Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale
A. A. 2020/2021
Sessione di Laurea Dicembre 2021

Utilizzo dell'ottimizzazione topologica per la produzione di stampi per la laminazione dei materiali compositi

Relatori:
Enrico Cestino

Candidati:
Giulia Maritano

A me e alla mia famiglia

Abstract

L'additive manufacturing è una tecnologia che si è diffusa notevolmente nell'ultimo decennio e che si sta utilizzando sempre più anche nell'ambito aerospaziale; la sua finalità è la realizzazione di veri e propri pezzi finiti, senza limitazioni date dal metodo di produzione.

In virtù di questo, il modo di progettare si sta modificando, lasciando molta più libertà di design ai progettisti che possono concentrarsi solo sullo scopo di utilizzo del pezzo.

La libertà di progettazione ha portato ad un vero e proprio studio sull'ottimizzazione della forma.

L'ottimizzazione topologica permette, infatti, di mantenere le funzionalità del componente andando a ridurre il materiale, i costi e i tempi necessari per produrlo.

Si può quindi dire che, sia la fabbricazione additiva, sia l'ottimizzazione topologica siano usate solitamente per ottimizzare e produrre il componente finale; in questo progetto invece, si è pensato di utilizzare queste due tecnologie, strettamente collegate, non per la produzione dei pezzi, ma per la costruzione di stampi.

Gli stampi sono delle parti fondamentali per la laminazione dei materiali compositi, il cui utilizzo, ormai largamente diffuso, è avvenuto anche nel Team S55 per la realizzazione di un aeromodello ed è stato fonte di idea per questo progetto di tesi.

Considerati i numerosi stampi prodotti, associati a lunghi tempi di stampa, si è pensato quindi di agire sull'ottimizzazione degli stampi.

La fase iniziale consisteva nella ricerca di materiali adatti alla costruzione degli stampi e alla loro successiva laminazione.

In seguito, si sono considerati i diversi tipi di ottimizzazione, per poi procedere alla fase sperimentale.

Lo scopo era quello di individuare i parametri di riempimento ottimali (per una specifica condizione di carico) da inserire all'interno dei software di stampa 3D (i cosiddetti slicer, come ad esempio Ultimaker Cura o Simplify 3D).

Per fare ciò si è realizzato un modello CAD di uno stampo tramite il software Solidworks, il cui design non troppo complesso e le cui dimensioni non richiedevano lunghi tempi di calcolo.

Il processo di ottimizzazione sul software Inspire è stato di tipo iterativo, variando le condizioni di carico (due diversi tipi di laminazione), i materiali (Pla e Ultem 1010), l'obiettivo e i vincoli dell'ottimizzazione (minimizzando la massa o massimizzando la rigidezza) e i parametri dimensionali del reticolo di riempimento (diametro e lunghezza dell'elemento).

Si sono poi messi a confronto i risultati simulando la stampa dei vari tipi di ottimizzazione, comparando il materiale e il tempo necessari.

Abstract (Eng)

The additive manufacturing technology has spread considerably in the last decade and is increasingly being used in the aerospace sector; its purpose is the realization of finished pieces without limitations given by the production system.

Because of that the concept of designing is changing, leaving more freedom to the designers who can focus only on the functionality of the piece.

The freedom of design led to a real study on the optimization of the shape.

The topology optimization allows to maintain the functionality of the component by reducing the material, costs and time required to produce it.

It can be said that both additive manufacturing and topological optimization are usually used to optimize and produce the final component; in this project, however, it was decided to use these two technologies, closely linked, not to produce the pieces, but for the construction of the moulds.

Moulds are fundamental components for the lamination of the composite materials, which have been widely used, even within the Team S55 to produce a model aircraft, that has been a source of inspiration for this thesis project.

Taken on account the large number of moulds produced and the long time for the printing, so came the idea to optimize the moulds instead of the final components.

The initial phase consisted in the search for suitable materials for the construction of the moulds and for their subsequent lamination. Afterwards, the different types of optimizations were considered and then proceeded to the experimental phase.

The purpose was to identify the optimal filling parameters (for a specific load condition) to be included within the 3D printing software (the so-called slicer, such as Ultimaker Cura or Simplify 3D).

In the experimental phase it was created a CAD model of a mould using the SolidWorks software, whose design was not too complex and whose dimensions did not require extended calculation times.

After this it was started the optimization process on the Inspire software. It was an iterative process varying: the load conditions (two different types of laminations), the materials (Pla and Ultem 1010), the objective and the optimization constraints (minimizing the mass or maximizing the

stiffness) and the dimensional parameters of the filling lattice (diameter and length of the element).

The results were then compared by simulating the printing of the various types of optimizations, comparing the material and the time required.

Introduzione

L'idea di questo progetto di tesi deriva dall'attività del team S55, il cui obiettivo di costruire un aeromodello ha portato all'utilizzo di materiali compositi e in particolare, della fibra di carbonio.
I materiali compositi sono formati da un materiale di rinforzo (fibra) e da una matrice (polimero, metallo o ceramica) e possono essere prodotti con diversi processi di laminazione.
Le tre principali tecniche per la fibra di carbonio sono il Wet Lay-Up, la laminazione tramite pre-preg e lo stampaggio a trasferimento di resina.
Quella presa in considerazione è la laminazione con pre-preg, in cui gli strati vengono sovrapposti all'interno di appositi stampi e poi laminati.
Sono perciò gli stampi a conferire la forma alla fibra di carbonio, inoltre la qualità del componente finale è influenzata direttamente dalla qualità dello stampo.
Solitamente gli stampi vengono prodotti in cera, schiuma poliuretanica, legno, plastica o metallo e possono realizzati a mano oppure mediante lavorazione meccanica CNC (fresatura e tornitura), tuttavia questi processi sono lunghi e complessi e con alti costi e tempi di produzione.
Di conseguenza si è scelto di utilizzare un'altra tecnologia di produzione, la fabbricazione additiva, con cui è possibile realizzare stampi a basso costo.
La stampa 3D è una tecnologia molto immediata, che permette di passare direttamente dal modello CAD dello stampo, alla sua realizzazione.
Il grande numero di stampi prodotti ha però messo in luce alcuni difetti, infatti per stampi di grandi dimensioni sono necessarie molte ore di stampa e una grande quantità di materiale e, anche un piccolo difetto di rifinitura superficiale, potrebbe causare l'inadeguatezza dello stampo per la laminazione.
Si è perciò pensato di applicare anche alla produzione degli stampi l'ottimizzazione topologica, che solitamente viene impiegata per lo studio del design dei componenti veri e propri.
Ottimizzando gli stampi è possibile ridurre al minimo il materiale utilizzandolo solo dove necessario e, di conseguenza, diminuire i costi e i tempi di stampa.
Lo scopo di questo progetto di tesi è infatti quello di trovare i parametri ottimali per la produzione degli stampi conoscendo la condizione di carico, sapendo quindi i tipi e l'entità dei carichi che dovranno sopportare durante la laminazione.

~ Capitolo 1 ~

1. Laminazione di materiali compositi

Il processo di laminazione dei materiali compositi e in particolare della fibra di carbonio, può avvenire partendo da tessuti che vengono manualmente impregnati di resine, oppure da fogli di pre-preg.

I fogli di pre-preg rappresentano dei materiali compositi fibro-rinforzati, questo significa che nel composito è già presente la matrice che mantiene la disposizione delle fibre, come a formare un tessuto. Questi tessuti sono formati da una matrice parzialmente polimerizzata e sono facilmente modellabili e adattabili agli stampi durante il processo di laminazione.

L'utilizzo di questi fogli preimpregnati comporta un elevato costo, tuttavia limitano i difetti di fabbricazione, garantendo un risultato migliore:

- quantità esatta di resina rispetto alle fibre;
- riduzione della disuniformità nella stesura della resina a causa della distribuzione manuale;
- riduzione del rischio per gli operatori con meno contatto con la resina liquida.

1.1. Laminazione con sacco a vuoto (vacuum bag)

La laminazione tramite sacco a vuoto utilizza la pressione atmosferica per far aderire tra loro gli strati di laminato. [1]

Il sistema può essere formato da un'unica busta ermetica, oppure da uno stampo ermetico e da una pellicola dalla parte opposta.

Tramite una pompa per il vuoto viene estratta l'aria dall'interno dell'involucro, di conseguenza si crea un gradiente di pressione tra l'esterno e l'interno che, in condizioni ottimali, sarà esattamente 1 atm. La pressione sarà esercitata in modo costante su tutto il laminato.

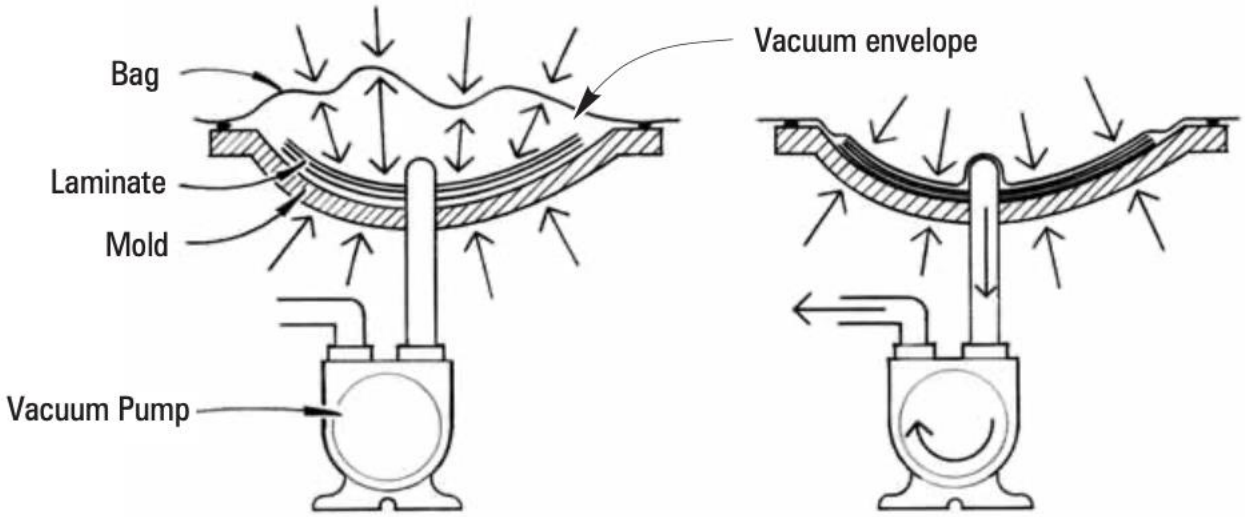


Figura 1 - Sistema del sacco a vuoto, configurazione prima (SX) e dopo (DX) l'azionamento della pompa

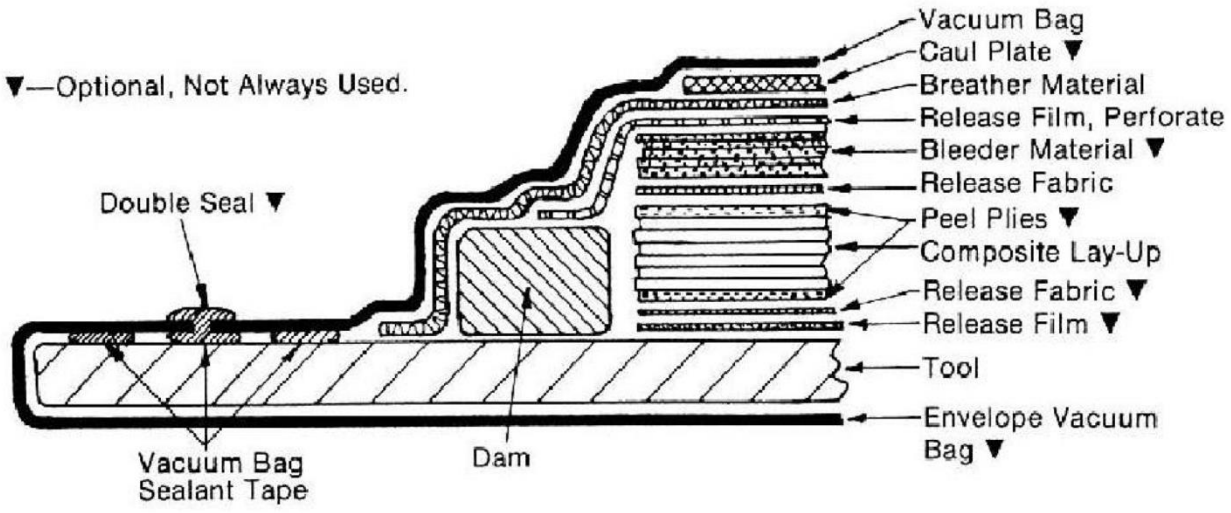


Figura 2 - Stratificazione dei materiali necessari per la laminazione con sacco a vuoto

Il sistema è costituito da più strati di materiali, partendo dal basso (nella figura sopra) si ha:

- lo stampo (*tool*);
- un *release agent* che può essere un foglio (ad esempio di teflon) oppure un liquido spennellato sul tool che andrà poi a solidificarsi. Lo scopo di questo strato è evitare che il laminato si incolli allo stampo;
- *peel plies* sopra e sotto al laminato, sono strati opzionali. Vengono usati nel caso in cui sia necessaria una certa rugosità del laminato;
- *laminato*, diversi strati di pre-impregnato disposti in successione secondo le orientazioni stabilite in fase di progetto (a seconda dei carichi che dovrà sopportare il componente);
- un secondo *release agent*, che, in questo caso, sarà perforato per consentire l'eliminazione della resina in eccesso;
- *bleeder* è un materiale assorbente che serve proprio ad assorbire l'eccesso di resina;
- *breather* è uno strato che consente il passaggio dall'aria;
- *vacuum bag* strato finale del sacco vuoto che viene sigillato.

All'interno dello schema è presenta anche un *dam* (letteralmente argine) che serve per evitare che la resina si sposti lateralmente intasando la valvola del vuoto e allo stesso tempo permette il passaggio dell'aria anche in direzione laterale al laminato.

1.2. Laminazione in autoclave

Il processo di laminazione in autoclave è caratterizzato da una combinazione di aumento di temperatura (fino a 200° C) e di pressione (fino a 10 bar). [2]

Si parte da una temperatura ambiente (circa 20° C) e da una pressione di 1 atm dovuta al sacco a vuoto in cui il laminato deve essere inserito prima dell'ingresso in autoclave.

L'incremento di pressione e temperatura viene fatto gradualmente e in modo che i due massimi siano raggiunti nello stesso tempo. Questa condizione viene poi mantenuta per un certo intervallo di tempo in modo da ottenere il risultato desiderato.

Il processo di laminazione in autoclave garantisce dei risultati migliori, tuttavia risulta essere più dispendioso; inoltre le alte temperature a cui viene sottoposto lo stampo richiedono l'utilizzo di particolari tipi di polimeri.

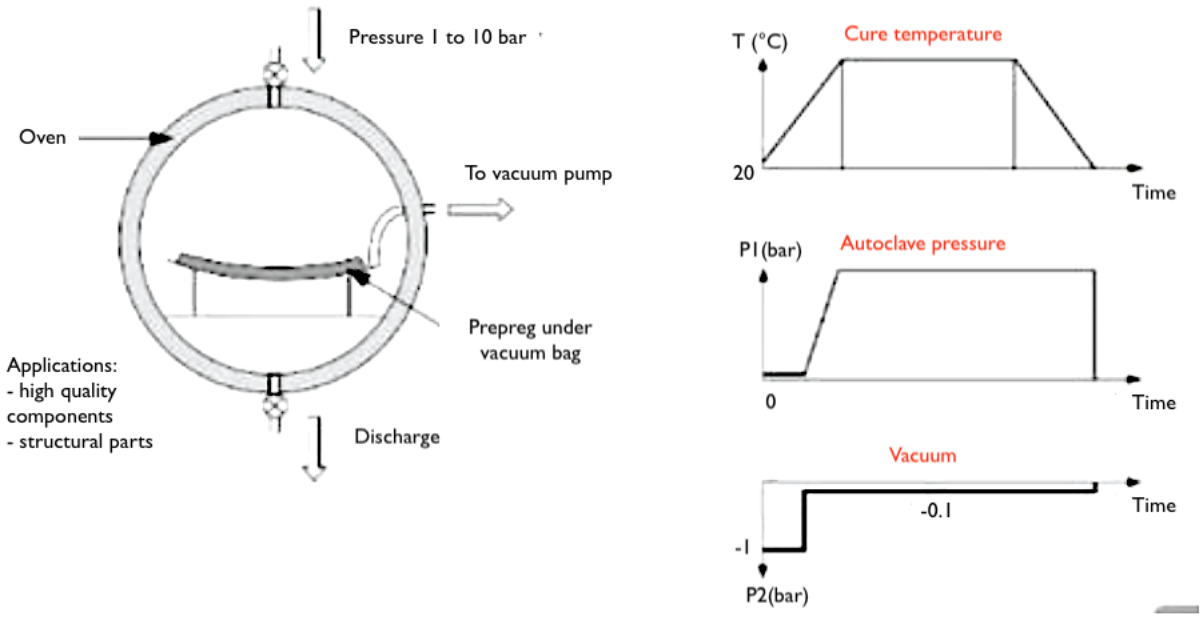


Figura 3 - Schema autoclave con relativo andamento di pressione e temperatura

1.3. Tecnologia di produzione e materiali

Come emerso in precedenza, per entrambi i tipi di laminazione (tramite sacco a vuoto e tramite autoclave) è necessario uno stampo per poter dare la forma desiderata al laminato.
Gli stampi per la laminazione della fibra di carbonio possono essere realizzati con differenti materiali; quelli maggiormente utilizzati sono fatti in cera, schiuma poliuretanica o metallo.
Tuttavia la scelta del team era di realizzare in modo autonomo e indipendente gli stampi, sia per un fattore economico, infatti richiedere la produzione di numerose parti ad aziende esterne avrebbe comportato un alto costo, sia per permettere ai membri del team di accrescere la propria esperienza e conoscenza su tematiche non prettamente accademiche.
Esaminando le varie tecnologie di produzione degli stampi, la scelta è ricaduta sull'additive manufacturing; una delle motivazioni è che i pezzi possono essere realizzati in modo veloce, senza l'impiego di grandi e costosi macchinari.
In particolare la tecnologia che è stata utilizzata è la Fused Deposition Modeling (FDM).

Fused Deposition Modeling (FDM)

Si tratta di una tecnologia di stampa 3D in cui un filamento di materiale termoplastico fuso viene estruso da un ugello riscaldato e depositato su un piatto (che può essere riscaldato o no) e via via su strati successivi.
L'indurimento di ogni strato permette la deposizione di quello successivo e di conseguenza la fabbricazione del pezzo lungo la direzione verticale.
È importante che il filamento, arrotolato su delle bobine, venga riscaldato subito prima dell'ugello di estrusione (per evitare che si solidifichi prima dell'uscita bloccando il foro), quindi sono presenti dei blocchi riscaldanti che portano il materiale ad una temperatura superiore al suo punto di fusione (o di rammollimento).
L'estrusore si muove in modo bidimensionale lungo X e Y, mentre è il piatto a scendere lungo z dopo il completamento di ogni strato.
Come detto in precedenza, il piatto può essere riscaldato, questo dipende dal tipo di materiale che viene estruso e dalla velocità di solidificazione che si vuole ottenere; in ogni caso la

temperatura del piatto è sempre inferiore a quella di estrusione proprio per garantire l'indurimento del materiale depositato.

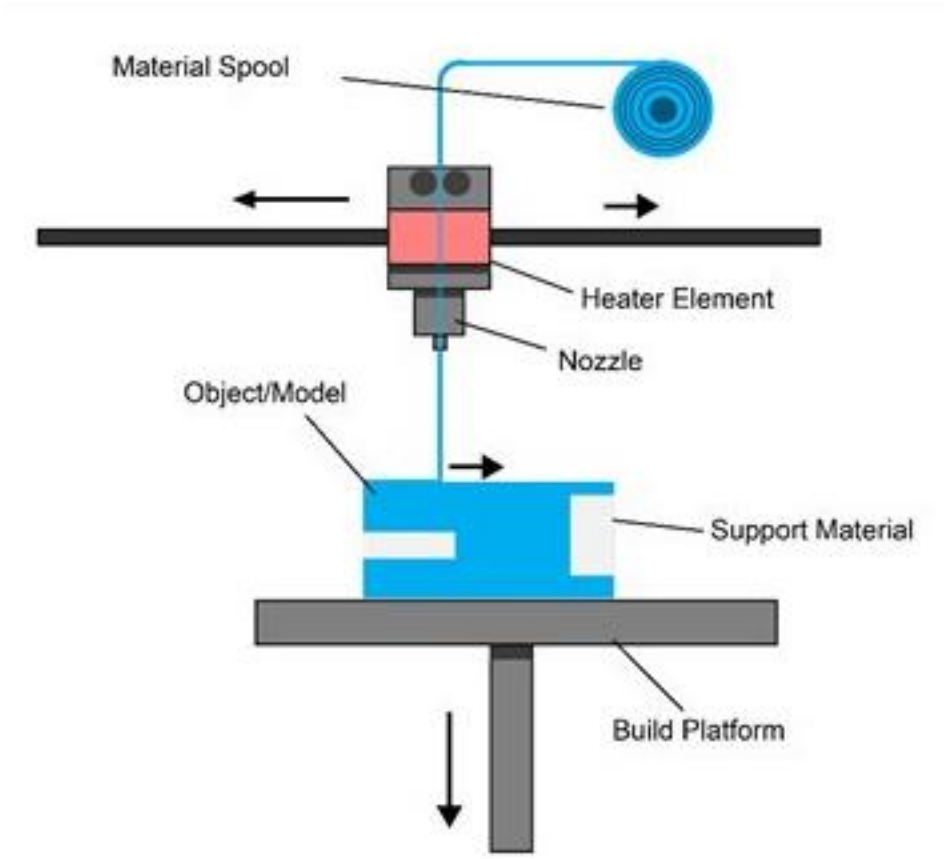


Figura 4 - Sistema per stampa tramite tecnica FDM [3]

Il diametro dell'ugello è variabile ed è uno dei fattori che determina la precisione dei dettagli e la rifinitura superficiale (correlata allo spessore dei singoli strati).
Il diametro di uscita determinerà anche il tempo complessivo di realizzazione del pezzo (che può variare da ore a giorni in base alla dimensione del pezzo, al riempimento e allo spessore dei layer).

Alcuni dei polimeri termoplastici più comuni adatti a questo scopo sono i seguenti: [4]

- **ABS** (acrilonitrile-butadiene-stirene) è un copolimero termoplastico molto utilizzato per creare oggetti leggeri e rigidi. La differente concentrazione dei materiali che lo compongono va a modificarne le caratteristiche:

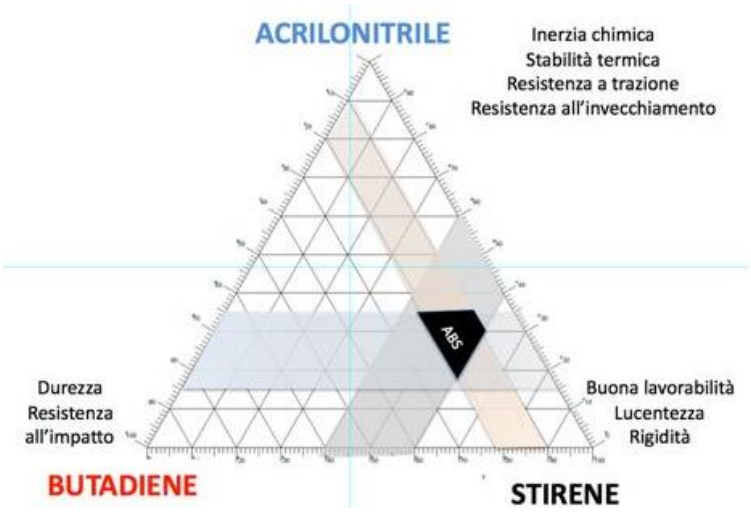


Figura 5 - Variazioni delle caratteristiche del materiale in base alle diverse composizioni

La temperatura di estrusione varia tra i 240 e i 260 °C, richiede un piatto riscaldato in modo da rallentare l'indurimento e permettere al primo strato di aderire alla superficie evitando distacchi e problemi di ritiro.

- **PLA** (acido poli lattico) è un polimero termoplastico generato dalla fermentazione del mais o del grano. È fortemente idroscopico, quindi deve essere conservato in ambiente secco ed è idrosolubile a temperature superiori ai 70 °C. La temperatura di estrusione è tra i 200 e i 230 °C e non necessita di un piano riscaldato.
  È utilizzato principalmente per realizzare pezzi di grandi dimensioni ma lineari e che non necessitino di significative proprietà meccaniche.

- **PVA** (alcol polivinilico) è molto utilizzato per realizzare supporti negli oggetti con forme particolari o che presentano sottosquadri. È un polimero termoplastico con una temperatura di estrusione abbastanza bassa, è idrosolubile, quindi ottimo per ottenere oggetti che con tecnologie convenzionali non potrebbero essere realizzati in un unico pezzo.

Tuttavia si decompone a temperature superiori ai 200 °C, quindi devono essere aggiunti altri polimeri così da permettere l'estrusione a temperature intorno ai 200 °C.

- **PC** (policarbonato)è un polimero termoplastico ottenuto dall'acido carbonico e che ha una buona resistenza al calore, inoltre può sopportare grandi deformazioni plastiche senza rompersi. La temperatura di estrusione è però superiore ai 260 °C e inoltre ha problemi di adesione, quindi necessita di un piatto riscaldato a circa 100 °C; assorbe l'umidità quindi per non intaccare la qualità del pezzo è necessario conservarlo in contenitori termici.

- **PET** (Polietilentereftalato) è un materiale molto leggero con una buona resistenza all'impatto e una buona adesione alla superficie di stampa, per questo non necessita di un piatto riscaldato, tuttavia la sua temperatura di estrusione è circa 260 °C.

- **HIPS** (High Impact Polystyrene) è costituito da polistirene e da gomma stirene-butadiene dispersa. La presenza dell'elastomero conferisce un maggiore allungamento a rottura e una maggiore resistenza all'impatto. La temperatura di estrusione è intorno ai 230-250 °C e necessita di un piatto riscaldato intorno ai 100 °C. È completamente solubile in limonene, può essere quindi usato come il PVA per dei supporti; tuttavia può presentare problemi di delaminazione.

- **Nylon** è un polimero a base poliammidica, è meno fragile dell'ABS e del PLA, tuttavia può avere deformazioni e ritiri maggiori, necessita quindi di un piano riscaldato. È un materiale molto fibroso e ciò limita la velocità di stampa; la temperatura di estrusione è tra i 235 e i 260 °C.

- **ULTEM 1010 / 9085** è un polimero termoplastico amorfo (sviluppato da General Electric negli anni '80 e poi prodotto da SABIC dal 2007), viene utilizzato principalmente per la facilità con cui può essere modellato mantenendo un'elevata stabilità dimensionale. Ha delle buone proprietà meccaniche (alta resistenza meccanica e resistenza agli urti) e un ottimo rapporto peso/resistenza (per questo largamente impiegato nel settore

aeronautico per gli allestimenti interni come nelle valvole di ventilazione o per i sedili). Ha un'alta resistenza termica (oltre i 210 °C) e chimica (migliore per quanto riguarda l'ULTEM 1010).

A seguito di quanto detto, la scelta per il materiale per gli stampa è ricaduta sul PLA: è quello con la più bassa temperatura di estrusione e quello più adatto alla realizzazione di pezzi di grandi dimensioni considerando il lento indurimento degli strati, inoltre non necessita del piano riscaldato.
È necessario tenere in considerazione che gli stampi prodotti in PLA potranno essere laminati solo mediante sacco a vuoto a causa della bassa temperatura di transizione vetrosa, non è quindi adatto alla lavorazione in autoclave.
Per questo per i pezzi che devono essere laminati in autoclave, così da ottenere un risultato migliore, si dovrà cambiare materiale per gli stampi passando all'ULTEM, la cui temperatura di transizione vetrosa e resistenza termica è decisamente superiore.

1.4. Schede tecniche

Dei due materiali scelti si riportano di seguito le schede tecniche i cui dati saranno necessari per le analisi successive sui software dedicati.
Per entrambi i materiali si è fatto riferimento alle proprietà meccaniche riportate sulla guida del produttore Stratasys [3]. Infatti ogni rivenditore di polimeri per le stampa 3D fornisce dati leggermente diversi dal momento che le caratteristiche meccaniche dipendono dal tipo di lavorazione con cui il filamento viene prodotto, dalla sua dimensione (diametro) e anche da come avviene l'estrusione per la produzione dei provini per i vari test.

1.4.1. PLA

PROPRIETA'	TEST METHOD	PIANO XZ	PIANO ZX
TENSIONE DI SNERVAMENTO	ASTM D638	45 MPa	26 MPa
TENSIONE A ROTTURA	ASTM D638	48 MPa	26 MPa
MODULO ELASTICO	ASTMD638	3039 MPa	2539 MPa
MODULO DI POISSON [5]		0.36	
DENSITA'	ASTM D792	1.264E-09 t/mm3	
T di transizione vetrosa	DMA (SSYS)	63 °C	
Coeff. di Espansione Termica	ASTM E831	101 µm/(m°C)	

Tabella 1 - Caratteristiche meccaniche PLA

1.4.2. ULTEM 1010

PROPRIETA'	TEST METHOD	PIANO XZ	PIANO ZX
σ di SNERVAMENTO	Non presenta snervamento a trazione		
σ di SNERVAMENTO a Compressione	ASTM D695	245 MPa	440 MPa
σ di ROTTURA	ASTM D638	80 MPa	30 MPa
MODULO ELASTICO	ASTM D638	3000 MPa	3000 MPa
MODULO di POISSON		0.115	
DENSITA'	ASTM D792	1.29E-09 t/mm3	
T di transizione vetrosa	ASTM D7426	210 °C	
Coeff. di Espansione Termica	ASTM E831	5-15 µm/(m°C)	

Tabella 2 - Caratteristiche meccaniche Ultem 1010

Per entrambe le schede tecniche si può vedere un riferimento al piano e alla direzione di estrusione, questo indica come viene realizzato il provino ed è importante in quanto tutte le parti realizzate tramite stampa 3D (compresa quindi la tecnica FDM) sono anisotrope.

Si riporta di seguito il sistema di orientazione con cui vengono realizzati i provini e che è stato riportato nelle tabelle:

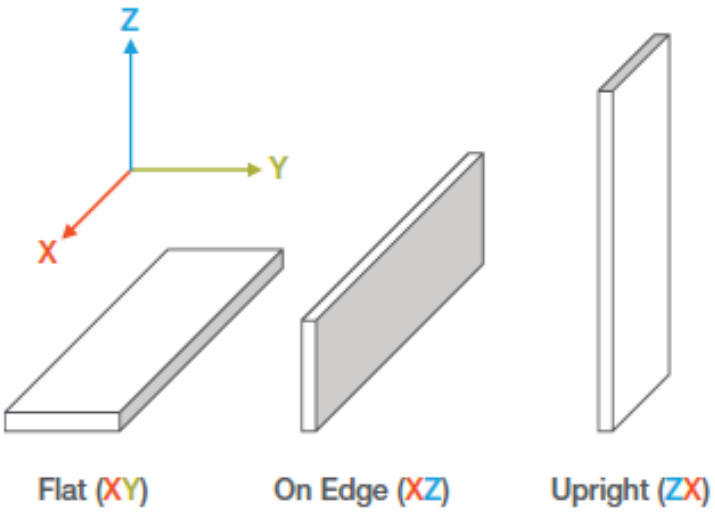


Figura 6 - Sistema di riferimento per la produzione dei provini

Si noti che per entrambi i materiali, i piani presi in considerazione sono solo XZ (On Edge) e ZX (Upright); è infatti poco utilizzata la realizzazione dei provini sul piano XY (Flat) in quanto la deposizione del materiale su una superficie molto ampia potrebbe portare a fenomeni di scollatura e ingobbimento del provino. O viceversa nel caso in cui si usino dei materiali per aumentare l'adesione tra il piatto e il pezzo (tipo colle o spray) si potrebbe danneggiare il provino nel tentativo di scollarlo dalla superficie una volta terminata la stampa.

Un ulteriore motivazione, per quanto riguarda il materiale ULTEM 1010, è data dal coefficiente di espansione termico. Come si vedrà nel paragrafo successivo, le dimensioni del provino hanno delle variazioni superiori nel caso in cui venga stampato Flat rispetto alla sua realizzazione On Edge.

1.5. Problematiche laminazione in autoclave

Durante la laminazione in autoclave sia lo stampo che il laminato vengono tenuti per un certo tempo ad alte temperature, per questo è necessario tenere in considerazione il diverso coefficiente di dilatazione termica (CTE) dei due materiali.

Si prenda in esame per primo il CTE della fibra di carbonio che, essendo un materiale composito unidirezionale, avrà due coefficienti differenti, uno in direzione longitudinale e uno in direzione trasversale. In generale, poiché il CTE delle fibre è minore di quello della matrice, le fibre impediscono la dilatazione della matrice in direzione longitudinale; quindi, il coefficiente di dilatazione termica dell'intero composito in direzione longitudinale α_L è più piccolo di quello trasversale $\alpha_T \rightarrow \alpha_L < \alpha_T$.

Dove in generale α si trova come:

$$\alpha = \left(\frac{\Delta L}{L}\right) / \Delta T$$

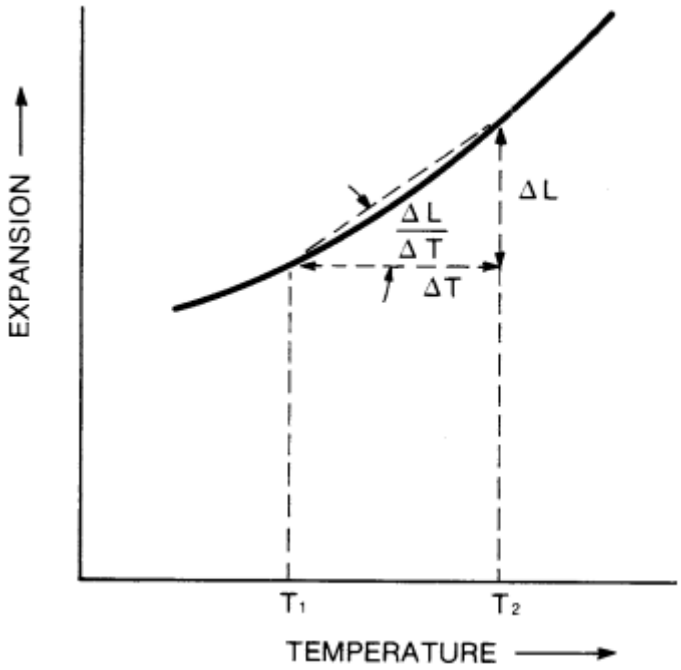


Figura 7 - Andamento della dilatazione rispetto alla temperatura

La fibra di carbonio ha coefficiente di dilatazione termica negativo, al contrario della matrice; quindi, si possono ottenere dei compositi con un'alta stabilità termica e coefficiente di dilatazione in direzione longitudinale praticamente nullo. [6]

FIBRA	CTE [E-06 m/(m°C)]
Carbon HS (PAN)	-0.1 / -0.5
Carbon HM (PAN)	-1.2 / 0.5
Carbon UHM (PAN)	-0.1 / -0.5
Carbon P5 (PITCH)	-0.9
Carbon P100 (PITCH)	-1.6

Tabella 3 - Coeff. di dilatazione termica per alcuni tipi di fibre di carbonio (solo fibra) [7][7]

Invece per quanto riguardo gli stampi verrà preso in considerazione solo l'Ultem poiché, come detto in precedenza, il PLA non è adatto per la laminazione in autoclave.

Si ricorda che il CTE dell'Ultem varia in base all'orientazione del provino durante la stampa.

Per trovare il CTE si utilizzano due differenti provini che vengono riscaldati da -50 °C a 200 °C con un incremento di 5 °C/min e se ne misura l'espansione.

Per quanto riguarda i provini XY si misura la variazione di dimensione attraverso gli strati lungo l'asse Z, mentre per i provini XZ / ZX si misura la dilatazione nel piano rispetto ai layers.

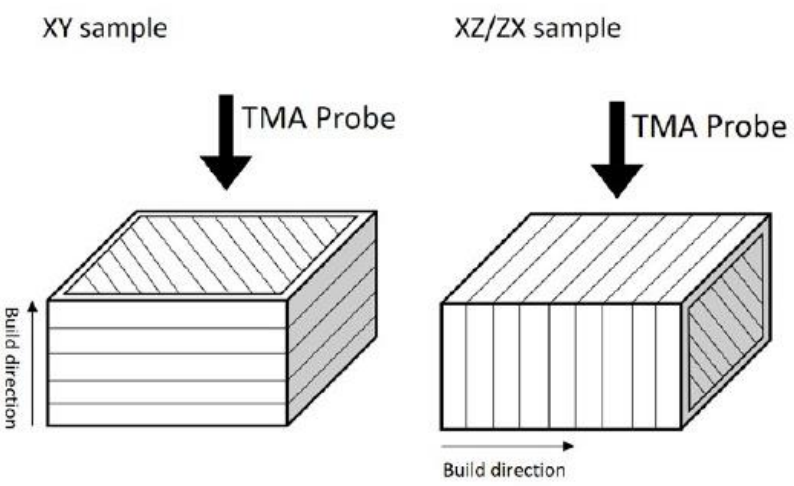


Figura 8 - Misura del CTE per materiali termoplastici ottenuti tramite FDM

CTE	XY [μm/(m°C)]	XZ / ZX [μm/(m°C)]
(step da -50°C a 60 °C)	35	30
(step da 60°C a 200 °C)	30	5-15

Tabella 4 - Coefficienti di dilatazione termica dell'Ultem per differenti orientazioni di stampa

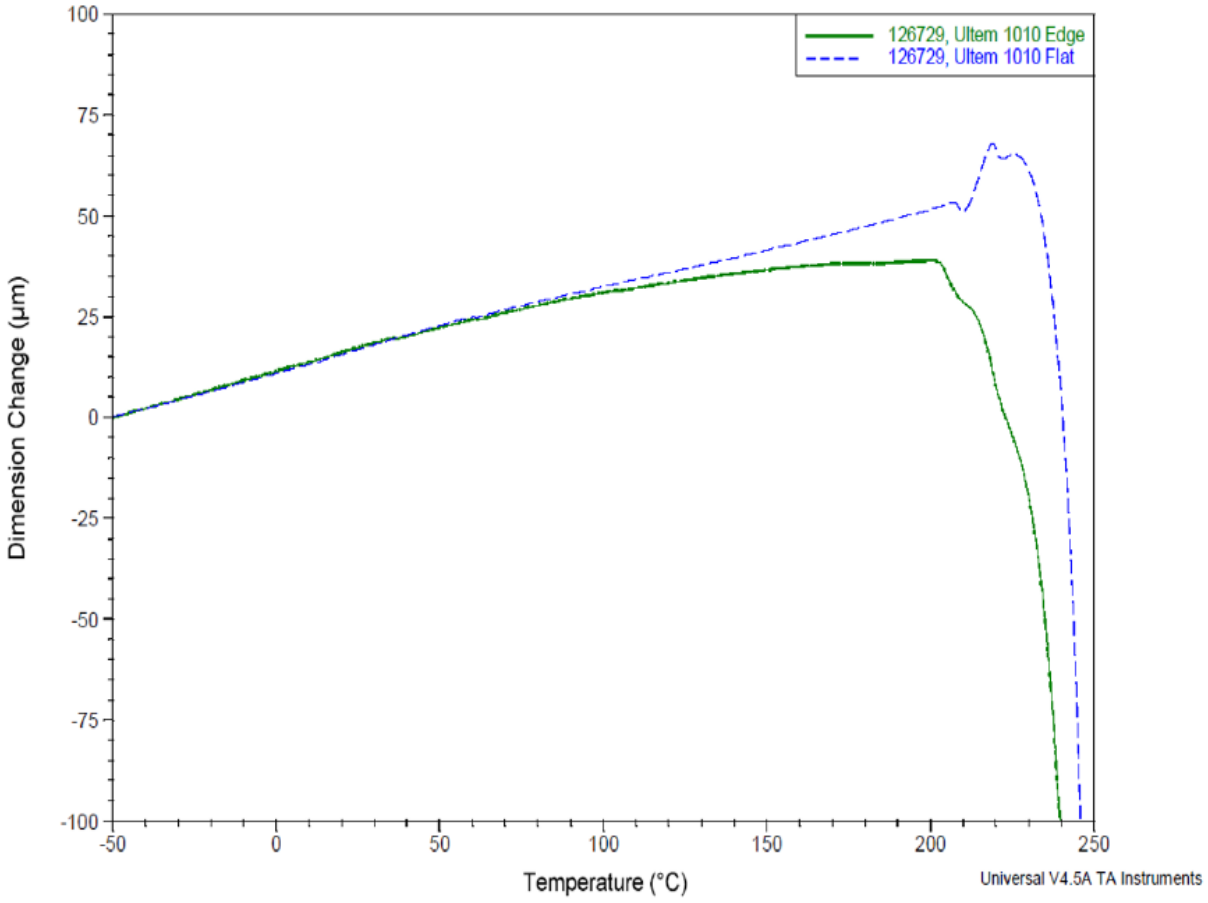


Grafico 1 - Sovrapposizione delle variazioni delle dimensioni all'aumentare della T per due tipologie di provini Flat e On Edge [3]

In generale si può notare che il CTE ha comunque un valore positivo, quindi, a fronte di un aumento di temperatura, si avrà un aumento delle dimensioni.

Questa variazione deve essere analizzata e valutata per il pezzo specifico che verrà posto in autoclave e tenuta in considerazione per ottenere un laminato dimensionalmente corretto.

~ Capitolo 2 ~

2. Software utilizzati

Per lo sviluppo di questo progetto di tesi sono stati utilizzati in prevalenza due software:

- SolidWorks
- Inspire

2.1. SolidWorks

È un software professionale di disegno e progettazione tridimensionale prodotto dalla Dassault Systèmes e rivolto principalmente al settore dell'ingegneria meccanica.

Figura 9 - Logo SolidWorks

Permette la modellazione di oggetti solidi in 3D visualizzandoli in modo realistico attraverso la simulazione di un ambiente tridimensionale.

Si possono realizzare sia singoli componenti o parti, sia assiemi più complessi.

Grazie a dei tool integrati (in particolare *Simulation*) si possono svolgere analisi agli elementi finiti per calcoli strutturali e fluidodinamici (analisi statica, a fatica, non lineare, ecc.).

Questo software è stato utilizzato per realizzare i CAD degli stampi, un vantaggio è infatti quello di poter esportare il modello come file STL (Standard Triangulation Language) e poterlo mettere direttamente in un software dedicato alla stampa 3D.

Il formato STL è infatti diventato il formato di trasmissione dei dati standard per la prototipazione rapida. In questi file le superfici del corpo solido vengono approssimate con dei triangoli, e più sono complesse le superfici più triangoli saranno necessari.

Nella maggior parte dei casi il file viene esportato come file binario e, direttamente dall'interfaccia di SolidWorks, è possibile scegliere la qualità del risultato salvato andando a modificare la risoluzione, ossia scegliendo la tolleranza per la deviazione e per gli angoli.

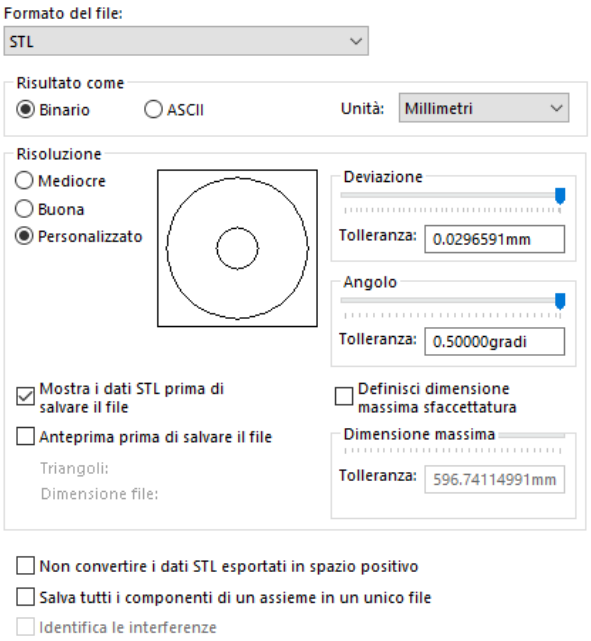


Figura 10 - Interfaccia per esportare il file STL inserendo un'alta risoluzione

Figura 11 - Interfaccia per esportare nel formato STL con bassa risoluzione

Di seguito si riportano due esempi di solidi di differente complessità (le figure più semplici sono quelle con meno curvature) modellizzati con la risoluzione più alta possibile tramite formato STL:

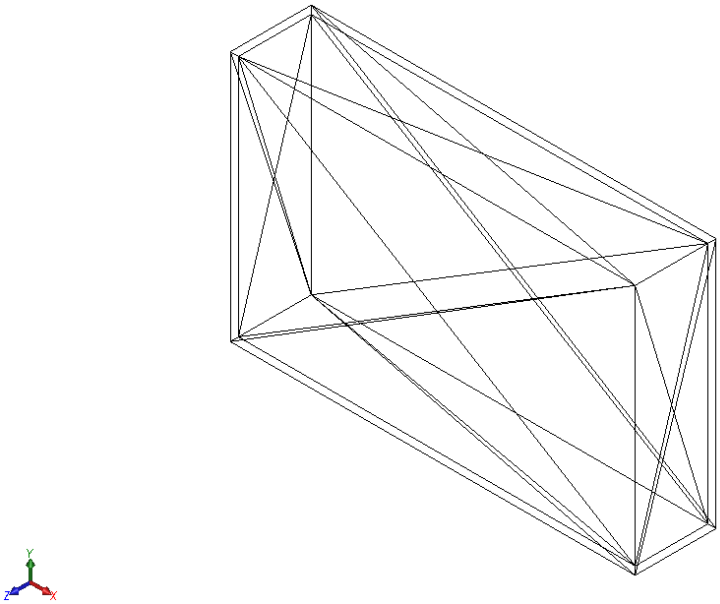


Figura 12 - Parallelepipedo in formato STL con 36 triangoli

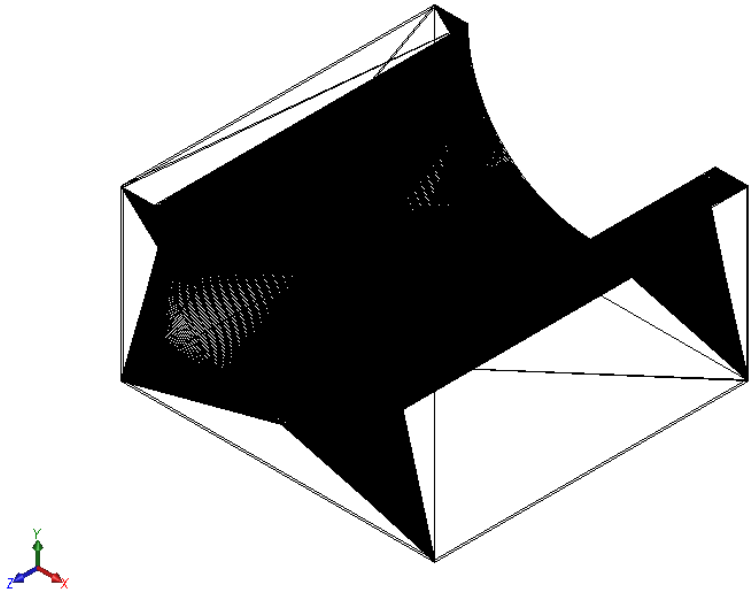


Figura 13 - Stampo con curvatura esportato in STL con 1420 triangoli

2.2. Inspire

Inspire è un software di analisi (strutturali e dinamiche) e ottimizzazione rilasciato da Altair; è una versione semplificata del software professionale HyperWorks.

Altair® Inspire™

Permette di ottimizzare il componente sia sulla base delle condizioni al contorno, sia per il tipo di tecnologia con cui verrà realizzato.

Ha numerose versioni che permettono di simulare diversi tipi di produzione (additive manufacturing, casting, molding, ecc.) così da ottimizzare fin dall'inizio il progetto.

L'interfaccia di Inspire consente la realizzazione di un modello CAD, tuttavia solitamente si importa un componente realizzato con altri software e si procede definendo:

- le proprietà del materiale, creando eventualmente il materiale desiderato, se non è ancora presente nella libreria preimpostata di Inspire;
- lo spazio di progettazione (design space);
- i carichi e i supporti;
- eventuali vincoli di forma (piani di simmetria).

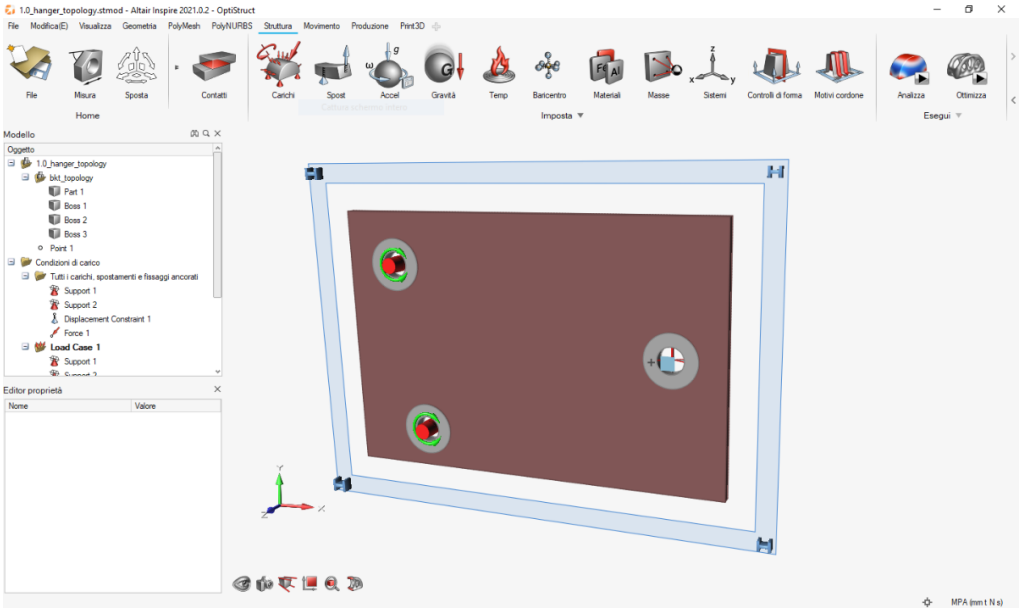


Figura 14-Interfaccia Inspire e visualizzazione di un modello dei tutorial a disposizione

Si può a questo punto procedere con le analisi ad elementi finiti, che potranno essere statiche o dinamiche, e con l'ottimizzazione del modello utilizzando le condizioni di carico create.

In questa versione di Inspire si hanno diversi tipi di ottimizzazione (topografica, topologica, spessore e altre) che verranno spiegate nel prossimo capitolo; per ogni tipo di ottimizzazione si possono imporre due distinti obiettivi:

- Minimizzare la massa;
- Massimizzare la rigidezza.

Dopo aver eseguito l'ottimizzazione, il software mostra i risultati ottenuti dall'analisi sul componente ottimizzato e si possono visualizzare diversi output, come lo spostamento, la deformazione principale, la tensione di Von Mises ecc.

~ Capitolo 3 ~

3. Concetti teorici

3.1. Cosa si intende per ottimizzazione

Parlando in senso generale di ottimizzazione si intende voler trovare ad un problema la risposta migliore possibile; quindi, cercare la soluzione migliore nel rispetto dei vincoli che ci vengono imposti.

Riferendoci nel nostro caso specifico, ad un progetto strutturale, si può quindi parlare di ottimizzazione strutturale, ed è proprio la disciplina che ha lo scopo di migliorare la struttura in modo che sostenga tutti i carichi applicati nel modo migliore possibile, e che allo stesso rispetti i vincoli imposti.

Lo sviluppo di un progetto può essere suddiviso in tre step principali:

- Si definiscono le specifiche, quindi quali sono gli obiettivi;
- Si propone un primo iniziale progetto, non necessariamente dettagliato, il quale non è detto che soddisfi in modo ideale tutti i requisiti;
- Si analizza il progetto, ad esempio mediante un'analisi ad elementi finiti (FEM) e si confrontano i risultati ottenuti con quelli attesi.

Da questo primo ciclo otterremo, molto probabilmente, un design di progetto *infeasible*, ossia che non rispetta tutte le specifiche; dovremo quindi andare ad effettuare delle revisioni e, in particolare, si potranno fare delle ottimizzazioni per rendere il progetto soddisfacente.

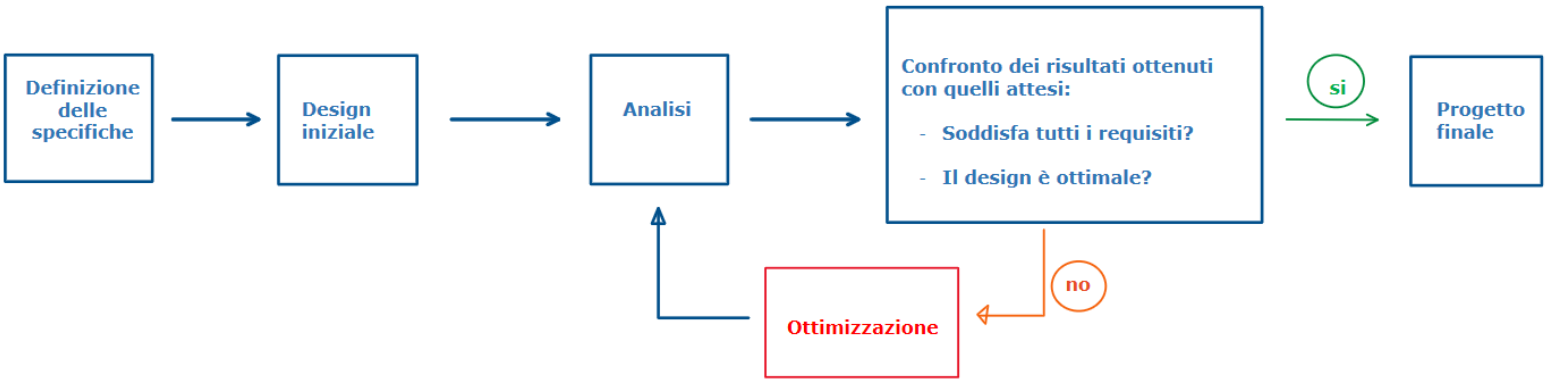


Figura 15 - Flow chart di un progetto

L'ottimizzazione è, come mostrato dal flow chart, una parte fondamentale di questo loop; essa va ad integrare il contributo umano (l'esperienza e la capacità del progettista) con sequenze ripetibili e automatizzate, in modo da rendere l'intero processo più formale e robusto e, allo stesso tempo, guadagnare in termini di tempo e velocità.

Il progettista dovrà definire quali sono le variabili dell'ottimizzazione (spessore di un pannello, area di un rinforzo, …) indicate genericamente con x_i, quali sono le funzioni obiettivo $F(x)$ (massa, rigidezza, deformazione …) e quali sono i vincoli.

È importante che in questa fase il progettista definisca in modo corretto e coerente i vincoli, infatti il programma, essendo automatizzato, potrebbe trovare una soluzione al problema puramente matematica ma non realistica o fisicamente accettabile (con uno spessore negativo, ad esempio, o una tensione massima superiore all'ammissibile) e questi vincoli li definiamo *behavioural constraints* [8].

Un ulteriore fattore di errore potrebbe essere un problema non ben posto (ad esempio se due vincoli sono in contrasto tra loro), in tal caso il programma non troverebbe alcuna soluzione.

Altri vincoli, chiamati *side constraints*, impongono dei margini sulla variabilità di x, così da limitare il margine di manovra dei valori in input.

3.2. Tipi di ottimizzazione strutturale

3.2.1. Ottimizzazione di dettaglio

3.2.1.1. Size optimization

L'ottimizzazione dimensionale è la più semplice fra le ottimizzazioni strutturali.

Essendo un'ottimizzazione di dettaglio, è adatta nei casi in cui la struttura sia già nota e si vadano a modificare i parametri strutturali (spessori, diametri, ...) ossia le variabili parametrizzate della struttura stessa.

Data ad esempio una trave, come in figura, in cui i vari elementi hanno la stessa sezione e costante, nell'ottimizzazione dimensionale si può andare a variare questa sezione (comunque costante) mantenendo però inalterata la disposizione o la lunghezza degli elementi.

Questo tipo di ottimizzazione viene utilizzata nelle fasi conclusive del progetto, così da rifinire un design già consolidato.

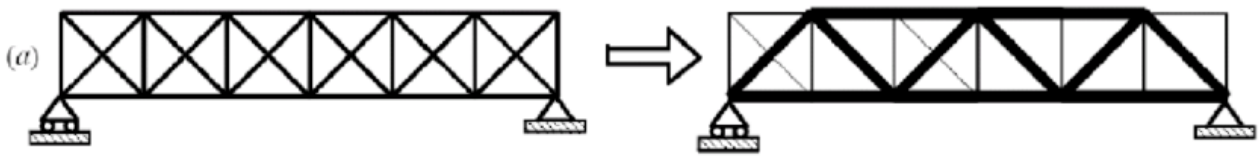


Figura 16 - Design della trave iniziale (SX) e design della trave in seguito all'ottimizzazione dimensionale (DX) [9]

3.2.1.2. Shape optimization

Anche in questo caso si tratta di un'ottimizzazione di dettaglio, quindi la struttura è già nota.

Nell'ottimizzazione di forma le variabili sono le caratteristiche geometriche della struttura, per esempio il diametro dei fori o il raggio di raccordo.

L'ottimizzazione di forma avviene secondo i vettori di perturbazione che definisce il progettista, in particolare sarà una combinazione lineare di questi vettori.

Lo scopo è quello di trovare la combinazione ottimale dei coefficienti di scalatura dei vettori di perturbazione, che ci garantisce il rispetto dei vincoli mantenendo il peso più basso.

L'entità della deformazione dipende dalla quantità di vettori di perturbazione che vengono usati.

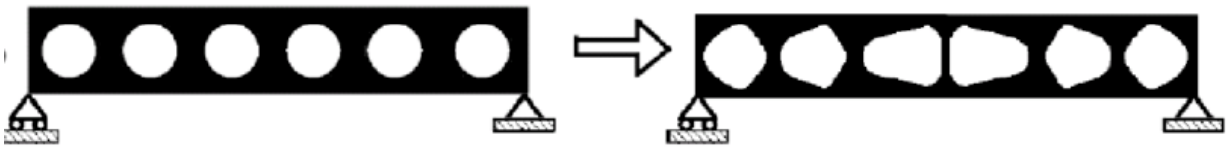


Figura 17 - Ottimizzazione di forma [9]

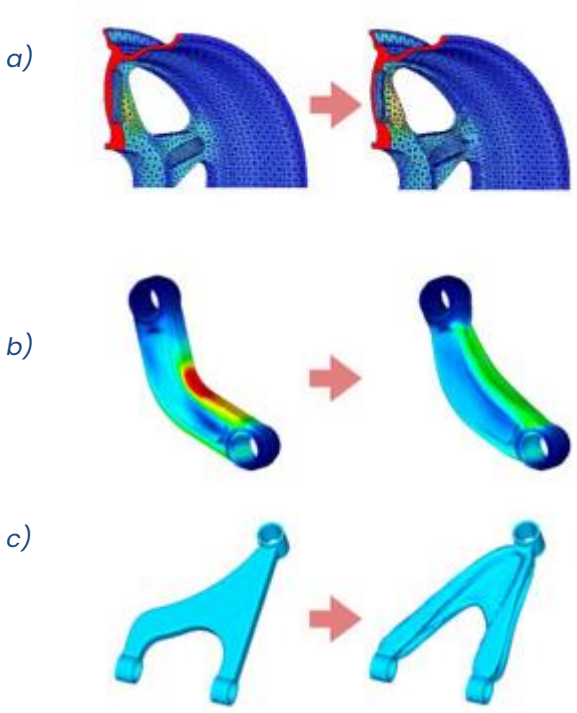


Figura 18 - Ottimizzazione di forma per : [10]

a) Minimizzare volume, vincoli di rigidezza e forma
b) Minimizzare lo stress, vincolo di volume
c) Minimizzare la frequenza di vibrazione propria, vincolo di volume

3.2.1.3. Topometry optimization

È un caso particolare di size optimization che permette di ottimizzare un parametro dimensionale (esempio lo spessore) di ogni singolo elemento.

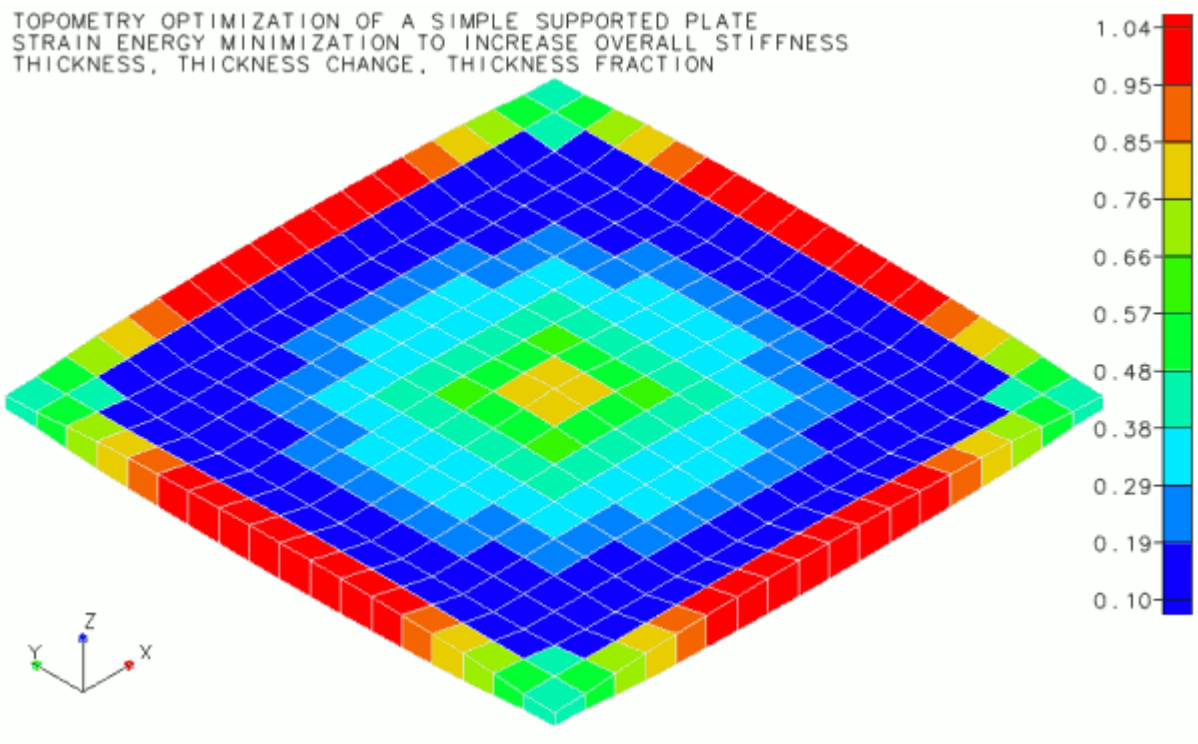


Figura 19 – Esempio di Topometry optimization [11]

3.2.1.4. Topography optimization

È un caso particolare di shape optimization che viene utilizzata per modificare le forme delle strutture a parete sottile, spesso soggette a problemi di rumore e vibrazione, introducendo localmente *stamped beads* (bozze) per una migliore prestazione strutturale.

È il software di ottimizzazione che suggerisce dove posizionarle, la loro direzione e la loro forma, così da migliore la performance del prodotto.

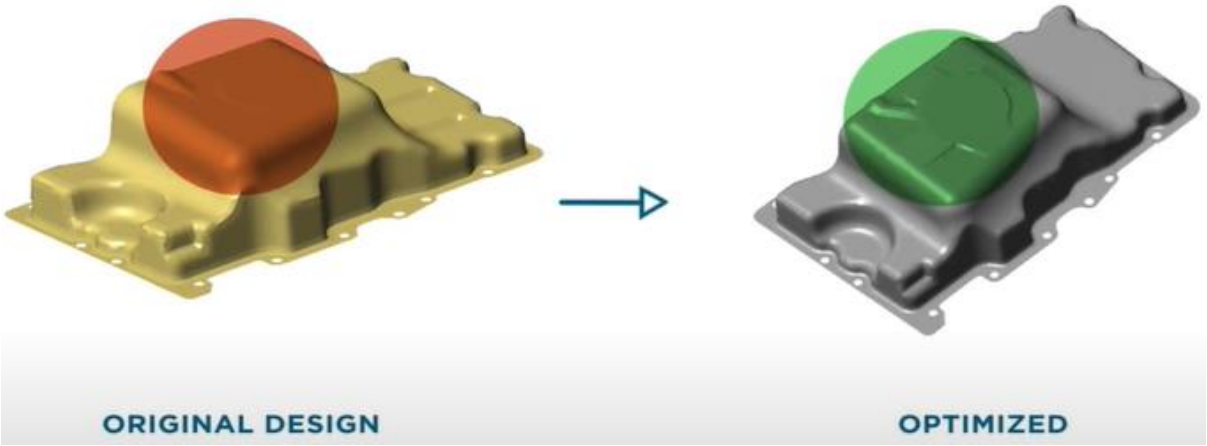


Figura 20 - Esempio di topography optimization tramite software di Altair [12]

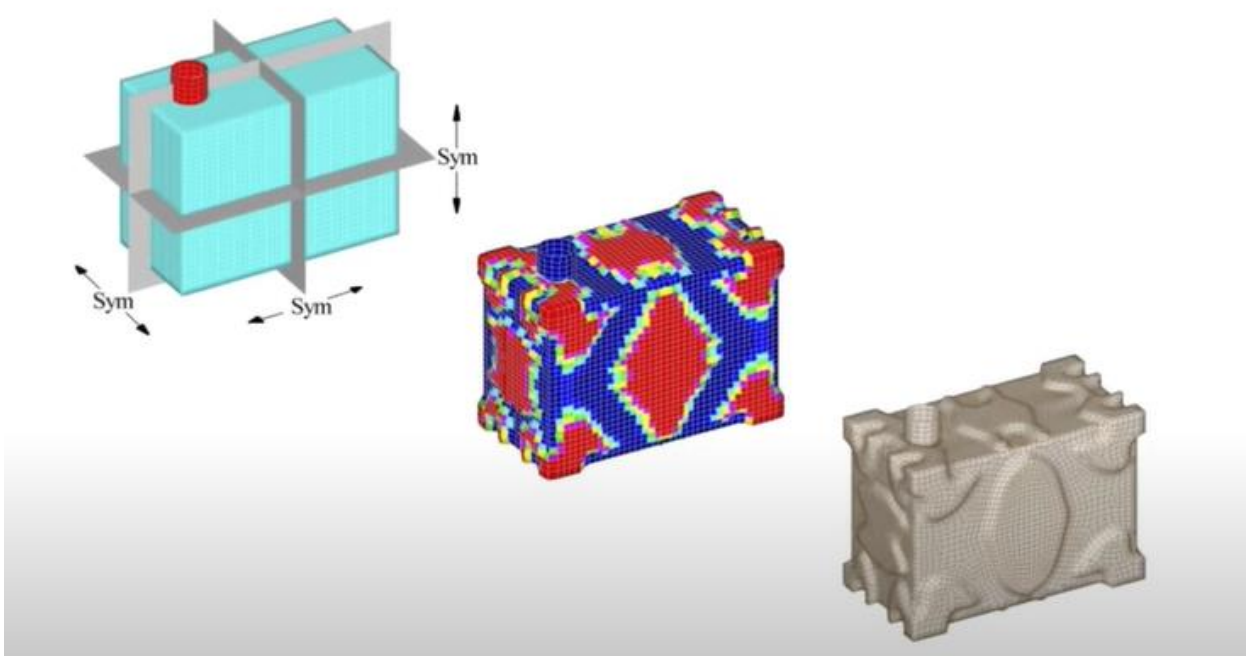


Figura 21 - Esempio di topography optimization tramite software di Altair [12]

3.2.2. Topology optimization (ottimizzazione pre-processo) [9]

È la forma più generale di ottimizzazione strutturale, nonché quella che ci permette di cambiare totalmente la forma della struttura, in modo da renderla più efficiente.

Similarmente alle altre ottimizzazioni, lo scopo è quello di trovare la migliore distribuzione di materiale in uno spazio di progetto vincolato. A differenza delle precedenti, in questo caso, non si parte da una struttura già determinata, poiché non sono stabilite né le posizioni degli elementi, né il loro numero.

Ecco perché l'ottimizzazione topologica viene definita ottimizzazione pre-processo e può essere utilizzata fin dalle prime fasi di progettazione.

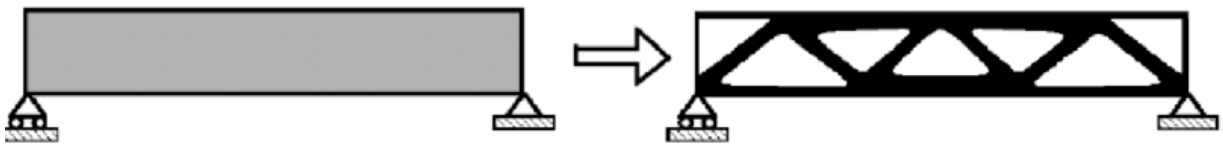


Figura 22 - Esempio di ottimizzazione topologica [9]

Il caso più semplice per l'ottimizzazione topologica ha come obiettivo la minima cedevolezza (ossia massima rigidezza globale); questa però verrebbe ottenuta mettendo materiale in modo continuo su tutto il dominio di progetto. Per questo è necessario introdurre un vincolo sulla quantità di materia che può occupare tale dominio.

3.2.2.1. Formulazione

Per determinare il miglior posizionamento del materiale è necessario individuare quali punti del dominio devono essere occupati da pieni o da vuoti. Per spiegarlo si parta dal caso più semplice considerando un corpo di materiale isotropo in campo lineare elastico definito in un dominio Ω^{mat}, sottospazio di Ω in R^2 o R^3.

Sia Γ_t il bordo su cui agiscono le forze di superficie t, Γ_u il bordo su cui sono assegnati gli spostamenti u e siano f le forze di volume:

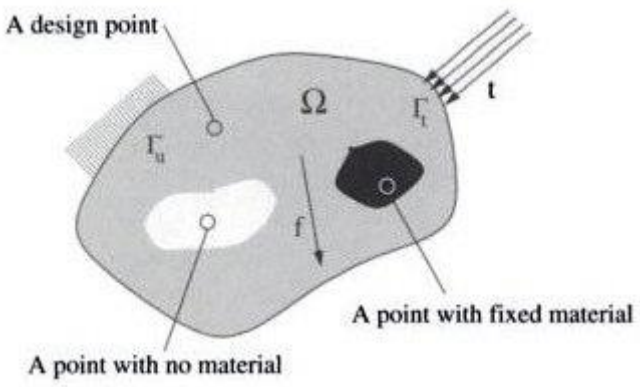


Figura 23 - Rappresentazione grafica del problema di ott. topologica

Per trovare l'ottimo del problema occorre trovare l'ottimo del tensore di rigidezza $E_{ijkl}(x)$ che è una variabile sul dominio; per farlo è necessario ricondursi al principio dei lavori virtuali.

Sia u lo spostamento all'equilibrio e v lo spostamento virtuale, allora si definisce l'energia interna:

$$\mathcal{E}(u,v) = \int_{\Omega} E_{ijkl}(x)\varepsilon_{ij}(u)\varepsilon_{kl}(v)d\Omega$$

con $\varepsilon_{ij}(u)$ le deformazioni linearizzate.

Il lavoro virtuale interno:

$$\mathcal{L}(u) = \int_{\Omega} fud\Omega + \int_{\Gamma_t} tuds$$

allora il problema di minima cedevolezza si può scrivere come:

$$\min_{u \in U, E} \mathcal{L}(u)$$
$$con\ \mathcal{E}_E(u,v) = \mathcal{L}(v)\ \forall\ v \in U$$
$$ed\ E \in E_{ad}$$

dove U è lo spazio dei campi di spostamento cinematicamente ammissibili.

Il pedice E nell'energia interna $\mathcal{E}$ indica che dipende dalle variabili di progetto; E_{ad} indica il set di tensori della rigidezza ammissibili.

Se il problema preso in esame viene discretizzato mediante il metodo agli elementi finiti, bisogna tenere in considerazione che si hanno due variabili da discretizzare, lo spostamento u e la rigidezza E. Nel caso in cui la mesh utilizzata sia la stessa per entrambi e costante, si può scrivere:

$$\min_{u,E_e} f^T u$$
$$con\ K(E_e)u = f$$
$$ed\ E_e \in E_{ad}$$

In questo caso u è il vettore degli spostamenti e f è il vettore dei carichi esterni; K è la matrice di rigidezza che dipende dalla rigidezza E del singolo elemento e $(con\ e = 1, \dots, N)$ e che si può scrivere nella forma:

$$K = \sum_{e=1}^{N} K_e(E_e)$$

3.2.2.2. Parametrizzazione del design

Riferendoci al dominio Ω^{mat}, si possono definire i tensori di rigidezza ammissibili come:

$$E_{ijkl} = 1_{\Omega^{\text{mat}}} E^0_{ijkl}$$

$$\mathbf{1}_{\mathbf{\Omega^{mat}}} = \begin{cases} \mathbf{1}\ \boldsymbol{se\ x} \in \mathbf{\Omega^{mat}} \\ \mathbf{0}\ \boldsymbol{se\ x} \in \mathbf{\Omega \backslash \Omega^{mat}} \end{cases}$$

$$\int_{\Omega} 1_{\Omega^{\text{mat}}}\, d\Omega = Vol(\Omega^{\text{mat}}) \leq V$$

quindi si troverà la condizione di minima cedevolezza per una fissata quantità di materiale (V rappresenta questo limite).

In questo modo si è passati ad un problema discretizzato, dove la variabile può assumere solo i valori 0 o 1.

Si può poi passare da tale problema per un dominio fissato, a una formulazione che vada a modificare la matrice di rigidezza, in modo che dipenda da una funzione, ossia la densità del materiale, che sarà quindi la variabile di progetto.

Il metodo maggiormente utilizzato è il Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP).

Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) method

In questo approccio $\rho(x)$ è la densità materiale assegnata ad ogni elemento (nonché variabile di progetto); E_{ijkl} rappresenta il tensore elastico elementare (E^0_{ijkl} quello del materiale isotropo) necessario per il calcolo della matrice di rigidezza K.
Sia la densità, sia il tensore elastico, devono assumere valori discreti; in particolare il tensore varrà 0 nel caso in cui la densità dell'elemento sia nulla, mentre sarà pari al tensore del materiale isotropo (E^0_{ijkl}) quando il valore della densità è pari all'unità.

$$E_{ijkl}(\rho = 0) = 0$$
$$E_{ijkl}(\rho = 1) = E^0_{ijkl}$$

Tuttavia, per modelli di grosse dimensioni in cui si hanno migliaia di elementi, il numero di combinazioni possibili (2^N con N che rappresenta il numero di elementi) aumenterebbe a dismisura con conseguenti problemi nel tempo di calcolo.
Per superare questo limite è necessario permettere alla densità di variare in modo continuo, lasciando che assuma anche i valori compresi tra 0 e 1. In questo modo avremo una densità che è comunque costante in ogni elemento (in base ai requisiti del metodo ad elementi finiti) e di conseguenza il numero di variabili si riduce al numero di elementi che discretizzano la struttura.
È necessario però notare che densità intermedie non possono avere significato fisico (corrispondono a dei materiali fittizi), di conseguenza si ricorre a dei metodi che penalizzano i valori intermedi, in favore di una struttura composta quasi esclusivamente da elementi con densità nulla o unitaria, per cui da vuoti e pieni (in altre parole si vuole avere una figura formata solo da "pixel" bianchi = vuoto o neri = pieno, eliminando tutte le sfumature di grigio).

Questo metodo di penalizzazione utilizzato comunemente dai software può essere scritto come:

$$\boldsymbol{E_{ijkl}(x) = \rho(x)^p E^0_{ijkl}} \;\; con \;\; p > 1$$

dove p rappresenta proprio l'esponente di penalizzazione e deve essere maggiore di 1 in modo che le densità intermedie siano sfavorite, ossia la rigidezza che si ottiene è piccola rispetto al volume del materiale (sperimentalmente si è visto che per problemi in cui si ha il vincolo attivo sul volume è necessario $p > 3$).

Come si può vedere dal grafico sottostante, aumentando il coefficiente di penalizzazione si va verso una netta distinzione tra le zone piene e quelle vuote, quindi tra le zone di materiale che lavorano molto e quelle che lavorano poco.

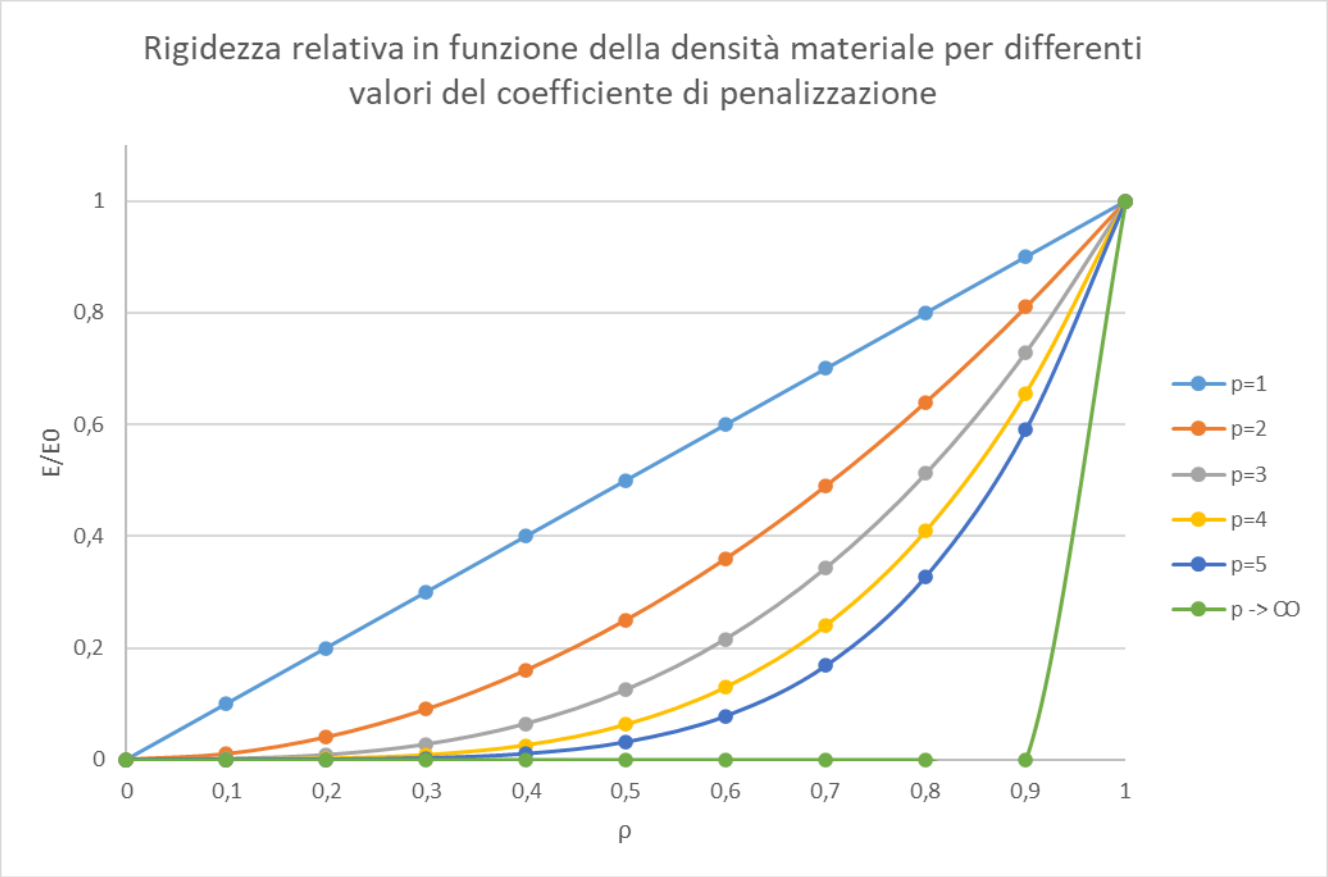


Grafico 2 - Andamento del tensore di elasticità rispetto alla densità del materiale

Il problema del materiale fittizio, quindi della visione non fisica del metodo, è stato risolto da Bendsoe & Sigmund nel 1999; risulta infatti che il metodo SIMP sia un metodo materiale se l'esponente di penalizzazione soddisfa questi requisiti:

- Nel 2-D $p \geq \max\left\{\frac{2}{1-\nu^0}\ ;\ \frac{4}{1+\nu^0}\right\}$
- Nel 3-D $p \geq \max\left\{15\,\frac{1-\nu^0}{7-5\nu^0}\ ;\frac{3}{2}\frac{1-\nu^0}{1-2\nu^0}\right\}$

dove ν^0 è il modulo di Poisson del materiale.

Quindi, per il 2D avremo che $p > 3$ se $\nu^0 = 1/3$ mentre nel 3D avremo $p > 2$ se $\nu^0 = 1/3$.

Oltre al metodo SIMP esistono altri tipi di approcci per l'ottimizzazione topologica.

Metodo di omogeneizzazione [13], [14]

Il metodo di omogeneizzazione va ad ottimizzare le prestazioni della struttura secondo delle variabili di densità, che sono legate ad un modello microstrutturale definito su una sottoscala separata, avremo quindi un layout formato da celle unitarie porose.

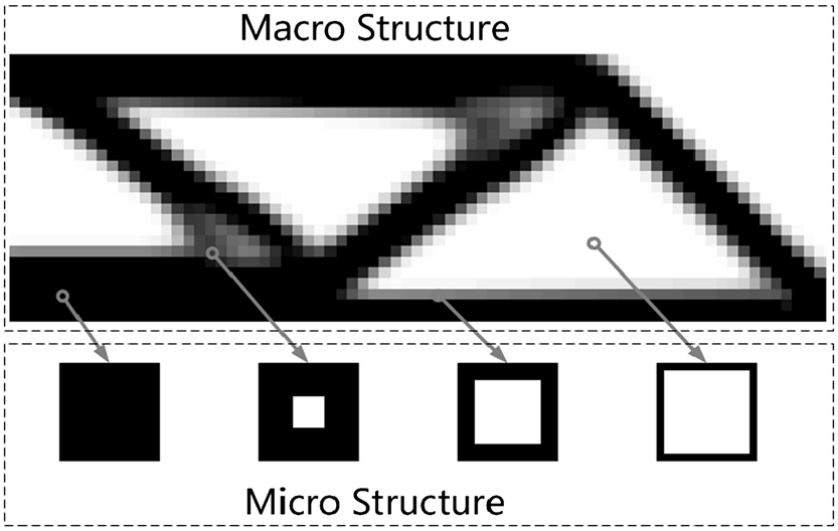


Figura 24 - Definizione della microstruttura

A questo punto si va a valutare il comportamento del materiale, ad esempio mediante il tensore di rigidezza elastica, per ciascuna cella unitaria e si effettua l'ottimizzazione topologica in modo iterativo andando a modificare le variabili dimensionali di ogni cella unitaria.
Questo metodo risulta però molto complesso e dispendioso, quindi non è efficace e non può essere utilizzato per un approccio generale.

Metodo ESO (Evolutionary Structural Optimization) [14]

Il metodo è basato su una strategia euristica di rimozione degli elementi; l'idea è di rimuovere gradualmente il materiale ridondante o inefficiente dalla struttura fino al raggiungimento del vincolo di volume.
Questo metodo, essendo molto semplice, è stato largamente utilizzato e sviluppato nell'ambito della progettazione meccanica; tuttavia, aveva il limite di non permettere di "tornare indietro", infatti non si potevano reinserire gli elementi rimossi.

Questa carenza è stata colmata con le versioni successive, chiamate BESO (Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization) in cui è consentita sia la rimozione sia l'aggiunta di materiale.

Per via del loro approccio i metodi ESO/BESO sono preferibili al metodo SIMP in progetti strutturali multi-scala.

3.2.2.3. Come trovare la soluzione di ottimo

Il metodo che consente di trovare la topologia ottimale di una struttura costruita da un singolo materiale isotropo consiste nei seguenti passaggi: [9]

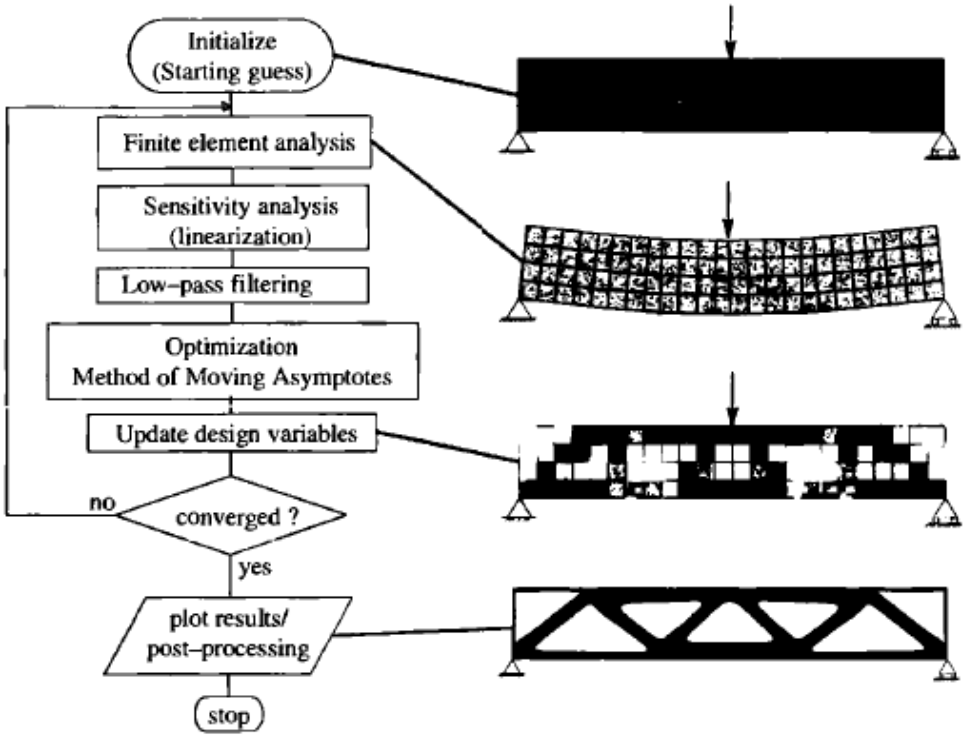


Figura 25 - Loop per ottimizzazione topologica attraverso il metodo SIMP e MMA

- Scegliere un dominio di riferimento adatto che consenta la definizione delle forze superficiali, bordi, ecc.;
- Scegliere quali parti del dominio devono essere riprogettate e quali devono essere mantenute fisse (possono essere sia spazi vuoti sia pieni);
- Definire la mesh in modo opportuno;

- Definire un design iniziale con una distribuzione della densità del materiale omogena;
- Analisi agli elementi finiti per valutare gli spostamenti e la cedevolezza della struttura;
- Analisi di sensitività mediante il metodo MMA (Method of Moving Asymptotes) e aggiornamento delle variabili di progetto;
- Controllo della convergenza del risultato tramite confronto tra la cedevolezza ottenuta nell'ultimo step e quello precedente.

Analisi di sensitività

Riscriviamo il problema solo in funzione della variabile di progetto:

$$c(\rho_e) = f^T u \quad in\ cui \quad \sum_{e=1}^{N} \rho_e^p K_e u = f$$

Si va ora a calcolare la derivata parziale delle risposte del sistema rispetto alle variabili di progetto come:

$$\frac{\partial c}{\partial \rho_e} = -u^T \frac{\partial K}{\partial \rho_e} u = -p\rho_e^{p-1} u^T K_e u$$

La derivata ha segno negativo, quindi si trova conferma nell'intuizione fisica che aggiungendo materiale (quindi densità maggiore) la struttura diventi più rigida.

MMA (Method of Moving Asymptotes)

È un metodo utilizzato per risolvere problemi di ottimizzazione non lineari, funziona con una sequenza di sotto-problemi approssimati più semplici. Questi sotto-problemi sono costruiti sulla base delle informazioni di sensibilità al punto di iterazione corrente. Ad ogni punto di iterazione questo sotto-problema viene risolto, e questa soluzione viene quindi utilizzata come design di partenza per lo step successivo della procedura iterativa.

3.2.2.4. Problematiche

Si andrà adesso a parlare di due importanti effetti che possono influenzare i risultati sulla distribuzione del materiale: [15]

- Effetto scacchiera (checkerboard problem)
- Mesh-dependency

Effetto scacchiera

Si riferisce alla formazione di regioni di elementi pieni e vuoti alternati in modo periodico e ordinato (come una scacchiera) ed è legato alla discretizzazione del problema continuo originario.
Questo risultato non è accettabile in quanto non rappresenta una soluzione ottimale di materiale ma è dovuto ad una instabilità numerica.

Figura 26 – Esempio dell'effetto scacchiera su una trave (Sigmund and Peterson 1998)

Dipendenza dalla mesh

È l'effetto per cui si ottengono soluzioni ottimali diverse partendo da discretizzazione o da dimensioni della mesh differenti; un rifinimento della mesh dovrebbe portare a delle soluzioni sempre migliori.

Questo problema deriva dalla questione dell'esistenza di soluzioni al problema continuo.

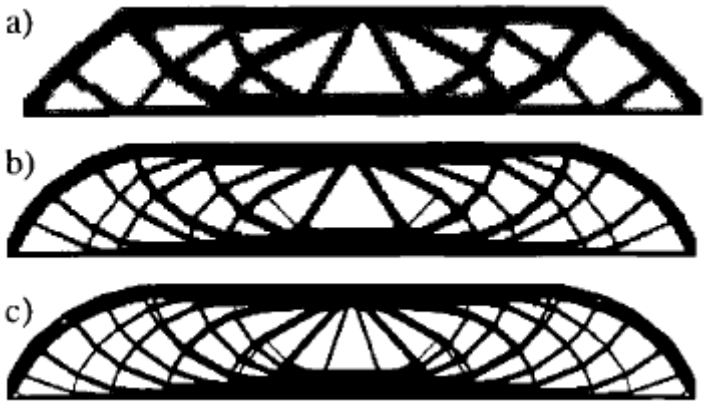


Figura 27 – Dipendenza da differenti discretizzazioni della mesh:
a) 2700 elementi
b) 4800 elementi
c) 17200 elementi

Entrambe le problematiche sono dovute ad instabilità numerica, una possibile soluzione è il *filtering,* si può infatti filtrare la densità o la sensitività. [9]

Il filtraggio sulla densità può avvenire imponendo limitazioni esplicite alle distribuzioni di densità ammissibili (vincoli nella formulazione di ottimizzazione), oppure limitando le variazioni di densità all'interno del set dei tensori di rigidezza ammissibili E_{ad}.

Filtrare la sensitività risulta molto efficiente per il problema di dipendenza dalla mesh; per fare ciò si va a modificare la sensitività di progetto di un elemento specifico in base ad una media ponderata della sensitività degli elementi adiacenti.

$$\frac{\partial f}{\partial \rho_k} = \frac{1}{\rho_k \sum_{i=1}^{N} H_i} \sum_{i=1}^{N} H_i \, \rho_i \frac{\partial f}{\partial \rho_i}$$

dove N sono tutti gli elementi della mesh; H_i è il fattore di convoluzione, definito come

$$H_i = r_{min} - dist(k,i) \quad ; \quad \{i \in N | dist(k,i) \leq r_{min}\} \;\; , \;\; k = 1, \dots, N$$

In questa espressione $dist(k,i)$ è considerata la distanza tra il centro dell'elemento k-esimo e il centro dell'elemento i-esimo; r_{min} è il raggio di filtraggio.

Avremo che H_i (il fattore di convoluzione) è zero al di fuori dell'area di filtraggio e decade linearmente per l'elemento i con la distanza dall'elemento k.

Inoltre si può notare che la sensitività calcolata con la media pesata converge a quella originale quando $r_{min} \to 0$, mentre avremo sensitività tutte uguali, e quindi distribuzione uniforme del materiale, quando $r_{min} \to \infty$.

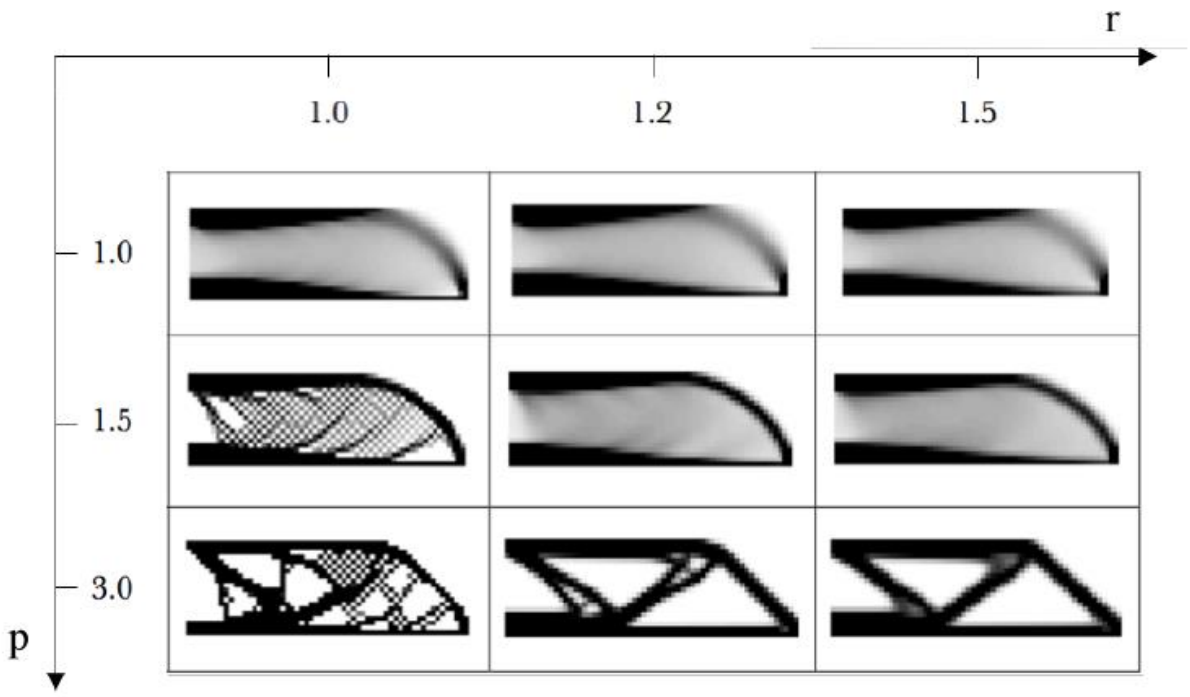


Figura 28 - Variazioni del layout in funzione del fattore di penalizzazione e del raggio di filtraggio [16]

~ Capitolo 4 ~

4. Caso studio

4.1. Design dello stampo

La geometria dello stampo per questo progetto di tesi ha preso spunto da un componente dell'aeromodello del Team S55.

Si tratta di una baionetta, ovvero una sorta di tubo caratterizzato da un angolo di diedro e da un angolo di freccia che consente di collegare la parte centrare del velivolo alle semiali.

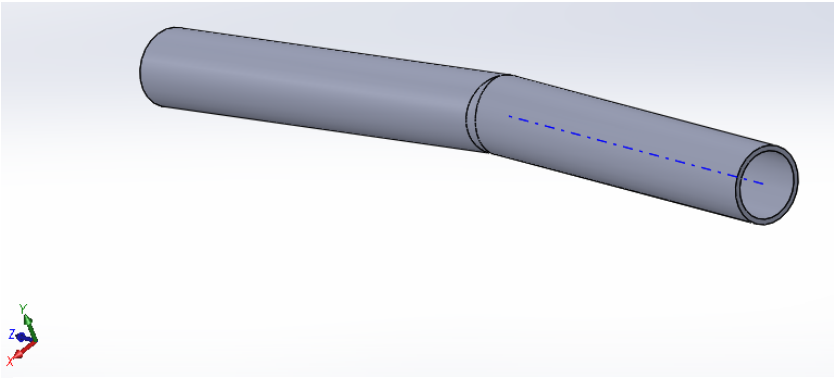


Figura 29 - Baionetta

Per poterla realizzare tramite laminazione in fibra di carbonio è necessario creare degli stampi, per farlo la baionetta è stata "racchiusa" all'interno di un parallelepipedo, e poi è stata eliminata lasciando solo la forma del componente.

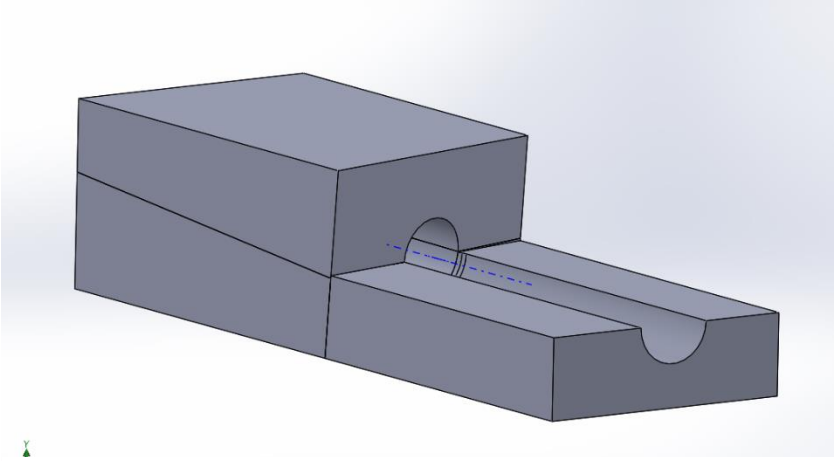


Figura 30 - Stampi baionetta

Si sono poi suddivise la parte superiore e inferiore e infine si è sezionato uno degli stampi con un piano in modo da ottenerne una porzione con uno spessore di 10 mm (parte in rosa nella *Figura 31*).

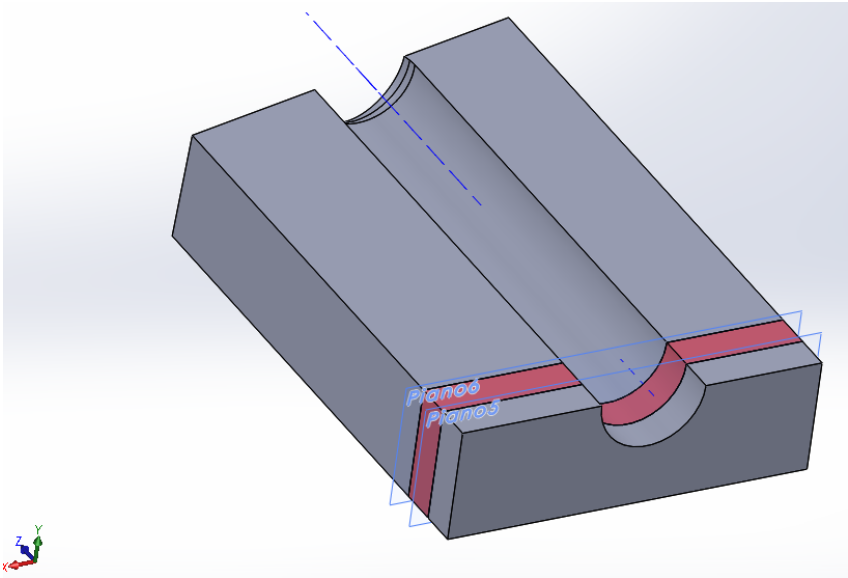


Figura 31 - Sezione dello stampo di riferimento

Questa parte è stata per l'appunto presa come spunto per realizzare uno stampo di prova da analizzare e ottimizzare. Si è mantenuta la forma, ma si sono modificate le dimensioni

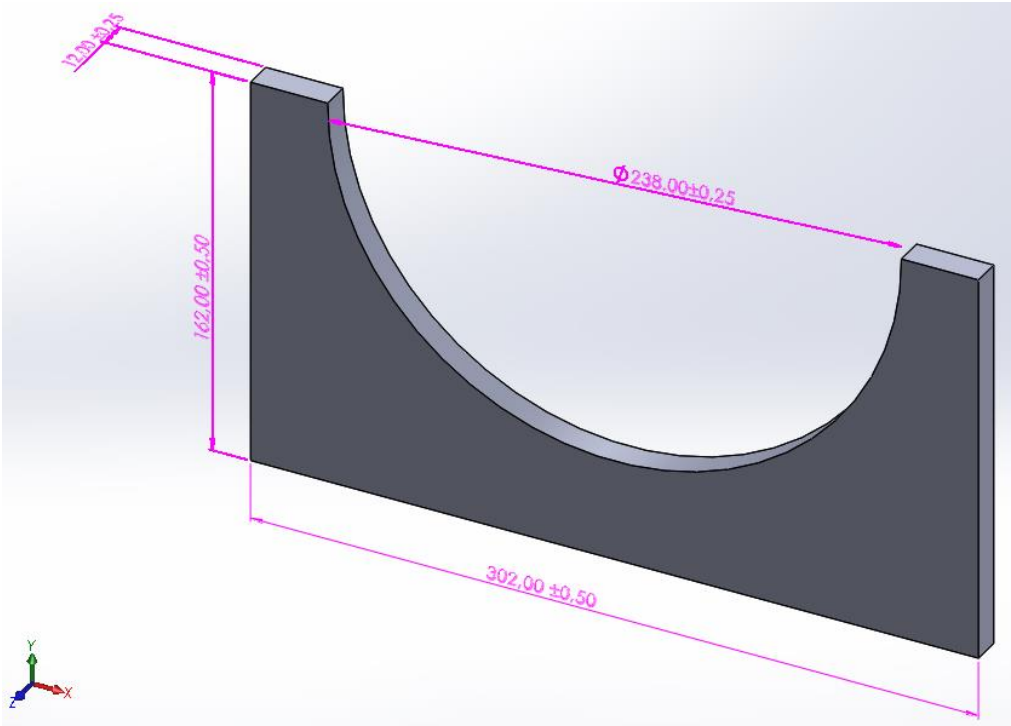


Figura 32 - Modello e dimensioni dello stampo

aumentando la curvatura e riducendo la parte resistente e in generale ingrandendo il pezzo, portandolo quasi ad una configurazione bidimensionale, in modo da aumentare le sollecitazioni. Inoltre è stata tenuta in considerazione la possibilità di stampare realmente il pezzo e di poterlo maneggiare in modo più agevole, tuttavia le dimensioni maggiori comportano più tempo di calcolo per le analisi.

Il modello è stato poi modificato in modo da avere due corpi solidi, uno all'interno dell'altro, come se ci fosse un guscio dello spessore di 1 mm attorno al pezzo più interno.

Questo è stato fatto per poter ottimizzare solo il riempimento, senza intaccare i bordi esterni che sono quelli che daranno la forma al laminato.

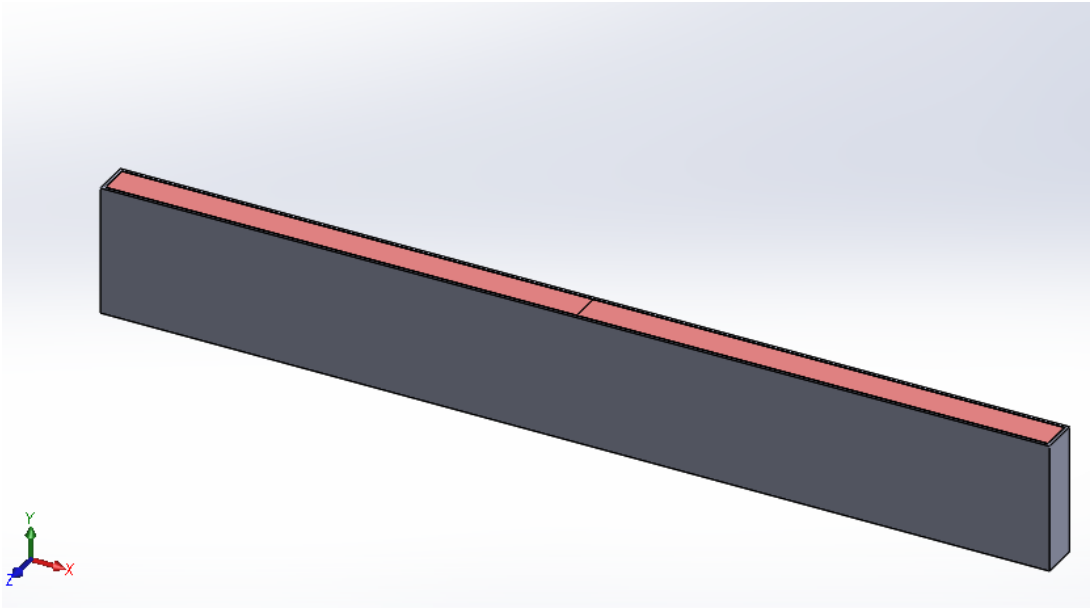


Figura 33 - Vista in sezione del modello

Nella Figura 33 si può vedere la parte interna in rosa che corrisponderà al design space (spazio di progettazione) e la zona più esterna grigia su cui verranno poi applicati i carichi e che costituisce il no-design space.

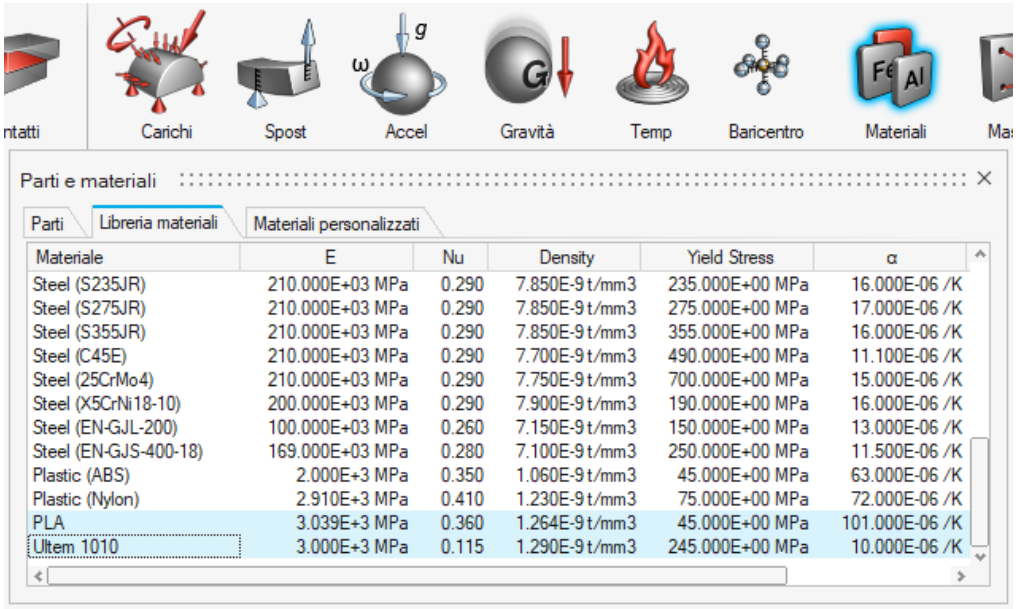
Ultimato il modello si può procedere con l'importazione su Inspire.

4.2. Definizione dei materiali

Dopo aver importato il modello su Inspire è necessario definire le proprietà dei materiali e le condizioni di carico.

Per quanto riguarda i materiali si sono andati ad aggiungere il PLA e l'Ultem 1010 alla libreria dei materiali di Inspire; per farlo è sufficiente inserire i valori delle caratteristiche meccaniche delle schede tecniche riportate in precedenza.

Dal momento che le analisi per lo stampo in Ultem prenderanno in considerazione anche la temperatura, è necessario aggiungere il valore del coefficiente di dilatazione termica α (il CTE del PLA è stato inserito in quanto il software avrebbe comunque riempito la casella mancante con un dato causale, tuttavia non è stato utilizzato).



Materiale	E	Nu	Density	Yield Stress	α
Steel (S235JR)	210.000E+03 MPa	0.290	7.850E-9 t/mm3	235.000E+00 MPa	16.000E-06 /K
Steel (S275JR)	210.000E+03 MPa	0.290	7.850E-9 t/mm3	275.000E+00 MPa	17.000E-06 /K
Steel (S355JR)	210.000E+03 MPa	0.290	7.850E-9 t/mm3	355.000E+00 MPa	16.000E-06 /K
Steel (C45E)	210.000E+03 MPa	0.290	7.700E-9 t/mm3	490.000E+00 MPa	11.100E-06 /K
Steel (25CrMo4)	210.000E+03 MPa	0.290	7.750E-9 t/mm3	700.000E+00 MPa	15.000E-06 /K
Steel (X5CrNi18-10)	200.000E+03 MPa	0.290	7.900E-9 t/mm3	190.000E+00 MPa	16.000E-06 /K
Steel (EN-GJL-200)	100.000E+03 MPa	0.260	7.150E-9 t/mm3	150.000E+00 MPa	13.000E-06 /K
Steel (EN-GJS-400-18)	169.000E+03 MPa	0.280	7.100E-9 t/mm3	250.000E+00 MPa	11.500E-06 /K
Plastic (ABS)	2.000E+3 MPa	0.350	1.060E-9 t/mm3	45.000E+00 MPa	63.000E-06 /K
Plastic (Nylon)	2.910E+3 MPa	0.410	1.230E-9 t/mm3	75.000E+00 MPa	72.000E-06 /K
PLA	3.039E+3 MPa	0.360	1.264E-9 t/mm3	45.000E+00 MPa	101.000E-06 /K
Ultem 1010	3.000E+3 MPa	0.115	1.290E-9 t/mm3	245.000E+00 MPa	10.000E-06 /K

Figura 34 - Libreria dei materiali di Inspire

Ora è necessario selezionare i modelli che interessano e applicargli il materiale appena creato.

4.3. Definizione delle condizioni di carico

Le condizioni di carico comprendono sia i carichi applicati al componente, sia eventuali vincoli o supporti.

Nella definizione delle due condizioni di carico prese in esame, si deve fare una distinzione sui carichi applicati, mentre i vincoli rimarranno invariati.

- Carico 1: laminazione con sacco a vuoto

  si ha solo l'applicazione della pressione di 1 atm sulle facce interessate; sarà indicata come una forza normale alla superficie e distribuita in modo uniforme.

  L'unità di misura della pressione è MPa, quindi è necessario fare la conversione:

$$1\ atm = 0{,}101325\ MPa.$$

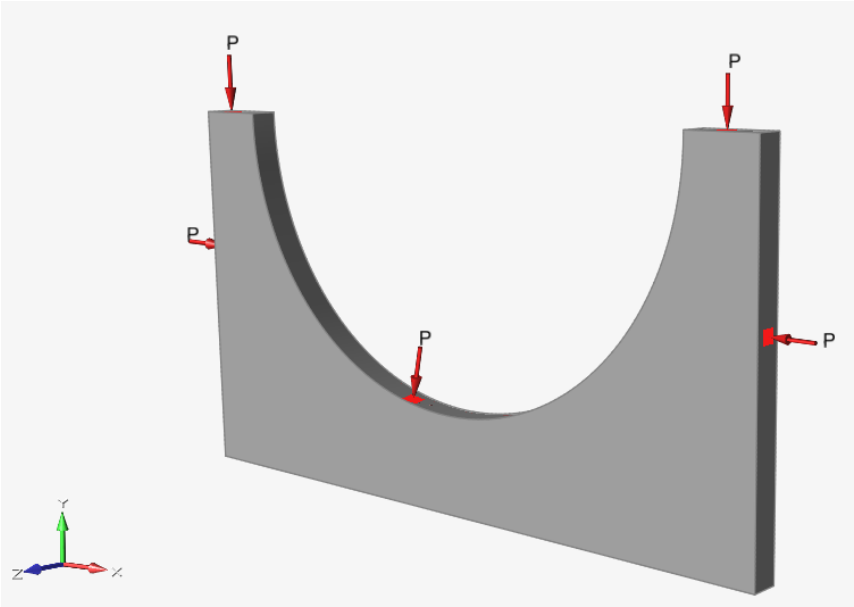


Figura 35 - Applicazione delle pressioni sulle facce interessate

- Carico 2: laminazione in autoclave

  si avrà l'applicazione di una pressione associata ad un carico termico.

  Per la pressione è necessario ricordare che si ha un "pre-caricamento" dovuto al sacco a vuoto (1 atm) e in aggiunta si va ad applicare un'ulteriore pressione sulle facce a contatto con il laminato; questa pressione aggiuntiva è stata impostata a $2\ atm = 0{,}20265\ MPa$.

Di conseguenza sulle facce a contatto con il laminato si ha una pressione totale di $3\ atm = 0{,}303975\ MPa$.

Il carico termico è invece dovuto all'applicazione della temperatura di 373 K all'intero stampo.

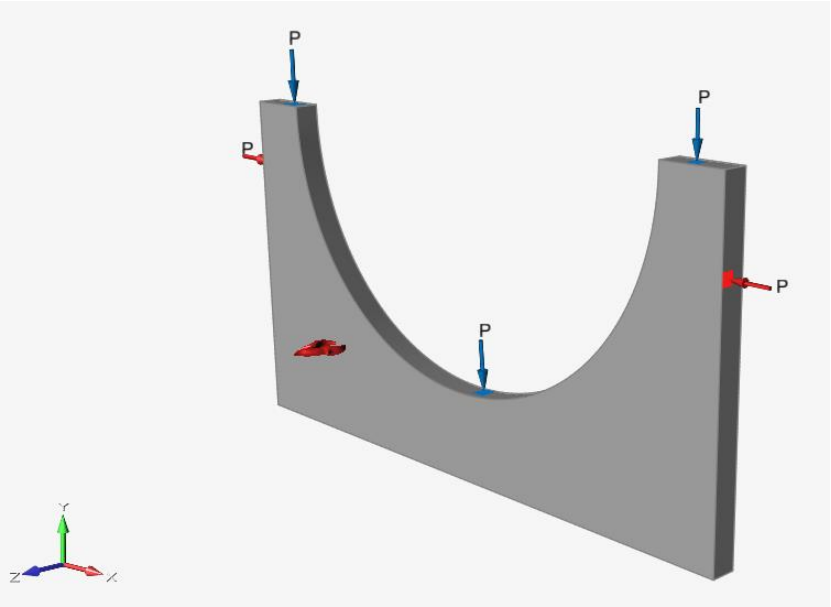


Figura 36 - Applicazione delle differenti pressioni (in blu 3 atm e in rosso 1 atm) e del carico termico

È necessario tenere in considerazione che nel software Inspire i carichi non possono essere applicati allo spazio di progettazione, quindi sia le pressioni, sia il carico termico, sono stati applicati solo al "guscio" del modello.

C'è un ulteriore carico che verrà aggiunto direttamente in fase di analisi e di ottimizzazione ed è la forza di gravità.

- Supporti

Per definire i vincoli si è tenuto in conto che il modello venga laminato su un piano d'appoggio, quindi è necessario bloccare la faccia inferiore con un incastro impedendo la traslazione in tutte le direzioni.

Inoltre questo modello deriva dal sezionamento di un componente, quindi lungo l'asse Z si può pensare che ci siano altre sezioni, di conseguenza è necessario impedire una deformazione fuori dal piano XY in quanto anche nella realtà sarebbe vietata dalle restanti parti del pezzo.

Per fare questo si è messo il vincolo per la traslazione lungo Z su entrambe le facce normali all'asse Z.

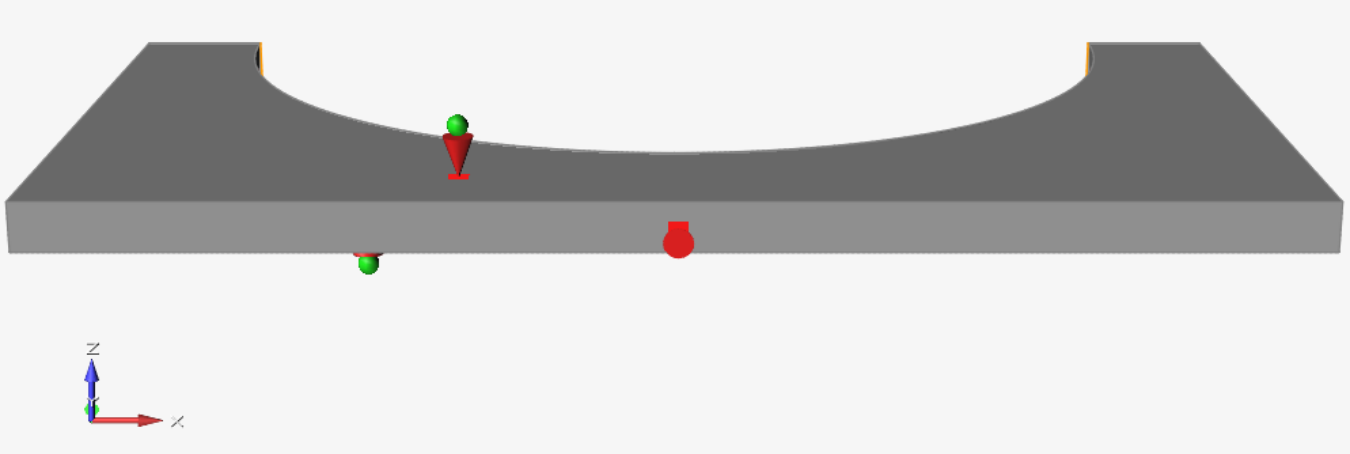


Figura 37 - Supporti

- Controlli di forma

Come detto in precedenza, questo stampo è solo una parte del componente completo. Avendo sezionato il pezzo lungo Z, imponiamo una simmetria proprio lungo questo asse, in modo che anche l'ottimizzazione venga simmetrica e che i risultati ottenuti possano essere estesi alle altre sezioni che formano il pezzo completo.

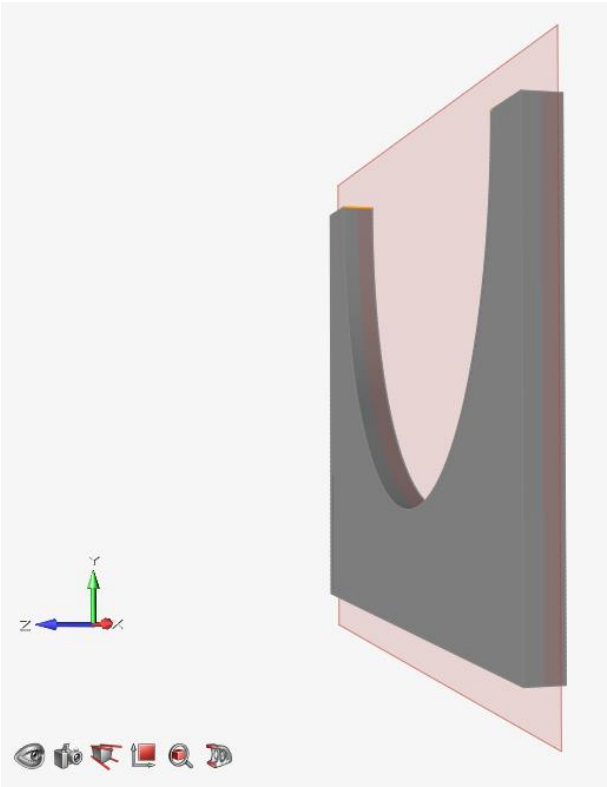


Figura 38 - Controllo di simmetria con un piano di simmetria in z

4.4. Analisi

In una prima fase le analisi sono state svolte sul modello intero, infatti prima di poter procedere con l'ottimizzazione è necessario verificare che i carichi applicati siano sopportati dalla struttura solida.

Se le deformazioni del modello completo dovessero essere troppo grandi, il processo di ottimizzazione non sarebbe possibile, anzi si dovrebbe rivedere la struttura del modello o le condizioni di carico.

Le analisi agli elementi finiti svolte sono di tipo lineare statico, i parametri che si andranno a verificare sono:

- Lo spostamento;
- Il fattore di sicurezza;
- La percentuale di snervamento, che può essere vista come l'inverso del fattore di sicurezza ed è espressa in percentuale in cui il 100% indica un probabile danneggiamento della parte;
- La tensione di Von Mises;
- La deformazione.

Nelle analisi e nelle ottimizzazioni del modello in PLA, con la condizione di carico 1, lo spostamento verrà confrontato con il valore di rugosità misurato sperimentalmente in precedenza dal team S55.

In particolare, usando un ugello con il diametro di estrusione di 1 mm, e filamento in PLA, si era ottenuto un valore di rugosità di $25\ \mu m = 25 \cdot 10^{-3} mm$. Tale valore sarà imposto come limite per lo spostamento massimo.

4.4.1. Analisi modello completo PLA

L'analisi sul modello completo è stata svolta impostando una dimensione dell'elemento di 5 mm, tenendo conto della forza di gravità e della condizione di carico 1:

Figura 39 - Impostazioni per analisi del modello completo in PLA

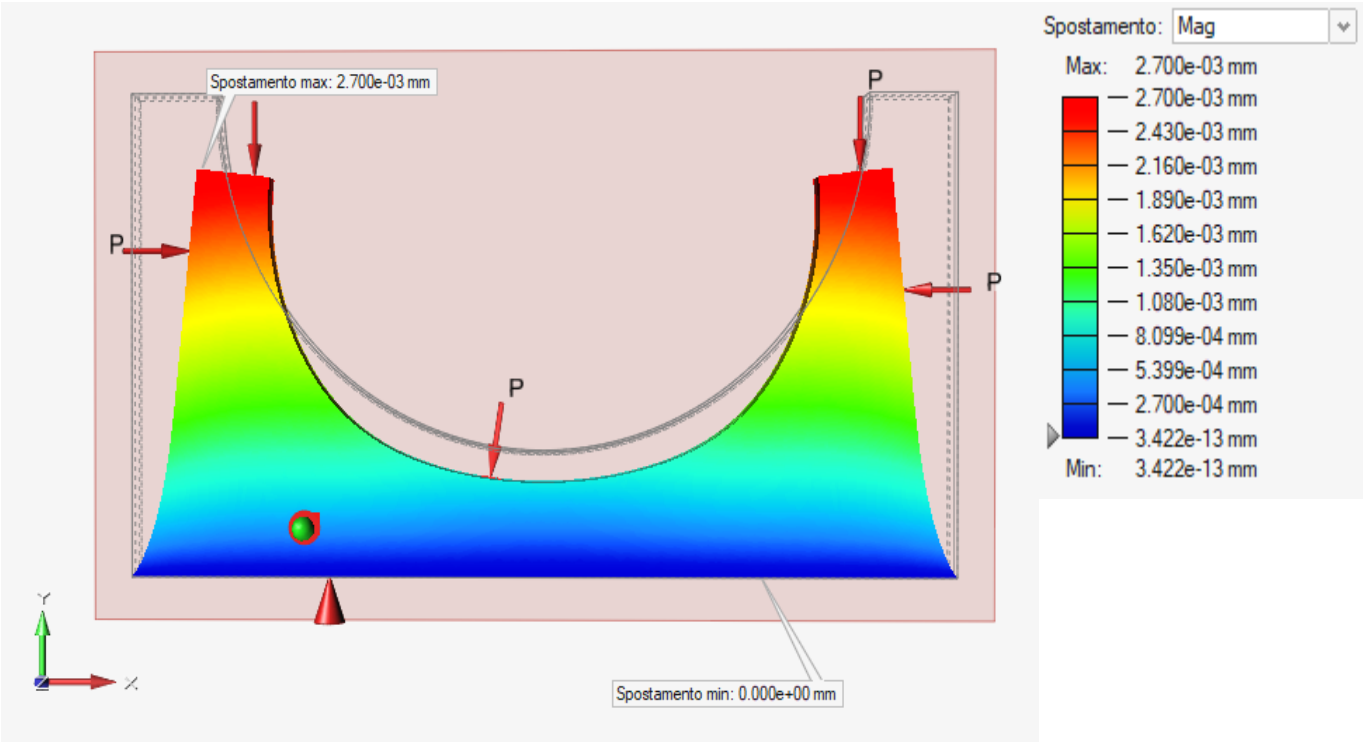


Figura 40 – Andamento del modulo dello spostamento per il modello completo in PLA

La forma con le linee nere rappresenta lo stampo nella condizione iniziale non deformata.

Nella *Figura 40* è riportato il valore in modulo dello spostamento, quindi è la somma vettoriale degli spostamenti nelle tre singole direzioni.

Di seguito si riportano gli andamenti dello spostamento in direzione X, Y e Z:

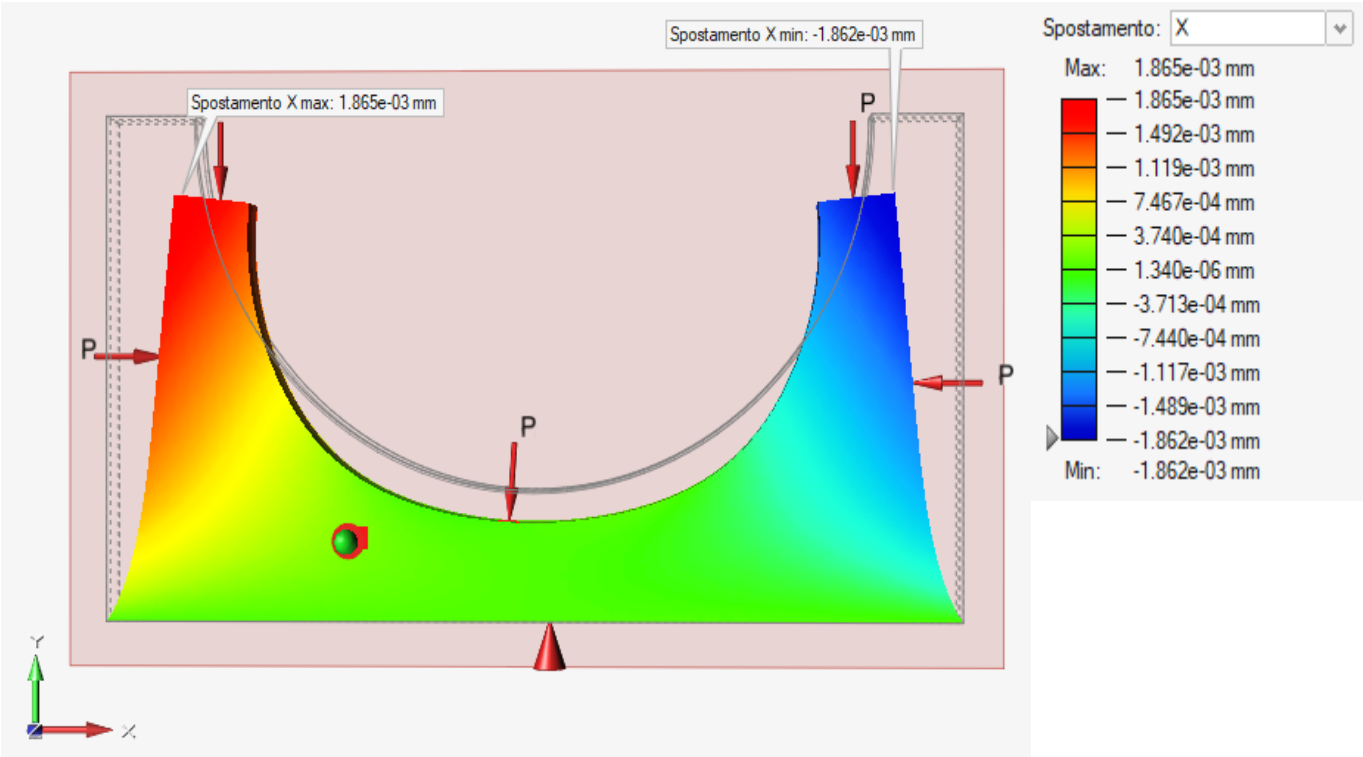


Figura 41 - Spostamento in direzione X per il modello completo in PLA

Lo spostamento lungo X risulta simmetrico, si ha infatti una compressione lungo l'asse a causa delle forze di pressione.

Si può notare come la parte centrale sia pressoché ferma, con uno spostamento dell'ordine di $10^{-6}mm$. Gli spostamenti minimo e massimo si trovano sulle facce opposte del modello e sono dello stesso ordine di grandezza ma con segno opposto, questo proprio perché sia la condizione di carico, sia la forma lungo l'asse X sono perfettamente simmetriche.

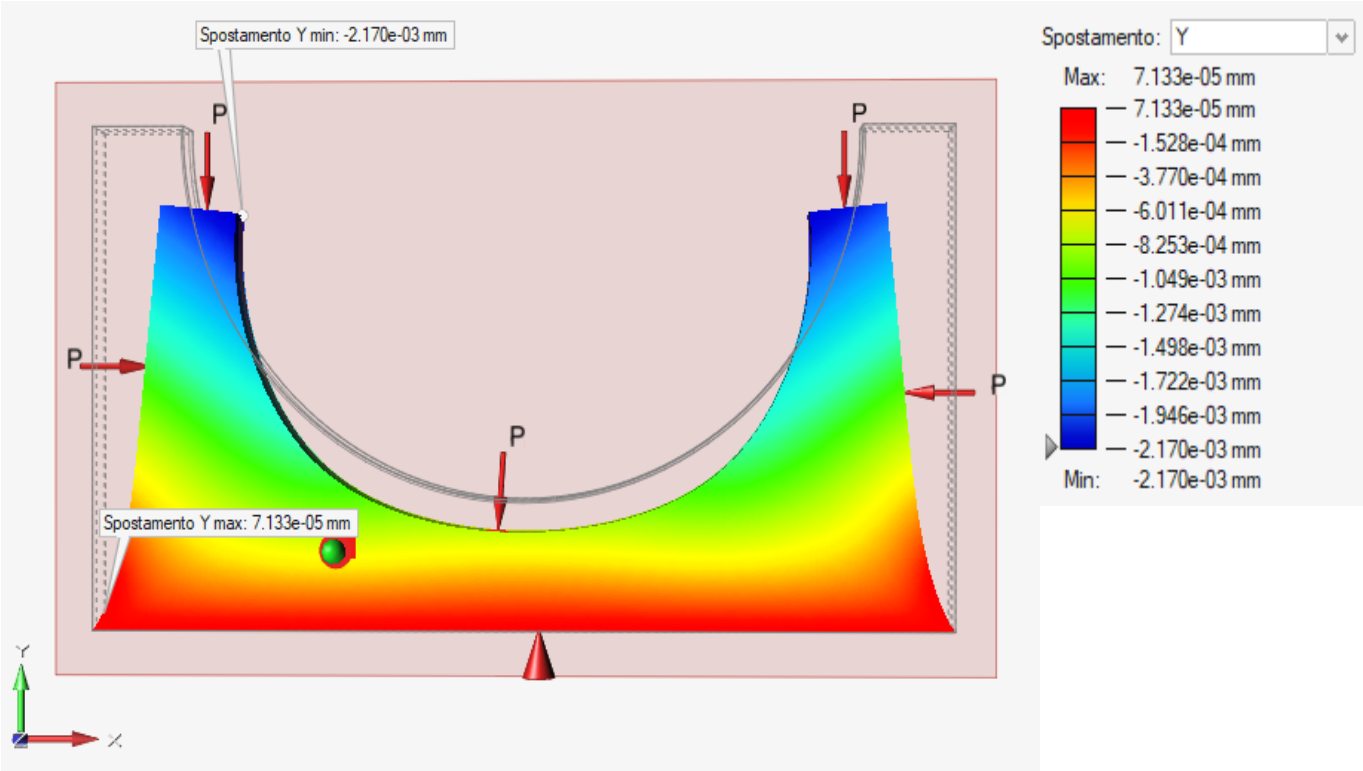


Figura 42 - Spostamento in direzione Y per il modello completo in PLA

Lo spostamento lungo l'asse Y risulta essere negativo, infatti le forze di pressione sulla faccia superiore tendono a schiacciare il modello nella direzione opposta rispetto ad Y.

Per questo motivo, ad un primo sguardo, l'andamento cromatico dello spostamento potrebbe sembrare scorretto: lo spostamento massimo (zona rossa) è posizionato sulla faccia incastrata, la cui traslazione è bloccata in tutte le direzioni, infatti si può notare che il valore è positivo ed è, in modulo, molto inferiore rispetto agli altri.

Lo spostamento minimo è invece sulla parte superiore (zona blu) e si può notare come, essendo un valore negativo, sia il più alto in modulo.

In conclusione anche lo spostamento lungo l'asse Y rispecchia quanto ci si aspettava.

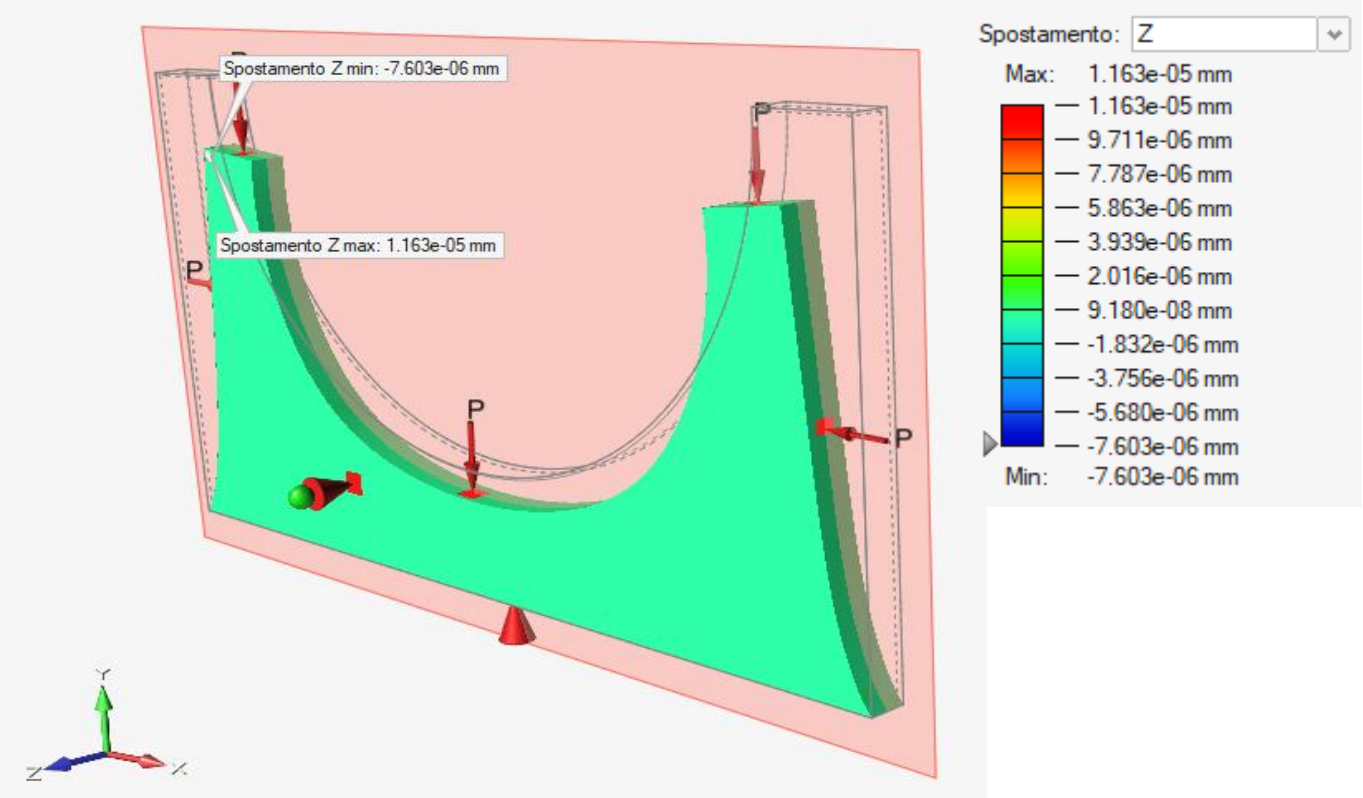


Figura 43 - Spostamento in direzione Z per il modello completo in PLA

Lo spostamento lungo Z risulta essere praticamente nullo in tutto il modello; non si ha infatti una deformazione del pezzo fuori dal piano XY. Questo è dovuto al vincolo imposto alla faccia frontale e a quella posteriore, che ne impedisce la traslazione in Z.

Per gli altri parametri si riporta di seguito solo una tabella con i valori minimi e massimi, senza le figure con i rispettivi andamenti, poiché i risultati ottenuti sono in linea con quanto ci si aspettava, e si può affermare che il modello integro sopporti perfettamente i carichi applicati.

PARAMETRO	MIN	MAX
Fattore di sicurezza	2.799E+02	2.226E+03
Percentuale di snervamento	0.04%	0.36%
Tensione di Von Mises	2.022E-02 MPa	1.607E-01 MPa
Deformazione principale	4.406E-06	3.131E-05

Tabella 5 - Risultati analisi modello integro PLA

4.4.2. Analisi modello completo Ultem

Per il modello completo realizzato in Ultem sono state svolte due differenti analisi, una con e una senza il carico termico.

Risultati analisi senza carico termico

L'analisi senza carico termico viene effettuata con gli stessi parametri utilizzati per l'analisi del modello integro in PLA. Quindi, con la sola applicazione delle pressioni dovute al sacco a vuoto, il vincolo di incastro sulla faccia inferiore e il bloccaggio della traslazione lungo Z per le facce laterali. Si è utilizzata inoltre una dimensione dell'elemento di 5 mm.

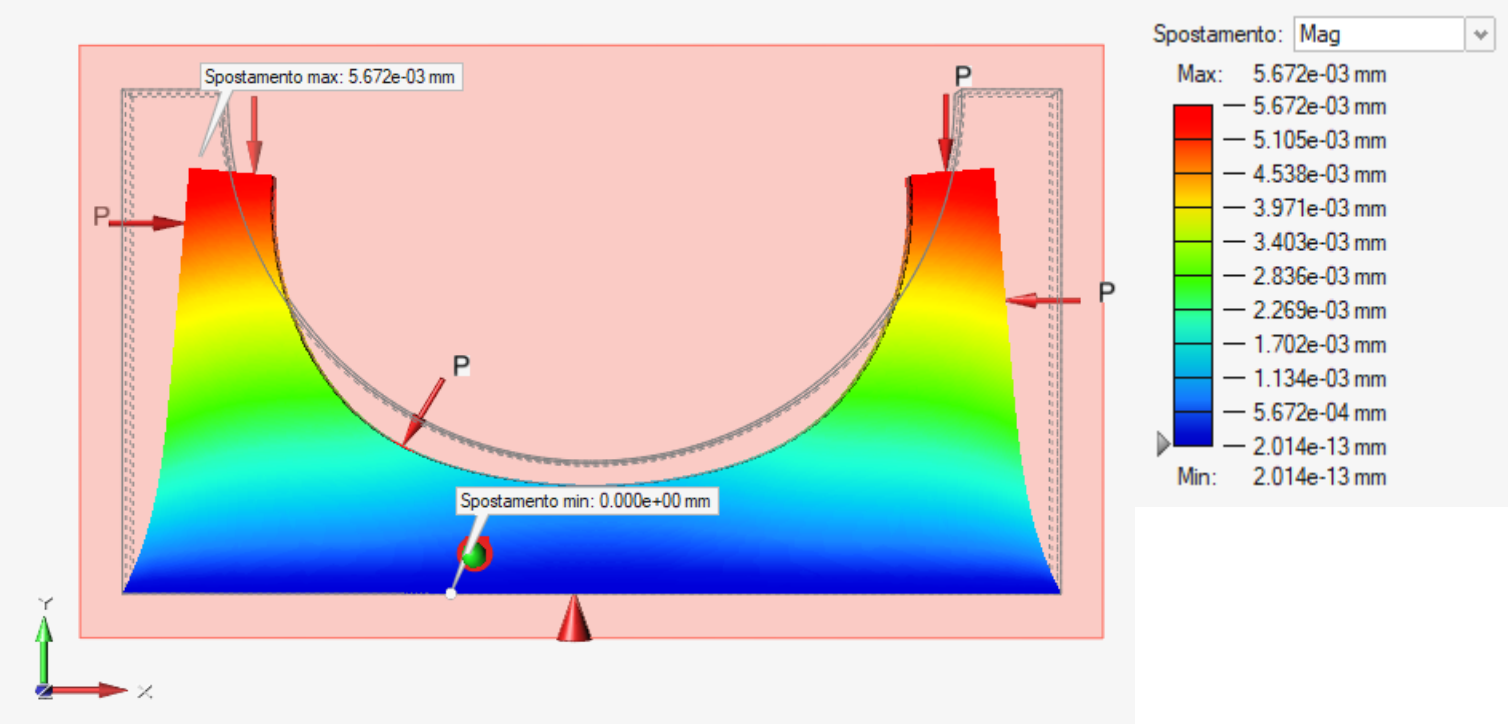


Figura 44 - Andamento del modulo dello spostamento del modello completo in Ultem

Come riscontrato in precedenza per lo stampo in PLA, anche in questo caso, i dati di spostamento sono molto bassi ed inferiori al limite di rugosità.

Si sono inoltre controllati gli spostamenti nelle singole direzioni verificando la simmetria lungo l'asse X e il corretto andamento di tale grandezza lungo gli assi Y e Z.

I risultati ottenuti rispecchiavano quanto ci si aspettava e quanto riportato in precedenza per il modello in PLA.

Per gli altri paramenti anche in questo caso i dati ottenuti concordano con le aspettative e di conseguenza non vengono riportate le figure con gli andamenti, ma solo i valori massimi e minimi nella tabella sottostante:

PARAMETRO	MIN	MAX
Fattore di sicurezza	6.474E+02	3.675E+03
Percentuale di snervamento	0.03%	0.15%
Tensione di Von Mises	6.667E-02 MPa	3.784E-01 MPa
Deformazione principale	-1.790E-07	7.844E-05

Tabella 6 - Risultati analisi modello integro Ultem

Risultati analisi con carico termico

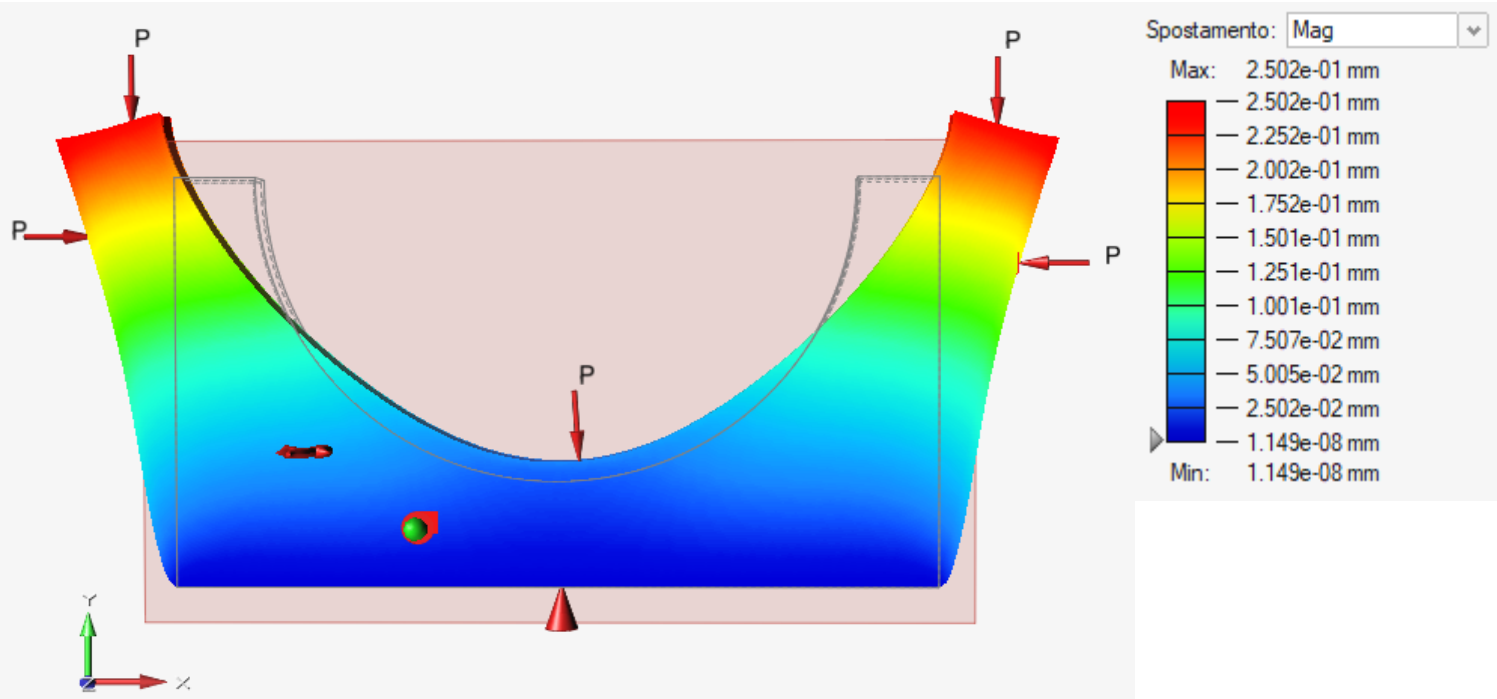


Figura 45 - Spostamento in modulo con applicazione del carico termico

Con l'applicazione del carico termico il modello si deforma espandendosi, in accordo con il segno positivo del coefficiente di dilatazione termica.

Lo spostamento massimo (in modulo) è di due ordini di grandezza superiore a quelli ottenuti nelle analisi precedenti, non è quindi possibile confrontare tali valori con il limite di rugosità come per gli altri due casi.

Tuttavia, verificando le deformazioni si può notare come queste risultino ancora molto basse, infatti, nonostante lo spostamento sia superiore al limite di rugosità, l'allungamento percentuale è inferiore allo 0.1%.

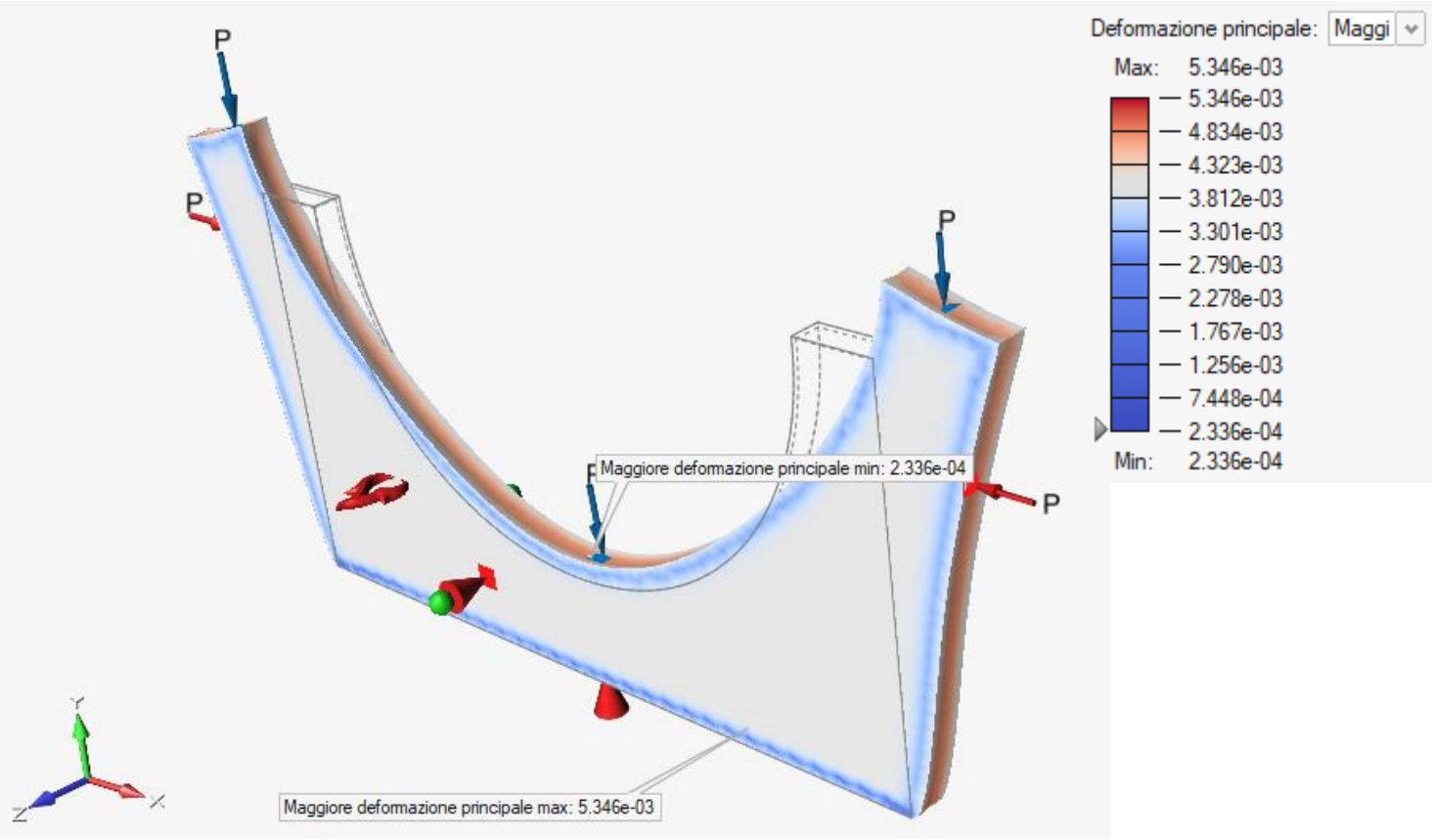


Figura 46 - Deformazione principale del modello completo con applicazione del carico termico

Come fatto nei casi precedenti, gli altri parametri vengono riportati in tabella solo con i valori massimi e minimi dal momento che l'andamento non risulta essere rilevante.

PARAMETRO	MIN	MAX
Fattore di sicurezza	1.466E+01	1.865E+02
Percentuale di snervamento	0.54%	6.82%
Tensione di Von Mises	1.314 MPa	1.671E+01 MPa

Tabella 7 - Risultati analisi modello integro Ultem con applicazione del carico termico

Si noti che i dati riportati per i vari casi sono stati ottenuti da analisi ad elementi finiti con dimensione dell'elemento di 5 mm.

Si sono poi ripetute le stesse analisi variando la dimensione dell'elemento a 1 mm, con l'obiettivo di avere un riscontro di correttezza e accuratezza dei risultati.

I dati ottenuti con la seconda serie di analisi non si distaccavano in modo significativo da quelli già acquisiti e quindi non è stato ritenuto necessario riportarli.

4.5. Ottimizzazione modelli

A seguito dei risultati positivi delle analisi, si è passati all'ottimizzazione del riempimento.

Inspire offre numerose categorie di ottimizzazione:

- Topologica
- Topografia
- Spessore
- Topografia e spessore
- Reticolo
- Forma PolyNurbs

Per questo progetto quella che è stata utilizzata è l'ottimizzazione tramite Reticolo; questa funzione riempie lo spazio di progettazione con una struttura reticolare ottimizzata.

Si tratta fondamentalmente di un particolare tipo di ottimizzazione topologica in cui gli elementi solidi vengono sostituiti con travi reticolari.

Il grande vantaggio di questa ottimizzazione, a discapito di quella topologica classica, è la forma nota delle strutture che si otterranno.

L'ottimizzazione topologica solitamente va a creare delle strutture solide con forme molto particolari e poco prevedibili. Questo aspetto comporta che ogni pezzo debba essere ottimizzato singolarmente, poiché la forma cambia di volta in volta.

Utilizzando l'ottimizzazione con sole strutture reticolari può variare solo la loro dimensione e la loro disposizione, quindi potranno essere più o meno fitte a seconda delle condizioni di carico, ma la loro struttura è definita a priori.

Lo scopo di questo progetto è infatti quello di determinare dei parametri dimensionali e non il design migliore per uno stampo specifico.

L'ottimizzazione reticolare è applicabile solo ad un modello solido in cui lo spazio di progettazione sia separato dal non-design space.

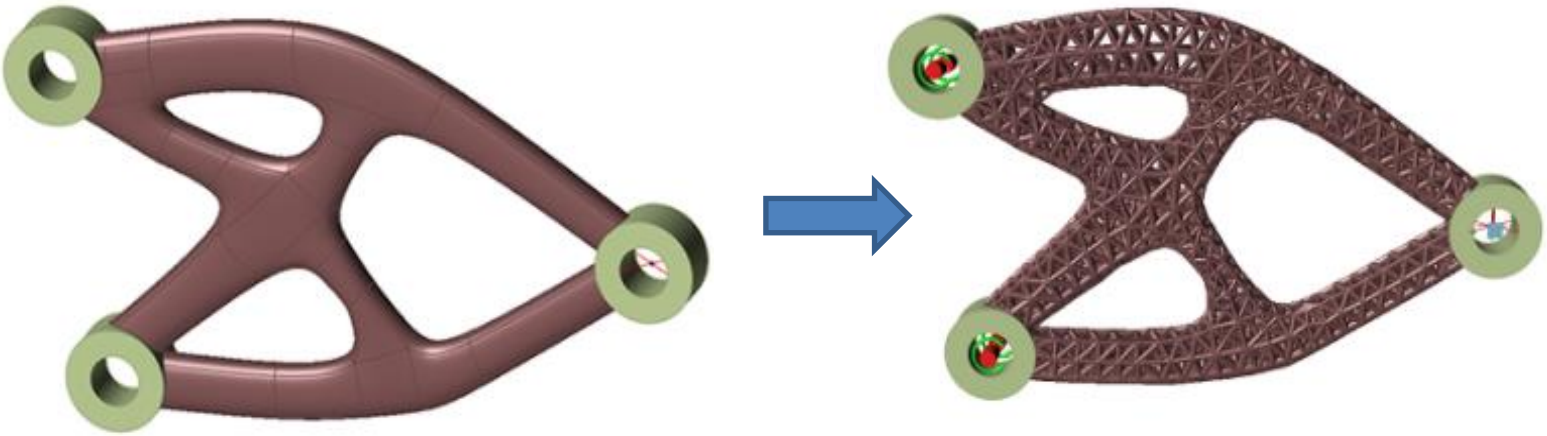


Figura 48 - Esempio di struttura ottimizzata tramite la funzione reticolo

4.5.1. Parametri di ottimizzazione

I due obiettivi che possono essere impostati sono massimizzare la rigidezza o minimizzare la massa.

L'obiettivo di minimizzare la massa risulta essere più adatto nei casi in cui non ci si preoccupi della deformazione dell'oggetto, e in cui l'unico vincolo di progettazione è che il componente sia il più leggero possibile.

In questo caso studio, invece, la deformazione dello stampo è uno dei vincoli di progetto, perciò come obiettivo è più indicato quello che permette di massimizzare la rigidezza.

La massa verrà comunque tenuta in considerazione per la scelta finale, ma con priorità secondaria rispetto allo spostamento.

È necessario tenere presente che una struttura reticolare che occupa lo stesso spazio di una solida, sarà inevitabilmente meno rigida e avrà quindi sollecitazioni maggiori; per questo motivo sarebbe opportuno impostare dei requisiti di progettazione più conservativi.

In seguito alla definizione dell'obiettivo si possono impostare i parametri dimensionali della struttura:

- **Lunghezza obiettivo**: corrisponde alla lunghezza della singola trave reticolare
- **Diametro minimo**: il diametro minimo consentito per le travi reticolari
- **Diametro massimo**: il diametro massimo consentito per le travi reticolari

Per definire i due diametri è necessario tenere in considerazione sia gli aspetti pratici della geometria, sia il processo di fabbricazione con cui verrà realizzato il pezzo.
In particolare, per questo progetto, il valore del diametro minimo è definito dal diametro dell'ugello estrusore, quindi 1 mm. Mentre il diametro massimo è stato calcolato considerando il vincolo di Inspire che impone che sia almeno due volte superiore a quello minimo, per questo è stato fissato a 2 mm.

Un ulteriore parametro è la percentuale di reticolo che andrà a sostituire lo spazio di progettazione solido, si può infatti scegliere se avere un reticolo completo o parziale.
La percentuale varia dal 100% al 50%; con le percentuali inferiori al 100% si otterrà una struttura che è un insieme di strutture solide e reticolari.
Dal punto di vista strutturale (con percentuali inferiori al 100%) il pezzo presenterà delle zone a resistenza variabile, inoltre potrebbero esserci dei difetti dal punto di vista estetico (come delle superfici frastagliate).

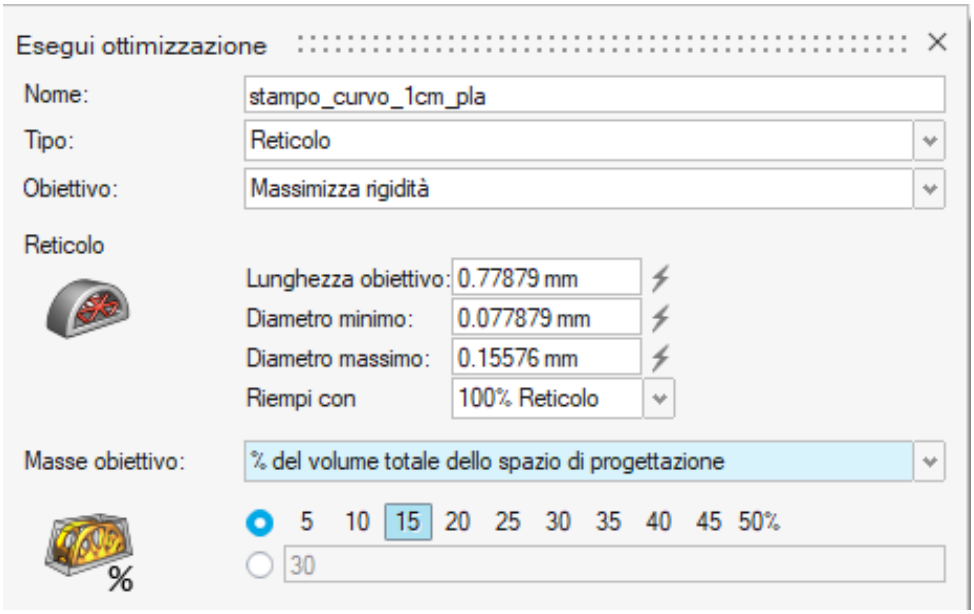
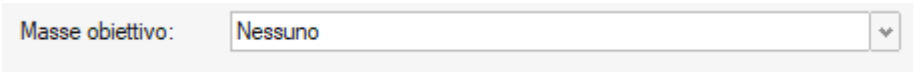


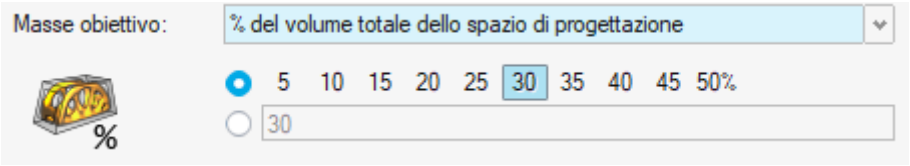
Figura 49 - Grafica riassuntiva dei parametri sopra citati e obiettivo di massima rigidezza

La massa obiettivo può essere definita in quattro differenti modi:

- **Nessuno**, in cui non si ha nessuna massa da raggiungere per quell'ottimizzazione;

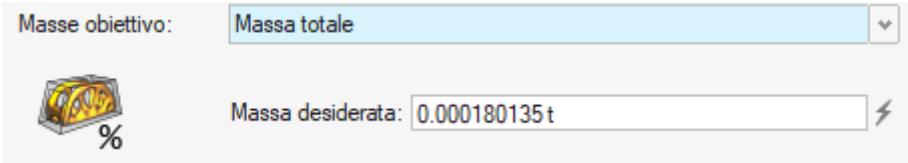


- **% del volume totale dello spazio di progettazione**, in cui si va a selezionare la percentuale di massa che si vuole mantenere rispetto al volume iniziale del solo spazio di progettazione.

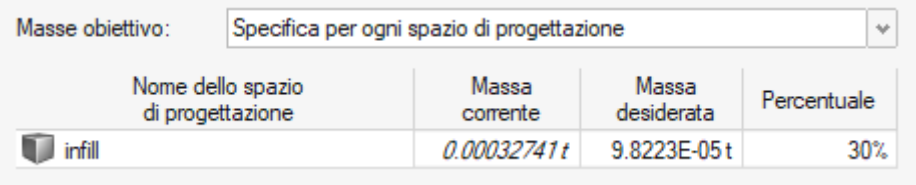


Questa è quella che sarà utilizzata per il caso studio in questione.

- **Massa totale**, si indica un preciso valore della massa dell'intero componente (comprendendo anche lo spazio di non progettazione);



- **Specifica per ogni spazio di progettazione**, nel caso in cui il modello abbia più spazi di progettazione, è possibile indicare un valore specifico della massa che si vuole ottenere o la sua percentuale.



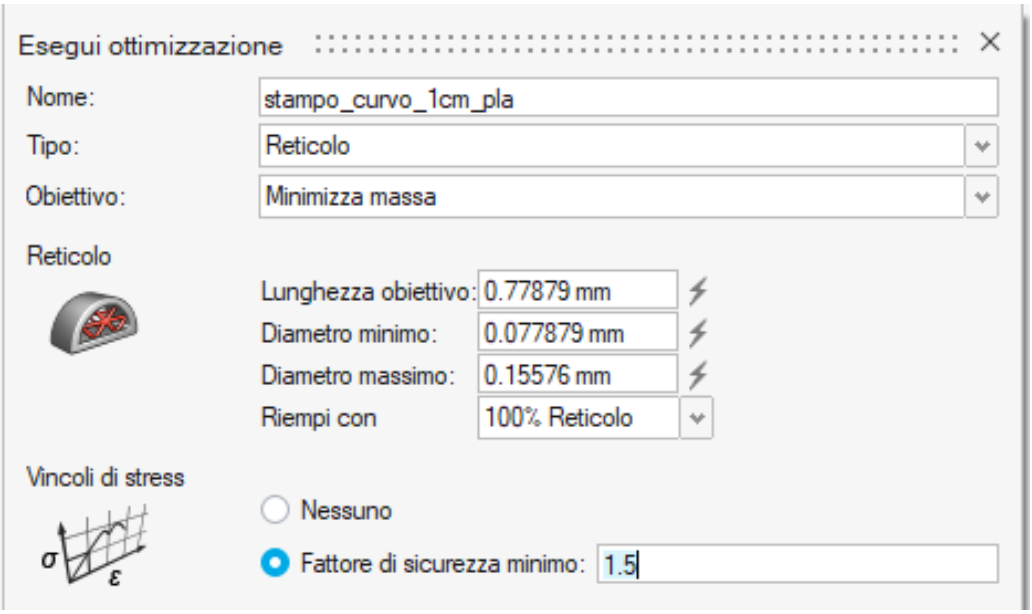


Figura 50 - Grafica riassuntiva dei parametri sopra citati e obiettivo di minima massa

Il fattore di sicurezza minimo viene solitamente applicato alla tensione di snervamento del materiale, e nel caso siano presenti più materiali nello stesso modello viene calcolato basandosi sul materiale con la tensione di snervamento più bassa.

4.5.2. Procedimento per l'ottimizzazione

Per l'ottimizzazione innanzitutto si è definito il solido all'interno come spazio di progettazione, quindi il volume che verrà effettivamente ottimizzato.

In seguito le analisi si sono svolte in modo iterativo; si mantengono fissati i valori di diametro minimo e massimo, la percentuale di reticolo e le condizioni carico, mentre si varia il valore della lunghezza obiettivo.

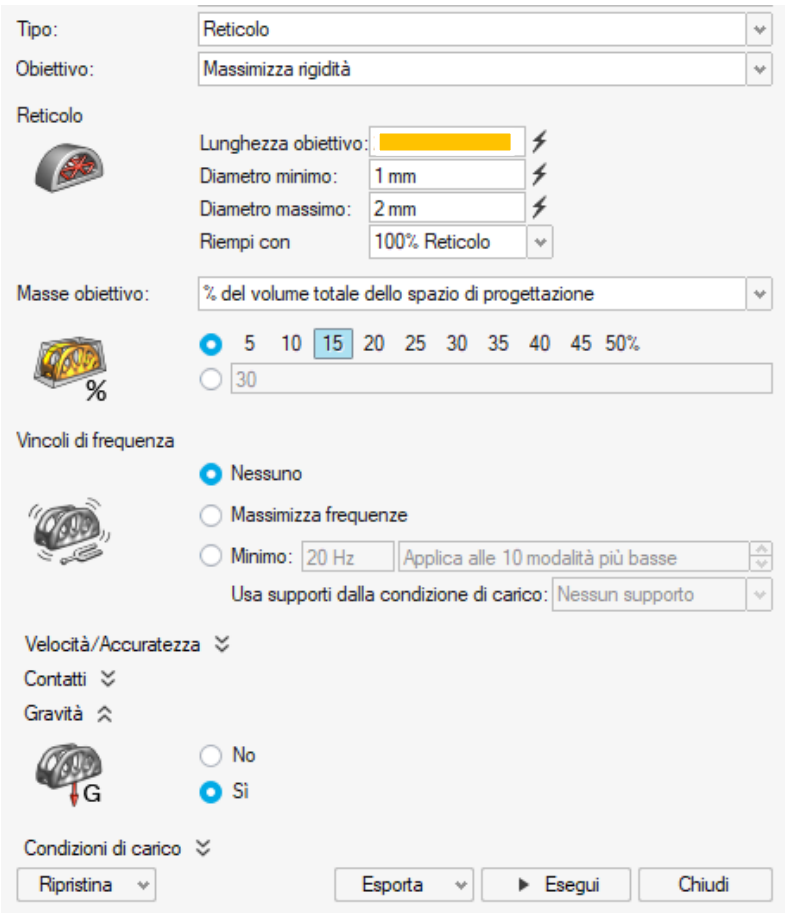


Figura 51 - Parametri fissati per le ottimizzazioni

I valori della lunghezza obiettivo sono stati scelti in modo arbitrario partendo da 5 mm (in quanto si è rilevato essere il primo valore accettato dal software per portare a termine l'ottimizzazione) e aumentando di volta in volta sulla base dei risultati ottenuti dall'ottimizzazione precedente.

4.5.3. Risultati ottimizzazione PLA

Per i diversi cicli di ottimizzazione si sono per primi confrontati i valori di spostamento ottenuti al variare della lunghezza obiettivo (indicata come L nella tabella sottostante).

I valori di spostamento sono stati comparati con il limite di rugosità e, se superiori a tale valore, sono indicati con sfondo rosso.

diametro fissato a 1 mm e 2 mm				
VINCOLO DI INCASTRO E PRESSIONI SULLE FACCE LATERALI				
limite di rugosità	tipologia modello	L [mm]	s_max [mm]	m [t]
	solido	0	2,70E-03	4,01E-04
2,50E-02	reticolo 100%	40	9,92E-02	8,54E-05
2,50E-02	reticolo 100%	30	1,42E-02	8,78E-05
2,50E-02	reticolo 100%	25	7,48E-03	8,98E-05
2,50E-02	reticolo 100%	20	1,06E-02	9,33E-05
2,50E-02	reticolo 100%	18	9,60E-03	9,32E-05
2,50E-02	reticolo 100%	15	2,28E-02	9,74E-05
2,50E-02	reticolo 100%	12	2,76E-02	1,01E-04
2,50E-02	reticolo 100%	10	4,67E-02	1,03E-04
2,50E-02	reticolo 100%	8	2,06E-02	1,12E-04
2,50E-02	reticolo 100%	5	1,98E-02	1,50E-04

Tabella 8 - Risultati di spostamento e massa delle ottimizzazioni del modello in PLA

Questi dati sono stati riportati su un grafico in modo da vedere la relazione tra la lunghezza obiettivo e lo spostamento, inserendo anche una curva che indichi il valore della rugosità.

Nel grafico è stato riportato inoltre il punto di partenza, quindi lo spostamento trovato dall'analisi del modello solido (segnato con un singolo pallino viola) come se avesse una lunghezza obiettivo nulla, con celle infinitesime.

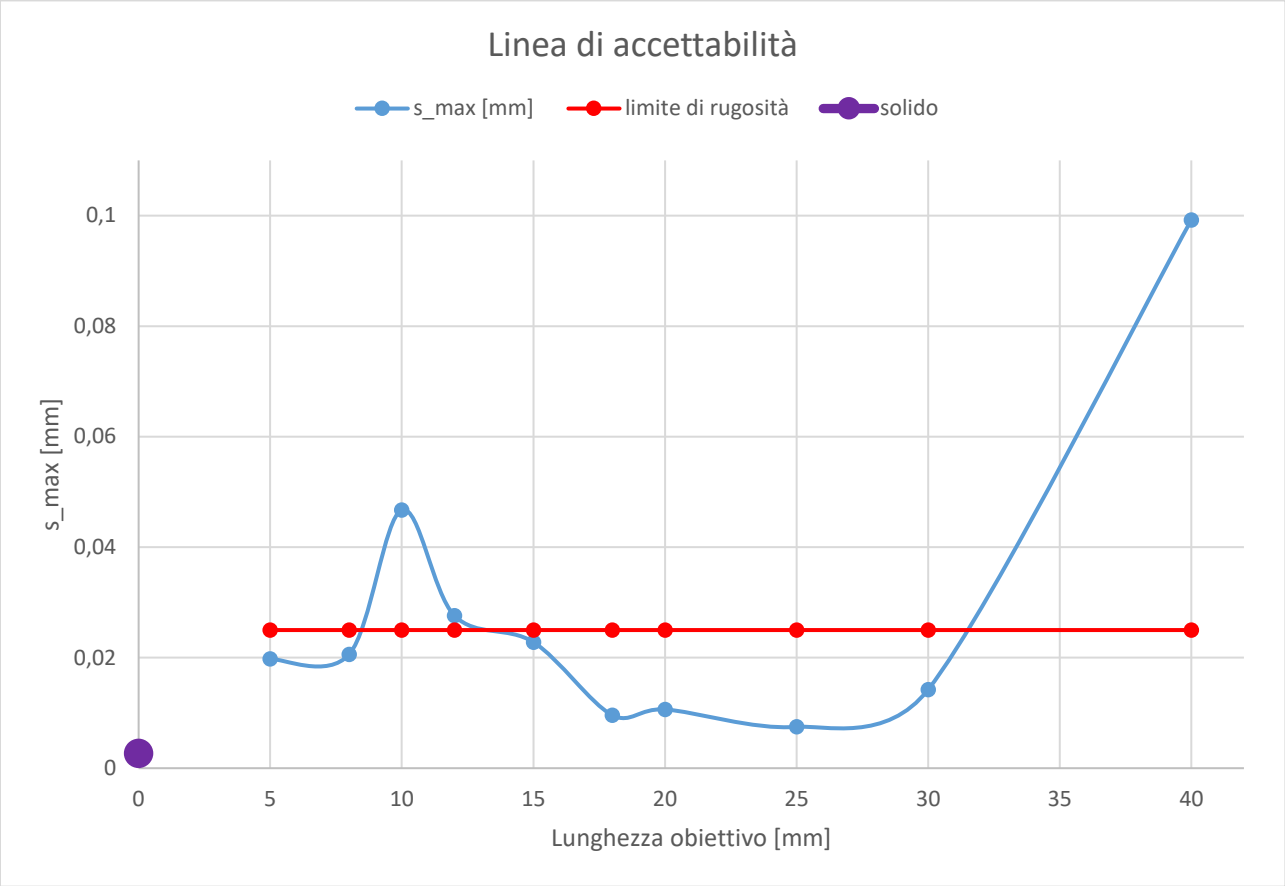


Grafico 3 - Grafico dello spostamento delle ottimizzazioni in PLA

Si può notare come lo spostamento dei modelli ottimizzati sia in generale superiore a quello del modello solido, dove la rigidezza è sicuramente inferiore per un volume reticolare.

Con una lunghezza obiettivo di 40 mm si ha un decisivo aumento dello spostamento, questo rispecchia quanto ci si aspettava, infatti aumentando la dimensione delle celle, ma mantenendo il diametro delle travi costante, si ha una riduzione della rigidezza. Inoltre la grande dimensione delle celle comporta una riduzione quantitativa di esse, contribuendo anch'essa alla maggiore cedevolezza del modello.

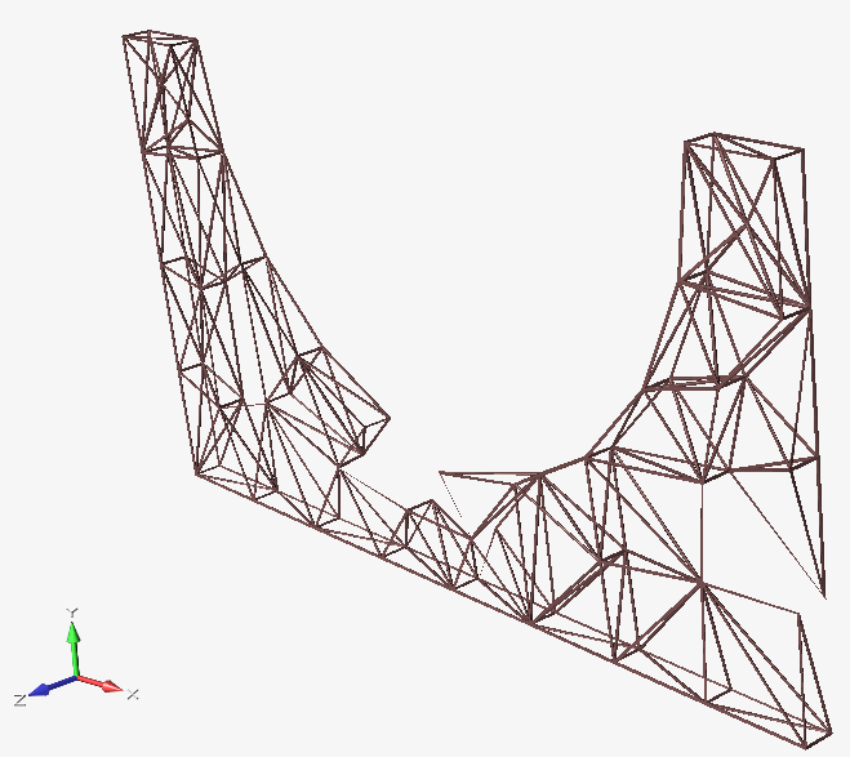


Figura 52 - Modello ottimizzato con lunghezza obiettivo = 40 mm

L'altro picco di spostamento visibile dal grafico è in corrispondenza della $L = 10\ mm$, questo risultato non è in linea con quanto ci si aspettava infatti, ad un infittimento delle celle del reticolo, dovrebbe corrispondere un aumento della rigidezza poiché ci si avvicina di più al modello solido. Tuttavia, osservando la disposizione delle celle, si può notare una grande disuniformità del reticolo e potrebbe essere una causa dell'alto valore di spostamento:

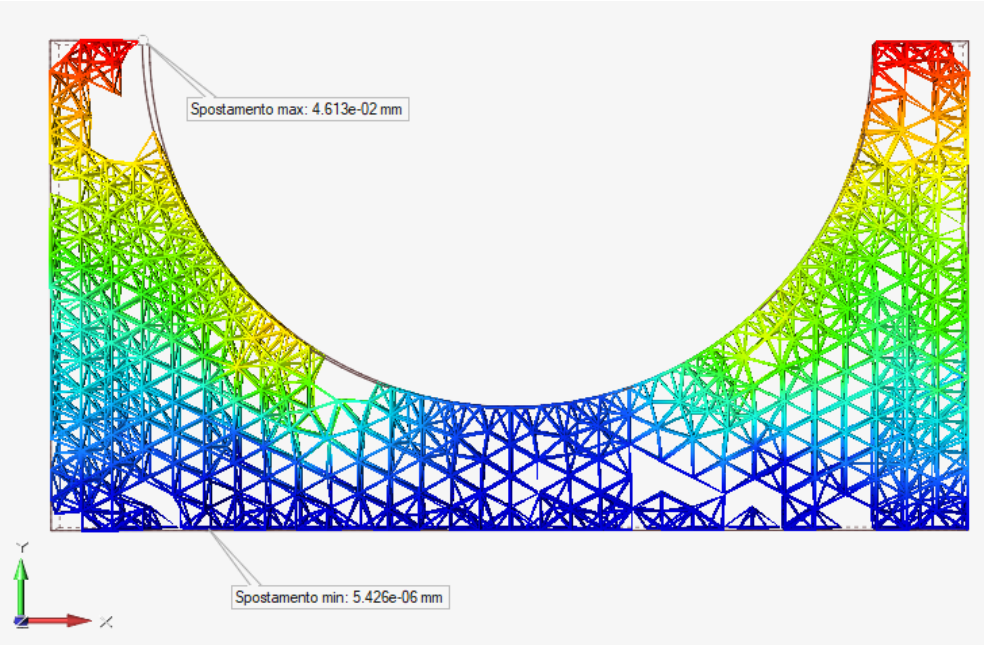


Figura 53 - Spostamento del modello ottimizzato con L=10 mm

I risultati migliori si sono ottenuti per una L compresa tra 18 e 30 mm, per questi casi si può osservare una distribuzione piuttosto uniforme delle celle; gli spostamenti sono molto bassi e anche molto simili tra loro (*Grafico 3*).

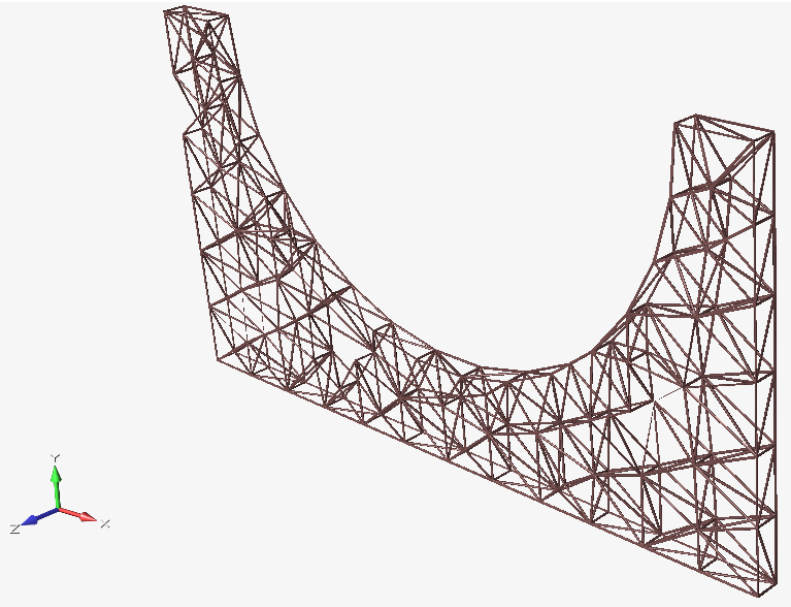


Figura 54 - Struttura del modello ottimizzato con L = 25mm

Per questo motivo si è messo a confronto un ulteriore parametro per poter definire la dimensione ottimale.

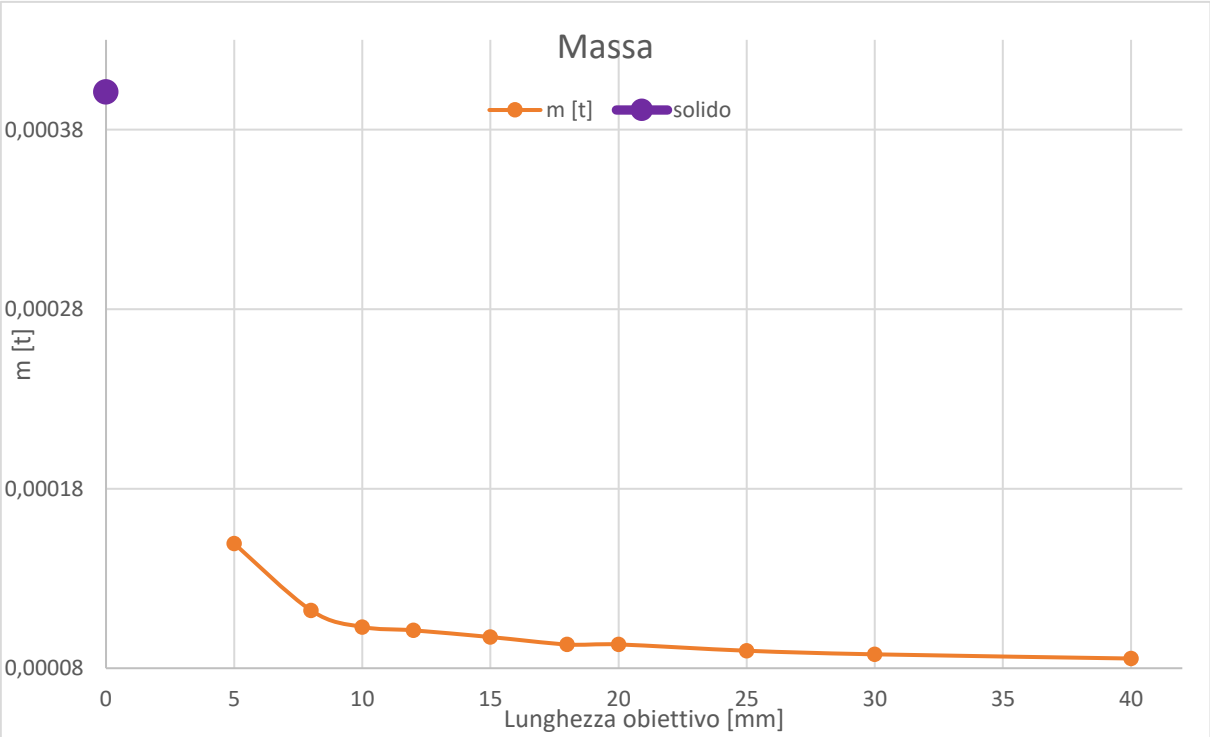


Grafico 4 - Grafico delle masse delle ottimizzazioni in PLA

Anche in questo grafico è stata inserita la massa del modello solido, così da avere un confronto immediato sulla sua riduzione grazie all'ottimizzazione.

L'andamento della massa non presenta risultati insoliti, è infatti evidente che ad un aumento della lunghezza obiettivo, e una conseguente riduzione del volume occupato dalle celle e quindi del materiale, si ha un decremento della massa del modello.

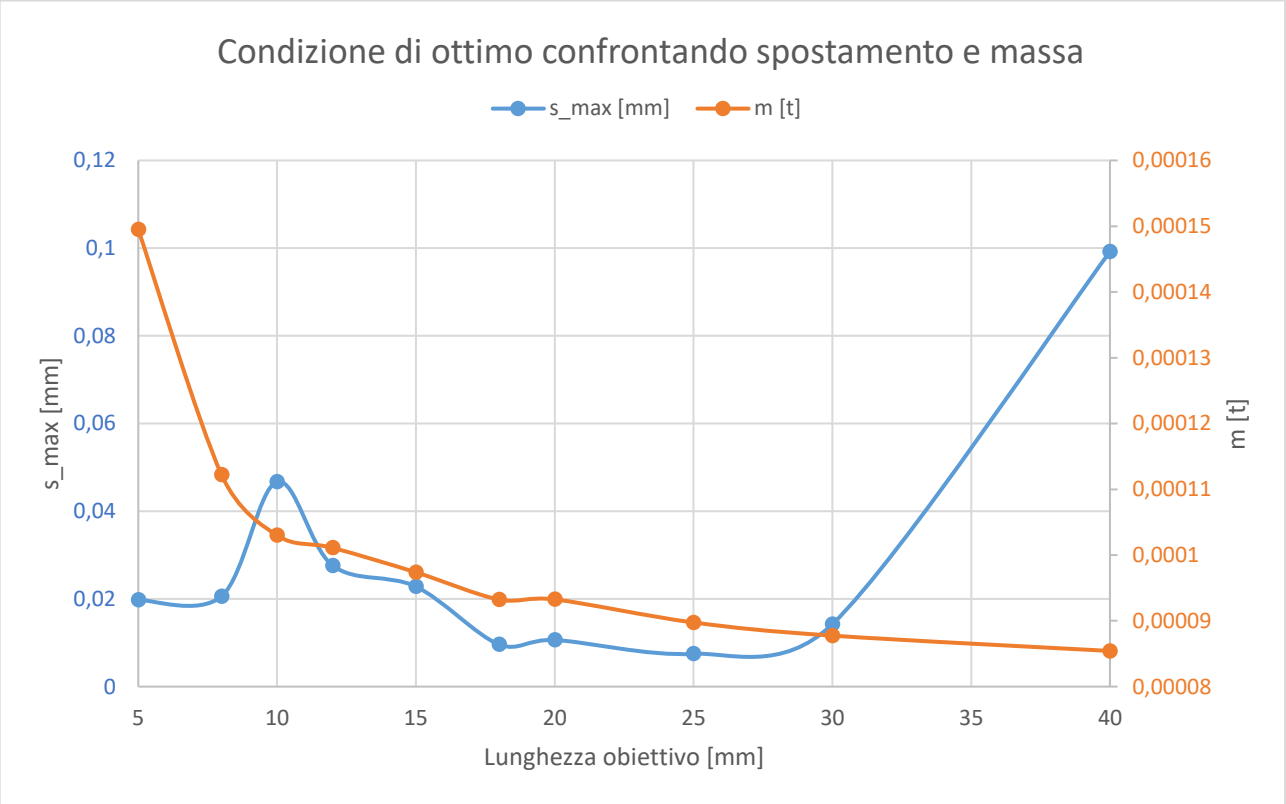


Grafico 5 - Sovrapposizione dello spostamento e della massa per individuare la condizione di ottimo

Da questo confronto si può intuire che la condizione di ottimo corrisponda ad una lunghezza obiettivo di 25 mm, come verifica ulteriore si sono messi a paragone anche i dati di altri parametri ottenuti dalle ottimizzazioni.

Nella tabella sottostante sono stati riportati i valori del fattore di sicurezza minimo, la percentuale di snervamento, il diametro massimo delle travi del reticolo e la tensione di Von Mises.

Le caselle colorate in rosso indicano i valori peggiori, passando via via alle celle azzurre che riportano i casi migliori.

È necessario dire che la differenziazione è stata fatta per trovare la situazione ottimale, tuttavia tutti i dati non risultano essere problematici se considerati singolarmente, non c'è infatti nessuna situazione che porterebbe ad un danneggiamento o a una rottura del componente.

L[mm]	Fattore di sicurezza min	%snervamento	Diametro reticolo max [mm]	Tensione di Von Mises [MPa]
5	51,9	1,93%	1	8,67E-01
8	59,2	1,69%	1	7,60E-01
10	11,1	9%	1,28	4,49
12	21,8	4,58%	1,024	2,06
15	62,2	1,61%	1,04	7,24E-01
18	130,9	0,76%	1,28	3,44E-01
20	104,2	0,96%	1	4,32E-01
25	138,8	0,72%	1	3,24E-01
30	76,5	1,31%	1,6	5,88E-01
40	20,6	4,86%	1,024	2,188

Tabella 9 - Tabella di confronto dei parametri delle ottimizzazioni in PLA

Considerando quanto detto in precedenza, e tutti i parametri a disposizione, si può affermare che la condizione di ottimo si trova per una $L = 25\ mm$.

4.5.4. Ottimizzazione topologica Ultem

L'ottimizzazione per il modello in Ultem con il carico dovuto alla laminazione con sacco a vuoto è avvenuta come visto nel caso precedente in PLA.

È stata quindi una procedura iterativa, andando a variare di volta in volta la lunghezza obiettivo.

Anche in questo caso la lunghezza minima che ha permesso la buona riuscita dell'ottimizzazione è $L = 5\ mm$.

Si riportano nella tabella seguente i relativi spostamenti e le relative masse:

diametro fissato a 1 mm e 2 mm				
VINCOLO DI INCASTRO E PRESSIONI SULLE FACCE LATERALI				
limite di rugosità	tipologia modello	L [mm]	s_max [mm]	m [t]
	solido	0	5,67E-03	4,09E-04
2,00E-02	reticolo 100%	40	4,27E-02	8,83E-05
2,00E-02	reticolo 100%	30	1,80E-02	8,95E-05
2,00E-02	reticolo 100%	25	1,34E-02	9,11E-05
2,00E-02	reticolo 100%	20	1,25E-02	9,49E-05
2,00E-02	reticolo 100%	18	1,93E-02	9,51E-05
2,00E-02	reticolo 100%	15	2,22E-02	9,86E-05
2,00E-02	reticolo 100%	12	2,99E-02	1,02E-04
2,00E-02	reticolo 100%	10	6,18E-02	1,09E-04
2,00E-02	reticolo 100%	8	2,77E-02	1,15E-04
2,00E-02	reticolo 100%	5	2,72E-02	1,33E-04

Tabella 10 - Risultati di spostamento e massa per le ottimizzazioni del modello in Ultem con solo pressioni

Per l'Ultem il limite di rugosità non è stato possibile ricavarlo sperimentalmente e inoltre non sono stati trovati dati utili in bibliografia.

In virtù di ciò, il valore è stato impostato in modo arbitrario, tenendo conto dei differenti parametri di stampa dell'Ultem; in particolare è richiesta una temperatura di estrusione superiore, quindi si suppone una rifinitura superficiale migliore. Per questo il limite di rugosità inserito $(20\ \mu m = 20 \cdot 10^{-3}\ mm)$ è leggermente inferiore a quello del PLA.

I dati sono poi stati riportati su un grafico per poter vedere l'andamento dello spostamento in funzione della lunghezza obiettivo.

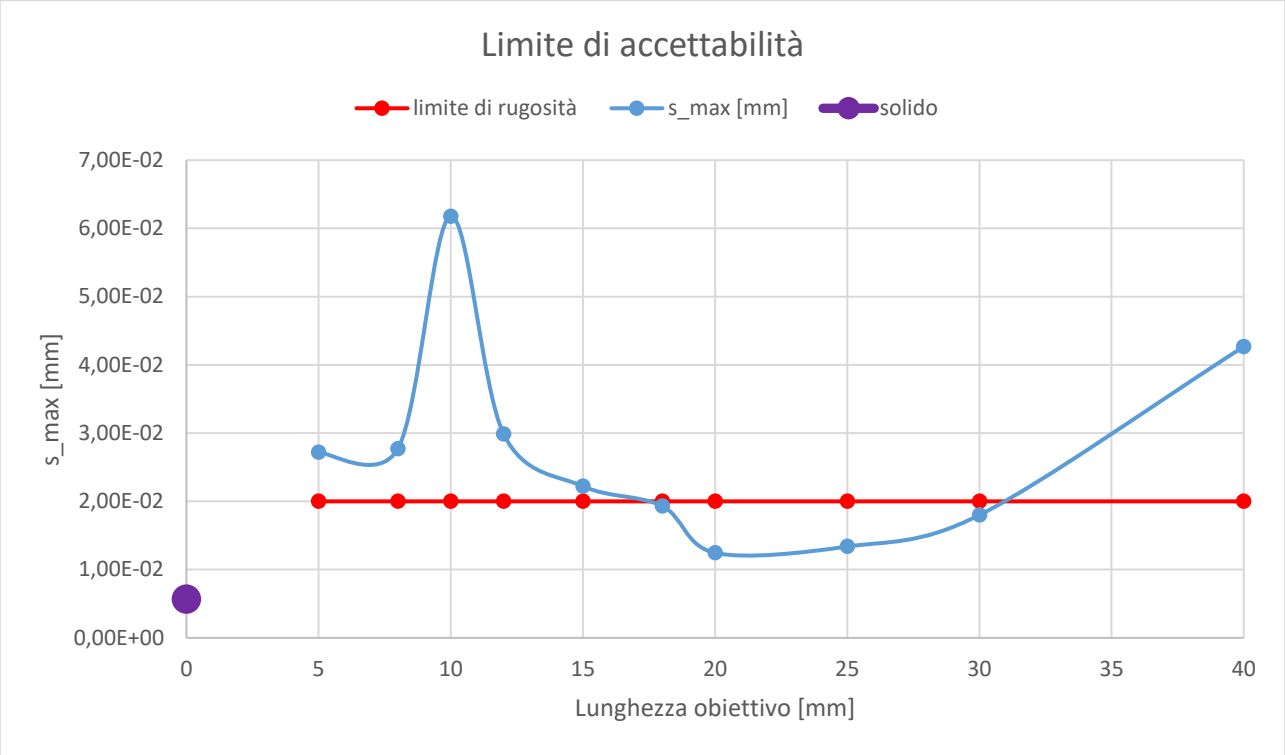


Grafico 6 - Grafico dello spostamento delle ottimizzazioni in Ultem

Come riscontrato nel caso precedente, si può notare che, portando la lunghezza obiettivo a 40 mm si ha un netto incremento dello spostamento. La struttura con L = 40 mm risulta infatti essere particolarmente sbilanciata con zone completamente prive del reticolo.

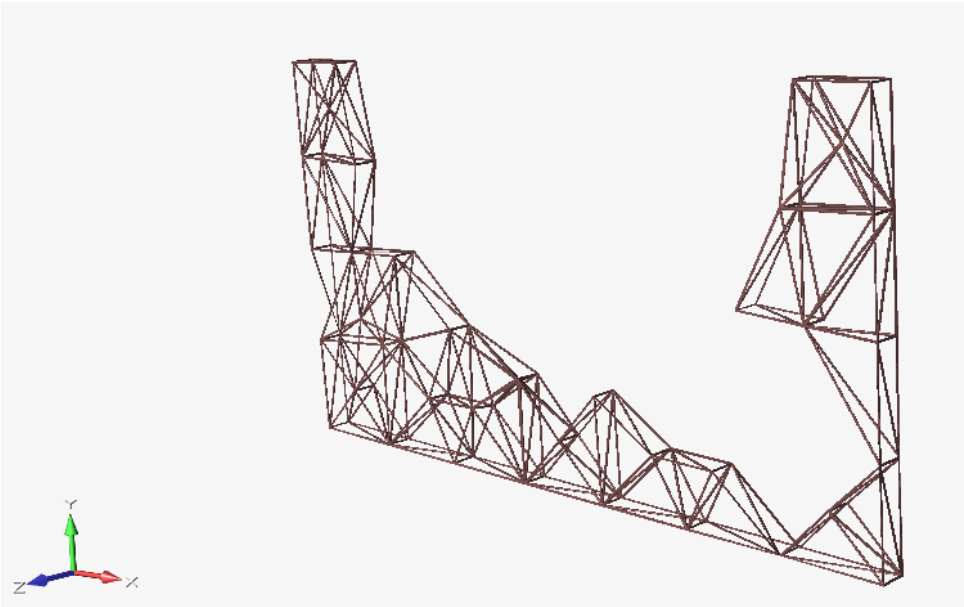


Figura 55 - Struttura del modello ottimizzato con L = 40mm

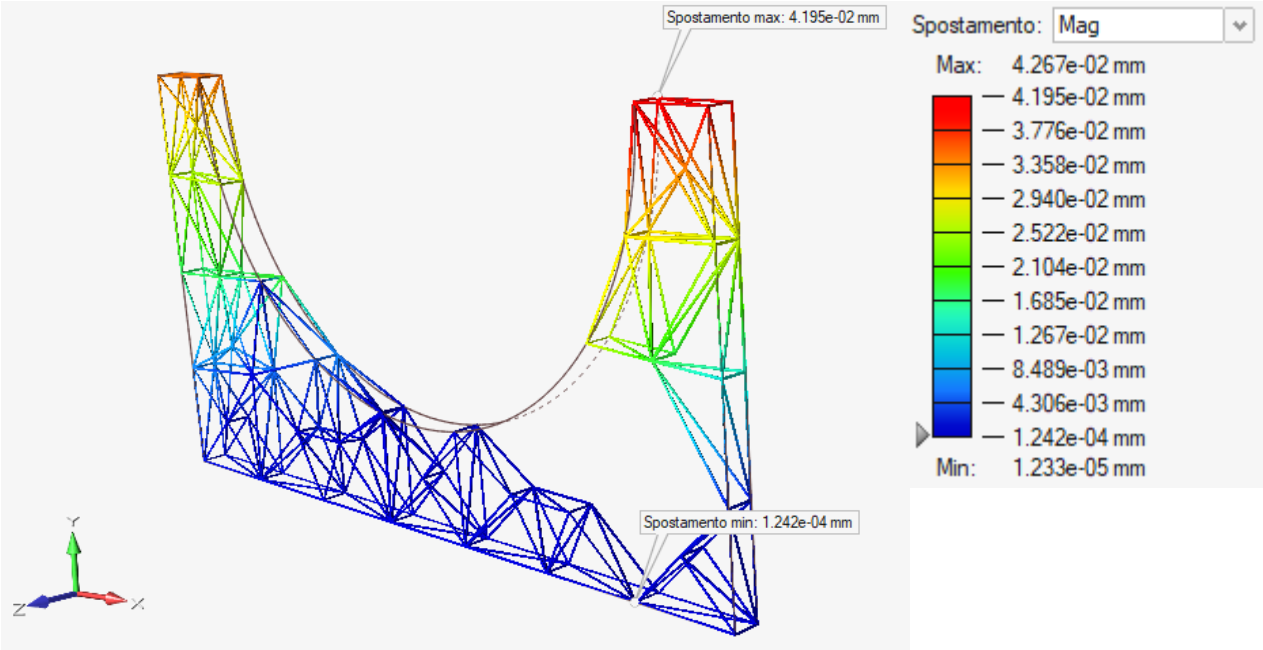


Figura 56 - Spostamento del modello ottimizzato in Ultem con L=40 mm

Nel *Grafico 6* si può osservare come per $L < 18\,mm$ si hanno valori di spostamento superiori all'andamento medio, quindi, ancora più che nel caso precedente, risulta evidente come l'infittimento delle celle reticolari non corrispondi a valori di rigidezza superiori.

Al contrario dimensioni di cella troppo piccole rendono la struttura più cedevole, nonostante la sua similitudine al modello solido.

Analogamente a quanto emerso in precedenza si ha un picco del dato di spostamento anche in corrispondenza di $L = 10\,mm$.

Confrontando le due figure *(Fig. 53 e Fig. 56)* che mostrano lo spostamento con $L = 10\,mm$ per i due casi studio, si nota una grande somiglianza delle strutture. Si può quindi dedurre che tale disposizione delle celle, con zone particolarmente fitte e zone del tutto vuote, causi una grande instabilità del modello.

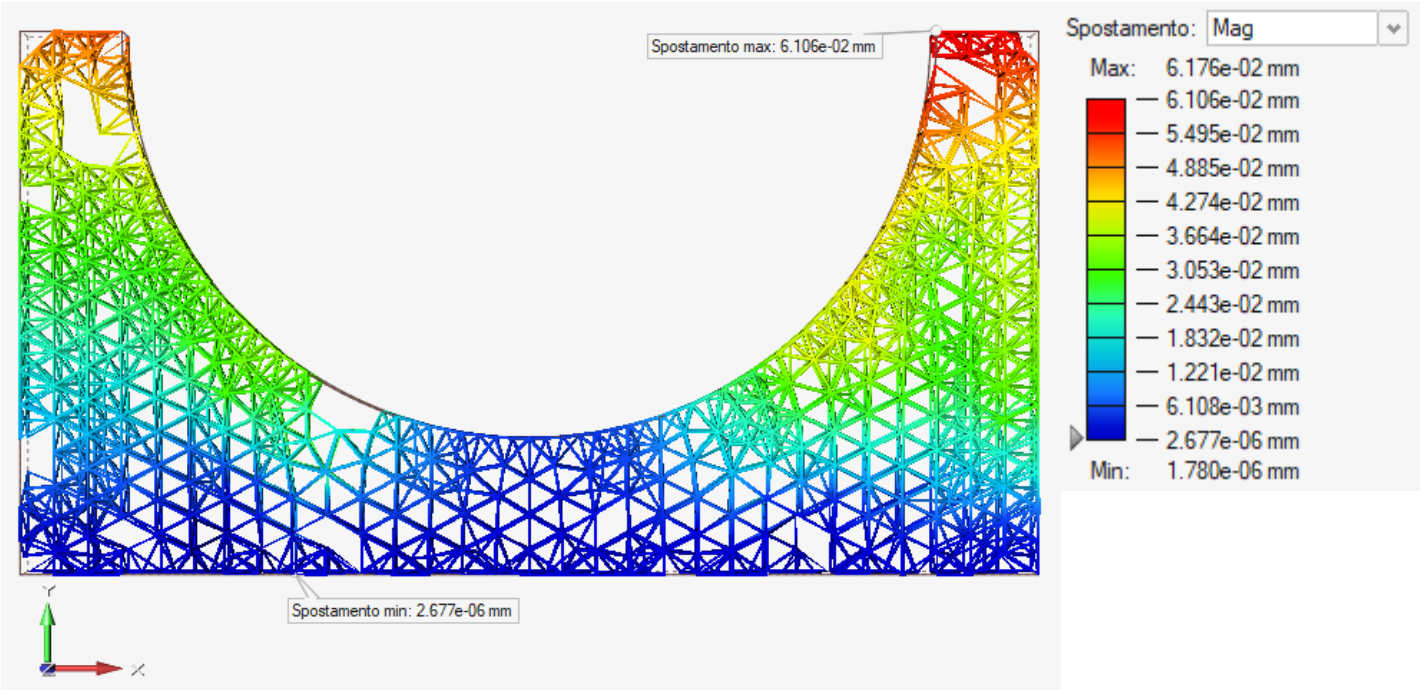


Figura 57 - Spostamento del modello ottimizzato in Ultem con L = 10mm

Per $20 < L < 30\ mm$ si ottengono i valori più bassi di spostamento; come fatto in precedenza per scegliere quale sia il valore migliore della lunghezza obiettivo si vanno a confrontare anche gli altri parametri.

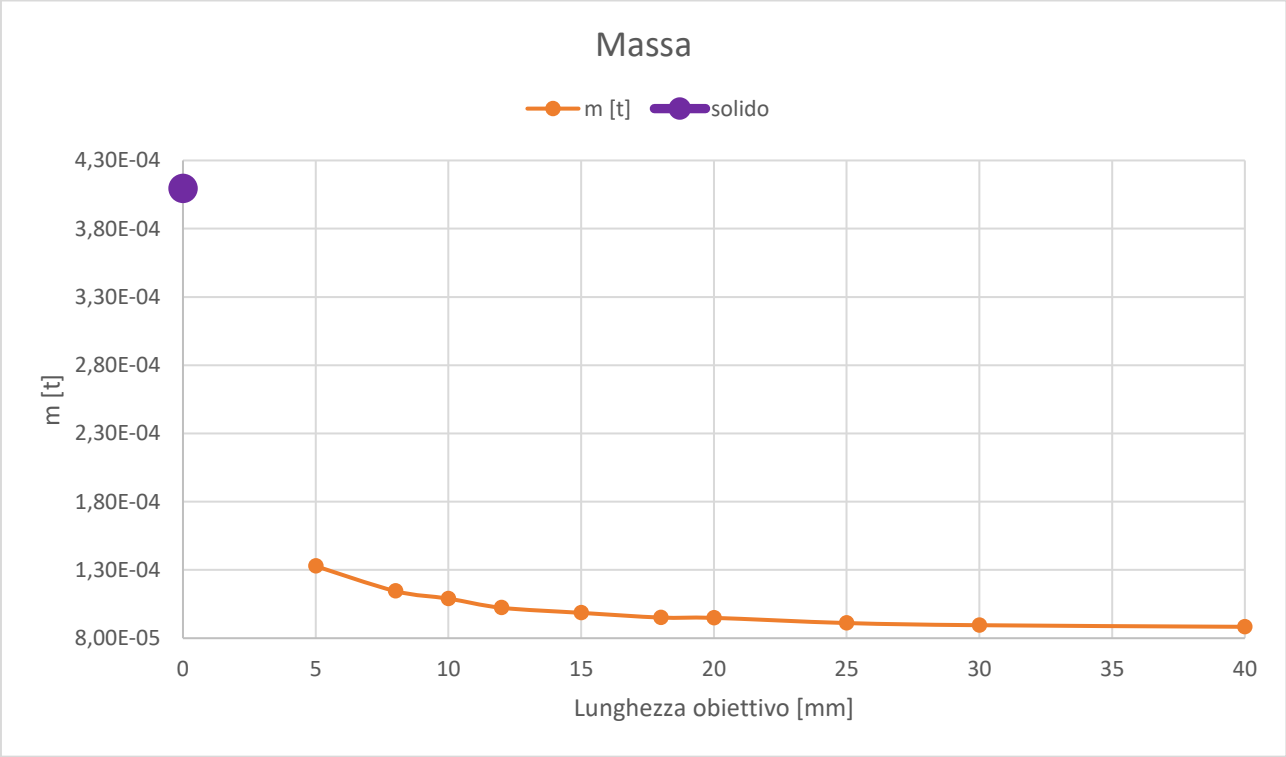


Grafico 7 - Grafico delle masse delle ottimizzazioni in Ultem con sole pressioni

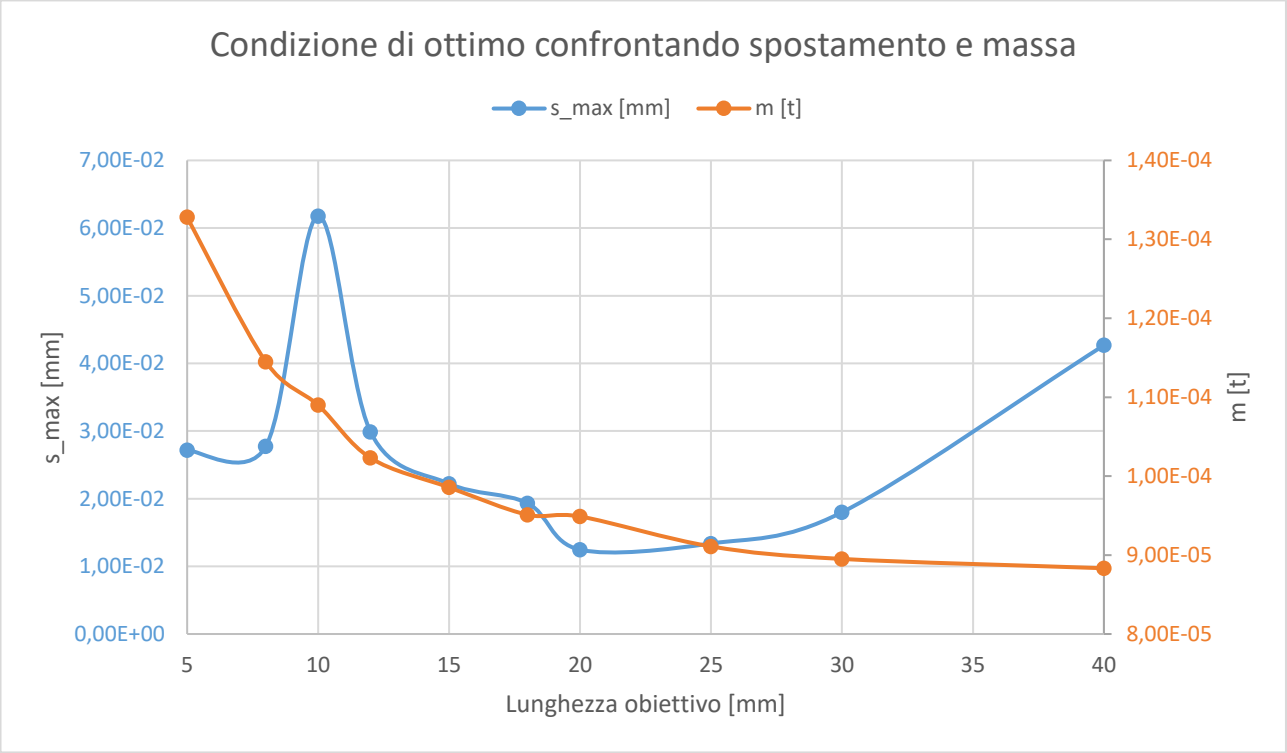


Grafico 8 - Sovrapposizione dello spostamento e della massa per individuare la condizione di ottimo per l'Ultem con solo pressioni

Sovrapponendo il grafico dello spostamento e quello della massa si può osservare come tutti e tre i valori di L (20, 25, 30 mm) forniscano un buon compromesso, in conseguenza di ciò si possono prendere in considerazione anche gli altri parametri, così da avere una visione complessiva.

L[mm]	Fattore di sicurezza	%snervamento	Diametro reticolo max [mm]	Tensione di Von Mises [MPa]
5	261,4	0,39%	1	9,37E-01
8	256,7	1,69%	1	9,55E-01
10	72,7	1%	1,28	3,37
12	141,7	0,71%	1,6	1,728
15	112,3	0,89%	1,024	2,18E+00
18	398,5	0,25%	1	6,15E-01
20	542,9	0,18%	1,6	4,51E-01
25	605,3	0,17%	1,6	4,05E-01
30	410,8	0,24%	1	5,96E-01
40	304,6	0,33%	2	8,04E-01

Tabella 11 - Tabella di confronto dei parametri delle ottimizzazioni in Ultem con solo pressioni

Confrontando tutti i parametri a disposizione la lunghezza obiettivo ottimale risulta essere $L = 30\ mm$ poiché, pur avendo un valore di spostamento leggermente superiore agli altri due, ha una

massa inferiore; inoltre il diametro massimo del reticolo coincide esattamente con il diametro dell'ugello di estrusione, permettendo così una stampa più veloce (non richiedendo più passaggi dell'ugello nelle medesime zone).

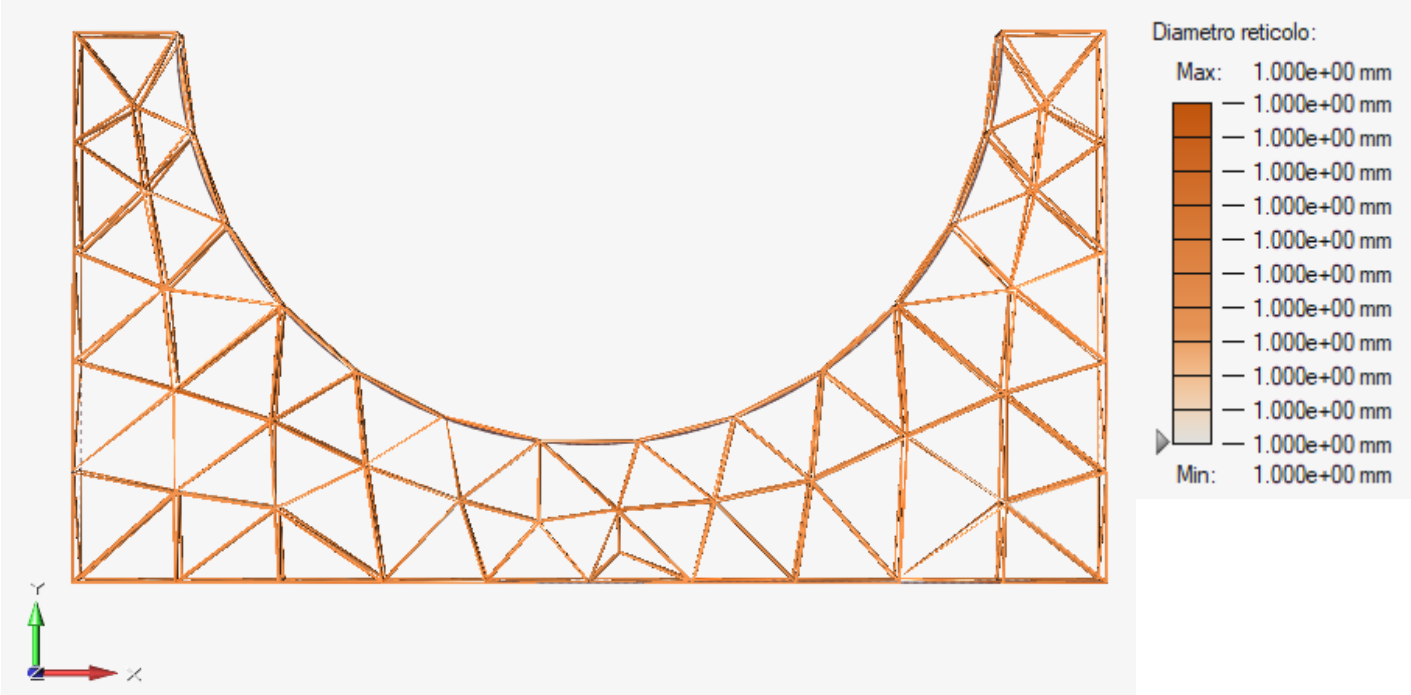


Figura 58 - Dimensione del reticolo nella struttura del modello ottimizzato in Ultem con L = 30 mm

4.5.5. Risultati ottimizzazione Ultem con carico termico

L'ottimizzazione del modello con applicazione del carico termico e della pressione aggiuntiva è avvenuta in due step successivi.

Il primo ciclo di analisi si è svolto come nei casi precedenti, quindi mantenendo fissati il diametro minimo e massimo, la percentuale del reticolo e la percentuale di riduzione del volume; si è variata solo la lunghezza obiettivo.

Tuttavia, come visto nel paragrafo dell'analisi del modello completo, a causa del carico termico applicato alla struttura, gli spostamenti risultano essere molto maggiori a quello che consideriamo il limite dato dalla rugosità superficiale. Motivo per cui era stata presa in considerazione la deformazione del componente.

La stessa verifica è stata effettuata sui risultati delle ottimizzazioni.

Nella tabella sottostante vengono infatti riportati i valori della massa e della deformazione per ogni variazione della lunghezza obiettivo.

diametro fissato a 1 mm e 2 mm			
VINCOLO DI INCASTRO E PRESSIONI SULLE FACCE LATERALI			
tipologia modello	L [mm]	m [t]	deformazione
solido	0	4,09E-04	5,35E-03
reticolo 100%	40	9,01E-05	5,14E-03
reticolo 100%	30	9,18E-05	5,61E-03
reticolo 100%	25	9,29E-05	5,37E-03
reticolo 100%	20	9,55E-05	5,93E-03
reticolo 100%	18	9,58E-05	7,63E-03
reticolo 100%	15	9,99E-05	6,22E-03
reticolo 100%	12	1,02E-04	7,09E-03
reticolo 100%	10	1,10E-04	1,14E-02
reticolo 100%	8	1,15E-04	5,25E-03
reticolo 100%	5	1,53E-04	5,29E-03

Tabella 12 - Risultati ottimizzazioni del modello in Ultem con applicazione del carico termico e delle pressioni

Si è poi passati alla realizzazione dei grafici delle grandezze per osservarne l'andamento in funzione di L.

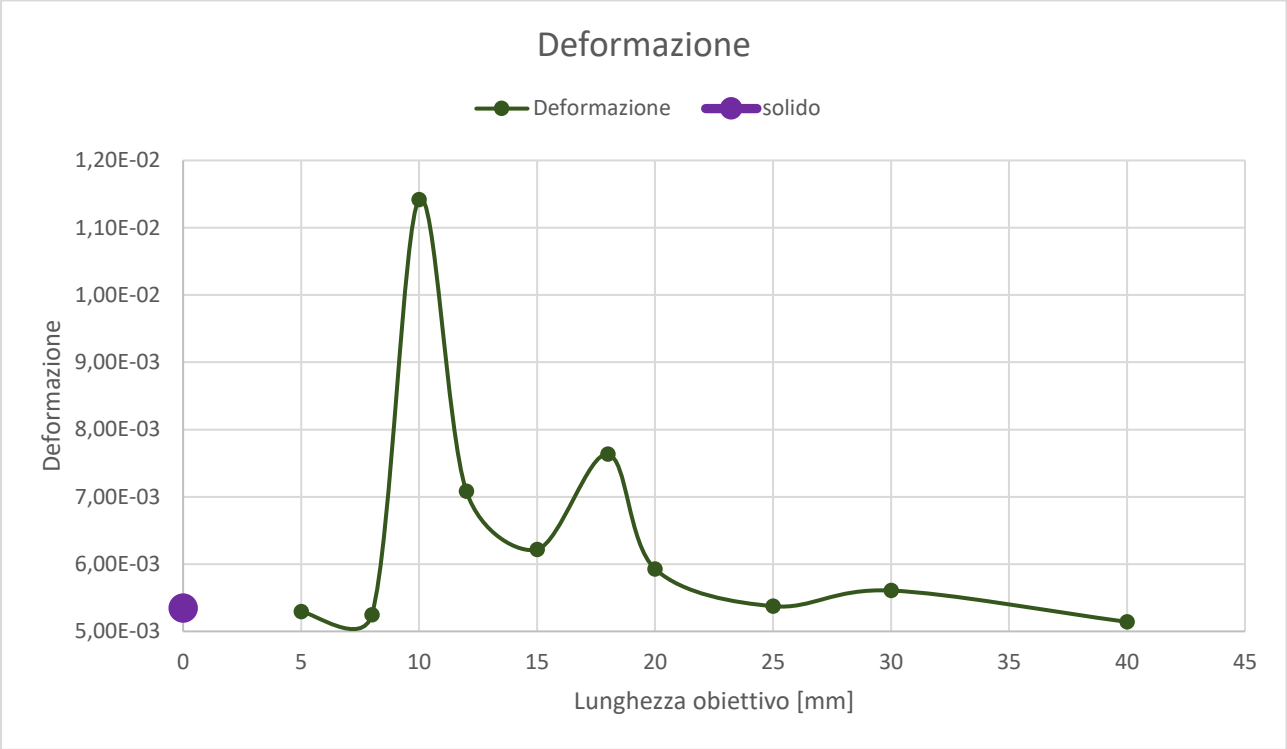


Grafico 9 - Grafico della deformazione delle ottimizzazioni con 100% reticolo e carico termico

Il modello così ottimizzato porta a dei risultati con un andamento molto ondulatorio, per questo motivo risulta difficile individuare una lunghezza obiettivo ottimale.

Nel *Grafico 9* si può comunque vedere che per $L > 20\ mm$ si ha un andamento più costante della grandezza, con valori simili alla deformazione ottenuta per il modello solido (pallino viola).

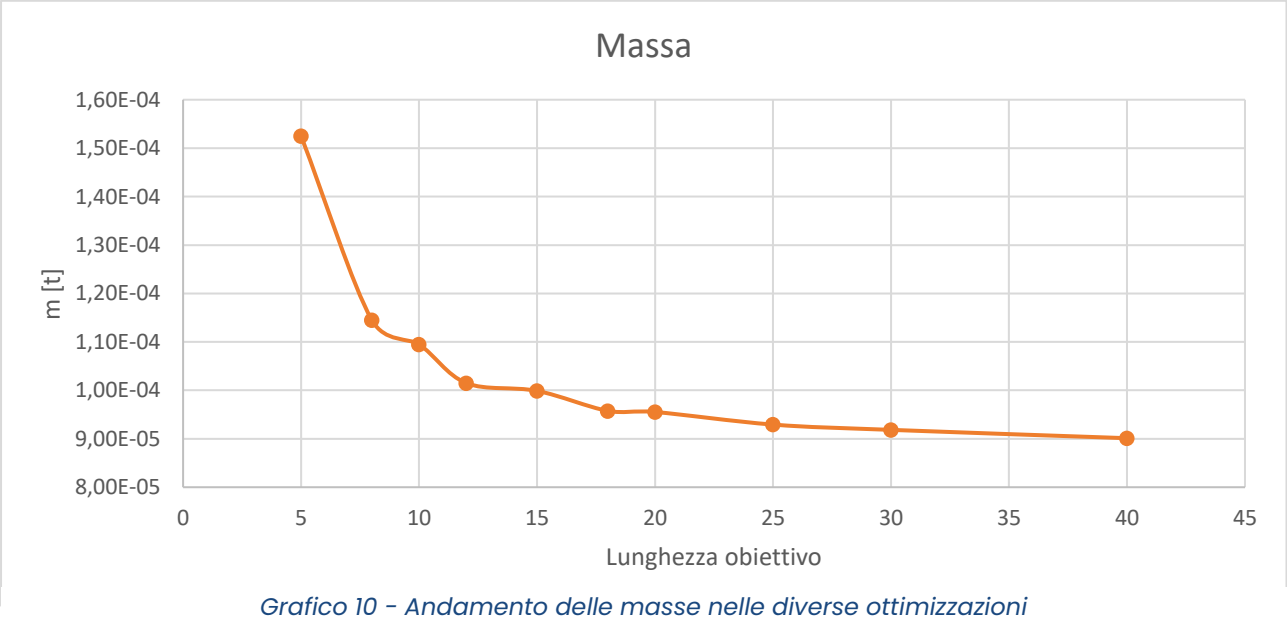


Grafico 10 - Andamento delle masse nelle diverse ottimizzazioni

Tuttavia per migliorare l'andamento e, come conferma dei dati, si è svolto un ulteriore ciclo di ottimizzazioni in cui si è diminuita la percentuale di reticolo al 70% in modo da irrigidire la struttura con delle zone solide.

diametro fissato a 1 mm e 2 mm			
VINCOLO DI INCASTRO E PRESSIONI SULLE FACCE LATERALI			
tipologia modello	L [mm]	m [t]	deformazione
solido	0	4,09E-04	5,35E-03
reticolo 70%	40	1,15E-04	5,01E-03
reticolo 70%	30	9,74E-05	5,56E-03
reticolo 70%	25	9,84E-05	5,40E-03
reticolo 70%	20	1,04E-04	6,80E-03
reticolo 70%	18	1,09E-04	7,54E-03
reticolo 70%	15	1,14E-04	7,48E-03
reticolo 70%	12	1,15E-04	7,29E-03
reticolo 70%	10	1,19E-04	7,19E-03
reticolo 70%	8	1,15E-04	5,36E-03
reticolo 70%	5	1,53E-04	5,63E-03

Tabella 13 - Risultati delle ottimizzazioni con percentuale di reticolo = 70 %

Come accaduto in precedenza, i dati della tabella sono stati riportati nei grafici per verificarne l'andamento.

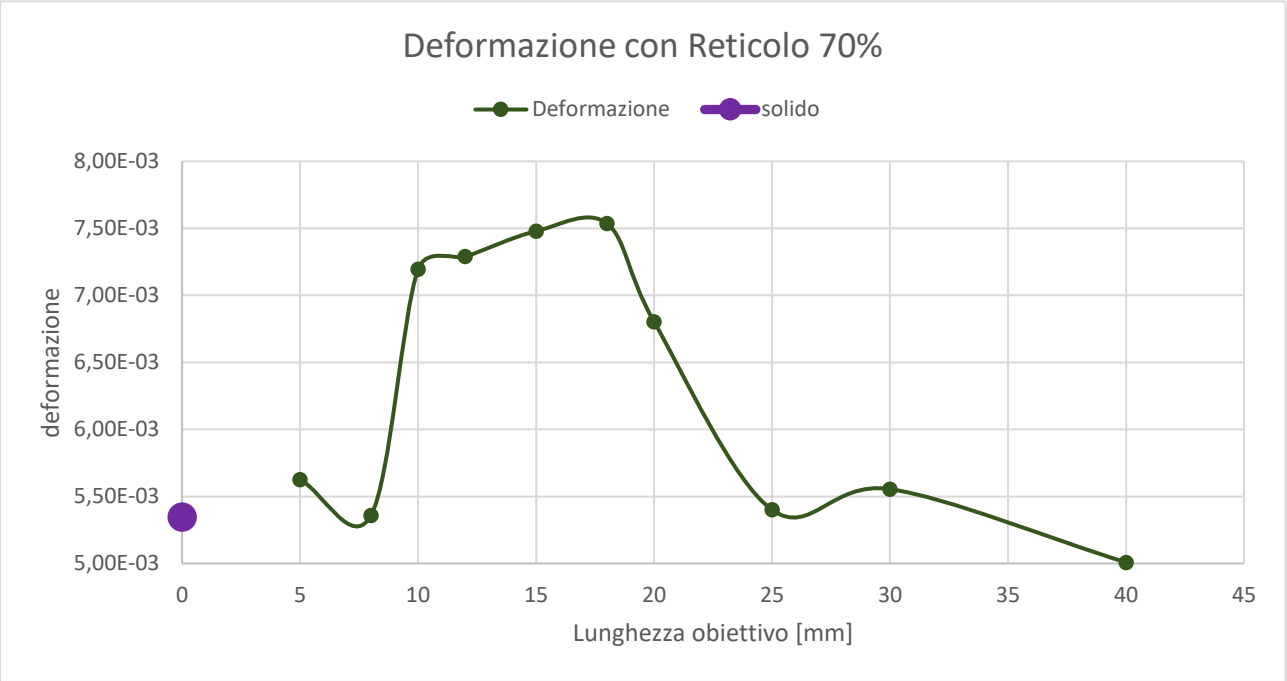


Grafico 11 - Andamento deformazione per le ottimizzazioni con reticolo 70%

Mettiamo inoltre a confronto i diversi valori delle deformazioni ottenuti con il primo e con il secondo ciclo di analisi sovrapponendo i due grafici.

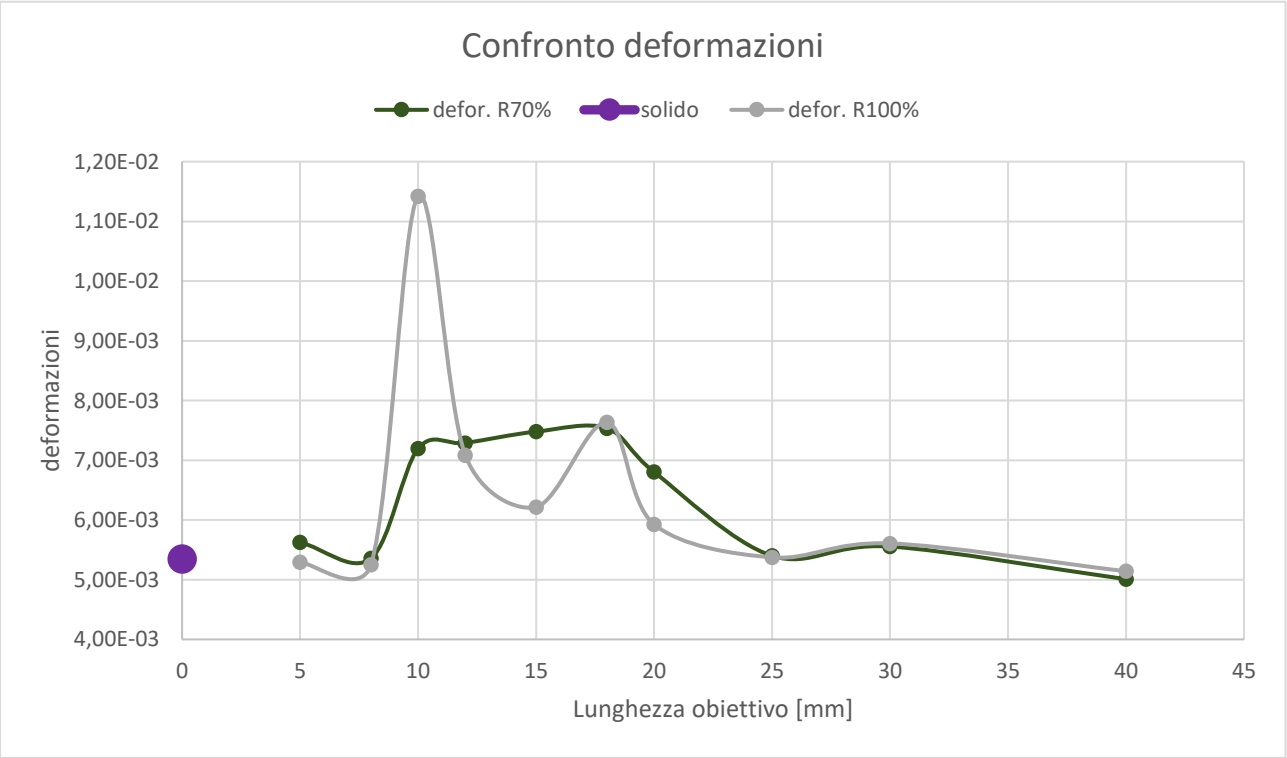


Grafico 12 - Confronto tra le deformazioni con reticolo 100% e 70%

Si può osservare come, irrigidendo la struttura con delle parti solide, si ottengano in generale dei risultati più vicini al valore del modello interamente solido; inoltre si va un po' ad appiattire l'andamento delle deformazioni ottenendo così dei risultati meglio interpretabili.

Le deformazioni minime si ricavano per lunghezze obiettivo superiori a 25 mm, tuttavia non si ha ancora un dato certo. Perciò come fatto nei precedenti casi si va adesso ad analizzare l'andamento della massa per trovare la soluzione ottimale.

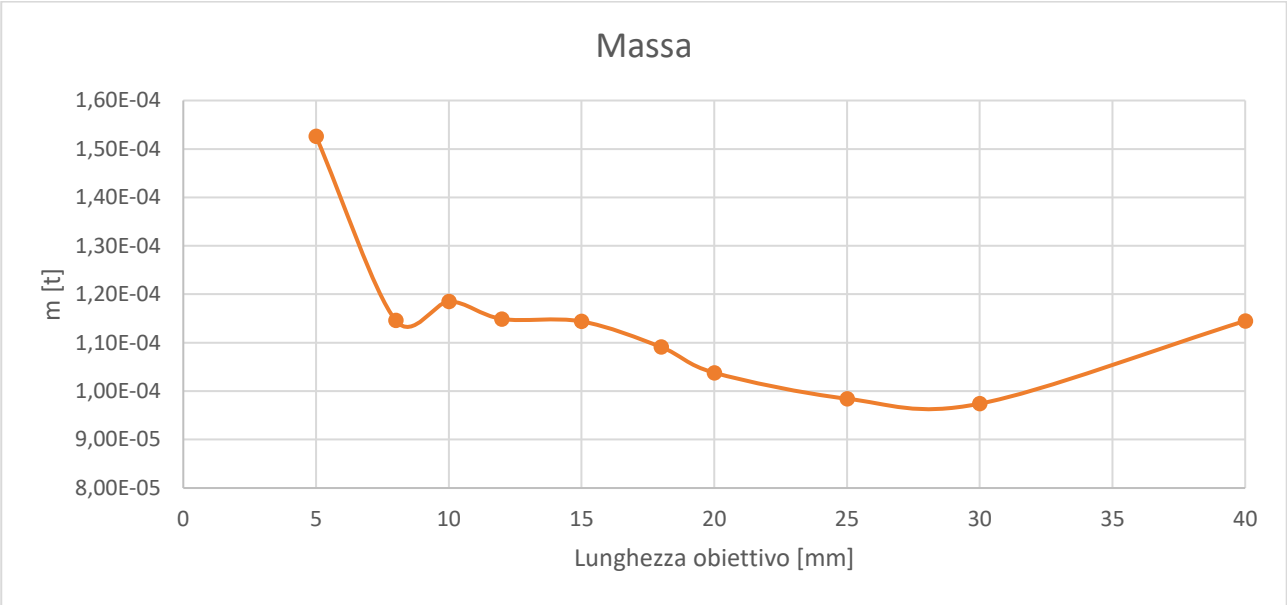


Grafico 13 - Andamento della massa nelle ottimizzazioni con Reticolo=70%

A differenza di quanto si era ottenuto nei casi precedenti, qui si può vedere un'anomalia dei risultati; per $L = 40\,mm$ si ha un aumento della massa, al contrario di quanto rilevato fin ad ora dove, ad un aumento della lunghezza obiettivo, si aveva sempre una diminuzione della massa. Questo è dovuto alla presenza di più parti solide come mostra la *Figura 59* sotto.

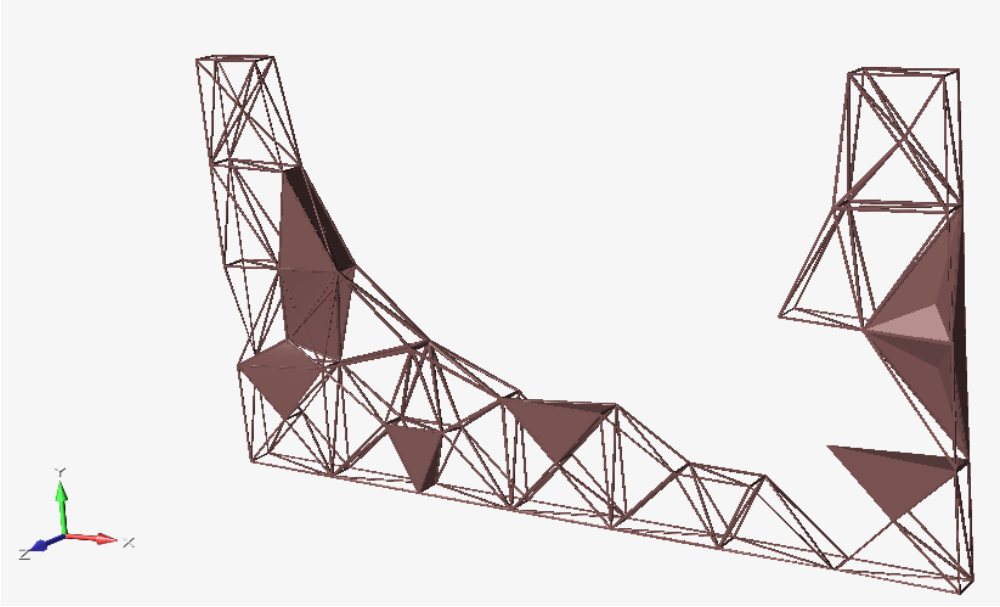


Figura 59 - Struttura ottimizzata con L = 40mm e Reticolo = 70%

Si sono poi messi a confronto i due grafici per individuare la dimensione ottimale di L:

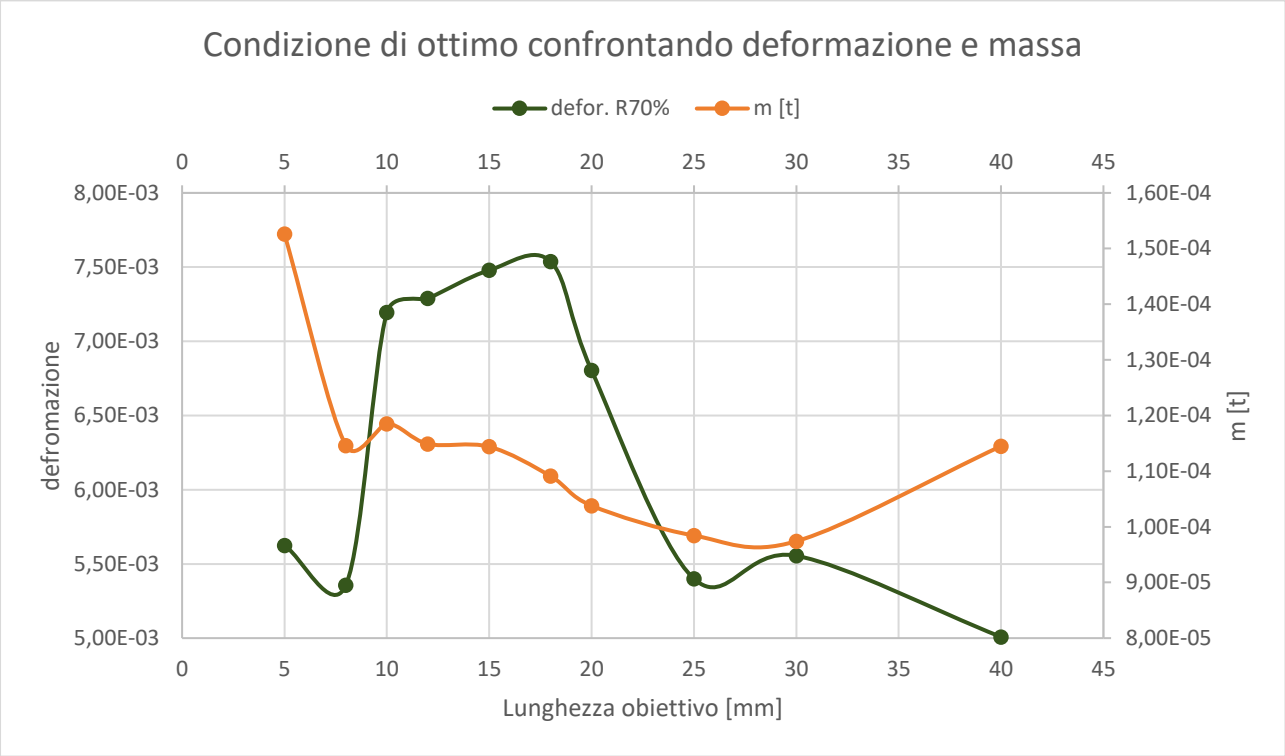


Grafico 14 - Sovrapposizione dei grafici di deformazione e massa

Sovrapponendo i due grafici risulta evidente come la rigidezza, e quindi la deformazione, sia correlata alla massa; si può notare come ad elevate rigidezze corrispondano piccole masse e viceversa.

In questo caso la dimensione delle celle ottimale risulta essere tra i 25 e i 30 mm ma, dal momento che l'obiettivo primario era ridurre al minimo le deformazioni e inoltre la differenza di massa è praticamente trascurabile, si andrà a scegliere la soluzione che tra le due risulta essere più rigida, quindi $L = 25\ mm$.

Si riporta di seguito la tabella con i risultati degli altri parametri, che tuttavia non sono stati tenuti in considerazione poiché risultavano essere troppo simili tra di loro e per consentire la formazione di una graduatoria sensata.

L[mm]	Fattore di sicurezza	% snervamento	Diametro reticolo max [mm]	Tensione di Von Mises [MPa]
5	13	7,68%	1	1,88E+01
8	14,6	6,85%	1	1,68E+01
10	8,4	12%	1,28	2,90E+01
12	11	9,06%	1,6	2,22E+01
15	9,1	10,93%	1,6	2,68E+01
18	8,7	11,54%	1,6	2,83E+01
20	12,1	8,24%	1,354	2,02E+01
25	14,3	6,99%	2	1,71E+01
30	11,9	8,42%	2	2,62E+01
40	17	5,88%	1,984	1,44E+01

Tabella 14 - Tabella dei parametri delle ottimizzazioni in Ultem con pressioni e carico termico e Reticolo=70%

4.5.6. Risultati

	Solo pressioni		Pressioni e temperatura
	PLA	Ultem1010	Ultem1010
L [mm]	25	30	25

Tabella 15 - Lunghezze obiettivo ottimali per le 3 differenti casistiche

4.5.7. Confronto fra le ottimizzazioni di stampi con raggi di curvatura differenti

Dopo aver ottenuto le lunghezze obiettivo per lo stampo in questione, si è voluto verificare se ci fosse una relazione tra la lunghezza obiettivo e il raggio di curvatura dello stampo.
Si sono quindi presi in considerazione raggi di curvatura maggiori ($r = 145\ mm$) portando al limite lo spessore delle parti verticali, risultando quasi inesistenti. E poi viceversa si è andati a diminuire il raggio di curvatura avvicinandosi sempre più ad un parallelepipedo con una sorta di foro (semicirconferenza) nella parte centrale superiore ($r = 45mm$), che è più simile allo stampo della baionetta da cui si era partiti (*Figura 31*).

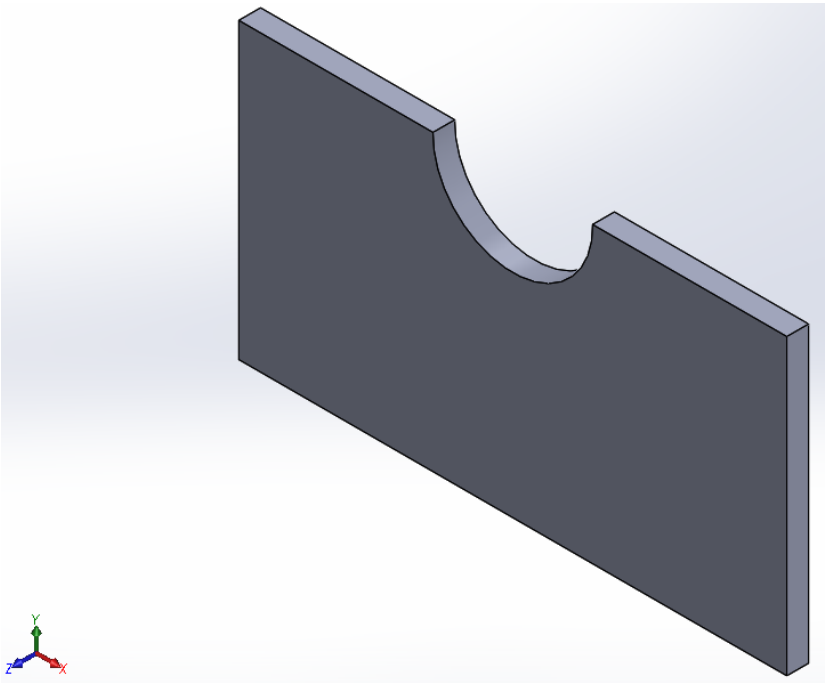


Figura 60 - Modello con raggio di curvatura di 45 mm

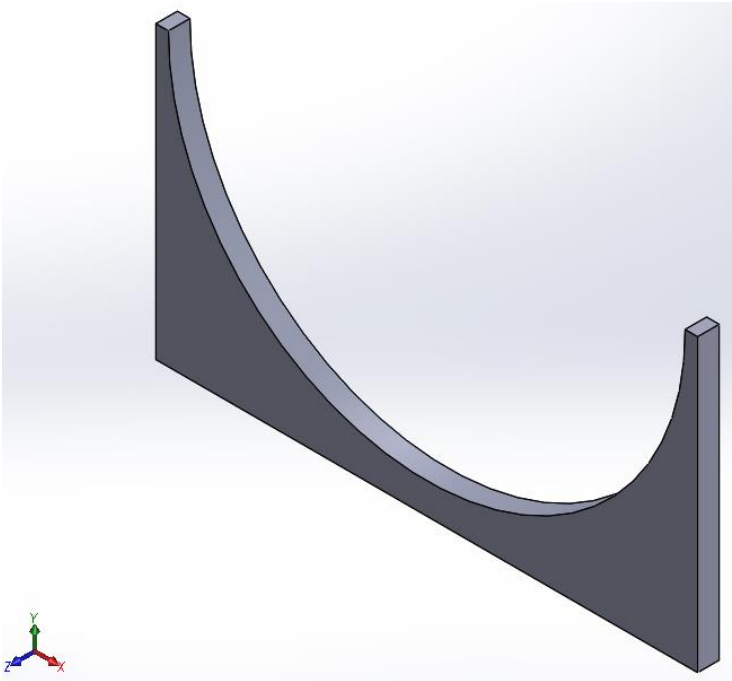


Figura 61 – Modello con raggio di curvatura di 145 mm

Per tutti i casi si sono svolte le ottimizzazioni in modo iterativo come in precedenza, quindi variando solo la lunghezza obiettivo L e come materiale è stato utilizzato l'Ultem.

Si riporta di seguito la tabella in cui sono stati raccolti tutti i dati di spostamento delle varie ottimizzazioni.

diametro fissato a 1 mm e 2 mm					
VINCOLO DI INCASTRO E PRESSIONI SULLE FACCE LATERALI					
tipologia modello	L [mm]	s_max r145	s_max r120	s_max r90	s_max r45
solido	0	5,38E-03	6,07E-03	6,00E-03	6,21E-02
reticolo 100%	40	5,84E-02	4,27E-02	4,48E-02	9,89E-02
reticolo 100%	30	1,57E-01	1,80E-02	4,60E-02	4,48E-02
reticolo 100%	25	6,11E-03	1,34E-02	4,63E-02	4,20E-02
reticolo 100%	20	3,68E-02	1,25E-02	4,62E-02	2,42E-01
reticolo 100%	18	9,87E-03	1,93E-02	7,75E-02	2,21E-01
reticolo 100%	15	1,29E-02	2,22E-02	7,77E-02	2,21E-01
reticolo 100%	12	4,52E-02	2,99E-02	7,86E-02	2,43E-01
reticolo 100%	10	2,27E-02	6,18E-02	7,82E-02	1,89E-01
reticolo 100%	8	2,32E-02	2,77E-02	3,02E-02	3,13E-02
reticolo 100%	5	2,24E-02	2,72E-02	2,86E-02	3,03E-02
reticolo 100%	4	-	-	-	2,57E-02

Le caselle colorate in azzurro mostrano i dati di spostamento migliori per ogni stampo ottimizzato. Si può osservare una correlazione tra il raggio di curvatura e la lunghezza obiettivo, infatti basandosi solo sui risultati di spostamento (a differenza di quanto fatto in precedenza) sembra che per raggi di curvatura maggiori si abbiamo L ottimali maggiori.

Inoltre per il modello con il raggio di curvatura minimo, è stato possibile ottimizzare anche con $L = 4\ mm$ ottenendo lo spostamento minimo.

Si riportano ora tutti i dati dello spostamento su un grafico per sovrapporre le diverse condizioni.

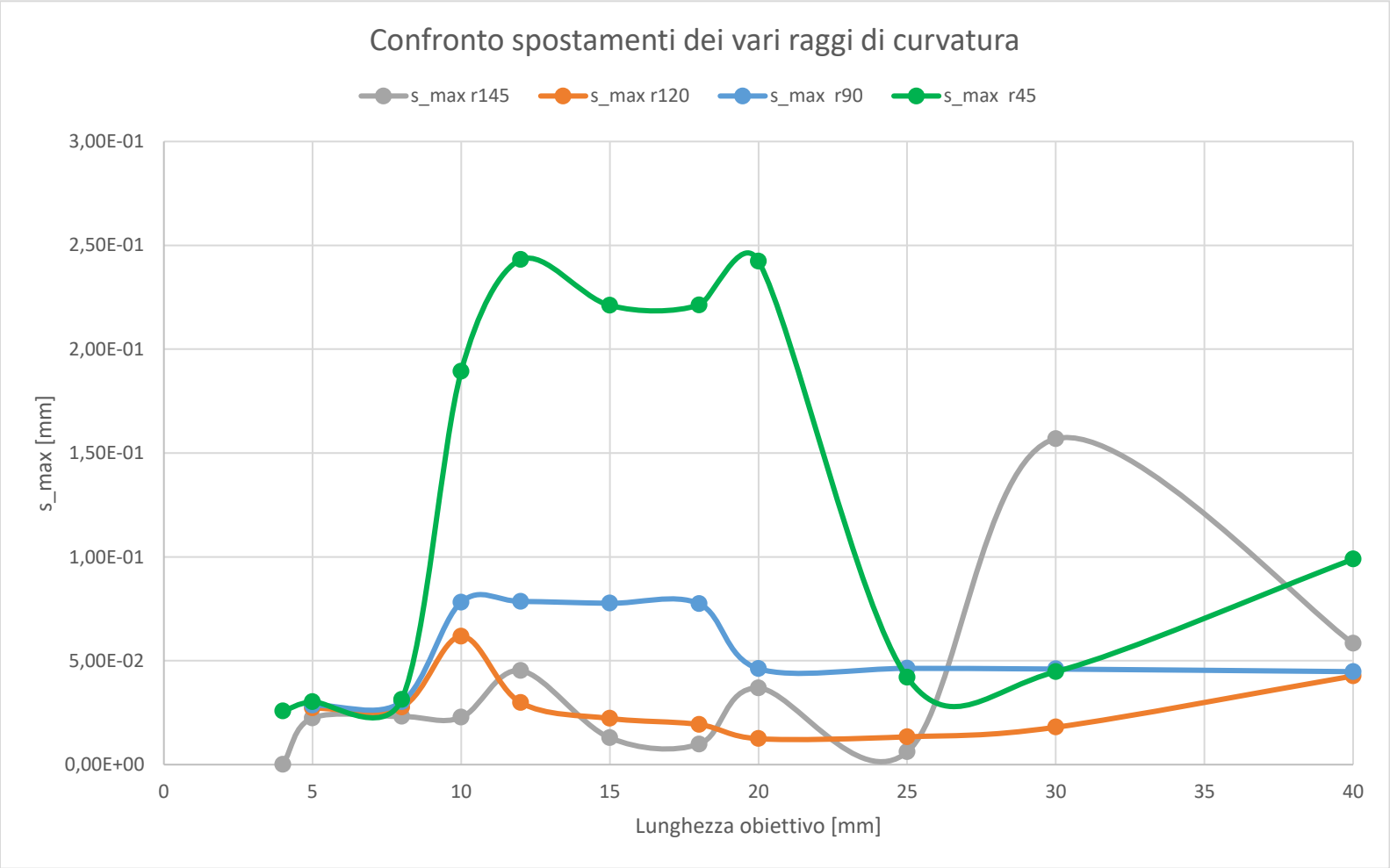


Grafico 15 - Confronto tra gli spostamenti per i diversi raggi di curvatura dello stampo

È necessario fare un'ulteriore osservazione, è evidente infatti, che l'andamento della curva grigia (per raggio di curvatura 145 mm) è molto ondulatorio. Lo spostamento minimo che si ottiene per $L = 25\ mm$ potrebbe quindi non essere effettivamente la condizione ottimale, in quanto non si ha un trend tale da prevedere l'andamento della curva e potrebbe esserci un altro minimo in corrispondenza di una lunghezza obiettivo che non è stata esaminata.

Per quanto riguarda invece la curva verde $(r = 45\,mm)$ e la curva blu $(r = 90\,mm)$ si può pensare che i minimi riscontrati per lunghezze obiettivo piccole siano corretti, in quanto l'andamento della curva diventa poi prevedibile e non si hanno altri valori altrettanto bassi.

4.6. Simulazione di stampa

I risultati ottenuti con le ottimizzazioni sono stati utilizzati all'interno del software Cura Ultimaker per simulare il processo di stampa.

Questo è un software open source che permette di elaborare un modello CAD importando il suo file in numerosi formati, uno dei quali è l'STL.

Si possono definire numerosi parametri di stampa e si può inoltre visualizzare lo slicing, cioè il software va a sezionare il modello in diversi layer (in base alle caratteristiche impostate in precedenza) e mostra il processo di stampa.

In seguito se si ha a disposizione una stampante 3D è sufficiente esportare il codice generato e procedere con la stampa.

Per questo progetto il programma è stato utilizzato solo per la simulazione di stampa, per verificare in che modo la lunghezza obiettivo trovata con le varie ottimizzazioni, potesse essere implementata nel processo.

Per simulare il processo di stampa è stato utilizzato il modello CAD dello stampo con raggio di curvatura di 120 mm, quindi quello di cui si sono effettuate le analisi con entrambi i materiali e con tutte le condizioni di carico.

Sono stati inseriti i due materiali impostando la loro densità all'interno del software.

4.6.1. Confronto

Si inseriscono gli opportuni parametri necessari per la stampa:

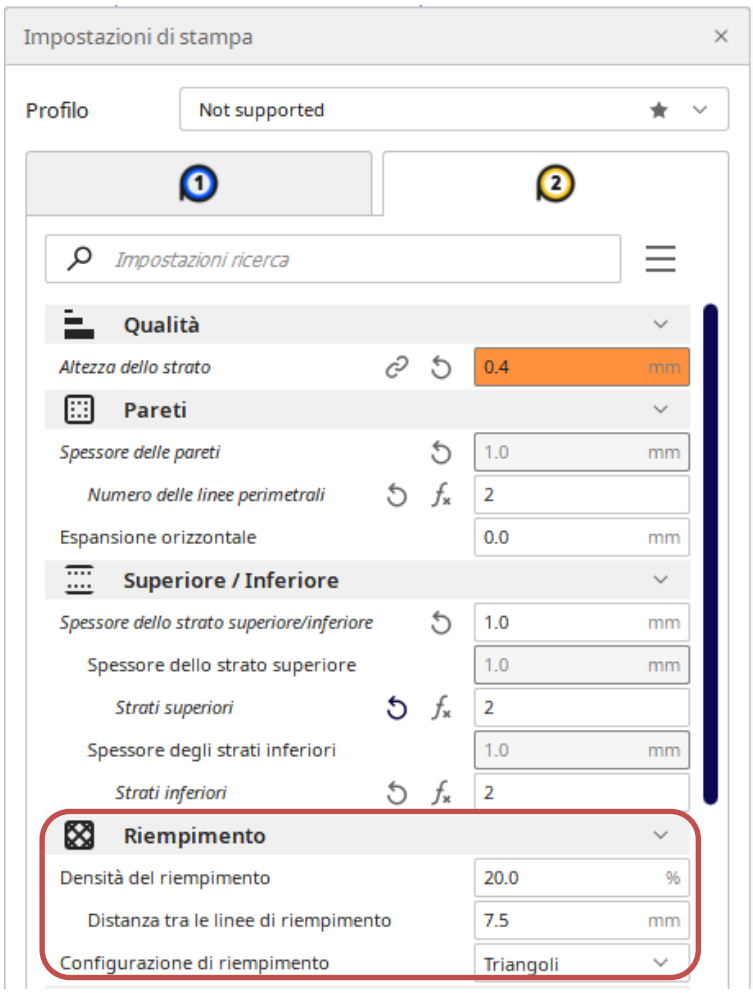


Figura 62 - Parametri di stampa per il PLA con riempimento definito dal software

Nel primo caso si va quindi a simulare la stampa con il riempimento definito dal software in modo standard $(20\% = 7{,}5\ mm)$.

Nel secondo caso si è simulata la stampa con la lunghezza obiettivo calcolata con l'ottimizzazione; per fare ciò è sufficiente modificare manualmente il parametro "distanza tra le linee di riempimento":

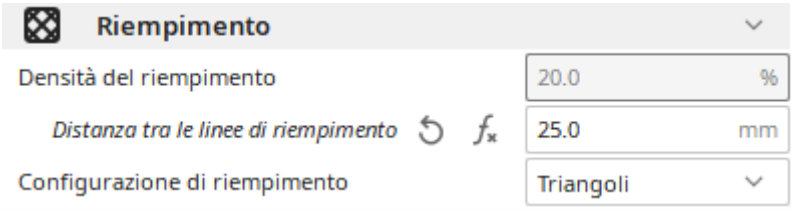


Figura 63 - Modifica del parametro di stampa con la lunghezza obiettivo = 25 mm

Per entrambe le impostazioni e con i due materiali, si è fatta la simulazione del processo azionando il "sezionamento" da parte del software e salvando i risultati ottenuti in termini di tempo di stampa e di materiale utilizzato.

Si riporta di seguito la tabella con i dati acquisiti dalle simulazioni:

	PLA (L=25mm)		ULTEM (1) (L=30mm)		ULTEM (2) (L=25mm)	
	Tempo	**Materiale (g)**	**Tempo**	**Materiale (g)**	**Tempo**	**Materiale (g)**
L obiettivo	5h55'	78	4h30'	82	4h34'	87
Riempimento standard 20%	6h54'	128	5h21'	134	5h21'	134

Tabella 16 - Riepilogo risultati della simulazione di stampa con i differenti riempimenti

Come ci si aspettava risulta evidente che inserendo le lunghezze obiettivo trovate in precedenza si va a diminuire sia il tempo di stampa sia il materiale utilizzato, infatti il riempimento risulta meno denso, con le celle più distanziate tra loro.

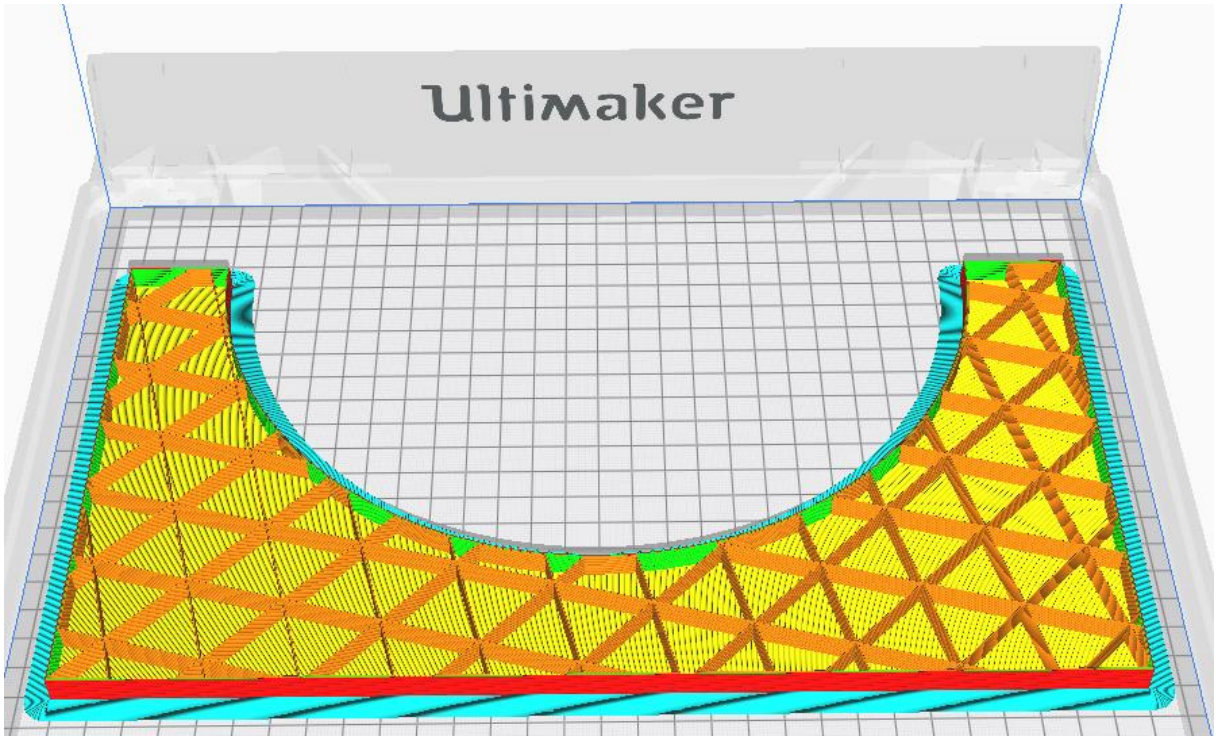


Figura 64 - Riempimento con L = 25mm

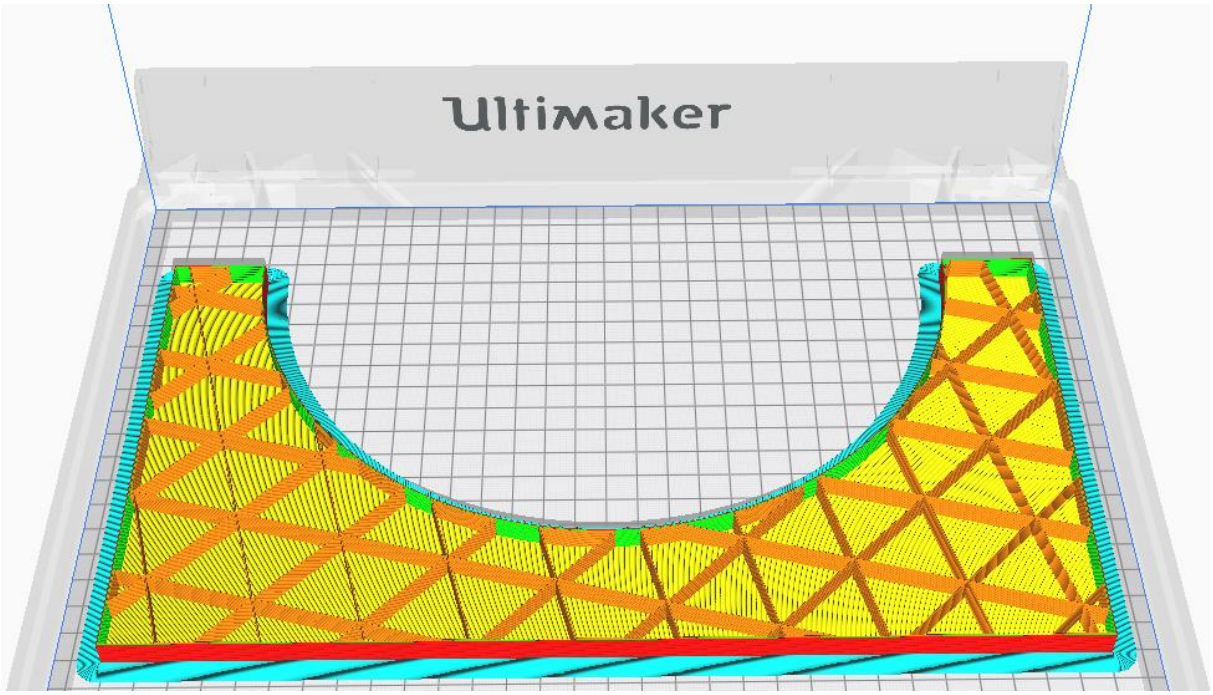


Figura 65 - Riempimento con L = 30mm

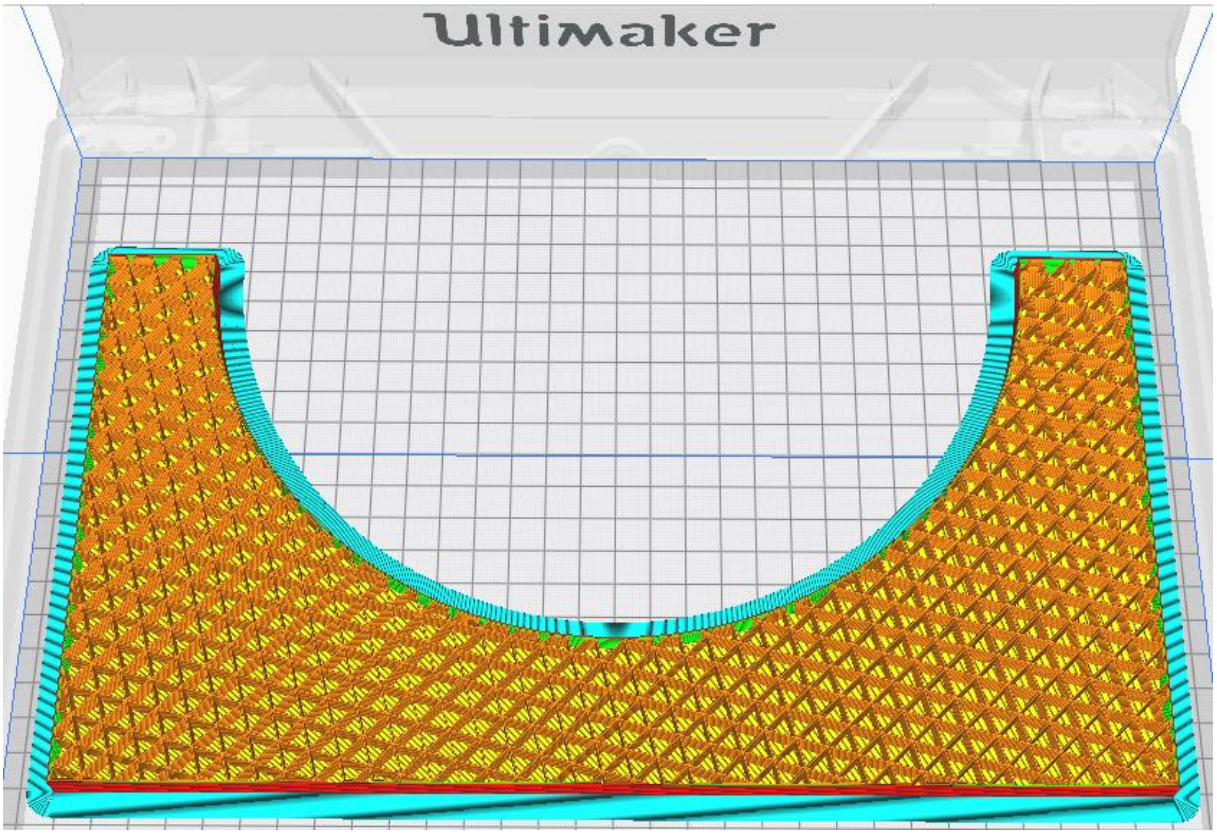


Figura 66 - Riempimento standard 20% (L = 7.5 mm)

Conclusioni

Al termine del lavoro svolto si può dire che, l'ottimizzazione tramite reticolo per la produzione degli stampi risulta essere vantaggiosa ed utile soprattutto nei casi in cui i pezzi da realizzare siano a sezione costante e con geometrie non troppo complesse.

Come visto, si può ottimizzare solo una parte dello stampo e poi estendere quanto trovato al componente completo risparmiando in termini di tempo di calcolo.

Inoltre, pensando ad uno stampo con delle variazioni della sezione trasversale, si può dire che ci sia una correlazione tra l'apertura dello stampo e la dimensione delle celle, quindi può essere formulato un codice di stampa che preveda un infittimento delle celle dove previsto.

Tuttavia, il discorso non può essere fatto in senso generale, infatti l'unica variabile era il raggio di curvatura dell'apertura, mantenendo costanti tutte le altre dimensioni.

Si potrebbe quindi pensare in futuro ad un'indagine più generica provando a variare la forma dello stampo o più dimensioni contemporaneamente.

D'altro canto, però, sono emersi anche i limiti di questo procedimento, infatti si sono ottenuti dei risultati molto distanti da quanto ci si aspettava.

L'idea iniziale era che ad un infittimento delle celle corrispondesse una migliore risposta del modello in termini di rigidezza, ma si è rilevata errata (o meglio, non sempre vera).

Inoltre, si è ottenuto un andamento ondulatorio dei grafici con dei picchi in corrispondenza di una precisa lunghezza obiettivo che non era prevedibile a priori e che può essere spiegata solo con una distribuzione molto disomogenea delle celle.

Questi due fatti portano a pensare che l'ottimizzazione tramite reticolo sia molto condizionata dalla forma dello stampo e di conseguenza, risulta impossibile dedurre la distribuzione delle celle. Ogni stampo va analizzato singolarmente e non può essere ricavato in modo logico da altri casi precedentemente studiati.

Riferimenti

[1]. Prof. G. Romeo, *"Tecnologie aerospaziali"*, Politecnico di Torino

[2]. Fabbricafuturo, *"Materiali polimerici per la stampa 3D con tecnologia FDM"*, Tecnologie, 2016

[3]. Guida Stratasys, ISO 9001:2008 Certified, ISO 9001:2015 Certified

[4]. 3dpartsunlimited,*"FDM Fused Deposition Modeling"*, 2016

[5]. J.Torres, J. Cotelo, J. Karl, A. P. Gordon, *"Mechanical Property Optimization of FDM PLA in Shear with Multiple Objectives"*, University of Central Florida, 2015

[6]. B. Zuccarello, *Progettazione meccanica con materiali compositi*

[7]. A. Liciulli, *Scienze e tecnologia dei materiali*

[8]. https://cdm.ing.unimo.it

[9]. Martin Philip Bendsoe, Ole Sigmund; *"Topology Optimization Theory, Methods and Applications"*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003

[10]. https://www.quint.co.jp/eng/pro/ots/ots_fnc-shp.htm#lsh

[11]. Genesis-support.com

[12]. Rahul Ponginan, *"What is topolography optimization"*, Altair University

[13]. Martin Philip Bendsoe, Noboru Kikuchi, *"Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method"*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 1998

[14]. Zhu, Ji-Hong, Zhang, Wei-Hong, Xia, Liang, *"Topology optimization in aircraft and aerospace structures design"*, Archives of Computational Methods in Engineering 2016

[15]. Prof. E. Campana, *"Ottimizzazione topologica"*, Università Sapienza di Roma, Strumenti e metodi di progettazione

[16]. Sigmund, Ole. *"A 99 line topology optimization code written in Matlab"*, Structural and multidisciplinary optimization, 2001

Sommario

Abstract 2

Abstract (Eng) 4

Introduzione 6

1. Laminazione di materiali compositi 8

1.1. Laminazione con sacco a vuoto (vacuum bag) 8

1.2. Laminazione in autoclave 10

1.3. Tecnologia di produzione e materiali 12

1.4. Schede tecniche 16

1.4.1. PLA 17

1.4.2. ULTEM 1010 18

1.5. Problematiche laminazione in autoclave 20

2. Software utilizzati 23

2.1. SolidWorks 23

2.2. Inspire 26

3. Concetti teorici 28

3.1. Cosa si intende per ottimizzazione 28

3.2. Tipi di ottimizzazione strutturale 30

3.2.1. Ottimizzazione di dettaglio 30

3.2.1.1. Size optimization 30

3.2.1.2. Shape optimization 31

3.2.1.3. Topometry optimization 32

3.2.1.4. Topography optimization 33

3.2.2. Topology optimization (ottimizzazione pre-processo) [9] 34

3.2.2.1. Formulazione 34

3.2.2.2. Parametrizzazione del design 36

3.2.2.3. Come trovare la soluzione di ottimo 40

3.2.2.4. Problematiche 42

4. Caso studio 45

4.1. Design dello stampo 45

4.2. Definizione dei materiali 48

4.3. Definizione delle condizioni di carico 49

4.4. Analisi 52

4.4.1. Analisi modello completo PLA 53

4.4.2. Analisi modello completo Ultem 57

4.5. Ottimizzazione modelli 61

4.5.1. Parametri di ottimizzazione 62

4.5.2. Procedimento per l'ottimizzazione 66

4.5.3. Risultati ottimizzazione PLA 67

4.5.4. Ottimizzazione topologica Ultem 73

4.5.5. Risultati ottimizzazione Ultem con carico termico 79

4.5.6. Risultati 85

4.5.7. Confronto fra le ottimizzazioni di stampi con raggi di curvatura differenti 86

4.6. Simulazione di stampa 90

4.6.1. Confronto 91

Conclusioni 94

Riferimenti 95

Sommario 96

Indice delle figure 99

Indice delle tabelle 102

Indice dei grafici.....103

Ringraziamenti.....104

Indice delle figure

Figura 1 - Sistema del sacco a vuoto, configurazione prima (SX) e dopo (DX) l'azionamento della pompa 9
Figura 2 - Stratificazione dei materiali necessari per la laminazione con sacco a vuoto 9
Figura 3 - Schema autoclave con relativo andamento di pressione e temperatura 11
Figura 4 - Sistema per stampa tramite tecnica FDM [3] 13
Figura 5 - Variazioni delle caratteristiche del materiale in base alle diverse composizioni 14
Figura 6 - Sistema di riferimento per la produzione dei provini 19
Figura 7 - Andamento della dilatazione rispetto alla temperatura 20
Figura 8 - Misura del CTE per materiali termoplastici ottenuti tramite FDM 21
Figura 9 - Logo SolidWorks 23
Figura 10 - Interfaccia per esportare il file STL inserendo un'alta risoluzione 24
Figura 11 - Interfaccia per esportare nel formato STL con bassa risoluzione 24
Figura 12 - Parallelepipedo in formato STL con 36 triangoli 25
Figura 13 - Stampo con curvatura esportato in STL con 1420 triangoli 25
Figura 14-Interfaccia Inspire e visualizzazione di un modello dei tutorial a disposizione 26
Figura 15 - Flow chart di un progetto 29
Figura 16 - Design della trave iniziale (SX) e design della trave in seguito all'ottimizzazione dimensionale (DX) [9] 30
Figura 17 - Ottimizzazione di forma [9] 31
Figura 18 - Ottimizzazione di forma per : [10] 31
Figura 19 – Esempio di Topometry optimization [11] 32
Figura 20 - Esempio di topography optimization tramite software di Altair [12] 33
Figura 21 - Esempio di topography optimization tramite software di Altair [12] 33
Figura 22 - Esempio di ottimizzazione topologica [9] 34
Figura 23 - Rappresentazione grafica del problema di ott. topologica 35
Figura 24 - Definizione della microstruttura 39
Figura 25 - Loop per ottimizzazione topologica attraverso il metodo SIMP e MMA 40
Figura 26 – Esempio dell'effetto scacchiera su una trave (Sigmund and Peterson 1998) 42

Figura 27 – Dipendenza da differenti discretizzazioni della mesh: a) 2700 elementi b) 4800 elementi c) 17200 elementi 43
Figura 28 - Variazioni del layout in funzione del fattore di penalizzazione e del raggio di filtraggio [16] 44
Figura 29 - Baionetta 45
Figura 30 - Stampi baionetta 45
Figura 31 - Sezione dello stampo di riferimento 46
Figura 32 - Modello e dimensioni dello stampo 46
Figura 33 - Vista in sezione del modello 47
Figura 34 - Libreria dei materiali di Inspire 48
Figura 35 - Applicazione delle pressioni sulle facce interessate 49
Figura 36 - Applicazione delle differenti pressioni (in blu 3 atm e in rosso 1 atm) e del carico termico 50
Figura 37 - Supporti 51
Figura 38 - Controllo di simmetria con un piano di simmetria in z 51
Figura 39 - Impostazioni per analisi del modello completo in PLA 53
Figura 40 – Andamento del modulo dello spostamento per il modello completo in PLA 53
Figura 41 - Spostamento in direzione X per il modello completo in PLA 54
Figura 42 - Spostamento in direzione Y per il modello completo in PLA 55
Figura 43 - Spostamento in direzione Z per il modello completo in PLA 56
Figura 44 - Andamento del modulo dello spostamento del modello completo in Ultem 57
Figura 45 - Spostamento in modulo con applicazione del carico termico 58
Figura 46 - Deformazione principale del modello completo con applicazione del carico termico 59
Figura 47 - Esempio di Ottimizzazione con Reticolo 61
Figura 48 - Esempio di struttura ottimizzata tramite la funzione reticolo 62
Figura 49 - Grafica riassuntiva dei parametri sopra citati e obiettivo di massima rigidezza 63
Figura 50 - Grafica riassuntiva dei parametri sopra citati e obiettivo di minima massa 65
Figura 51 - Parametri fissati per le ottimizzazioni 66
Figura 52 - Modello ottimizzato con lunghezza obiettivo = 40 mm 69
Figura 53 - Spostamento del modello ottimizzato con L=10 mm 69

Figura 54 - Struttura del modello ottimizzato con L = 25mm....70
Figura 55 - Struttura del modello ottimizzato con L = 40mm....74
Figura 56 - Spostamento del modello ottimizzato in Ultem con L=40 mm....75
Figura 57 - Spostamento del modello ottimizzato in Ultem con L = 10mm....76
Figura 58 - Dimensione del reticolo nella struttura del modello ottimizzato in Ultem con L = 30 mm 78
Figura 59 - Struttura ottimizzata con L = 40mm e Reticolo = 70%....84
Figura 60 - Modello con raggio di curvatura di 45 mm....86
Figura 61 – Modello con raggio di curvatura di 145 mm....87
Figura 62 - Parametri di stampa per il PLA con riempimento definito dal software....91
Figura 63 - Modifica del parametro di stampa con la lunghezza obiettivo = 25 mm....91
Figura 64 - Riempimento con L = 25mm....92
Figura 65 - Riempimento con L = 30mm....93
Figura 66 - Riempimento standard 20% (L = 7.5 mm)....93

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Caratteristiche meccaniche PLA 17
Tabella 2 - Caratteristiche meccaniche Ultem 1010 18
Tabella 3 - Coeff. di dilatazione termica per alcuni tipi di fibre di carbonio (solo fibra) [7] 21
Tabella 4 - Coefficienti di dilatazione termica dell'Ultem per differenti orientazioni di stampa 21
Tabella 5 - Risultati analisi modello integro PLA 56
Tabella 6 - Risultati analisi modello integro Ultem 58
Tabella 7 - Risultati analisi modello integro Ultem con applicazione del carico termico 59
Tabella 8 - Risultati di spostamento e massa delle ottimizzazioni del modello in PLA 67
Tabella 9 - Tabella di confronto dei parametri delle ottimizzazioni in PLA 72
Tabella 10 - Risultati di spostamento e massa per le ottimizzazioni del modello in Ultem con solo pressioni 73
Tabella 11 - Tabella di confronto dei parametri delle ottimizzazioni in Ultem con solo pressioni 77
Tabella 12 - Risultati ottimizzazioni del modello in Ultem con applicazione del carico termico e delle pressioni 79
Tabella 13 - Risultati delle ottimizzazioni con percentuale di reticolo = 70 % 81
Tabella 14 - Tabella dei parametri delle ottimizzazioni in Ultem con pressioni e carico termico e Reticolo=70% 85
Tabella 15 - Lunghezze obiettivo ottimali per le 3 differenti casistiche 85
Tabella 16 - Riepilogo risultati della simulazione di stampa con i differenti riempimenti 92

Indice dei grafici

Grafico 1 - Sovrapposizione delle variazioni delle dimensioni all'aumentare della T per due tipologie di provini Flat e On Edge [3] 22
Grafico 2 - Andamento del tensore di elasticità rispetto alla densità del materiale 38
Grafico 3 - Grafico dello spostamento delle ottimizzazioni in PLA 68
Grafico 4 - Grafico delle masse delle ottimizzazioni in PLA 70
Grafico 5 - Sovrapposizione dello spostamento e della massa per individuare la condizione di ottimo 71
Grafico 6 - Grafico dello spostamento delle ottimizzazioni in Ultem 74
Grafico 7 - Grafico delle masse delle ottimizzazioni in Ultem con sole pressioni 76
Grafico 8 - Sovrapposizione dello spostamento e della massa per individuare la condizione di ottimo per l'Ultem con solo pressioni 77
Grafico 9 - Grafico della deformazione delle ottimizzazioni con 100% reticolo e carico termico 80
Grafico 10 - Andamento delle masse nelle diverse ottimizzazioni 80
Grafico 11 - Andamento deformazione per le ottimizzazioni con reticolo 70% 82
Grafico 12 - Confronto tra le deformazioni con reticolo 100% e 70% 82
Grafico 13 - Andamento della massa nelle ottimizzazioni con Reticolo=70% 83
Grafico 14 - Sovrapposizione dei grafici di deformazione e massa 84
Grafico 15 - Confronto tra gli spostamenti per i diversi raggi di curvatura dello stampo 88

Ringraziamenti

In primis vorrei ringraziare il professor Cestino, per la sua grande disponibilità e i suoi consigli in qualità di relatore e ancor prima di referente del team S55.
Vorrei poi ringraziare il team S55 e tutti i suoi membri, che mi ha dato la possibilità di partecipare ad eventi internazionali e di poter accrescere la mia conoscenza ed esperienza facendomi inoltre ad appassionare alla tecnologia di stampa 3D.

Vorrei poi ringraziare la mia famiglia.
I miei genitori che mi hanno sempre sostenuto e supportato, anche nei momenti più difficili, quando qualche esame (e sappiamo di cosa sto parlando) mi ha creato non pochi problemi.
Che han saputo stare sempre dalla mia parte senza giudicarmi.
Mia sorella, la mia persona, così diverse ma così uguali, per avermi ascoltato durante i miei scleri e avermi dato i consigli e detto le parole che dovevo sentire per andare avanti. Per essere stata un'ancora e uno sfogo in quei mesi duri di lockdown.

Il mio ragazzo per aver sempre creduto in me, per essermi stato sempre vicino e aver sopportato le mie paranoie per gli esami, le mie paure di fallimento e le mie fasi un po' lunatiche. Perché mi ha dimostrato che anche provando tante e tante volte, alla fine si arriva al traguardo.

Le amiche di una vita Silvia, Cecilia e Beatrice con cui abbiamo iniziato a condividere tutto sui banchi del liceo, siamo cresciute e maturate insieme; sempre presenti nei giorni e nei momenti più importanti.

Gli amici "EASIANI" del Poli Alessio, Martina e Cristian con cui ho condiviso le gioie e i dolori dell'università. Con cui ho trascorso le giornate a studiare, i pranzi al volo, le compere alla Decathlon, i caffè pre e post esame, i ritiri immediati appena lette le domande (perché ammettiamolo ci sono anche quelli).
E poi un ringraziamento particolare al mio traduttore e revisionatore di fiducia, lui sa di esserlo.

Grazie alla mia squadra del cuore, al mister, alle mie compagne e amiche con cui condivido una grande passione e che, pur conoscendoci da poco, soprattutto nell'ultimo periodo, un po' stressato e ansiogeno, mi hanno saputo tirare su di morale e aiutato a liberare la testa.

Infine, ma non per importanza, vorrei ringraziare chi oggi non è qui, ma che so per certo che avrebbe voluto esserci, chi per me è stata una guida fin da quando avevo tre mesi e che ha sempre creduto in me. Chi che, anche se molto lontana è sempre stata presente, che ha sempre seguito il mio percorso universitario con interesse e gioia. Chi mi ha insegnato la professionalità e la grandissima dedizione al lavoro anche dopo tanti anni.

Grazie a tutti, vi voglio bene e ora si festeggia perché questa sarà anche l'ultima laurea che prenderò.