



**Politecnico  
di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in  
Ingegneria Meccanica  
A.A. 2024/2025

**Strategie di ottimizzazione topologica  
di strutture lattice da produrre  
mediante Fabbricazione Additiva**

**Relatore:**

Prof. Andrea Tridello

**Corelatori:**

Prof. Davide Salvatore Paolino

Prof. Carlo Boursier Niutta

Prof. Alberto Ciampaglia

**Candidato:**

Nicola Cardone

Luglio 2025

## Abstract

Le tecnologie di fabbricazione additiva garantiscono al progettista un nuovo e più ampio spazio di progettazione rispetto alle tecniche tradizionali, consentendo la realizzazione di forme complesse. L'ottimizzazione topologica trova una sua interessante applicazione nelle strutture lattice, che consentono di alleggerire i componenti senza compromettere le prestazioni strutturali sotto una determinata condizione di carico. Le strutture lattice periodiche sono accompagnate da un'intrinseca anisotropia, che può limitare il raggiungimento della massima efficienza nella distribuzione del materiale costituente la struttura. Questo lavoro di tesi propone strategie di ottimizzazione topologica lattice che sfruttino l'anisotropia della cella per ottenere un vantaggio strutturale. Tale vantaggio è quantificato in termini di riduzione della massa e aumento della rigidità del componente ottimizzato, e in termini di distribuzione delle tensioni negli elementi della struttura. L'obiettivo è raggiunto effettuando modifiche alla forma e alla disposizione delle celle all'interno dello spazio di design dei componenti. I componenti vengono ottimizzati con due diverse strutture lattice costituite dalla stessa tipologia di cella elementare, ma che differiscono per l'orientazione delle celle. Nella prima ottimizzazione l'orientazione delle celle è coerente con la geometria del componente, nella seconda ottimizzazione essa è coerente con la direzione delle tensioni principali. I risultati ottenuti mediante strumenti di analisi FEA vengono validati con prove sperimentali, eseguite su provini realizzati in PLA mediante Fused Deposition Melting.

# Sommario

1. Fabbricazione Additiva, Strutture Lattice e Strategie di Ottimizzazione Topologica: Concetti Fondamentali e Contesto	
1.1. Introduzione all'Additive Manufacturing .....	15
1.2. Strutture lattice .....	16
1.3. Ottimizzazione topologica lattice (LSTO) .....	20
1.4. Anisotropia delle celle lattice.....	21
1.5. Strategie di ottimizzazione topologica.....	24
1.5.1. La teoria delle strutture di Michell.....	24
1.5.2. La teoria delle Linee di Tensione Principale (PSL) .....	27
1.5.3. Correlazione tra le Teorie di Michell e PSL.....	28
1.5.4. Correlazione con le Strutture Lattice per Additive Manufacturing .....	29
1.5.5. Fabbricazione Additiva per la biomimetica .....	32
1.6. Obiettivo del presente lavoro di tesi.....	34
2. Metodologia adottata	
2.1. Generazione di una mesh standard.....	36
2.2. Ottimizzazione lattice con mesh standard .....	37
2.2.1. Condizioni al contorno.....	37
2.2.2. Tipologia di cella.....	37
Caratterizzazione di una cella BCCxyz .....	38
2.2.3. Limiti di densità .....	44
2.2.4. Obiettivo e vincolo .....	45
2.3. Analisi delle tensioni principali .....	45
2.4. Generazione di una mesh orientata .....	46
2.5. Ottimizzazione con mesh orientata.....	46
2.6. Confronto dei risultati .....	46
3. Applicazione ad una trave caricata in mezzzeria	
3.1. Introduzione al componente e al processo di ottimizzazione.....	47

Analisi del componente originale.....	47
Processo di ottimizzazione .....	49
Scelta dei vincoli di ottimizzazione .....	50
3.2. Preparazione del modello .....	51
3.2.1. Ottimizzazione solida .....	51
3.2.2. Ricostruzione del design space.....	52
3.3. Applicazione della metodologia di ottimizzazione .....	52
3.3.1. Generazione della mesh standard .....	52
Imposizione delle BC .....	53
3.3.2. Ottimizzazione con mesh standard.....	53
Tipologia di cella .....	53
Limiti di densità.....	54
Obiettivo e vincoli.....	54
Risultati di ottimizzazione .....	55
Analisi FEM dei risultati di ottimizzazione.....	56
3.3.3. Analisi delle tensioni principali.....	59
3.3.4. Generazione di una mesh orientata.....	59
3.3.5. Ottimizzazione con mesh orientata .....	60
Imposizione delle BC .....	60
Impostazione dei parametri di ottimizzazione.....	61
Risultati di ottimizzazione .....	61
Analisi FEM dei risultati di ottimizzazione.....	64
3.3.6. Confronto dei risultati.....	66
4. Applicazione ad un profilo alare Eppler 420	
4.1. Introduzione al componente e al processo di ottimizzazione.....	68
Processo di ottimizzazione .....	69
4.2. Scelta del materiale e dei parametri della mesh e di ottimizzazione .....	69
Materiali.....	70

4.2.1.	Produzione di provini di celle lattice .....	71
4.2.2.	Risultati di analisi dei provini .....	73
4.3.	Applicazione della metodologia di ottimizzazione .....	74
4.3.1.	Generazione della mesh standard e analisi del componente originale..	75
4.3.2.	Ottimizzazione con mesh standard.....	76
	Impostazione dei parametri di ottimizzazione.....	76
	Scelta dei vincoli di ottimizzazione .....	77
	Risultati di ottimizzazione .....	77
	Analisi FEM dei risultati di ottimizzazione.....	79
4.3.3.	Analisi delle tensioni principali.....	81
4.3.4.	Generazione della mesh orientata.....	82
4.3.5.	Ottimizzazione con mesh orientata .....	84
	Imposizione delle BC .....	84
	Impostazione dei parametri di ottimizzazione.....	85
	Risultati di ottimizzazione .....	85
	Analisi FEM dei risultati di ottimizzazione.....	87
4.3.6.	Confronto dei risultati .....	89
4.4.	Criticità di produzione.....	91
5.	Test meccanici sul profilo alare Eppler 420	
5.1.	Preparazione alla fabbricazione .....	92
5.2.	Adattamento della geometria alla stampa.....	92
5.3.	Scelta dei parametri delle strutture lattice .....	93
5.4.	Generazione delle geometrie ottimizzate.....	95
5.4.1.	Struttura Lattice Standard.....	95
5.4.2.	Struttura Lattice Orientata .....	96
5.5.	Analisi dei componenti ottimizzati.....	98
5.5.1.	Confronto dei risultati delle simulazioni .....	101
5.6.	Set up di prova .....	101

5.6.1.	Progettazione dei componenti di interfaccia.....	103
5.7.	Risultati.....	105
	Risultati principali.....	109
	Validazione Sperimentale e Limitazioni.....	110
	Sviluppi Futuri.....	110

## Indice delle figure

Figura 1 - Confronto tra le tecniche di fabbricazione tradizionali (A) e le tecniche di fabbricazione additiva (B)[3]. .....	15
Figura 2 - Strutture lattice strut-based: (A) BCC; (B) BCCz; (C) FCC; (D) FCCz; (E) simple cubic; (F) octet-truss; (G) diamond [9].....	17
Figura 3 - Celle TPMS: (a) gyroid; (b) primitive; (c) diamond; (d) IWP; (e) lidinoid; (f) neovius; (g) octo; (h) split P [5].....	18
Figura 4 - Classificazione delle strutture lattice in base alla distribuzione spaziale: omogenee periodiche (a) ed eterogenee adattative (b). .....	19
Figura 5 - Mappa di densità di un componente sottoposto ad ottimizzazione topologica lattice.....	21
Figura 6 - Legge di Hook in forma matriciale per: (a) materiale anisotropo, con 21 coefficienti indipendenti della matrice di rigidità; (b) materiale ortotropo, con 9 coefficienti indipendenti della matrice di rigidità; (c) materiale isotropo, con 3 coefficienti della matrice di rigidità [15].....	22
Figura 7 - Confronto tra due celle di pari dimensione e raggio degli elementi, ma di densità relative diverse a causa del diverso numero di elementi reticolari: (a) octet-truss; (b) BCCxyz.....	23
Figura 8 - Celle di ugual numero di elementi reticolari e di pari interasse tra loro ( $i = 7$ mm), ma di raggio diverso: (a) $r = 0,2$ mm; (b) $r = 1,2$ mm.....	23
Figura 9 - La cella BCCxyz. ....	24
Figura 10 - Esempi della teoria di Michell: trave caricata in punta (a) e trave caricata in mezzzeria (b)[16].....	25
Figura 11 - Processo di ottimizzazione di Michell: trave caricata in punta[16].....	26
Figura 12 - Processo di ottimizzazione di Michell: trave caricata in mezzzeria[16]. ...	26
Figura 13 - Linee di tensione principali (PSL) in presenza di diverse condizioni al contorno (BC) [16].....	27
Figura 14 - Confronto tra i metodi di ottimizzazione strutturale: (a) trave caricata in punta; (b) reticolo di Michell; (c) ottimizzazione topologica; (d) PSL [2]. .....	28
Figura 15 - Struttura ossea [18]. .....	29
Figura 16 - Distribuzione di tensioni e spostamenti in una trave caricata in punta: (a) distribuzione delle tensioni in una struttura lattice basata sulle PSL (sinistra) e in una LS periodica (destra); (b) spostamenti in una struttura lattice basata sulle PSL (sinistra) e in una LS periodica (destra)[2]. .....	30

Figura 17 - Volte gotiche e ramificazioni di alberi, morfologicamente simili alle ottimizzazioni di Michell [17].....	32
Figura 18 - Trave caricata in mezzeria .....	35
Figura 19 - Profilo alare Eppler 420 .....	35
Figura 20 - Metodologia adottata.....	36
Figura 21 - Confronto tra ottimizzazione lattice e ottimizzazione topologica [20]....	36
Figura 22 - Celle disponibili per l'ottimizzazione lattice in HyperWorks Desktop 2022 [20].....	38
Figura 23 - Cella BCCxyz, piani XY e XZ. ....	38
Figura 24 - Caratterizzazione di una cella BCCxyz, variazione dell'angolo $\vartheta$ nel piano XZ: compressione (in rosso), trazione (in verde).....	39
Figura 25 - Caratterizzazione di una cella BCCxyz, variazione dell'angolo $\varphi$ nel piano XY.....	40
Figura 26 - Caratterizzazione di una cella BCCxyz, tensione di von Mises massima nei Loadcases.....	43
Figura 27 - Caratterizzazione di una cella BCCxyz, spostamento massimo nei Loadcases.....	44
Figura 28 - Trave caricata in mezzeria (TCM) .....	47
Figura 29 - Trave caricata in mezzeria (TCM).....	48
Figura 30 - TCM, spostamenti.....	48
Figura 31 - TCM, tensioni di von Mises.....	49
Figura 32 - Applicazione della metodologia di ottimizzazione alla TCM.....	50
Figura 33 - TCM, preparazione del modello .....	50
Figura 34 - TCM, risultato di ottimizzazione solida.....	51
Figura 35 - TCM, risultato di ottimizzazione solida ricostruita tramite PolyNURBS..	52
Figura 36 - TCM, ricostruzione del design space.....	52
Figura 37 - TCM, MS, applicazione delle BC.....	53
Figura 38 - Cella BCCxyz. ....	54
Figura 39 - TCM, ottimizzazione lattice con MS, mappa di densità. ....	55
Figura 40 - TCM, ottimizzazione lattice con MS, risultato di ottimizzazione.....	56
Figura 41 - TCM, ottimizzazione lattice con MS, spostamento. ....	57
Figura 42 - TCM, ottimizzazione lattice con MS, tensioni di von Mises. ....	57
Figura 43 - TCM, ottimizzazione lattice con MS, distribuzione delle tensioni negli elementi reticolari.....	58

Figura 44 - TCM, ottimizzazione lattice con MS, distribuzione delle tensioni negli elementi reticolari, dettaglio.....	58
Figura 45 - TCM, analisi delle tensioni principali.....	59
Figura 46 - TCM, generazione della MO.....	60
Figura 47 - TCM, MO, applicazione delle BC.....	61
Figura 48 - TCM, MO, tensioni principali massima e minima.....	62
Figura 49 - TCM, MS e MO, confronto delle tensioni principali massima e minima. ..	62
Figura 50 - TCM, ottimizzazione lattice con MO, mappa di densità.....	63
Figura 51 - TCM, ottimizzazione lattice con MO, risultato di ottimizzazione. ....	63
Figura 52 - TCM, ottimizzazione lattice con MO, spostamenti.....	64
Figura 53 - TCM, ottimizzazione lattice con MO, tensioni di von Mises negli elementi reticolari.....	64
Figura 54 - TCM, ottimizzazione lattice con MO, distribuzione delle tensioni di von Mises negli elementi reticolari.....	65
Figura 55 - TCM, ottimizzazione lattice con MO, distribuzione delle tensioni negli elementi reticolari, dettaglio.....	66
Figura 56 - TCM, confronto della distribuzione delle tensioni dei risultati di ottimizzazione con MS e MO .....	67
Figura 57 - Profilo alare Eppler 420 (E420), componenti e BC.....	68
Figura 58 - Applicazione della metodologia di ottimizzazione al componente E420. ....	69
Figura 59 - Difettosità dei provini in PA6-CF.....	73
Figura 60 - Provini in PLA-Basic.....	73
Figura 61 - Provini in PLA-Basic, dettaglio delle celle con difettosità.....	74
Figura 62 - E420, applicazione della metodologia di ottimizzazione sviluppata.....	74
Figura 63 - E420, MS, applicazione delle BC.....	75
Figura 64 - E420, analisi del componente originale, spostamenti. ....	76
Figura 65 - E420, analisi del componente originale, tensioni di von Mises. ....	76
Figura 66 - E420, ottimizzazione con MS, mappa di densità.....	78
Figura 67 - E420, ottimizzazione con MS, risultati.....	78
Figura 68 - E420, ottimizzazione con MS, risultati di ottimizzazione, dettaglio della struttura lattice.....	79
Figura 69 - E420, ottimizzazione con MS, spostamenti.....	80
Figura 70 - E420, ottimizzazione con MS, tensioni di von Mises negli elementi reticolari.....	80

Figura 71 - E420, ottimizzazione con MS, distribuzione delle tensioni di von Mises negli elementi reticolari.....	81
Figura 72 - E420, MS, analisi delle tensioni principali massima e minima.....	82
Figura 73 - E420, generazione della mesh orientata.....	83
Figura 74 - E420, MO, analisi delle tensioni principali massima e minima.....	84
Figura 75 - E420, confronto dell'analisi delle tensioni principali massima e minima nei componenti meshati con MS e MO.....	84
Figura 76 - E420, MO, applicazione delle BC.....	85
Figura 77 - E420, ottimizzazione con MO, mappa di densità.....	86
Figura 78 - E420, ottimizzazione con MO, risultati di ottimizzazione.....	86
Figura 79 - E420, ottimizzazione con MO, risultati di ottimizzazione, dettaglio.....	87
Figura 80 - E420, ottimizzazione con MO, spostamenti.....	88
Figura 81 - E420, ottimizzazione con MO, tensioni di von Mises negli elementi reticolari.....	88
Figura 82 - E420, ottimizzazione con MO, distribuzione delle tensioni di von Mises negli elementi reticolari.....	89
Figura 83 - E420, confronto delle distribuzioni delle tensioni di von Mises negli elementi reticolari delle ottimizzazioni con MS e MO.....	90
Figura 84 - E420, componenti e applicazione delle BC.....	92
Figura 85 - E420, Outer body e Inner body in nTop.....	93
Figura 86 - Cella elementare BCCxyz.....	94
Figura 87 - Cella elementare Simple Cubic (a sinistra) e Cella elementare BCC (a destra).....	94
Figura 88 - E420, nTop, generazione della struttura LS.....	96
Figura 89 - E420, generazione di una Cell Map cilindrica per il componente.....	97
Figura 90 - E420, nTop, sovrapposizione della Cell Map cilindrica con l'analisi delle tensioni principali del componente con MS.....	97
Figura 91 - E420, nTop, generazione della struttura LO.....	98
Figura 92 - E420, nTop, applicazione delle BC ai componenti con struttura LS (a) e con struttura LO (b).....	99
Figura 93 - E420, nTop, componente con struttura LS, spostamenti.....	99
Figura 94 - E420, nTop, componente con struttura LS, tensioni di von Mises.....	100
Figura 96 - E420, nTop, componente con struttura LO, spostamenti.....	100
Figura 97 - E420, nTop, componente con struttura LO, tensioni di von Mises.....	101
Figura 98 - MTS EM Flexure Criterion [32].	101

Figura 99 - Dispositivi di afferraggio.....	102
Figura 100 - Realizzazione dei componenti oggetto di test: (a) componente con struttura LS;(b) componente con struttura LO.....	103
Figura 101 - Componenti di interfaccia: (a) applicazione del carico; (b) applicazione dei vincoli.....	103
Figura 102 - Componenti di interfaccia, dettaglio della struttura interna.....	104
Figura 103 - Set-up di prova: (a) componente con struttura LS; (b) componente con struttura LO.....	105
Figura 104 - Diagramma Carico-Spostamento dei due componenti testati.....	105
Figura 105 - Diagramma Carico-Spostamento, dettaglio tratto lineare.....	106

## Indice delle tabelle

Tabella 1 - Proprietà meccaniche di un acciaio generico.....	39
Tabella 2 - Caratterizzazione di una cella BCCxyz, numerazione dei Loadcases in funzione dei valori degli angoli $\vartheta$ e $\varphi$ .....	40
Tabella 3 - Caratterizzazione di una cella BCCxyz, componenti normalizzate della forza in funzione dei valori degli angoli $\vartheta$ e $\varphi$ .....	41
Tabella 4 - Caratterizzazione di una cella BCCxyz, risultati di analisi nei diversi Loadcases.....	42
Tabella 5 - Proprietà meccaniche dell'acciaio AISI 4340.....	47
Tabella 6 - TCM, ottimizzazione con MS, parametri di ottimizzazione.....	55
Tabella 7 - TCM, MO, parametri di ottimizzazione lattice.....	61
Tabella 8 - TCM, confronto dei risultati di ottimizzazione con MS e MO.....	66
Tabella 9 - Proprietà meccaniche di interesse dei materiali PA6-CF e PLA [30], [31]. .....	70
Tabella 10 - Matrice dei provini, rapporto R/L.....	71
Tabella 11 - Matrice dei provini, frazione di volume.....	72
Tabella 12 - Matrice dei provini, frazione di volume degli elementi di interesse.....	72
Tabella 13 - E420, MS, parametri di ottimizzazione.....	77
Tabella 14 - E420, MO, parametri di ottimizzazione.....	85
Tabella 15 - E420, confronto dei risultati delle ottimizzazioni con MS e MO.....	89
Tabella 16 - E420, massa attesa dei componenti ottimizzati.....	95
Tabella 17- Limiti del tratto elastico del diagramma Carico-Spostamento per i componenti con struttura LS e struttura LO.....	106
Tabella 18 - Rigidezza flessionale dei componenti sottoposti a test.....	107

# Introduzione

Il presente lavoro di tesi si propone di esplorare e dimostrare il vantaggio strutturale ottenibile attraverso strategie innovative di ottimizzazione topologica lattice (LSTO), che sfruttano l'anisotropia intrinseca delle celle lattice per migliorare le prestazioni dei componenti in termini di riduzione della massa, aumento della rigidità e ottimizzazione della distribuzione delle tensioni.

La fabbricazione additiva (AM), comunemente nota come stampa 3D, ha rivoluzionato il panorama della produzione, superando i limiti delle tecniche tradizionali consentendo la realizzazione di geometrie estremamente complesse e intricate che sarebbero altrimenti impossibili da ottenere. Questa tecnologia ha aperto la strada alla progettazione di strutture lattice, che sono architetture porose altamente ingegnerizzate, caratterizzate dalla disposizione spaziale di unità ripetitive o reti complesse di elementi interconnessi. Le strutture lattice offrono significativi vantaggi, tra cui leggerezza, elevata resistenza specifica e rigidità specifica, notevole capacità di assorbimento dell'energia ed efficienza nella dissipazione del calore.

Tuttavia, le strutture lattice periodiche convenzionali presentano un'intrinseca anisotropia, ovvero una variazione della risposta meccanica in base alla direzione di applicazione del carico, che può limitare il raggiungimento della massima efficienza nella distribuzione del materiale. L'anisotropia è particolarmente marcata in celle caratterizzate da bassi valori di densità relativa, come la cella BCCxyz utilizzata in questo studio, che esibisce una spiccata ortotropia.

Per superare queste limitazioni, il lavoro si concentra sull'ottimizzazione topologica lattice (LSTO), un metodo che mira a individuare la distribuzione ottimale del materiale all'interno di un dominio di progettazione per massimizzare le prestazioni strutturali. L'LSTO consente la progettazione di strutture ibride solido-lattice-vuoto, che hanno dimostrato di superare le prestazioni delle sole strutture lattice o solide.

Le basi teoriche di questa ottimizzazione affondano le radici nella teoria delle strutture di Michell e nelle Linee di Tensione Principale (PSL). La teoria di Michell, proposta nel 1904, si concentra sulla ricerca di strutture che possiedano la massima rigidità per un dato volume di materiale, stabilendo che ogni elemento dovrebbe essere soggetto alla stessa tensione o compressione. Le PSL, d'altra parte, forniscono

una visualizzazione chiara del percorso di trasferimento del carico, con le loro direzioni che coincidono con quelle di minima tensione di taglio. Esiste una correlazione intrinseca tra le strutture di Michell e le PSL: le soluzioni ottimali di Michell implicano che gli elementi di una struttura reticolare siano posizionati lungo le direzioni delle tensioni principali, garantendo un'efficiente distribuzione dello stress.

L'integrazione di queste teorie con la fabbricazione additiva è fondamentale. In analogia con le strutture di Michell, i membri di una struttura lattice ottimale dovrebbero essere disposti lungo le PSL, permettendo al materiale di essere utilizzato nel modo più razionale per soddisfare le proprietà meccaniche desiderate con il minimo materiale e il peso più leggero. Questo approccio consente di progettare strutture lattice eterogenee e conformi che sfruttano appieno le capacità dell'AM per creare componenti leggeri, resistenti e rigidi, tenendo conto dell'anisotropia dei materiali e dei vincoli di fabbricazione.

L'obiettivo specifico di questo lavoro di tesi è dimostrare l'efficacia delle PSL come guida per la disposizione delle celle lattice, sfruttando l'ortotropia della cella BCCxyz come una risorsa strutturale. Questo viene raggiunto attraverso due diverse strategie di ottimizzazione lattice:

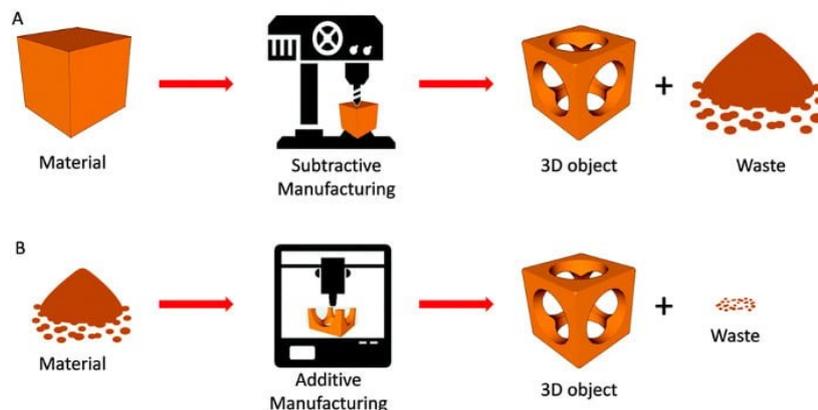
- Una prima ottimizzazione con orientazione delle celle coerente con la geometria del componente (mesh standard, MS).
- Una seconda ottimizzazione con la stessa tipologia di cella, ma con orientazione il più possibile coerente con le direzioni delle tensioni principali (mesh orientata, MO), elaborate tramite analisi agli elementi finiti (FEA) del componente originale.

La metodologia è applicata a due casi studio: una generica trave caricata in mezzzeria (TCM) e un profilo alare Eppler 420 (E420). Sebbene alcune limitazioni abbiano impedito la validazione sperimentale diretta dei componenti ottimizzati da HyperWorks, sono stati condotti test meccanici su provini realizzati in PLA tramite Fused Deposition Melting (FDM) in nTopology per dimostrare l'efficacia delle PSL nella creazione di strutture lattice rigide. Questo approccio dimostra un passo avanti cruciale nell'ottimizzazione delle prestazioni strutturali nell'ingegneria moderna.

# 1. Fabbricazione Additiva, Strutture Lattice e Strategie di Ottimizzazione Topologica: Concetti Fondamentali e Contesto

## 1.1. Introduzione all'Additive Manufacturing

La Fabbricazione Additiva (Additive Manufacturing, AM), comunemente nota come stampa 3D, rappresenta un'innovazione trasformativa nel panorama tecnologico, rivoluzionando i metodi di produzione tradizionali [1]. A differenza dei processi sottrattivi convenzionali, che rimuovono materiale da un blocco per creare un oggetto, l'AM costruisce componenti strato per strato a partire da un modello digitale tridimensionale. Questo processo può essere immaginato come una crescita del materiale nello spazio tridimensionale, dal "punto" alla "linea", poi alla "superficie" e infine al "corpo" [2]. Questo approccio garantisce una flessibilità di progettazione senza precedenti e ampie possibilità di personalizzazione, con un notevole risparmio di materiale e riduzione dei costi e dei tempi di produzione (Figura 1).



*Figura 1 - Confronto tra le tecniche di fabbricazione tradizionali (A) e le tecniche di fabbricazione additiva (B)[3].*

I vantaggi dell'AM includono la capacità di realizzare geometrie estremamente complesse e intricate, che sarebbero difficili o impossibili da ottenere con le tecniche

manifatturiere tradizionali [4]. Di conseguenza, la tecnologia ha trovato ampia applicazione in settori come l'ingegneria aerospaziale, automotive e biomedica, dove la creazione di strutture leggere, componenti personalizzati e geometrie interne complesse è di fondamentale importanza [5].

Esistono diverse tecniche di fabbricazione additiva, classificate in base al tipo di materiale e alla fonte di energia utilizzata[5]. Alcuni dei processi più comuni impiegati per la fabbricazione di strutture lattice includono:

- FDM (Fused Deposition Modeling): Estrude filamenti di materiale fuso che si solidificano strato per strato.
- DED (Directed Energy Deposition): Fonde e deposita materiali (spesso metalli o ceramiche) usando un laser o un fascio elettronico.
- BJ (Binder Jetting): Spruzza un legante liquido su un letto di polvere (metallo, ceramica, polimero) per unire le particelle.
- PBF (Powder Bed Fusion): Include il Selective Laser Melting (SLM) e l'Electron Beam Melting (EBM), che fondono selettivamente polveri in un letto con un laser o un fascio elettronico.
- Fotopolimerizzazione in vasca: Comprende SLA (Stereolithography), DLP (Digital Light Processing), MSLA, 2PL e CLIP, che utilizzano luce UV per polimerizzare una resina liquida. Il processo DLP, in particolare, è apprezzato per l'elevata velocità e precisione, polimerizzando interi strati contemporaneamente [1].

Nonostante i numerosi vantaggi, la produzione additiva presenta anche delle sfide, diverse a seconda dei materiali utilizzati, come la potenziale formazione di difetti (es. rugosità superficiale, porosità elevata, tensioni residue) e la necessità di strutture di supporto per geometrie complesse o sporgenti[4]. Tuttavia, la ricerca è attiva nell'ottimizzazione dei parametri di processo e nell'implementazione di post-trattamenti per mitigare tali problematiche.

## 1.2. Strutture lattice

Le strutture lattice sono strutture porose altamente ingegnerizzate, caratterizzate dall'organizzazione spaziale di unità ripetitive o da reti complesse costituite da una serie di elementi interconnessi come puntoni, pannelli o unità con caratteristiche

superficiali [6]. Possono essere definite come strutture a traliccio di dimensioni mesoscopiche (0,1-10 mm) o microscopiche (sotto 0,1 mm), composte da puntoni e nodi interconnessi disposti periodicamente nello spazio tridimensionale [7]. Le loro proprietà intrinseche includono leggerezza, elevata resistenza specifica e rigidità specifica, notevole capacità di assorbimento dell'energia, efficienza nella dissipazione del calore, soppressione del rumore, potenziale di esibire un coefficiente di Poisson negativo e un coefficiente di espansione termica negativo [8].

Le strutture lattice possono essere classificate in base alla tipologia di elemento costituente:

- Strutture lattice reticolari (strut-based): Sono composte da elementi lineari a forma di trave, o puntoni. Esempi comuni includono strutture cubiche, cubiche a corpo centrato (BCC), cubiche a facce centrate (FCC), ottaedro, romboedro, BCCZ (Body-Centered Cubic with Z-struts), FCCZ (Face-Centered Cubic with Z-struts), octet-truss e diamante (Figura 2). Le proprietà di queste strutture dipendono direttamente dalla forma e dalla disposizione della cella unitaria [5].

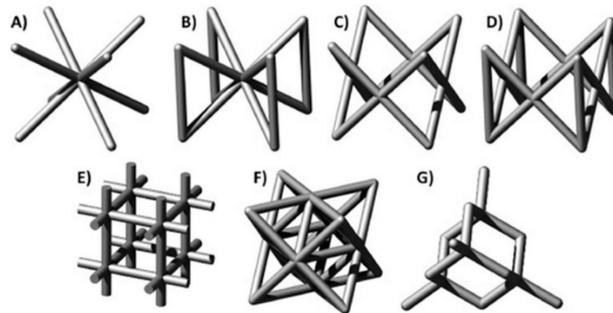
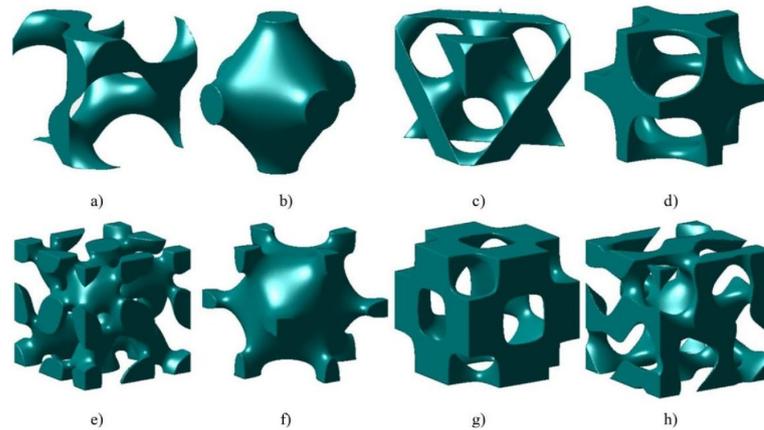


Figura 2 - Strutture lattice strut-based: (A) BCC; (B) BCCz; (C) FCC; (D) FCCz; (E) simple cubic; (F) octet-truss; (G) diamond [9].

- Strutture a superficie minima tripla periodica (TPMS - Triply Periodic Minimal Surfaces): Si basano su superfici implicite definite da equazioni matematiche, caratterizzate dal mantenimento di una curvatura media pari a zero in ogni punto. Si distinguono in due fasi: TPMS-Network (ottenute sezionando un dominio con una superficie minima) e TPMS-Sheet (ottenute risolvendo la regione tra due superfici minime). Esempi includono le geometrie giroidi, primitive, diamante, IWP, lidinoide, neovius e octo (Figura 3). In generale, le strutture TPMS-Sheet tendono a mostrare una minore anisotropia rispetto alle strutture a traliccio [10].



*Figura 3 - Celle TPMS: (a) gyroid; (b) primitive; (c) diamond; (d) IWP; (e) lidinoid; (f) neovius; (g) octo; (h) split P [5].*

In base alla distribuzione spaziale, le strutture lattice possono essere ulteriormente classificate:

- Omogenee periodiche (homogeneous periodic lattices): Sono costituite da celle unitarie di forma e dimensione identica, distribuite periodicamente nello spazio di progettazione. A scala macroscopica, possono essere considerate come materiali omogenei [4].
- Eterogenee adattive (conformal lattices): La forma e le dimensioni delle celle possono variare da punto a punto per creare un gradiente funzionale nelle proprietà. Questo consente di adattare le strutture alla geometria del componente, o alle condizioni di carico locali, ad esempio variando lo spessore dei puntoni, il tipo di unità, la composizione del materiale o la dimensione della cella. Le strutture adattive spesso esibiscono comportamenti di deformazione differenti e proprietà meccaniche superiori rispetto a quelle uniformi [5]. Figura 4 illustra le differenze geometriche tra le strutture omogenee periodiche e le strutture eterogenee adattive.

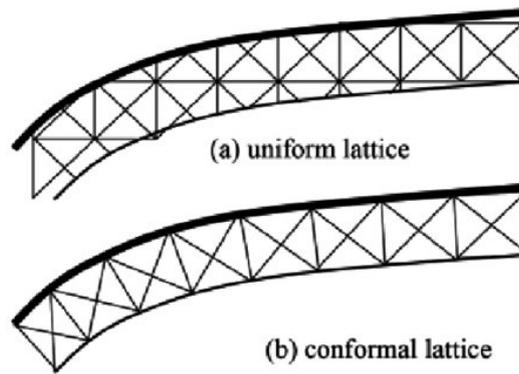


Figura 4 - Classificazione delle strutture lattice in base alla distribuzione spaziale: omogenee periodiche (a) ed eterogenee adattative (b).

La fabbricazione di strutture lattice con geometrie complesse è resa possibile principalmente dalla produzione additiva, che supera le limitazioni dei metodi di produzione tradizionali come la fusione, la formatura di lamiera o l'assemblaggio di fili. Tuttavia, i processi AM sono sensibili ai parametri operativi, che possono influenzare la qualità del prodotto finale, generando difetti come porosità e rugosità superficiale [4].

Il comportamento meccanico delle strutture lattice dipende da numerosi fattori, tra cui la dimensione e la geometria della cella, le proprietà del materiale costituente, la periodicità, l'interconnessione tra le celle, la forma e la sezione dei puntoni, la porosità e la densità relativa. Le curve sforzo-deformazione ideali sotto compressione rivelano due tipi principali di comportamento: "bending-dominated" (dominato dalla flessione) e "stretch-dominated" (dominato dalla trazione/compressione). Le strutture stretch-dominated mostrano un'efficienza strutturale superiore, con moduli elastici e tensioni di snervamento maggiori, poiché i loro elementi sono principalmente soggetti a trazione e compressione piuttosto che a flessione. Il criterio di stabilità di Maxwell aiuta a comprendere questi comportamenti [11].

Un aspetto cruciale nella previsione delle prestazioni delle strutture lattice è la gestione dei difetti. I processi di produzione additiva, in particolare SLM, possono introdurre numerose irregolarità e vuoti di dimensioni variabili. Questi difetti hanno un impatto significativo sulle proprietà meccaniche, causando intensificazioni di tensione e alterando il comportamento statico e dinamico della struttura, influenzando ad esempio l'energia assorbita e i diagrammi forza-spostamento. La modellazione numerica accurata deve quindi considerare l'effetto di tali difetti, anche se la loro disposizione è casuale [12].

### 1.3. Ottimizzazione topologica lattice (LSTO)

L'ottimizzazione topologica è un metodo di progettazione strutturale generativa che mira a individuare la distribuzione ottimale del materiale all'interno di un dominio di progettazione prestabilito, con l'obiettivo di massimizzare le prestazioni fisiche strutturali. Questo approccio consente di ottimizzare la disposizione del materiale rispettando vincoli specifici, portando a significative riduzioni di peso e miglioramenti delle prestazioni. Ampiamente impiegata in settori come l'ingegneria aerospaziale e meccanica, l'ottimizzazione topologica non si limita alla distribuzione del materiale a livello macroscopico, ma supporta anche la progettazione a due scale, ottimizzando contemporaneamente parti macroscopiche e unità di materiale rappresentative a micro o mesoscala [13].

Nel contesto delle strutture lattice, questo approccio, denominato ottimizzazione topologica della struttura lattice (Lattice Structure Topology Optimization, LSTO), espande notevolmente lo spazio di progettazione.

L'LSTO è ampiamente impiegata in settori come l'ingegneria aerospaziale e meccanica, contribuendo in modo significativo alla riduzione del peso e al miglioramento delle prestazioni strutturali dei componenti. L'avanzamento delle tecnologie di produzione additiva (AM) ha facilitato la fabbricazione di queste complesse strutture ottimizzate topologicamente, che altrimenti sarebbero difficili da realizzare con metodi convenzionali [5].

L'ottimizzazione topologica lattice, inoltre, consente di ottimizzare un componente seguendone la mappa di densità con maggiore rigore rispetto all'ottimizzazione topologica solida. Ciò consente di ottenere una struttura che rispecchia maggiormente le esigenze strutturali del componente sotto una certa condizione di carico, ottimizzandone le prestazioni strutturali, quali minimizzazione della compliance e massimizzazione della rigidità, a parità di volume di materiale utilizzato nella struttura.

Metodi LSTO più avanzati, infatti, consentono la progettazione di strutture ibride solido-lattice-vuoto (solid-lattice-void hybrid structures). Questo si ottiene dividendo il dominio di progettazione in base alla densità (Figura 5): le aree con densità elevata diventano solide, quelle con bassa densità diventano vuote, e le restanti vengono riempite con reticoli dotati di proprietà anisotrope estreme [13].

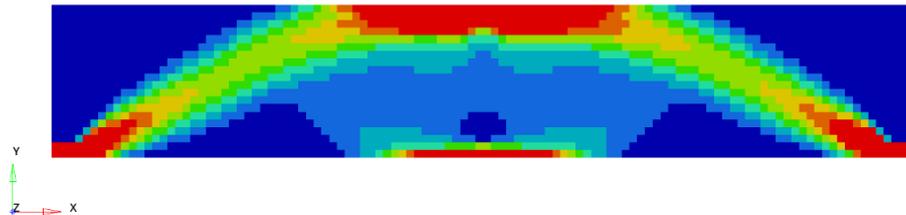
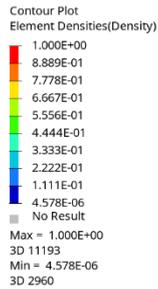


Figura 5 – Mappa di densità di un componente sottoposto ad ottimizzazione topologica lattice.

Questa metodologia permette la realizzazione di strutture gerarchiche tridimensionali. Le strutture ibride solido-lattice-vuoto hanno dimostrato di superare le prestazioni delle sole strutture lattice o solide, portando a una significativa riduzione della compliance strutturale (ad esempio, una riduzione del 18,46% in un caso studio [13]).

#### 1.4. Anisotropia delle celle lattice

L'anisotropia nelle strutture lattice si manifesta come una variazione della risposta meccanica in base alla direzione di applicazione del carico. Questo fenomeno è intrinsecamente legato alla distribuzione non uniforme del materiale costituente all'interno delle celle unitarie che compongono la struttura [10]. Diversi fattori contribuiscono a tale anisotropia: l'orientazione specifica della cella unitaria, la disposizione dei puntoni (le celle con puntoni allineati parallelamente alla direzione del carico tendono a mostrare una maggiore rigidità e sono responsabili della maggior parte della trasmissione del carico)[14], la struttura topologica intrinseca della cella stessa e le caratteristiche del processo di produzione additiva [2]. Le tecnologie di AM, a causa della loro natura di deposizione strato per strato, possono indurre diversi gradi di anisotropia a seconda della tecnica impiegata.

Ad esempio, le strutture lattice basate su giroidi possono mostrare moduli di Young a compressione variabili con diverse orientazioni delle celle. La direzione meno rigida può presentare un modulo di Young inferiore fino al 18,99% rispetto alla direzione più rigida per una data porosità. Il modulo di Young massimo si riscontra lungo le

orientazioni diagonali, mentre il minimo si ha lungo le direzioni assiali della cella. Questa differenza tende a ridursi con la diminuzione della porosità. Le strutture lattice TPMS sono generalmente meno anisotrope rispetto a quelle strut-based [10].

L'anisotropia può essere quantificata e descritta tramite indici come l'indice di anisotropia tensoriale (AT) e l'indice di Zener modificato. L'indice AT, che considera tutti i 21 coefficienti elastici (Figura 6), può descrivere il comportamento completamente anisotropo di un materiale. I valori di AT tendono a essere più elevati a basse densità relative e diminuiscono, indicando una maggiore isotropia, all'aumentare della densità relativa. È importante notare che valori elevati di AT non indicano necessariamente prestazioni scarse, ma piuttosto la presenza di direzioni preferenziali ottimali per l'applicazione del carico. In generale, le strutture lattice strut-based tendono a presentare indici di anisotropia tensoriale più elevati rispetto alle strutture TPMS [14].

$$\begin{aligned}
 \text{(a)} \quad \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \\
 \text{(b)} \quad \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \\
 \text{(c)} \quad \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Figura 6 - Legge di Hook in forma matriciale per: (a) materiale anisotropo, con 21 coefficienti indipendenti della matrice di rigidezza; (b) materiale ortotropo, con 9 coefficienti indipendenti della matrice di rigidezza; (c) materiale isotropo, con 3 coefficienti della matrice di rigidezza [15].

È stato, quindi, dimostrato come gli effetti dell'anisotropia della cella sulle prestazioni strutturali sia più marcata in celle caratterizzate da bassi valori di densità relativa. Questo fattore assume un'estrema importanza nei processi di ottimizzazione con strutture ibride solido-lattice-vuoto.

A parità di dimensione della cella, le strutture reticolari periodiche possono replicare diversi valori di densità relativa in fase di ottimizzazione, a seconda dello spessore dei

singoli elementi reticolari. Il range di densità replicabile da ciascuna cella lattice è limitato inferiormente da due fattori: il numero di elementi reticolari presenti in una singola cella e il diametro minimo degli elementi reticolari.

- A parità di dimensione della cella e di diametro degli elementi reticolari, una cella con meno elementi reticolari esibisce una densità relativa inferiore rispetto ad una cella con un maggior numero di elementi reticolari (Figura 7);

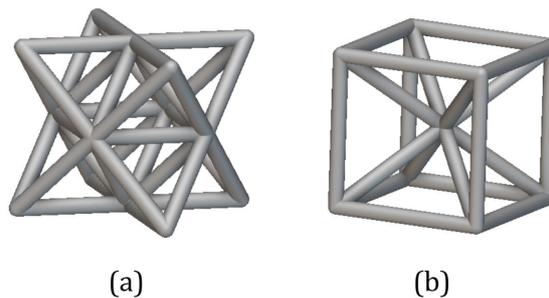


Figura 7 - Confronto tra due celle di pari dimensione e raggio degli elementi, ma di densità relative diverse a causa del diverso numero di elementi reticolari: (a) octet-truss; (b) BCCxyz.

- A parità di dimensione della cella e di numero di elementi reticolari, una cella con elementi di diametro più basso esibisce una densità relativa inferiore ad una cella con elementi reticolari di diametro più alto (Figura 8).

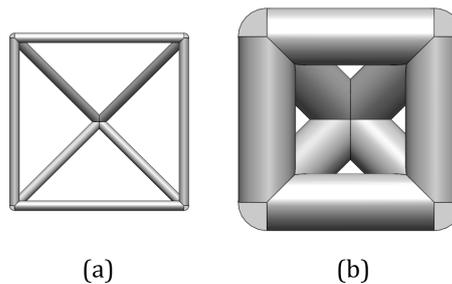
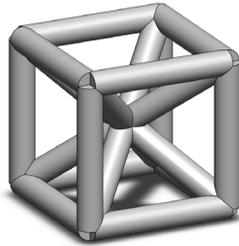


Figura 8 - Celle di ugual numero di elementi reticolari e di pari interasse tra loro ( $i = 7 \text{ mm}$ ), ma di raggio diverso: (a)  $r = 0,2 \text{ mm}$ ; (b)  $r = 1,2 \text{ mm}$ .

Questo fattore acquisisce un'enorme importanza considerando i limiti realizzativi di questo tipo di strutture. Nel momento in cui viene prodotta una cella lattice reticolare, la stampante impone un limite inferiore al diametro dei raggi degli elementi della cella, da ricercare ottimizzando i parametri di stampa. Volendo elaborare una

struttura lattice che ricalchi anche i valori di densità relativa più bassi della mappa di densità, è conveniente utilizzare celle reticolari con un basso numero di elementi.

Una criticità esibita dalle celle lattice reticolari con basso numero di elementi è la spiccata anisotropia strutturale. In particolare, le celle di tipo BCCxyz (Figura 9) esibiscono una marcata ortotropia, che sarà indagata nel seguito di questo lavoro.



*Figura 9 - La cella BCCxyz.*

L'ortotropia delle celle può essere interpretata come una limitazione delle celle leggere, ma, operando opportune scelte di design, può rivelarsi una risorsa di progettazione.

Manipolando l'orientazione della cella unitaria o altri parametri geometrici, è possibile regolare localmente le proprietà meccaniche di una struttura per ottimizzarne le prestazioni in condizioni di carico specifiche.

## 1.5. Strategie di ottimizzazione topologica

In questa sezione vengono affrontate le basi teoriche di alcune storiche metodologie di ottimizzazione che non hanno avuto la possibilità di esibire tutto il loro potenziale nel mondo industriale, in assenza di tecnologie che consentissero di raggiungerlo. Con l'avvento, il perfezionamento e la diffusione delle tecnologie di fabbricazione additiva, tali metodologie possono trovare un nuovo spazio in diversi campi dell'ingegneria e del design.

### 1.5.1. La teoria delle strutture di Michell

La teoria delle strutture di Michell, proposta dall'australiano Anthony George Maldon Michell nel 1904, rappresenta un pilastro nell'ottimizzazione strutturale e si concentra sulle proprietà fondamentali dei continui ottimali a griglia [16]. Il suo principio cardine è la ricerca di strutture che possiedano la massima rigidezza (o, in modo equivalente, la minima deformabilità, ovvero la minima "compliance" o lavoro

svolto dalle forze esterne all'equilibrio) per un dato volume di materiale. Michell formulò che una struttura raggiunge la massima economia di materiale quando ogni suo elemento (o "membro") è soggetto alla stessa tensione o compressione. Questo concetto si basa sul teorema del percorso di carico di Maxwell, che stabilisce una relazione tra i percorsi di carico di trazione e compressione e il lavoro svolto dalle forze esterne [17].

Le soluzioni ideali di Michell sono configurazioni continue, concettualmente composte da un numero infinito di membri infinitamente corti. Questi elementi sono disposti in modo che i membri in trazione e quelli in compressione si intersechino ad angolo retto.

Due classici esempi di questa teoria sono la trave a sbalzo di Michell e la trave caricata in mezzeria di Michell, illustrati in Figura 10.

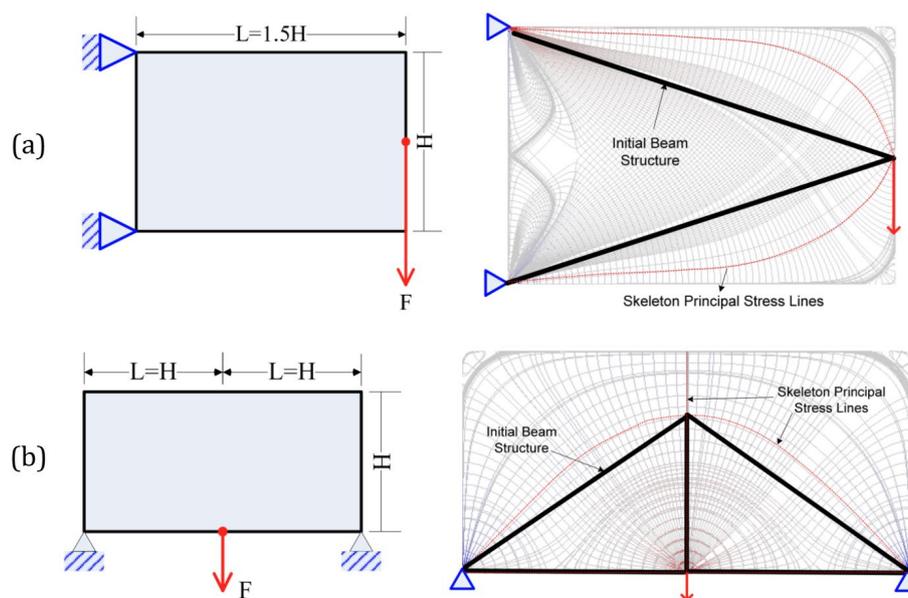


Figura 10 - Esempi della teoria di Michell: trave caricata in punta (a) e trave caricata in mezzeria (b)[16].

In entrambi i casi è possibile ottenere una struttura ottimizzata con un processo iterativo che, in pochi passi, consente di ridurre notevolmente l'energia di deformazione, e quindi di aumentare la rigidezza della struttura, generando un numero crescente di elementi reticolari, di dimensioni più basse ad ogni passo, come illustrato in Figura 11 e in Figura 12.

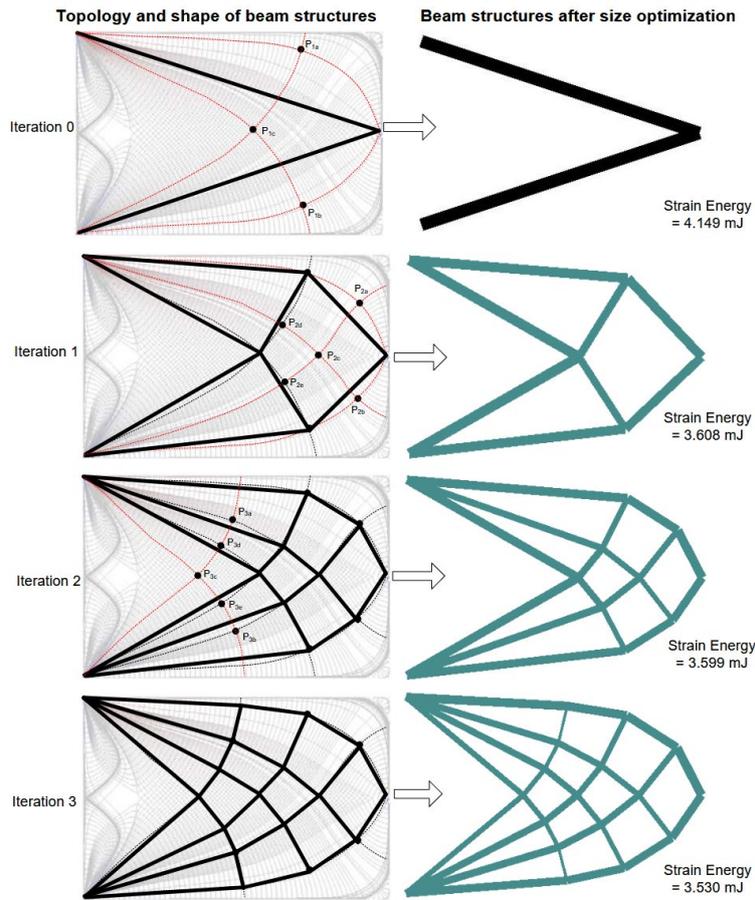


Figura 11 - Processo di ottimizzazione di Michell: trave caricata in punta[16].

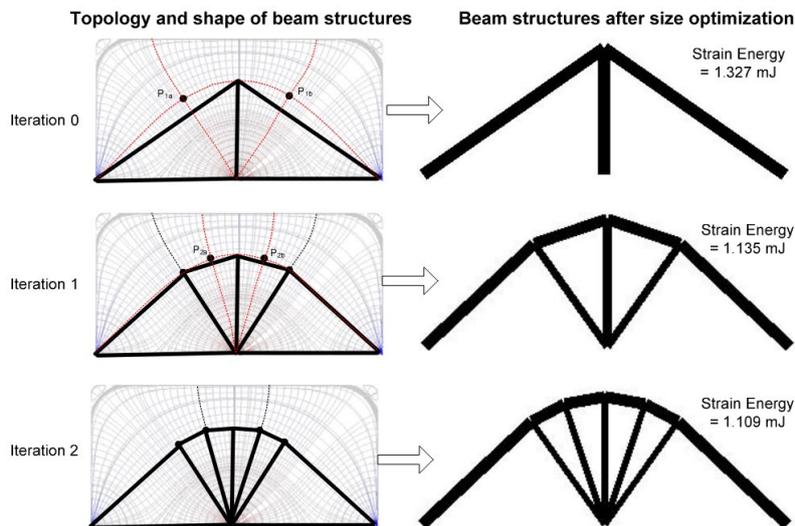


Figura 12 - Processo di ottimizzazione di Michell: trave caricata in mezzzeria[16].

Nonostante la loro importanza teorica, le strutture di Michell presentano delle sfide nella loro applicazione pratica a causa della loro intrinseca complessità e della difficoltà nell'interpretare i risultati. Metodi computazionali tradizionali per

l'ottimizzazione topologica, come l'Homogenization e il Ground Structure, sebbene ben consolidati, hanno mostrato problemi quali la generazione di "aree grigie" (regioni di densità intermedia difficili da interpretare in termini di presenza o assenza di materiale) o strutture disconnesse. Inoltre, questi metodi possono essere costosi dal punto di vista computazionale, rendendo difficile per i progettisti il controllo dei risultati generati [16].

### 1.5.2. La teoria delle Linee di Tensione Principale (PSL)

Le linee di tensione principale (Principal Stress Lines, PSL) sono definite come le due famiglie ortogonali di curve le cui direzioni in ogni punto coincidono con quelle di minima tensione di taglio in uno stato di deformazione piana [16]. Esse offrono una visualizzazione diretta e chiara delle traiettorie delle forze interne e del percorso di trasferimento del carico all'interno di un dominio continuo [2]. Una proprietà cruciale delle PSL è che la loro direzione non è influenzata dalla scala delle forze esterne né dal tipo di materiale (per materiali isotropi nel campo di deformazione elastica), ma è primariamente legata alle variabili topologiche del progetto strutturale, come la posizione dei carichi esterni e i tipi di vincoli. Ad esempio, le distribuzioni delle PSL mostrano che la loro densità è più alta nelle aree fisse (vincoli) e diminuisce esponenzialmente verso i punti di applicazione del carico, suggerendo una densità ideale dei membri che aumenta verso il vincolo (Figura 13) [17].

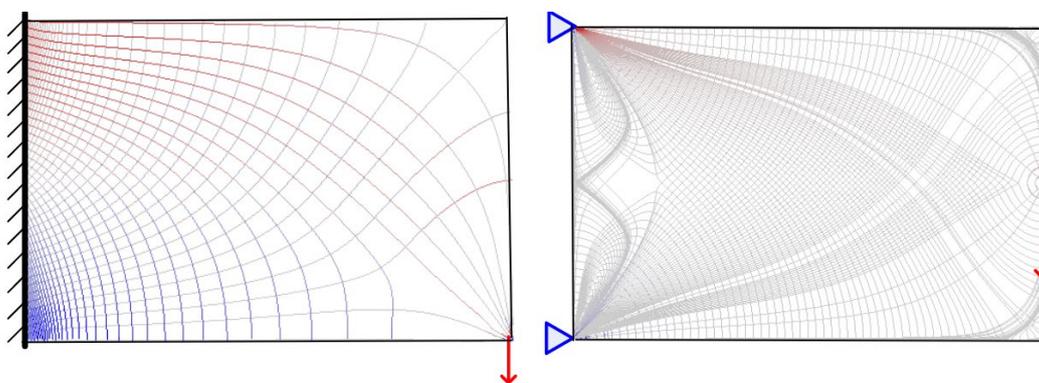


Figura 13 - Linee di tensione principali (PSL) in presenza di diverse condizioni al contorno (BC) [16].

Per calcolare le PSL, si preferisce tipicamente un approccio numerico rispetto ai metodi analitici. Questo metodo si basa sull'analisi agli elementi finiti (Finite Element Method, FEM) per ottenere i componenti di stress (tensioni normali e di taglio) dai nodi degli elementi finiti. Questi dati vengono poi interpolati linearmente (ad esempio, utilizzando coordinate baricentriche) per costruire un campo di stress continuo nel dominio di progetto, da cui si possono determinare le tensioni principali

e le loro direzioni in qualsiasi punto. I vantaggi del metodo numerico includono la sua capacità di gestire un'ampia varietà di tipi e quantità di carico senza essere limitato, e l'assenza di problemi di non convergenza dei derivati direzionali. Una volta ottenuti i dati di stress, le PSL possono essere generate iterativamente seguendo le direzioni principali nel campo di stress continuo. Per assicurare una copertura densa e uniforme delle PSL nel dominio di progetto, si possono usare strategie come l'aggiunta di "curve guida" e il campionamento uniforme di punti su di esse come punti di partenza per la generazione delle linee [2], [16].

### 1.5.3. Correlazione tra le Teorie di Michell e PSL

Esiste una relazione intrinseca e profonda tra le strutture di Michell e le linee di tensione principale (Figura 14). Fondamentalmente, le soluzioni ottimali di Michell implicano che le barre di un continuo reticolare siano posizionate nelle direzioni delle tensioni principali. Si può quindi immaginare una struttura di Michell come composta da un numero infinito di barre che si intersecano perpendicolarmente, allineate con le direzioni delle tensioni principali. Questo allineamento intrinseco permette alle strutture di distribuire uniformemente lo stress, raggiungendo la massima rigidezza per un dato volume di materiale [2], [16].

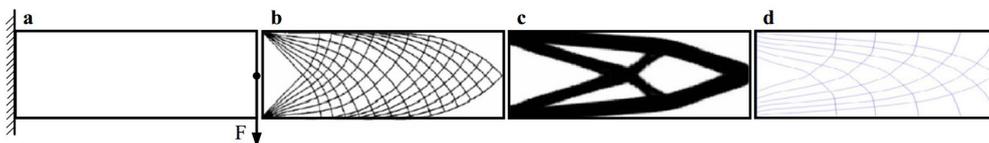


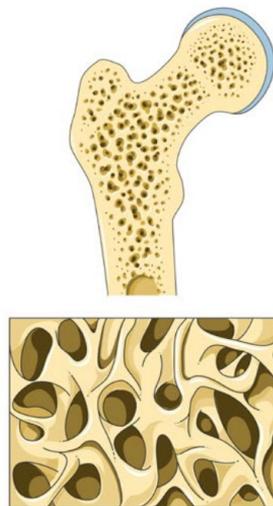
Figura 14 - Confronto tra i metodi di ottimizzazione strutturale: (a) trave caricata in punta; (b) reticolo di Michell; (c) ottimizzazione topologica; (d) PSL [2].

Il metodo di ottimizzazione basato sulle linee di tensione principale è esplicitamente motivato dalle teorie di Michell e dalle proprietà delle PSL. Entrambi gli approcci convergono nell'obiettivo di identificare il percorso ottimale di trasferimento del carico. A differenza dei metodi tradizionali di ottimizzazione topologica (come Homogenization o Ground Structure), che possono generare forme meno intuitive, il metodo basato sulle PSL è considerato più intuitivo, controllabile e veloce. Le strutture generate tramite PSL evitano inoltre problemi comuni come le "aree grigie" o le strutture disconnesse. L'allineamento dei membri lungo le PSL assicura che essi siano soggetti principalmente a forze assiali (trazione o compressione) e siano quasi esenti da forze di taglio. Questo rende l'utilizzo del materiale estremamente razionale ed efficiente [2], [16].

#### 1.5.4. Correlazione con le Strutture Lattice per Additive Manufacturing

I recenti progressi nella fabbricazione additiva hanno rivoluzionato la capacità di produrre componenti con geometrie complesse e strutture interne organiche, come le strutture lattice. Questa capacità apre nuove frontiere per la progettazione di componenti leggeri e ad alte prestazioni, superando le limitazioni imposte dai processi di produzione convenzionali. Come visto nei paragrafi precedenti, le LS offrono vantaggi significativi, tra cui bassa densità, eccellenti prestazioni specifiche (come elevata rigidità e resistenza specifiche) e ampie superfici. Possono ridurre il peso di oltre il 70% rispetto ai materiali solidi tradizionali a parità di resistenza [2], [6], [16].

Tuttavia, le strutture lattice convenzionali, siano esse omogenee o periodiche, non sono in grado di raggiungere le prestazioni ottimali senza considerare l'entità e l'orientamento dello stress. Le strutture biologiche naturali, come ossa (Figura 15) e legno, dimostrano un approccio superiore: sono eterogenee e non uniformi, con una topologia, geometria, orientamento e dimensione cellulare che si adattano alla direzione e all'entità del carico applicato [2].



*Figura 15 - Struttura ossea [18].*

È proprio qui che l'integrazione delle teorie di Michell e delle linee di tensione principale diventa fondamentale per l'AM. I membri di una struttura lattice ottimale, in analogia con le strutture di Michell, dovrebbero essere disposti lungo le linee di tensione principale (Figura 16). Questo garantisce che il materiale sia utilizzato nel

modo più razionale per soddisfare le proprietà meccaniche desiderate con il minimo materiale e il peso più leggero, in quanto i membri sono quasi esenti da forze di taglio [2].

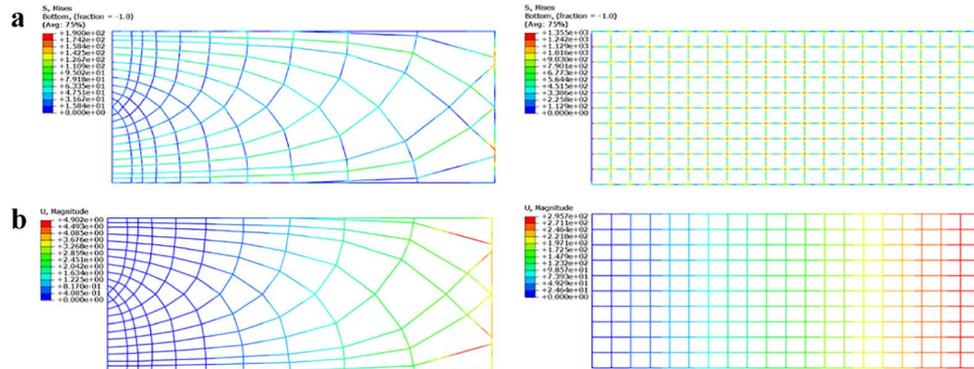


Figura 16 - Distribuzione di tensioni e spostamenti in una trave caricata in punta: (a) distribuzione delle tensioni in una struttura lattice basata sulle PSL (sinistra) e in una LS periodica (destra); (b) spostamenti in una struttura lattice basata sulle PSL (sinistra) e in una LS periodica (destra)[2].

In questo modo la teoria di Michell, storicamente difficile da applicare per via della necessità di impiego di strutture concettualmente composte da un numero infinito di membri infinitamente corti, può finalmente trovare applicazione grazie alle strutture lattice per fabbricazione additiva.

Il processo di ottimizzazione per la progettazione di LS basate sulle PSL per l'AM è un approccio completo che include ottimizzazione di dimensione, forma e topologia. Le fasi principali sono le seguenti [2], [16]:

1. Specificazione del Dominio di Progetto: L'utente definisce il dominio, i carichi, i vincoli e le proprietà del materiale.
2. Calcolo delle Linee di Tensione Principale (PSL): Viene eseguita un'analisi FEM sul dominio per calcolare le PSL, visualizzando il campo di stress continuo.
3. Generazione della Struttura Iniziale: Si identificano le "linee di stress principali scheletriche" (skeleton PSL), che sono le PSL che collegano carichi e vincoli. Una struttura iniziale viene generata da queste linee, connettendo i punti di intersezione delle PSL con travi diritte, poiché una linea retta tra due nodi porta a una minore compliance.
4. Ottimizzazione delle Dimensioni (Size Optimization): Le aree della sezione trasversale di ciascun elemento della trave vengono modificate. Questo

passaggio si basa sul principio dell'uniforme densità di energia di deformazione, esteso dalle strutture a traliccio a quelle a trave. L'obiettivo è ottimizzare il diametro di ogni tirante per adattarlo al massimo allo stress, riducendo la ridondanza del materiale.

5. Crescita Topologica (Topology Growth): Questo è un processo iterativo in cui nuove PSL vengono aggiunte per ridurre gli errori di approssimazione tra la struttura attuale e il campo di stress ideale. Questo comporta l'introduzione di nuovi nodi e travi, modificando la topologia e la forma della struttura. Il processo di ottimizzazione delle dimensioni viene poi ripetuto per la nuova struttura. Questo ciclo continua fino a quando non si raggiunge la performance desiderata o un limite al numero di travi.

Un aspetto critico nell'AM è l'anisotropia dei materiali, ovvero la variazione delle proprietà meccaniche con l'orientamento delle celle, la direzione di deposizione e le dimensioni dei membri. I modelli di ottimizzazione per le LS devono accoppiare questa anisotropia con i vincoli di fabbricazione (come le dimensioni minime dei membri o gli angoli di sbalzo massimo senza supporti). L'ottimizzazione del diametro dei membri basata su un modello di anisotropia permette di massimizzare la corrispondenza tra lo stress previsto e quello consentito, riducendo la ridondanza di materiale. Ad esempio, studi sull'FDM (Fused Deposition Modeling) hanno mostrato come la resistenza a trazione vari con l'orientamento di deposizione e il diametro dei tiranti, e come sia cruciale considerare questi effetti per evitare fallimenti strutturali o eccesso di materiale. Un altro vincolo importante è la dimensione minima fabbricabile che limita l'ottimizzazione del diametro dei tiranti. Anche le strutture di supporto necessarie per la stampa influenzano l'efficienza di fabbricazione, la qualità superficiale e le prestazioni meccaniche finali della LS [2].

In conclusione, l'integrazione delle teorie di Michell e delle linee di tensione principale offre un metodo robusto e prevedibile per la progettazione di strutture lattice eterogenee e conformi, sfruttando appieno le capacità di fabbricazione di geometrie complesse dell'Additive Manufacturing. Questo approccio consente di creare componenti leggeri, resistenti e rigidi, tenendo conto delle specificità dei materiali prodotti con questa tecnologia, come la loro anisotropia e i vincoli di fabbricazione. I risultati di test meccanici hanno dimostrato l'efficacia di questo metodo, con miglioramenti significativi nel rapporto forza-peso e rigidità-peso delle strutture ottimizzate. Nonostante le sfide residue, come l'integrazione completa tra design e

produzione e la gestione ottimale dei supporti, questa metodologia rappresenta un passo avanti cruciale nell'ottimizzazione delle prestazioni strutturali nell'ingegneria moderna [2], [16].

### 1.5.5. Fabbricazione Additiva per la biomimetica

I principi di ottimizzazione naturale teorizzati da Michell si legano intrinsecamente al campo della biomimetica. La biomimetica (dal greco “βίος”, vita, e “μίμησις”, imitazione) è una disciplina scientifica che trae ispirazione dalla natura per sviluppare prodotti e sistemi pratici che imitano la struttura e le funzioni di sistemi biologici [19].

Da tempo immemorabile, gli esseri umani hanno attinto conoscenze dalla natura circostante, utilizzando animali volanti e marini come fonte di ispirazione per il design. L'esplorazione delle applicazioni biomimetiche è diventata un campo di studio approfondito, con termini come "bio-inspired" o "bionico" usati spesso in alternativa a "biomimetico". La natura, infatti, progetta in modo efficiente, utilizzando solo l'energia necessaria, armonizzando forma e scopo, riciclando tutto e affidandosi alla varietà e alla conoscenza dell'ecosistema locale [19]. Le forme biologiche ideali, risultato dell'ottimizzazione in natura, mostrano una forte correlazione con la propagazione delle tensioni principali [17]. Esempi storici come le volte gotiche, simili a spirali logaritmiche o a ramificazioni di alberi (Figura 17), dimostrano come i principi naturali di ottimizzazione siano stati applicati intuitivamente nel design [17].



*Figura 17 - Volte gotiche e ramificazioni di alberi, morfologicamente simili alle ottimizzazioni di Michell [17].*

L'avvento della fabbricazione additiva ha consentito la creazione di geometrie altamente dettagliate e complesse con un minimo spreco di materiale, strato dopo strato, da modelli digitali. A differenza dei processi sottrattivi, l'AM costruisce oggetti dal basso verso l'alto, offrendo una libertà di design senza precedenti e la capacità di fabbricare forme complesse che sarebbero difficili o impossibili con i metodi

convenzionali [1]. Questo la rende uno strumento cruciale per realizzare innovazioni sofisticate ispirate alla natura [19].

Pertanto, è possibile affermare come la sinergia tra la teoria di Michell, le tensioni principali, la biomimetica e la fabbricazione additiva sia profonda.

I modelli naturali sono spesso a forma libera e presentano geometrie complesse. La stampa 3D consente la fabbricazione di geometrie a forma libera e complesse che imitano le strutture presenti in natura, rendendola uno strumento potente per il design biomimetico. La capacità dell'AM di creare strutture intricate, precise e a forma libera che assomigliano alle strutture naturali è particolarmente utile nei settori dell'ingegneria e del design, dove le idee ispirate alla natura si sono dimostrate efficaci nel risolvere problemi complessi [19].

L'unione di biomimetica e fabbricazione additiva ha portato a progressi in molteplici settori:

- **Ingegneria biomedica:** Sviluppo di impianti, tessuti sintetici, organi, protesi e sistemi di rilascio di farmaci. Esempi includono scaffold porosi in titanio ispirati al tessuto osseo per la ricostruzione ossea e dispositivi di immobilizzazione ortopedica leggeri e personalizzabili, spesso con strutture a traliccio Voronoi ispirate a strutture cellulari naturali come quelle dei ricci di mare [1], [19].
- **Architettura e Costruzione:** Progettazione di strutture più efficaci, sostenibili e reattive all'ambiente. Esempi includono facciate biomimetiche per l'efficienza energetica, strutture che imitano il cesto di fiori di Venere, o ponti ispirati all'architettura biomimetica [5], [19].
- **Aerospaziale e Automobilistico:** Creazione di componenti leggeri con elevate proprietà meccaniche, come dissipatori di calore a traliccio o parti per aerei commerciali [1], [5], [19].
- **Robotica:** Sviluppo di mani robotiche personalizzabili e leggere ispirate alla natura, pesci robotici o attuatori magnetici biomimetici che imitano i movimenti di creature come le farfalle o i tentacoli dei polpi [19].

- **Materiali e Design Funzionale:** Creazione di materiali con proprietà specifiche come superfici superidrofile/superidrofobiche ispirate al coleottero del deserto o alla foglia di loto [19].

La combinazione dei principi di ottimizzazione della teoria di Michell e delle tensioni principali con le capacità di fabbricazione uniche dell'additive manufacturing, guidate dall'ispirazione biomimetica, consente la progettazione e la produzione di strutture e sistemi innovativi che raggiungono un'efficienza senza precedenti in termini di peso, rigidità e funzionalità, riproducendo l'ingegneria sofisticata della natura [16], [19].

## 1.6. Obiettivo del presente lavoro di tesi

L'obiettivo di questo lavoro di tesi consiste nel dimostrare l'importanza della morfologia della struttura lattice nei processi di ottimizzazione, e l'efficacia delle linee di tensione principale come guida per la disposizione delle celle. L'applicabilità e l'efficacia del metodo sono discusse affrontando diversi casi studio, sottoponendo i componenti trattati a due diverse strategie di ottimizzazione lattice.

La prima consiste nel realizzare un'ottimizzazione con celle ortotrope seguendo una griglia coerente con le linee geometriche del componente (conformal lattice). La seconda consiste nel realizzare un'ottimizzazione con la stessa tipologia di cella usata nel caso precedente, ma seguendo una griglia il più possibile coerente con le linee di tensione principale elaborate dall'analisi agli elementi finiti (FEA) del componente originale. In questo modo l'ortotropia della cella può essere sfruttata come una risorsa strutturale nel processo di ottimizzazione, invece di restare un fattore limitante.

Tale metodologia viene applicata a diversi casi studio e caratterizzata sulla base delle peculiari condizioni di ogni componente. I due componenti oggetto di questa analisi sono:

- Una generica trave caricata in mezzzeria (TCM, Figura 18);

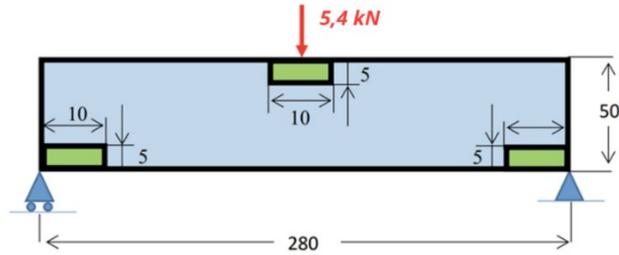


Figura 18 - Trave caricata in mezzeria

- Un profilo alare Eppler 420 (E420, Figura 19).

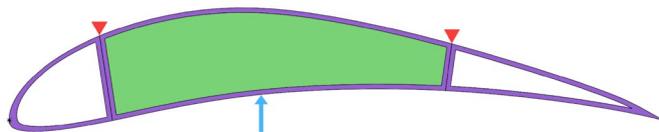


Figura 19 - Profilo alare Eppler 420

Alcune delle ottimizzazioni condotte sul profilo alare Eppler 420 sono state sottoposte non solo ad analisi FEM, ma anche a validazione sperimentale, grazie alla loro produzione mediante fabbricazione additiva in materiale polimerico, come illustrato al Capitolo 5 “Test meccanici sul profilo alare Eppler 420”.

L'applicazione dell'obiettivo del lavoro di tesi ai componenti sopracitati e la loro fabbricazione sono soggette alle limitazioni imposte dagli strumenti di modellazione offerti dai software utilizzati. In particolare, per la generazione e l'analisi delle ottimizzazioni sono stati adottati due software, Altair HyperWorks Desktop 2022 e nTopology 5, che forniscono diversi strumenti e diverse strategie per la generazione delle strutture lattice. Pertanto, nella generazione delle strutture lattice orientate non è stato possibile orientare tutte le celle in modo ideale, seguendo in ogni elemento le direzioni delle tensioni principali. Queste limitazioni lasciano possibili margini di miglioramento dei risultati ottenuti.

Inoltre, è stato necessario adottare il software nTopology anche a causa delle difficoltà incontrate nel tentativo di esportare i risultati di ottimizzazione lattice ottenuti in HyperWorks Desktop 2022 in un formato compatibile con un software di slicing per la successiva fabbricazione finalizzata ai test meccanici.

## 2. Metodologia adottata

La metodologia adottata in questo lavoro è schematizzata in Figura 20. Essa viene applicata ai due casi studio della trave caricata in mezzzeria e del profilo alare Eppler 420.

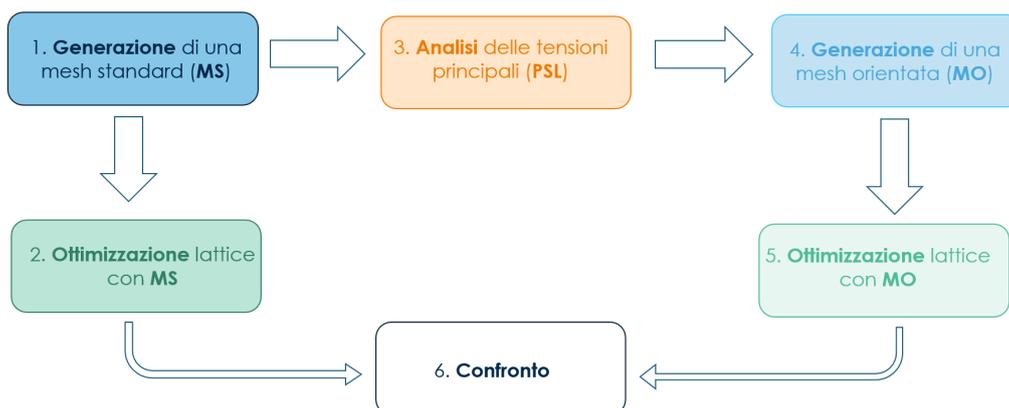


Figura 20 - Metodologia adottata

### 2.1. Generazione di una mesh standard

L'obiettivo finale è di ottenere una struttura ottimizzata ibrida solido-lattice-vuoto. Il processo di ottimizzazione topologica lattice è condotto tramite il software HyperWorks Desktop 2022, che si avvale dell'ottimizzatore Optistruct.

Optistruct costruisce la struttura lattice sostituendo la cella elementare selezionata dall'utente ai singoli elementi di mesh volumetrica [20]. La generazione della mesh è quindi di fondamentale importanza per l'ottenimento della struttura lattice desiderata.

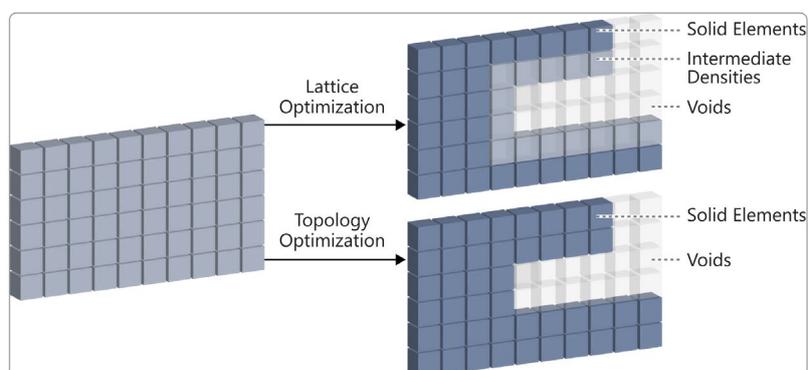


Figura 21 - Confronto tra ottimizzazione lattice e ottimizzazione topologica [20].

Il primo passo nel processo di ottimizzazione adottato è quindi la generazione di una mesh standard (MS). La MS è una mesh coerente con le caratteristiche geometriche del componente da ottimizzare. Per la generazione della struttura lattice, è necessario che gli elementi di mesh siano solidi. Per semplicità, i due componenti trattati sono caratterizzati da uno spessore tale da consentire la generazione di una mesh con un solo elemento lungo lo spessore.

Gli elementi di mesh solida vengono costruiti partendo da elementi superficiali, che, essendo più semplici, consentono una maggiore possibilità di personalizzazione della geometria della mesh. Gli elementi di mesh 2D vengono poi estesi ai volumi da meshare.

La mesh finale è composta principalmente da elementi solidi di tipo HEXA (a sei facce), mentre all'interfaccia con la struttura solida possono essere presenti alcuni elementi solidi prismatici di tipo PENTA (a cinque facce).

## 2.2. Ottimizzazione lattice con mesh standard

Per la generazione della struttura lattice è necessario impostare le condizioni al contorno (BC) sul componente e i parametri di ottimizzazione.

### 2.2.1. Condizioni al contorno

Le BC in HyperWorks vanno assegnate a dei singoli nodi di mesh. Pertanto, il carico e i vincoli vengono distribuiti su diversi nodi, per evitare elevate concentrazioni di tensioni nei pochi elementi caricati e vincolati.

### 2.2.2. Tipologia di cella

Per l'ottimizzazione topologica lattice in HyperWorks Desktop 2022 sono disponibili quattro tipologie di cella unitaria, tutte generabili a partire da elementi di mesh solidi di tipo HEXA, e illustrate in Figura 22.

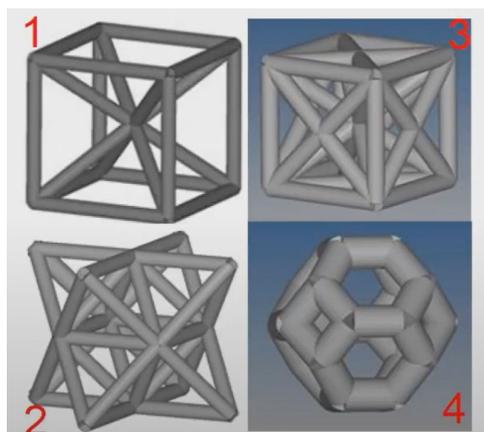


Figura 22 - Celle disponibili per l'ottimizzazione lattice in HyperWorks Desktop 2022 [20].

Per tutte le ottimizzazioni viene scelta la cella type 1 (BCCxyz) dal momento che, grazie al ridotto numero di elementi reticolari, è la cella con la minor densità relativa a parità di sezione degli elementi reticolari. Tale cella, è inoltre quella caratterizzata da un'anisotropia più marcata rispetto alle altre disponibili, ed è quindi più utile all'analisi condotta in questo lavoro.

#### Caratterizzazione di una cella BCCxyz

Questa fase del lavoro si pone l'obiettivo di caratterizzare le proprietà meccaniche della cella lattice scelta, al variare della direzione del carico. Per farlo, si sottopone una cella elementare a diverse condizioni di carico, con una forza applicata di modulo costante e di direzione variabile nei piani XY e XZ, illustrati in Figura 23.

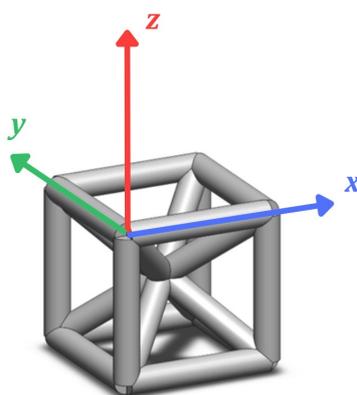


Figura 23 - Cella BCCxyz, piani XY e XZ.

La cella viene modellata in SOLIDWORKS ed è caratterizzata da:

- Interasse tra i bracci  $L = 10 \text{ mm}$ ;
- Raggio dei bracci  $R = 1 \text{ mm}$ ;

- Materiale: acciaio generico, le cui proprietà meccaniche sono illustrate in Tabella 1.

Tabella 1 - Proprietà meccaniche di un acciaio generico.

Densità [ $g/cm^3$ ]	Modulo di elasticità $E$ [ $MPa$ ]	Coefficiente di Poisson	Tensione di snervamento [ $MPa$ ]
7,85	210000	0,3	215

La cella è vincolata con quattro vincoli incastri applicati a superfici quadrate sulla faccia inferiore (opportunamente spianata) ed è caricata con quattro forze di modulo  $F = 200 N$  ciascuna concentrate su superfici quadrate sulla faccia superiore (opportunamente spianata).

Per caratterizzare le proprietà di una cella al variare della direzione del carico, si fa variare la direzione della forza nei due piani XZ e XY. Le variazioni nel piano YZ non vengono prese in considerazione per ragioni di simmetria con il piano XZ.

Per analizzare il comportamento a compressione (Figura 24, in rosso), il carico viene inclinato gradualmente nel piano XZ, a partire da  $\vartheta = 0^\circ$  (direzione verticale coincidente con l'asse z negativo, condizione di pura compressione), fino a raggiungere  $\vartheta = 90^\circ$  (direzione orizzontale coincidente con l'asse x positivo, condizione di puro taglio).

Per analizzare il comportamento a trazione (Figura 24, in verde), il carico viene inclinato gradualmente nel piano XZ, a partire da  $\vartheta = 90^\circ$  (direzione orizzontale coincidente con l'asse x positivo, condizione di puro taglio), fino a raggiungere  $\vartheta = 180^\circ$  (direzione verticale coincidente con l'asse z positivo, condizione di pura trazione).

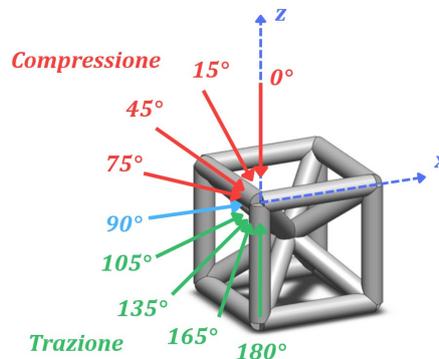


Figura 24 - Caratterizzazione di una cella BCCxyz, variazione dell'angolo  $\vartheta$  nel piano XZ: compressione (in rosso), trazione (in verde).

Per ogni valore compreso tra  $\vartheta = 0^\circ$  e  $\vartheta = 180^\circ$ , il carico viene inclinato nel piano XY (Figura 25), a partire da  $\varphi = 0^\circ$  (carico giacente nel piano xz), fino a  $\varphi = 90^\circ$  (carico giacente nel piano YZ). Per ragioni di simmetria della cella, è possibile arrestare la variazione dell'angolo  $\varphi$  a  $45^\circ$ .

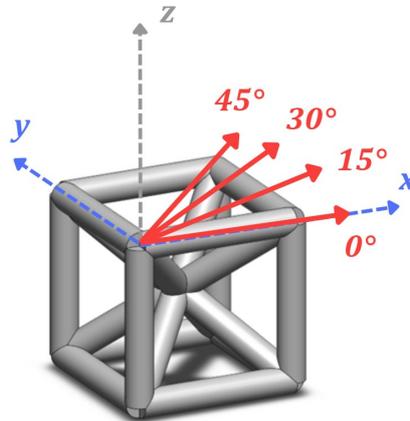


Figura 25 - Caratterizzazione di una cella BCCxyz, variazione dell'angolo  $\varphi$  nel piano XY.

In questo modo, il numero di condizioni di carico (Loadcases) a cui è sottoposta la cella è pari a 46. I Loadcases sono illustrati in Tabella 2.

Tabella 2 - Caratterizzazione di una cella BCCxyz, numerazione dei Loadcases in funzione dei valori degli angoli  $\vartheta$  e  $\varphi$ .

		$\varphi$			
		$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$
$\vartheta$	$0^\circ$	1	/	/	/
	$15^\circ$	2	3	4	5
	$30^\circ$	6	7	8	9
	$45^\circ$	10	11	12	13
	$60^\circ$	14	15	16	17
	$75^\circ$	18	19	20	21
	$90^\circ$	22	23	24	25
	$105^\circ$	26	27	28	29
	$120^\circ$	30	31	32	33
	$135^\circ$	34	35	36	37
	$150^\circ$	38	39	40	41
	$165^\circ$	42	43	44	45
	$180^\circ$	46	/	/	/

A questo punto viene elaborato uno script Python che calcola le componenti normalizzate X, Y, Z della forza per ognuna delle 46 condizioni di carico. I valori delle componenti normalizzate sono illustrati in Tabella 3.

*Tabella 3 - Caratterizzazione di una cella BCCxyz, componenti normalizzate della forza in funzione dei valori degli angoli  $\vartheta$  e  $\varphi$ .*

<b>Loadcase</b>	<b><math>\vartheta</math></b>	<b><math>\varphi</math></b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
1	0°	0°	0,000	0,000	-1,000
2	15°	0°	0,259	0,000	-0,966
3		15°	0,250	0,067	-0,966
4		30°	0,224	0,129	-0,966
5		45°	0,183	0,183	-0,966
6		0°	0,500	0,000	-0,866
7	30°	15°	0,483	0,129	-0,866
8		30°	0,433	0,250	-0,866
9		45°	0,354	0,354	-0,866
10	45°	0°	0,707	0,000	-0,707
11		15°	0,683	0,183	-0,707
12		30°	0,612	0,354	-0,707
13		45°	0,500	0,500	-0,707
14	60°	0°	0,866	0,000	-0,500
15		15°	0,837	0,224	-0,500
16		30°	0,750	0,433	-0,500
17		45°	0,612	0,612	-0,500
18	75°	0°	0,966	0,000	-0,259
19		15°	0,933	0,250	-0,259
20		30°	0,837	0,483	-0,259
21		45°	0,683	0,683	-0,259
22	90°	0°	1,000	0,000	0,000
23		15°	0,966	0,259	0,000
24		30°	0,866	0,500	0,000
25		45°	0,707	0,707	0,000
26	105°	0°	0,966	0,000	0,259
27		15°	0,933	0,250	0,259
28		30°	0,837	0,483	0,259
29		45°	0,683	0,683	0,259
30	120°	0°	0,866	0,000	0,500
31		15°	0,837	0,224	0,500
32		30°	0,750	0,433	0,500
33		45°	0,612	0,612	0,500
34	135°	0°	0,707	0,000	0,707
35		15°	0,683	0,183	0,707

<b>36</b>		30°	0,612	0,354	0,707
<b>37</b>		45°	0,500	0,500	0,707
<b>38</b>		0°	0,500	0,000	0,866
<b>39</b>	150°	15°	0,483	0,129	0,866
<b>40</b>		30°	0,433	0,250	0,866
<b>41</b>		45°	0,354	0,354	0,866
<b>42</b>		0°	0,259	0,000	0,966
<b>43</b>	165°	15°	0,250	0,067	0,966
<b>44</b>		30°	0,224	0,129	0,966
<b>45</b>		45°	0,183	0,183	0,966
<b>46</b>	0°	0°	0,000	0,000	1,000

La cella viene sottoposta ad analisi FEM in tutte le condizioni di carico tramite il software Altair Inspire 2022. I risultati di analisi in termini di tensione di von Mises massima, spostamento massimo e fattore di sicurezza minimo sono illustrati in Tabella 4 e in Figura 26 e Figura 27.

Tabella 4 - Caratterizzazione di una cella BCCxyz, risultati di analisi nei diversi Loadcases.

<b>Loadcase</b>	<b><math>\vartheta</math></b>	<b><math>\varphi</math></b>	<b><math>\sigma_{VM}^{max} [MPa]</math></b>	<b><math>s_{max} [mm]</math></b>	<b><math>FS_{min}</math></b>
<b>1</b>	0°	0°	1,62E+02	3,21E-03	3,7
<b>2</b>		0°	2,98E+02	7,29E-03	2,0
<b>3</b>	15°	15°	3,00E+02	7,34E-03	2,0
<b>4</b>		30°	2,94E+02	7,38E-03	2,0
<b>5</b>		45°	2,78E+02	7,39E-03	2,2
<b>6</b>		0°	4,36E+02	1,22E-02	1,4
<b>7</b>	30°	15°	4,42E+02	1,22E-02	1,4
<b>8</b>		30°	4,32E+02	1,22E-02	1,4
<b>9</b>		45°	4,01E+02	1,20E-02	1,5
<b>10</b>		0°	5,44E+02	1,64E-02	1,1
<b>11</b>	45°	15°	5,54E+02	1,66E-02	1,1
<b>12</b>		30°	5,40E+02	1,67E-02	1,1
<b>13</b>		45°	4,98E+02	1,65E-02	1,2
<b>14</b>		0°	6,16E+02	1,96E-02	1,0
<b>15</b>	60°	15°	6,29E+02	2,00E-02	1,0
<b>16</b>		30°	6,12E+02	2,01E-02	1,0
<b>17</b>		45°	5,76E+02	2,00E-02	1,0
<b>18</b>		0°	6,46E+02	2,15E-02	0,9
<b>19</b>	75°	15°	6,60E+02	2,20E-02	0,9
<b>20</b>		30°	6,43E+02	2,22E-02	0,9
<b>21</b>		45°	7,50E+02	2,85E-02	0,8
<b>22</b>	90°	0°	6,31E+02	2,20E-02	1,0

23		15°	6,47E+02	2,25E-02	0,9
24		30°	6,30E+02	2,29E-02	1,0
25		45°	6,13E+02	2,29E-02	1,0
26		0°	6,39E+02	2,15E-02	0,9
27	105°	15°	6,20E+02	2,19E-02	1,0
28		30°	6,09E+02	2,22E-02	1,0
29		45°	6,01E+02	2,22E-02	1,0
30		0°	6,10E+02	1,96E-02	1,0
31	120°	15°	5,88E+02	1,99E-02	1,0
32		30°	5,78E+02	2,01E-02	1,0
33		45°	5,63E+02	2,00E-02	1,1
34		0°	5,39E+02	1,64E-02	1,1
35	135°	15°	5,17E+02	1,66E-02	1,2
36		30°	5,09E+02	1,66E-02	1,2
37		45°	4,86E+02	1,64E-02	1,2
38		0°	4,32E+02	1,22E-02	1,4
39	150°	15°	4,12E+02	1,22E-02	1,5
40		30°	4,05E+02	1,21E-02	1,5
41		45°	3,81E+02	1,20E-02	1,6
42		0°	2,96E+02	7,29E-03	2,0
43	165°	15°	2,81E+02	7,35E-03	2,1
44		30°	2,75E+02	7,38E-03	2,2
45		45°	2,65E+02	7,39E-03	2,3
46	180°	0°	1,62E+02	3,21E-03	3,7

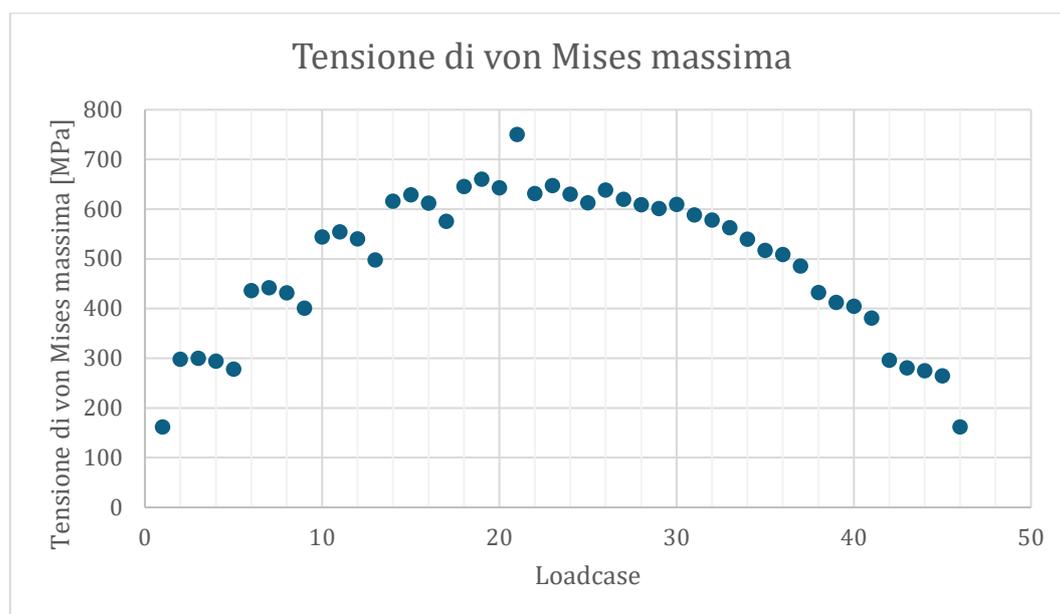


Figura 26 - Caratterizzazione di una cella BCCxyz, tensione di von Mises massima nei Loadcases.

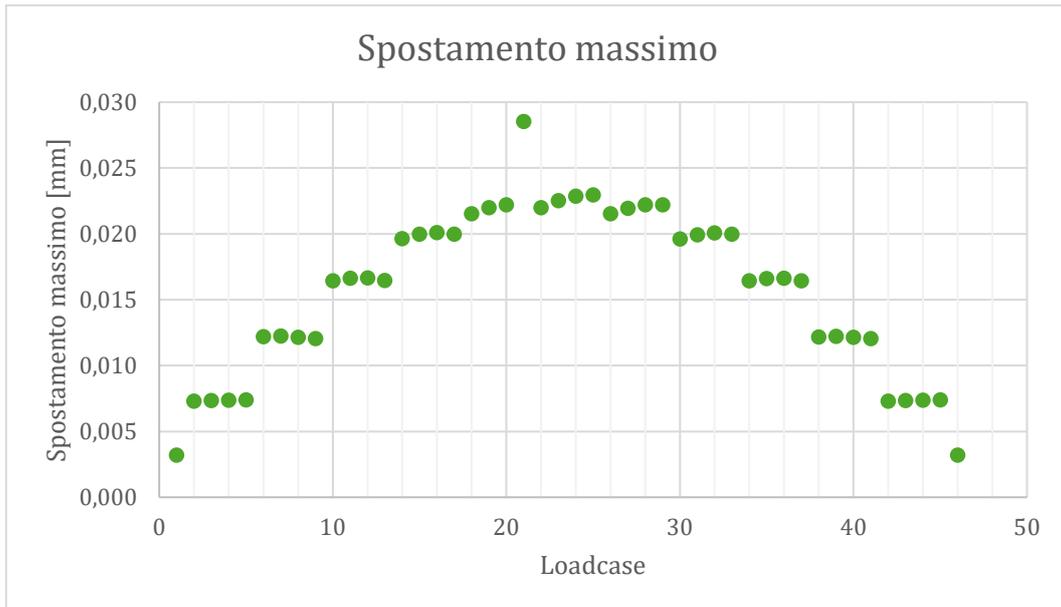


Figura 27 - Caratterizzazione di una cella BCCxyz, spostamento massimo nei Loadcases.

Dai risultati di analisi si evince che:

- L'orientamento meno gravoso è quello verticale (carico parallelo all'asse z), sia in compressione ( $\vartheta = 0^\circ$ ) che in trazione ( $\vartheta = 180^\circ$ ), poiché caratterizzato dai valori minimi sia di tensione che di spostamento;
- La tensione massima e lo spostamento massimo aumentano progressivamente al discostarsi da questa condizione sia a trazione che a compressione, raggiungendo i valori massimi per  $75^\circ \leq \vartheta \leq 105^\circ$ ;
- A parità di angolo  $\vartheta$ , la tensione massima si riduce all'aumentare dell'inclinazione della forza rispetto all'asse X (angolo  $\varphi$  crescente).

Alla luce di ciò, è conveniente orientare la cella in maniera tale che l'asse Z sia parallelo alla direzione del carico. Inoltre, a prescindere dall'inclinazione del carico nel piano XZ (angolo  $\vartheta$ ), nel piano XY è conveniente inclinare la cella con angolo  $\varphi = 45^\circ$  rispetto alla direzione del carico.

### 2.2.3. Limiti di densità

Scelta la tipologia della cella, è necessario indicare l'intervallo di densità relativa in cui si vuole generare una struttura lattice. Il software HyperWorks è, infatti,

predisposto per un'ottimizzazione ibrida solido-lattice-vuoto ed è possibile controllare la distribuzione delle strutture.

Al lancio dell'ottimizzazione, Optistruct elabora una mappa di densità in cui ad ogni elemento della mesh viene assegnato un valore di densità relativa, in base alle necessità strutturali.

Si selezionano un limite di densità relativa inferiore, al di sotto del quale vengono inseriti elementi vuoti, e un limite di densità superiore, al di sopra del quale vengono inseriti elementi solidi. Gli elementi di mesh a cui viene assegnato un valore di densità relativa compreso tra i limiti inferiore e superiore vengono sostituiti dalla struttura lattice. Questa è caratterizzata da celle della tipologia selezionata dall'utente e ciascuna di dimensioni pari a quelle dell'elemento di mesh che sostituisce.

La struttura lattice generata è costituita da celle ciascuna di densità relativa pari a quella assegnata all'elemento di mesh solida che sostituisce, grazie alla variabilità della dimensione della sezione dei singoli elementi reticolari di ogni cella.

#### 2.2.4. Obiettivo e vincolo

Per l'ottimizzazione lattice vengono impostati:

- Obiettivo: minimizzazione della response compliance (spostamento);
- Vincolo: frazione di volume massima.

In questo modo Optistruct ottimizza la struttura minimizzando gli spostamenti (quindi massimizzando la rigidità), mantenendo la massa della struttura al di sotto del valore scelto per la frazione di volume massima del design space.

### 2.3. Analisi delle tensioni principali

Il componente meshato con MS viene sottoposto ad analisi FEM per verificare l'orientazione delle tensioni principali rispetto a quella degli elementi di mesh. Vengono visualizzate la tensione principale massima e quella minima, poiché le tensioni di compressione sono di segno negativo. In questo modo per ogni elemento della mesh vengono visualizzate due tensioni ortogonali tra loro, una di trazione e una di compressione.

## 2.4. Generazione di una mesh orientata

Come visto nel paragrafo 2.1 “Generazione di una mesh standard”, l’ottimizzatore Optistruct costruisce la struttura lattice sostituendo la cella elementare selezionata dall’utente ai singoli elementi di mesh volumetrica. Pertanto, per ottenere una struttura lattice ottimizzata con celle orientate il più possibile coerentemente con la direzione delle tensioni principali, è necessario operare sulla generazione della mesh.

Per la generazione della mesh orientata viene quindi presa come riferimento l’analisi delle tensioni principali del componente originale con mesh standard. Essendo un’operazione non automatizzata, spesso è necessario effettuare più di un tentativo di generazione della mesh, per ottenere i risultati desiderati in termini di prestazioni meccaniche del componente ottimizzato risultante.

## 2.5. Ottimizzazione con mesh orientata

Le condizioni al contorno, la cella elementare, i limiti di densità, obiettivo e vincoli di ottimizzazione sono i medesimi adottati nell’ottimizzazione con mesh standard, per ottenere dei risultati confrontabili.

## 2.6. Confronto dei risultati

I due componenti ottimizzati, con mesh standard e mesh orientata, vengono sottoposti ad analisi FEM per stabilire un confronto sulla base di:

- Massa;
- Frazione di volume del design space;
- Spostamento massimo;
- Tensione di von Mises massima negli elementi reticolari;
- Media e distribuzione delle tensioni di von Mises negli elementi reticolari.

# 3. Applicazione ad una trave caricata in mezzeria

## 3.1. Introduzione al componente e al processo di ottimizzazione

Il primo componente oggetto di analisi è una trave caricata in mezzeria, di dimensioni in *mm* illustrate in Figura 28. Il volume di design space è evidenziato in azzurro, mentre i volumi di non-design space sono evidenziati in verde. I tre volumi di non-design space sono luogo di applicazione dei vincoli e del carico, imposti come quelli di una generica trave caricata in mezzeria. Il volume centrale, in alto, è luogo di applicazione di un carico verticale verso il basso di  $5,4\text{ kN}$ , mentre i due volumi laterali, posizionati in basso, sono luogo di applicazione dei vincoli, in questo caso carrello e cerniera.

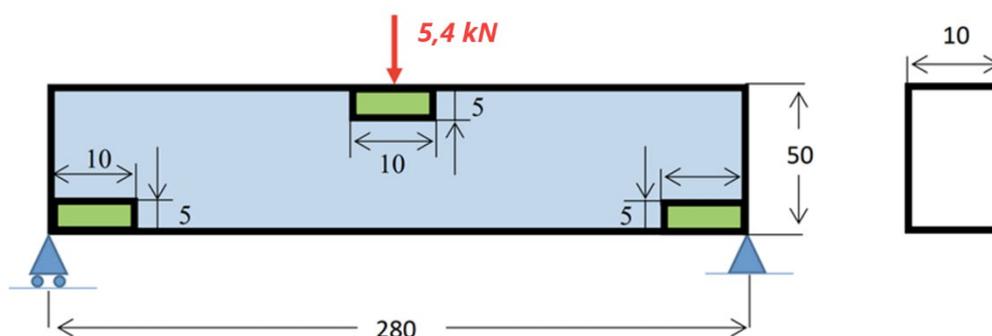


Figura 28 - Trave caricata in mezzeria (TCM)

Il materiale scelto è l'acciaio inossidabile AISI 4340, le cui proprietà meccaniche di interesse sono illustrate in Tabella 5 [21].

Tabella 5 - Proprietà meccaniche dell'acciaio AISI 4340

Densità [ $g/cm^3$ ]	Modulo di elasticità $E$ [MPa]	Coefficiente di Poisson	Tensione di snervamento [MPa]
7,85	205000	0,3	862

### Analisi del componente originale

La massa complessiva del componente originale è pari a  $1099\text{ g}$ . La massa del design space è pari a  $1086,25\text{ g}$ , quella del non-design space  $12,75\text{ g}$ .

Il componente, sottoposto alla condizione di carico sopra discussa, si presenta come in Figura 29.

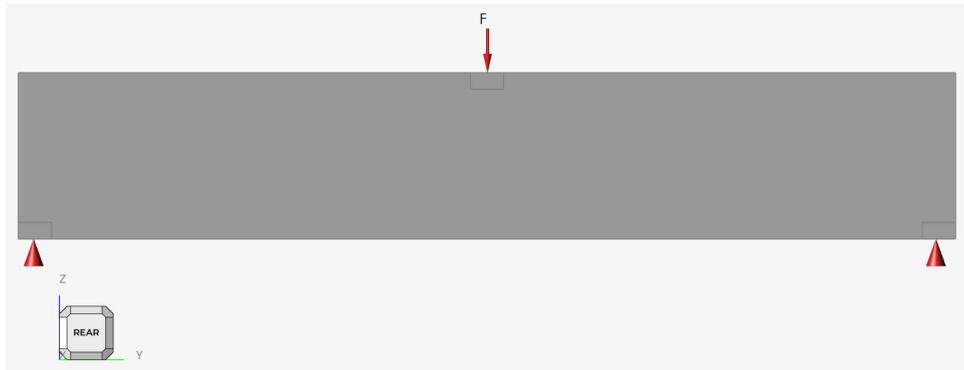


Figura 29 - Trave caricata in mezzeria (TCM).

Viene condotta analisi FEM del componente in Altair Inspire 2022. I risultati di analisi in termini di spostamenti e tensione di von Mises sono illustrati in Figura 30 e Figura 31.

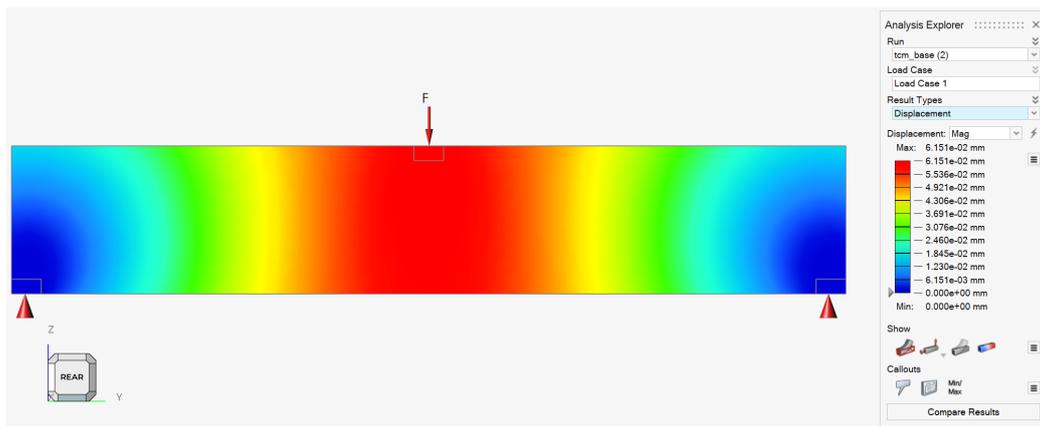


Figura 30 - TCM, spostamenti.

Lo spostamento massimo è pari a 0,062 mm.

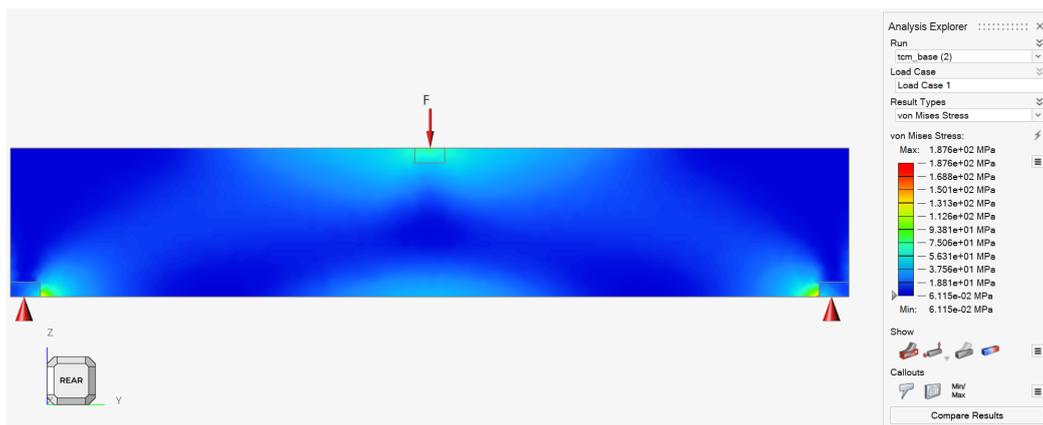


Figura 31 - TCM, tensioni di von Mises.

La tensione di von Mises massima è pari a 187,6 MPa.

### Processo di ottimizzazione

L'obiettivo finale è di ottenere una struttura ottimizzata ibrida solido-lattice-vuoto. Il processo di ottimizzazione è, pertanto, portato avanti in due fasi. La prima fase, condotta tramite il software Altair Inspire 2022.3, è una fase di preparazione del modello e si configura come un'ottimizzazione solida. La seconda fase, condotta tramite Altair HyperWorks Desktop 2022, consiste nell'applicazione del metodo proposto al Capitolo 2.

La metodologia descritta al Capitolo 2 "Metodologia adottata" applicata alla TCM è riassumibile come segue ed è illustrata in Figura 32:

1. Generazione della Mesh Standard (MS);
2. Ottimizzazione lattice con MS;
3. Analisi delle tensioni principali;
4. Generazione Mesh Orientata (MO);
5. Ottimizzazione lattice con MO.

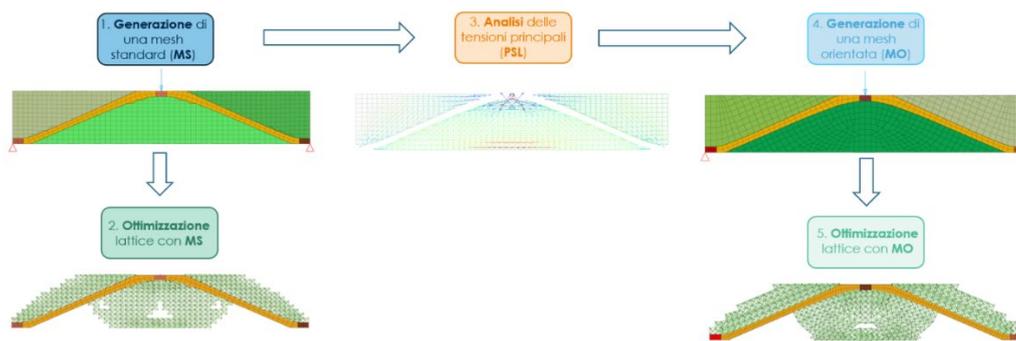


Figura 32 – Applicazione della metodologia di ottimizzazione alla TCM.

Prima di iniziare il processo di ottimizzazione lattice il modello viene preparato con una prima fase di ottimizzazione solida e successiva ricostruzione del design space per l'ottimizzazione lattice, come illustrato in Figura 33.

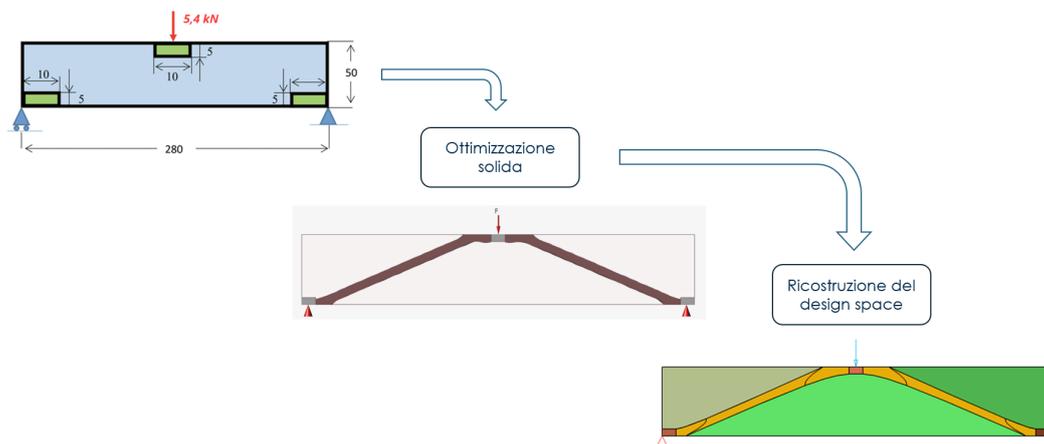


Figura 33 - TCM, preparazione del modello

### Scelta dei vincoli di ottimizzazione

Prima di iniziare il processo di ottimizzazione è necessario stabilire alcuni dei parametri di ottimizzazione. Dal momento che l'ottimizzazione è suddivisa in due fasi, bisogna adottare opportuni valori del vincolo di riduzione della massa. La massa obiettivo del componente finale ottimizzato è pari al 30% della massa del componente originale (329,7 g). Si impone che la massa della struttura lattice del componente ottimizzato sia il doppio della massa della struttura solida.

Sottraendo alla massa teorica del componente ottimizzato (329,7 g) la massa del non-design space (12,75 g) si ottiene la massa teorica generata nelle due fasi di ottimizzazione (105,65 g di struttura solida, 211,3 g di struttura lattice). Note la massa del design space originale (1086,25 g) e la massa teorica del design space della

fase di ottimizzazione lattice (980,6 g), si ricavano i valori ideali della frazione di volume da impostare nelle due fasi di ottimizzazione, pari a 9,73% per l'ottimizzazione solida e 21,54% per l'ottimizzazione lattice.

Pertanto, si scelgono come vincoli sulla frazione di volume:

- 10% per l'ottimizzazione solida;
- 20% per l'ottimizzazione lattice.

## 3.2. Preparazione del modello

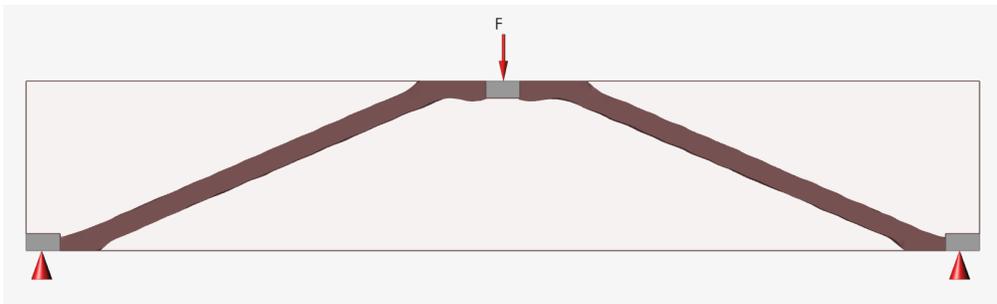
La prima fase si pone come obiettivo l'ottenimento di una struttura ottimizzata completamente solida. Per farlo, si importa la geometria del componente in Altair Inspire e si applicano le condizioni al contorno (boundary conditions, BC).

### 3.2.1. Ottimizzazione solida

L'ottimizzazione solida viene impostata come segue:

- Obiettivo: massimizzazione della rigidezza;
- Vincolo: massa del componente ottimizzato pari al 10% della massa del design space originale.

Il risultato di ottimizzazione è illustrato in Figura 34.



*Figura 34 - TCM, risultato di ottimizzazione solida.*

Il componente, ricostruito utilizzando lo strumento PolyNURBS, si presenta come in Figura 35.

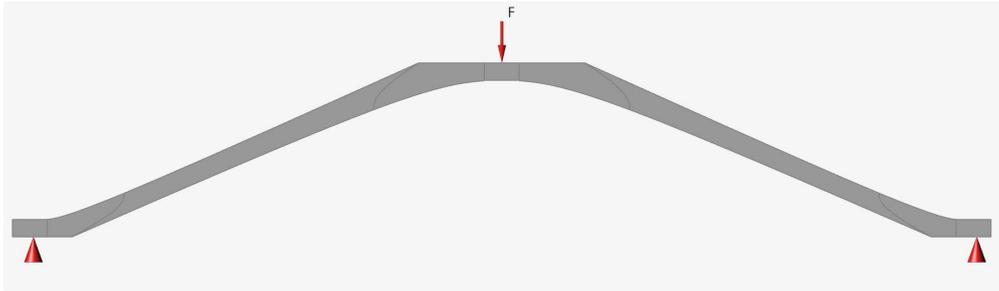


Figura 35 - TCM, risultato di ottimizzazione solida ricostruita tramite PolyNURBS.

La massa del componente è pari a 152,05 g, di cui 12,75 g di non-design space e 139,3 g di struttura solida generata.

### 3.2.2. Ricostruzione del design space

A questo punto il design space viene ricostruito mediante operazioni booleane di intersezione e unione. Il componente ricostruito (Figura 36) ha massa pari a 1099 g, pari a quella del componente originale, di cui 946,95 g di design space e 152,05 g di non-design space.

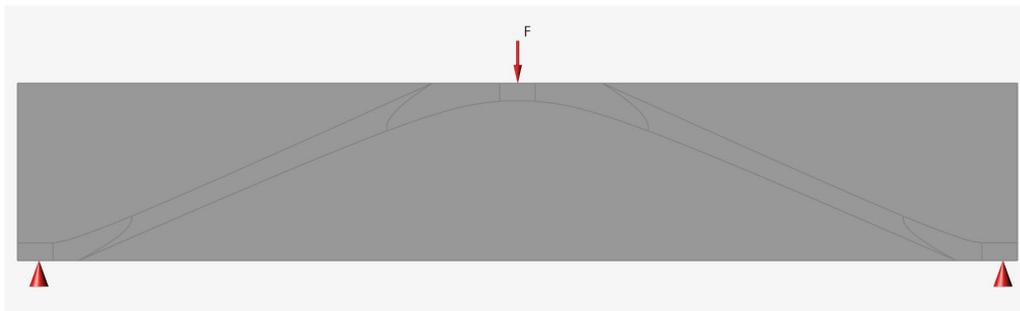


Figura 36 - TCM, ricostruzione del design space.

## 3.3. Applicazione della metodologia di ottimizzazione

### 3.3.1. Generazione della mesh standard

La fase di ottimizzazione lattice viene condotta in HyperWorks Desktop 2022. Il primo passo nell'ottimizzazione lattice è la generazione di una mesh. Come visto al paragrafo 2.1 "Generazione di una mesh standard" l'ottimizzatore Optistruct costruisce la struttura lattice sostituendo la cella elementare selezionata dall'utente ai singoli elementi di mesh volumetrica.

La mesh viene realizzata con elementi solidi di tipo HEXA (a sei facce) di lato compreso tra 4,1 mm e 5,0 mm. All'interfaccia con la struttura solida sono presenti alcuni elementi solidi prismatici di tipo PENTA (a cinque facce).

## Imposizione delle BC

Le condizioni al contorno per fase di ottimizzazione lattice sono le medesime della fase di ottimizzazione solida. Tuttavia in HyperWorks, diversamente da Inspire, le BC vanno assegnate non a delle superfici, ma a dei singoli nodi di mesh. Pertanto, la forza e i vincoli vengono distribuiti su diversi nodi, per evitare elevate concentrazioni di tensioni nei pochi elementi caricati.

I due vincoli vengono suddivisi tra sei nodi ciascuno, e il carico da  $5,4 \text{ kN}$  viene ripartito su tre nodi, con  $1,8 \text{ kN}$  su ciascun nodo. L'applicazione delle BC al componente è illustrata in Figura 37.

Model Info: C:/Users/nikca/OneDrive/Documents/POLITO/TESI/hyper/TCM - 17/beam\_17.hm\*

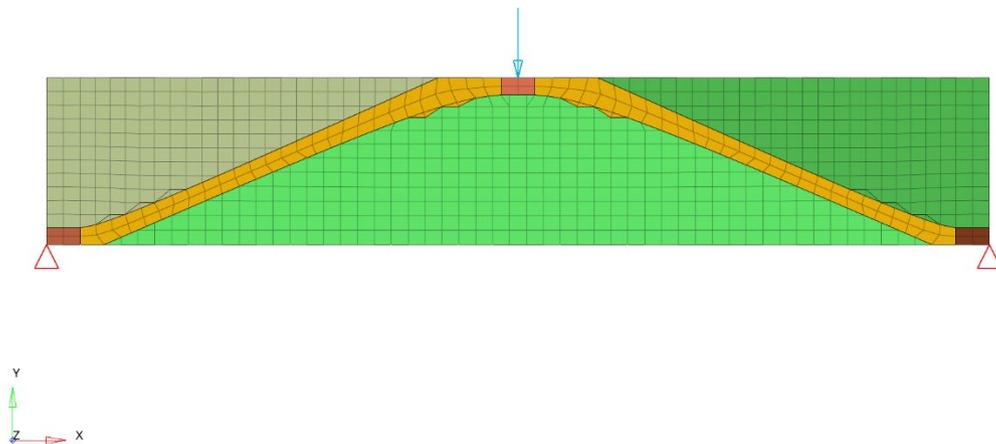


Figura 37 - TCM, MS, applicazione delle BC.

### 3.3.2. Ottimizzazione con mesh standard

#### Tipologia di cella

Per l'ottimizzazione lattice viene scelta la cella BCCxyz (Figura 38). Le motivazioni di questa scelta e le caratteristiche della cella sono state trattate al paragrafo 2.2.2 "Tipologia di cella".

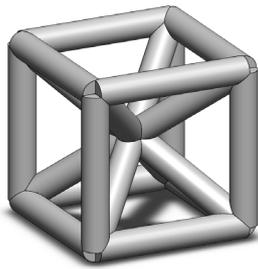


Figura 38 - Cella BCCxyz.

### Limiti di densità

Scelta la tipologia della cella, è necessario indicare l'intervallo di densità relativa in cui si vuole generare una struttura lattice. Il software HyperWorks è, infatti, predisposto per un'ottimizzazione ibrida solido-lattice-vuoto ed è possibile controllare la distribuzione delle strutture.

Al lancio dell'ottimizzazione, Optistruct elabora una mappa di densità in cui ad ogni elemento della mesh viene assegnato un valore di densità relativa, in base alle necessità strutturali.

Vengono scelti i valori:

- Limite di densità relativa inferiore: 10%;
- Limite di densità relativa superiore: 100%.

In questo modo la struttura generata non comprende una parte solida (già ottenuta dall'ottimizzazione solida in fase di preparazione del modello in Inspire), ma soltanto una struttura lattice, a partire da una densità relativa minima del 10%.

La struttura lattice generata è costituita da celle ciascuna di densità relativa pari a quella assegnata all'elemento di mesh solida che sostituisce, grazie alla variabilità della dimensione della sezione dei singoli elementi reticolari di ogni cella.

### Obiettivo e vincoli

L'ottimizzazione lattice viene impostata come segue:

- Obiettivo: minimizzazione della response compliance (spostamento);
- Vincolo: frazione di volume massima 20%.

In questo modo Optistruct ottimizza la struttura minimizzando gli spostamenti (quindi massimizzando la rigidezza), mantenendo la massa della struttura al di sotto del 20% della massa del design space ricostruito.

La massa attesa della struttura lattice generata è di 189,39 g, pari al 20% della massa del design space ricostruito (946,95 g).

Viene imposto un vincolo di simmetria per essere certi che la struttura ottimizzata sia simmetrica e viene lanciata l'ottimizzazione topologica lattice.

I parametri di ottimizzazione adottati sono riassunti in Tabella 6:

Tabella 6 - TCM, ottimizzazione con MS, parametri di ottimizzazione.

Cella	$\rho_{min}$	$\rho_{max}$	Obiettivo	Limite VF max
BCCxyz	0,1	1,0	minimizzazione compliance	0,20

### Risultati di ottimizzazione

La mappa di densità dell'ottimizzazione è illustrata in Figura 39.

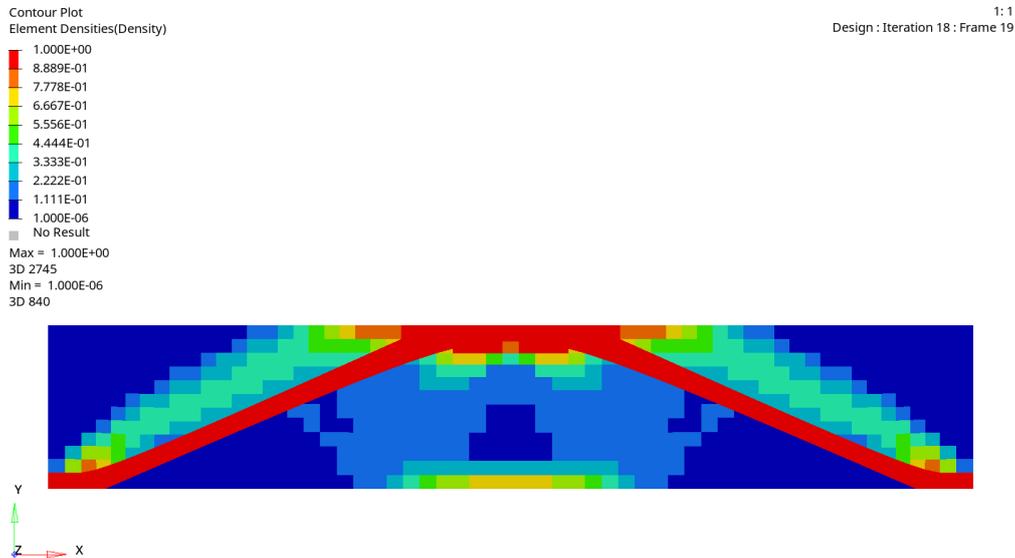


Figura 39 - TCM, ottimizzazione lattice con MS, mappa di densità.

La struttura ottimizzata si presenta come in Figura 40.

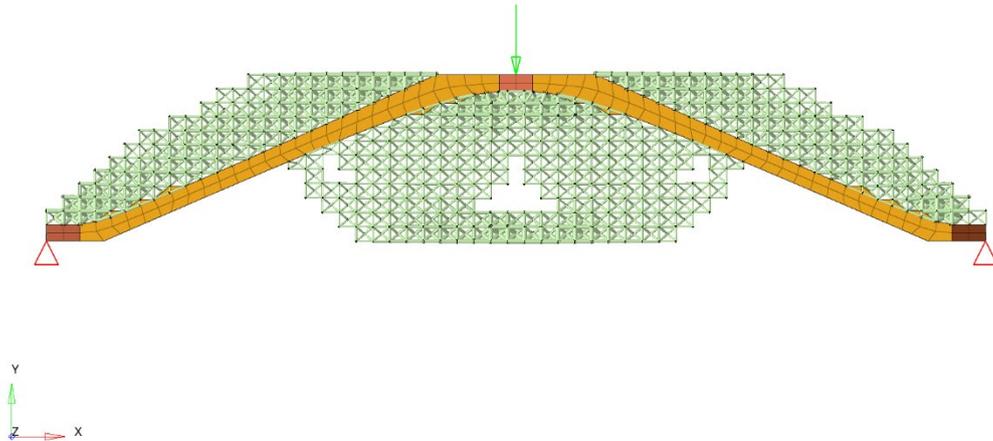


Figura 40 - TCM, ottimizzazione lattice con MS, risultato di ottimizzazione.

La massa del componente ottimizzato è pari a 363,3 g. Sottraendo a questa la massa del non design space (152,05 g) si ottiene la massa della struttura lattice generata, pari a 211,25 g (22,3% del design space ricostruito).

La massa del componente finale ottimizzato (363,3 g) è pari al 33% (accettabile dato l'obiettivo del 30%) della massa del componente originale (1099 g).

Il raggio degli elementi reticolari della struttura lattice è compreso tra i valori di 0,25 mm e 0,75 mm.

#### Analisi FEM dei risultati di ottimizzazione

Il componente ottimizzato viene sottoposto ad analisi FEM per valutarne gli spostamenti e le tensioni di von Mises negli elementi reticolari. I risultati di analisi in termini di spostamento e tensioni di von Mises negli elementi reticolari sono illustrati in Figura 41 e Figura 42.

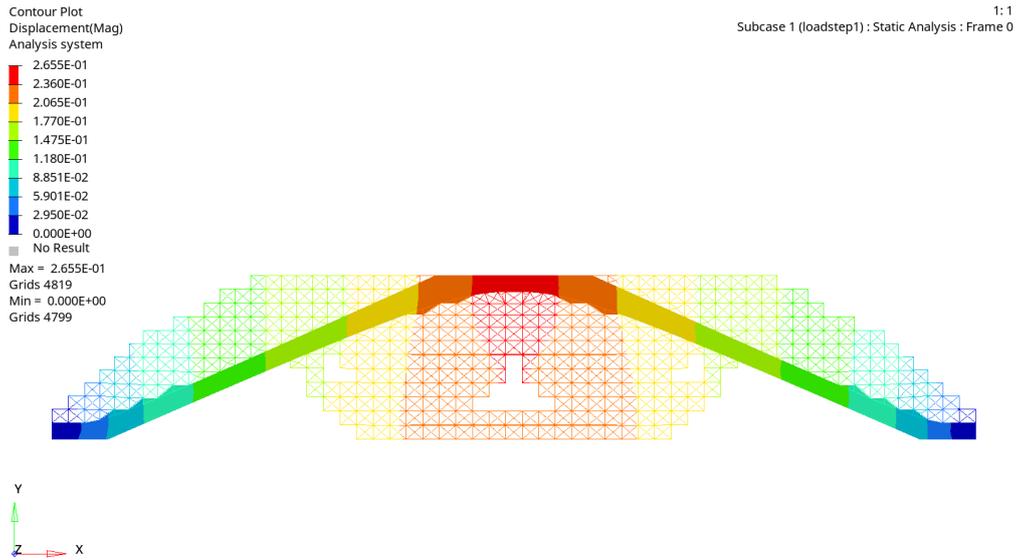


Figura 41 - TCM, ottimizzazione lattice con MS, spostamento.

Lo spostamento massimo è pari a 0,27 mm.

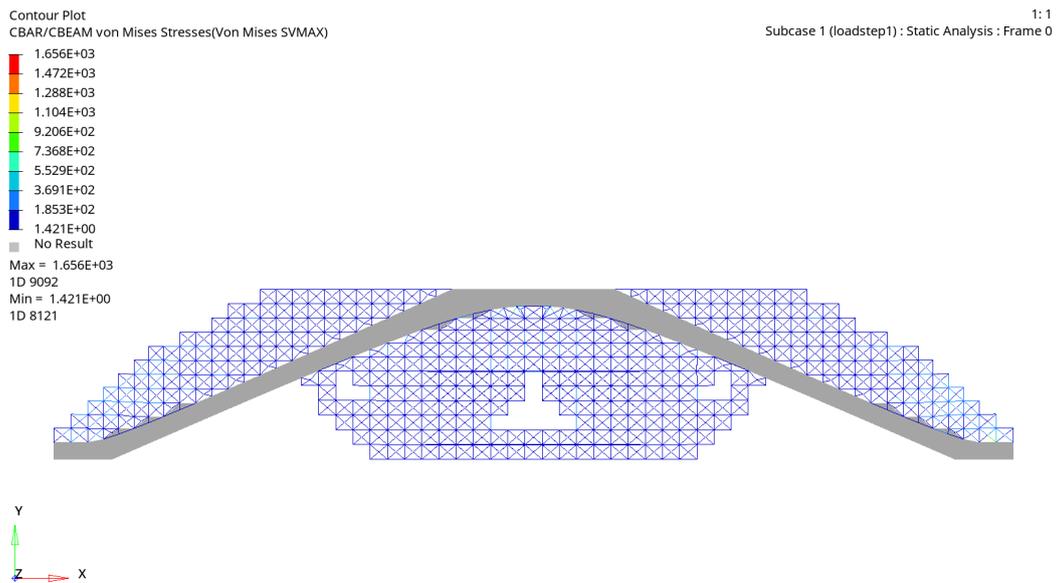


Figura 42 - TCM, ottimizzazione lattice con MS, tensioni di von Mises.

La tensione di von Mises massima negli elementi reticolari risulta pari a 1656 MPa, superiore alla tensione di snervamento dell'acciaio AISI 4340, pari a 862 MPa. Tuttavia, esportando i valori delle tensioni nei singoli elementi reticolari ed analizzandone la distribuzione (Figura 43), si nota come la tensione media è pari a 85,63 MPa, e valori di tensione superiori a circa 300 MPa vengono registrati soltanto in pochi elementi isolati.

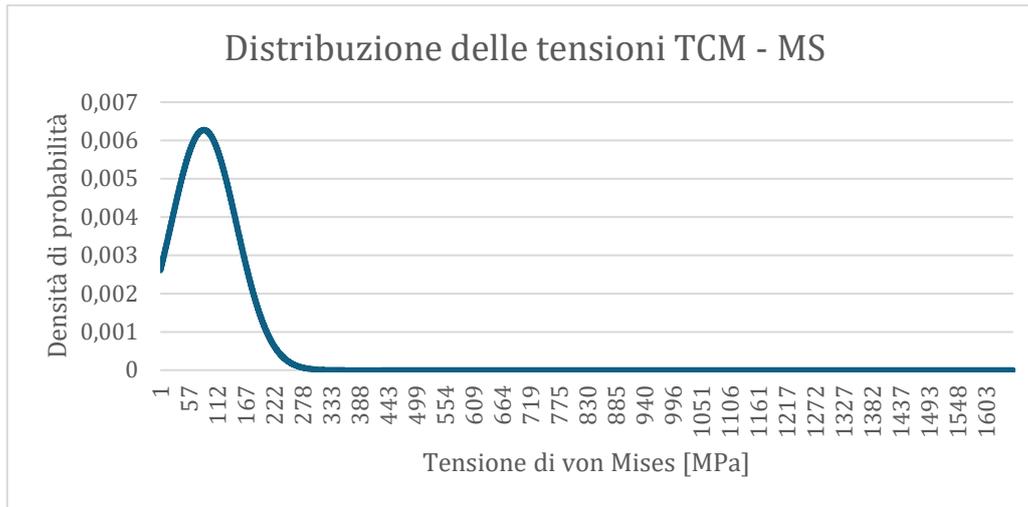


Figura 43 - TCM, ottimizzazione lattice con MS, distribuzione delle tensioni negli elementi reticolari.

In particolare, il 99,4% degli elementi reticolari è soggetto a tensioni inferiori al valore di soglia di  $S = 308 \text{ MPa}$ , calcolato come:

$$S = \mu + k * \delta$$

Dove  $\mu$  è il valore medio delle tensioni (pari a  $85,63 \text{ MPa}$ ),  $\delta$  è la deviazione standard (pari a  $63,6 \text{ MPa}$ ), e  $k$  è un coefficiente di valore pari a 3,5. La Figura 44 illustra un dettaglio della distribuzione delle tensioni nel componente ottimizzato con mesh standard, evidenziando il valore di tensione di soglia  $S = 308 \text{ MPa}$ .

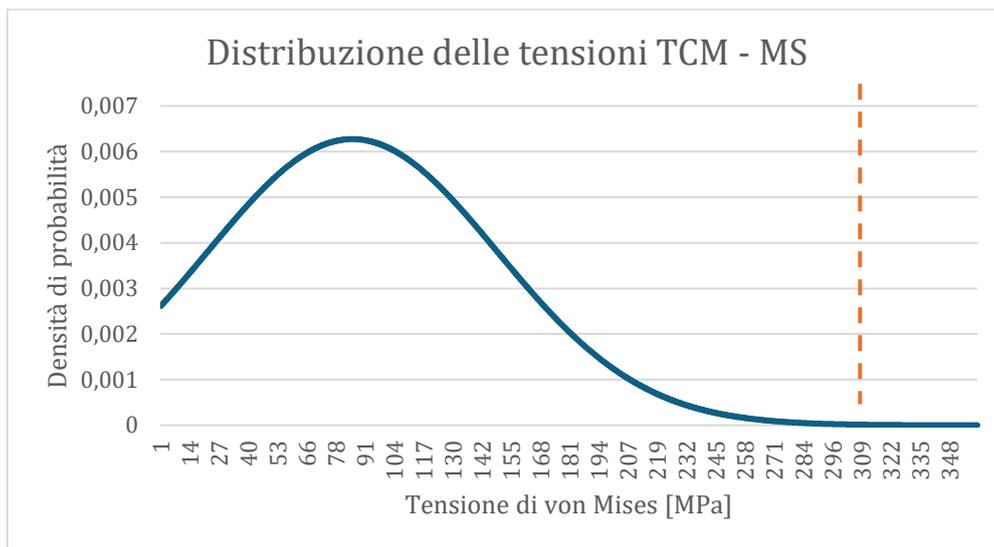


Figura 44 - TCM, ottimizzazione lattice con MS, distribuzione delle tensioni negli elementi reticolari, dettaglio

Soltanto lo 0,6% degli elementi è soggetto a valori di tensione superiori al valore di soglia.

### 3.3.3. Analisi delle tensioni principali

Come visto nel paragrafo 2.1 “Generazione di una mesh standard”, l’ottimizzatore Optistruct costruisce la struttura lattice sostituendo la cella elementare selezionata dall’utente ai singoli elementi di mesh volumetrica. Pertanto, per ottenere una struttura lattice ottimizzata con celle orientate il più possibile coerentemente con la direzione delle tensioni principali, è necessario operare sulla generazione della mesh.

Per la generazione della mesh orientata viene quindi preso come riferimento l’analisi delle tensioni principali del componente originale con mesh standard, illustrata in Figura 45.

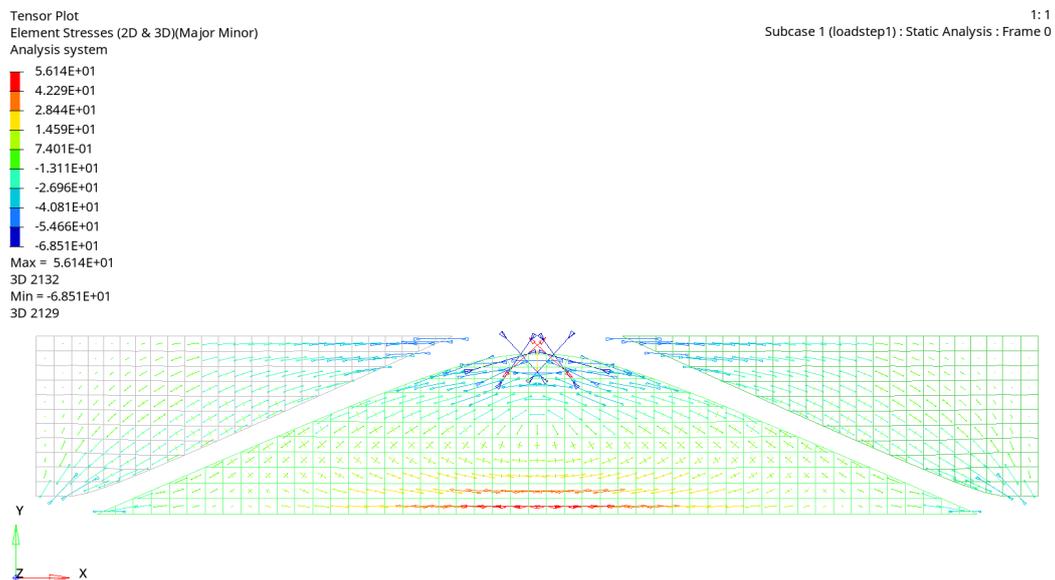


Figura 45 - TCM, analisi delle tensioni principali.

È possibile notare come soltanto pochi elementi della mesh siano allineati con le linee di tensione principale. In particolare, soltanto gli elementi sollecitati in compressione al di sotto della zona di applicazione del carico e gli elementi sollecitati in trazione tra i due vincoli sono orientati coerentemente con le PSL. Per ottenere una maggiore rigidità ed una migliore distribuzione delle tensioni, è quindi possibile modificare l’orientazione degli altri elementi, cercando di lasciare invariata quella degli elementi orientati già correttamente.

### 3.3.4. Generazione di una mesh orientata

Per la generazione della mesh orientata vengono effettuati diversi tentativi, il migliore dei quali è illustrato in Figura 46.

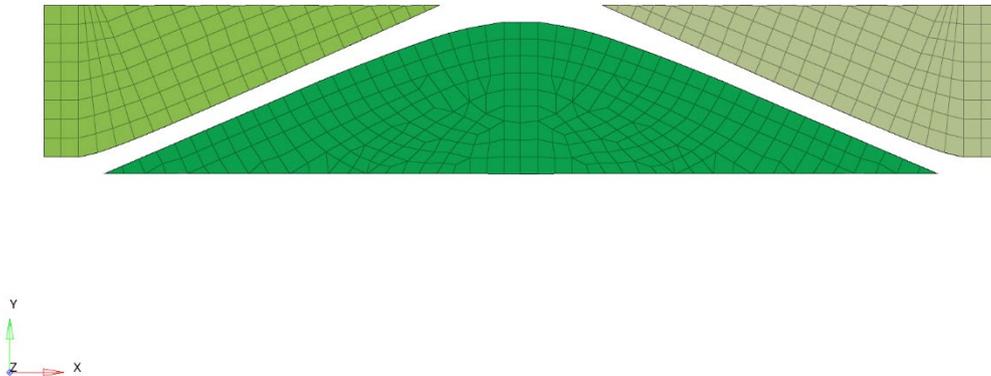


Figura 46 - TCM, generazione della MO.

Gli elementi della mesh vengono costruiti come elementi bidimensionali sulla faccia frontale e poi estrusi lungo lo spessore del componente come elementi volumetrici.

Come nel caso precedente, gli elementi solidi sono principalmente di tipo HEXA (a sei facce), e per assecondare le variazioni geometriche dovute alla curvatura delle linee di tensione sono presenti alcuni elementi solidi prismatici di tipo PENTA (a cinque facce).

### 3.3.5. Ottimizzazione con mesh orientata

#### Imposizione delle BC

Le condizioni al contorno per fase di ottimizzazione lattice con mesh orientata sono le medesime dell'ottimizzazione solida e dell'ottimizzazione con mesh standard. La forza e i vincoli vengono distribuiti su diversi nodi, per evitare elevate concentrazioni di tensioni nei pochi elementi caricati.

I due vincoli vengono suddivisi tra sei nodi ciascuno, e il carico da  $5,4 \text{ kN}$  viene ripartito su tre nodi, con  $1,8 \text{ kN}$  su ciascun nodo. L'applicazione delle BC al componente è illustrata in Figura 47.

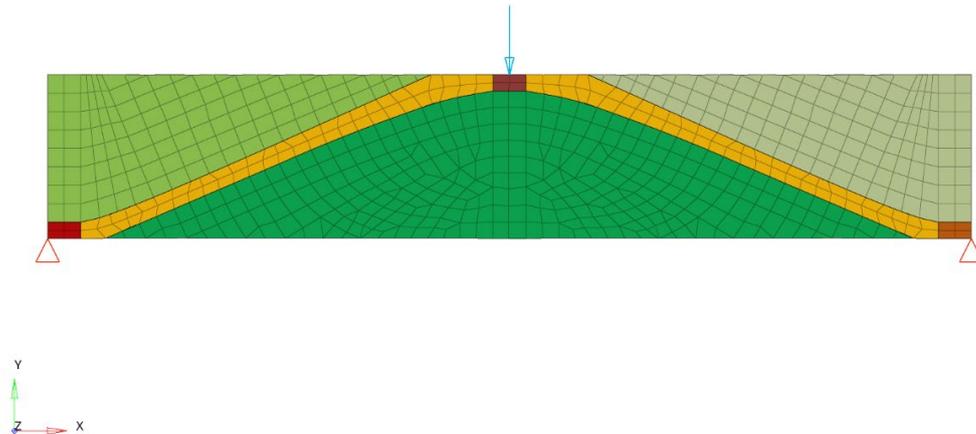


Figura 47 - TCM, MO, applicazione delle BC.

### Impostazione dei parametri di ottimizzazione

I parametri di ottimizzazione scelti sono i medesimi dell'ottimizzazione lattice con mesh standard, discussi nel dettaglio al paragrafo 3.3.2 "Ottimizzazione con mesh standard". Essi sono riportati in forma compatta in Tabella 7.

Tabella 7 - TCM, MO, parametri di ottimizzazione lattice.

Cella	$\rho_{min}$	$\rho_{max}$	Obiettivo	Limite VF max
BCCxyz	0,1	1,0	minimizzazione compliance	0,20

### Risultati di ottimizzazione

Prima di avviare l'ottimizzazione viene analizzato il componente con mesh orientata per verificare che gli elementi di mesh siano allineati con la direzione delle tensioni principali in ciascuno di essi (Figura 48).

Tensor Plot  
 Element Stresses (2D & 3D)(Major Minor)  
 Analysis system

4.467E+01
2.961E+01
1.454E+01
-5.198E-01
-1.558E+01
-3.065E+01
-4.571E+01
-6.077E+01
-7.584E+01
-9.090E+01

Max = 4.467E+01  
 3D 1507  
 Min = -9.090E+01  
 3D 892

1: 1  
 Subcase 1 (loadstep1) : Static Analysis : Frame 0

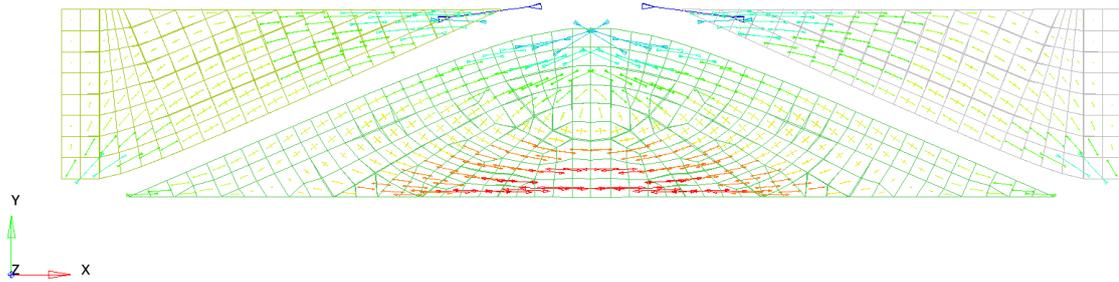


Figura 48 - TCM, MO, tensioni principali massima e minima.

La Figura 49 confronta la mappa delle tensioni principali nel componente con mesh standard e nel componente con mesh orientata.

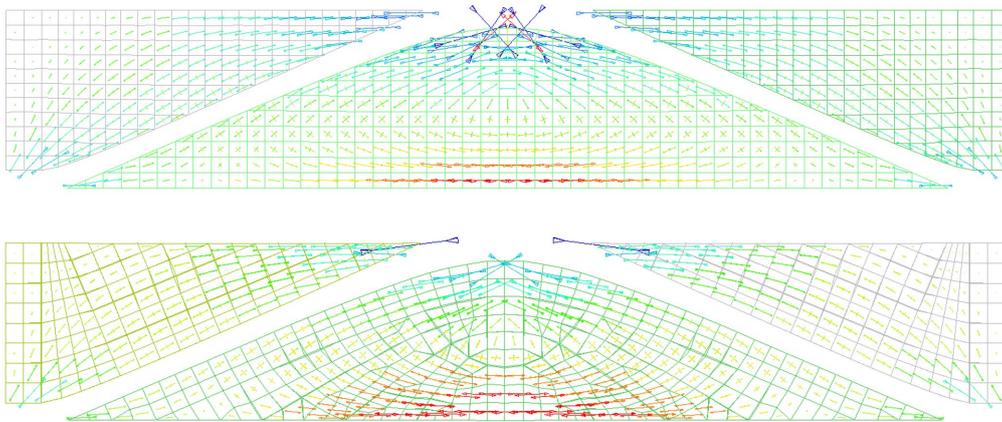


Figura 49 - TCM, MS e MO, confronto delle tensioni principali massima e minima.

Una volta lanciata l'ottimizzazione, la mappa di densità si presenta come in Figura 50.

Contour Plot  
Element Densities(Density)

1.000E+00
8.889E-01
7.778E-01
6.667E-01
5.556E-01
4.444E-01
3.333E-01
2.222E-01
1.111E-01
1.000E-06
No Result

Max = 1.000E+00  
3D 907  
Min = 1.000E-06  
3D 629

1: 1  
Design : Iteration 18 : Frame 19



Figura 50 - TCM, ottimizzazione lattice con MO, mappa di densità.

La struttura ottimizzata è illustrata in Figura 51.

Model Info: C:/Users/nikca/OneDrive/Documents/POLITO/TESI/hyper/TCM - 18/beam\_18\_lattice.hm\*

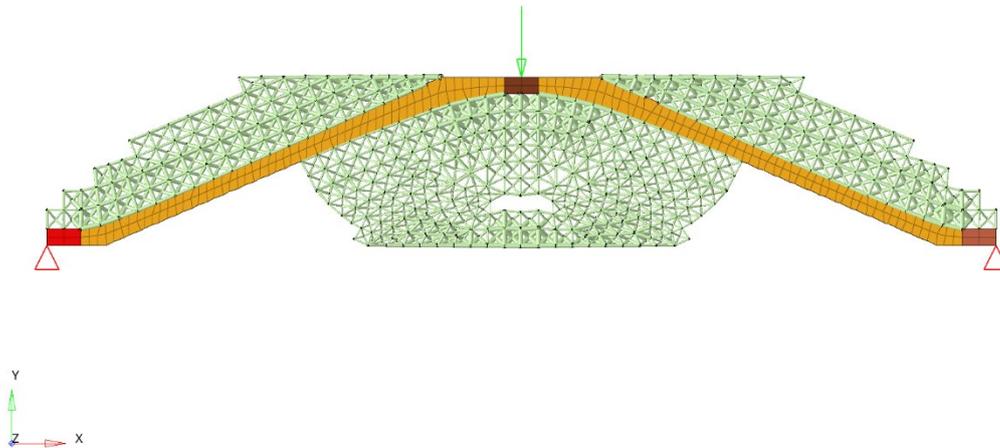


Figura 51 - TCM, ottimizzazione lattice con MO, risultato di ottimizzazione.

La massa del componente ottimizzato è pari a 360,9 g. Sottraendo a questa la massa del non design space (152,05 g) si ottiene la massa della struttura lattice generata, pari a 208,85 g (22,1% del design space ricostruito).

La massa del componente finale ottimizzato (360,9 g) è pari al 32,8% (accettabile dato l'obiettivo del 30%) della massa del componente originale (1099 g).

Il raggio degli elementi reticolari della struttura lattice è compreso tra i valori di  $0,25\text{ mm}$  e  $0,75\text{ mm}$ .

### Analisi FEM dei risultati di ottimizzazione

Il componente ottimizzato viene sottoposto ad analisi FEM per valutarne gli spostamenti e le tensioni di von Mises negli elementi reticolari. Figura 52 e Figura 53 illustrano i risultati di analisi in termini di spostamento e tensioni di von Mises.

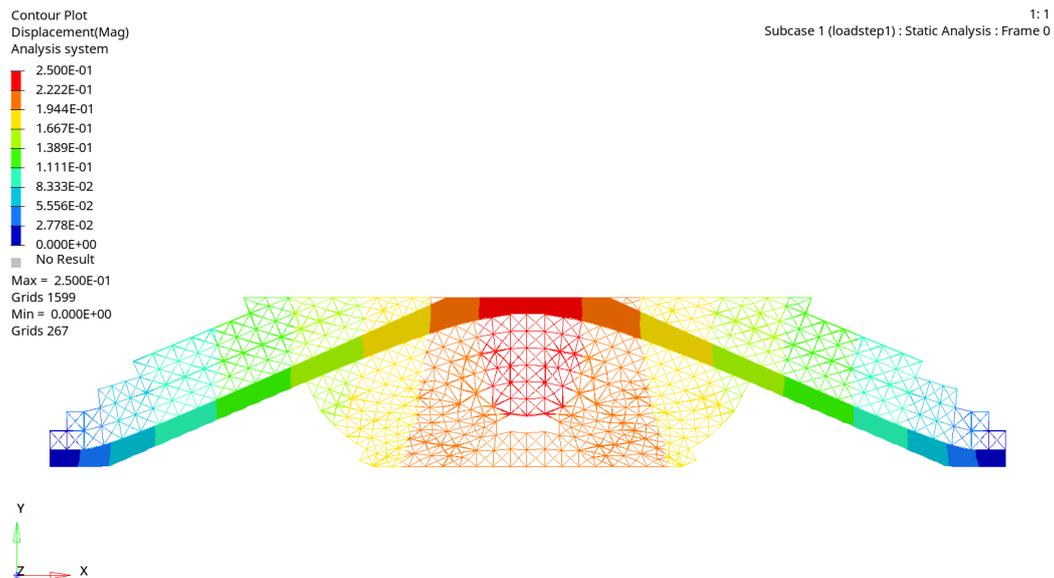


Figura 52 - TCM, ottimizzazione lattice con MO, spostamenti.

Lo spostamento massimo è pari a  $0,25\text{ mm}$ .

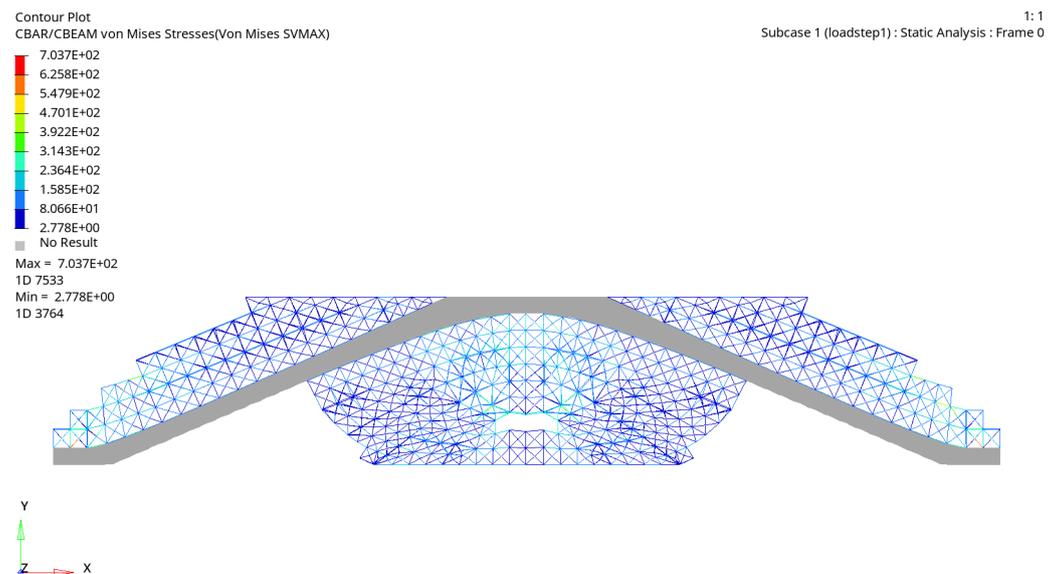


Figura 53 - TCM, ottimizzazione lattice con MO, tensioni di von Mises negli elementi reticolari.

La tensione di von Mises massima negli elementi reticolari è pari a 703,7 MPa. Tuttavia, esportando i valori delle tensioni nei singoli elementi reticolari ed analizzandone la distribuzione (Figura 54), si nota come la tensione media è pari a 81,42 MPa, e valori di tensione superiori a circa 250 MPa vengono registrati soltanto in pochi elementi isolati.

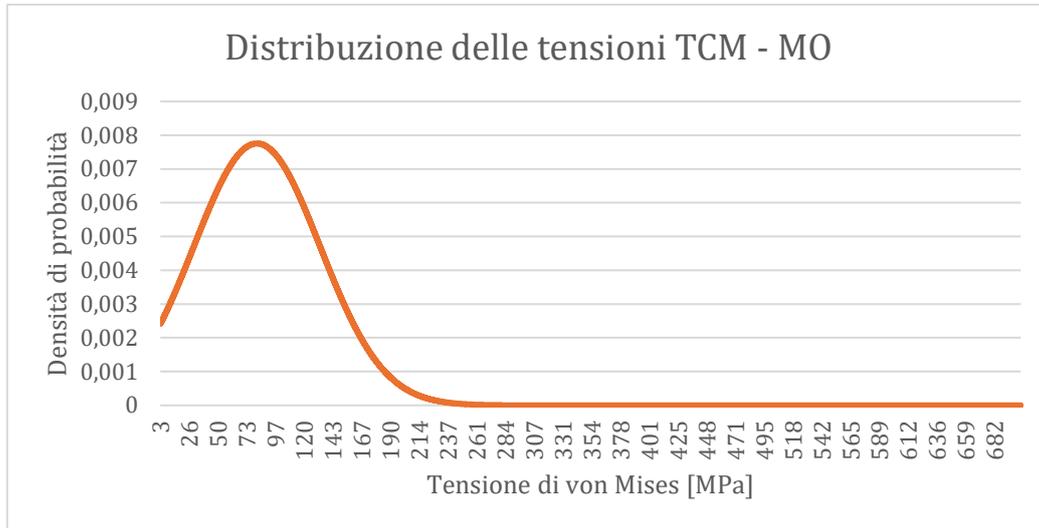


Figura 54 - TCM, ottimizzazione lattice con MO, distribuzione delle tensioni di von Mises negli elementi reticolari.

In particolare, il 99,3% degli elementi reticolari è soggetto a tensioni inferiori al valore di soglia di  $S = 261 \text{ MPa}$ , calcolato come:

$$S = \mu + k * \delta$$

Dove  $\mu$  è il valore medio delle tensioni (pari a 81,42 MPa),  $\delta$  è la deviazione standard (pari a 51,4 MPa), e  $k$  è un coefficiente di valore pari a 3,5. La Figura 55 illustra un dettaglio della distribuzione delle tensioni nel componente ottimizzato con mesh standard, evidenziando il valore di tensione di soglia  $S = 261 \text{ MPa}$ .

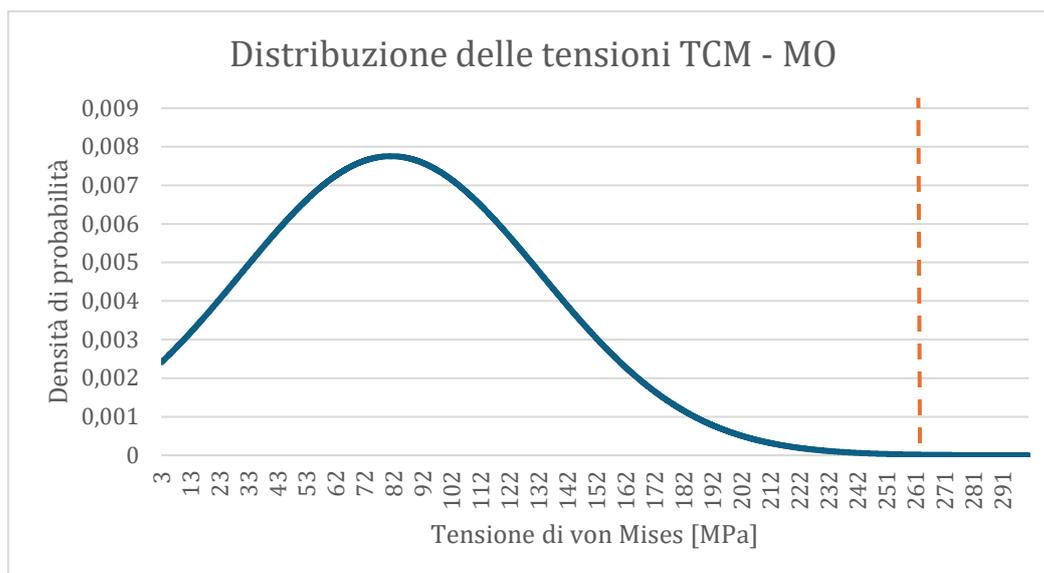


Figura 55 - TCM, ottimizzazione lattice con MO, distribuzione delle tensioni negli elementi reticolari, dettaglio.

Soltanto lo 0,6% degli elementi è soggetto a valori di tensione superiori al valore di soglia.

### 3.3.6. Confronto dei risultati

Per stabilire un confronto dei risultati focalizzato sulle proprietà di maggiore interesse dei componenti ottimizzati è stata elaborata la Tabella 8.

Tabella 8 - TCM, confronto dei risultati di ottimizzazione con MS e MO.

Modello	Massa [g]	Frazione di volume [%]	Spostamento massimo [mm]	Tensione di von Mises massima [MPa]	Media delle tensioni di von Mises [MPa]
Mesh Standard	363,3	33,06	0,27	1656	85,63
Mesh Orientata	360,9	32,84	0,25	704	81,42
<b>Delta MO/MS</b>	<b>-0,66%</b>	<b>-0,66%</b>	<b>-7,41%</b>	<b>-57,49%</b>	<b>-4,92%</b>

Il modello ottimizzato con mesh orientata esibisce un comportamento meccanico migliore sotto la data condizione di carico. Infatti, il modello ottimizzato con mesh orientata esibisce spostamenti, tensione massima e tensione media più bassi, a fronte di una massa inferiore a quella del modello ottimizzato con mesh standard. Pertanto, nonostante la massa del componente con mesh orientata sia più bassa, questo esibisce una maggiore rigidità ed una migliore distribuzione delle tensioni all'interno della

struttura, come evidenziato dalla Figura 43, che mette a confronto le distribuzioni delle tensioni negli elementi reticolari dei due componenti ottimizzati.

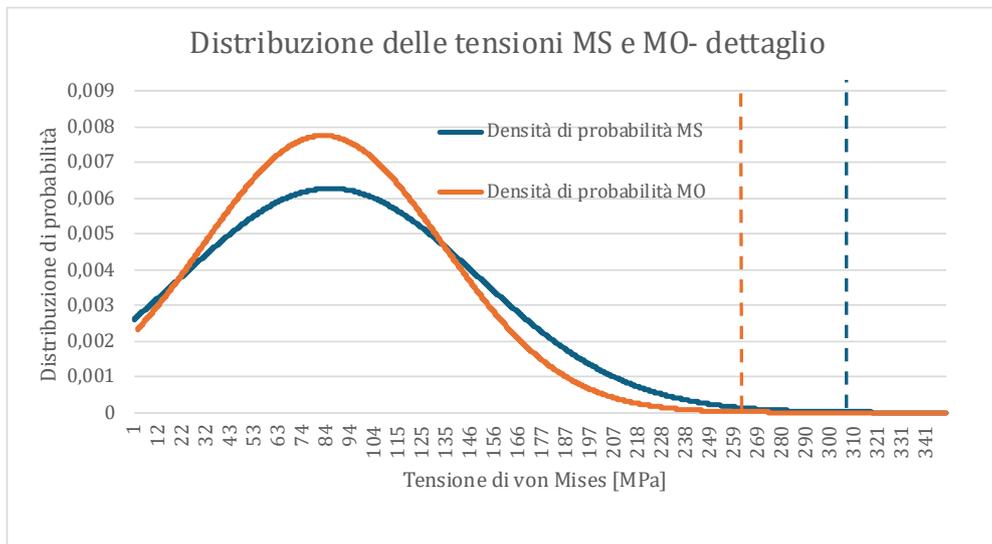


Figura 56 - TCM, confronto della distribuzione delle tensioni dei risultati di ottimizzazione con MS e MO

Il componente ottimizzato con mesh orientata, infatti, è caratterizzato da un maggior numero di elementi con valori di tensione intermedi, e un minor numero di elementi con valori di tensione elevati.

Infatti, il 99,3% degli elementi della struttura con MO sono sottoposti ad una tensione al di sotto del valore di soglia di 261 MPa, mentre nella struttura con MS il 99,4% degli elementi sono sottoposti ad una tensione inferiore al valore di soglia di 308 MPa.

Alla luce di questa analisi, è possibile affermare che orientare le celle ortotrope della struttura lattice coerentemente con la direzione delle tensioni principali del componente ha consentito di ottenere un vantaggio in termini strutturali.

# 4. Applicazione ad un profilo alare Eppler 420

## 4.1. Introduzione al componente e al processo di ottimizzazione

L'Eppler 420 è un profilo alare ampiamente studiato e impiegato nel campo dell'ingegneria aerospaziale, in particolare per le sue proprietà aerodinamiche e la sua adattabilità in configurazioni innovative. È un profilo alare cambered (con curvatura), si distingue per il suo camber sostanziale (elevata curvatura), ed è utilizzato sia in applicazioni aeronautiche che nelle pale di turbomacchine [22], [23], [24].

Il profilo trattato in questo lavoro (illustrato in Figura 57) è stato già oggetto di studio per il riempimento del volume interno con struttura lattice periodica [25]. La dimensione della corda è stata scalata opportunamente per adattare il profilo all'analisi condotta in questo lavoro. Il profilo è caratterizzato da una corda di 525 mm e da uno spessore di 9 mm. In Figura 57 il non-design space è evidenziato in viola, mentre il design space è evidenziato in verde. Il modello è costituito da 4 componenti:

- Front body;
- Outer body;
- Inner body, design space di massa;
- Back body.

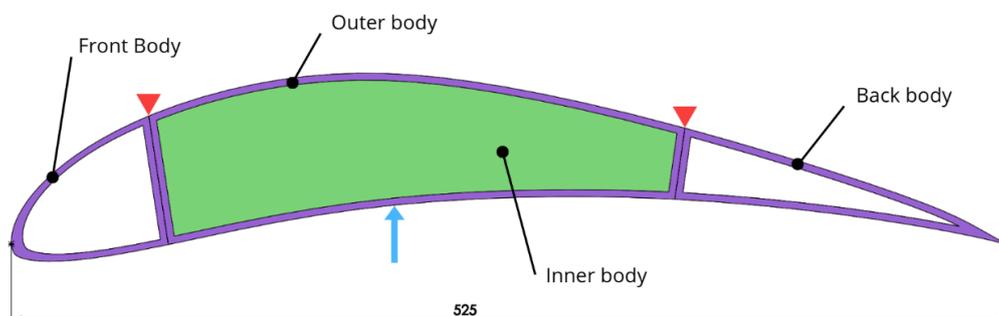


Figura 57 - Profilo alare Eppler 420 (E420), componenti e BC.

Ai fini di questa analisi, il componente è sottoposto alla condizione di carico illustrata in Figura 57, costituita da un carico concentrato di direzione coincidente con l'asse Y positivo, e vincolato con due incastri sulla superficie superiore.

### Processo di ottimizzazione

L'obiettivo finale è di ottenere una struttura ottimizzata ibrida solido-lattice-vuoto. La parte solida è già presente, essendo costituita dal non-design space. Pertanto, l'ottimizzazione del componente dovrà generare una struttura 100% lattice. Per farlo si fa uso soltanto del software HyperWorks Desktop 2022. Il processo di ottimizzazione è quindi più semplice rispetto a quello adottato nel caso della trave caricata in mezzeria (paragrafo 3.1 "Introduzione al componente e al processo di ottimizzazione") poiché non c'è bisogno di preparare il modello con un'ottimizzazione solida e una successiva ricostruzione del design space per l'ottimizzazione lattice. Il processo di ottimizzazione segue il flusso del metodo sviluppato in questo lavoro, descritto al Capitolo 2 "Metodologia adottata". L'applicazione della metodologia al componente E420 è illustrata in Figura 58.

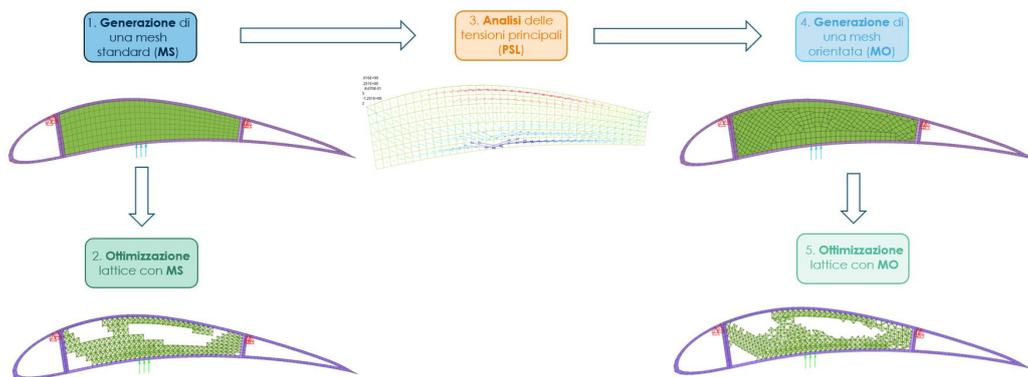


Figura 58 - Applicazione della metodologia di ottimizzazione al componente E420.

Prima di applicare la metodologia al componente è necessario scegliere il materiale da utilizzare e determinare i parametri della mesh e dell'ottimizzazione.

## 4.2. Scelta del materiale e dei parametri della mesh e di ottimizzazione

La scelta dei parametri della mesh e dei parametri di ottimizzazione è fortemente condizionata dal materiale e dalla tecnologia di fabbricazione adottata. Visto l'intento di validare sperimentalmente i risultati di ottimizzazione, è necessario scegliere un materiale e una tecnica di fabbricazione additiva. La tecnica scelta è la Fused

Deposition Melting (FDM), attualmente la tecnologia di stampa 3D più comunemente utilizzata per le plastiche. La sua popolarità deriva principalmente dal suo basso costo, dall'ampia gamma di materiali utilizzabili, dalla capacità di produrre oggetti durevoli e robusti, e dalla sua velocità di stampa [26], [27], [28].

Per la realizzazione dei componenti si sceglie la stampante 3D Bambu Lab X1E [29]. È quindi necessario testare le capacità realizzative della macchina con diversi materiali, al fine di selezionare i parametri di ottimizzazione più adeguati per la generazione della struttura lattice.

## Materiali

I materiali oggetto di analisi sono:

- Nylon 6 rinforzato con fibre corte di carbonio (PA6-CF);
- Acido polilattico (PLA-Basic).

Le proprietà meccaniche di interesse dei due materiali sono confrontate in Tabella 9.

*Tabella 9 - Proprietà meccaniche di interesse dei materiali PA6-CF e PLA [30], [31].*

<b>Materiale</b>	$\rho$ [ $g/cm^3$ ]	$E$ [ $MPa$ ]	$\nu$	$\sigma_R$ [ $MPa$ ]
<b>PA6-CF</b>	1,09	2170	0,39	48
<b>PLA-Basic</b>	1,24	2060	0,33	31

Il Nylon PA6 caricato con fibre corte di carbonio è un composito caratterizzato da ottime caratteristiche meccaniche di rigidità e resistenza in ambiente asciutto. Offre buona resistenza chimica e agli urti, rendendolo adatto a condizioni ambientali difficili. La sua leggerezza lo rende ideale per applicazioni nei settori aerospaziale, automobilistico e industriale [30].

Il PLA è un materiale termoplastico biodegradabile. È una delle materie plastiche più comuni utilizzate nella stampa 3D. Ha temperature di fusione relativamente basse, il che lo rende conveniente per la fusione durante il processo di estrusione nella tecnologia FDM, pur essendo sufficiente per mantenere la forma degli oggetti stampati a temperature d'uso moderate [26], [27], [31].

#### 4.2.1. Produzione di provini di celle lattice

Per scegliere il materiale e i parametri della struttura lattice vengono realizzati dei provini della cella elementare BCCxyz in PA6-CF e in PLA-Basic con la Bambu Lab X1E, facendo variare due dimensioni caratteristiche della cella:

- Lato della cella;
- Diametro degli elementi reticolari.

In particolare, viene realizzata una matrice in cui:

- Sulle colonne è presente il lato della cella ( $L$ ), che varia tra i valori di 10 mm e 4 mm;
- Sulle righe è presente il raggio degli elementi ( $R$ ), che varia tra i valori di 0,2 mm e 1,4 mm.

Ad ogni elemento della matrice è assegnato un identificativo costituito da una lettera (corrispondente alla dimensione del lato della cella) e un numero (corrispondente alla dimensione del raggio degli elementi della cella). La Tabella 10 illustra il rapporto  $R/L$  di ciascun elemento della matrice così costruita.

Tabella 10 - Matrice dei provini, rapporto  $R/L$ .

		A	B	C	D	E	F	G	
		L [mm]							
		10	9	8	7	6	5	4	
1	R [mm]	0,2	0,0200	0,0200	0,0222	0,0250	0,0286	0,0333	0,0400
2		0,4	0,0400	0,0400	0,0444	0,0500	0,0571	0,0667	0,0800
3		0,6	0,0600	0,0600	0,0667	0,0750	0,0857	0,1000	0,1200
4		0,8	0,0800	0,0800	0,0889	0,1000	0,1143	0,1333	0,1600
5		1,0	0,1000	0,1000	0,1111	0,1250	0,1429	0,1667	0,2000
6		1,2	0,1200	0,1200	0,1333	0,1500	0,1714	0,2000	0,2400
7		1,4	0,1400	0,1400	0,1556	0,1750	0,2000	0,2333	0,2800

Il numero degli elementi della matrice è pari a 49.

A questo punto è possibile valutare per ogni cella la frazione di volume rispetto ad una cella solida di pari dimensioni. In questo modo si possono scartare le celle con frazione di volume  $VF \geq 1$ , dal momento che non sarebbero utili ad un processo di ottimizzazione. La Tabella 11 mostra la frazione di volume corrispondente ad ogni elemento della matrice:

Tabella 11 - Matrice dei provini, frazione di volume.

		A	B	C	D	E	F	G	
		Lato [mm]							
		10	9	8	7	6	5	4	
1	Raggio [mm]	0,2	0,0231	0,0284	0,0358	0,0465	0,0629	0,0897	0,1380
2		0,4	0,0897	0,1100	0,1380	0,1783	0,2391	0,3370	0,5097
3		0,6	0,1957	0,2391	0,2986	0,3833	0,5096	0,7094	1,0511
4		0,8	0,3370	0,4101	0,5096	0,6498	0,8557	1,1742	1,6988
5		1	0,5096	0,6175	0,7631	0,9658	1,2583	1,6987	2,3886
6		1,2	0,7094	0,8557	1,0511	1,3194	1,4815	2,2400	3,0750
7		1,4	0,9323	1,1190	1,3656	1,6035	1,8519	2,8000	4,6875

Eliminando gli elementi con valore della frazione di volume  $VF \geq 1$ , il numero di elementi della matrice si riduce a 32. La matrice semplificata è illustrata in Tabella 12.

Tabella 12 - Matrice dei provini, frazione di volume degli elementi di interesse.

		A	B	C	D	E	F	G	
		L [mm]							
		10	9	8	7	6	5	4	
1	R [mm]	0,2	0,0200	0,0200	0,0222	0,0250	0,0286	0,0333	0,0400
2		0,4	0,0400	0,0400	0,0444	0,0500	0,0571	0,0667	0,0800
3		0,6	0,0600	0,0600	0,0667	0,0750	0,0857	0,1000	
4		0,8	0,0800	0,0800	0,0889	0,1000	0,1143		
5		1	0,1000	0,1000	0,1111	0,1250			
6		1,2	0,1200	0,1200					
7		1,4	0,1400						

Si nota come le celle eliminate sono tutte quelle con rapporto  $R/L \geq 0,15$ .

Le 32 celle elementari vengono modellate in SOLIDWORKS, parametrizzando la geometria usando come variabili  $R$  e  $L$ .

I provini vengono realizzati con ugello da  $0,4 \text{ mm}$ , con riempimento al 100%, e impostando il profilo di stampa "0.08mm Extra Fine @BBL X1C", in maniera tale che l'altezza di ogni layer sia pari a  $0,08 \text{ mm}$ , la più bassa disponibile. Per migliorare l'adesione al piano di stampa, viene impostato un brim esterno e interno da  $3 \text{ mm}$ . Per il resto dei parametri di stampa vengono usate le impostazioni predefinite caratteristiche dei due diversi materiali [29], [30], [31]. Per la realizzazione dei provini non viene fatto uso di supporti, che diventerebbero difficili da separare nella struttura lattice da generare per il componente Eppler 420.

#### 4.2.2. Risultati di analisi dei provini

I provini realizzati in PA6-CF presentano molte difettosità, evidenziate in Figura 59.



*Figura 59 - Difettosità dei provini in PA6-CF.*

I provini realizzati in PLA-Basic si presentano come in Figura 60.



*Figura 60 - Provini in PLA-Basic.*

Si nota come la stampa sia fallita per tutti i provini della prima riga, corrispondenti a un raggio  $R = 0,2 \text{ mm}$ . Sulla seconda riga ( $R = 0,4 \text{ mm}$ ) sono presenti dei difetti nelle celle della prima e seconda colonna (evidenziati nel dettaglio in Figura 61), con valore del lato  $L = 10 \text{ mm}$  e  $L = 9 \text{ mm}$ .

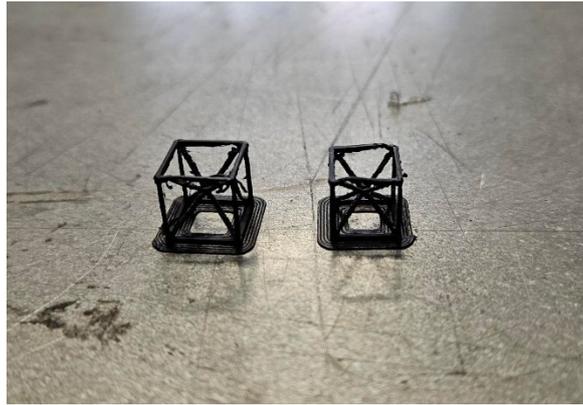


Figura 61 - Provini in PLA-Basic, dettaglio delle celle con difettosità

Alla luce delle diffuse difettosità riscontrate nei provini realizzati in PA6-CF, il materiale viene escluso.

Vista, invece, la buona qualità complessiva dei provini realizzati in PLA-Basic, si sceglie di adottarlo come materiale per il componente Eppler 420. Tuttavia, per garantire una buona qualità dei componenti ottimizzati da stampare con struttura lattice, le caratteristiche dimensionali delle celle vanno limitate come segue:

- $R \geq 0,4 \text{ mm}$ ;
- $4 \leq L < 9 \text{ mm}$ .

A questo punto è possibile passare all'applicazione della metodologia di ottimizzazione.

### 4.3. Applicazione della metodologia di ottimizzazione

La metodologia sviluppata viene applicata al componente Eppler 420 come illustrato in Figura 62.

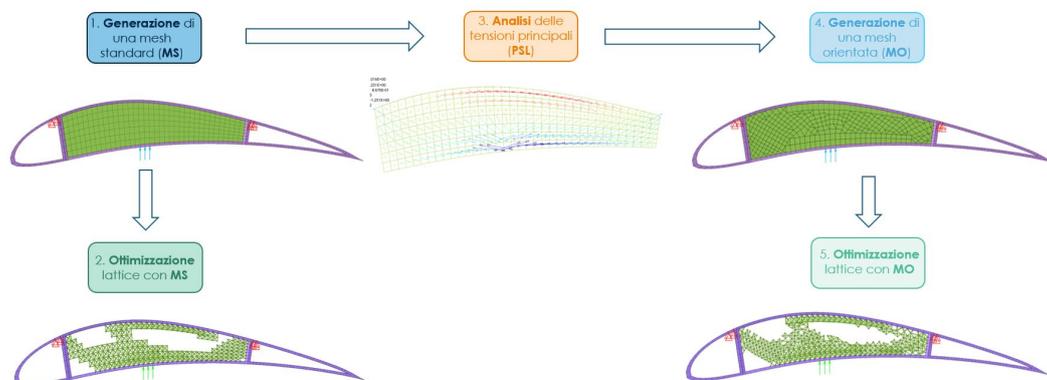


Figura 62 - E420, applicazione della metodologia di ottimizzazione sviluppata.

#### 4.3.1. Generazione della mesh standard e analisi del componente originale

La massa complessiva del componente originale in PLA-Basic è pari a 178,8 g. La massa del design space è pari a 129,2 g, quella del non-design space 49,6 g.

Viene condotta analisi FEM del componente in HyperWorks Desktop 2022. Sia il non-design space che il design space vengono meshati con elementi solidi di tipo HEXA. La dimensione degli elementi del design space è compresa tra 8,84 mm e 4,47 mm, che rientrano nei limiti determinati al paragrafo precedente. Per evitare un'eccessiva concentrazione delle tensioni in pochi elementi in corrispondenza delle zone di applicazione delle BC, il carico, di 120 N, viene ripartito su sei nodi (20 N su ciascun nodo) e i vincoli vengono ripartiti tra otto nodi ciascuno. Il componente meshato e sottoposto alle BC si presenta come in Figura 63.

Model Info: C:/Users/nikca/OneDrive/Documents/POLITO/TEST/hyper/Eppler\_420/eppler\_lattice\_optimizations/eppler\_07/eppler\_07.hm\*

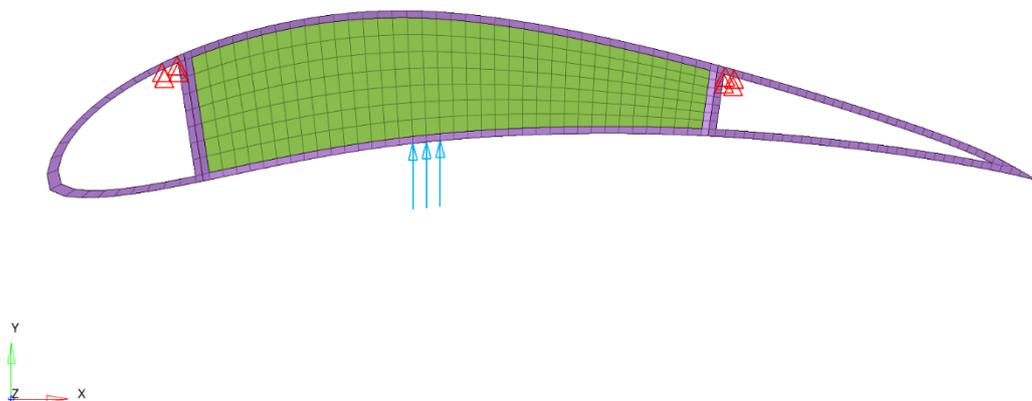


Figura 63 - E420, MS, applicazione delle BC.

I risultati di analisi in termini di spostamento massimo e tensione di von Mises massima sono illustrati in Figura 64 e Figura 65.

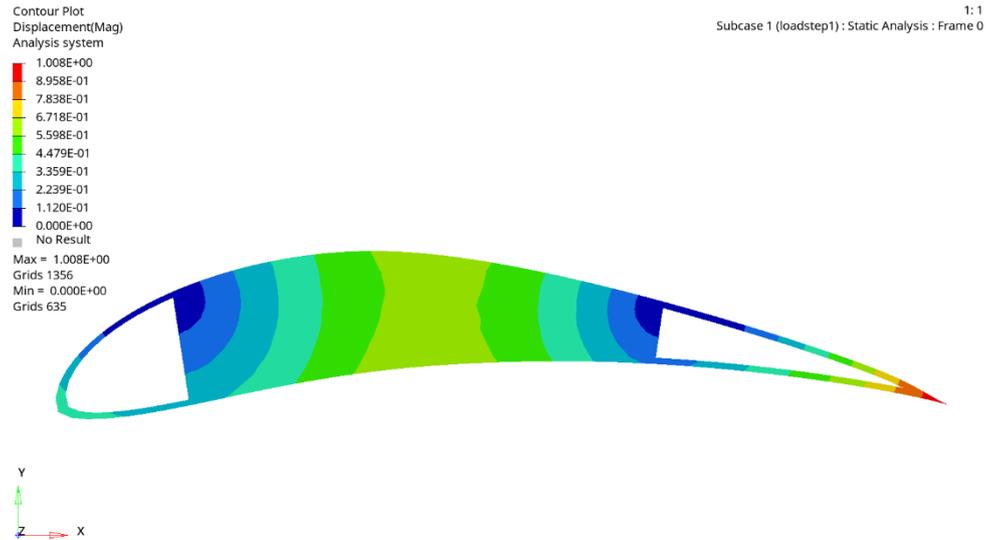


Figura 64 - E420, analisi del componente originale, spostamenti.

Lo spostamento massimo è pari a 1 mm.

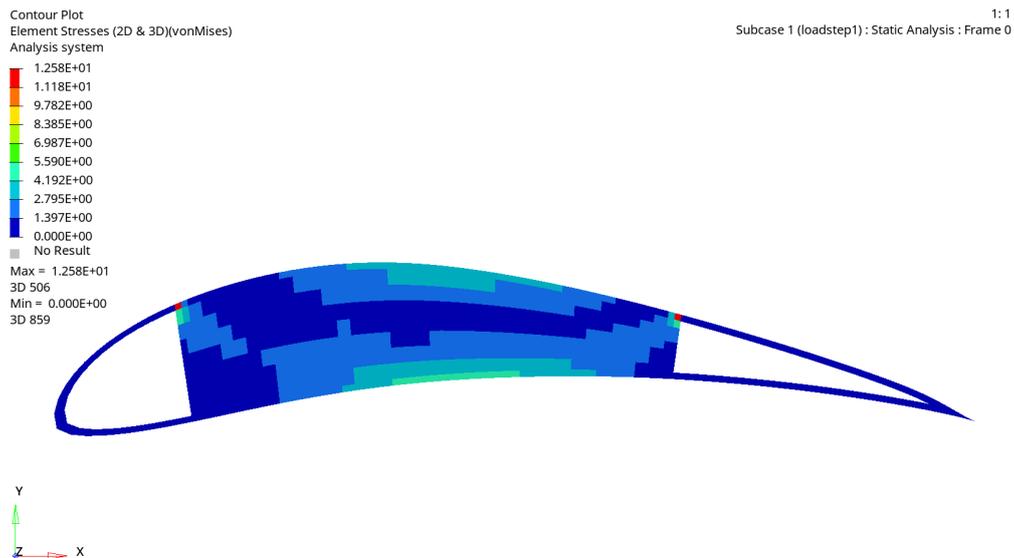


Figura 65 - E420, analisi del componente originale, tensioni di von Mises.

La tensione di von Mises massima è pari a 12,58 MPa.

#### 4.3.2. Ottimizzazione con mesh standard

##### Impostazione dei parametri di ottimizzazione

La tipologia di cella e l'obiettivo sono i medesimi del caso della TCM, già discussi al paragrafo 3.3.2 "Ottimizzazione con mesh standard". Come limite di densità inferiore viene scelto il valore di 0,16, mentre il limite superiore resta pari a 1,0. L'unico altro parametro di ottimizzazione da ridefinire è il vincolo sulla frazione di volume.

### Scelta dei vincoli di ottimizzazione

Prima di iniziare il processo di ottimizzazione è necessario stabilire il valore del vincolo sulla frazione di volume. Come massa obiettivo del componente finale ottimizzato si sceglie il 50% della massa del componente originale (89,4 g).

Sottraendo alla massa teorica del componente ottimizzato (89,4 g) la massa del non-design space (49,6 g) si ottiene la massa teorica da generare in fase di ottimizzazione (39,8 g di struttura lattice). Note la massa del design space (129,2 g) e la massa teorica della struttura lattice da generare (39,8 g), si ricava il valore ideale della frazione di volume da impostare in fase di ottimizzazione lattice, pari a 30,8%. Pertanto, si sceglie come vincolo sulla frazione di volume il valore di 0,30.

Inoltre, alla luce dell'analisi condotta sui provini delle celle al paragrafo 4.2.1 "Produzione di provini di celle lattice", vengono impostati un limite minimo e un limite massimo al raggio degli elementi reticolari, pari rispettivamente a 0,4 mm e 1,0 mm.

I parametri di ottimizzazione adottati sono riassunti in Tabella 13:

Tabella 13 - E420, MS, parametri di ottimizzazione.

<b>Cella</b>	$\rho_{min}$	$\rho_{max}$	<b>Obiettivo</b>	<b>Limite VF max</b>	$R_{min}$ [mm]	$R_{max}$ [mm]
BCCxyz	0,16	1,0	minimizzazione compliance	0,30	0,4	1,0

### Risultati di ottimizzazione

La mappa di densità dell'ottimizzazione è illustrata in Figura 66.

Contour Plot  
Element Densities(Density)

1:1  
Design : Iteration 12 : Frame 13

1.000E+00  
8.951E-01  
7.902E-01  
6.853E-01  
5.804E-01  
4.755E-01  
3.707E-01  
2.658E-01  
1.609E-01  
5.599E-02  
No Result  
Max = 1.000E+00  
3D 288  
Min = 5.599E-02  
3D 498

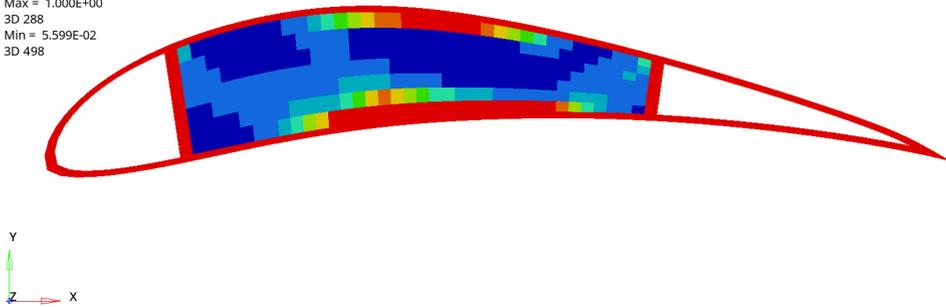


Figura 66 - E420, ottimizzazione con MS, mappa di densità.

La struttura ottimizzata si presenta come in Figura 67 e in Figura 68, in cui sono nascosti i componenti Front body e Back body, non utili all'analisi.

Model Info: C:/Users/nikka/OneDrive/Documents/POLITO/TESTI/hyper/Eppler\_420/eppler\_lattice\_optimizations/eppler\_08/eppler\_08\_MS/eppler\_08\_MS\_lattice\_0.16.hm

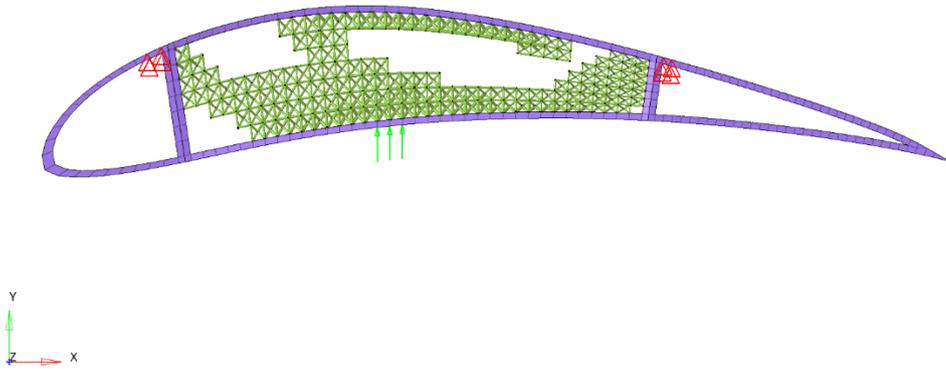


Figura 67 - E420, ottimizzazione con MS, risultati.

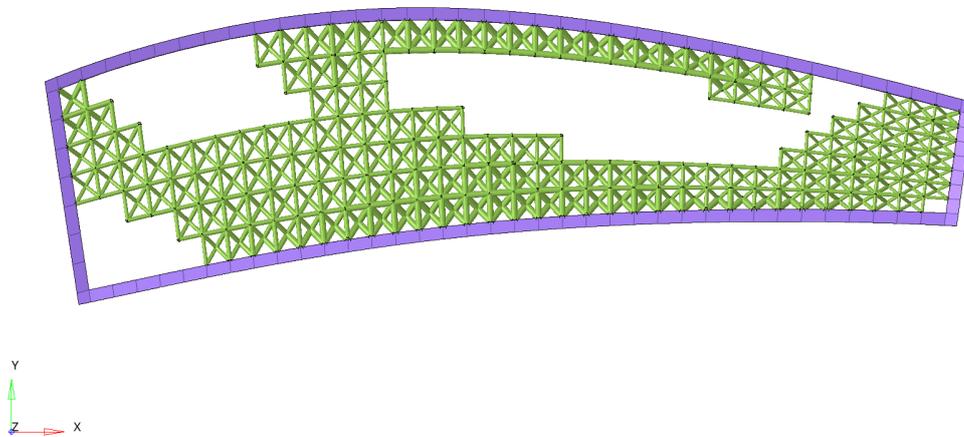


Figura 68 - E420, ottimizzazione con MS, risultati di ottimizzazione, dettaglio della struttura lattice.

La massa del componente ottimizzato è pari a 80,54 g. Sottraendo a questa la massa del non design space (49,6 g) si ottiene una massa della struttura lattice generata di 30,93 g, pari al 24% della massa del design space iniziale (129,2 g).

La massa del componente finale ottimizzato (80,54 g) è pari al 45,04% (accettabile dato l'obiettivo del 50%) della massa del componente originale (178,8 g).

Il raggio degli elementi reticolari della struttura lattice è compreso tra i valori di 0,47 mm e 1,00 mm, all'interno del range di stampabilità.

#### Analisi FEM dei risultati di ottimizzazione

Il componente ottimizzato viene sottoposto ad analisi FEM per valutarne gli spostamenti e le tensioni di von Mises negli elementi reticolari. I risultati di analisi sono illustrati in Figura 69 e in Figura 70.

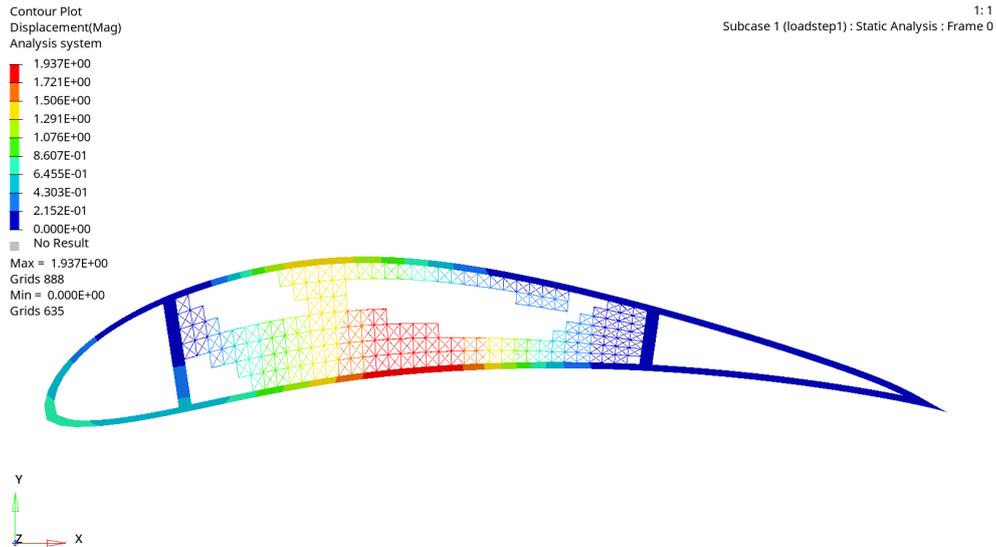


Figura 69 - E420, ottimizzazione con MS, spostamenti.

Lo spostamento massimo è pari a 1,94 mm.

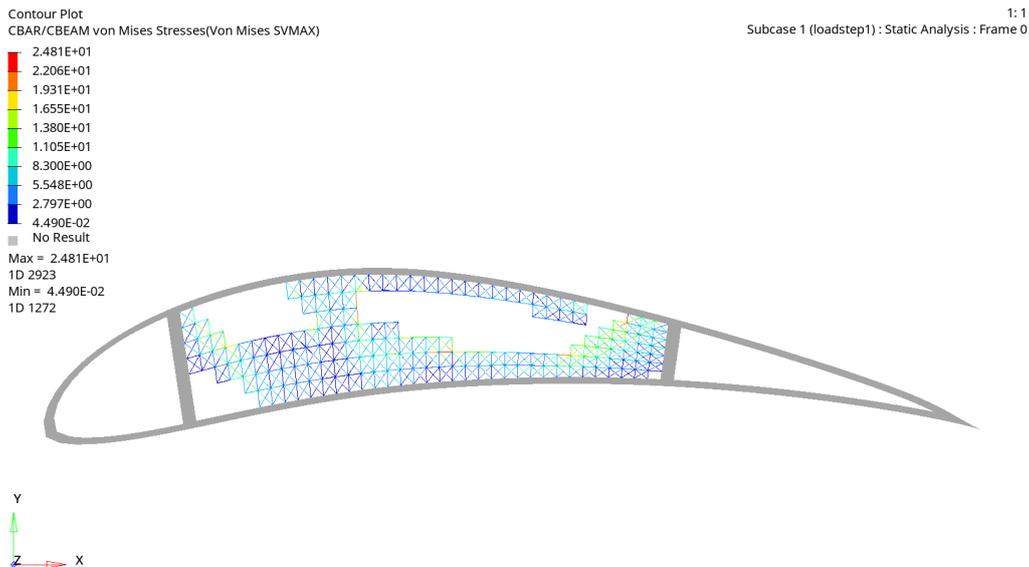


Figura 70 - E420, ottimizzazione con MS, tensioni di von Mises negli elementi reticolari.

La tensione di von Mises massima negli elementi reticolari risulta pari a 24,81 MPa. Tuttavia, esportando i valori delle tensioni nei singoli elementi reticolari ed analizzandone la distribuzione, si nota come la tensione media è pari a 5,30 MPa, e valori di tensione superiori alla tensione di soglia  $S = 18,4$  MPa vengono registrati soltanto in 24 elementi (1,1% degli elementi della struttura).

Nel calcolo della tensione di soglia,  $\mu = 5,30$  MPa,  $\delta = 3,75$  MPa, e  $k = 3,5$ .

Figura 71 illustra la distribuzione delle tensioni nel componente ottimizzato con MS e il valore di soglia.

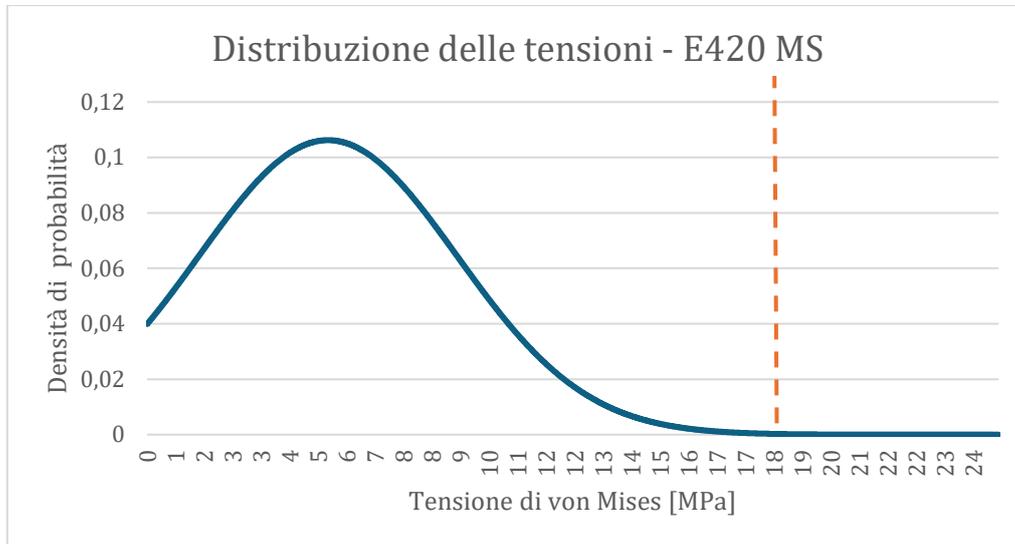


Figura 71 - E420, ottimizzazione con MS, distribuzione delle tensioni di von Mises negli elementi reticolari.

Il 98,9% degli elementi reticolari è sottoposto ad una tensione inferiore a 18,4 MPa.

#### 4.3.3. Analisi delle tensioni principali

Come visto nei paragrafi 2.2 “Ottimizzazione lattice con mesh standard” e 3.3.2 “Ottimizzazione con mesh standard”, l’ottimizzatore Optistruct costruisce la struttura lattice sostituendo la cella elementare selezionata dall’utente ai singoli elementi di mesh volumetrica. Pertanto, per ottenere una struttura lattice ottimizzata con celle orientate il più possibile coerentemente con la direzione delle tensioni principali, è necessario operare sulla generazione della mesh.

Per la generazione della mesh orientata viene presa come riferimento l’analisi delle tensioni principali del componente originale con mesh standard, illustrata in Figura 72.

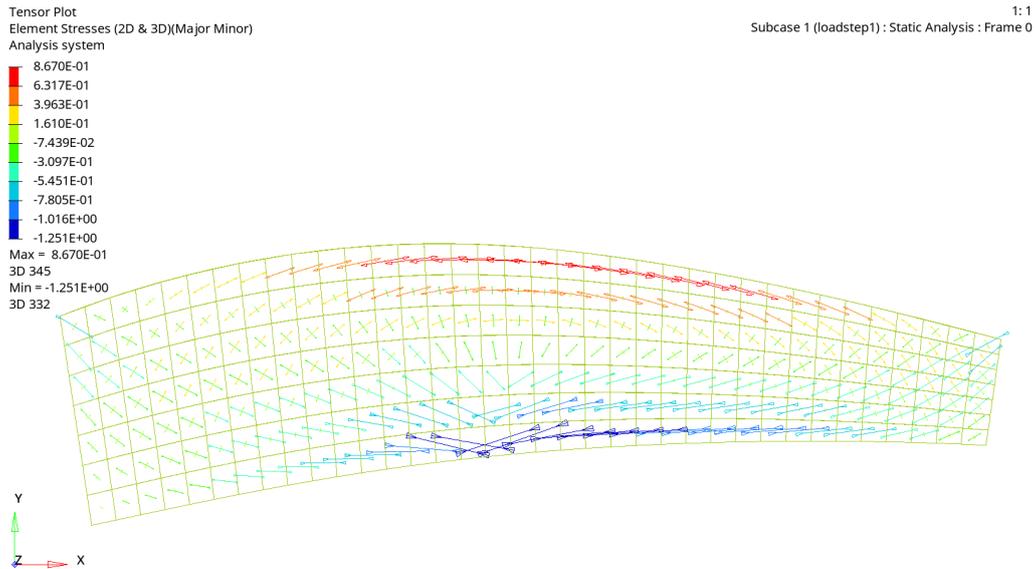
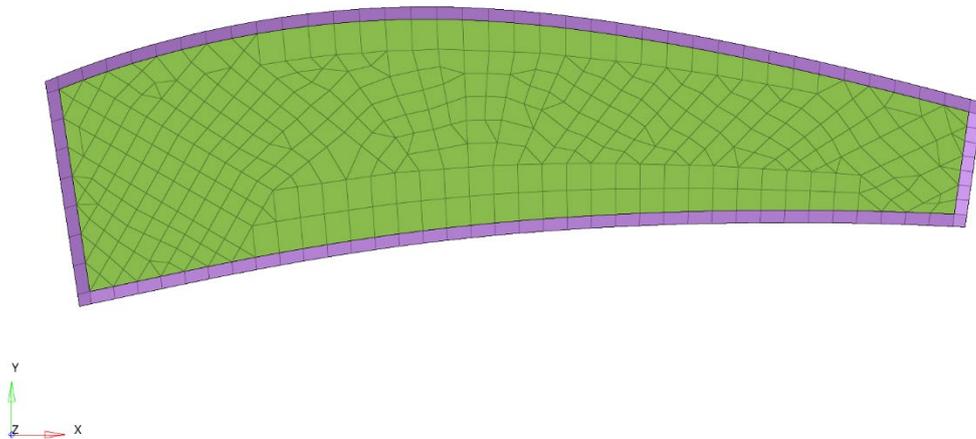


Figura 72 - E420, MS, analisi delle tensioni principali massima e minima.

Come visto nel paragrafo 3.3.3. “Analisi delle tensioni principali” relativo alla TCM, è possibile notare come soltanto pochi elementi della mesh siano allineati con le linee di tensione principale. In particolare, soltanto gli elementi sollecitati in compressione al di sotto della zona di applicazione del carico e gli elementi sollecitati in trazione tra i due vincoli sono orientati coerentemente con le PSL. Per ottenere una maggiore rigidezza ed una migliore distribuzione delle tensioni, è quindi necessario modificare l’orientazione degli altri elementi, cercando di lasciare invariata quella degli elementi orientati già correttamente.

#### 4.3.4. Generazione della mesh orientata

Per la generazione della mesh vengono effettuati diversi tentativi, il migliore dei quali è illustrato in Figura 73.



*Figura 73 - E420, generazione della mesh orientata.*

Dal momento che gli elementi centrali dei bordi superiore e inferiore del design space risultavano già orientati bene rispetto alle direzione delle tensioni principali, la loro orientazione non è stata alterata. È stata, invece, modificata l'orientazione degli elementi vicini ai vincoli e nella zona compresa tra i bordi superiore e inferiore del design space.

Gli elementi della mesh vengono costruiti come elementi bidimensionali sulla faccia frontale e poi estrusi lungo lo spessore del componente come elementi volumetrici.

Come nel caso precedente, gli elementi solidi sono principalmente di tipo HEXA (a sei facce), e per assecondare le variazioni geometriche dovute alla curvatura delle linee di tensione sono presenti alcuni elementi solidi prismatici di tipo PENTA (a cinque facce).

Prima di avviare l'ottimizzazione il componente con mesh orientata viene analizzato per verificare che gli elementi di mesh siano allineati con la direzione delle tensioni principali in essi (Figura 74).

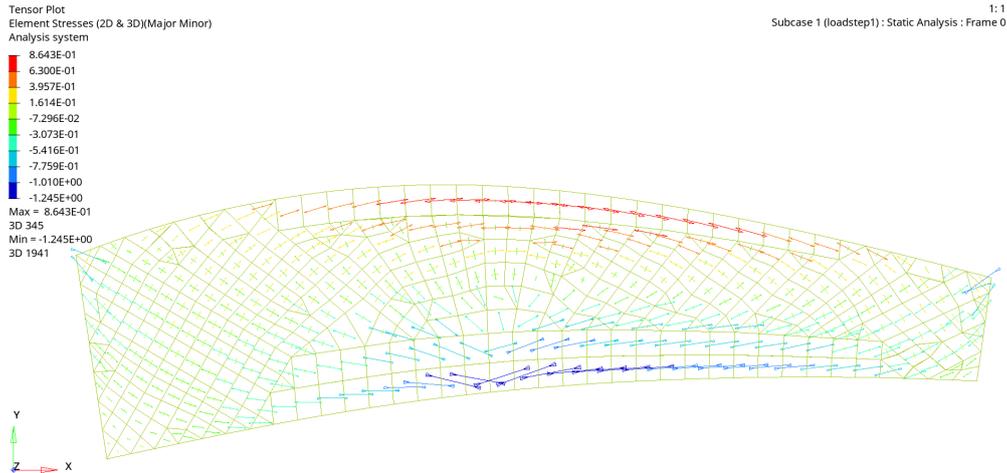


Figura 74 - E420, MO, analisi delle tensioni principali massima e minima.

La Figura 75 confronta la mappa delle tensioni principali nel componente con mesh standard e nel componente con mesh orientata.

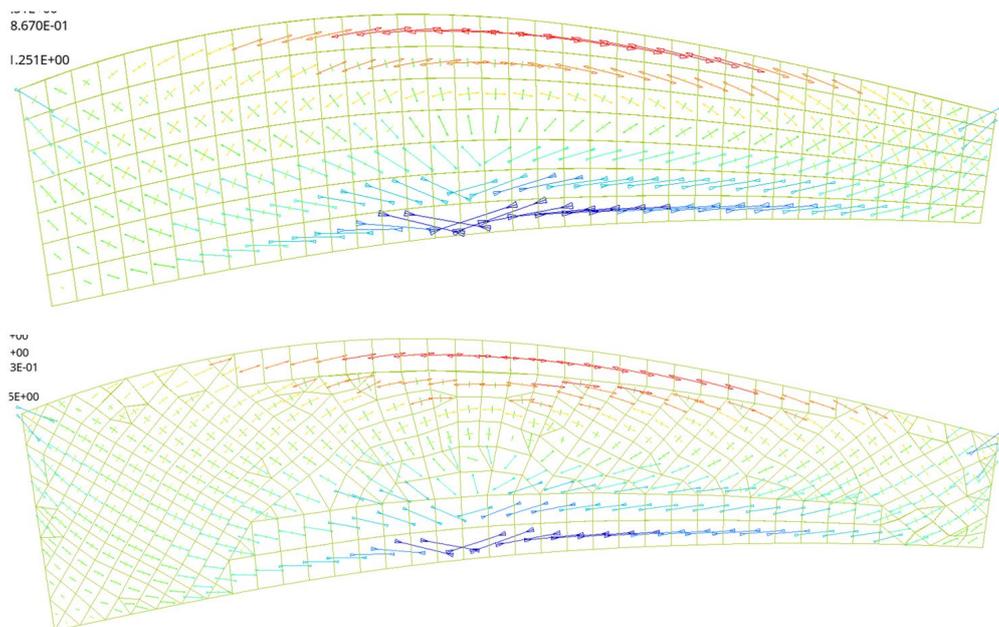


Figura 75 - E420, confronto dell'analisi delle tensioni principali massima e minima nei componenti meshati con MS e MO.

#### 4.3.5. Ottimizzazione con mesh orientata

##### Imposizione delle BC

Le condizioni al contorno per fase di ottimizzazione lattice con mesh orientata sono le medesime dell'ottimizzazione con mesh standard. La forza e i vincoli vengono distribuiti su diversi nodi, per evitare elevate concentrazioni di tensioni nei pochi elementi caricati.

I due vincoli vengono suddivisi tra sei nodi ciascuno, e il carico da 120 N viene ripartito su sei nodi, con 20 N su ciascun nodo. L'applicazione delle BC al componente è illustrata in Figura 76.

Model Info: C:/Users/nikka/OneDrive/Documenti/POLITO/TESI/hyper/Eppler\_420/eppler\_lattice\_optimizations/eppler\_08/eppler\_08\_MO/eppler\_08\_MO\_03/eppler\_08\_MO\_03.hm\*

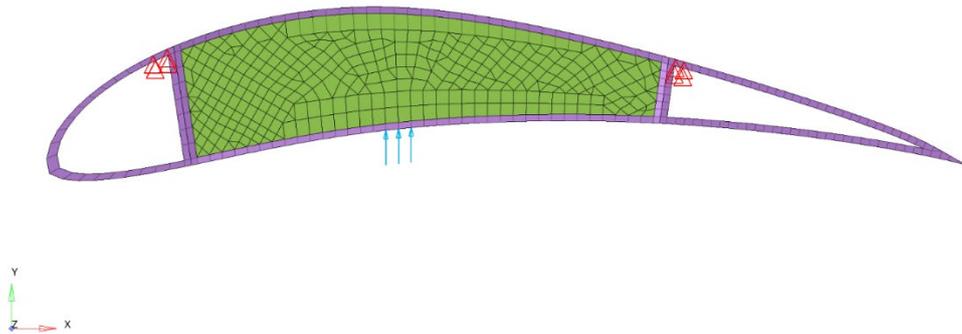


Figura 76 - E420, MO, applicazione delle BC.

### Impostazione dei parametri di ottimizzazione

I parametri di ottimizzazione scelti sono i medesimi dell'ottimizzazione lattice con mesh standard, discussi nel dettaglio al paragrafo 4.3.2 "Ottimizzazione con mesh standard". Essi sono riportati in forma compatta in Tabella 14.

Tabella 14 - E420, MO, parametri di ottimizzazione.

Cella	$\rho_{min}$	$\rho_{max}$	Obiettivo	Limite VF max	$R_{min}$ [mm]	$R_{max}$ [mm]
BCCxyz	0,16	1,0	minimizzazione compliance	0,30	0,4	1,0

### Risultati di ottimizzazione

Una volta lanciata l'ottimizzazione, la mappa di densità si presenta come in Figura 77.

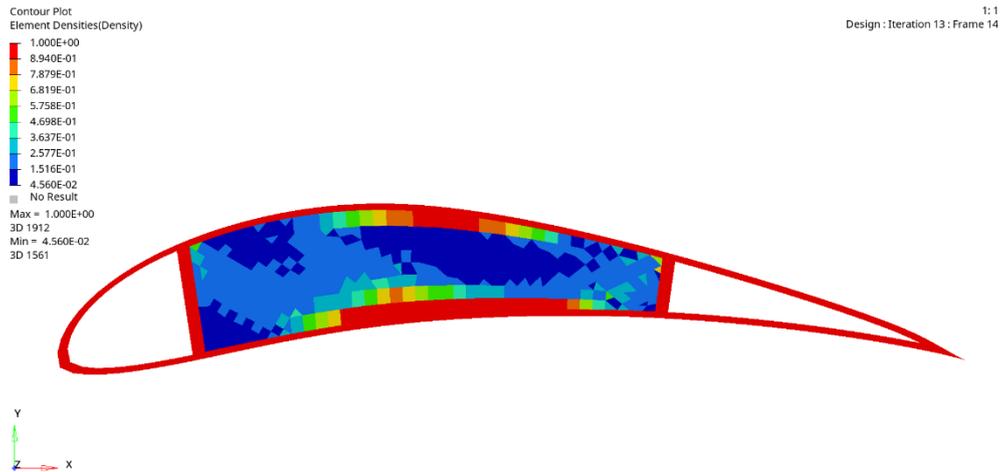


Figura 77 - E420, ottimizzazione con MO, mappa di densità.

La struttura ottimizzata è illustrata in Figura 78 e in Figura 79, in cui sono nascosti i componenti Front body e Back body, non utili all'analisi.

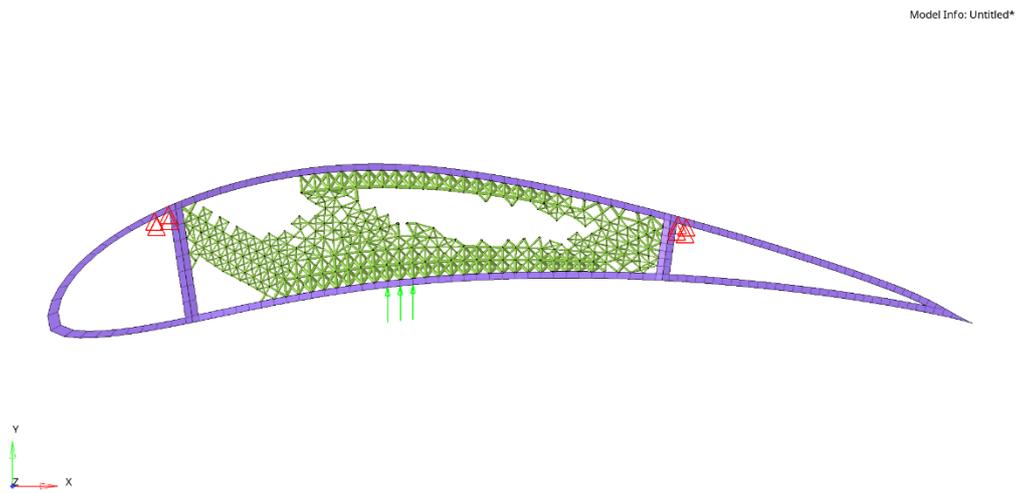


Figura 78 - E420, ottimizzazione con MO, risultati di ottimizzazione.

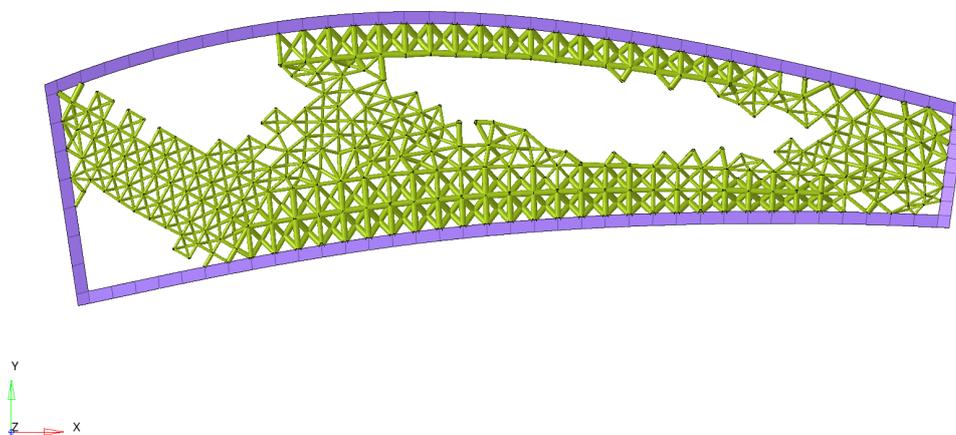


Figura 79 - E420, ottimizzazione con MO, risultati di ottimizzazione, dettaglio.

La massa del componente ottimizzato è pari a 82,27 g. Sottraendo a questa la massa del non design space (49,6 g) si ottiene una massa della struttura lattice generata di 32,67 g, pari al 25,3% della massa del design space iniziale (129,2 g).

La massa del componente finale ottimizzato (82,27 g) è pari al 46,01% (accettabile dato l'obiettivo del 50%) della massa del componente originale (178,8 g).

Il raggio degli elementi reticolari della struttura lattice è compreso tra i valori di 0,47 mm e 1,00 mm, all'interno del range di stampabilità.

#### Analisi FEM dei risultati di ottimizzazione

Il componente ottimizzato viene sottoposto ad analisi FEM per valutarne gli spostamenti e le tensioni di von Mises negli elementi reticolari. I risultati di analisi sono illustrati in Figura 80 e in Figura 81.

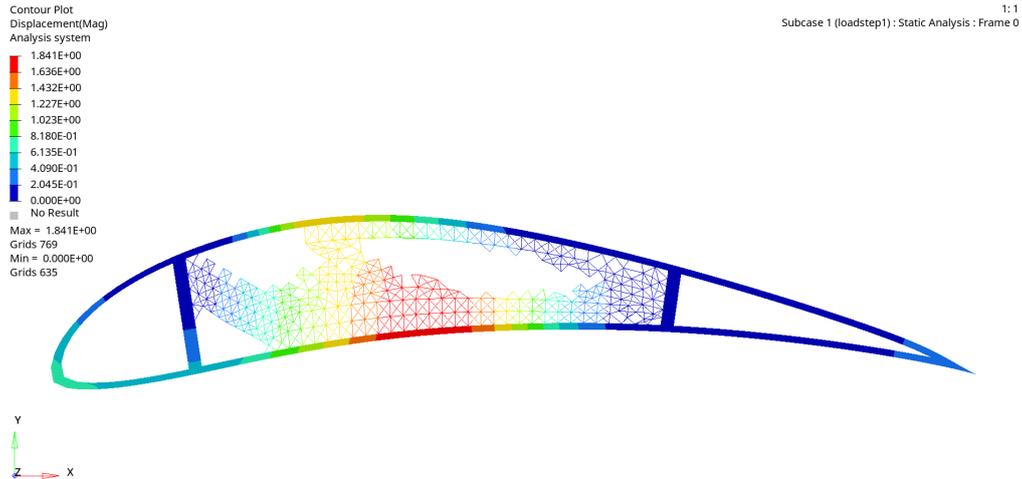


Figura 80 - E420, ottimizzazione con MO, spostamenti.

Lo spostamento massimo è pari a 1,84 mm.

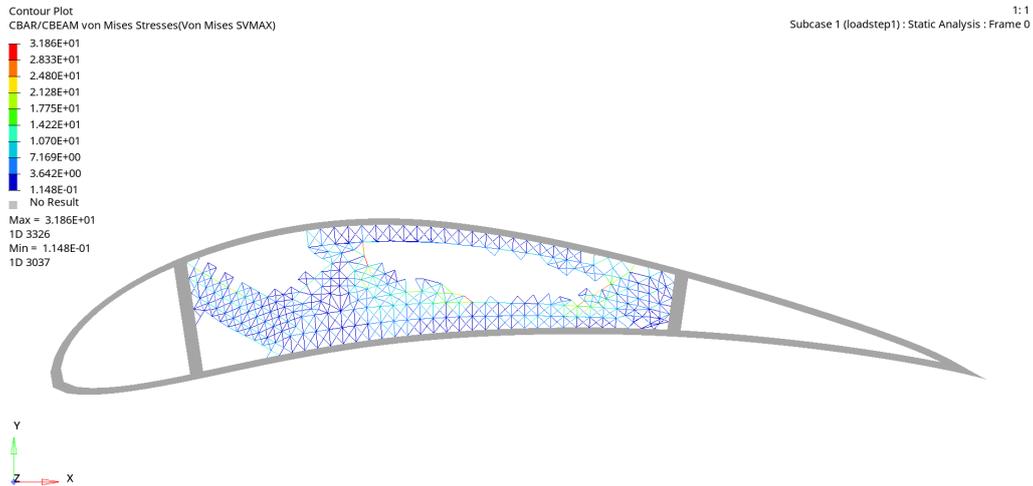


Figura 81 - E420, ottimizzazione con MO, tensioni di von Mises negli elementi reticolari.

La tensione di von Mises massima negli elementi reticolari risulta pari a 31,86 MPa, di poco superiore al valore della tensione di rottura del materiale (31 MPa). Tuttavia, esportando i valori delle tensioni nei singoli elementi reticolari ed analizzandone la distribuzione, si nota come la tensione media è pari a 4,87 MPa, e valori di tensione superiori al valore di soglia  $S = 18,2 \text{ MPa}$  vengono registrati soltanto in 40 elementi reticolari (1,5% degli elementi della struttura).

Nel calcolo della tensione di soglia,  $\mu = 4,87 \text{ MPa}$ ,  $\delta = 3,8 \text{ MPa}$ , e  $k = 3,5$ . Figura 67 illustra la distribuzione delle tensioni nel componente ottimizzato con MO e il valore di soglia.

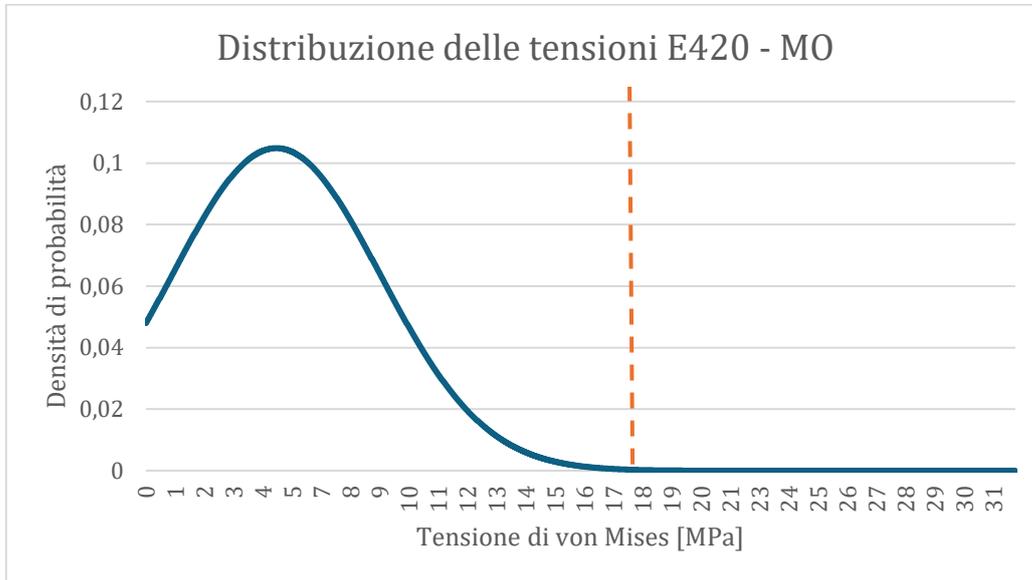


Figura 82 - E420, ottimizzazione con MO, distribuzione delle tensioni di von Mises negli elementi reticolari.

Il 98,5% degli elementi reticolari è sottoposto ad una tensione inferiore a 18,2 MPa.

#### 4.3.6. Confronto dei risultati

Per stabilire un confronto dei risultati focalizzato sulle proprietà di maggiore interesse dei componenti ottimizzati è stata elaborata la Tabella 15.

Tabella 15 - E420, confronto dei risultati delle ottimizzazioni con MS e MO.

Modello	Massa [g]	Frazione di volume [%]	Spostamento massimo [mm]	Tensione di von Mises massima [MPa]	Media delle tensioni di von Mises [MPa]
MS	80,54	45,04	1,94	24,81	5,3
MO	82,27	46,01	1,84	31,86	4,87
$\Delta(\text{MO/MS})$	+2,15%	+2,15%	-5,15%	+28,42%	-8,11%

Il modello ottimizzato con MO esibisce spostamenti e tensione media più bassi rispetto al modello ottimizzato con MS, a fronte di una massa leggermente più elevata. Come visto nel paragrafo precedente, nel modello con MO viene registrato un valore di tensione massima più elevato, ma il numero di elementi altamente sollecitati è bassissimo (il 98,5% degli elementi è soggetto a tensioni sotto 18,2 MPa). Quel che è

evidente è che il modello con MO esibisce una maggiore rigidezza ed una migliore distribuzione delle tensioni all'interno della struttura, come evidenziato dalla Figura 83, che mette a confronto le distribuzioni delle tensioni negli elementi reticolari dei due componenti ottimizzati, a fronte di un piccolo aumento della massa, inferiore a 2 g.

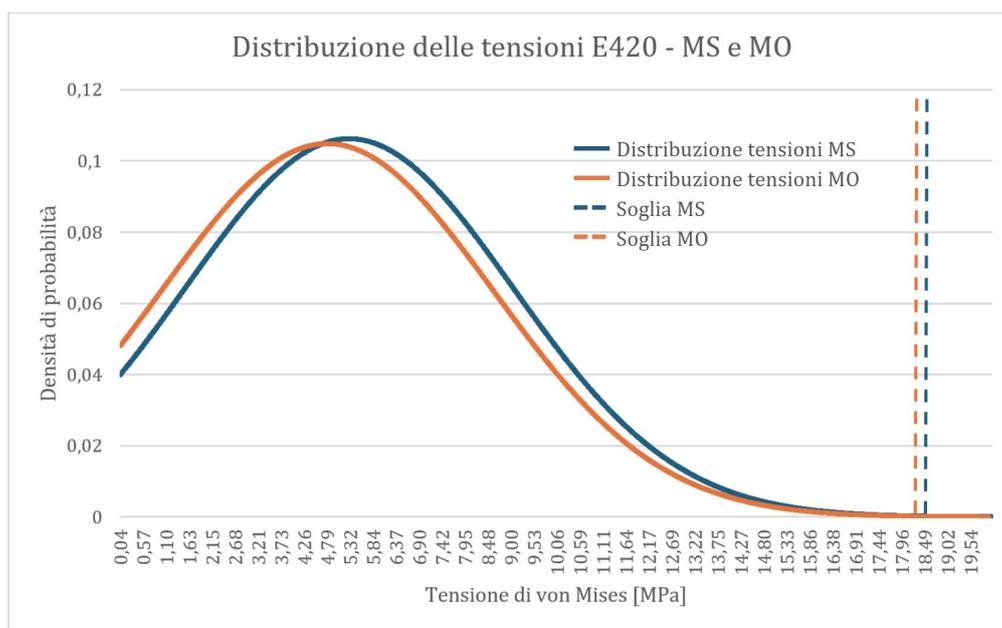


Figura 83 - E420, confronto delle distribuzioni delle tensioni di von Mises negli elementi reticolari delle ottimizzazioni con MS e MO.

Il componente ottimizzato con MO, infatti, è caratterizzato da un maggior numero di elementi con valori di tensione più bassi, e un minor numero di elementi con valori di tensione elevati. Infatti il valore della tensione di soglia, calcolata come  $S = \mu + k * \delta$ , è più basso nel caso di ottimizzazione con MO.

Anche alla luce di questa analisi, sebbene in maniera meno evidente rispetto al caso della trave caricata in mezzzeria discusso al capitolo 3, è possibile affermare che orientare le celle ortotrope della struttura lattice coerentemente con la direzione delle tensioni principali del componente ha consentito di ottenere un vantaggio in termini strutturali.

Le cause della minor evidenza di risultati è attribuibile alle differenze nelle condizioni geometriche dei due componenti. Infatti, la TCM presentava un maggior numero di celle (di dimensione media più bassa) rispetto all'E420. Pertanto, avendo a disposizione una risoluzione maggiore, è stato più semplice orientare le celle lungo le linee di tensione principale. È possibile affermare che il metodo risulta essere più

efficace in presenza di grande differenza dimensionale tra la geometria del componente e quella delle celle lattice.

#### 4.4. Criticità di produzione

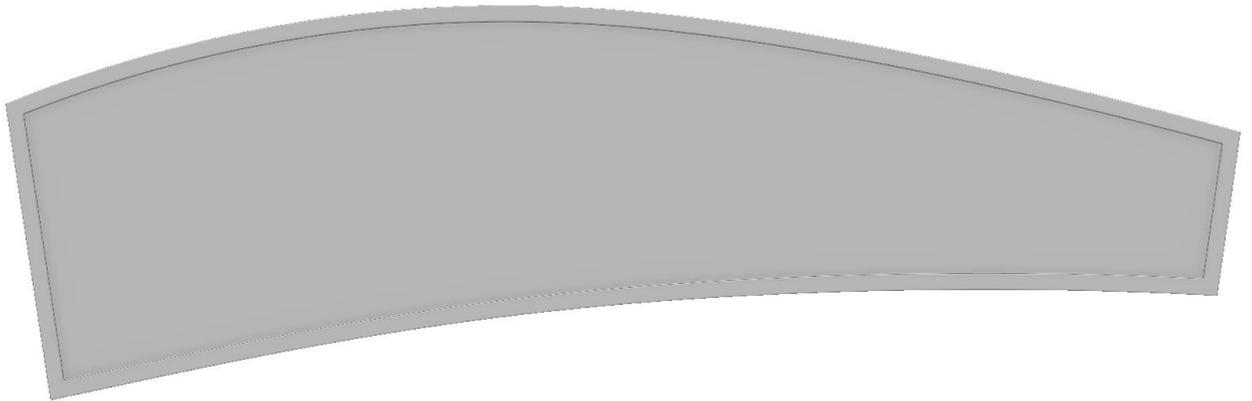
Una volta ottenuti dei buoni risultati analitici dalla metodologia di ottimizzazione, si intende sottoporre i risultati a validazione sperimentale. Per farlo è necessario esportare le geometrie dei componenti ottimizzati in HyperWorks, ed importarle in formato .STL oppure .3mf in un software di slicing, al fine di generare un g-code per la stampa. Tuttavia, possono essere convertite in formato .STL e .3mf soltanto le geometrie bidimensionali e tridimensionali. Dal momento che Optistruct genera la struttura lattice sottoforma di elementi monodimensionali (CBEAM), senza possibilità di convertirli in elementi superficiali o solidi, questi non vengono conservati nella conversione della geometria al formato .STL. Pertanto, nell'ambito di questo lavoro di tesi non è stato possibile sottoporre a validazione sperimentale i risultati dell'applicazione della metodologia di ottimizzazione lattice elaborata.

Tuttavia, al fine di dimostrare l'efficacia delle linee di tensione principale come guida per la realizzazione di strutture lattice strut-based dall'elevata rigidità, sono stati effettuati dei test meccanici su due strutture lattice generate nel design space del componente Eppler 420 tramite il software nTopology. La trattazione del processo di generazione delle strutture lattice e della loro validazione sperimentale è illustrata al capitolo 5 "Test meccanici sul profilo alare Eppler 420".



compatibilmente con le dimensioni del piano di stampa, di dimensioni  $256 \times 256 \times 256 \text{ mm}^3$  [29], ed è possibile realizzare una struttura lattice che segua al meglio le PSL.

Il componente originale si presenta come illustrato in Figura 85.



*Figura 85 - E420, Outer body e Inner body in nTop.*

La massa del componente originale è pari a  $156,4 \text{ g}$ , di cui  $132,2 \text{ g}$  di Inner body e  $24,2 \text{ g}$  di Outer body.

### 5.3. Scelta dei parametri delle strutture lattice

In nTop non è possibile effettuare un'ottimizzazione lattice direttamente da un componente solido, come accade in HyperWorks, ma è necessario prima generare una struttura lattice e poi, eventualmente, ottimizzarla. Per lo scopo di questo lavoro è sufficiente generare due strutture lattice, una con celle orientate coerentemente con la geometria del componente (come fatto nei capitoli precedenti per i componenti ottimizzati con MS) e una con celle orientate coerentemente con le PSL (come fatto nei capitoli precedenti per i componenti ottimizzati con MO). Pertanto, non si parlerà di scelta dei parametri di ottimizzazione, ma di scelta dei parametri delle strutture lattice. Non è necessario, quindi, scegliere dei limiti di densità, un obiettivo e un vincolo sulla frazione di volume, ma basta selezionare il tipo di cella e i suoi parametri geometrici caratterizzanti (dimensione, raggio degli elementi) coerentemente con la massa obiettivo che si vuole ottenere.

In nTop è disponibile un'ampia libreria di strutture lattice periodiche, sia di tipo strut-based che di tipo TPMS. Non essendo disponibile in nTop la cella elementare BCCxyz

utilizzata nelle ottimizzazioni in HyperWorks Desktop (Figura 86), essa viene creata dalla combinazione di una cella BCC e una cella Simple Cubic (Figura 87).

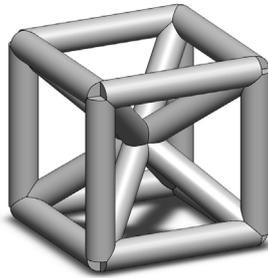


Figura 86 - Cella elementare BCCxyz.

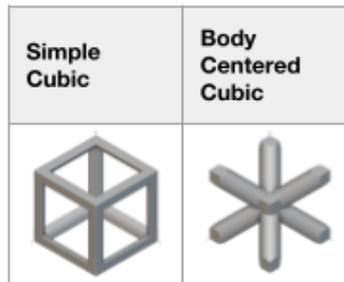


Figura 87 - Cella elementare Simple Cubic (a sinistra) e Cella elementare BCC (a destra).

Si sceglie di generare una struttura ibrida lattice-solido, senza vuoti. La struttura solida è già presente nel modello, costituita dall'Outer body.

Si sceglie una frazione di volume (VF) obiettivo dei componenti ottimizzati pari al 30% del volume iniziale. La frazione di volume va intesa come rapporto tra la massa del componente ottimizzato, in questo caso composto dall'unione di Outer body e struttura lattice, e la massa del componente originale (156,4 g), in questo caso composto dall'unione di Outer body (24,2 g) e Inner body (132,2 g). Pertanto, con una VF obiettivo del 30%, la massa dei componenti ottimizzati attesa è pari a 46,9 g, di cui 24,2 g di Outer body e, conseguentemente, 22,7 g di struttura lattice. Tali considerazioni sono riassunte in Tabella 16.

Tabella 16 - E420, massa attesa dei componenti ottimizzati.

	<b>Massa Outer body [g]</b>	<b>Massa Inner body [g]</b>	<b>Massa complessiva [g]</b>	<b>VF [%]</b>
<b>Componente originale</b>	24,2	132,2	156,4	100,00
<b>Ottimizzazione attesa</b>	24,2	22,7	46,9	30,00

Fissata la tipologia della cella e la VF obiettivo, per ognuno dei due componenti ottimizzati si opera iterativamente sui parametri geometrici della cella per ottenere un componente che rispecchi la VF attesa.

## 5.4. Generazione delle geometrie ottimizzate

La generazione della struttura lattice viene effettuata, come nei casi trattati nei capitoli precedenti, prima coerentemente con la geometria del componente (Lattice Standard, LS), e poi coerentemente con le PSL (Lattice Orientata, LO).

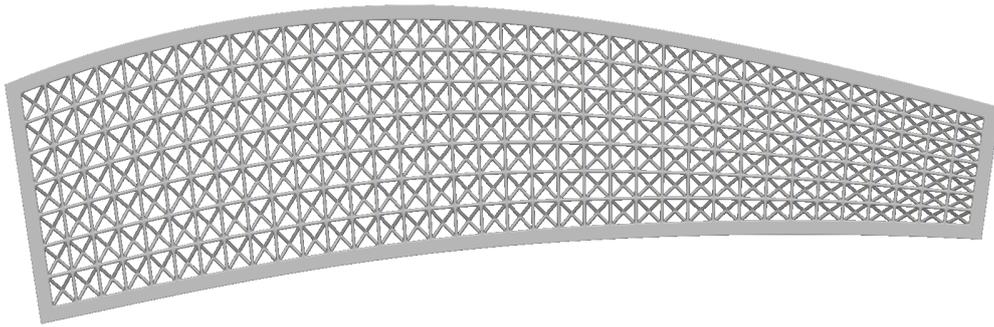
### 5.4.1. Struttura Lattice Standard

Fissata la tipologia della cella e la VF obiettivo, si opera iterativamente sui parametri geometrici della cella per ottenere un componente che rispecchi la VF attesa.

Per quanto riguarda la dimensione delle celle, si prende come riferimento il componente ottimizzato con MS trattato al capitolo precedente (Figura 63). Il raggio degli elementi reticolari viene scelto di conseguenza, in maniera tale da ottenere una frazione di volume  $VF = 0,30$ , ed è pari a  $R = 0,5 \text{ mm}$ . I valori delle dimensioni del raggio e del lato delle celle sono coerenti con quelli ideali ottenuti al paragrafo 4.2 “Scelta del materiale e dei parametri della mesh e di ottimizzazione”, qui riportati:

- $R \geq 0,4 \text{ mm}$ ;
- $4 \leq L < 9 \text{ mm}$ .

Il componente ottimizzato con struttura LS si presenta come illustrato in Figura 88.



*Figura 88 - E420, nTop, generazione della struttura LS.*

La massa del componente ottimizzato con struttura LS è pari a 47,2 g (30,1% del componente originale).

#### 5.4.2. Struttura Lattice Orientata

Per realizzare la struttura lattice orientata (LO) si prende nuovamente come riferimento il grafico delle tensioni principali massime ottenuto al capitolo precedente in HyperWorks, illustrato in Figura 72.

In nTop non è possibile orientare la struttura lattice modificando l'orientazione della mesh, come fatto in HyperWorks. È stato, quindi, trovato un modo di ottenere una struttura lattice orientata il più possibile coerentemente con le PSL utilizzando gli strumenti di modellazione disponibili in nTop. Lo strumento adottato è "Cylindrical Cell Map" (Figura 89), che consente di disporre le celle in un volume cilindrico.

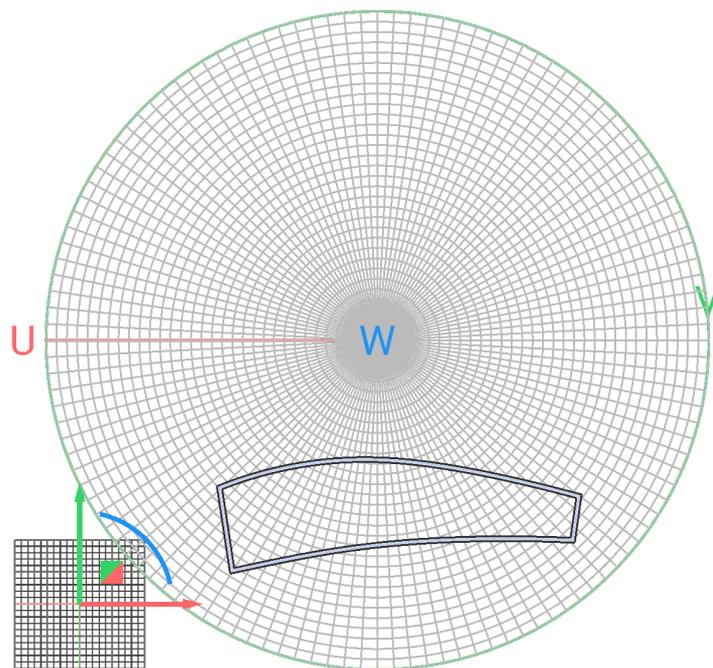


Figura 89 - E420, generazione di una Cell Map cilindrica per il componente.

Osservando il grafico in Figura 72, infatti, e confrontandolo con la trave caricata in mezzeria di Michell (Figura 10) discussa nel capitolo 1 al paragrafo 1.5 “Strategie di ottimizzazione topologica”, si può notare come le linee di tensione principale sono disposte in forma circolare, passanti per i punti di applicazione dei vincoli e centrata in corrispondenza del punto di applicazione del carico.

Figura 90 illustra la sovrapposizione della Cell Map cilindrica generata in nTop con l’analisi delle tensioni principali massima e minima ottenuta in HyperWorks per il componente E420 meshato con MS.

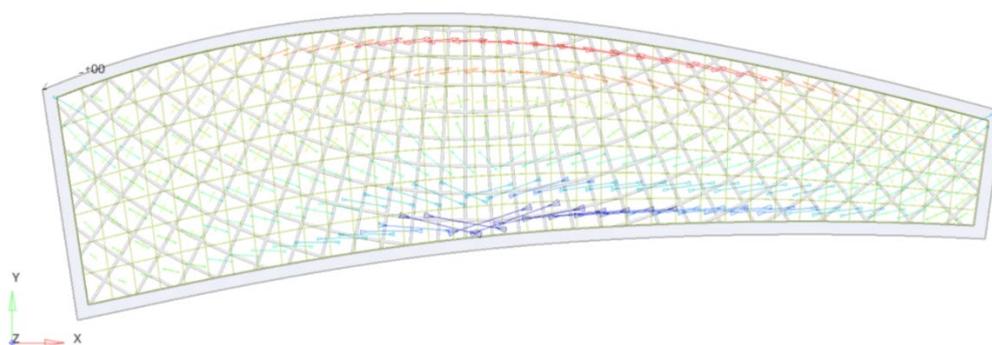
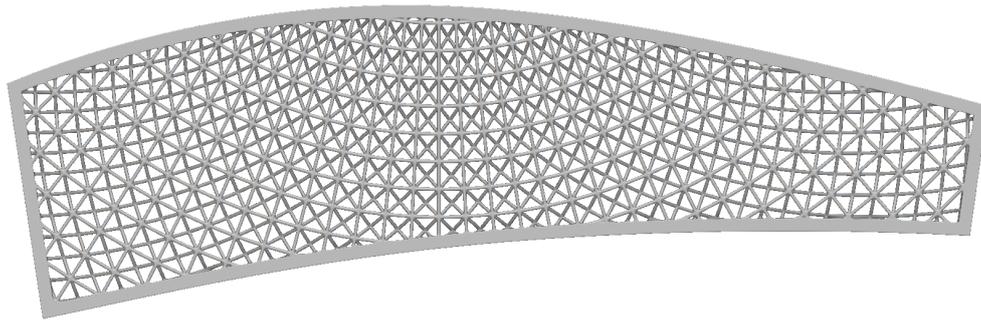


Figura 90 - E420, nTop, sovrapposizione della Cell Map cilindrica con l’analisi delle tensioni principali del componente con MS.

Il valore del raggio viene scelto pari a quello della struttura ottimizzata con LS, e si opera sulle caratteristiche geometriche della Cell Map (numero di celle nella circonferenza e dimensione radiale della cella) per ottenere una frazione di volume  $VF = 0,3$ .

La struttura lattice orientata usando una Cell Map cilindrica è illustrata in Figura 91.



*Figura 91 - E420, nTop, generazione della struttura LO.*

La massa del componente ottimizzato con LO è pari a 47,2 g (30,1% del componente originale), pari a quella del componente ottimizzato con LS.

## 5.5. Analisi dei componenti ottimizzati

I due componenti ottimizzati, con lattice standard e lattice orientata vengono sottoposti ad analisi FEM in nTop. Il valore del carico è il medesimo adottato al capitolo precedente, e pari a  $F = 120 N$ . Le BC sono applicate come illustrato in Figura 92.

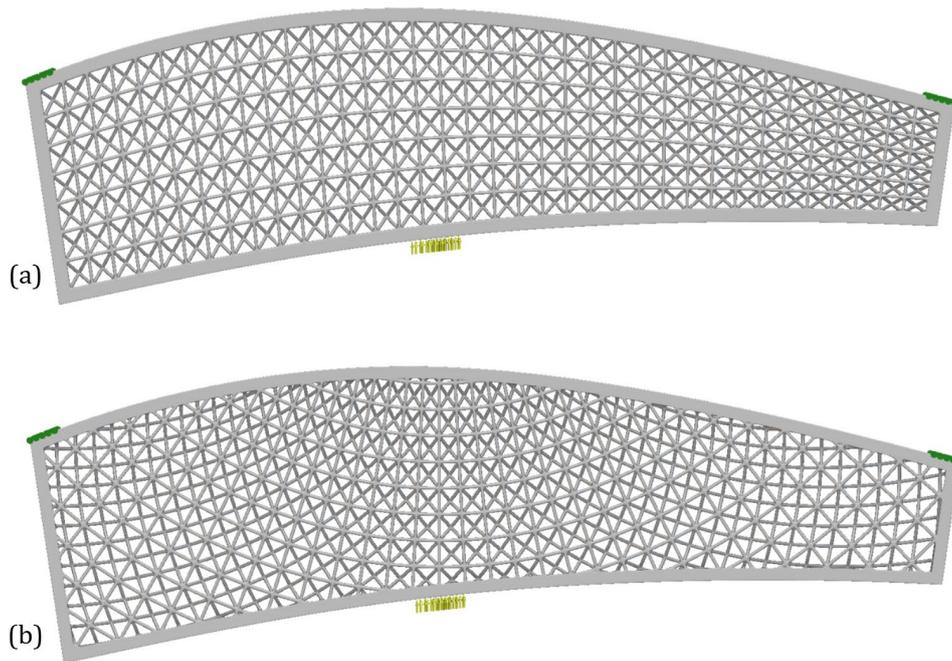


Figura 92 - E420, nTop, applicazione delle BC ai componenti con struttura LS (a) e con struttura LO (b).

I risultati di analisi del componente con struttura LS in termini di spostamento e tensioni di von Mises sono illustrati in Figura 93 e in Figura 94.

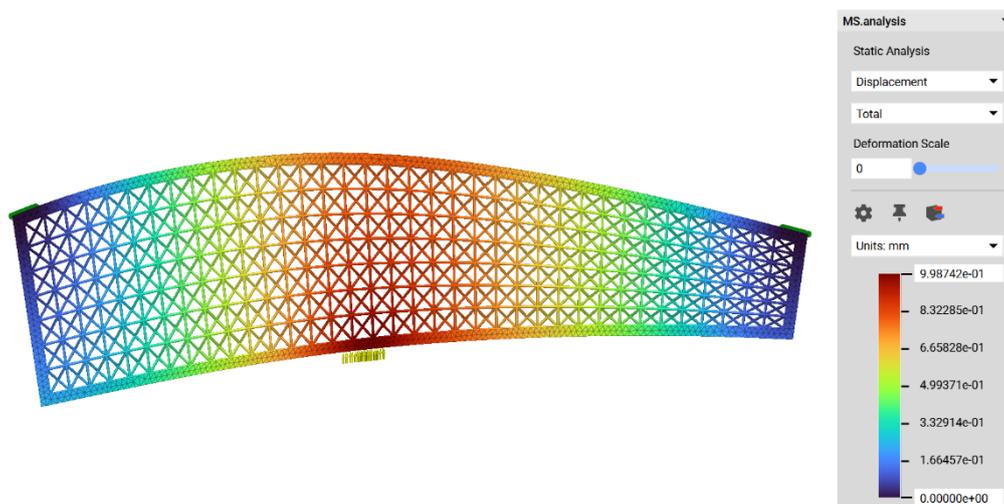


Figura 93 - E420, nTop, componente con struttura LS, spostamenti.

Lo spostamento massimo è pari a 1,00 mm.

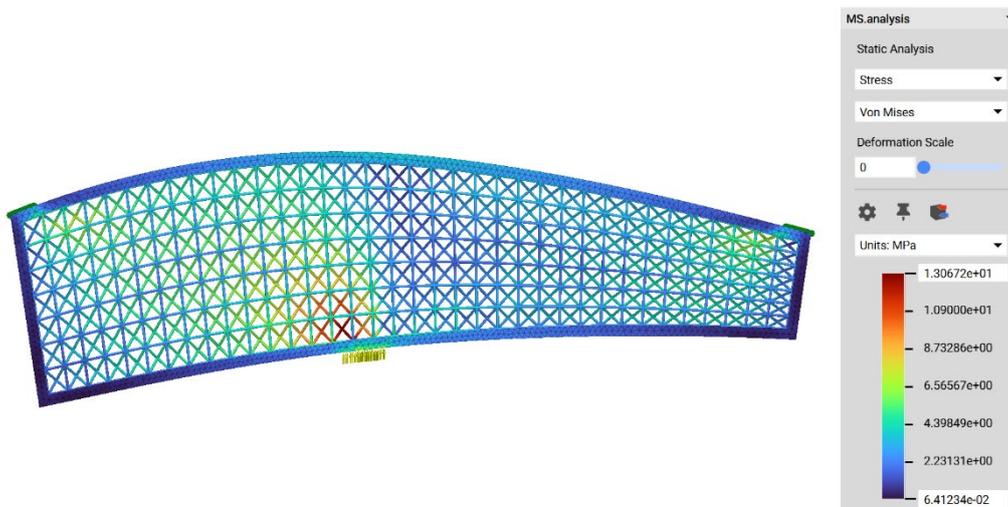


Figura 94 - E420, nTop, componente con struttura LS, tensioni di von Mises.

La tensione di von Mises massima è pari a 13,07 MPa.

I risultati di analisi del componente con LO in termini di spostamento sono illustrati in Figura 96.

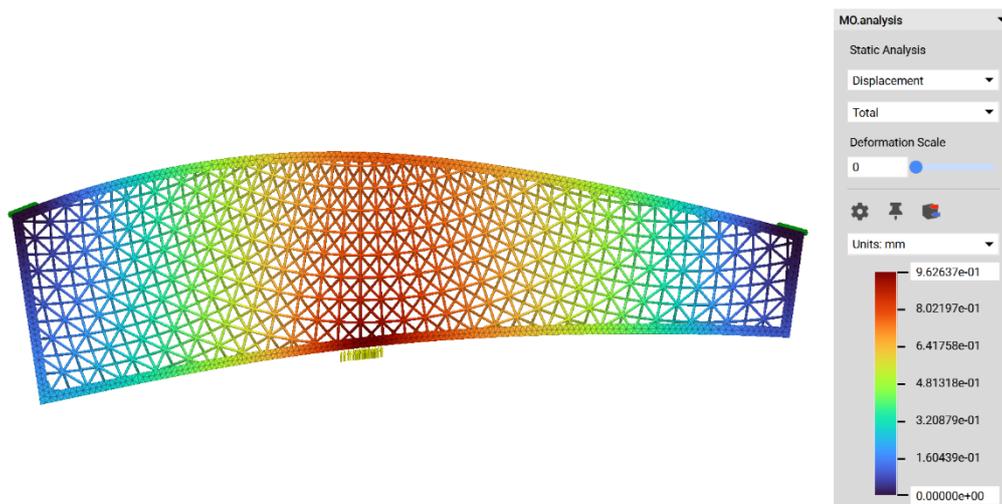


Figura 95 - E420, nTop, componente con struttura LO, spostamenti.

Lo spostamento massimo è pari a 0,97 mm.

I risultati di analisi del componente con LS in termini di tensione di von Mises sono illustrati in Figura 97.

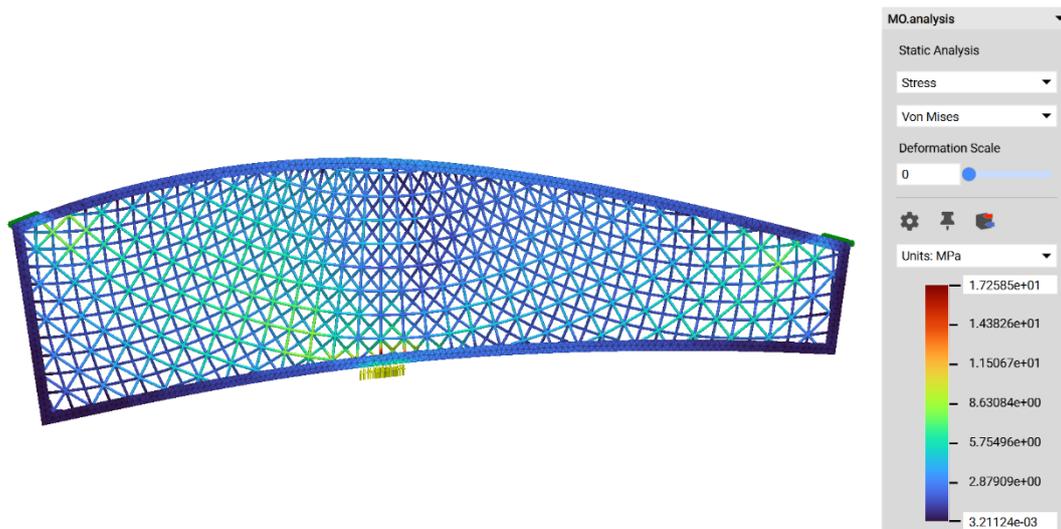


Figura 96 - E420, nTop, componente con struttura LO, tensioni di von Mises.

La tensione di von Mises massima è pari a 17,26 MPa.

### 5.5.1. Confronto dei risultati delle simulazioni

A parità di massa e condizioni di carico, il componente con struttura LO esibisce uno spostamento massimo più basso del 3%. Pertanto, si attende che i test meccanici dimostrino una maggiore rigidezza nel componente con struttura LO.

## 5.6. Set up di prova

La prova viene condotta su una MTS EM Flexure Criterion (Figura 98), per prove di flessione a tre punti.



Figura 97 - MTS EM Flexure Criterion [32].

La prova si configura con l'imposizione di una velocità di spostamento (il valore scelto è  $v = 1\text{mm}/\text{min}$ ) e la lettura del valore della forza di reazione esibita dal componente.

Il confronto tra i due componenti è stabilito sul valore della rigidità a flessione, ovvero l'inclinazione del tratto elastico del diagramma Carico-Spostamento elaborato.

I dispositivi di afferraggio utilizzati sono illustrati in Figura 99.



*Figura 98 - Dispositivi di afferraggio.*

I due componenti, con struttura LS e struttura LO, vengono prodotti in PLA-Basic con la Bambu Lab X1E, con un riempimento del 100% per rispecchiare i valori di densità del modello numerico. Essi si presentano come evidenziato in Figura 100.



Figura 99 - Realizzazione dei componenti oggetto di test: (a) componente con struttura LS; (b) componente con struttura LO.

La massa dei due componenti è pari a:

- Componente con struttura LS:  $m_{LS} = 41,73 \text{ g}$ ;
- Componente con struttura LO:  $m_{LO} = 42,26 \text{ g}$ .

È quindi presente una differenza dell'1,27% nella massa dei due componenti.

È necessario realizzare dei componenti di interfaccia tra i dispositivi di afferraggio e i componenti sottoposti a test. Vengono quindi progettati due dispositivi di afferraggio, uno per l'applicazione del carico e uno per l'applicazione dei vincoli, da serrare nei dispositivi di afferraggio, superiore (per l'applicazione della forza) e inferiore (per l'applicazione dei vincoli).

### 5.6.1. Progettazione dei componenti di interfaccia

I componenti di interfaccia vengono modellati su SOLIDWORKS a partire dalle dimensioni rilevate dalle misurazioni effettuate sui dispositivi di afferraggio. I due componenti di interfaccia sono illustrati in Figura 101.

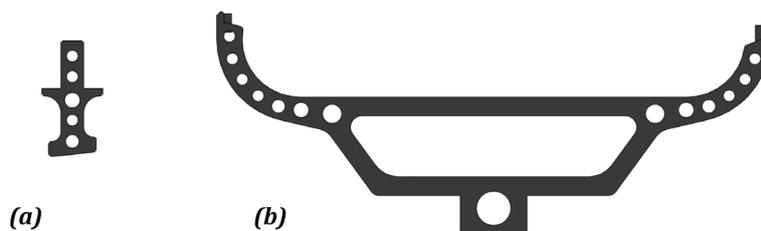
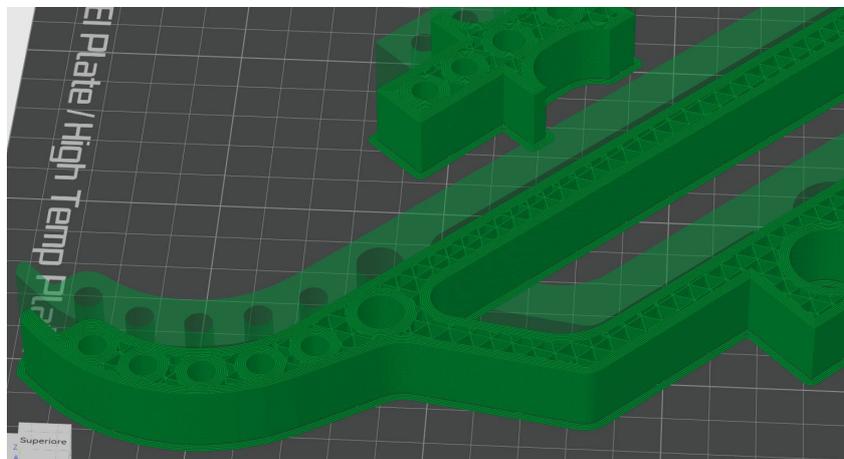


Figura 100 - Componenti di interfaccia: (a) applicazione del carico; (b) applicazione dei vincoli.

Essi sono estrusi per una profondità di  $30\text{ mm}$ , superiore allo spessore dei componenti da testare (spessore di  $9\text{ mm}$ ), per aumentarne la rigidità, senza aumentare eccessivamente il tempo di stampa. I due componenti di interfaccia, infatti, vengono realizzati in PLA-Basic con la Bambu Lab X1E. Il riempimento viene impostato con struttura a triangoli con densità del 30%. Vengono impostati 6 loop pareti e vengono previsti dei fori circolari sui due componenti per collegare i loop pareti tra di loro e di conseguenza aumentare la rigidità dei componenti. Durante la prova, infatti, si vuole isolare la deformazione dei componenti testati e ridurre al minimo la deformabilità degli elementi di supporto. Un dettaglio della struttura interna dei componenti di interfaccia è illustrato in Figura 102.



*Figura 101 - Componenti di interfaccia, dettaglio della struttura interna.*

L'installazione del set-up di prova per i due componenti, con struttura LS e struttura LO, è illustrata in Figura 103.

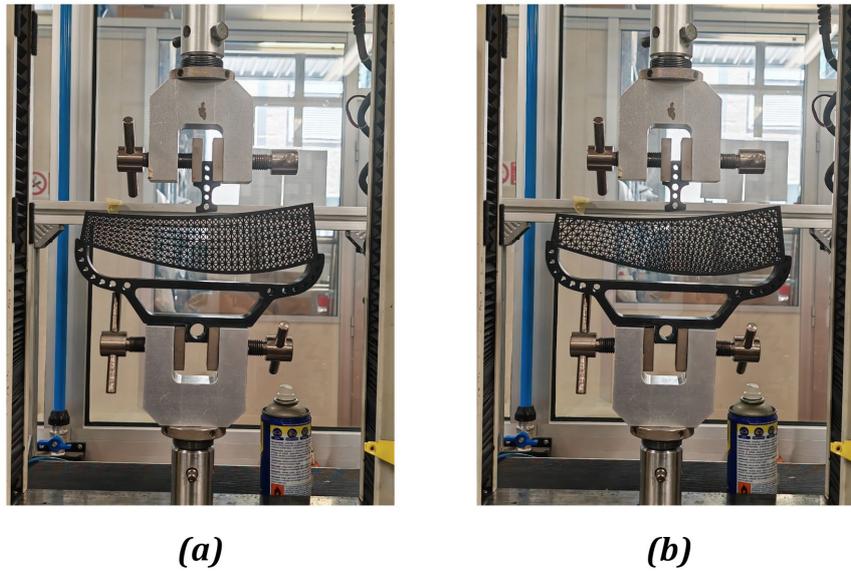


Figura 102 - Set-up di prova: (a) componente con struttura LS; (b) componente con struttura LO.

## 5.7. Risultati

Il confronto tra i due componenti è stabilito sul valore della rigidità a flessione, ovvero l'inclinazione del tratto elastico del diagramma Carico-Spostamento elaborato in Figura 104.

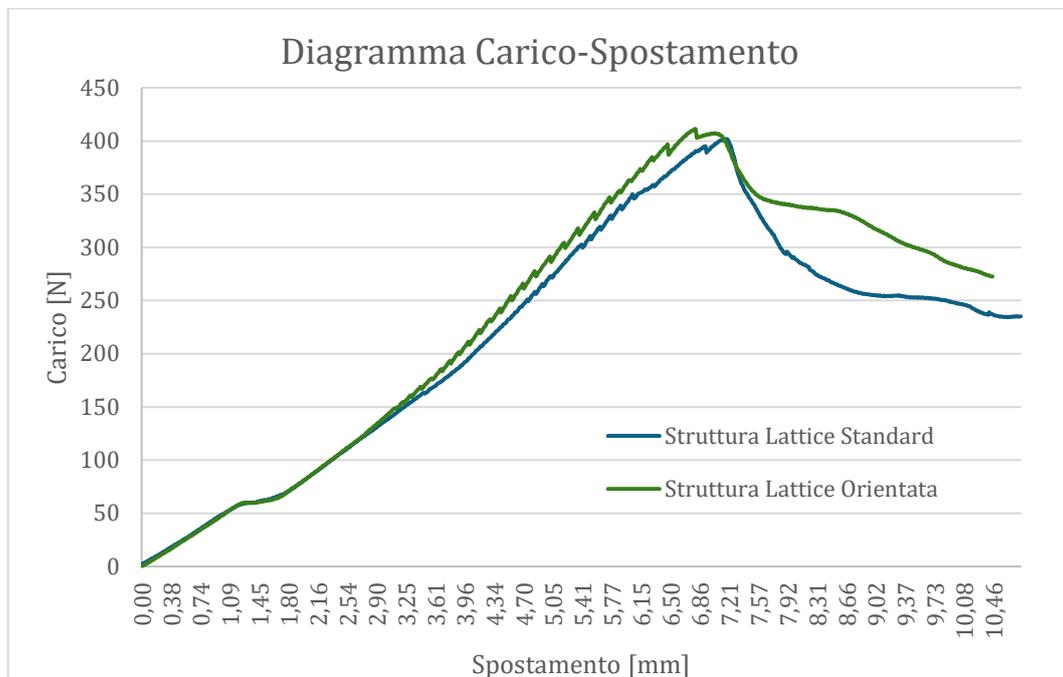


Figura 103 - Diagramma Carico-Spostamento dei due componenti testati.

Per valutare la rigidità a flessione si considera il tratto elastico del diagramma in Figura 104. Si trascura quindi la prima parte del diagramma, con valori dello

spostamento fino a circa 2 mm , perché derivanti dalla deformazione dei due componenti di interfaccia. Per i due componenti il tratto elastico viene quindi compreso tra i punti illustrati in Tabella 17:

Tabella 17- Limiti del tratto elastico del diagramma Carico-Spostamento per i componenti con struttura LS e struttura LO.

	<b>Carico [N]</b>	<b>Spostamento [mm]</b>
<b>LS min</b>	79	1,98
<b>LS max</b>	398	706
<b>LO min</b>	68	1,75
<b>LO max</b>	410	6,76

I due tratti lineari dei diagrammi Carico-Spostamento dei due componenti sono evidenziati in Figura 105. La figura evidenzia anche le interpolazioni lineari dei valori di carico e spostamento dei due componenti.

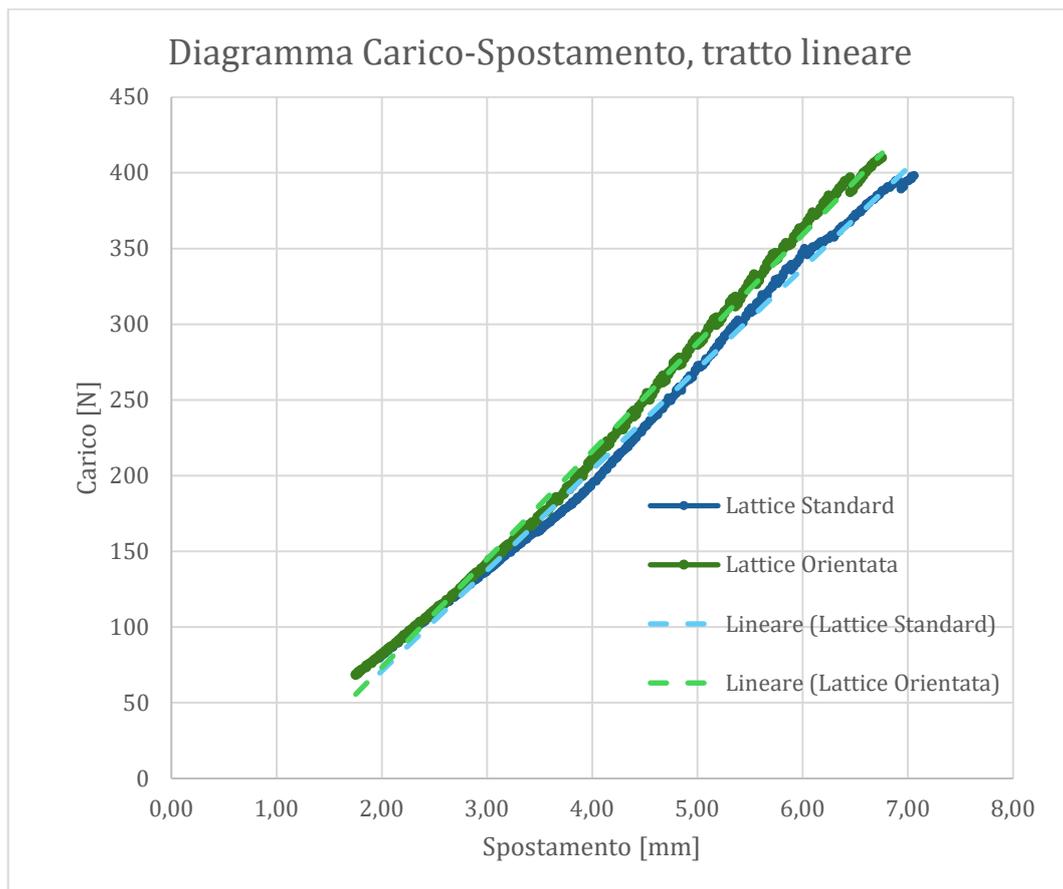


Figura 104 - Diagramma Carico-Spostamento, dettaglio tratto lineare.

La rigidezza a flessione dei componenti coincide con il coefficiente angolare delle rette costituenti l'interpolazione lineare dei valori di carico e spostamento del tratto

elastico. In questo modo si ottengono i valori di rigidità:  $K_{fless}^{LS} = 66,5 \text{ N/mm}$  e  $K_{fless}^{LO} = 71,4 \text{ N/mm}$  (Tabella 18).

Tabella 18 - Rigidità flessionale dei componenti sottoposti a test.

<b>Componente</b>	<b>Massa [g]</b>	<b><math>K_{fless}</math> [N/mm]</b>
<b>Struttura LS</b>	41,73	66,5
<b>Struttura LO</b>	42,26	71,4
$\Delta(LO/LS)$	+1,27%	+7,4%

Pertanto, il componente con struttura lattice orientata, a fronte di una differenza di peso dell'1,27%, presenta una rigidità più elevata del 7,4%. Si può quindi ritenere dimostrata l'efficacia delle linee di tensione principale come guida per la realizzazione di strutture lattice più rigide.

# Conclusioni

Il presente lavoro di tesi si è prefissato l'obiettivo di esplorare e dimostrare il vantaggio strutturale ottenibile attraverso strategie innovative di ottimizzazione topologica lattice (LSTO). Nello specifico, si è voluto evidenziare come l'anisotropia intrinseca delle celle lattice – in particolare la spiccata ortotropia della cella BCCxyz – possa essere sfruttata come risorsa di progettazione, piuttosto che come limitazione, per migliorare le prestazioni dei componenti in termini di riduzione della massa, aumento della rigidità e ottimizzazione della distribuzione delle tensioni.

La fabbricazione additiva (AM), o stampa 3D, ha rappresentato il fondamento tecnologico di questo studio, consentendo la realizzazione di geometrie estremamente complesse e intricate, altrimenti impossibili con tecniche tradizionali. Questa capacità ha aperto la strada alla progettazione di strutture lattice: architetture porose ingegnerizzate che offrono vantaggi significativi come leggerezza, elevata resistenza e rigidità specifiche, e capacità di assorbimento dell'energia. Tuttavia, le strutture lattice periodiche convenzionali presentano una intrinseca anisotropia che va opportunamente considerata in fase di progettazione.

Le basi teoriche di questa ottimizzazione affondano le radici nella teoria delle strutture di Michell e nelle Linee di Tensione Principale (PSL). La teoria di Michell, del 1904, ricerca strutture con la massima rigidità per un dato volume di materiale, dove ogni elemento è idealmente soggetto alla stessa tensione. Le PSL, d'altra parte, forniscono una visualizzazione chiara del percorso di trasferimento del carico, con direzioni che coincidono con quelle di minima tensione di taglio. È stata evidenziata una correlazione intrinseca tra le strutture di Michell e le PSL: le soluzioni ottimali di Michell implicano che gli elementi di una struttura reticolare siano posizionati lungo le direzioni delle tensioni principali, garantendo un'efficiente distribuzione dello stress. L'integrazione di queste teorie con la fabbricazione additiva è fondamentale, consentendo la realizzazione di membri di strutture lattice ottimizzate lungo le PSL, massimizzando l'efficienza del materiale.

La metodologia adottata nel lavoro ha previsto due diverse strategie di ottimizzazione lattice:

- Una prima ottimizzazione con orientazione delle celle coerente con la geometria del componente (mesh standard, MS).
- Una seconda ottimizzazione con la stessa tipologia di cella, ma con orientazione il più possibile coerente con le direzioni delle tensioni principali (mesh orientata, MO), elaborate tramite analisi agli elementi finiti (FEA) del componente originale.

Questa metodologia è stata applicata a due casi studio: una generica trave caricata in mezzaria (TCM) e un profilo alare Eppler 420 (E420).

### Risultati principali

Per la Trave Caricata in Mezzaria (TCM) il modello ottimizzato con mesh orientata (MO) ha mostrato un comportamento meccanico superiore rispetto a quello con mesh standard (MS). Nonostante una massa leggermente inferiore (-0.66%), il componente ottimizzato con MO ha esibito:

- Uno spostamento massimo inferiore (-7.41%), indicando una maggiore rigidità.
- Una tensione di von Mises massima e media più basse (-57.49% e -4.92% rispettivamente), e una migliore distribuzione delle tensioni. Questo significa un maggior numero di elementi con valori di tensione intermedi e un minor numero di elementi altamente sollecitati. Questi risultati hanno dimostrato chiaramente che l'orientamento delle celle ortotrope della struttura lattice coerentemente con la direzione delle tensioni principali ha fornito un significativo vantaggio strutturale.

Per il Profilo Alare Eppler 420 (E420), analogamente alla TCM, il modello ottimizzato con MO ha esibito spostamenti e tensione media più bassi rispetto al modello con MS, a fronte di una massa leggermente più elevata (+2.15%). Sebbene la tensione massima sia risultata più alta in MO, il numero di elementi altamente sollecitati era estremamente basso. La distribuzione delle tensioni era migliore nella struttura MO, con più elementi a tensioni più basse e meno elementi ad alte tensioni.

L'efficacia del metodo per l'E420 è meno evidente rispetto alla TCM, principalmente a causa delle differenze nelle condizioni geometriche: la TCM presenta un numero maggiore di celle (e di dimensione media più piccola), consentendo una maggiore risoluzione nell'orientamento delle celle lungo le PSL. Ciò suggerisce che il metodo è

più efficace in presenza di una grande differenza dimensionale tra la geometria del componente e quella delle celle lattice.

### Validazione Sperimentale e Limitazioni

Un'importante criticità emersa è stata l'impossibilità di sottoporre a validazione sperimentale diretta i componenti ottimizzati in HyperWorks, a causa della limitata capacità del software di esportare le strutture lattice (generate come elementi monodimensionali CBEAM) in formati compatibili con la stampa 3D come .STL o .3mf.

Nonostante questa limitazione, per dimostrare l'efficacia delle PSL come guida per la realizzazione di strutture lattice rigide, sono stati condotti test meccanici su provini realizzati in PLA-Basic tramite Fused Deposition Melting (FDM) e creati utilizzando il software nTopology. I test hanno confrontato due strutture lattice del profilo E420: una con orientazione standard (LS) e una orientata (LO) tramite una "Cylindrical Cell Map" coerente con le PSL. Le simulazioni in nTopology avevano previsto per la struttura LO uno spostamento massimo inferiore del 3% a parità di massa, indicando maggiore rigidità. I risultati sperimentali hanno confermato questa previsione: il componente con struttura lattice orientata (LO), pur con una differenza di peso dell'1.27%, ha presentato una rigidità a flessione superiore del 7.4% rispetto al componente con struttura LS. Questo ha confermato l'efficacia delle Linee di Tensione Principale come guida per la realizzazione di strutture lattice più rigide.

Le principali limitazioni del lavoro includono, oltre al già citato problema di esportazione dei file da HyperWorks, la non perfetta automatizzazione dell'orientamento delle celle lungo le PSL, che ha richiesto più tentativi manuali, e la minore efficacia del metodo per componenti con celle di dimensione simile alla geometria generale.

### Sviluppi Futuri

Le future ricerche potrebbero concentrarsi sullo sviluppo di software e tool integrati che superino le attuali limitazioni di esportazione e sulla creazione di algoritmi di ottimizzazione topologica che permettano un orientamento delle celle più preciso e automatizzato in base alle PSL, specialmente per geometrie complesse e di dimensioni ridotte. Ulteriori studi potrebbero anche esplorare l'impiego di diversi materiali e tecnologie AM per valutare l'impatto dell'anisotropia intrinseca del processo di stampa sull'efficienza delle strutture ottimizzate con PSL.

# Bibliografia

- [1] Z. Golubović, J. Tanasković, A. Milovanović, e B. Bojović, «Experimental and Numerical Research of 3D DLP-Printed Solid and Voronoi PLA Resin Specimens Under Tensile and Bending Loads», *Polymers*, vol. 17, fasc. 9, p. 1180, apr. 2025, doi: 10.3390/polym17091180.
- [2] Y. Wang *et al.*, «Lattice structure design optimization coupling anisotropy and constraints of additive manufacturing», *Mater. Des.*, vol. 196, p. 109089, nov. 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2020.109089.
- [3] N. Harrison, «Comparing Additive Manufacturing Vs Subtractive Manufacturing: What Are the Differences», *rapiddirect*. Consultato: 7 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.rapiddirect.com/blog/additive-vs-subtractive-manufacturing/>
- [4] Y. Tang, G. Dong, Q. Zhou, e Y. F. Zhao, «Lattice Structure Design and Optimization With Additive Manufacturing Constraints», *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 15, fasc. 4, pp. 1546–1562, ott. 2018, doi: 10.1109/TASE.2017.2685643.
- [5] J. Yang, H. Liu, G. Cai, e H. Jin, «Additive Manufacturing and Influencing Factors of Lattice Structures: A Review», *Materials*, vol. 18, fasc. 7, p. 1397, mar. 2025, doi: 10.3390/ma18071397.
- [6] P. Xiao *et al.*, «Lightweight, Strong and Stiff Lattice Structures Inspired by Solid Solution Strengthening», *Materials*, vol. 18, fasc. 9, p. 1984, apr. 2025, doi: 10.3390/ma18091984.
- [7] Y. Sui e J. Liu, «Study on fatigue crack initiation behavior of two types of lattice structures», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 3009, fasc. 1, p. 012002, mag. 2025, doi: 10.1088/1742-6596/3009/1/012002.
- [8] L. Bai *et al.*, «Influence of relative density distribution rules on the mechanical compression responses of additive manufactured Ti6Al4V graded lattice structures», *Mech. Adv. Mater. Struct.*, vol. 30, fasc. 1, pp. 114–130, gen. 2023, doi: 10.1080/15376494.2021.2009600.
- [9] F. Distefano, S. Pasta, e G. Epasto, «Titanium Lattice Structures Produced via Additive Manufacturing for a Bone Scaffold: A Review», *J. Funct. Biomater.*, vol. 14, fasc. 3, p. 125, feb. 2023, doi: 10.3390/jfb14030125.
- [10] G. Nikaein, M. H. Sadeghi, M. Jamshidi, e B. Sağbaş, «INVESTIGATING THE EFFECT OF UNIT CELL ORIENTATION ON MECHANICAL PROPERTIES OF GYROID-BASED LATTICE STRUCTURES», *Int. J. 3D Print. Technol. Digit. Ind.*, vol. 9, fasc. 1, pp. 45–52, apr. 2025, doi: 10.46519/ij3dptdi.1542438.
- [11] C. di L. Magistrale, «Tesi Politi».
- [12] «Tesi\_De\_Michele».
- [13] C. Zhang *et al.*, «A novel lattice structure topology optimization method with extreme anisotropic lattice properties», *J. Comput. Des. Eng.*, vol. 8, fasc. 5, pp. 1367–1390, set. 2021, doi: 10.1093/jcde/qwab051.
- [14] M. E. García-Gutiérrez, A. L. Giraldo Betancur, E. Cuan-Urquizo, J. M. Alvarado-Orozco, e J. González-Hernández, «Numerical investigation of the effective mechanical properties of architected structures: a comparative study of

- flexural stiffness, homogenization, and elastic anisotropy», *Mater. Res. Express*, vol. 11, fasc. 11, p. 115801, nov. 2024, doi: 10.1088/2053-1591/ad8b99.
- [15] I. V. P. Berardi e N. Cardone, «Studio dei materiali compositi fibrorinforzati e della loro applicazione nel portellone di carico di un aereo da trasporto regionale».
- [16] Y. Li e Y. Chen, «Beam Structure Optimization for Additive Manufacturing based on Principal Stress Lines».
- [17] T. Stejskal, M. Dovica, J. Svetlík, P. Demeč, L. Hrivniak, e M. Šašala, «Establishing the Optimal Density of the Michell Truss Members», *Materials*, vol. 13, fasc. 17, p. 3867, set. 2020, doi: 10.3390/ma13173867.
- [18] M. Blaszczyk e K. Hackl, «Multiscale modeling of cancellous bone considering full coupling of mechanical, electric and magnetic effects», *Biomech. Model. Mechanobiol.*, vol. 21, fasc. 1, pp. 163–187, feb. 2022, doi: 10.1007/s10237-021-01525-6.
- [19] M. Y. Mohamed e H. K. Surmen, «A Comprehensive Review on Additive Manufacturing and Its Applications in Biomimetics»: in *Practice, Progress, and Proficiency in Sustainability*, B. K. Mishra, A c. di, IGI Global, 2024, pp. 499–520. doi: 10.4018/979-8-3693-1638-2.ch030.
- [20] «Lattice Structure Optimization». Consultato: 9 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: [https://2021.help.altair.com/2021/hwsolvers/os/topics/solvers/os/lattice\\_structure\\_optimization\\_intro\\_r.htm](https://2021.help.altair.com/2021/hwsolvers/os/topics/solvers/os/lattice_structure_optimization_intro_r.htm)
- [21] «aisi 4340 - MFG Shop». Consultato: 7 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: [https://shop.machinemfg.com/it/?post\\_type=product&s=aisi+4340&trp-form-language=it](https://shop.machinemfg.com/it/?post_type=product&s=aisi+4340&trp-form-language=it)
- [22] D. C. Panigrahi e D. P. Mishra, «CFD Simulations for the Selection of an Appropriate Blade Profile for Improving Energy Efficiency in Axial Flow Mine Ventilation Fans», *J. Sustain. Min.*, vol. 13, fasc. 1, pp. 15–21, 2014, doi: 10.7424/jsm140104.
- [23] A. Whan *et al.*, «Optimising the design of auxetic core airfoil for wing morphing applications», *Struct. Integr. Life*, vol. 25, fasc. Special Issue A, pp. S17–S24, mar. 2025, doi: 10.69644/ivk-2025-siA-0017.
- [24] «Passive\_Control\_of\_Boundary\_Layer\_on\_Wing\_Numerica».
- [25] A. Spadoni e M. Ruzzene, «Numerical and experimental analysis of the static compliance of chiral truss-core airfoils», *J. Mech. Mater. Struct.*, vol. 2, fasc. 5, pp. 965–981, lug. 2007, doi: 10.2140/jomms.2007.2.965.
- [26] B. Yang, «The influence of infill density on the mechanical properties of PLA samples in FDM 3D printing», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 3019, fasc. 1, p. 012046, mag. 2025, doi: 10.1088/1742-6596/3019/1/012046.
- [27] M. M. Hanon, R. Marczis, e L. Zsidai, «Influence of the 3D Printing Process Settings on Tensile Strength of PLA and HT-PLA», *Period. Polytech. Mech. Eng.*, vol. 65, fasc. 1, pp. 38–46, nov. 2020, doi: 10.3311/PPme.13683.
- [28] Z.-Z. Zhang, H.-Z. Zhang, e Z.-Y. Zhang, «3D printed poly( $\epsilon$ -caprolactone) scaffolds function with simvastatin-loaded poly(lactic-co-glycolic acid) microspheres to repair load-bearing segmental bone defects», *Exp. Ther. Med.*, vol. 17, fasc. 1, pp. 79–90, gen. 2019, doi: 10.3892/etm.2018.6947.
- [29] «Bambu Lab X1E Specifiche Tecniche».
- [30] «Bambu\_PA6-CF\_Technical\_Data\_Sheet-v2».
- [31] «Bambu\_PLA\_Basic\_Technical\_Data\_Sheet».
- [32] «MTS», MTS. Consultato: 11 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.mts.com/en/products/materials/static-materials-test-systems/www.mts.com>

