli stress S33 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

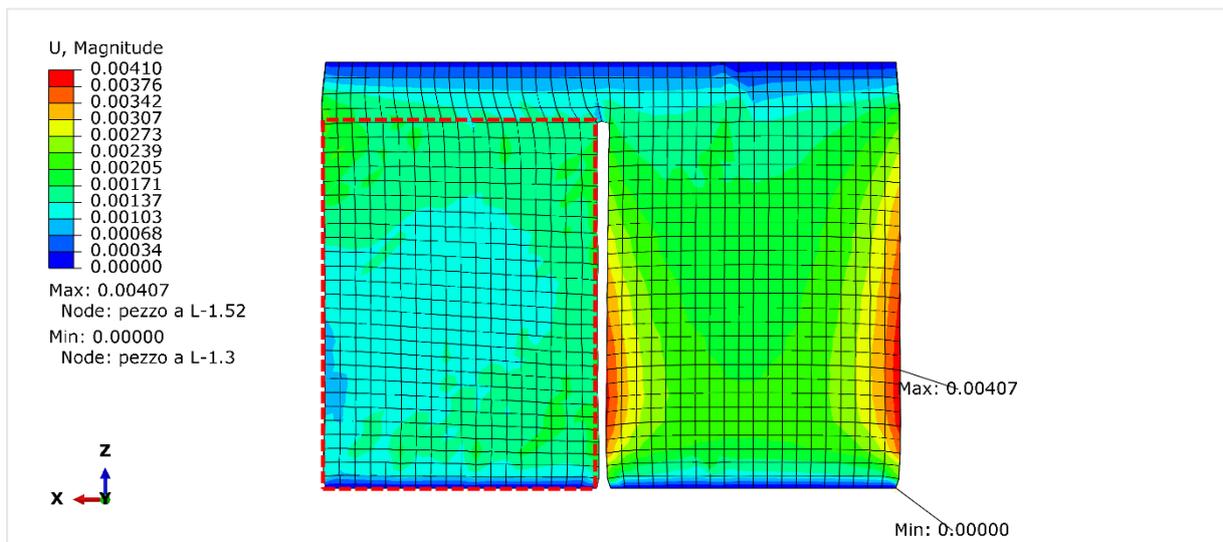


Figura B.18: Distribuzione delle distorsioni gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

Caso 4

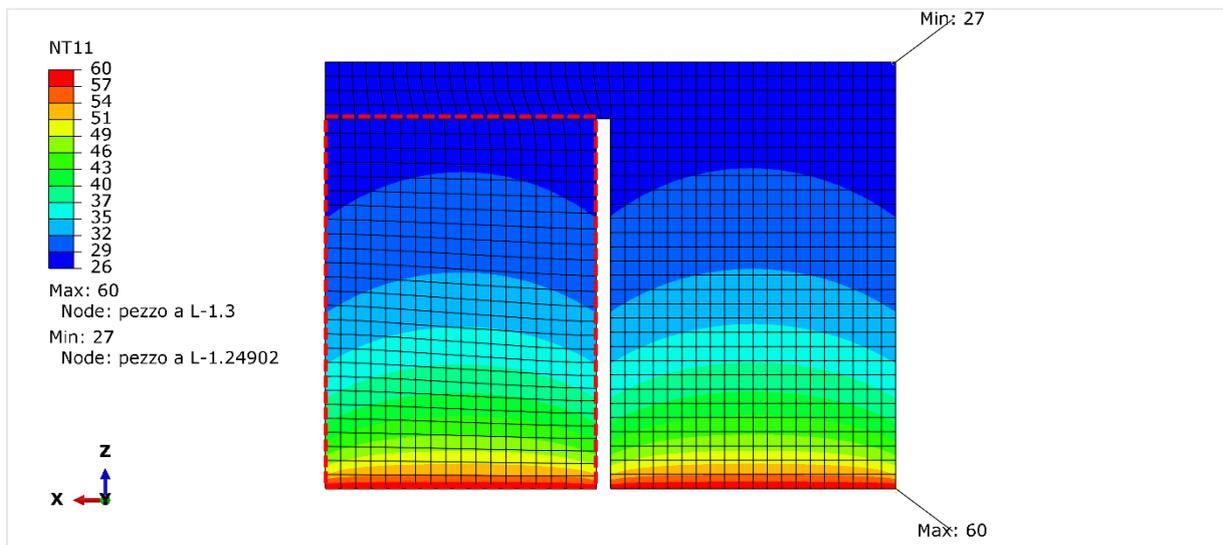


Figura B.19: Profilo termico del componente a L (a destra) e del supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

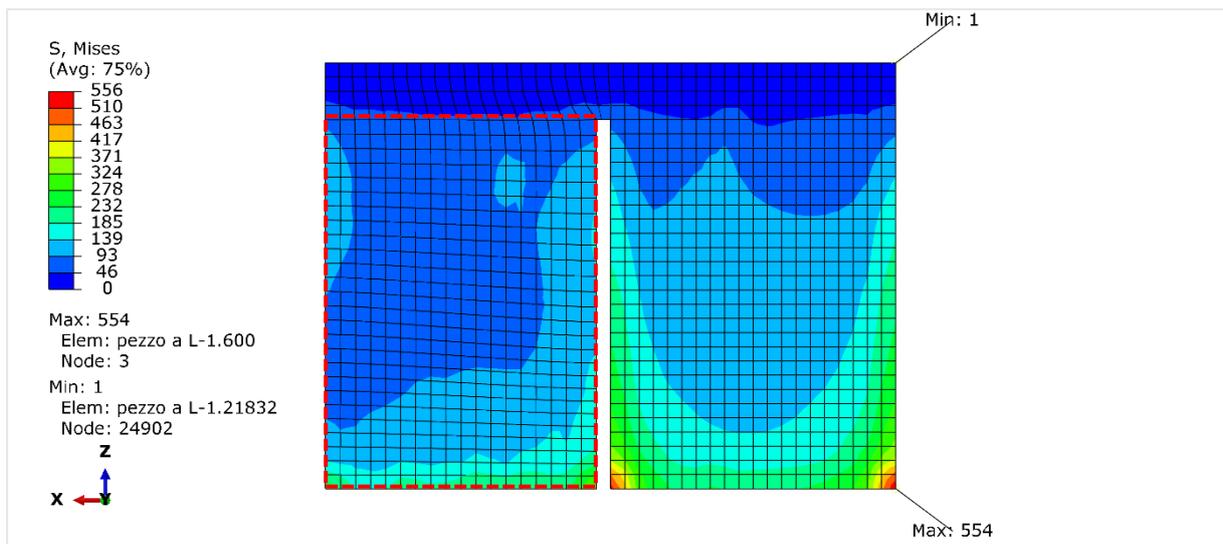


Figura B.20: Distribuzione degli stress di von Mises gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

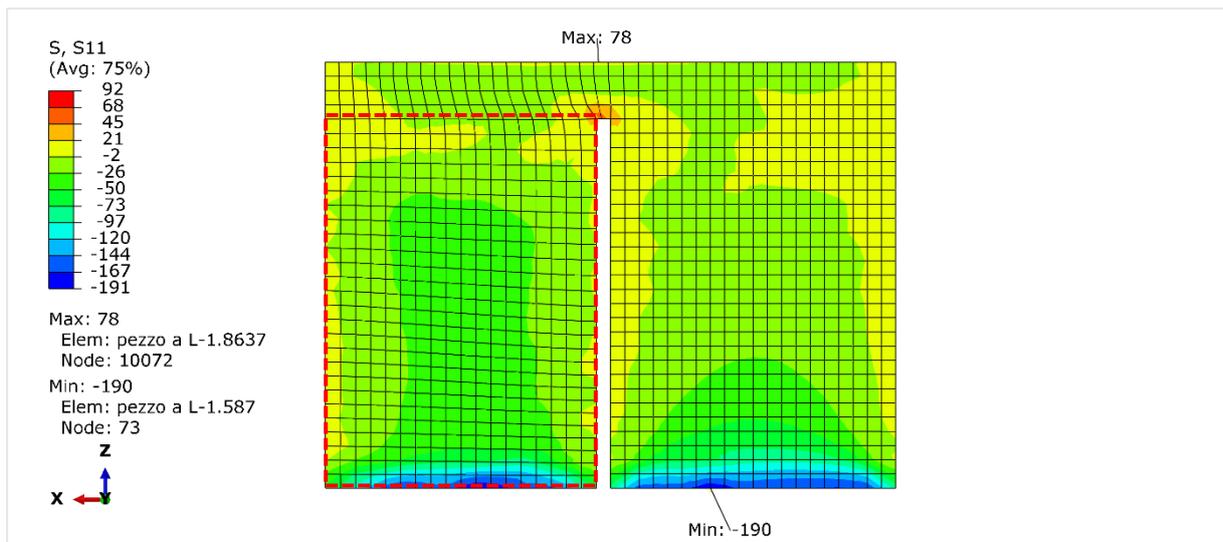


Figura B.21: Distribuzione degli stress S11 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

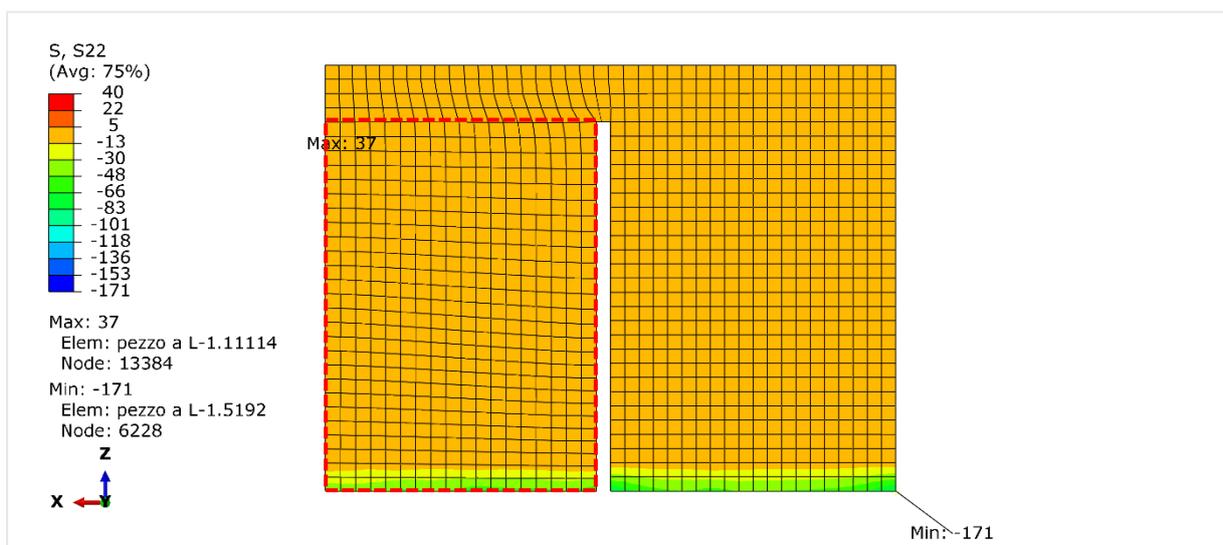


Figura B.22: Distribuzione degli stress S22 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

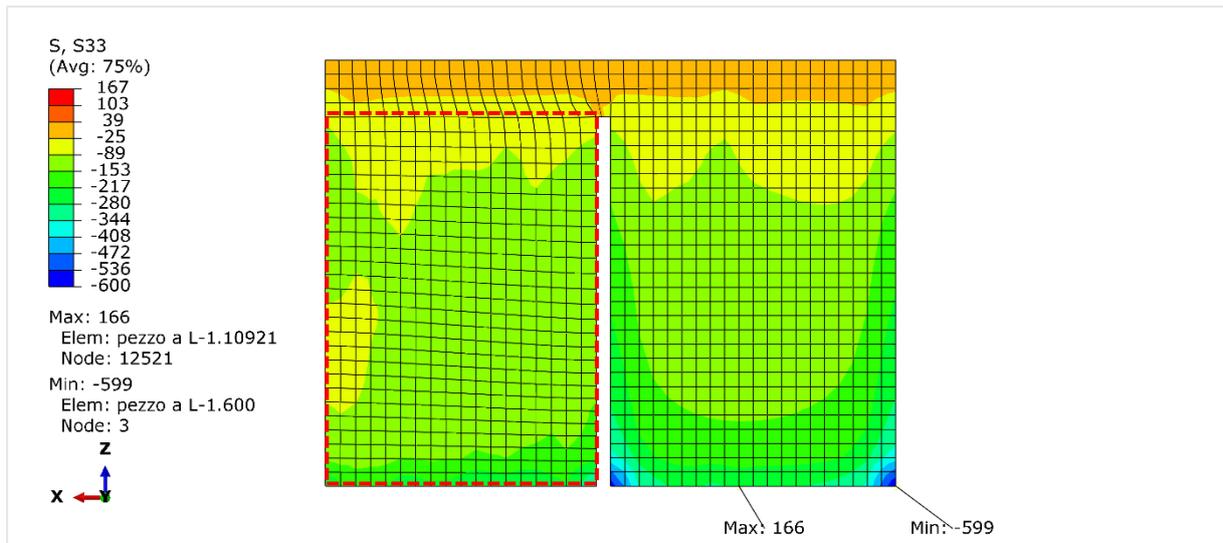


Figura B.23: Distribuzione degli stress S33 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

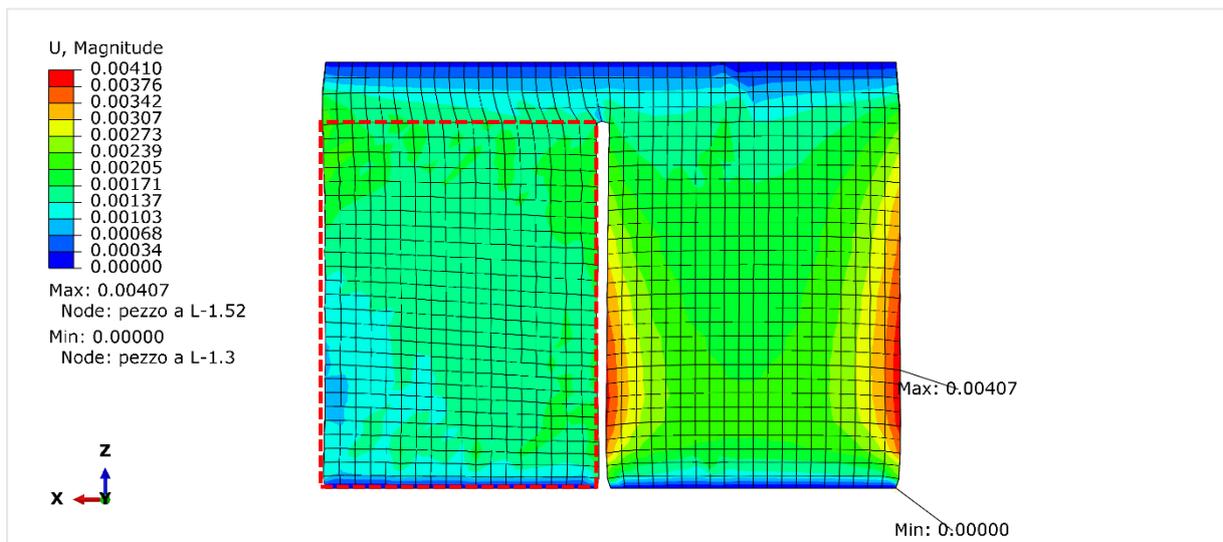


Figura B.24: Distribuzione delle distorsioni gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

Caso 5

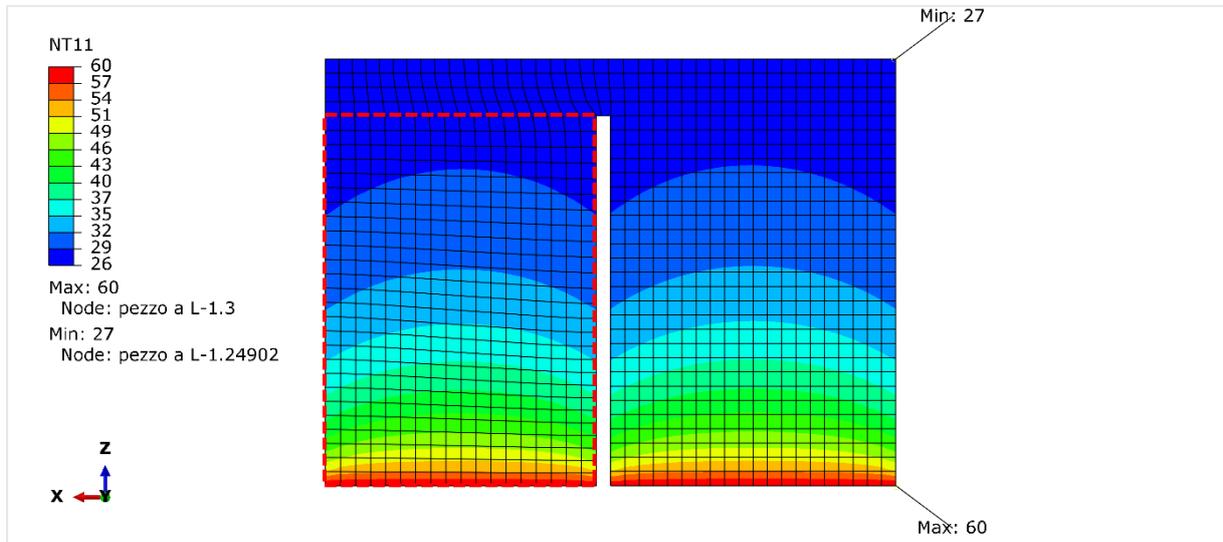


Figura B.25: Profilo termico del componente a L (a destra) e del supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

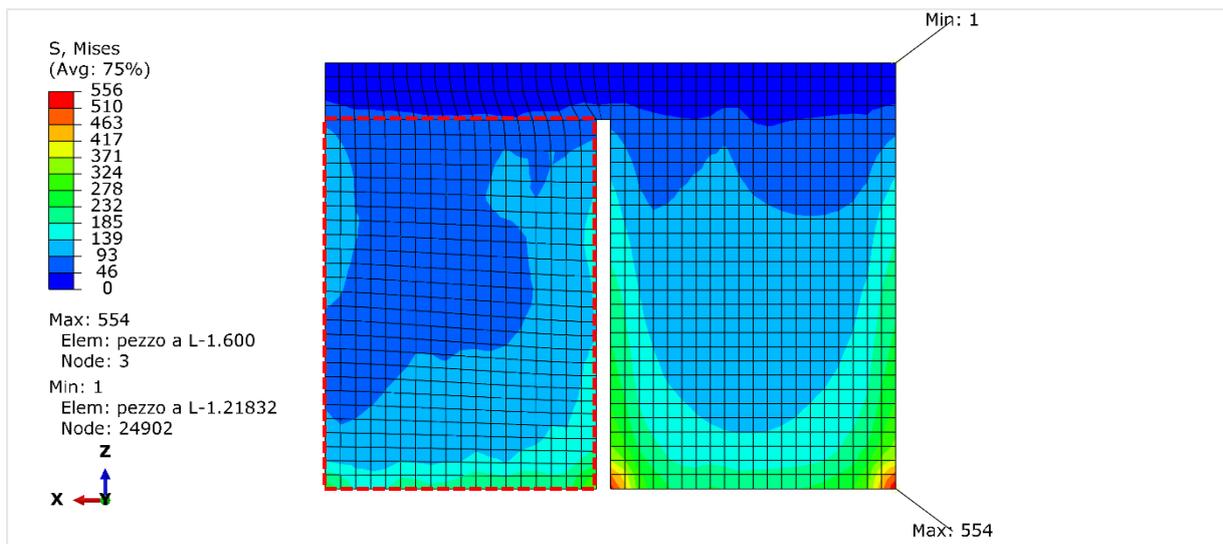


Figura B.26: Distribuzione degli stress di von Mises gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

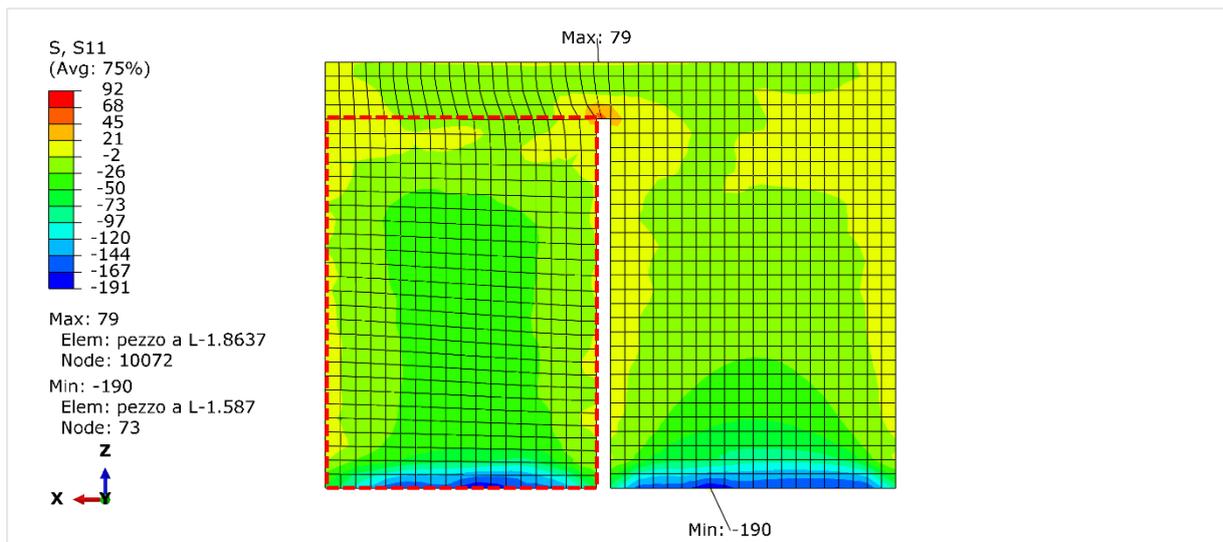


Figura B.27: Distribuzione degli stress S11 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

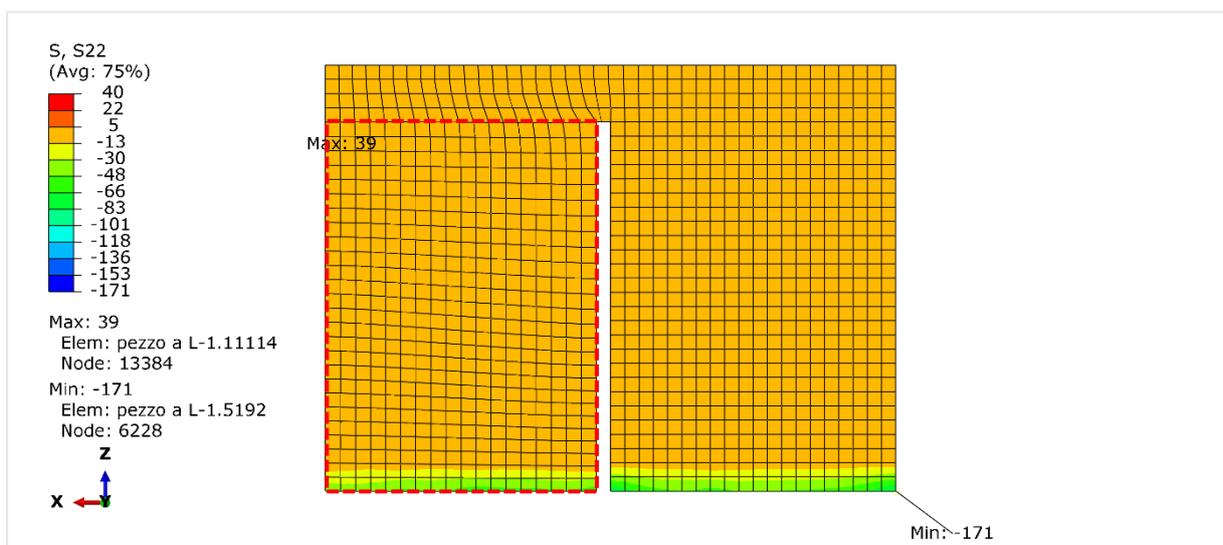


Figura B.28: Distribuzione degli stress S22 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

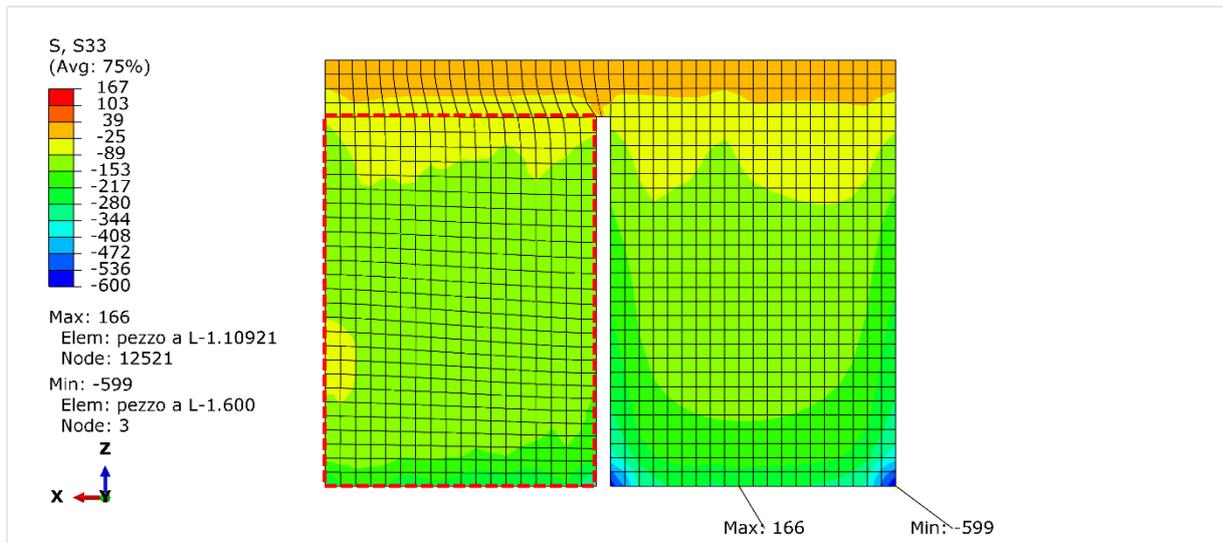


Figura B.29: Distribuzione degli stress S33 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

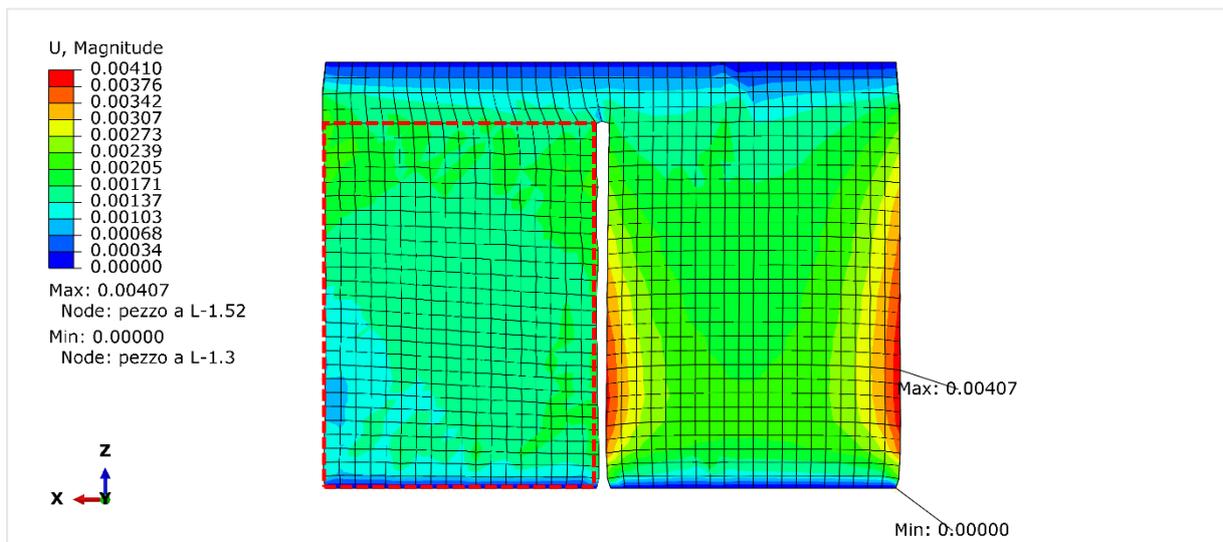


Figura B.30: Distribuzione delle distorsioni gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

Caso 6

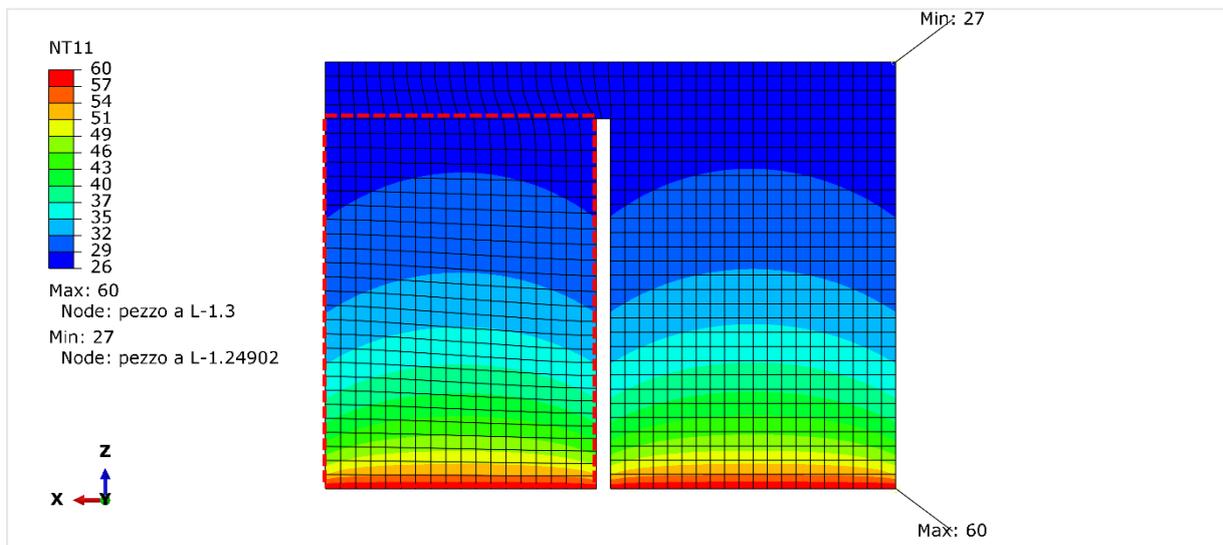


Figura B.31: Profilo termico del componente a L (a destra) e del supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

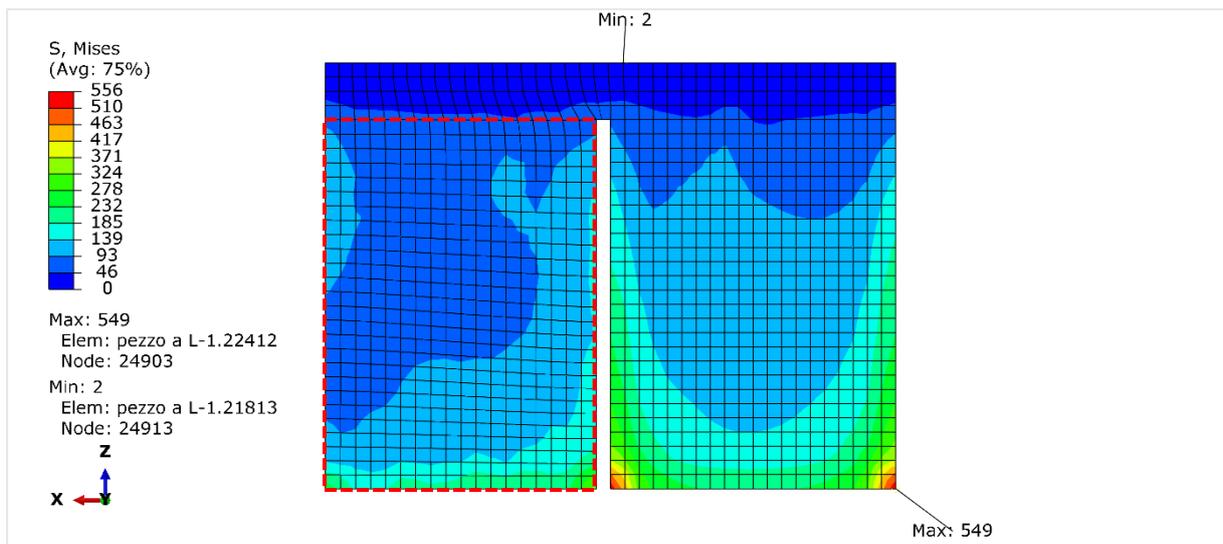


Figura B.32: Distribuzione degli stress di von Mises gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

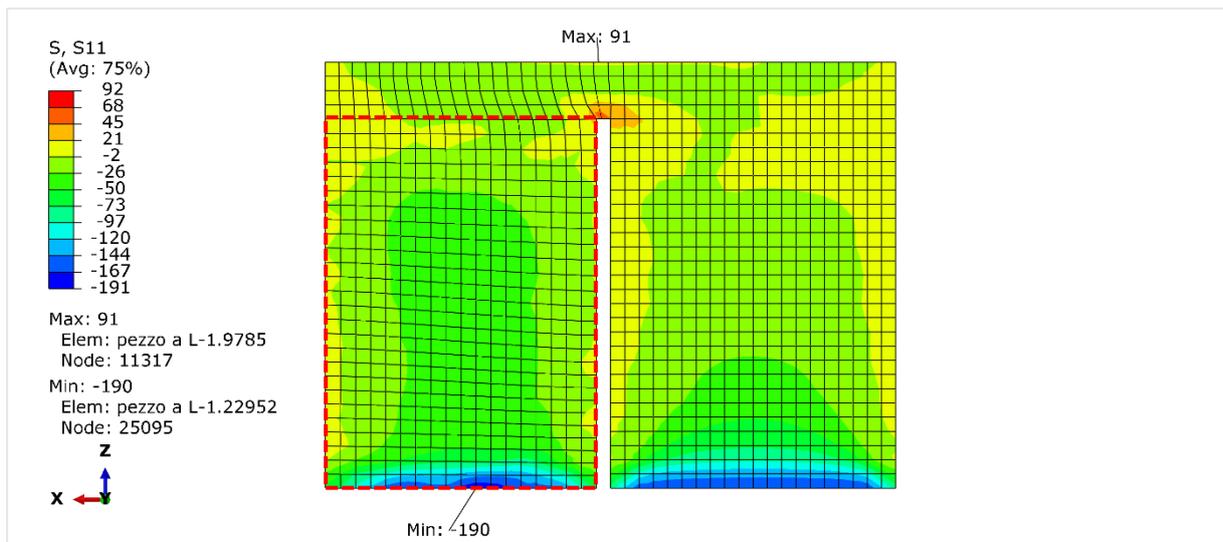


Figura B.33: Distribuzione degli stress S11 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

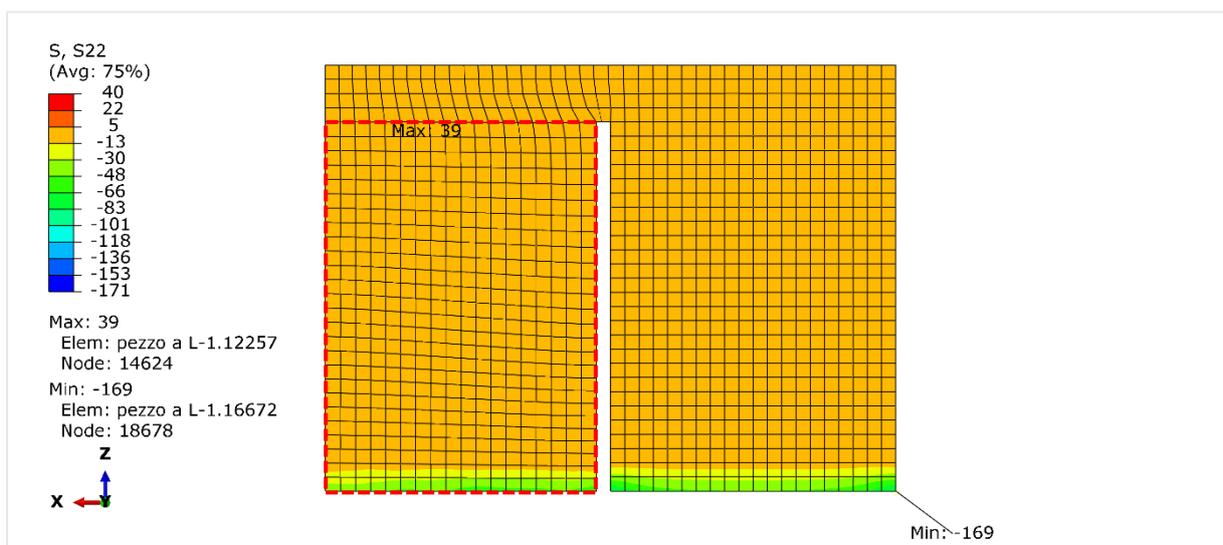


Figura B.34: Distribuzione degli stress S22 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

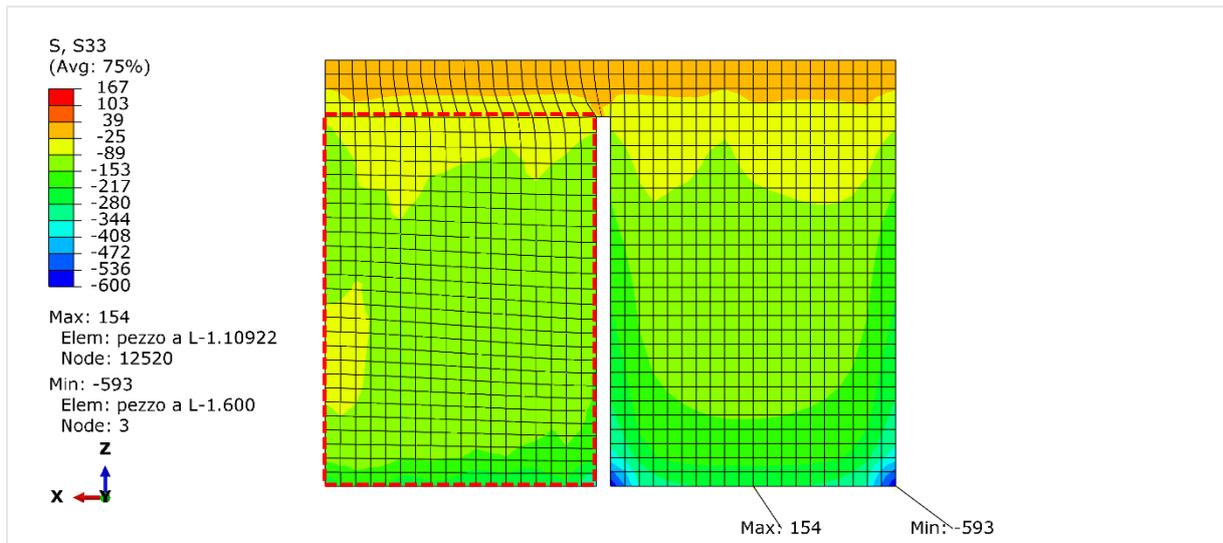


Figura B.35: Distribuzione degli stress S33 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

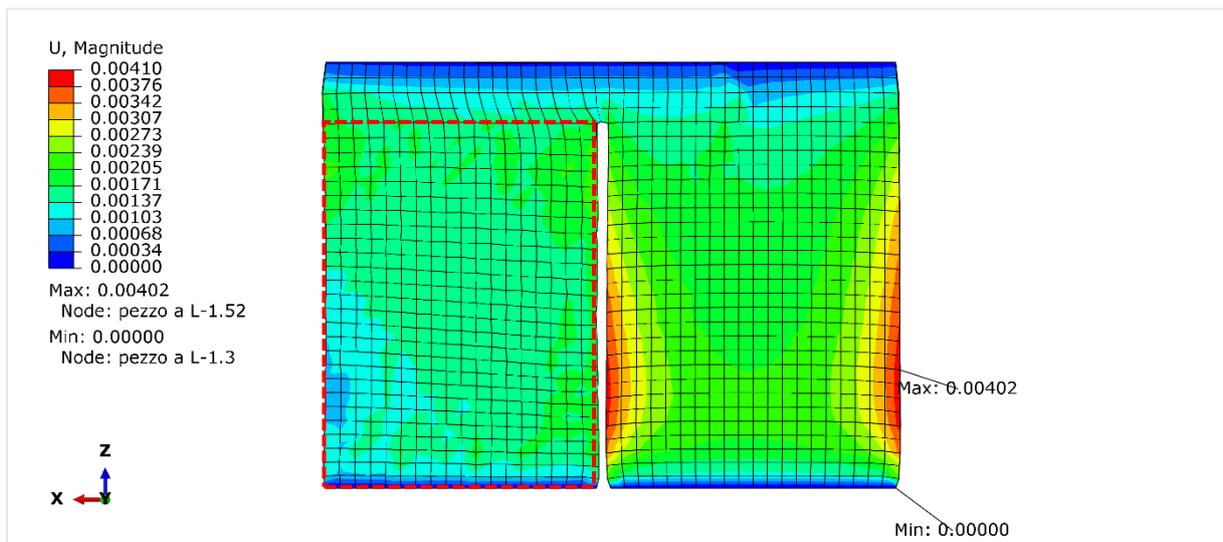


Figura B.36: Distribuzione delle distorsioni gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

Caso 7

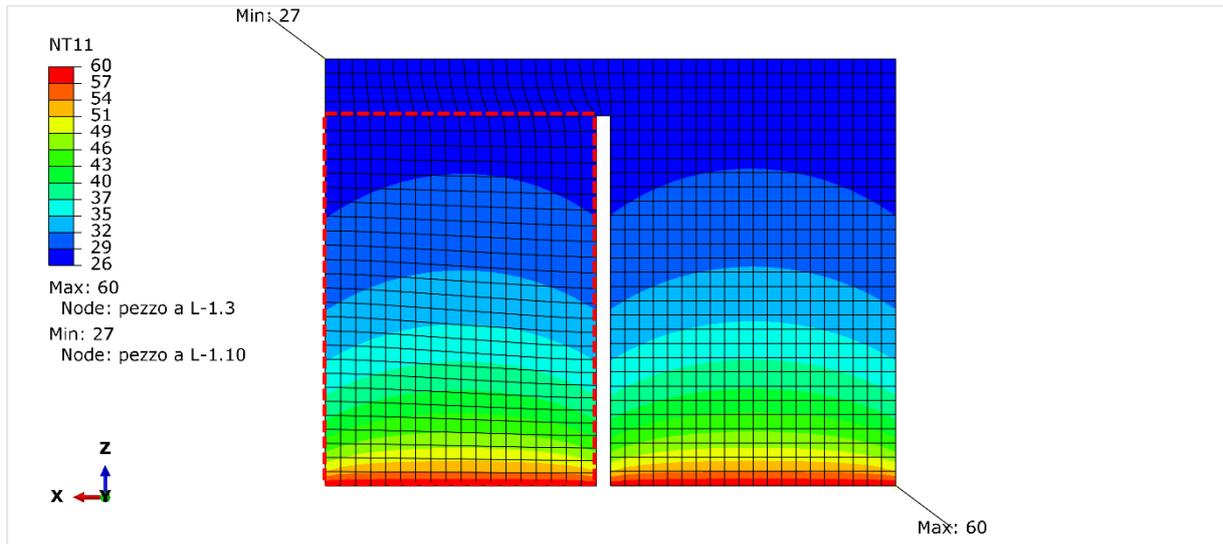


Figura B.37: Profilo termico del componente a L (a destra) e del supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

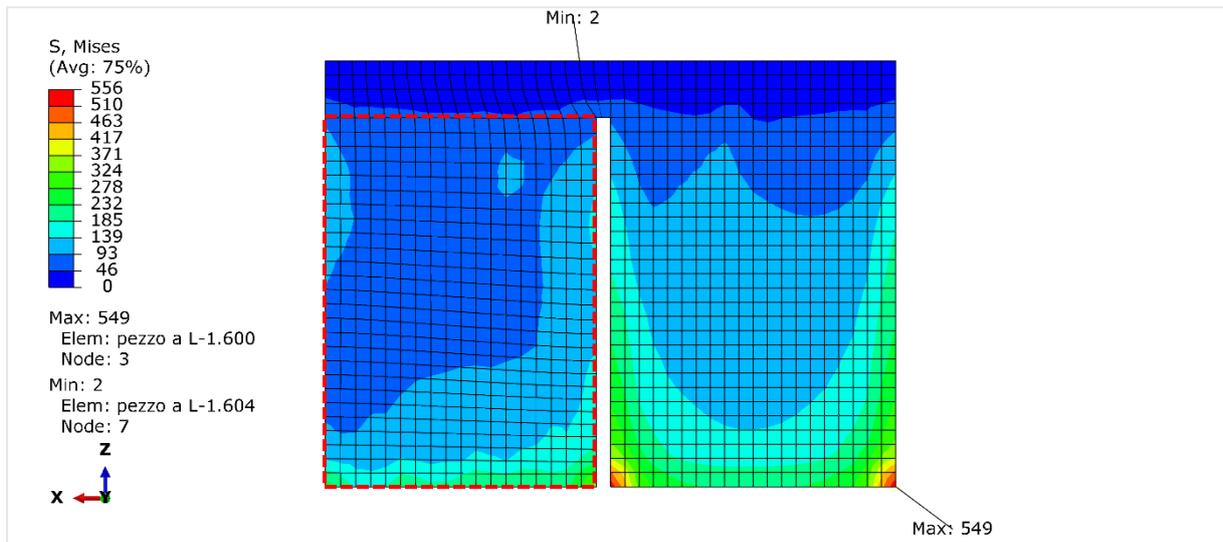


Figura B.38: Distribuzione degli stress di von Mises gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

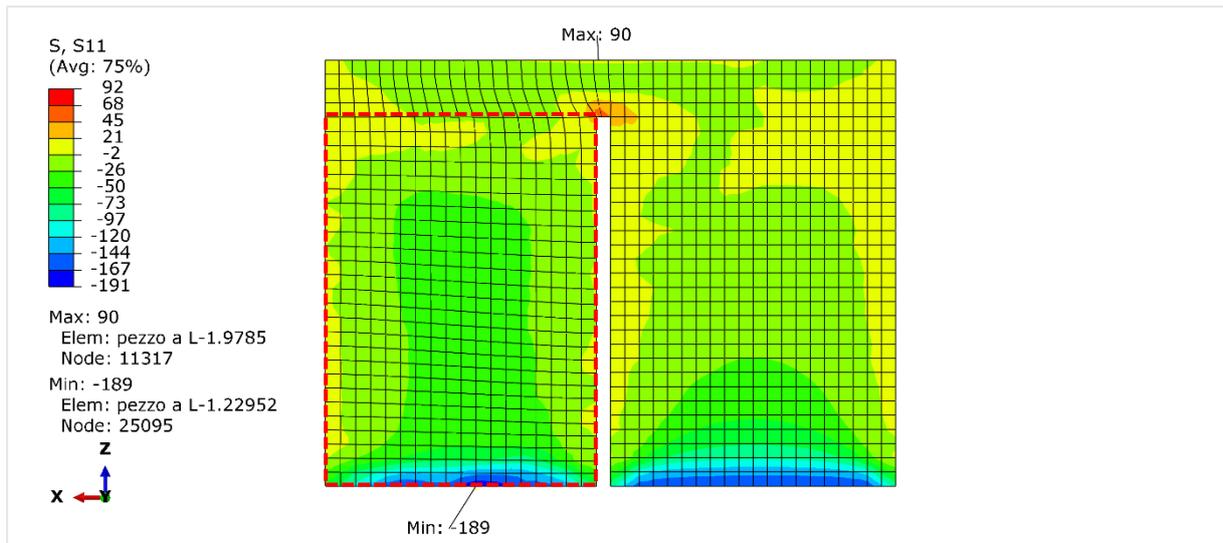


Figura B.39: Distribuzione degli stress S11 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

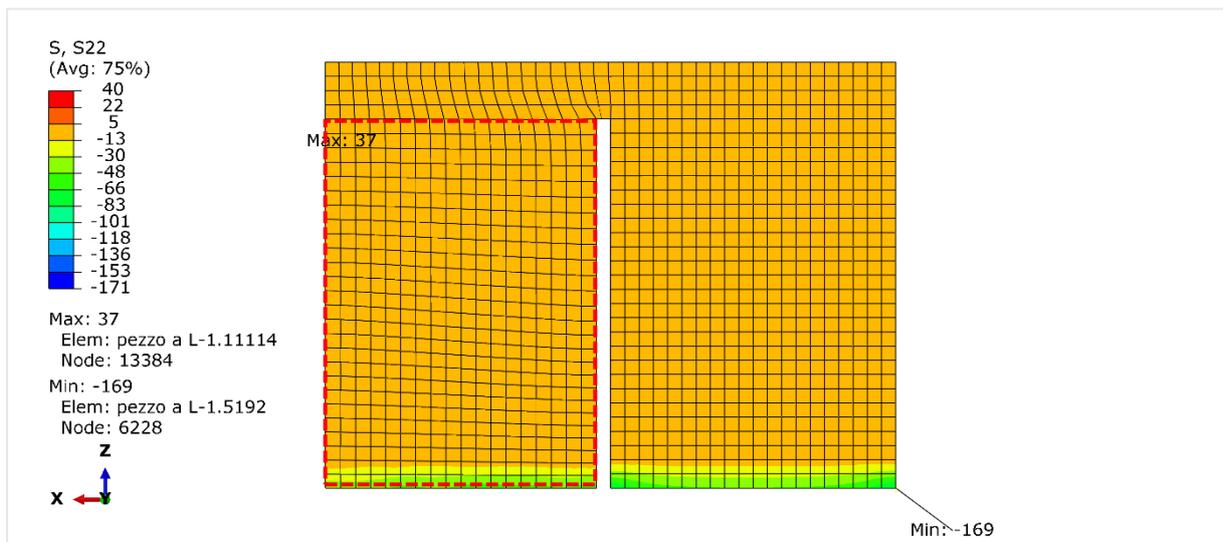


Figura B.40: Distribuzione degli stress S22 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

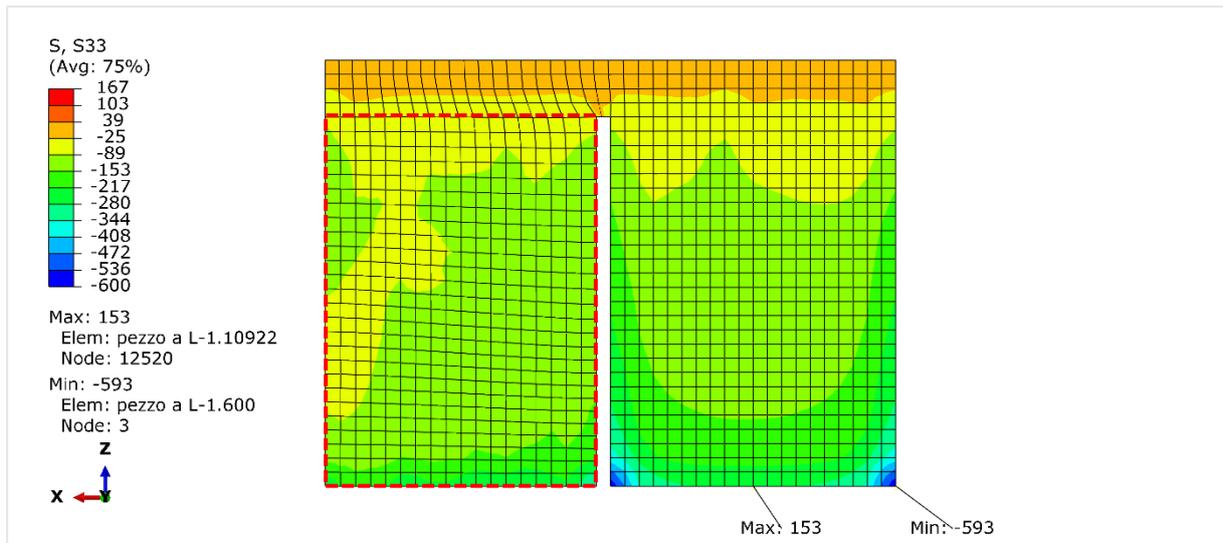


Figura B.41: Distribuzione degli stress S33 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

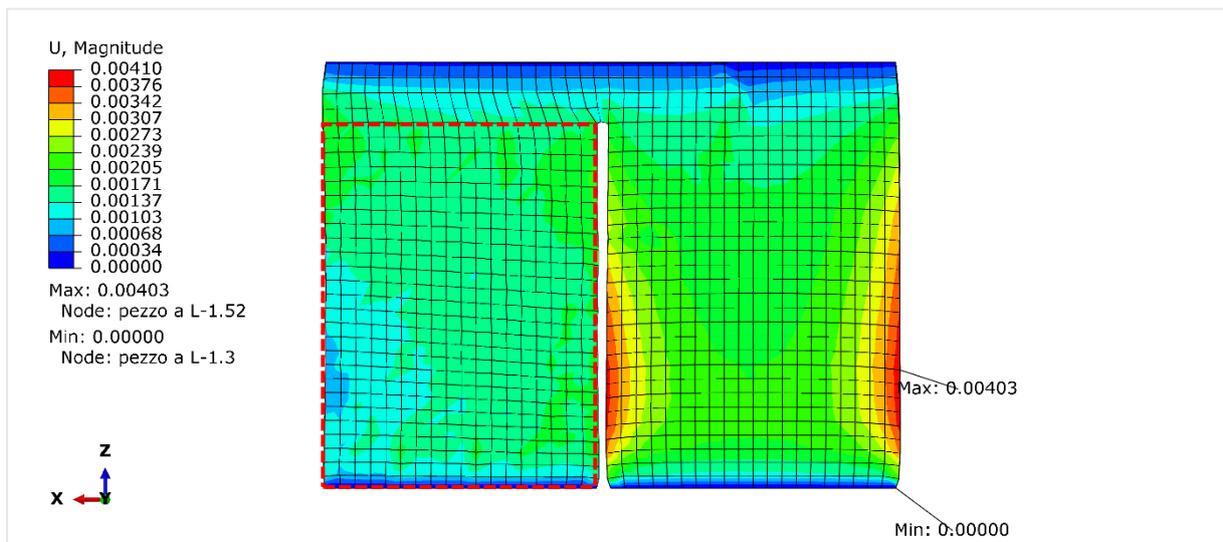


Figura B.42: Distribuzione delle distorsioni gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

Caso 8

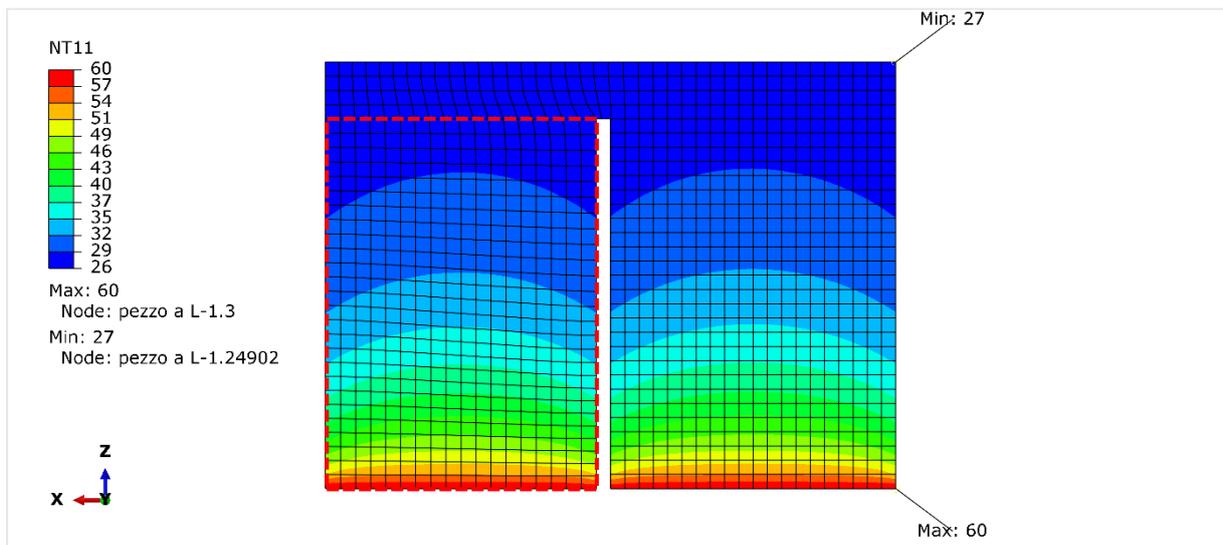


Figura B.43: Profilo termico del componente a L (a destra) e del supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

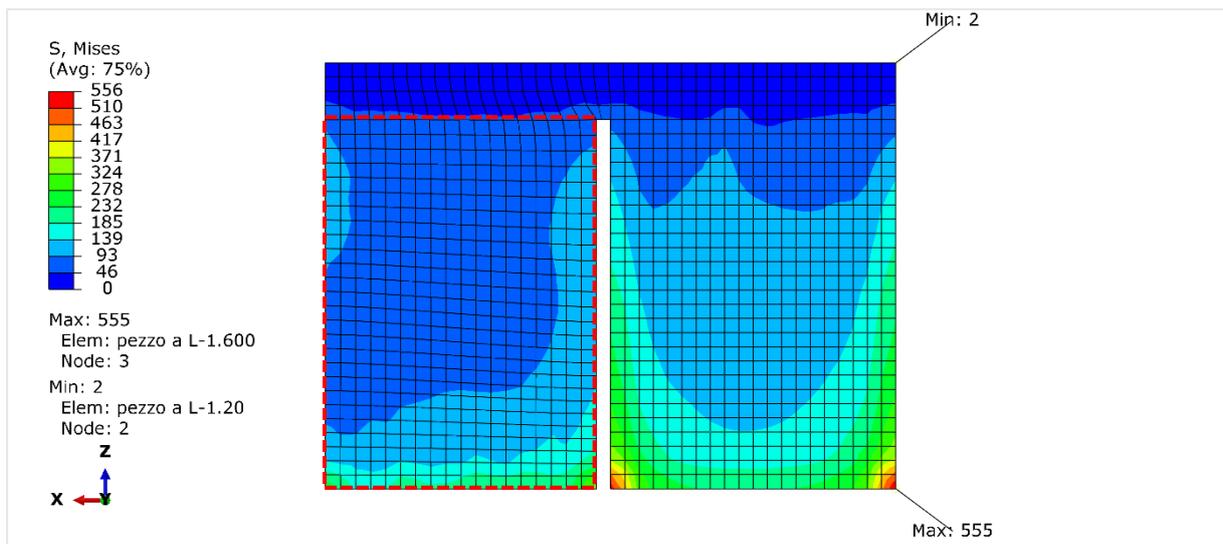


Figura B.44: Distribuzione degli stress di von Mises gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

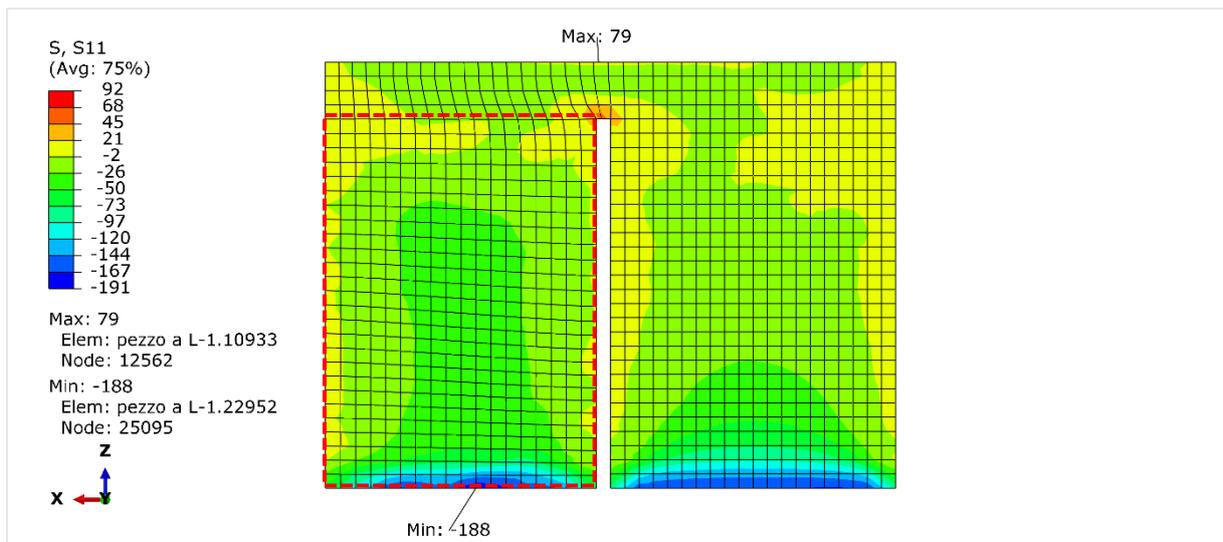


Figura B.45: Distribuzione degli stress S11 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

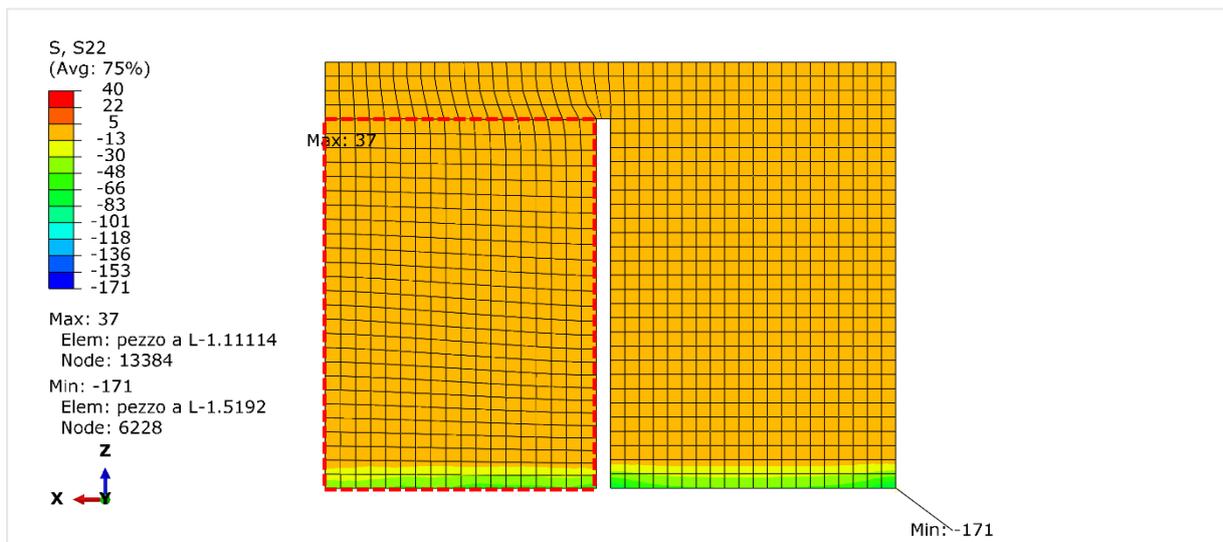


Figura B.46: Distribuzione degli stress S22 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

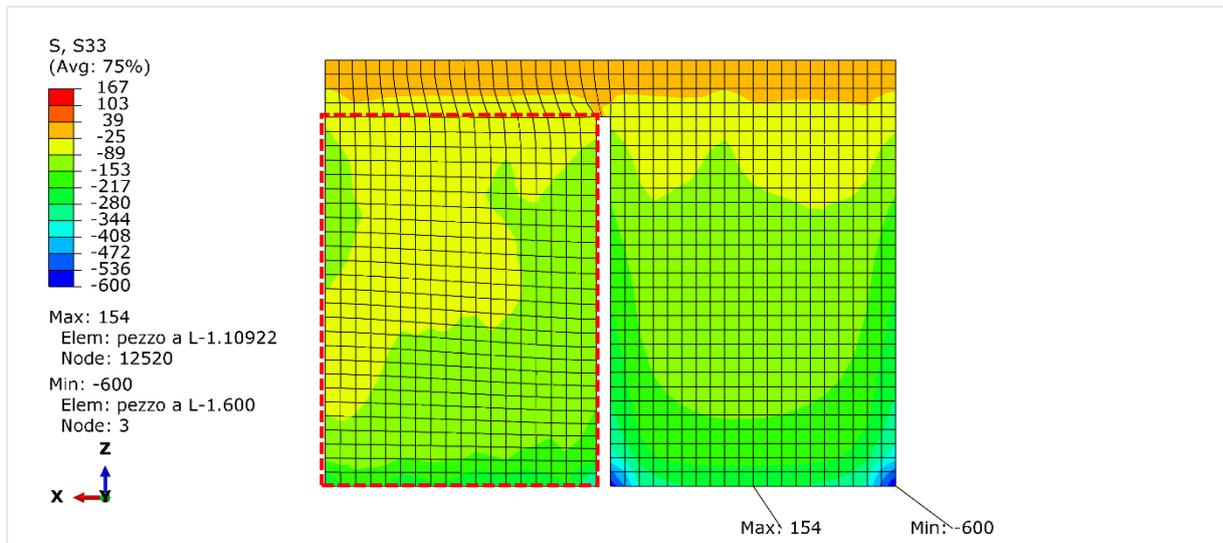


Figura B.47: Distribuzione degli stress S33 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

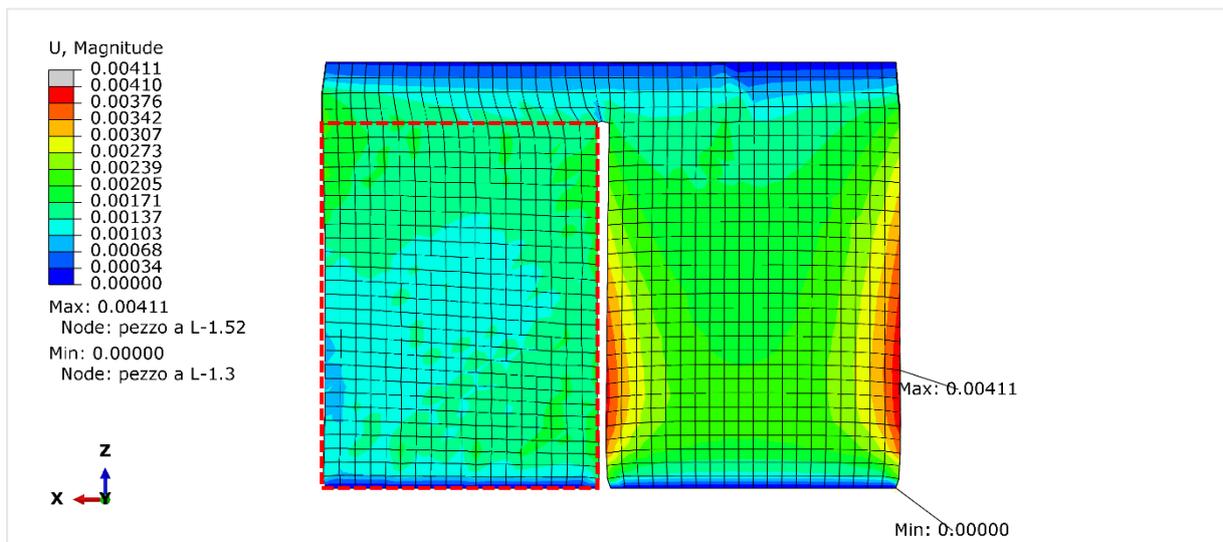


Figura B.48: Distribuzione delle distorsioni gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

Caso 9

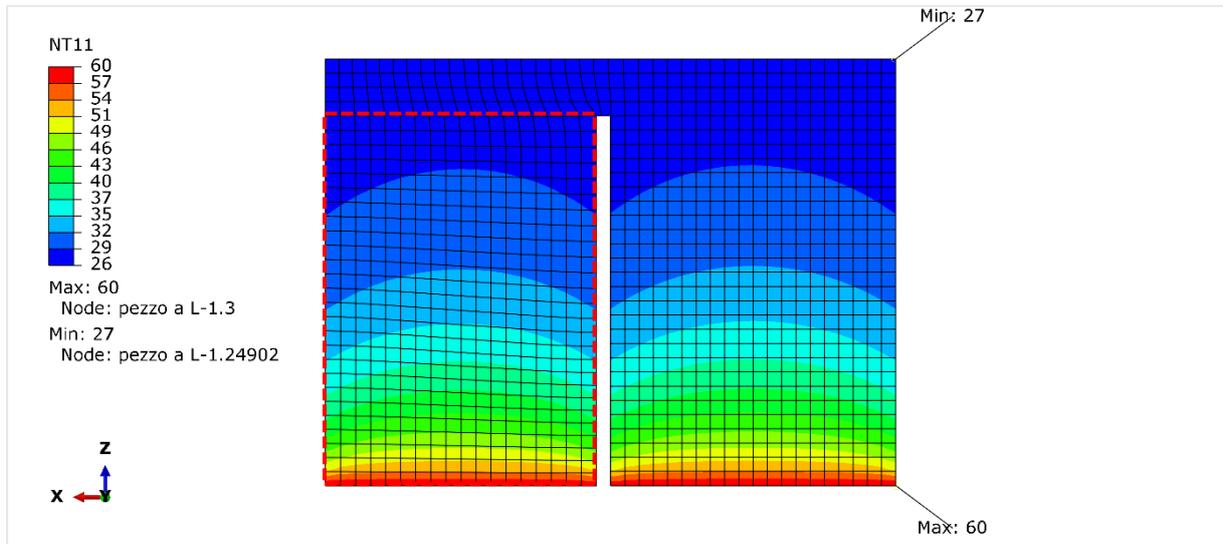


Figura B.49: Profilo termico del componente a L (a destra) e del supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

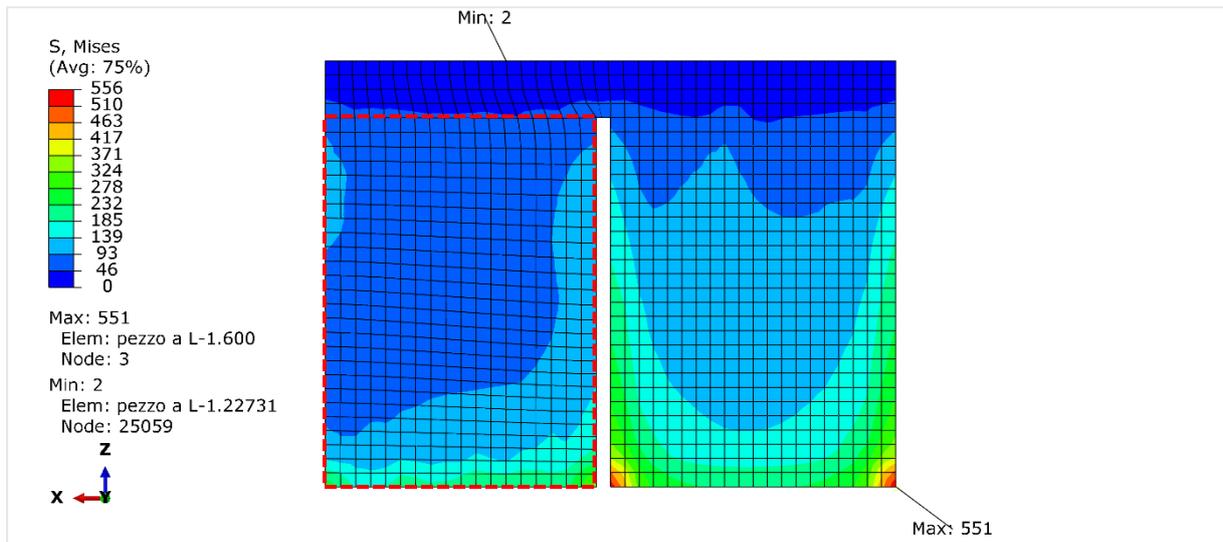


Figura B.50: Distribuzione degli stress di von Mises gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

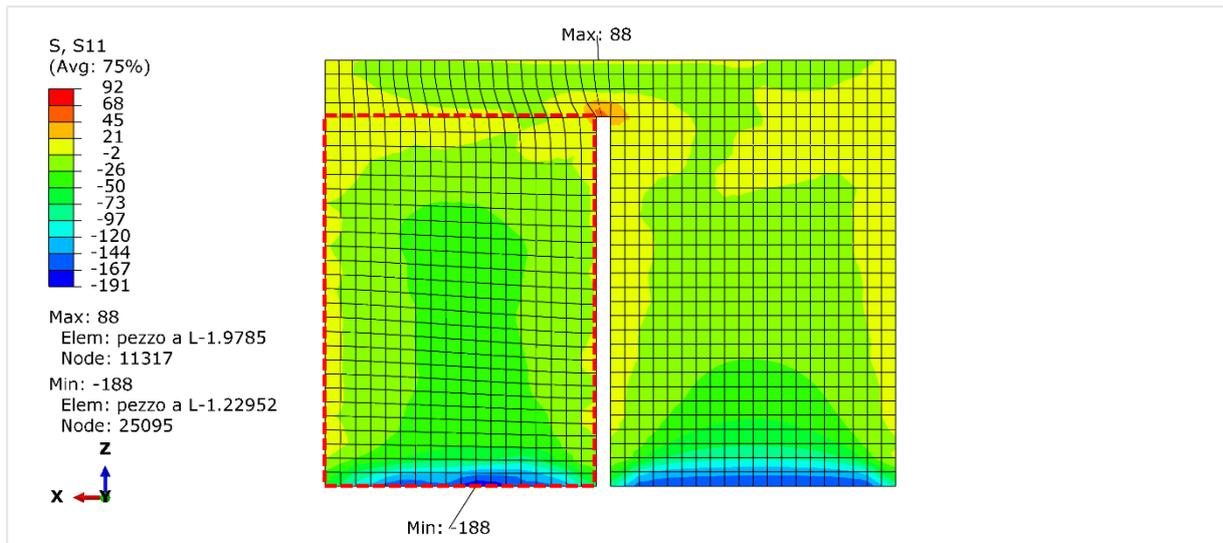


Figura B.51: Distribuzione degli stress S11 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

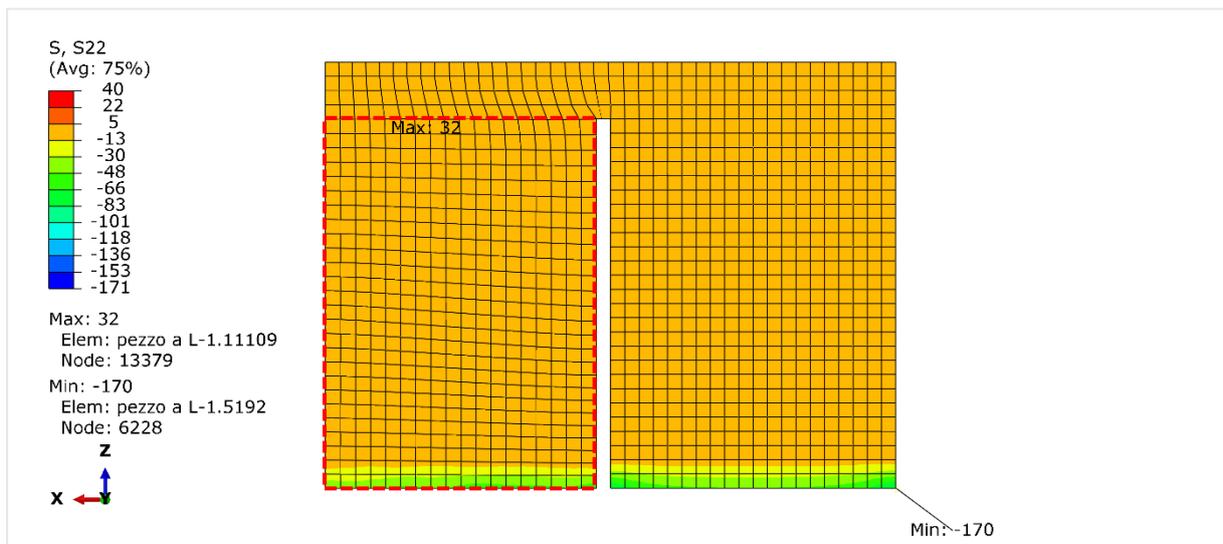


Figura B.52: Distribuzione degli stress S22 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

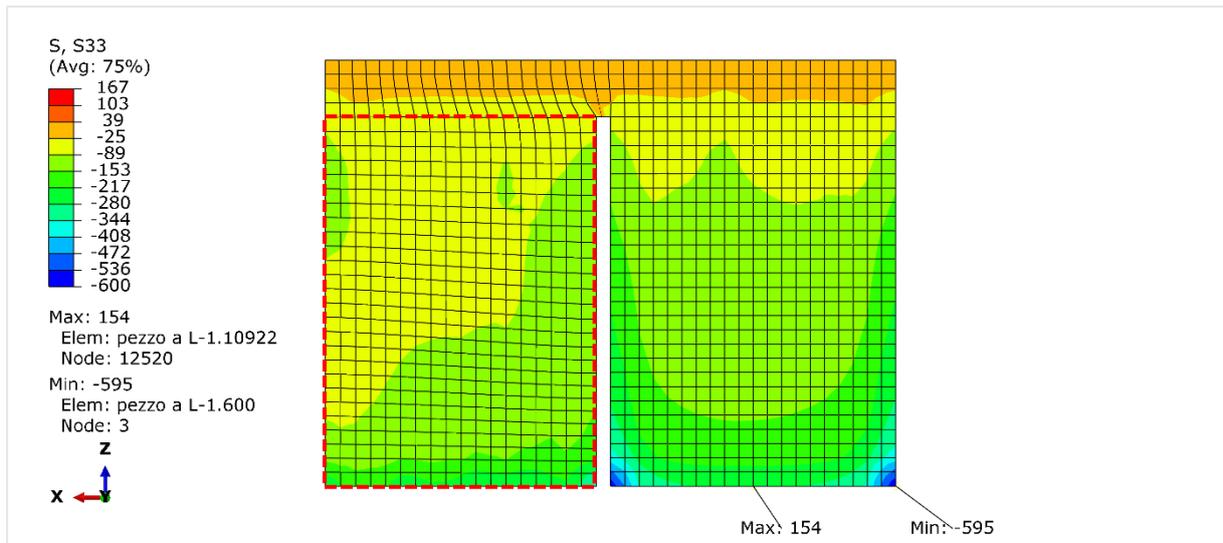


Figura B.53: Distribuzione degli stress S33 gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

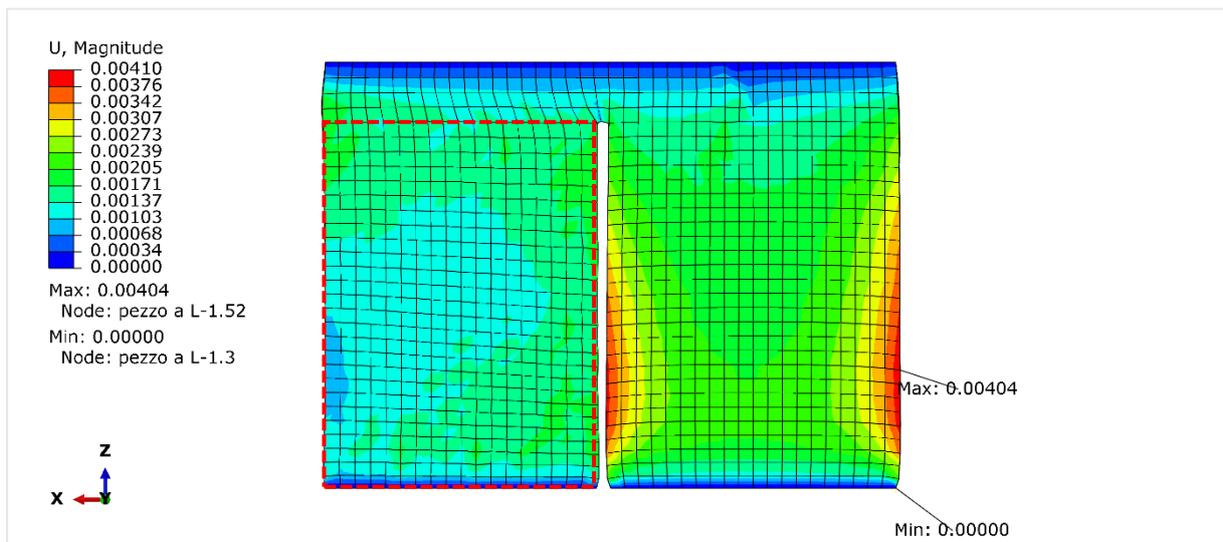


Figura B.54: Distribuzione delle distorsioni gravanti sul componente a L (a destra) e sul supporto (a sinistra) al termine della simulazione.

Ringraziamenti

Un sincero e doveroso ringraziamento va

alla mia ragazza Gabriella,

alla mia famiglia e ai miei parenti,

ai miei amici,

ai professori del Politecnico di Torino,

ai dipendenti di Prima Additive

e a tutti coloro che mi hanno dato anche solamente una piccola mano per la realizzazione di questa tesi e per il completamento dei miei studi.