



Università  
degli Studi di  
Messina

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA

Università degli studi di Messina

Dipartimento di Ingegneria

Dottorato di Ricerca in "Ingegneria e Chimica dei Materiali e  
delle Costruzioni"

XXXIV Ciclo

**SVILUPPO DI ALGORITMI DI  
OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA ORIENTATI  
ALL'ADDITIVE MANUFACTURING**

Fabio Salmeri

Tutor: Prof. Filippo Cucinotta

Coordinatore: Prof. Giovanni Neri

SSD: ING/IND-15 - DISEGNO E METODI DELL'INGEGNERIA  
INDUSTRIALE

2020/2021

## **Abstract**

The PhD thesis was aimed at the implementation of new Topological Optimization algorithms oriented at Additive Manufacturing. Five algorithms were developed and allowed the application of different Topological Optimization strategies, in particular:

- Topological optimization of surfaces with Voronoi tessellation
- Topological optimization of complex surfaces with Voronoi tessellation
- Topology optimization of volumes with Voronoi tessellation
- Topological optimization of stochastic lattice structures
- Topological optimization through structural hollowing

In particular, the study was focused on the optimization of an objective function, defined by the user, such as the minimization of the analysed components' weight by considering the maximum stress as a threshold.

Unlike most of the existing Topological Optimization strategies, the developed algorithms act on the CAD instead of the mesh.

The advantage of obtaining a CAD ready to use without a subsequent designer mediation lies in the possibility of a direct creation of the optimized part through Additive Manufacturing technologies.

All the algorithms were implemented in Rhino - Grasshopper environment which employs a block parametric drawing system unlike most of the CAD software which use a tree logic. The algorithms have been designed to be independent from the type of finite element software used for structural analysis.

The methodology underlying all the developed algorithms uses an iterative process. At each iteration the algorithms add material where the obtained stress values are higher and remove material where the stresses are lower.

In some of the developed algorithms a Voronoi diagram was used: this acts through a hollowing, starting from some points (seeds), which can have a random distribution or dependent on the calculated stress, allowing the designer to set numerous parameters, such as the number of control points, the size of the holes and the thickness of the tessellation branches. An iterative process leads to redesigning the

Voronoi tessellation at each iteration as a function of the stress distribution.

In the Topological Optimization of stochastic lattice structures, a reticular structure was generated whose seeds can be distributed in a stochastic way or through a distribution law. The seed population can be controlled according to the design parameters chosen by the user.

Finally, the Topological Optimization algorithm using structural hollowing was set up using cylindrical holes whose diameters vary according to the calculated stresses. The advantage of such approach is that it is suitable for both additive and subtractive manufacturing. In this case, the optimized component was printed using a 3D Fused Deposition Modeling technique and an experimental campaign was conducted to test its effectiveness.

For each optimization strategy, different components have been optimized and tested as case studies, such as a seat for motorboat applications, a Frontal Head Restraint device, an automotive connecting rod and rectangular beams.

The results obtained in all case studies were discussed in detail. The developed algorithms have shown good qualities in terms of ease of use and performance of the optimized component.

## Abstract

La tesi di dottorato è stata finalizzata alla realizzazione di nuovi algoritmi di Ottimizzazione Topologica orientati alla produzione mediante tecnologie di Additive Manufacturing. I cinque algoritmi realizzati hanno permesso di effettuare diverse strategie di Ottimizzazione Topologica, in particolare:

- Ottimizzazione Topologica di superfici con diagrammi di Voronoi
- Ottimizzazione Topologica di superfici complesse con diagrammi di Voronoi
- Ottimizzazione Topologia di volumi con diagrammi di Voronoi
- Ottimizzazione Topologica di strutture *lattice* stocastiche
- Ottimizzazione Topologica mediante *hollowing* strutturale

In particolare, lo studio si è concentrato sull'ottimizzazione di una funzione obiettivo impostata dall'utente come, ad esempio, la minimizzazione del peso dei componenti esaminati considerando la tensione massima come soglia da non superare.

Mentre la maggior parte delle strategie di Ottimizzazione Topologica ad oggi utilizzate agiscono sulla mesh, gli algoritmi realizzati in questo progetto di tesi operano direttamente a livello CAD. Il vantaggio di ottenere un CAD pronto all'uso senza la necessità di un successivo intervento da parte del progettista sta nel poter realizzare direttamente il pezzo ottimizzato attraverso tecnologie di Additive Manufacturing. Tutti gli algoritmi sono stati realizzati in ambiente Rhino – Grasshopper il quale impiega sistema di disegno parametrico a blocchi a differenza della maggioranza dei software CAD che impiegano una logica ad albero. Gli algoritmi sono stati progettati in modo da essere indipendenti dal tipo di software agli elementi finiti utilizzato per l'analisi strutturale.

La metodologia alla base di tutti gli algoritmi realizzati sfrutta un processo iterativo. Ad ogni iterazione gli algoritmi aggiungono materiale dove i valori di tensione ottenuti risultano essere più alti e rimuovono materiale dove le tensioni sono inferiori.

In alcuni degli algoritmi sviluppati è stato impiegato un diagramma di Voronoi il quale agisce tramite uno svuotamento, a partire da alcuni punti (semi), che possono avere una distribuzione random o dipendente dalle tensioni calcolate, permettendo al progettista di impostare numerosi parametri, come il numero di punti di controllo, la dimensione

dei fori e lo spessore dei rami della tassellazione. Un processo iterativo porta a ridisegnare ad ogni iterazione lo schema di Voronoi in funzioni della distribuzione delle tensioni.

Nell' Ottimizzazione Topologica di strutture *lattice* stocastiche è stata generata una struttura reticolare i cui semi possono essere distribuiti in modo stocastico o tramite una legge di distribuzione. La popolazione dei semi può essere controllata in funzione di parametri progettuali scelti dall'utente.

Infine, l'algoritmo di Ottimizzazione Topologica mediante *hollowing* strutturale è stato impostato utilizzando fori cilindrici i cui diametri variano in funzione alle tensioni calcolate. Il vantaggio di questo approccio consiste nel fatto che si presta ad essere utilizzato sia per la produzione additiva che per quella sottrattiva. In questo caso il componente ottimizzato è stato stampato utilizzando una tecnica di stampa 3D Fused Deposition Modeling ed è stata condotta una campagna sperimentale per testarne l'efficacia.

Per ogni strategia di ottimizzazione sono stati ottimizzati e testati, come casi studio, differenti componenti, quali, un sedile per applicazioni motonautiche sportive, un dispositivo Frontal Head Restraint, una biella automobilistica e delle travi rettangolari.

I risultati ottenuti in tutti i casi studio sono stati discussi nel dettaglio. Gli algoritmi sviluppati hanno dimostrato buone performance in termini di semplicità di utilizzo e prestazioni del componente ottimizzato.

# Sommario

<b>1.</b>	<b>INTRODUZIONE E STATO DELL'ARTE .....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>MATERIALI E METODI .....</b>	<b>10</b>
2.1.	MODELLAZIONE ALGORITMICA IN AMBIENTE GRASSHOPPER .....	10
2.1.1.	STRUTTURA DI GRASSHOPPER .....	10
2.1.2.	STRUTTURA DATI .....	15
2.1.3.	LA TASSELLAZIONE DI VORONOI .....	17
<b>3.</b>	<b>OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA CON SUPERFICI DI VORONOI .....</b>	<b>21</b>
3.1.	PRESENTAZIONE .....	21
3.2.	L'ALGORITMO .....	22
3.3.	L'ACQUISIZIONE DELLA GEOMETRIA .....	29
3.4.	I MATERIALI .....	30
3.5.	IL MODELLO FE .....	33
3.6.	RISULTATI E DISCUSSIONE .....	37
3.6.1.	IL SEDILE IN FIBRA DI CARBONIO .....	37
3.6.2.	L'OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA .....	38
3.7.	DISCUSSIONE FINALE .....	45
<b>4.</b>	<b>OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA DI SUPERFICI COMPLESSE CON VORONOI .....</b>	<b>47</b>
4.1.	PRESENTAZIONE .....	47
4.2.	L'ALGORITMO .....	48
4.3.	L'ACQUISIZIONE DELLA GEOMETRIA .....	51
4.4.	IL MATERIALE .....	52
4.5.	IL MODELLO FE .....	52
4.6.	RISULTATI E DISCUSSIONE .....	54
4.7.	CONSIDERAZIONI FINALI .....	58
<b>5.</b>	<b>OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGIA DI VOLUMI DI VORONOI .....</b>	<b>59</b>
5.1.	PRESENTAZIONE .....	59
5.2.	L'ALGORITMO .....	60
5.3.	IL MATERIALE .....	62
5.4.	IL MODELLO FE .....	63
5.5.	RISULTATI E DISCUSSIONE .....	65
5.5.1.	CASO A .....	65
5.5.2.	CASO B .....	69
5.5.3.	CASO C .....	71

5.6.	CONSIDERAZIONI FINALI .....	76
<b>6.</b>	<b>OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA DI STRUTTURE <i>LATTICE</i></b>	
	<b>STOCASTICHE .....</b>	<b>79</b>
6.1.	PRESENTAZIONE .....	79
6.2.	L'ALGORITMO .....	79
6.3.	IL CASO DI STUDIO .....	80
6.4.	RISULTATI E DISCUSSIONE .....	83
6.5.	CONSIDERAZIONI FINALI .....	89
<b>7.</b>	<b>OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA MEDIANTE <i>HOLLOWING</i></b>	
	<b>STRUTTURALE .....</b>	<b>90</b>
7.1.	PRESENTAZIONE .....	90
7.2.	L'ALGORITMO .....	91
7.3.	LA PROTOTIPAZIONE FDM.....	93
7.4.	LA PROVA DI FLESSIONE.....	95
7.5.	RISULTATI E DISCUSSIONE .....	97
7.6.	CONSIDERAZIONI FINALI .....	101
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>102</b>
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>108</b>

## **1. Introduzione e stato dell'arte**

La progettazione di strutture e di nuovi materiali che permettano di migliorare le prestazioni di strutture e componenti meccanici, agendo sulla riduzione del loro peso, è stata la sfida industriale dell'ingegneria meccanica per eccellenza del XXI secolo.

Il collegamento tra L'Additive Manufacturing (AM) e l'Ottimizzazione Strutturale (OS) risulta essere al giorno d'oggi l'elemento chiave nello sviluppo di nuovi prodotti; infatti, i modelli realizzati possono essere prototipati in modo rapido e semplice. Ciò offre ai progettisti un'enorme flessibilità sulla realizzazione di nuove geometrie rispetto alla produzione tradizionale, senza costi aggiuntivi. L'Ottimizzazione Strutturale riduce l'utilizzo di materiale e applicata insieme all'additive manufacturing può accorciare il ciclo di progettazione e migliorare la qualità del prodotto, in quanto il prototipo stampato in 3d consente di validare la progettazione dei componenti. Inoltre, l'impiego della stampa 3D per la realizzazione dello stampo pilota nel caso delle produzioni in serie permette di ridurre tempi e costi di produzione.

La maggior parte delle tecniche utilizzate oggi tendono ad ottimizzare la topologia, la dimensione o la forma.

L'idea generale è quella di trovare la distribuzione ottimale del materiale all'interno di una struttura in funzione dei carichi e dei vincoli agenti su di esso.

Tra le possibili Ottimizzazioni Strutturali, l'Ottimizzazione Topologica (OT) è quella che Permette di ottenere strutture molto performanti, ottimizzando uno o più parametri, quali peso, tensioni agenti, costi e impatto ambientale.

Quindi, ad oggi la sfida principale riguardante l'Ottimizzazione Topologica è quella di fornire una parametrizzazione del design che porti anche a una condizione strutturalmente ottimale [1].

Tra i primi articoli pubblicati riguardanti l'Ottimizzazione Topologica vi è quello redatto nel 1904 dall'ingegnere meccanico australiano Anthony George Maldon Michell [2]. L'articolo di Michell ha affrontato il problema della topologia a volume minimo di capriate.

Bendsoe [3] nel 1989 presentò per la prima volta come trovare la distribuzione ottimale della densità relativa su una griglia di voxel per una frazione di volume scelta sotto un insieme predefinito di carichi esterni e condizioni al contorno.

Tale concetto è oggi molto maturato con un'ampia applicazione tra tutti i campi dell'ottimizzazione strutturale [4, 5].

L'Ottimizzazione Topologica è attualmente studiata ed utilizzata per una miriade di applicazioni, sia nell'industria che nel mondo accademico. Una rassegna degli articoli pubblicati dal 1989 fa luce sulla sua estesa applicazione alla meccanica strutturale [1, 6–10]. Bendsoe ha per primo considerato l'OT delle strutture continue [11], mentre Suzuki et al. hanno considerato l'Ottimizzazione Topologica con il metodo dell'omogeneizzazione [12]. Duysinx et al. sono stati i primi a considerare i vincoli di stress locali [13], mentre Beekers ha studiato l'OT su strutture continue linearmente elastiche [14]. La progettazione ottimale di strutture a guscio/piastra con piccole deformazioni è stata studiata nei seguenti articoli [15–18]. Hammer et al. hanno lavorato sull'Ottimizzazione Topologica considerando carichi di pressione [19], mentre Buhl ha studiato l'Ottimizzazione Topologica con non linearità geometriche [20]. Il metodo è stato inoltre applicato con anche per valutare la topologia ottimale di una struttura elastica lineare valutandone la sua stabilità globale e applicandola a problemi dinamici [6, 21, 22]. Kikuchi et al. hanno considerato un problema di ottimizzazione della risposta in frequenza sia per la disposizione ottimale che per il rinforzo di una struttura elastica [23]. Un lavoro esteso sulla topologia ottimale di strutture discrete come capriate e strutture a griglia è stato fatto da Rozvany et al. [10]. Collet et

al. hanno sfruttato l'Ottimizzazione Topologica per la progettazione strutturale a peso minimo sotto vincoli locali basati sullo stress per la resistenza alla fatica[23], e successivamente sono ricorsi all'Ottimizzazione Topologica per la progettazione di microstrutture periodiche con vincoli di stress per prevenire alte concentrazioni di tensione [24]. Una ricerca significativa sull'ottimizzazione topologica di problemi non lineari multiscala è stata condotta da Xia e Breitung [25–27].

Il presente lavoro di tesi propone dei metodi di Ottimizzazione Topologica, di varie tipologie di componenti, mediante lo studio dell'intensità e della distribuzione dello stato tensionale agente su questi ultimi.

Pur non essendo una metodologia di recente innovazione, l'Ottimizzazione Topologica, ha suscitato negli ultimi anni un interesse sempre maggiore grazie alla crescente diffusione delle tecnologie di Additive Manufacturing. L'Ottimizzazione Topologica è quindi una metodologia dalle grandi potenzialità [28]. Permette di ottenere strutture molto performanti, ottimizzando uno o più parametri quali peso, sollecitazioni, costi e impatto ambientale [29]. Recentemente, grazie al rapido sviluppo delle tecnologie di Additive Manufacturing (AM), anche l'Ottimizzazione Topologica ha avuto un rapido

incremento di interesse e applicazione [30] I campi di applicazione della OT abbracciano diversi ambiti, tra i quali spiccano quello biomedicale [31, 32] sportivo [33], automotive [34] e aerospaziale [35].

L'Ottimizzazione Topologica si differenzia dall'ottimizzazione delle dimensioni (Sizing Optimization) o della forma (Shape Optimization) in quanto consente una maggiore libertà di azione e minori costi computazionali [36]. I due approcci più utilizzati prevedono l'uso di strutture reticolari o in alternativa l'uso dell'analisi agli elementi finiti [37]. Tuttavia, i passi da gigante compiuti nell'ultimo decennio in ambito di Additive Manufacturing (AM) hanno reso sempre più interessante lo sviluppo di nuovi metodi di Ottimizzazione Topologica.

L'Additive Manufacturing è una metodologia di produzione con la quale è possibile creare oggetti tridimensionali attraverso la deposizione di materiale strato per strato utilizzando diversi tipi materiali e tecnologie; si procede, quindi, in modo opposto rispetto ai metodi di fabbricazione tradizionali che operano sottraendo materiale [38] per conferire al pezzo le caratteristiche geometriche desiderate, come ad esempio quelli basati sull'asportazione di truciolo. Sviluppato nel 1980 come metodo per la prototipazione rapida [39] l'Additive Manufacturing si è evoluto, tanto da poter essere utilizzato nella produzione di pezzi

completamente finiti. Le proprietà meccaniche che questi prodotti finali possiedono dipendono essenzialmente dal metodo con cui vengono depositati gli strati di materiale, nonché dal materiale stesso. Concentrandosi sulla *Fused Deposition Modeling* (FDM), una tecnica di fabbricazione additiva utilizzata nella parte sperimentale di questo lavoro di tesi, è possibile vedere come, sia la finitura superficiale che le proprietà meccaniche del pezzo dipendano dallo spessore dello strato e della direzione di stampa [40, 41]. La realizzazione di un oggetto tridimensionale con la tecnica FDM avviene attraverso l'utilizzo di un filamento polimerico termoplastico che, dopo essere stato riscaldato e portato allo stato fuso, viene depositato per mezzo di un estrusore. Pertanto, per la corretta realizzazione del pezzo, è necessario conoscere il tipo di sollecitazione che agirà su di esso durante il suo utilizzo e, di conseguenza, definire una direzione di stampa appropriata che dia all'oggetto le proprietà meccaniche di cui ha bisogno. Ciò è consentito dalla possibilità di posizionare spazialmente il modello CAD 3D e di poter stampare, allo stesso tempo, le strutture di supporto necessarie [42] (che verranno successivamente rimosse) per lo *slicing* delle geometrie nella direzione desiderata. Tra i principali vantaggi di questo metodo di produzione, vi è la possibilità di creare oggetti dalla forma complessa anche se

limitati nelle dimensioni dalla grandezza della macchina con cui vengono prodotti. Questo specifico vantaggio è legato al concetto di Ottimizzazione Topologica.

La sinterizzazione laser selettiva (SLS) è una tecnologia di Additive Manufacturing che per realizzare l'oggetto 3D utilizza l'azione di un laser su un letto di polvere metallica, ceramica o polimerica. Durante il processo di stampa, il laser viene diretto per disegnare un motivo specifico sulla superficie del letto di polvere, fondendo le particelle colpite. Una volta completato il primo strato, un rullo distribuisce un nuovo strato di polvere sopra il precedente. L'oggetto viene costruito strato per strato. La sinterizzazione laser selettiva rispetto alla prototipazione FDM non richiede la produzione preventiva di filamenti mediante estrusione a caldo e produce oggetti di maggiore risoluzione grazie alla precisione del laser. Tuttavia, poiché i materiali comunemente utilizzati richiedono temperature elevate per essere sinterizzati risulta necessario l'utilizzo di laser ad alta energia.

Una rassegna sullo stato dell'arte delle tecniche di AM con particolare riferimento all'AM dei componenti in Titanio è stata redatta da Saboori et al. [43].

Il tema dello sviluppo di materiali innovativi e geometrie efficienti è fortemente tenuto in considerazione nel campo del motorsport, in cui sicurezza, affidabilità e peso sono elementi

fondamentali. In particolare, Cucinotta et al. hanno effettuato diversi studi al fine di testare e sviluppare materiali ad alte prestazioni per applicazioni offshore di motoscafi [44, 45].

L'Ottimizzazione Topologica realizzata in questo progetto di tesi si basa sulla realizzazione di algoritmi in grado di modificare la geometria del componente in funzione delle sollecitazioni agenti su di esso. Lo studio si è concentrato sull'ottimizzazione del peso dei componenti considerati considerando la tensione come limite massimo da raggiungere, tuttavia, il metodo si presta anche ad altri tipi di ottimizzazione come, ad esempio, di rigidezza o di costo. Gli algoritmi sviluppati sono stati implementati con Rhino-Grasshopper che consente di modificare direttamente il CAD, senza agire, come solitamente avviene, sulla mesh. Grasshopper è un plugin di Rhino ([grasshopper3d.com](http://grasshopper3d.com)). Gli algoritmi sviluppati, permettono l'Ottimizzazione Topologica dei componenti sia attraverso lo svuotamento di superfici e volumi, che attraverso la creazione di strutture *lattice*. Lo svuotamento dei componenti ottimizzati è stato ottenuto mediante la tassellazione di Voronoi, o attraverso la creazione di fori cilindrici. Il diagramma di Voronoi consente di decomporre uno spazio metrico rispetto alle distanze di un insieme discreto di elementi, descrivendone il partizionamento in regioni distinte in funzione della distanza

dei punti, agendo su parametri quali il numero di punti di controllo e la dimensione delle cavità. Il metodo di sottrazione di materiale attraverso dei fori cilindrici, ha inizio dalla definizione di una griglia di punti che rappresentano i semi da cui partirà lo svuotamento del componente, si noti come questa tecnica si presta sia per produrre componenti sia con tecnologie additive che sottrattive, come foratrici o fresatrici. Per analizzare come le sollecitazioni agiscono sul componente scelto, è stato necessario effettuare un'analisi FEM.

A seguito delle analisi FEM, lo svuotamento è gestito da diversi parametri, legati principalmente alle tensioni ottenute dall'analisi stessa. Secondo un processo iterativo, l'algoritmo consente di svuotare il modello CAD variando la distribuzione e la dimensione dei fori in funzione delle tensioni.

Nel lavoro di tesi si è partiti dall'Ottimizzazione Topologica di componenti 2D, fino ad arrivare alla realizzazione di algoritmi più complessi che permettono di ottimizzare componenti 3D. A seguito del capitolo 2 in cui sono illustrati i materiali e metodi impiegati, nei capitoli dal 3 al 7 sono illustrati nel dettaglio i singoli algoritmi sviluppati, utilizzando dei casi di studio di test.

## 2. Materiali e metodi

### 2.1. Modellazione algoritmica in ambiente Grasshopper

#### 2.1.1. Struttura di Grasshopper

Gli algoritmi sviluppati per il seguente progetto di tesi sono stati implementati mediante l'uso di *Grasshopper*, un plug-in di *Rhinoceros* che consente di creare modelli 3D parametrizzati realizzati con un diagramma a blocchi. Grasshopper utilizza un sistema di modellazione parametrica che permette di creare forme comunque complesse attraverso la definizione di un diagramma a nodi, ovvero un algoritmo utilizzato per stabilire relazioni matematiche su un modello 3D.

L'editor di Grasshopper è costituito da una finestra, che lavora in parallelo con l'ambiente di lavoro di *Rhinoceros*, consentendo di realizzare una geometria sull'ambiente di lavoro 3D, di parametrizzarla col diagramma a nodi e di poter osservare direttamente su *Rhinoceros* il risultato dell'imposizione dei parametri su quest'ultima, ottenendo una visualizzazione chiara ed immediata.

La struttura dell'editor mostrata in Figura 1 è composta da:

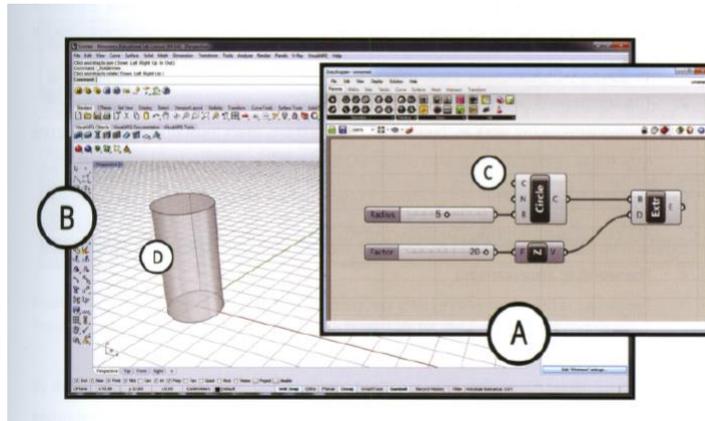


Figura 1 - Struttura complessiva dell'editor di Grasshopper

A finestra di Grasshopper

B ambiente di modellazione Rhino

C algoritmo visivo

D geometria generata

In riferimento all'ambiente A, la finestra di Grasshopper è suddivisa in quattro parti, come riportato in Figura 2.

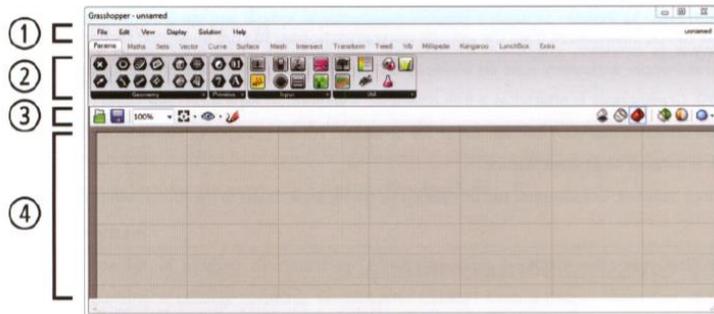


Figura 2 - Composizione finestra di Grasshopper

1. **Barra menù:** essa presenta le operazioni di base, quali Apri, Salva ecc. e consente di aprire più file simultaneamente.
2. **Scheda Componenti:** per abilitarli, l'utente deve trascinare le icone sull'area di lavoro e ciascuno di essi diventa un nodo dell'algoritmo.
3. **Barra degli strumenti:** che contiene le opzioni di visualizzazione.
4. **Area di lavoro:** spazio utilizzato per creare l'algoritmo.

La *Scheda Componenti* contiene Primitive (quali punto, curva e superficie), Entità Geometriche (come i vettori), Operazioni Geometriche (come estrusione e rivoluzione) e altre categorie, che sono tutte raggruppate in *Elementi*. Gli

elementi sono organizzati in *Pannelli*, come mostrato in Figura 3:



Figura 3 - Esempio di suddivisione in componenti e pannelli

I pannelli possono essere estesi per mostrare tutti i comandi utilizzabili. A titolo d'esempio, in Figura 4 si riportano tutti i comandi racchiusi nel pannello *Geometry*:

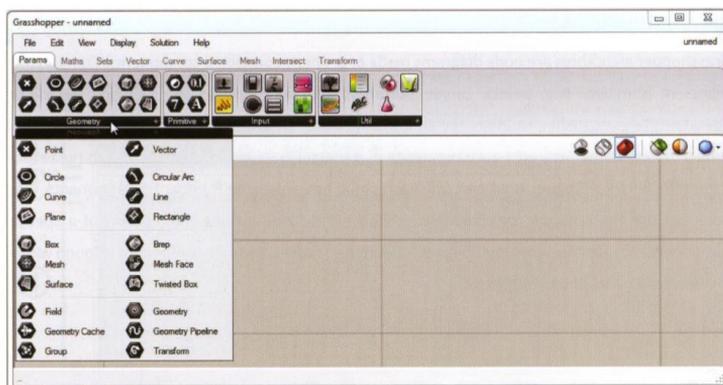


Figura 4 - Estensione del pannello Geometry

Possiamo distinguere tre tipi di elementi:

1. *Elementi Standard*, che eseguono operazioni sui dati, ovvero necessitano di un insieme di input definiti che

vengono elaborati per generare un output, che può essere usato come input in un altro elemento.

2. *Elementi Input*, che forniscono dati modificabili dall'utente e non necessitano di dati in ingresso.
3. *Elementi Contenitori*, che possono includere dati in diversi modi e possono essere usati come input per altri elementi.

Un elemento standard si suddivide in tre sezioni: input, nome e output, come mostrato in Figura 5 per l'elemento *Construct Point*.

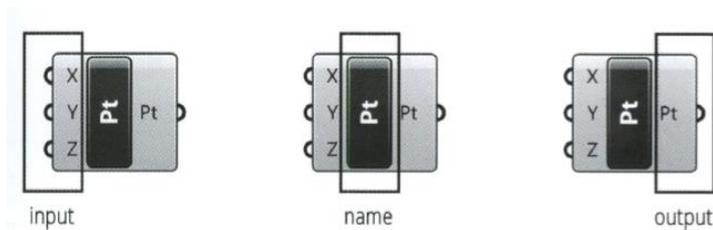


Figura 5 - Struttura dell'Elemento Standard Construct Point

- *Input*: contiene un numero variabile di ingressi relativi ad ogni elemento.
- *Nome*: mostra il nome abbreviato o esteso dell'elemento. Questo può essere rinominato, oppure in alternativa è possibile mostrare l'icona piuttosto che il nome dell'elemento.
- *Output*: contiene un numero variabile di uscite relative ad ogni elemento.

### 2.1.2. Struttura dati

Grasshopper gestisce i dati secondo una struttura dati ad albero (Figura 6). L'albero dati, permette la realizzazione di relazioni complesse generando dei sottoinsiemi per ogni percorso.

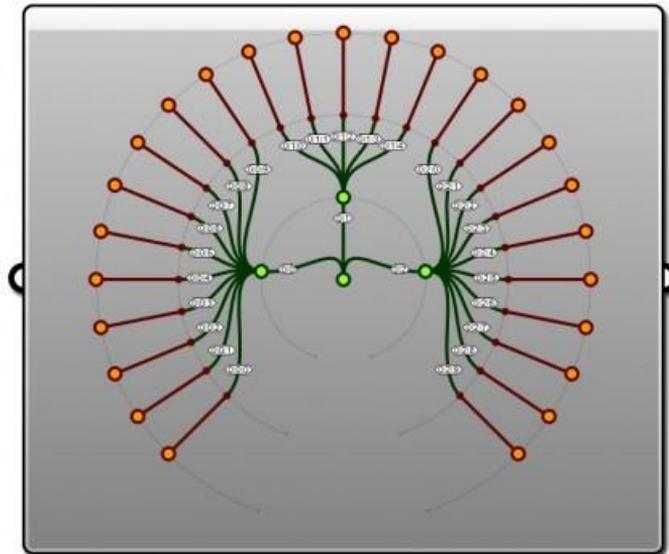


Figura 6 - Rappresentazione della struttura dati col comando Param Viewer

Gli Alberi di Dati seguono due regole:

1. I rami sono dei sottoinsiemi stagni, dunque la connessione tra dati appartenenti a rami diversi non è realizzabile.

2. Gli alberi di dati possono essere manipolati per ottenere risultati specifici.

Per manipolare la struttura dei dati si utilizzano elementi quali Flatten e Graft.

*Flatten (Appiattare)*: semplifica un albero dati rimuovendo tutte le informazioni dai rami e spostandole nei tronchi. In alternativa al blocco *Flatten*, è possibile applicare il comando direttamente su uno specifico input e/o output, come mostrato in Figura 7:

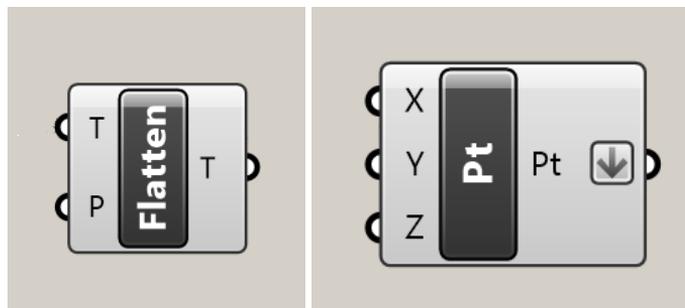


Figura 7 - Comando Flatten Tree e comando Flatten sull'output del comando Construct Point

*Graft (Innestare)*: crea un ramo per ogni oggetto appartenente ad una lista. In alternativa al blocco Graft, è possibile applicarlo su uno specifico input e/o output, come mostrato in Figura 8:

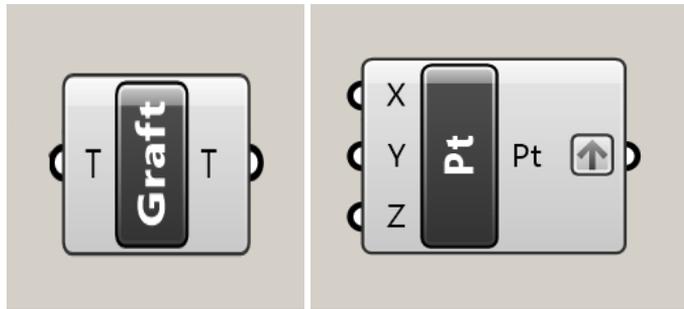


Figura 8 - Comando Graft Tree e comando Graft sull'output del comando Construct Point

### 2.1.3. La tassellazione di Voronoi

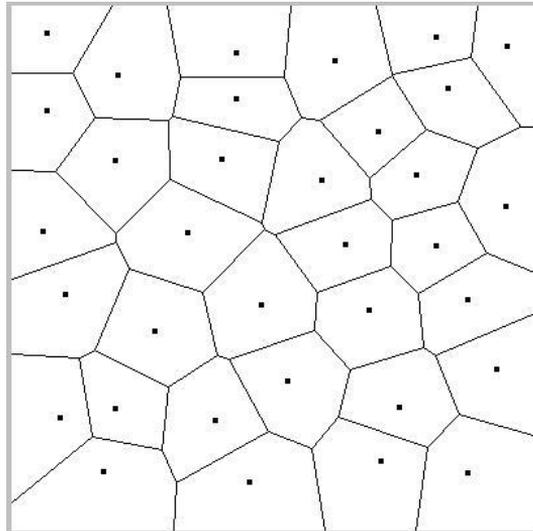
Uno degli elementi di Grasshopper che consente di realizzare lo svuotamento del componente è Voronoi (dal nome del matematico russo Georgij Voronoi) che consiste in un partizionamento del piano in  $n$  poligoni derivati da  $n$  punti principali, dove ciascun poligono contiene uno solo degli  $n$  punti principali e dove ogni altro punto del poligono è più vicino al punto del poligono che a tutti gli altri.

Quanto detto può essere sintetizzato affermando che il diagramma di Voronoi è una decomposizione dello spazio metrico, determinata dalle distanze rispetto ad un insieme discreto di elementi nello spazio.

Il diagramma di Voronoi viene utilizzato per applicazioni in ambito geofisico e meteorologico per analizzare distribuzioni nello spazio, quali la distribuzione delle precipitazioni, oppure

in ambito fisico per la realizzazione di polimeri, in quanto consente di scoprire il punto più vicino ad un punto definito senza dover calcolare la distanza di quest'ultimo da ogni punto presente.

Una rappresentazione del diagramma di Voronoi è riportata in Figura 9.



*Figura 9 - diagramma di Voronoi*

Il diagramma parte dalla costruzione di circonferenze, centrate su dei punti casuali sul piano. All'aumentare del loro raggio, si generano delle intersezioni tra coppie di circonferenze, formando delle celle date dall'unione lineare dei punti d'intersezione. Ciò consente di realizzare dei pattern

costituiti da punti casuali o da una disposizione di punti ben definita.

In Figura 10 sono riportati i comandi Voronoi e Voronoi 3D, applicati in questo progetto di tesi:

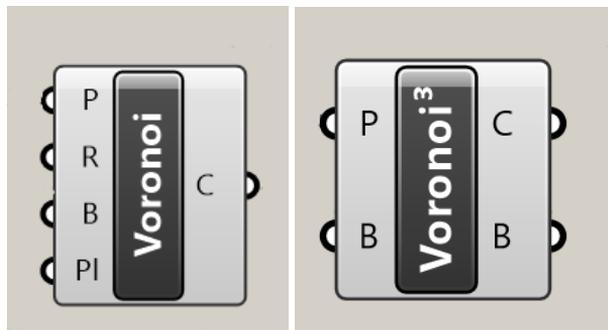


Figura 10 - Comandi Voronoi e Voronoi 3D

I parametri da inserire in ingresso sono:

- *Punti (P)*: popolazione di punti necessari per realizzare il diagramma Voronoi.
- *Raggio (R)*: indica il raggio delle celle.
- *Confine (B)*: confine di contenimento per il diagramma puramente opzionale.
- *Piano (Pl)*: stabilisce un piano base opzionale. Se non viene fornito, verrà usato il piano più adatto.

I parametri in uscita sono:

- *Celle (C)*: celle del diagramma Voronoi

- *Confine (B)*: lista di valori booleani che indica per ogni cella se è parte del confine originale.

Voronoi consente la realizzazione di celle sia per una popolazione di punti casuale della geometria (col comando *Populate Geometry*), sia con punti definiti stabiliti in ingresso.

### 3. Ottimizzazione Topologica con superfici di Voronoi

#### 3.1. Presentazione

In questa prima parte di tesi è stato scelto come primo caso di studio, un sedile da throttleman per motoscafi di classe X-CAT. In queste tipologie di competizioni è imposto un limite di almeno due persone di equipaggio ovvero un pilota e un throttleman. Il pilota ha la funzione di governare il motoscafo mentre il throttleman attraverso una leva di comando (*throttle*), regola la potenza del motore durante tutta la competizione (Figura 11).



*Figura 11 – disposizione dei sedili nei motoscafi da competizione classe X-CAT*

Mentre il sedile originale è stato realizzato utilizzando un laminato in fibra di carbonio, quello proposto in questo caso studio è progettato per la realizzazione tramite la sinterizzazione laser selettiva (SLS) in lega di titanio. Per la

caratterizzazione meccanica della lega di titanio sono stati utilizzati i risultati di Murr et al. [46]. e la scheda tecnica del materiale di EOS Titanium Ti64 [47]. La caratterizzazione meccanica del composito in fibra di carbonio è stata eseguita mediante l'uso di una macchina per prove di trazione abbinata a una *Digital Image Correlation* (DIC), al fine di valutare la vera curva di tensione deformazione. La geometria del sedile originale è stata ottenuta per mezzo di una scansione 3D. Per quanto riguarda carichi, vincoli e deflessioni, si è fatto riferimento alla specifica 39.2 SFI per i sedili da corsa [48] che stabilisce gli standard per la sicurezza degli sport motoristici. La SFI Foundation è un'organizzazione senza scopo di lucro istituita per emettere e amministrare standard per assicurare la qualità delle prestazioni e delle attrezzature da corsa.

### 3.2. L'algoritmo

Il diagramma di flusso utilizzato in questo lavoro è schematizzato in Figura 12. I tre blocchi colorati rappresentano tre diversi ambienti software. Il primo blocco (arancione) rappresenta l'ambiente del software di scansione 3d. Il secondo blocco (giallo) rappresenta l'algoritmo sviluppato all'interno dell'ambiente Rhino – Grasshopper. Il blocco grigio si riferisce alla parte sviluppata in ambiente Ansys workbench che consente di effettuare la FEM. Il passaggio tra il blocco Grasshopper e quelli di Ansys è ciclico.

La fase di Surface editing permette di esportare una superficie CAD pronta per l'analisi strutturale e per la comparazione con la superficie originale in materiale composito. La comparazione avviene a livello di peso della struttura fissato il limite massimo di tensione raggiungibile. Nel caso in cui l'obiettivo non sia raggiunto il ciclo genera una nuova tassellazione di Voronoi fino alla verifica del target.

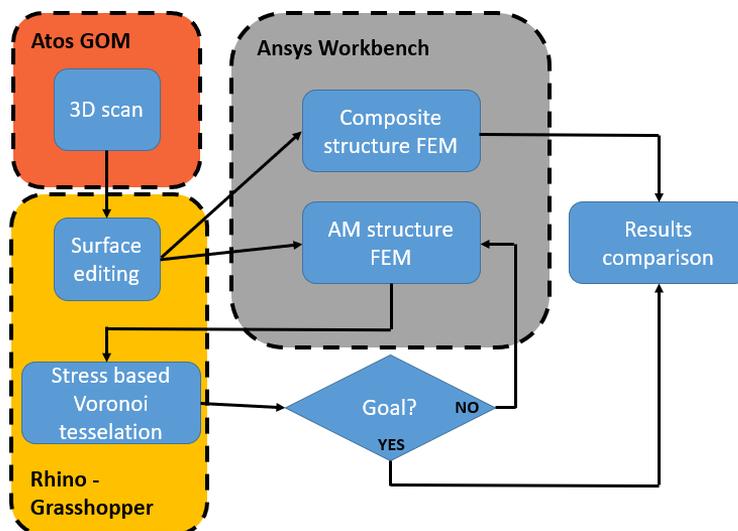
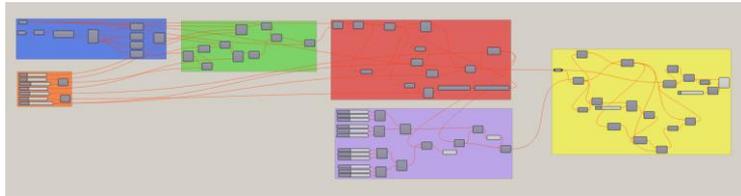


Figura 12 - Flowchart del metodo

Il cuore della metodologia proposta si svolge all'interno dell'ambiente Rhino - Grasshopper. La Figura 13 è una rappresentazione globale dell'algorithm di OT in cui ogni comando, rappresentato da una "tavolozza di componenti", è

raggruppato all'interno di sei diversi gruppi differenziati per colore.



*Figura 13 - Schema globale dell' algoritmo OT in ambiente Rhino – Grasshopper*

I gruppi sono:

- Blu: Lettura di punti e superfici
- Arancione: impostazione dei parametri
- Verde: tassellazione di Voronoi
- Rosso: Generazione di curve
- Viola: imposizione dei vincoli
- Giallo: generazione di superfici

L'Ottimizzazione Topologica agisce direttamente sulla superficie desiderata. Il primo passo consiste nell'analisi agli elementi finiti della struttura originale (Iterazione 0). L'esportazione dei dati in formato di testo csv, che contiene sotto forma di elenco le tensioni e i rispettivi nodi su cui agiscono, rende l'algoritmo indipendente dal software utilizzato per la FEA. Successivamente, viene effettuato uno

svuotamento della struttura, con andamento regolare, mediante una popolazione di punti sulla superficie (Iterazione 1). La popolazione, in questa fase, è costituita da una griglia regolare di punti, al fine di garantirne un numero minimo in ogni parte della superficie, secondo un intervallo desiderato. In questa fase, il peso viene drasticamente ridotto, ma le tensioni agenti all'interno del pezzo potrebbero essere al di fuori dell'intervallo consentito. Inoltre, è possibile impostare una o più zone vincolate per identificare le parti della geometria da non ottimizzare in tutte le iterazioni. Ci sono molte possibilità per definire l'area vincolata; in questo caso studio, tali zone sono state scelte come quelle interessate dai due binari che rappresentano il vincolo del sedile, definite attraverso due riquadri tridimensionali. La tassellazione di Voronoi è composta da segmenti che fungono da base per la generazione di una superficie loft. La superficie è generata attribuendo una larghezza ai rami monodimensionali della tassellazione stessa. Ogni foro viene poi raccordato imponendo un raggio di raccordo.

Ad ogni iterazione successiva (Iterazione 2 e successive), l'algoritmo agisce in due modi: aggiungendo più punti di controllo nelle zone in cui la tensione supera una soglia (impostata come percentuale della tensione o deformazione massima consentita) e chiudendo i fori che avrebbero un

perimetro troppo piccolo. Poiché i punti di controllo saranno la base della tassellazione di Voronoi, più i punti saranno densi, più la geometria finale sarà localmente resistente. Questa popolazione viene aggiunta alla popolazione del passaggio precedente.

La Figura 14 mostra il caso di un semplice elemento quadrato, vincolato attraverso un incastrato sul bordo sinistro e caricato attraverso una forza normale applicata sul bordo destro. Nella prima iterazione l' algoritmo distribuisce i fori sulla superficie. Dopo la prima FEA (Iterazione 0), i fori diventano più densi e più piccoli in prossimità del vincolo, in modo da limitare le tensioni al di sotto della soglia fissata.

La Figura 15 mostra il diagramma di flusso dell' algoritmo Rhino-Grasshopper.

La Figura 16 rappresenta le impostazioni dei parametri dell' algoritmo, mentre in Tabella 1 sono rappresentate le loro definizioni e unità di misura.

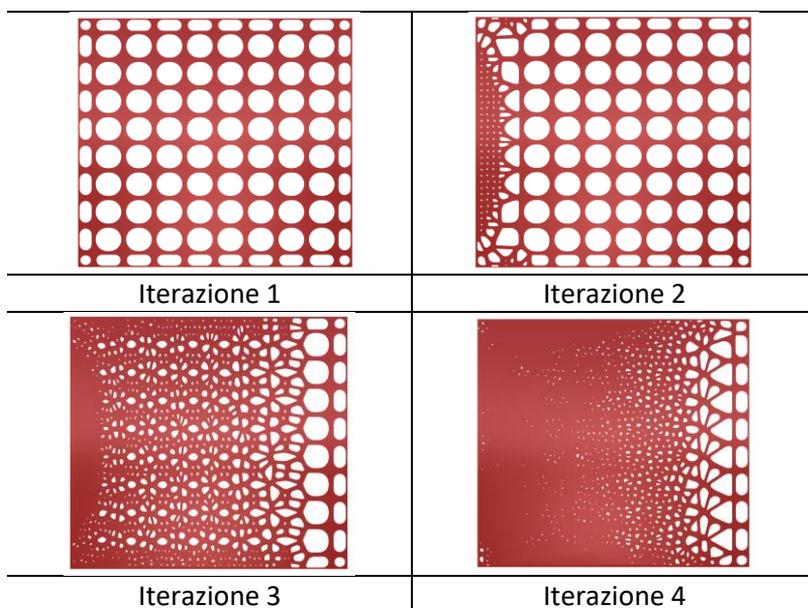


Figura 14 - Esempio di applicazione dell' algoritmo su un elemento quadrato vincolato a sinistra e caricato a destra

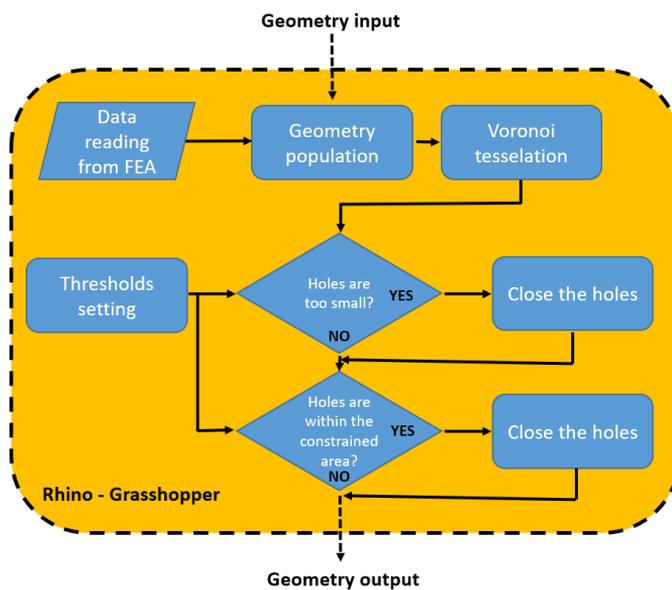


Figura 15 - Diagramma di flusso all'interno dell'ambiente Rhino – Grasshopper

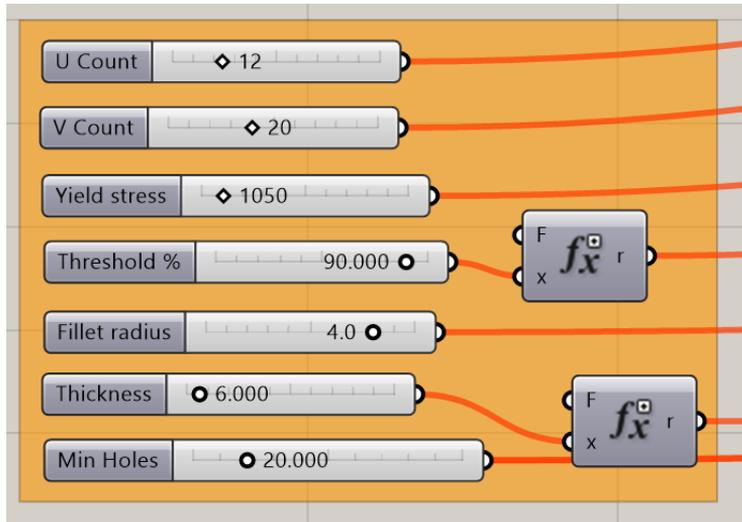


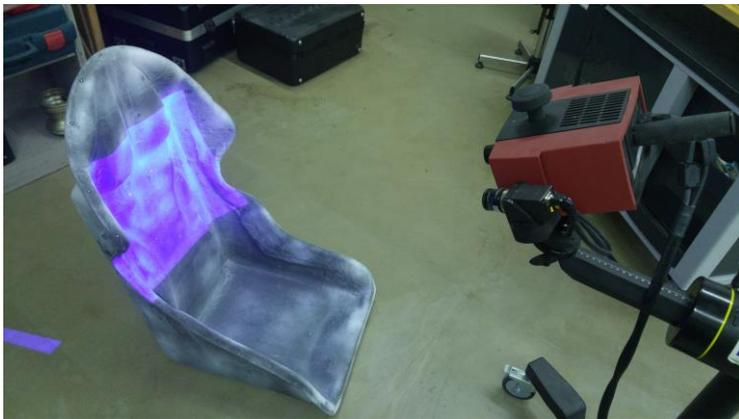
Figura 16 - Impostazione dei parametri

Nome	Unità di misura	Definizione
<i>U Count</i>	-	Numero di punti della popolazione nella direzione U
<i>V Count</i>	-	Numero di punti della popolazione nella direzione V
<i>Yield stress</i>	[MPa]	Tensione di snervamento del materiale
<i>Threshold</i>	-	La tensione massima ammissibile in termini di percentuale della tensione di snervamento
<i>Fillet radius</i>	[mm]	Raggio di raccordo delle celle
<i>Thickness</i>	[mm]	Spessore dei rami nella tassellazione Voronoi
<i>Min holes</i>	[mm]	Perimetro minimo consentito dei fori

Tabella 1 - I parametri utilizzati

### 3.3. L'acquisizione della geometria

Il dispositivo utilizzato per l'acquisizione della geometria è un ATOS Compact Scan 500-2M (GOM), ovvero uno scanner 3d ottico a luce blu strutturata con un proiettore e due telecamere. Con la configurazione utilizzata, lo scanner garantisce una risoluzione di 0,02 mm [49]. Lo scanner sfrutta il metodo della triangolazione per ottenere nuvole di punti dalle superfici acquisite. I marcatori vengono utilizzati per allineare le scansioni effettuate da diverse angolazioni in modo da poter generare il modello tridimensionale [50] (Figura 17).



*Figura 17 - La scansione 3D*

Per ottenere una mesh poligonale (modello StL) dalla nuvola di punti, è stato eseguito un processo di poligonalizzazione

(Figura 18 – a sinistra). Dopo aver ottenuto il file StL, è stato eseguito un processo di ricostruzione basato su NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*) con una superficie *loft* (Figura 18 – a destra). Le superfici *loft* sono delle superfici generate per sezioni.



*Figura 18 - File StL a sinistra, ricostruzione NURBS a destra*

#### 3.4. I materiali

Il sedile originale è composto da diversi strati di carbonio, con una distribuzione simmetrica degli strati lungo lo spessore. Le proprietà meccaniche di un singolo laminato variano in funzione dell'orientamento e della sequenza di impilamento

degli strati all'interno del laminato. Basandosi sulla teoria della laminazione, è possibile calcolare le proprietà meccaniche e le principali caratteristiche ingegneristiche del laminato. La Tabella 2 mostra le caratteristiche generali di ciascun laminato. Lo spessore totale del sedile è di 5 mm. La Tabella 3 riporta le proprietà meccaniche dei materiali di base del sedile, mentre la Tabella 4 le proprietà meccaniche di ciascun laminato.

Ply	Orientation [°]	Wet thickness [mm]	Dry mass density
Carbon	-45/+45	0.50	4.07E-07 [kg/mm <sup>2</sup> ]
Carbon	0/90	0.50	4.07E-07 [kg/mm <sup>2</sup> ]
Carbon	-45/+45	0.50	4.07E-07 [kg/mm <sup>2</sup> ]
Carbon	0/90	0.50	4.07E-07 [kg/mm <sup>2</sup> ]
Carbon	-45/+45	0.50	4.07E-07 [kg/mm <sup>2</sup> ]
Carbon	-45/+45	0.50	4.07E-07 [kg/mm <sup>2</sup> ]
Carbon	0/90	0.50	4.07E-07 [kg/mm <sup>2</sup> ]
Carbon	-45/+45	0.50	4.07E-07 [kg/mm <sup>2</sup> ]
Carbon	0/90	0.50	4.07E-07 [kg/mm <sup>2</sup> ]
Carbon	-45/+45	0.50	4.07E-07 [kg/mm <sup>2</sup> ]

Tabella 2 - Caratteristiche generali del laminato

Basic materials	$\sigma_R$ [MPa]	E [MPa]	G [GPa]	$\nu$	$\rho$ [kg/mm <sup>3</sup> ]
Carbon	4070	248000	103	0.20	1.80E-06
Resin	110	3400	1.31	0.30	1.20E-06

Tabella 3 - Proprietà meccaniche dei materiali di base

Cross-ply laminate	$\sigma_{R11}$ [MPa]	$\sigma_{R22}$ [MPa]	E1 [MPa]	E2 [MPa]	G12 [GPa]	$\nu_{12}$
Carbon [-45/45]	801.2	801.2	9400	9400	31.7	0.68
Carbon [0/90]	1049	1048	65040	65040	2.53	0.03

Tabella 4 - Proprietà meccaniche per ogni laminato cross-ply

Il materiale, scelto per questo primo caso di studio, è una lega di titanio denominata EOS Titanium Ti64, di EOS GmbH. Questa polvere di lega è stata ottimizzata appositamente per la produzione attraverso Additive Manufacturing con tecnologia SLS. Le parti costruite in EOS Titanium Ti64 hanno una composizione chimica corrispondente a ISO 5832-3, ASTM F1472 e ASTM B348.

Questa lega leggera si caratterizza per avere buone proprietà meccaniche e resistenza alla corrosione combinate a basso peso specifico e biocompatibilità. Questo materiale è ampiamente utilizzato per molte applicazioni ingegneristiche ad alte prestazioni, ad esempio nel settore aerospaziale e automobilistico. In questo caso l'anisotropia dovuta al metodo di costruzione a strati risulta essere molto bassa.

Le proprietà dei materiali sono riportate in Tabella 5 e Tabella 6.

Material composition	Ti (balance) Al (5.5 – 6.75 weight %) V (3.5 – 4.5 weight %) O (< 2000 ppm) N (< 500 ppm) C (< 800 ppm) H (< 150 ppm) Fe (< 3000 ppm)
Density	4410 kg/m <sup>3</sup>

*Tabella 5 - Proprietà fisiche e chimiche*

	As built
Horizontal tensile strength	1230 ± 50 MPa
Vertical tensile strength	1200 ± 50 MPa
Horizontal yield strength	1060 ± 50 MPa
Vertical yield strength	1070 ± 50 MPa
Horizontal elongation at break	10 ± 2 %
Vertical elongation at break	11 ± 3 %
Horizontal Modulus of elasticity	110 ± 10 GPa
Vertical Modulus of elasticity	110 ± 10 GPa

*Tabella 6 - Proprietà meccaniche*

In entrambi i sedili è stato considerato lo stesso fattore di sicurezza.

### 3.5. Il modello FE

Al fine di valutare condizioni di carico progettuali, è stato fatto riferimento agli standard SFI.

Gli standard SFI considerano l'applicazione di tre diversi carichi, rispettivamente in corrispondenza della testa, della spalla e del bacino. I carichi devono essere applicati mediante un attuatore di forma specifica e forza diversa. Il test viene superato se il sedile non raggiunge la tensione di snervamento del materiale. Poiché il sedile non è perfettamente simmetrico, il test deve essere ripetuto sia nella direzione destra che in quella sinistra. In tutte le simulazioni, è stato inserito un carico aggiuntivo pari al peso del conducente (80 kg) moltiplicato per l'accelerazione z massima prevista, scelta come 6 g, facendo riferimento a quanto riportato sulle accelerazioni nella direzione dell'asse z misurate su un RIB

(gommone a chiglia rigida) da 28 piedi, che naviga a 40 nodi su di un mare forza 1-2, secondo quanto riportato in [51], che porta a una forza peso di circa 4710 N.

La Tabella 7 mostra le diverse condizioni di carico e le forme dei loro attuatori.

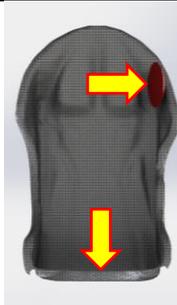
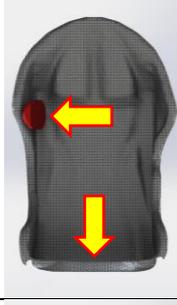
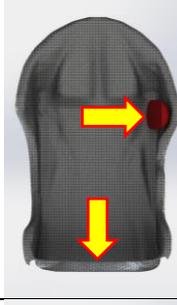
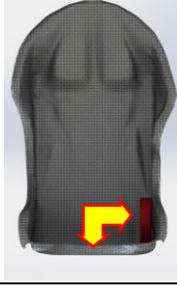
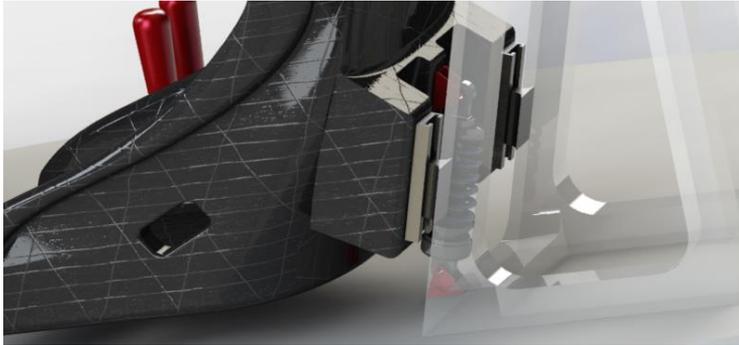
Posizione	Carico [kN]	Forma dell'attuatore	Direzione destra	Direzione sinistra
Testa + Carico aggiuntivo	4448 N + 4710 N	Emisferico con un raggio di 127 mm		
Spalla + Carico aggiuntivo	8896 N + 4710 N	Emicilindrico con una lunghezza di 152 mm e un raggio di 50 mm		
Bacino + Carico aggiuntivo	13344 N + 4710 N	Disco piatto con un raggio di 127 mm		

Tabella 7 - Riepilogo dei carichi agenti

Il modello è stato vincolato utilizzando la stessa configurazione applicata a bordo. In particolare, il sedile è collegato direttamente sulla barca, tramite due binari posti sullo schienale, come in Figura 19.



*Figura 19 - - Dettaglio del sistema di vincolo del sedile*

I modelli FE sono stati simulati utilizzando ANSYS Workbench 19. La fisica del problema richiede un modello FE ad alta complessità per riprodurre le proprietà anisotropiche e non omogenee del materiale (nel caso della sede in carbonio), le regioni di contatto, le non linearità geometriche e le condizioni di vincolo. Sono stati creati due modelli, uno considerando il sedile in composito e l'altro considerando la stessa geometria ma realizzato in titanio. In entrambi i casi, al fine di ridurre l'onere computazionale, il sedile è stato modellato con elementi shell.

Nella struttura composita, le proprietà effettive sono state implementate sfruttando la funzione "*Layered Section*" del software, che permette di impostare la sequenza di sovrapposizione degli strati in termini di ordine dei layer e spessore. Pertanto, solo le proprietà non isotrope dei singoli strati sono state impostate nella libreria dei materiali, mentre le proprietà del laminato risultanti vengono calcolate dal software utilizzando la teoria classica della laminazione. Per il modello in titanio, le proprietà isotrope del materiale sono state implementate nella libreria appropriata. Al fine di migliorare la precisione del modello, gli attuatori sono stati modellati come elementi infinitamente rigidi.

Considerata la complessità della geometria del sedile, è stata realizzata una mesh triangolare in modo da poter approssimare correttamente la sua forma. Per simulare il test del sedile è stata effettuata un'analisi strutturale statica. I contatti tra gli attuatori e il sedile sono stati impostati senza attrito (*frictionless*). Per riprodurre il modo in cui il sedile è vincolato all'interno del motoscafo è stato utilizzato sullo schienale un vincolo fisso. Successivamente, sono state applicate le forze sulle facce degli attuatori che si trovano a contatto con il sedile. Per simulare il peso del conducente è stata utilizzata una forza applicata direttamente ai nodi della mesh.

Il sedile non è perfettamente simmetrico in quanto è specificamente progettato per il *throttleman*. Di conseguenza, è posizionato nella parte sinistra del motoscafo e ha una forma tale da consentire al *throttleman* di utilizzare la mano destra senza ostacoli, per manovrare i comandi della barca.

### 3.6. Risultati e discussione

#### 3.6.1. Il sedile in fibra di carbonio

I risultati della FEA, in termini di tensione massima equivalente di von-Mises, del sedile in composito sono brevemente riassunti in Tabella 8.

Carico	Direzione	Tensione massima [MPa]
Testa	sinistra	226.89
Testa	destra	208.29
Spalla	sinistra	331.62
Spalla	destra	528.45
Bacino	sinistra	554.29
Bacino	destra	532.56

Tabella 8 - Sedili in fibra di carbonio

### 3.6.2. L'Ottimizzazione Topologica

Nel caso di studio, il raggiungimento dell'obiettivo viene raggiunto alla terza iterazione. La Tabella 9 riassume i risultati in termini di sollecitazione massima e peso del sedile ad ogni iterazione.

Come da previsione, all'iterazione 0, che corrisponde al sedile senza alcuna tassellazione, si osservano tensioni basse ed un peso più alto. All'iterazione 1, dopo il primo svuotamento, il sedile raggiunge il minimo peso, ma tensioni più elevate (superando quelle consentite). ad ogni iterazione successiva, l'algoritmo ha modificato il numero e la dimensione dei fori, aumentando il peso del sedile ma riducendo le tensioni agenti su di esso, fino al raggiungimento della condizione ammissibile al di sotto della soglia impostata.

Iterazione	Carico	Direzione	Tensione massima [MPa]	Peso [kg]
0	Testa	sinistra	325.4	13.42
	Testa	destra	413.1	
	Spalla	sinistra	379.9	
	Spalla	destra	523.0	
	Bacino	sinistra	321.2	
	Bacino	destra	448.5	
1	Testa	sinistra	1085.0	5.00
	Testa	destra	1115.5	
	Spalla	sinistra	1109.3	
	Spalla	destra	1103.5	
	Bacino	sinistra	1202.0	
	Bacino	destra	1243.7	
2	Testa	sinistra	1053.9	5.48
	Testa	destra	961.6	
	Spalla	sinistra	1088.5	
	Spalla	destra	1097.6	
	Bacino	sinistra	1015.5	
	Bacino	destra	1100.1	
3	Testa	sinistra	875.7	5.51
	Testa	destra	664.1	
	Spalla	sinistra	825.9	
	Spalla	destra	860.6	
	Bacino	sinistra	989.7	
	Bacino	destra	982.9	

*Tabella 9 - tensione e peso del sedile in lega di titanio*

La Figura 20 mostra l'andamento del peso del sedile e delle tensioni massime ad ogni iterazione, evidenziando il peso del sedile in fibra di carbonio e la tensione di snervamento della

lega di titanio. L'iterazione 3 è la prima in cui entrambe le condizioni risultano verificate.

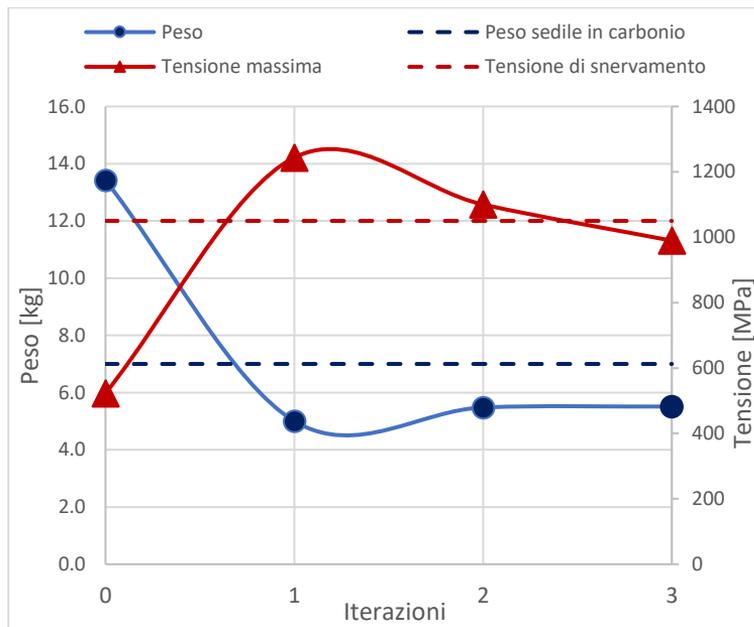


Figura 20 - peso e tensione massima equivalente di von Mises ad ogni iterazione

La Figura 21 mostra la mappa delle tensioni equivalenti di von Mises per ogni condizione di carico, all'ultima iterazione (Iterazione 3). Le aree in cui l'algoritmo non ha creato fori o questi ultimi sono di diametro inferiore rispetto agli altri, rappresentano le zone in cui sono presenti tensioni elevate o in cui sono stati applicati i vincoli.

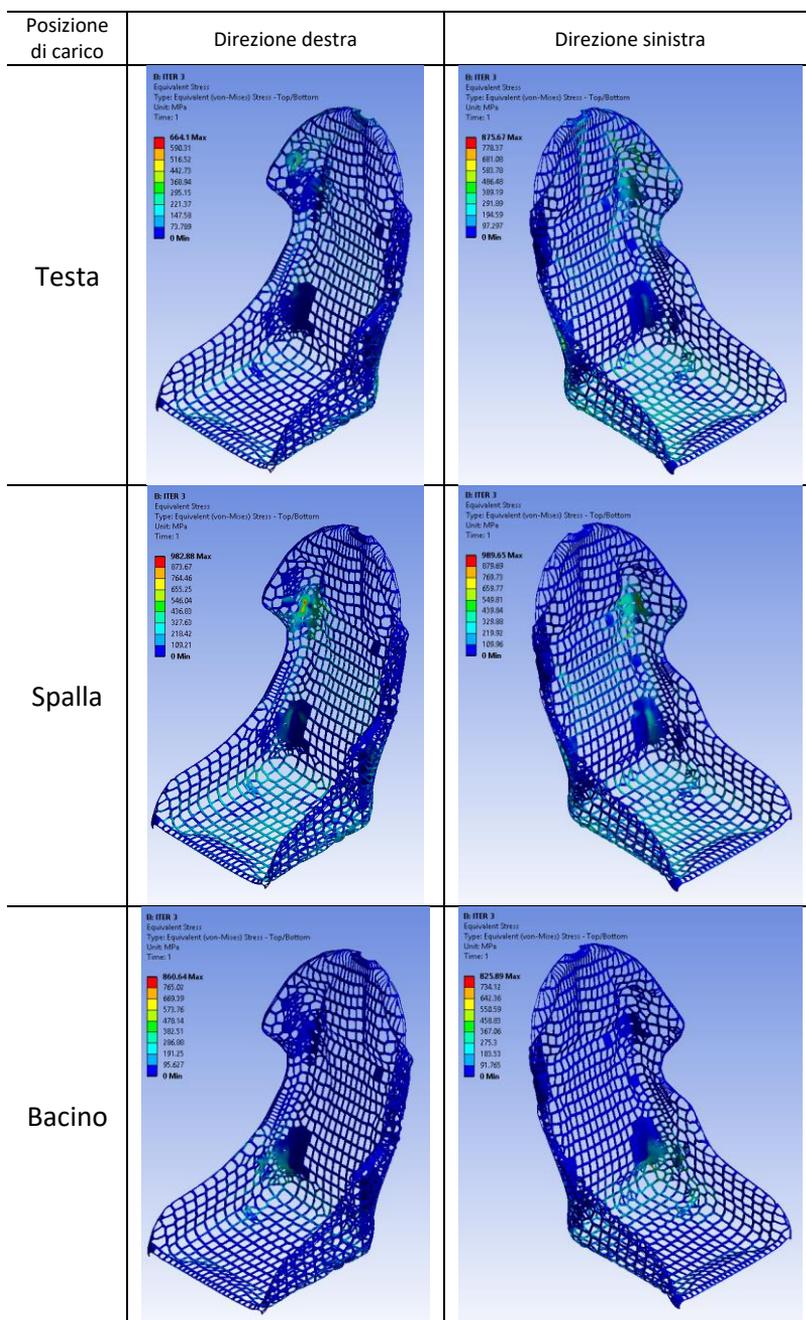
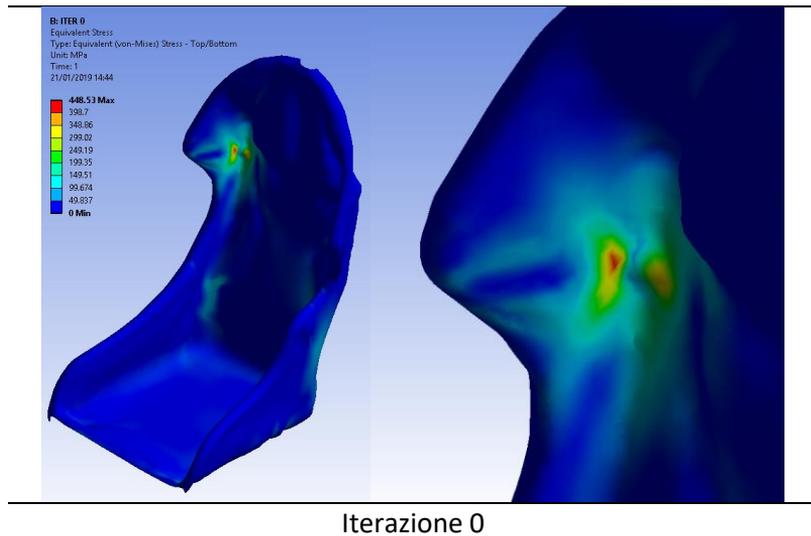
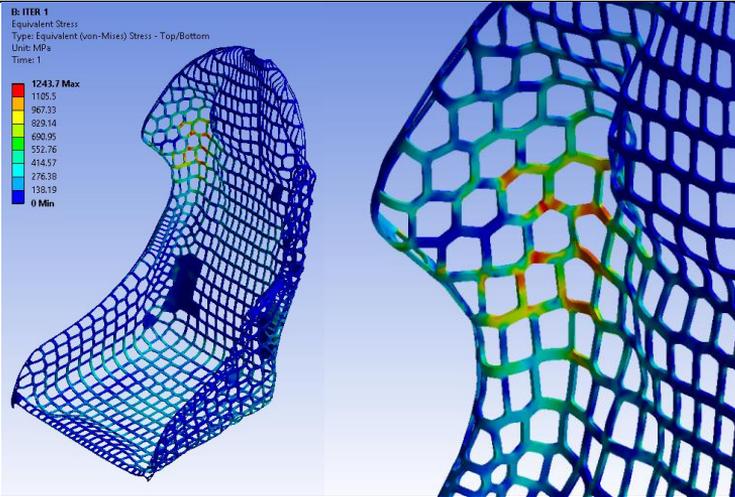


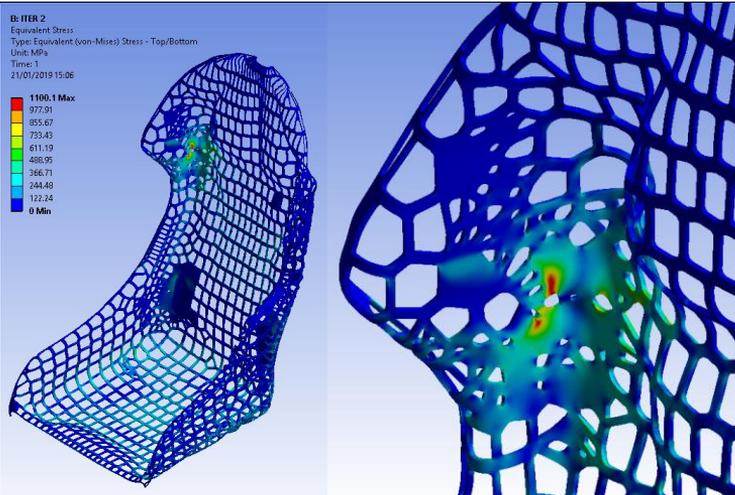
Figura 21 - Mappa delle tensioni alla terza iterazione

In Figura 22 è riportato un particolare dell'area della spalla ad ogni iterazione, in modo da poter evidenziare come funziona l'algoritmo. All'iterazione 1 i fori sono molto regolari, ma la tensione massima risulta essere maggiore rispetto a quella di snervamento, mentre all'iterazione 3 un affinamento locale consente di raggiungere tensioni inferiori e, di conseguenza, un'Ottimizzazione Topologica del pezzo.

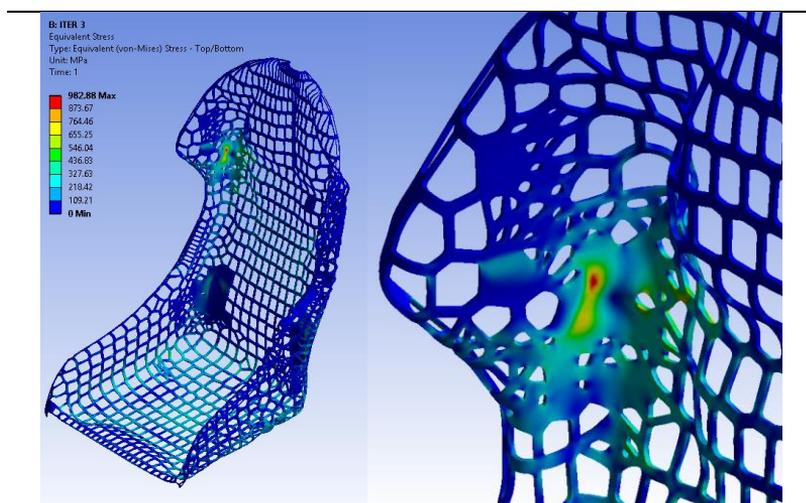




Iterazione 1



Iterazione 2



### Iterazione 3

*Figura 22 - Mappa delle tensioni equivalenti sul sedile sollecitato dalla spalla destra*

L'ottimizzazione proposta ha portato a una riduzione del peso globale di quasi il 60% del peso del sedile originale in titanio. Rispetto alla struttura in composito originale la riduzione di peso finale raggiunge un risparmio di oltre il 20%. Nella Tabella 10 sono riepilogate le progressive riduzioni di peso ad ogni iterazione, calcolate, rispettivamente, rispetto al peso del sedile in titanio e al peso del sedile in materiale composito.

Iterazione	Peso [kg]	Variazione di peso rispetto a:	
		Titanio	Composito
0	13.4	0.00%	91.74%
1	5.0	-62.73%	-28.54%
2	5.5	-59.17%	-21.72%
3	5.5	-58.95%	-21.28%

*Tabella 10 - Riduzione progressiva del peso del sedile ottimizzato*

### 3.7. Discussione finale

In questa prima parte di tesi si è proposta una nuova metodologia per l'OT basata su una tassellazione Voronoi di superfici con punti di controllo generati in funzione delle tensioni provenienti da un FEA. La metodologia si basa su un processo iterativo all'interno dell'ambiente Rhino – Grasshopper per la parte CAD e Ansys Workbench per la FEA. Iterando il processo fino al raggiungimento di una soglia di tensione, è possibile raggiungere un obiettivo desiderato. La novità di questa metodologia consiste nell'agire direttamente sulle geometrie CAD e non sulla mesh come di consueto.

La metodologia viene presentata utilizzando come caso di studio su un sedile di barche da competizione a motore. Il sedile originale era in materiale composito, mentre quello ottimizzato è progettato per un processo di AM (SLS) in lega di titanio. I carichi di prova sono stati scelti dai requisiti di omologazione. Dopo sole tre iterazioni dell'algoritmo il peso del sedile ottimizzato risulta essere circa il 40% di quello originale in titanio massiccio e circa l'80% di quello in composito. La superficie ottenuta è pronta all'uso, senza alcun ulteriore intervento da parte del progettista. Attualmente nessuna tecnologia di uso commerciale permette volumi di lavoro adeguatamente grandi per stampare componenti delle dimensioni del sedile studiato. Tuttavia, va rilevato che gli

algoritmi di ottimizzazione devono svilupparsi di pari passo all'evolversi della tecnologia, che permette di aumentare i volumi di stampa sempre di più o di utilizzare tecniche di stampa innovative che consentano di generare volumi "infiniti" [52].

Nel complesso, la metodologia è molto facile da usare, robusta e veloce, permettendo di raggiungere una drastica riduzione del peso in modo alternativo rispetto alle altre metodologie di OT.

## 4. Ottimizzazione Topologica di superfici complesse con Voronoi

### 4.1. Presentazione

Come secondo caso di studio, al fine di dimostrare, le potenzialità dell'algorithmo proposto, è stato ottimizzato un *Frontal Head Restraint* (FHR) [53], a partire da uno commerciale realizzato in fibra di carbonio avente un peso di 750g. Questo tipo di dispositivo è ampiamente utilizzato nel motorsport, nell'automotive e negli sport nautici [54], al fine di ridurre le lesioni da giunzione craniovertebrale dovute a frenate improvvise e collisioni (Figura 23).

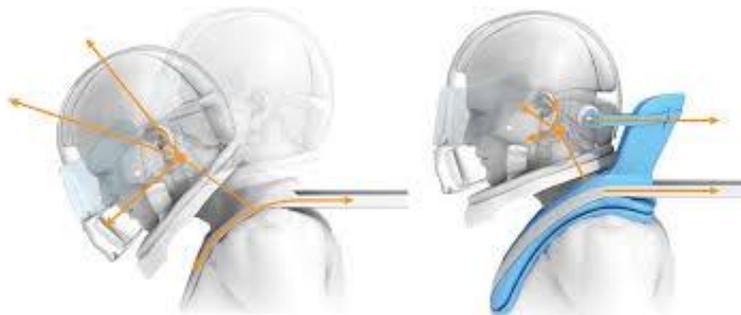


Figura 23 – Funzione del collare FHR

La scelta di un dispositivo FHR come caso di studio dipende dal fatto che, per testare la competitività dell'algorithmo, in termini di riduzione del peso, negli scenari produttivi che ci si può

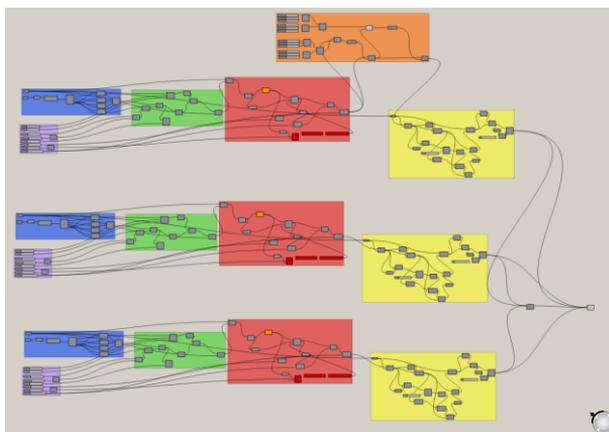
aspettare per il prossimo futuro, è necessario valutare l'ottimizzazione di oggetti già altamente performanti. Anche in questo caso studio il componente ottimizzato è progettato per essere realizzato tramite sinterizzazione laser selettiva (SLS) in lega di titanio.

Per rendere l'oggetto utilizzabile in ambito sportivo, il processo di omologazione deve essere comunque effettuato.

#### 4.2. L'algoritmo

Anche in questo caso il metodo proposto consiste in una ricostruzione delle superfici, inizialmente, mediante un regolare svuotamento delle superfici e successivamente, tramite una riduzione della dimensione e della distribuzione dei fori in funzione delle tensioni valutate da un'analisi agli Elementi Finiti. Il modello per lo svuotamento si basa ancora sulla tassellazione Voronoi. L'analisi FE viene utilizzata per ridurre i diametri dei fori nelle zone in cui la tensione supera una soglia imposta, a seconda della tensione massima consentita del materiale. Dove la dimensione dei fori è troppo piccola, l'algoritmo li occlude, per evitare concentrazioni delle tensioni nonché per la fattibilità tecnologica di produzione. Dopo lo svuotare, ogni foro viene raccordato con un raggio impostato dall'utente.

Un'immagine dello schema che fa riferimento all'algoritmo è riportata in Figura 24.



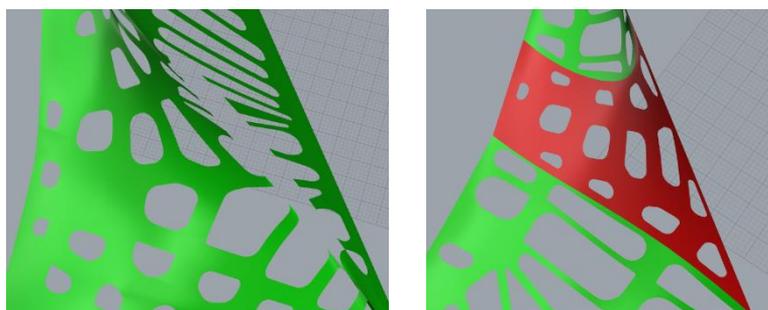
*Figura 24 - Schema dell'algoritmo nell'ambiente di Grasshopper*

Nello schema, i blocchi principali, ognuno dei quali contiene diverse funzioni, sono identificati da un colore diverso. I colori rappresentano, rispettivamente:

- Blu: lettura di punti e superfici
- Viola: impostazione dei parametri
- Verde: tassellazione Voronoi
- Rosso: generazione di curve
- Arancione: imposizione dei vincoli
- Giallo: generazione di superfici

L'algoritmo utilizzato è un'evoluzione di quello rappresentato nel primo caso di studio. In questa evoluzione, sono state

migliorate alcune caratteristiche dell'algoritmo, in particolare come vengono gestite le superfici che cambiano in maniera significativa l'orientazione nello spazio. Di fatto, quando la superficie da ottimizzare ha una brusca variazione spaziale in termini di curvatura e orientazione, i fori possono rischiare di auto-intersecarsi o intersecarsi tra loro, portando alla costruzione di geometrie impossibili, punti angolosi e fori spezzati (Figura 25 – a). Il nuovo algoritmo invece di utilizzare un'unica normale fissa proietta il pattern di Voronoi con la normale della superficie punto per punto. Qualora anche questa procedura non fosse possibile, l'algoritmo divide la superficie in due sotto-superfici, in modo da raggiungere sempre uno svuotamento di buona qualità (Figura 25 – b).



a)

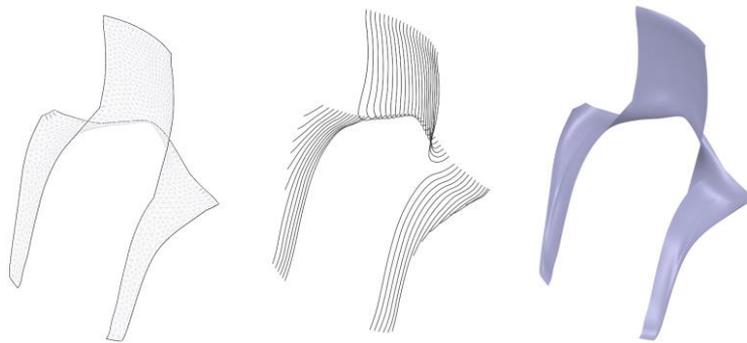
b)

*Figura 25 - Fori spezzati a causa di problemi di proiezione con il vecchio algoritmo (a) e fori corretti con il miglioramento dei nuovi algoritmi (b). Il cambio di colore evidenzia una suddivisione della superficie originale in sotto-superfici.*

L'algoritmo è stato fatto girare su una workstation abbastanza comune, dotata di CPU Intel Core I7-8700 con 16 GB di RAM. Il tempo richiesto dall'algoritmo per il suo funzionamento si aggira intorno ai 20-30 secondi per ogni generazione di superficie, mostrando le elevate prestazioni del metodo anche in termini di risorse computazionali.

#### 4.3. L'acquisizione della geometria

Anche in questo caso è stato utilizzato lo stesso scanner a luce strutturata. Lo scanner, utilizzando il metodo della triangolazione, permette di ottenere nuvole di punti dalle superfici acquisite garantendo una risoluzione di 0,02 mm [55]. Dal processo di scansione è stata ottenuta una mesh poligonale StL. Dalla mesh attraverso un processo di reverse engineering è stato ottenuto infine un modello CAD utilizzando la funzione loft sulle NURBS che compongono il modello, come mostrato in Figura 26.



*Figura 26 – Il dispositivo FHR, rispettivamente in triangolazione StL, sezioni e superficie CAD ricostruita*

#### 4.4. Il materiale

Anche in questo caso di studio è stata utilizzata la lega di Titanio adatta a processi di AM, dal nome EOS Titanium Ti64, prodotta da EOS GmbH.

Le proprietà del materiale sono riportate in Tabella 5 e Tabella 6.

In entrambi i dispositivi FHR è stato considerato lo stesso fattore di sicurezza.

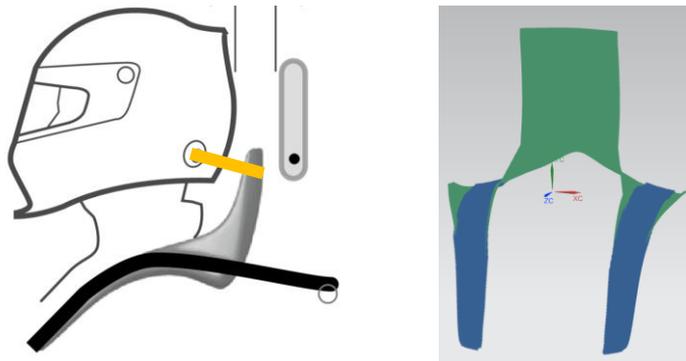
#### 4.5. Il modello FE

Le FEA in questo caso sono state eseguite utilizzando il risolutore Nastran all'interno dell'ambiente Siemens NX 1859.

La scelta della mesh è ricaduta su elementi triangolari di 1mm, in modo da seguire fedelmente la topologia del dispositivo FHR, che, una volta ottimizzato, diventa sempre più

complessa. Il dispositivo ha uno spessore costante di 4 mm. Un'analisi statica lineare è stata eseguita utilizzando la soluzione Nastran SOL 101, e per essere sicuri che le condizioni al contorno fossero sempre le stesse in ogni simulazione, sono state create delle caselle di selezione fisse.

Il sistema è stato vincolato lungo le spalle laterali del dispositivo FHR mediante vincoli fissi, in modo da simulare l'azione delle cinture di sicurezza che sono in grado di bloccare tutte le traslazioni e le rotazioni (Figura 27).



*Figura 27 - Schema della configurazione FHR e cinture di sicurezza (a sinistra) e dei vincoli fissi (a destra)*

Il carico applicato consiste in una forza che simula l'azione del peso della testa del pilota (5 kg) più il peso del casco (1 kg) con un'accelerazione negativa di 45 g (circa  $441.3 \text{ m/s}^2$ ). Questo carico viene distribuito sulla cinghia che collega il casco con il

dispositivo FHR (Figura 28). Il dispositivo FHR è perfettamente simmetrico.

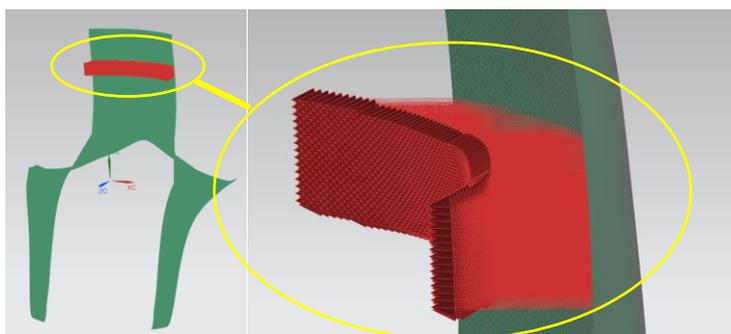


Figura 28 - Il carico applicato

#### 4.6. Risultati e discussione

La prima iterazione, chiamata Iterazione 0, è stata eseguita sulla superficie originale e le successive iterazioni, da 1 a 3, hanno permesso di raggiungere un giusto equilibrio tra il peso del dispositivo FHR e un campo di tensione consentito. La Tabella 11 mostra il peso e le tensioni massime ottenute ad ogni iterazione.

Iterazione	Tensione massima [MPa]	Peso [kg]
0	364.99	0.828
1	2122.59	0.472
2	982.48	0.514
3	661.83	0.517

Tabella 11 – Tensione massima e peso FHR in lega di titanio

I dati in tabella mostrano che il dispositivo FHR intatto (iter 0) presenta ovviamente le tensioni più basse e il peso più alto. La prima iterazione è caratterizzata da una tensione massima troppo elevata, superiore alla resistenza allo snervamento del materiale, e da un peso ridotto del 43% rispetto al dispositivo FHR originale. All'iterazione 2, c'è un piccolo aumento di peso rispetto all'iter precedente, ma la tensione massima diminuisce a un valore simile a quella di snervamento. Nell'ultima iterazione, è possibile osservare un aumento molto piccolo di peso rispetto all'iter 2 e una diminuzione della tensione massima che porta ad una condizione ammissibile. Si nota che all'iterazione 3 con una semplice riorganizzazione della geometria che di fatto lascia la massa quasi invariata, si è riusciti ad ottenere una drastica riduzione della tensione massima. Poiché l'obiettivo target è stato raggiunto è possibile fermarsi all'iterazione 3. Tuttavia, studi successivi potrebbero indagare la stabilità dell'algoritmo per cercare ulteriori punti di minimo locale.

La riduzione totale del peso all'iterazione 3 rispetto alle condizioni iniziali è del 37,5%. La

Figura 29 mostra l'andamento del peso del dispositivo FHR e la tensione massima ad ogni iterazione.

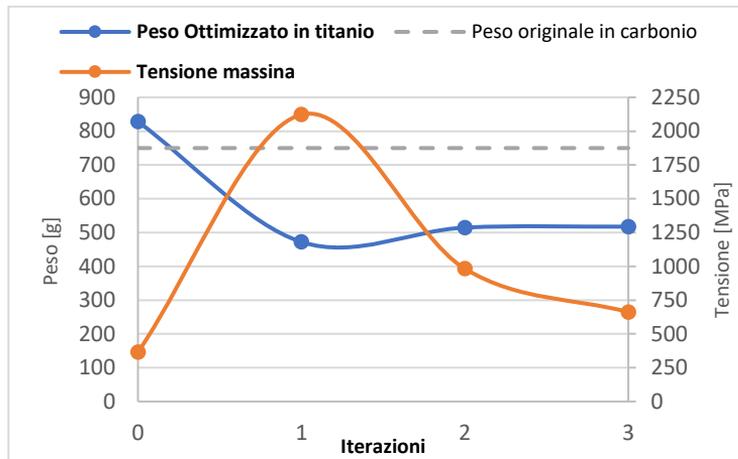
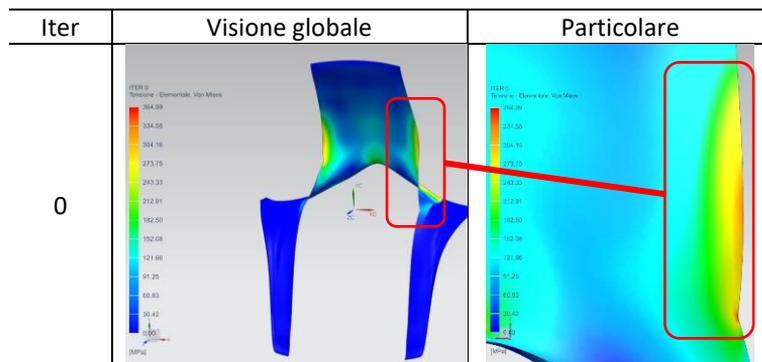


Figura 29 - Peso e tensione massima equivalente di von Mises ad ogni iterazione e peso originale del dispositivo in fibra di carbonio

In Figura 30 è possibile valutare la distribuzione delle tensioni equivalenti di von Mises ad ogni iterazione.



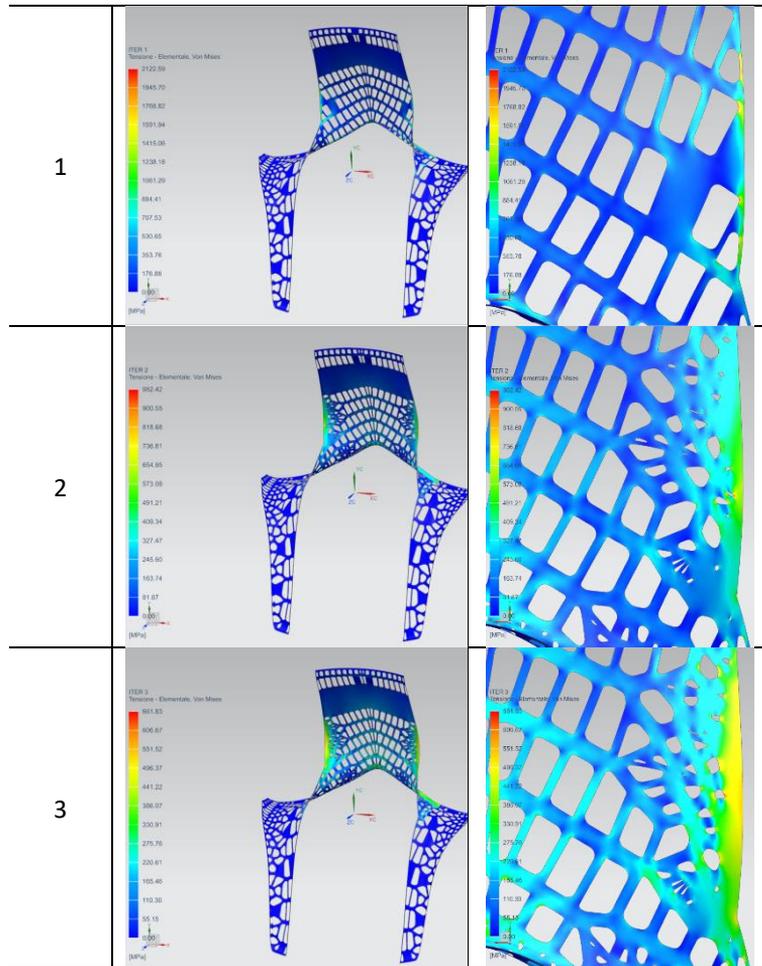


Figura 30 - mappa delle tensioni ad ogni iterazione

All'iterazione 1 è possibile valutare una distribuzione regolare dei fori, sia nella forma che nella posizione, con conseguente grande riduzione del peso ma anche della resistenza del dispositivo. All'ultima iterazione, una maggiore densità locale nei punti più sollecitati permette di ottenere globalmente un

dispositivo FHR che resiste alle sollecitazioni esterne per le quali è stato progettato con una drastica riduzione di peso.

#### 4.7. Considerazioni finali

In questa parte di tesi è stato sviluppato un nuovo metodo di Ottimizzazione Topologica, che si basa su un processo iterativo che utilizza l'ambiente Rhino - Grasshopper come CAD e Nastran NX per la FEA.

In particolare, la metodologia proposta per l'OT è un'evoluzione, con diversi miglioramenti dell'algoritmo descritto in precedenza.

Come caso di studio, è stato scelto un dispositivo FHR progettato per il motorsport competitivo, realizzato con una lega di Titanio e progettato per essere prodotto con un processo di sinterizzazione laser selettiva in Additive Manufacturing. Come carico di prova è stata considerata l'azione di un'accelerazione negativa di 45 g applicata sulla testa del pilota dotato di casco.

Attraverso quattro iterazioni, è stato possibile ottenere una drastica riduzione di peso del componente, che risulta essere pari al 37,5% rispetto al modello originale, massimizzando la resistenza nei punti più sollecitati.

## 5. Ottimizzazione Topologia di volumi di Voronoi

### 5.1. Presentazione

Al fine di sviluppare un algoritmo che permetta l'ottimizzazione topologica di volumi piuttosto che di superfici, è stata scelta come componente di prova una biella automobilistica per un motore a 4 tempi, avente fusto di biella con sezione ad I, progettata per essere realizzata tramite la sinterizzazione laser selettiva (SLS).

Le dimensioni della biella scelta sono riportate in Figura 31:

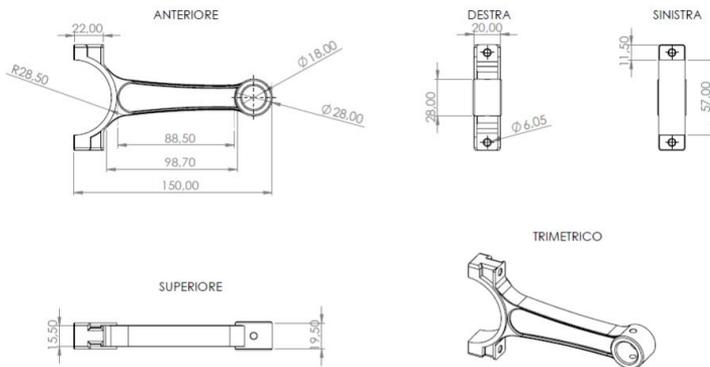


Figura 31 - dimensioni della biella presa in esame

Nello studio non si è tenuto conto né del cappello della testa di biella né dell'accoppiamento mediante bulloni, limitando l'attenzione alle tensioni agenti sul fusto.

## 5.2. L'algoritmo

L'algoritmo utilizzato è riportato in Figura 32:

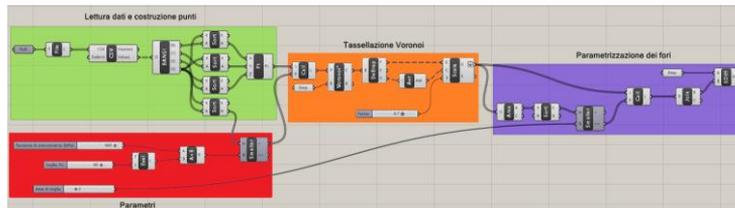


Figura 32 - algoritmo sviluppato per l'ottimizzazione topologica di componenti 3D

Anche in questo caso ognuno dei blocchi principali, che rappresentano delle specifiche funzioni, sono identificati mediante colori differenti.

Il blocco verde rappresenta la parte dell'algoritmo destinata alla lettura dei dati ottenuti dalla FEA, necessari per la costruzione dei punti con cui realizzare la tassellazione Voronoi. Il blocco Rosso che permette l'impostazione dei parametri risulta necessario per filtrare le tensioni ottenute dall'analisi FE, di modo da escludere dalla tassellazione i valori che si trovano al di sopra di una soglia stabilita. La tassellazione di Voronoi è effettuata attraverso il blocco arancione. Poiché i fori realizzati mediante la tassellazione Voronoi hanno dimensione variabile, in funzione della distanza tra i punti, esiste la possibilità di ottenere dei fori molto piccoli che possono rendere difficoltosa la realizzazione

della mesh sul componente e risultano comunque essere ininfluenti ai fini dell'ottimizzazione. Si è dunque resa necessaria un'esclusione dei fori dalle dimensioni eccessivamente ridotte attraverso il blocco viola.

In questo caso trattandosi dell'Ottimizzazione Topologica di un pezzo tridimensionale e non di una superficie, per la realizzazione della tassellazione si è utilizzato il blocco Voronoi 3D che realizza la discretizzazione della porzione stabilita in funzione della distribuzione di punti al suo interno, mentre il blocco Brep (Boundary REPresentation) è stato utilizzato per limitare il diagramma di Voronoi ad una porzione interna al fusto di biella. Infine, attraverso il blocco *Solid Difference* si esegue la differenza tra un solido A, ovvero il Brep contenente l'intera biella e un solido B, costituito da tutti i fori.

Per valutare il funzionamento dell'algoritmo sono stati considerati tre casi:

- Caso A: è il caso di primo tentativo, utilizzando i parametri standard dell'algoritmo.
- Caso B: si è agito sul numero e sulla distribuzione dei punti, andando a diminuire il numero di punti (e di conseguenza aumentando il volume dei vuoti) e riducendo il fattore di scala dei poligoni realizzati con il diagramma di Voronoi.

- Caso C: si è operato con lo stesso numero di punti del caso B, aumentando il fattore di scala e modificando la distribuzione all'interno dell'area considerata.

### 5.3. Il materiale

Come materiale è stato scelto un Acciaio AISI 1005 temprato, un acciaio da bonifica con alta temprabilità e tenacità e avente una buona lavorabilità sia a caldo che a freddo. Questo acciaio possiede un'elevata resistenza a fatica anche a temperature d'esercizio superiori a 350°C ed è particolarmente adatto per pezzi sollecitati a torsione, inoltre la presenza del Molibdeno evita il fenomeno della fragilità da rinvenimento.

Le proprietà del materiale sono riportate in Tabella 12:

<b>Proprietà fisiche</b>	
Densità	7.87 g/cm <sup>3</sup>
<b>Proprietà meccaniche</b>	
Modulo di elasticità	210 GPa
Modulo di taglio	80 GPa
Tensione di rottura	1100 MPa
Tensione di snervamento	900 MPa
Allungamento percentuale	15%
<b>Composizione del materiale</b>	
Carbonio, C	0.06%
Ferro, Fe	99.5%
Manganese, Mn	0.35%
Fosforo, P	0.04%
Zolfo, S	0.5%

*Tabella 12 - proprietà dell'Acciaio AISI 1005*

#### 5.4. Il modello FE

Le analisi FE sono state effettuate utilizzando il risolutore Nastran all'interno dell'ambiente Siemens NX 1859.

Per il componente non ottimizzato la scelta del tipo di mesh è ricaduta su una mesh tetraedrica con dimensione degli elementi pari a 4 mm.

Al fine di realizzare l'Ottimizzazione Topologica del fusto di biella, sollecitato principalmente a trazione-compressione, si prende in considerazione la posizione in cui la biella è maggiormente sollecitata, ovvero in corrispondenza del punto morto in combustione e all'inizio dell'aspirazione.

Per valutare le forze in gioco risulta necessario definire:

$p_{max}$  = pressione massima dei gas

S = superficie del pistone

$m_a$  = masse alterne, ovvero pistone, biella e spinotto

r = raggio di manovella

l = lunghezza della biella

$\lambda = r/l$

N = numero di giri al minuto

$\omega$  = velocità angolare

Le forze agenti sulla biella in corrispondenza dei punti morti sono:

*Compressione massima dovuta ai gas, valutata in corrispondenza del PMS*

$$P = p_{max}S$$

*Forza d'inerzia delle masse alterne di trazione, rispetto al PMS*

$$P' = m_a r(1 + \lambda)\omega^2$$

*Forza d'inerzia delle masse alterne di compressione, rispetto al PMI*

$$P'' = m_a r(1 - \lambda)\omega^2$$

Nelle posizioni di punto morto, le forze d'inerzia sono dirette secondo l'asse del moto, quindi le forze agenti sulla biella non sono costanti in tutte le sezioni, ma subiscono incrementi positivi o negativi, inoltre le accelerazioni nelle varie sezioni non sono costanti, ma variano linearmente.

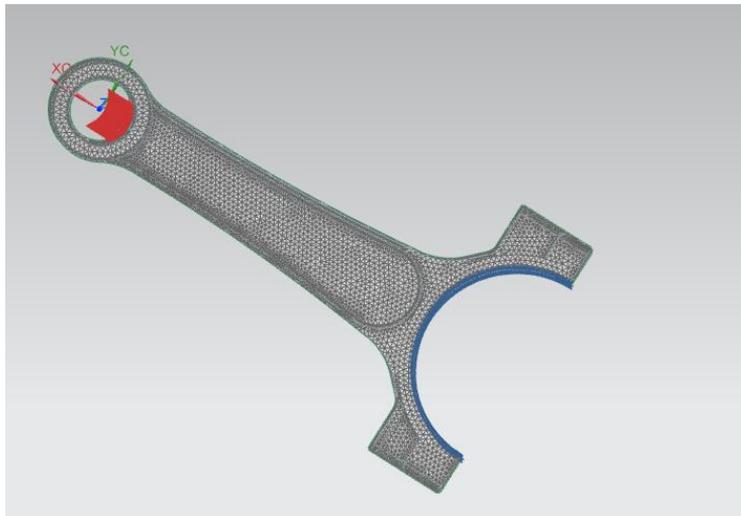
Possiamo concludere che al PMS la *Forza d'inerzia complessiva* della biella vale:

$$\bar{P}' = m_a r(1 + \lambda)\omega^2$$

In questo caso poiché è stata eseguita un'analisi di tipo statico, si sono trascurate le forze d'inerzia, considerando esclusivamente le sollecitazioni a compressione. La forza di compressione agente sul piede di biella a seguito della

combustione della miscela aria-benzina vale circa 40000 N, che rappresenta il carico da applicare sul piede di biella.

In Figura 33 è riportata la disposizione dei carichi e dei vincoli sulla biella, ovvero una forza di compressione agente sul piede di biella (regione in rosso), applicata sulla porzione di collegamento col fusto e un incastro in corrispondenza della testa di biella (regione in blu).



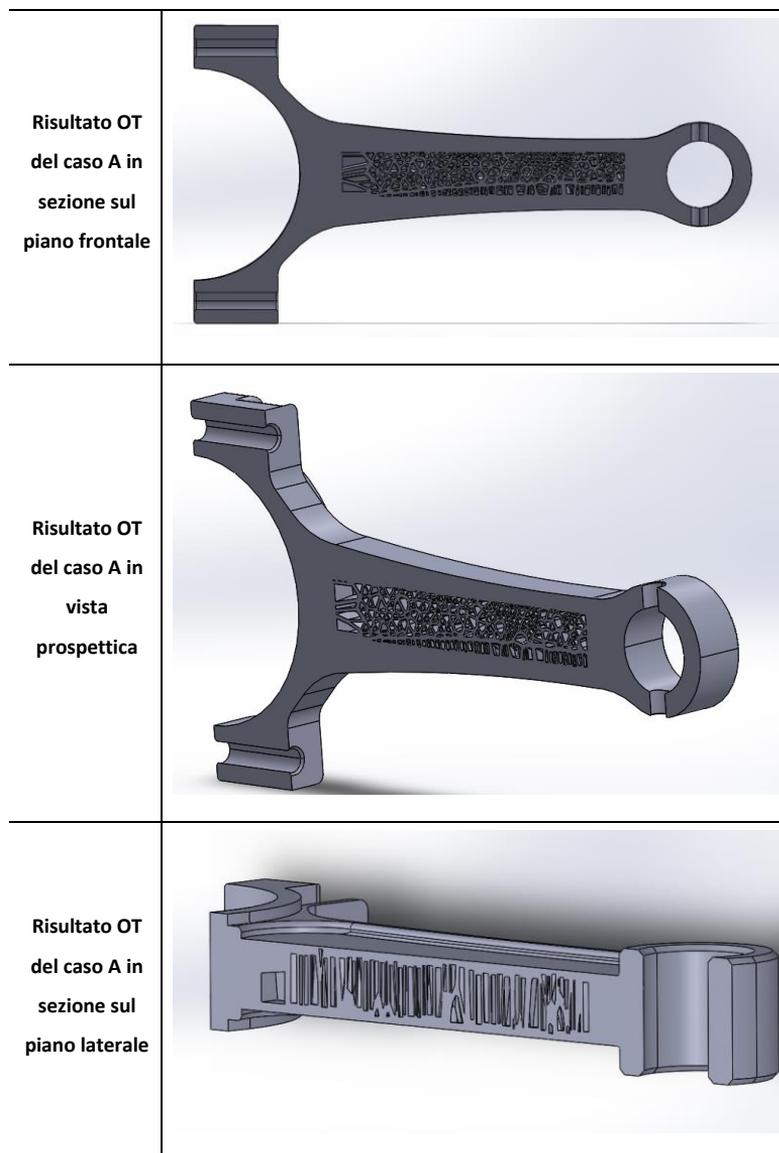
*Figura 33 - vincoli e carichi agenti sulla biella*

## 5.5. Risultati e discussione

### 5.5.1. Caso A

I dati ottenuti dall'analisi FE sono stati sostituiti nell'algoritmo e opportunamente filtrati per ottenere un'asportazione di

materiale apprezzabile. L'ottimizzazione ottenuta è mostrata in Figura 34:



*Figura 34 – Risultati OT nel caso A*

Sottoponendo la biella alle medesime condizioni del componente non ottimizzato, si vuole verificare come con una variazione della struttura del componente si ottengano comunque valori di tensione tali da non danneggiarlo, evitando quindi che si generino delle tensioni eccessivamente gravose per la nuova struttura interna del componente, tali da superare la tensione di snervamento o da portarlo a rottura. La presenza di elementi di piccole dimensioni, quali i fori interni al fusto di biella, ha reso necessaria la realizzazione di una mesh più fitta. I valori di tensione ottenuti sono riportati in Figura 35, mentre in Figura 36 sono riportati quelli relativi alla deformazione.

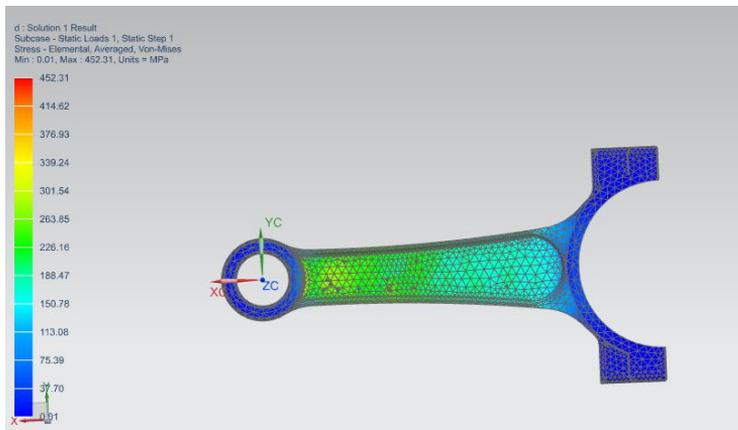


Figura 35 – Tensioni agenti sulla biella a seguito dell'ottimizzazione nel caso A

Ponendo a confronto la distribuzione delle tensioni nel caso in esame con quella ottenuta mediante l'analisi della biella non ottimizzata, è possibile notare un aumento delle tensioni e delle deformazioni, queste ultime risultano incrementate soprattutto in corrispondenza del piede di biella, passando da 0,0012 a 0,0015.

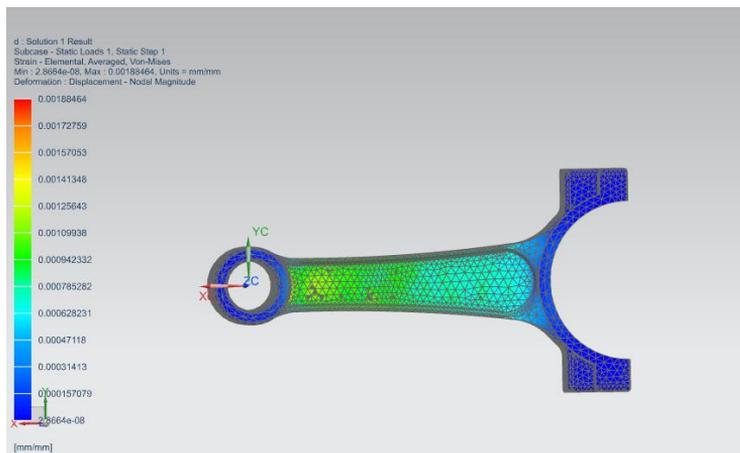


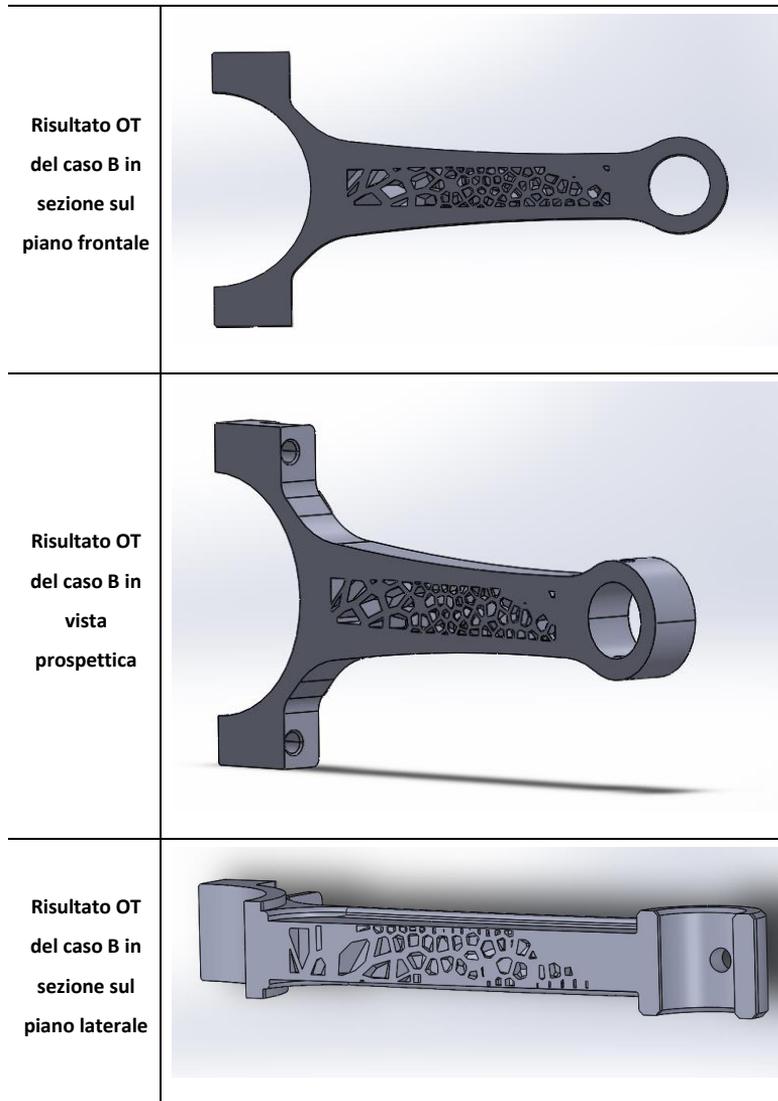
Figura 36 - Deformazioni sulla biella a seguito dell'ottimizzazione nel caso A

Nel caso A si ha quindi un aumento del valor medio delle tensioni massime di circa il 7%, dovuto alla diversa struttura interna del componente, che comporta tensioni più elevate, tuttavia accettabili, in quanto molto al di sotto del valore della tensione di snervamento del materiale.

### 5.5.2. Caso B

Nel caso B si è agito sull'algoritmo diminuendo il numero di punti e riducendo il fattore di scala a 0,5.

Il risultato dello svuotamento è riportato in Figura 37:



*Figura 37 – Risultati OT nel caso B*

Per l'analisi FE si è realizzata una mesh Tetraedrica con dimensione degli elementi pari a 1.9 mm. Imponendo le medesime condizioni di carico e vincolo. Il risultato ottenuto in termini di tensioni e deformazioni è riportato in Figura 38 e Figura 39:

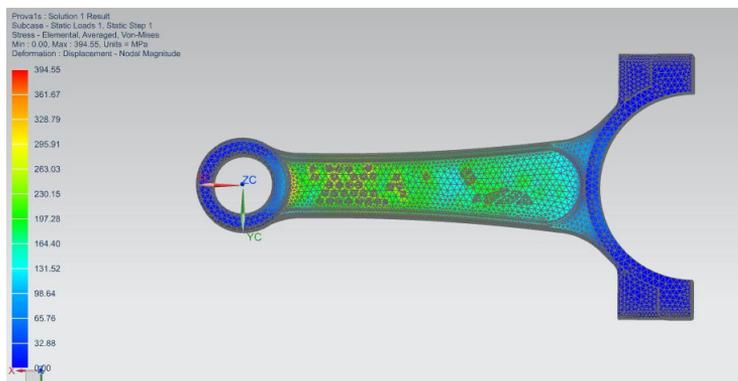


Figura 38 - tensioni sulla biella a seguito dell'ottimizzazione nel caso B

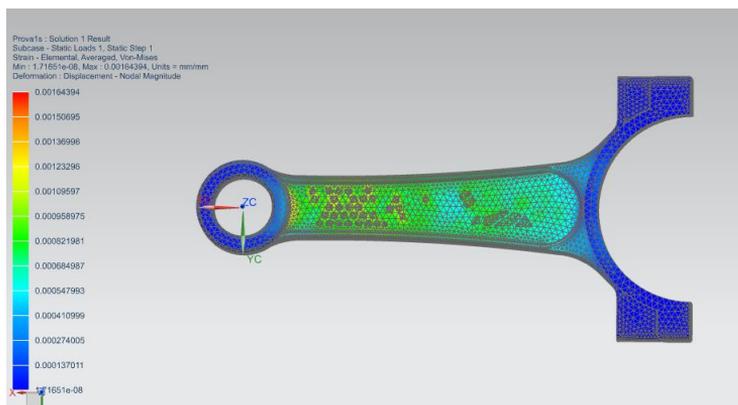


Figura 39 - deformazioni sulla biella a seguito dell'ottimizzazione nel caso B

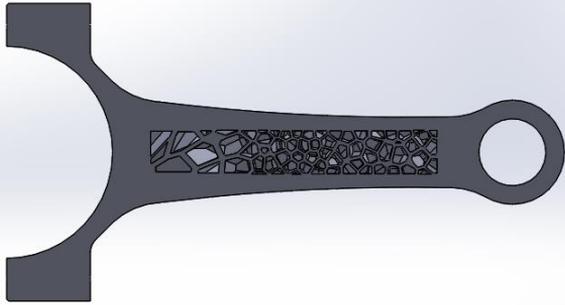
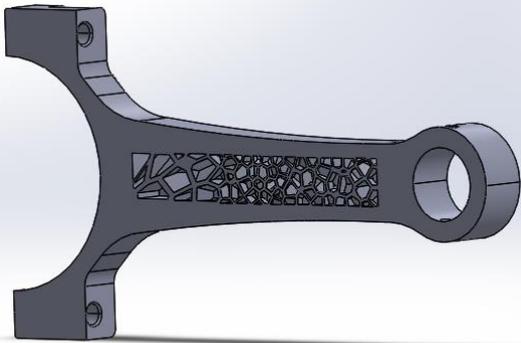
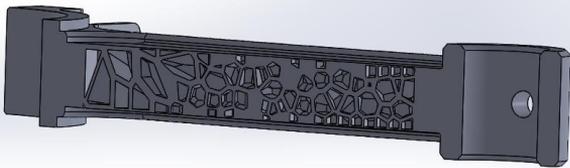
In questo caso è possibile notare una tensione massima di poco superiore rispetto al caso A. Questo è dovuto ad un numero minore di punti e ad un differente fattore di scala, tale da influenzare lo svuotamento interno del fusto di biella.

La distribuzione delle tensioni sul fusto di biella nel caso e A nel caso B risulta essere differente, in quanto nel primo caso le tensioni più elevate si trovavano in prossimità del piede di biella, mentre nel secondo i valori più elevati sono maggiormente distribuiti su tutto il fusto. Questo è dovuto alla presenza di fori di maggiori dimensioni in prossimità della testa di biella.

#### 5.5.3. Caso C

Nel caso C si è operato con lo stesso numero di punti del caso B, aumentando tuttavia il fattore di scala a 0,8 e modificando l'area di soglia a 3.

Il risultato ottenuto è riportato in Figura 40:

<p><b>Risultato OT del caso C in sezione sul piano frontale</b></p>	
<p><b>Risultato OT del caso C in vista prospettica</b></p>	
<p><b>Risultato OT del caso C in sezione sul piano laterale</b></p>	

*Figura 40 – Risultati OT nel caso C*

Per la FEA è stata realizzata una mesh Tetraedrica con dimensione degli elementi pari a 2 mm.

I risultati ottenuti sono riportati in Figura 41 e Figura 42.

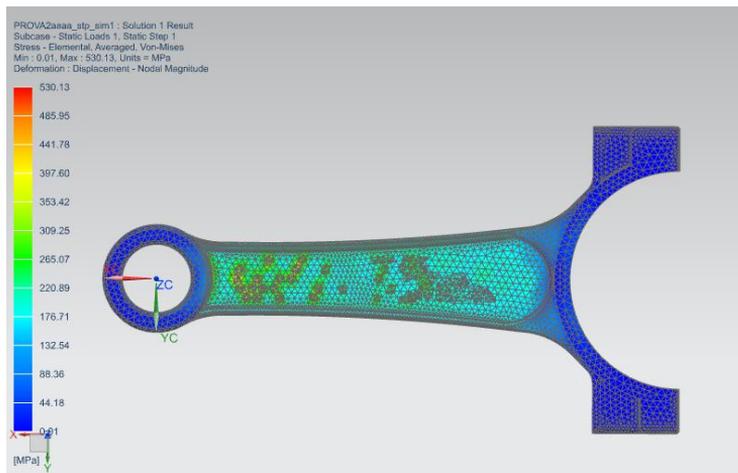


Figura 41 - Tensioni sulla biella a seguito dell'ottimizzazione nel caso C

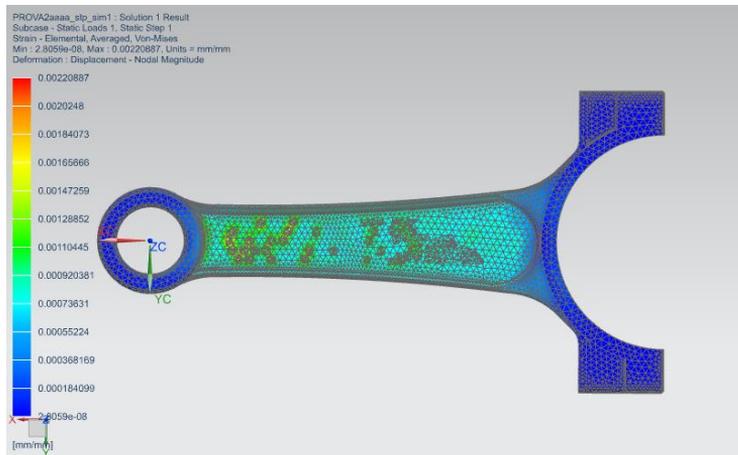


Figura 42 - Deformazioni sulla biella a seguito dell'ottimizzazione nel caso C

In questo caso vi è stato un ulteriore aumento delle tensioni, dovuto ad una maggiore asportazione di materiale rispetto ai casi A e B; tuttavia, le tensioni sulla biella risultano essere comunque al di sotto dei valori di soglia. In corrispondenza del piede di biella si può osservare un piccolo aumento delle deformazioni.

A differenza del caso B, dove le tensioni più elevate sono distribuite in modo più omogeneo sul fusto di biella, in questo caso si ha un evidente aumento delle tensioni in corrispondenza dei fori.

Avendo verificato che per tutti e tre i casi non si supera mai la tensione di snervamento, il confronto tra i pesi ottenuti consente di stabilire quale tra essi sia il più conveniente.

In Tabella 13 sono riportati i pesi rispettivamente del fusto di biella non ottimizzato e per i casi A, B e C.

Caso	Peso [kg]	Riduzione di peso (%)
Non ottimizzato	0.199	-
A	0.152	23.5
B	0.157	21.1
C	0.147	27.6

*Tabella 13 - Pesi e riduzione di peso percentuale per i casi di studio*

Dai risultati ottenuti, è possibile evincere che l'OT più performante è quella ottenuta nel caso C, in quanto consente una riduzione di peso del fusto di biella di oltre il 27%, inoltre presenta una distribuzione dei fori più omogenea.

Il caso A rappresenta un caso intermedio, caratterizzato da una distribuzione dei punti più regolare, ma con la presenza di fori di piccole dimensioni e dalla forma complessa.

Il caso B è il meno performante, in quanto comporta una riduzione di peso di poco superiore al 21%, dimostrando come la variazione dei parametri introdotti nell'algoritmo sia di fondamentale importanza per migliorare le prestazioni del componente.

In Tabella 14 sono riportati i dati relativi a tensioni e deformazioni relativi a tutti i casi di studio:

Caso	Tensione massima [MPa]	Deformazione massima	Peso [kg]
Non ottimizzato	360.46	0.0016	0.199
A	452.31	0.0018	0.152
B	394.55	0.0016	0.157
C	530.13	0.0022	0.147

*Tabella 14 - Confronto riassuntivo dei risultati per i tre casi, in termini di tensioni massime, deformazioni massime e pesi*

Il valore più elevato di tensione massima si ottiene al caso C, a causa di un'asportazione di materiale maggiore rispetto agli

altri due casi, ottenendo di conseguenza un aumento delle tensioni in corrispondenza dei fori.

Rispetto al caso non ottimizzato, si ottiene un aumento di tensione del 47,1% che risulta comunque essere al di sotto del valore della tensione di snervamento.

Il caso A presenta un valore di tensione massima inferiore rispetto al caso C, tuttavia superiore rispetto al caso non ottimizzato del 25,5%.

Il caso B mostra risultati peggiori in termini di diminuzione del peso, e di conseguenza, rispetto al caso non ottimizzato si osserva un modesto aumento della tensione massima, pari al 9,45%.

#### 5.6. Considerazioni finali

In questa parte di tesi si propone un metodo di Ottimizzazione Topologica su un modello 3D, che si basa su un processo iterativo sull'ambiente di lavoro Rhino-Grasshopper e su analisi FE effettuate attraverso Siemens NX con solutore Nastran.

In questa metodologia di Ottimizzazione Topologica proposta si pone come obiettivo la realizzazione su Grasshopper di un algoritmo funzionante per un solido 3D, dove è già stata dimostrata la capacità del programma ad operare con superfici.

Come caso di studio è stata scelta una biella automobilistica per un motore a 4 tempi realizzata in AISI 1005 ed è stata considerata la condizione di sollecitazione più gravosa, ovvero in corrispondenza del punto morto superiore.

Per verificare come l'impostazione dei parametri nell'algoritmo fosse determinante sul risultato ottenuto, sono stati considerati tre casi. Ad ogni caso si è variato il numero di punti, la loro distribuzione all'interno dell'area considerata e il fattore di scala dei poligoni realizzati con diagramma di Voronoi.

Si è effettuata un'analisi FE i cui risultati ottenuti sono stati sostituiti nell'algoritmo precedentemente implementato e il fusto di biella è stato scavato internamente, ottenendo fori di dimensione variabile, in particolare con dimensioni maggiori per valori di tensioni più bassi e con dimensioni minori per valori più elevati. Nelle zone in cui i valori di tensione risultano al di sopra di una soglia preimpostata il componente rimane invariato.

Il pezzo ottimizzato è stato sottoposto nuovamente ad analisi FE ed i valori ottenuti sono stati confrontati con quelli precedenti.

Dal confronto tra i risultati ottenuti e tra i diversi casi studiati, è emerso che:

- Nei tre casi trattati, si ottiene un aumento delle tensioni, come previsto, dovuto ad uno svuotamento della struttura interna. Tuttavia, l'aumento delle tensioni è accettabile, in quanto al di sotto del valore della tensione di snervamento.
- Con questo metodo è stato possibile ridurre il peso del fusto di biella in modo apprezzabile, mantenendo comunque delle buone caratteristiche meccaniche, quale la resistenza ad elevati valori di compressione.
- L'algoritmo implementato funziona bene per i solidi e consente di modificare in modo apprezzabile il risultato in termini di pesi e tensioni, variando i parametri che caratterizzano le dimensioni dei fori da realizzare sul componente.
- Tra i casi esaminati, il più performante è il caso C, che riduce il peso del fusto di biella del 27,6%, ottenuto considerando un numero più contenuto di punti, ma aumentando il fattore di scala dei poligoni ottenuti dalla tassellazione di Voronoi.
- Nei software di gestione della stampante 3D, vi è una funzione che permette durante la realizzazione del percorso di slicing di generare dei fori di collegamento tra i vuoti, consentendo la fuoriuscita della polvere metallica intrappolata all'interno del componente.

## 6. Ottimizzazione Topologica di strutture *lattice* stocastiche

### 6.1. Presentazione

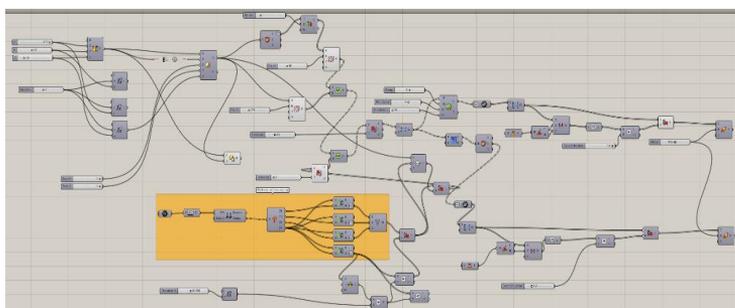
Si presenta adesso un'importante evoluzione degli algoritmi precedentemente descritti. Mentre nei casi precedenti la procedura era quella di scavare attraverso il volume stesso, in questo caso tramite questo nuovo metodo è possibile creare delle strutture reticolari. La struttura reticolare generata è basata su punti, detti semi, che possono essere distribuiti in modo stocastico o tramite una legge di distribuzione.

Il metodo in esame è ancora orientato verso le tecnologie di sinterizzazione laser selettiva (SLS).

### 6.2. L'algoritmo

Anche in questo caso l'algoritmo è stato sviluppato in ambiente Rhinoceros – Grasshopper. Inizialmente l'algoritmo riempie le regioni che devono essere ottimizzate con dei semi, dove ogni seme rappresenta il punto in cui i reticoli si collegheranno tra loro. È possibile decidere il numero e la distribuzione dei semi, la quale può essere uniforme o meno. Nella seconda fase, i semi vengono interconnessi da elementi prismatici lineari. In questo caso sono stati scelti elementi cilindrici ma è possibile connettere anche elementi a sezione esagonale, quadrata o altro. In questa fase è possibile stabilire

un limite al numero di connessioni per ogni nodo ed anche i limiti di lunghezza massima e minima degli elementi reticolari. In pratica ogni nodo viene connesso agli n nodi più vicini purché questi nodi siano non più distanti di un limite massimo e non meno distanti di un limite minimo. Ovviamente, aumentando il numero di connessioni e i limiti di lunghezza massima, il numero di elementi che compongono la struttura reticolare aumenterà. Alla fine di ogni fase, l'algoritmo esporta un file in formato .STP pronto all'uso. In Figura 43 è mostrato lo schema dell'intero algoritmo.



*Figura 43 - Schema dell'algoritmo nell'ambiente di Grasshopper*

### 6.3. Il caso di studio

Per la validazione dell'algoritmo è stata modellata una trave monolitica a sbalzo, incastrata in un lato, e su cui agisce un carico verticale sul lato opposto. L'Ottimizzazione Topologica

della trave avviene solo all'interno del volume del nucleo centrale, mentre le facce (superiore e inferiore) sono state considerate a spessore costante. In questo modo, si ottiene come risultato finale un pannello sandwich [56] con tutte le potenzialità in termini di peso e resistenza paragonabili alle strutture di questo tipo. L'obiettivo di questa Ottimizzazione Topologica è quello di raggiungere una riduzione del peso globale del sistema, fino al raggiungimento di una soglia di sollecitazione prefissata (in questo caso fissata al 70% dello snervamento, ovvero circa 600 MPa). Il componente considerato è quindi una trave a sbalzo di dimensioni 100 (lunghezza) x 50 (larghezza) x 13 (spessore) mm, vincolata attraverso un incastro da un lato, e sollecitata da una forza verticale distribuita pari a 2 KN sul bordo del lato opposto (Figura 44).

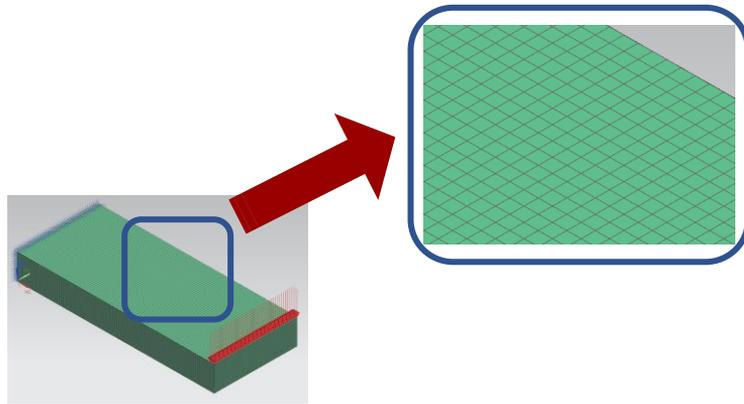


*Figura 44 – sistema equivalente trave monolitica*

Inizialmente si esegue un'analisi FE sulla trave monolitica dove i risultati ottenuti vengono inseriti all'interno dell'algoritmo (iterazione 0). Dopo tale iterazione, ad ogni passaggio successivo, l'algoritmo popola di semi il volume tra la faccia superiore e quella inferiore, realizzando un sandwich. Lo spessore delle due pelli esterne è stato fissato a 3 mm. La popolazione dei semi aumenta ad ogni iterazione, mantenendo i punti che si trovano nelle zone in cui viene raggiunta una soglia di tensione, ed aggiungendo una quota di punti stocastica. La quota dei punti aggiuntivi può essere distribuita uniformemente, come nel caso di questo lavoro, o in maniera non uniforme seguendo una legge di distribuzione ad hoc. Per ogni seme, l'algoritmo collega i 5 semi più vicini con delle travi, purché queste ultime si trovino all'interno di un determinato range di lunghezza. Per ogni trave è stata imposta una sezione circolare e un diametro fisso di 0,5 mm. Per questo caso di studio è stata utilizzata la lega di titanio Ti-6Al-4V ELI ipotizzando un processo di AM con tecnologia SLS. Questo tipo di materiale trova impiego in svariati settori industriali, per via delle sue buone proprietà meccaniche e in campo biomedicale grazie alla sua biocompatibilità [14].

La FEA è stata eseguita utilizzando il solutore Nastran all'interno di Siemens NX 1859. La scelta della mesh per la discretizzazione del componente monolitico e per le pelli è

ricaduta su una griglia esaedrica strutturata con dimensione di ogni elemento pari ad 1 mm (Figura 45), mentre per la struttura reticolare sono stati utilizzati elementi beam.



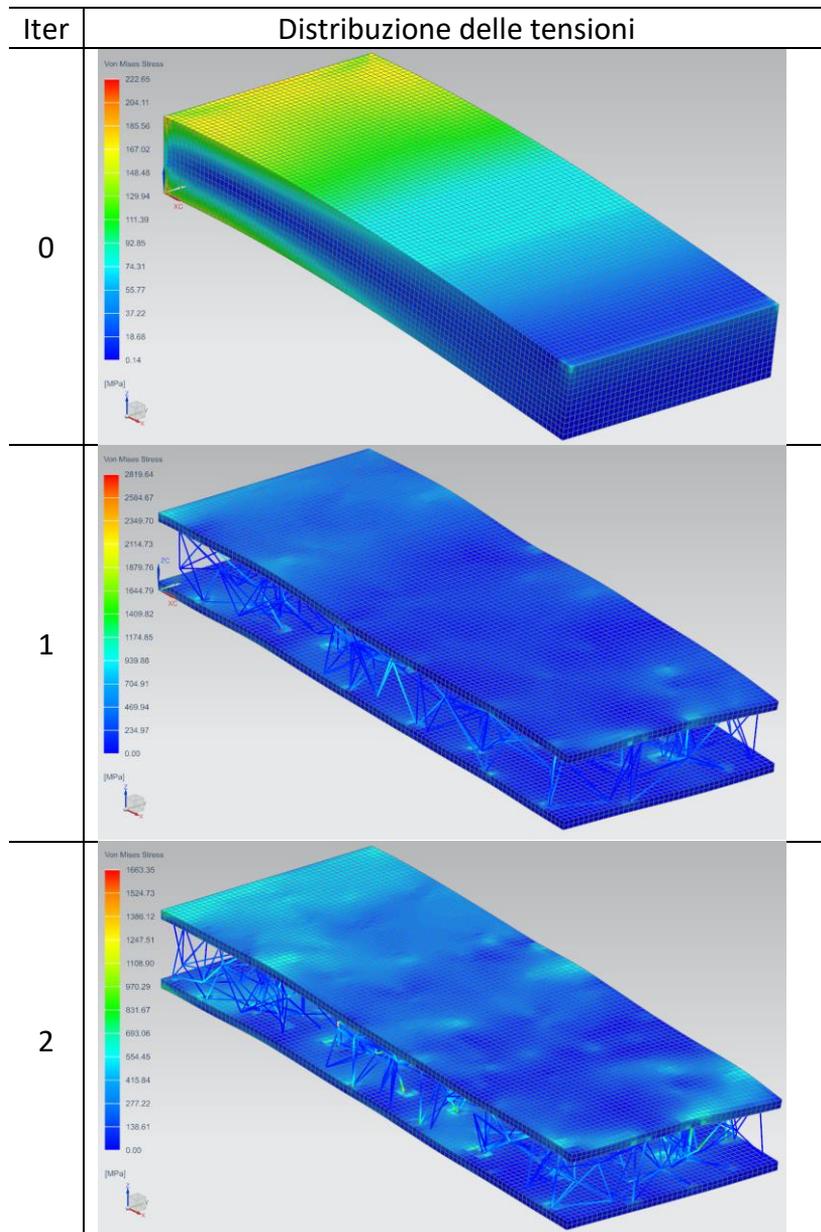
*Figura 45 – Mesh esaedrica strutturata*

È stata eseguita un'analisi statica lineare utilizzando la soluzione Nastran SOL 101. Infine, affinché in ogni simulazione ci fossero sempre le stesse condizioni al contorno, sono state create delle caselle di selezione fisse.

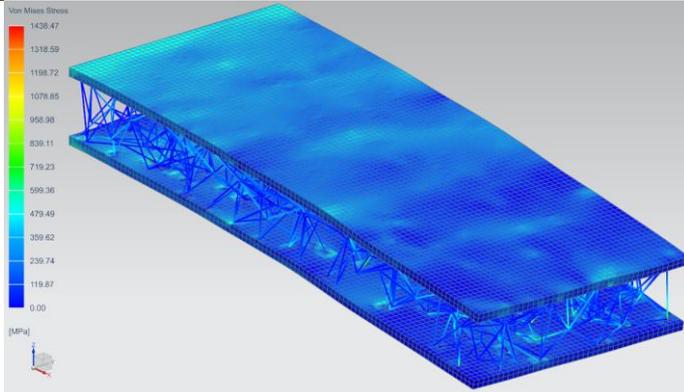
#### 6.4. Risultati e discussione

La Figura 46 mostra la distribuzione delle tensioni ad ogni iterazione. Si è scelto di non uniformare la scala delle tensioni ottenute in quanto a causa dell'eccessiva variazione dei valori

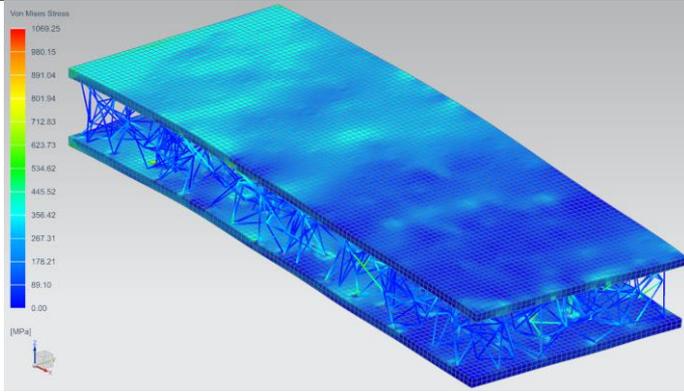
delle tensioni massime, in alcune iterazioni si otterrebbe una mappa dei colori monocromatica.



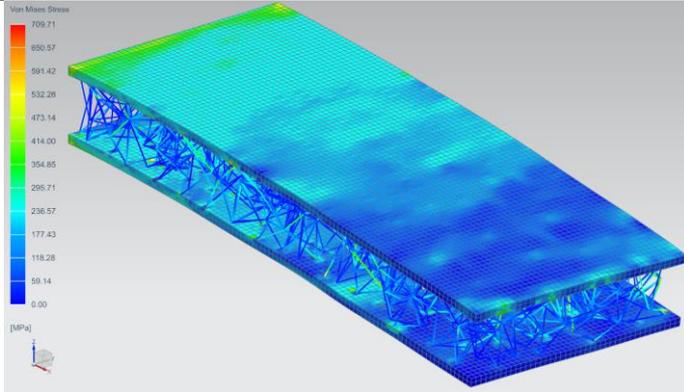
3



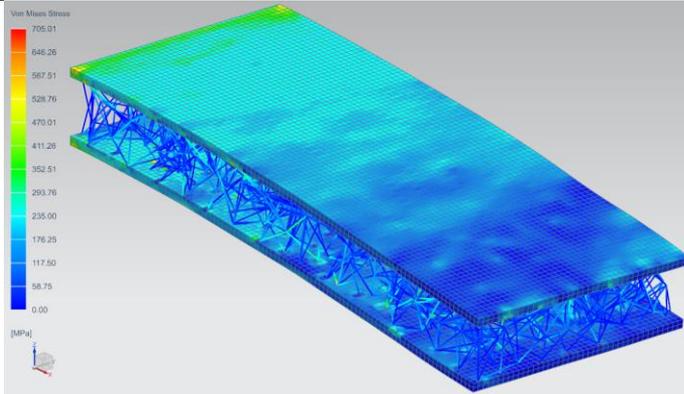
4



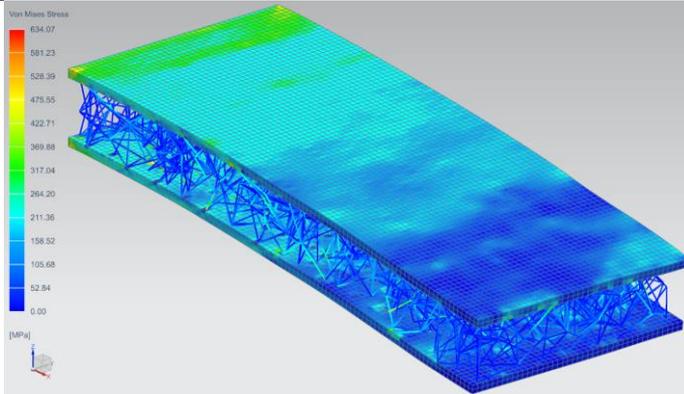
5



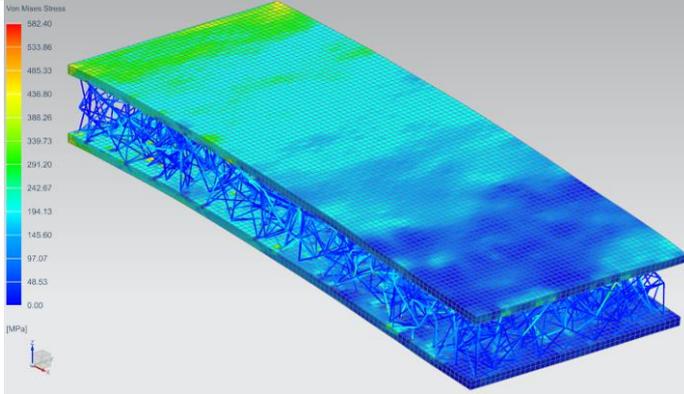
6



7



8



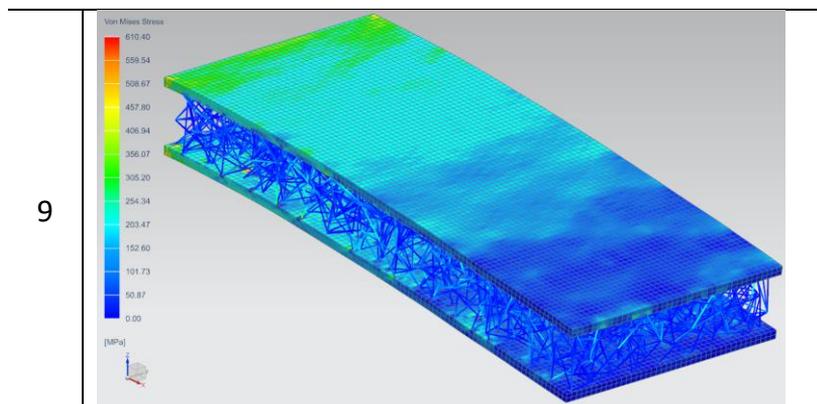


Figura 46 – Distribuzione delle tensioni ad ogni iterazione

La Figura 47 mostra in particolare i risultati della FEA all'ultima iterazione (in cui sono presenti 1000 semi). È possibile osservare che, se le pelli sono caricate linearmente, le travi vengono caricate più o meno uniformemente, poiché il numero di semi cambia in funzione delle tensioni.

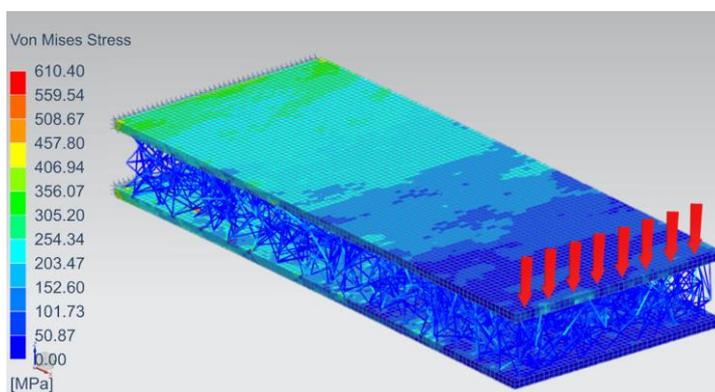


Figura 47 – Tensioni di Von Mises sulla FEA all'ultima iterazione. Il carico distribuito di 2 kN è rappresentato dalle frecce rosse. Il vincolo è fissato sul lato opposto rispetto al carico.

All'aumentare del numero di semi, aumenta il numero di travi, e di conseguenza la struttura diventa più robusta ma anche più pesante (Figura 48). Per testare l'efficacia dell' algoritmo, sono stati effettuati molti cicli, fino a quando il valore della tensione massima si è stabilizzato senza produrre vantaggi significativi. A quel punto, il rapporto peso/tensione cresce.

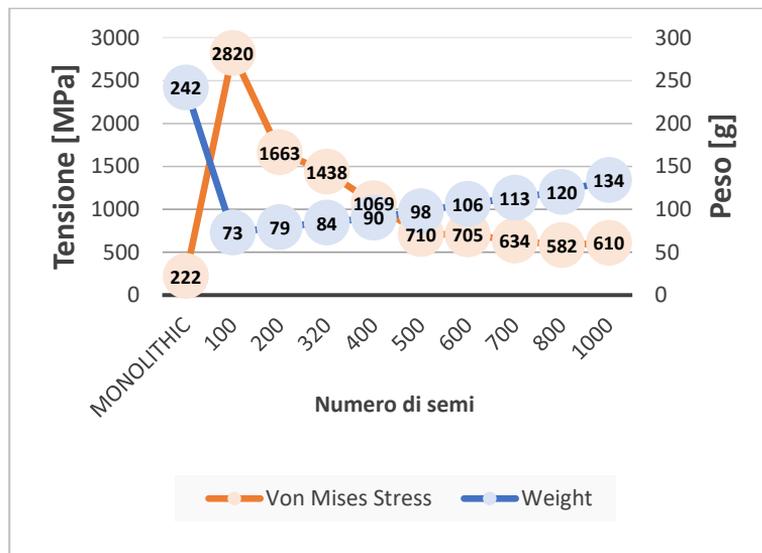


Figura 48 – Variazione della tensione e del peso all'aumentare del numero di semi

Al termine dell'ottimizzazione, il componente ha raggiunto la tensione consentita (600 MPa) con una riduzione di peso del 50% utilizzando 800 semi e circa 2700 travi.

La workstation utilizzata per l'esecuzione dell'algoritmo era dotata di una CPU Intel Core I7-8700 con 16 GB di RAM e di

una NVIDIA Quadro P5000 da 16 GB. Il tempo computazionale richiesto dall' algoritmo è stato di circa 60 secondi per ogni ricostruzione CAD, mostrando le elevate prestazioni del metodo anche in termini di risorse computazionali.

#### 6.5. Considerazioni finali

In questa parte di tesi è stato proposto un nuovo metodo di ottimizzazione 3D. Il metodo consente la realizzazione di una struttura reticolare stocastica all'interno di due pelli monolitiche. L'algoritmo è stato sviluppato all'interno dell'ambiente Rhinoceros-Grasshopper che consente di programmare e parametrizzare i comandi CAD. Come caso di studio è stata scelta una semplice trave a sbalzo. L'analisi mostra i diversi effetti, in termini di peso e tensioni massime, che modificano il numero di semi necessari per la costruzione della struttura reticolare stocastica. Il metodo ha mostrato un alto potenziale con una drastica riduzione del peso fino al 50% rispetto alla trave piena ed eccellenti prestazioni meccaniche. Inoltre, la struttura stocastica garantisce buone prestazioni anche quando i carichi reali differiscono notevolmente dai carichi di progetto. questo metodo consente inoltre una riduzione del costo e del materiale utilizzato.

## 7. Ottimizzazione Topologica mediante *Hollowing* strutturale

### 7.1. Presentazione

Uno degli obiettivi di quest'ultima parte di tesi, è quello di prototipare il pezzo ottimizzato, al fine di poter valutare le caratteristiche meccaniche ottenute attraverso il processo di Ottimizzazione Topologica, mediante l'utilizzo di macchine di prova. In questo caso per Ottimizzare il pezzo non è stata utilizzata una tassellazione di Voronoi, bensì una griglia di fori circolari con diametro variabile. Il provino ottimizzato è stato quindi prototipato utilizzando una stampante 3D FDM. Poiché la tecnologia FDM utilizza un filamento polimerico termoplastico per la deposizione dei vari strati, si è deciso di avvalersi di filamenti composti da acido polilattico (PLA). Questa scelta è stata effettuata sia per le buone caratteristiche meccaniche del materiale ma soprattutto per la sua ecocompatibilità, in quanto il PLA proviene da fonti rinnovabili come l'amido [57], ed è biodegradabile [58], ottenendo dei vantaggi rispetto ai polimeri di derivazione petrolchimica. Seol et al. [59] attraverso una panoramica delle proprietà meccaniche di diversi provini ad osso di cane realizzati in PLA con la tecnica FDM, mostra come le

caratteristiche meccaniche del campione variano in base alla geometria e alla densità del riempimento.

Le potenzialità del metodo consistono non solo nella sua semplicità e nella praticità che si ha nell'ottenere direttamente delle geometrie CAD pronte all'uso, ma anche nell'elevata versatilità della tecnica di svuotamento in termini di tecnologie di produzione. In effetti, lo svuotamento è molto adatto per essere prodotto sia con tecnologie AM che sottrattive, come foratrici o fresatrici.

#### 7.2. L'algoritmo

Il metodo proposto consiste nello svuotare il volume del modello, variando la dimensione dei fori in funzione delle tensioni valutate attraverso la FEA effettuata con il software Ansys Workbench.

Come caso di studio, è stata scelta una semplice trave rettangolare sottoposta a una prova di flessione a tre punti.

A differenza degli altri algoritmi sviluppati, questo non lavora in modo iterativo. Per svuotare il modello non ottimizzato, viene inizialmente inserita una griglia di punti equidistanti che rappresentano i semi da cui partirà lo svuotamento del componente (Figura 49).

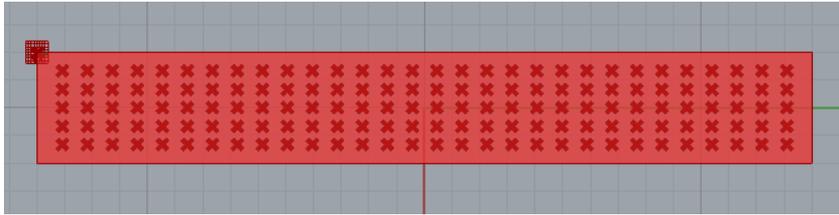


Figura 49 - popolazione dei semi

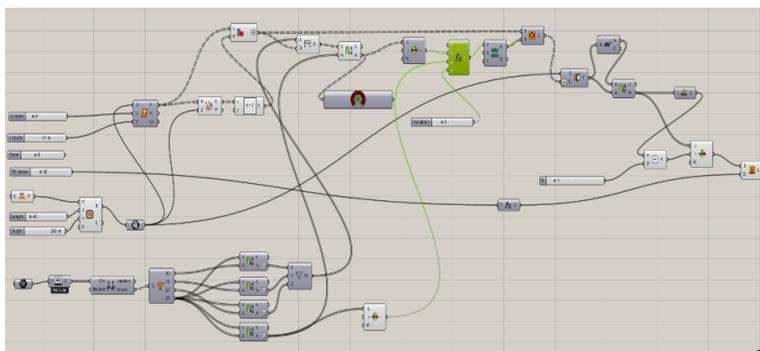
Una volta ottenuti i risultati della FEA, vengono inseriti come dati di input all'interno dell'algorithm, che, valuta la massima tensione agente intorno ad ogni punto.

L'algorithm creato è monoparametrico e agisce variando il diametro dei fori che scavano il componente con una funzione inversa all'intensità delle tensioni che agiscono. La funzione matematica scelta è mostrata in (1).

$$D \propto \left(1 - k \cdot \frac{\sigma}{\sigma_p}\right) \quad (1)$$

In cui  $D$ , che è il diametro locale del foro, è proporzionale ad un andamento lineare, dove  $k$  è un parametro fisso,  $\sigma$  la tensione locale di von Mises e  $\sigma_p$  la tensione ammissibile.

Come nei casi precedenti l'algorithm è stato sviluppato nell'ambiente Rhinoceros-Grasshopper. L'algorithm è mostrato in Figura 50.



*Figura 50 - L' algoritmo di Grasshopper*

Dopo il processo di ottimizzazione, il software crea una geometria CAD 3D pronta per essere esportata in un formato standard (ad esempio STL) e prototipata senza la necessità di lavori di post-elaborazione.

### 7.3. La prototipazione FDM

Il materiale utilizzato per la stampa dei provini è il PLA. L'utilizzo di questo materiale è attualmente in forte espansione, poiché presenta delle proprietà interessanti come, buone caratteristiche meccaniche, basso costo ed infine risulta essere più ecologico rispetto agli altri materiali plastici più utilizzati. Le proprietà meccaniche del materiale sono mostrate in Tabella 15 [60].

Proprietà	Unità	Valore
Densità	kg/m <sup>3</sup>	1165
Modulo di Young	MPa	2300
Rapporto di Poisson	-	0.4
Resistenza alla trazione	MPa	50
Resistenza alla trazione finale	MPa	60

*Tabella 15 - Proprietà meccaniche del PLA*

Il provino a forma di trave rettangolare (280 x 20 x 40 mm) è stato stampato in PLA utilizzando un riempimento del 100%, per un peso di circa 0,260 kg. La direzione dello *slicing* è stata considerata lungo un asse diretto lungo la direzione dello spessore (Figura 53). Le stesse dimensioni e la stessa direzione di stampa sono state utilizzate anche per il campione ottimizzato.

In questa fase, affinché si possa ottenere una corretta adesione tra i vari strati di stampa, è particolarmente importante stampare con una temperatura dell'estrusore e una velocità di stampa adeguate. In particolare, per questa stampa sono state impostate, una temperatura di estrusione pari a 200 °C ed una velocità di stampa pari a 50 mm/s. Il tempo di stampa varia in base alla complessità del modello da stampare. La stampante 3D, per stampare il provino non ottimizzato in questo caso di studio, ha impiegato 24 ore e 40 minuti.

#### 7.4. La prova di flessione

Tutte le prove sono state eseguite con una macchina servo-idraulica a carico assiale INSTRON 8854 con una capacità di carico massima di 250 kN. Le prove di flessione a 3 punti sono state eseguite con una distanza tra i rulli di appoggio pari a 220 mm, aventi un diametro pari a 20 mm. La velocità di abbassamento del rullo superiore è stata impostata a 5 mm al minuto. Le prove sono state effettuate fino alla rottura del provino (Figura 51). La Figura 52 mostra il provino non ottimizzato dopo la prova di flessione.



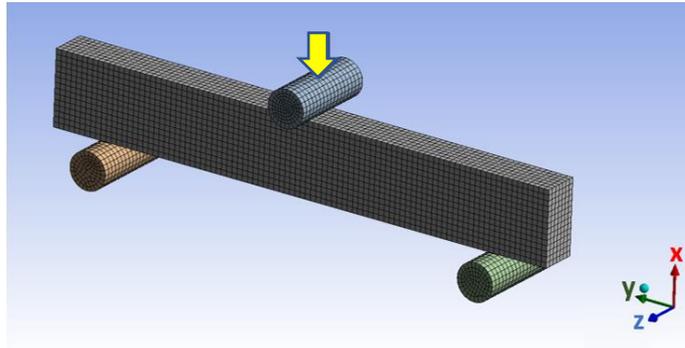
*Figura 51 - L'allestimento sperimentale*



*Figura 52 - Il provino rotto*

Le analisi FE sono state eseguite utilizzando Ansys workbench 2020 attraverso un modello elastico lineare. La regolarità geometrica del campione ha permesso di creare una mesh strutturata regolare. i tre rulli sono stati modellati per avere le

stesse dimensioni di quelli utilizzati nella prova sperimentale e sono stati posizionati allo stesso modo (Figura 53).



*Figura 53 - Mesh 3D strutturata e disposizione dei rulli. La forza è applicata lungo la direzione x mentre i layer crescono in direzione z.*

Il materiale è stato impostato inserendo le caratteristiche meccaniche del PLA, mentre i rulli sono stati modellati in acciaio. I rulli inferiori sono stati vincolati attraverso un supporto fisso, mentre per il rullo superiore è stato impostato un abbassamento pari a quello ottenuto durante la prova di flessione all'estremità della parte elastica della curva sperimentale. I contatti sono stati impostati senza attrito (frictionless).

### 7.5. Risultati e discussione

È stato effettuato uno studio di OT su un provino rettangolare. La FEA del modello non ottimizzato ha fornito i valori di tensione distribuiti all'interno del campione da inserire nell'algoritmo (Figura 54).

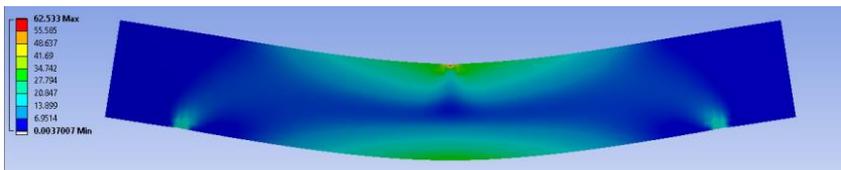


Figura 54 – Distribuzione delle tensioni nel campione

Il modello ottenuto utilizzando l'algoritmo di ottimizzazione è mostrato in Figura 55, e l'effetto dovuto alle fibre esterne, all'asse neutro e alle pressioni di contatto sui supporti è ben visibile.

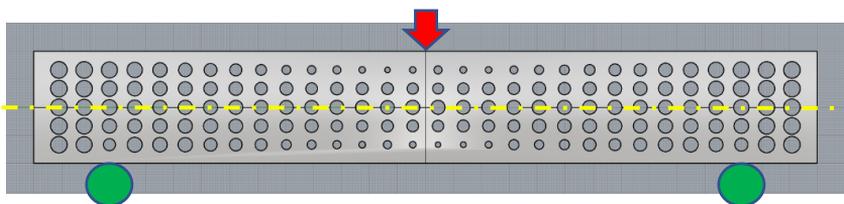
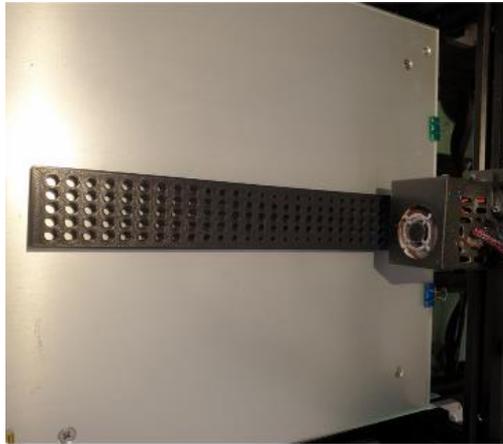


Figura 55 - Il campione scavato, dopo l'ottimizzazione dell'algoritmo. La linea in giallo rappresenta l'asse neutro, la freccia rossa la forza applicata e le circonferenze verdi i rulli di appoggio.

Il campione ottimizzato è stato quindi stampato. In questo caso, nonostante il peso sia diminuito a 0,205 kg, il tempo di stampa è aumentato a 38 ore, cioè è aumentato di circa il 50% rispetto al campione non ottimizzato (Figura 56).



*Figura 56 - Stampa del campione ottimizzato*

Un confronto del diverso comportamento dei due campioni è riportato in Figura 57. Il limite della fase elastica è stato considerato al variare della derivata della curva, ovvero quando l'andamento di quest'ultima decresce. Questo valore non cambia in modo significativo nei due provini. La rottura del provino non ottimizzato avviene ad un carico pari a circa 6000 N, mentre il provino ottimizzato arriva a rottura per un carico poco inferiore di 5000 N. Il campione ottimizzato ha,

ovviamente, rigidezza e resistenza alla trazione minori ma ha un rapporto tensione/peso più elevato. Inoltre, le due modalità di rottura sono abbastanza diverse in quanto il campione non ottimizzato ha un'ampia area plastica, mentre il campione ottimizzato collassa improvvisamente, dopo il carico di rottura Figura 58.

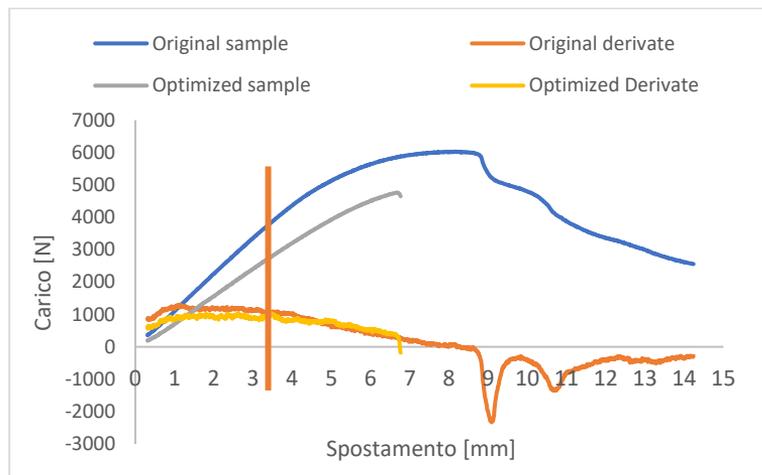


Figura 57 - Le curve Carico-Spostamento dei due campioni

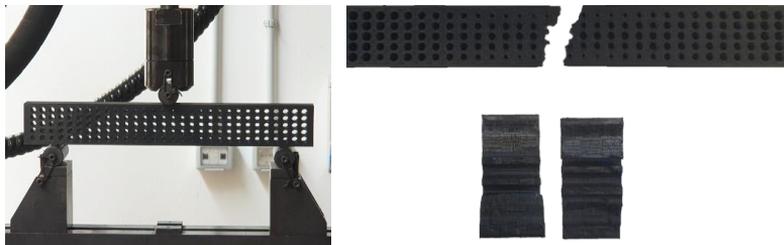
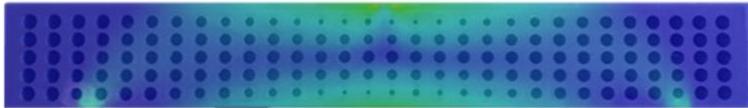


Figura 58 – Il provino rotto

Sovrapponendo il risultato dell'analisi FE al campione ottimizzato, si può osservare come la variazione del diametro dei fori sia correlata all'andamento delle sollecitazioni (Figura 59).



*Figura 59 - Composizione del campo di tensione sovrapposta al modello di svuotamento*

Il rapporto tensione/peso aumenta di circa il 20% nel provino ottimizzato. Un aspetto interessante è che il coefficiente di utilizzazione, definito come la tensione media sul campione, aumenta di circa il 37% a parità di spostamento. Ciò significa che ogni parte del provino funziona in media di più. Al contrario, il tempo di produzione aumenta di circa il 50%, a causa dei continui cambi di direzione dell'ugello di stampa e della retrazione necessaria al passaggio tra i vari fori.

Le principali differenze sono riassunte in *Tabella 16* in termini di variazione percentuale del provino ottimizzato rispetto a quello non ottimizzato.

<b>Proprietà</b>	<b>Variazione ottimizzata del campione</b>
Peso	-21%
tensione/peso	+20%
Coefficiente di utilizzazione	+37%
Tempo di stampa	+54%

*Tabella 16 - Confronto tra i provini*

#### 7.6. Considerazioni finali

È stato testato un nuovo metodo di ottimizzazione della topologia basato su uno svuotamento monoparametrico.

L'algoritmo, interfacciandosi con i risultati della FEA, scava il componente con fori inversamente proporzionali all'intensità della tensione.

Una trave di forma rettangolare è stata ottimizzata, come caso studio. Sia la trave ottimizzata che non ottimizzata sono state stampate in 3D utilizzando una stampante FDM. I provini stampati sono stati testati con una macchina di prova a flessione. Il provino ottimizzato ha ottenuto un buon incremento del rapporto tensione/peso, ma risulta aumentato anche il rapporto tempo di stampa/peso.

Lo stesso approccio può essere utilizzato con componenti di qualsiasi forma e natura ed è utile sia per tecnologie AM che tradizionali, utilizzando ad esempio foratrici o fresatrici CNC.

## 8. Conclusioni

Le tecnologie di Additive Manufacturing ampliano considerevolmente il range di geometrie realizzabili, rispetto alle classiche tecnologie sottrattive; l'approccio classico alla progettazione, tuttavia, resta ancora fortemente indirizzato verso la realizzazione di pezzi con tecnologie tradizionali. Questo comporta un limite importante alla realizzazione di componenti ottimizzati da un punto di vista strutturale e meccanico. L'Ottimizzazione Topologica permette di risolvere questo problema, introducendo algoritmi evolutivi che agiscono diminuendo il peso dei componenti e quindi il volume di materiale utilizzato, pur mantenendo le caratteristiche meccaniche desiderate.

L'obiettivo del lavoro di tesi è stato quello di sviluppare algoritmi di Ottimizzazione Topologica, utilizzando l'ambiente Rhino – Grasshopper. A differenza di altri ambienti di ottimizzazione che agiscono sul modello discretizzato (mesh), Rhino-Grasshopper consente di agire direttamente a livello CAD, permettendo di ottenere alla fine di ogni processo, file CAD in formato standard, pronti per essere utilizzati senza la necessità di effettuare alcuna azione di post-processing. La novità di questa metodologia consiste nell'agire direttamente

sulle geometrie CAD e non sulla mesh come avviene di consueto.

Sono state implementate diverse tipologie di algoritmo in relazione alle diverse tipologie di componenti da ottimizzare. Inizialmente attraverso la tassellazione di Voronoi si è considerata l'Ottimizzazione Topologica di superfici sia semplici che complesse ottenendo in entrambi i casi dei buoni risultati. In seguito, l'evoluzione dell'algoritmo ha reso possibile ottimizzare componenti 3D, inizialmente con tassellazione di Voronoi, successivamente con strutture *lattice* ed infine tramite uno svuotamento del componente con fori cilindrici.

Tutti gli algoritmi sviluppati agiscono mediante un processo iterativo che porta il componente ad alleggerirsi ma al tempo stesso permette di mantenere le caratteristiche meccaniche desiderate. Iterando il processo fino al raggiungimento di una soglia di tensione, è possibile raggiungere l'obiettivo desiderato.

Il funzionamento degli algoritmi prevede inizialmente l'importazione dei dati ottenuti in uscita da un'analisi FE, in cui i componenti da ottimizzare sono caricati e vincolati in funzione del loro reale utilizzo. In funzione del campo di tensione che agisce all'interno del componente l'algoritmo crea dei fori di dimensione maggiore nelle zone in cui i valori

di tensione risultano più bassi e di dimensione minore dove le tensioni aumentano.

Inizialmente si è testato l'algoritmo su un caso di studio consistente in un sedile da throttleman per motoscafi di classe X-CAT. In questo caso si è partiti da un sedile realizzato in composito per ottenere infine un sedile ottimizzato realizzato in lega di titanio mediante un processo di AM (SLS). L'obiettivo prefissato è stato ottenuto dopo tre iterazioni, infatti l'algoritmo ha permesso di alleggerire il sedile di circa il 60% rispetto all'originale realizzato in titanio massiccio e del 20% rispetto al sedile originale in composito, mantenendo la tensione massima al di sotto di quella di snervamento. Il limite di questo algoritmo è la cattiva gestione dei fori in prossimità di brusche variazioni di curvatura e orientazione delle superfici. In questo caso, infatti, vi è la possibilità che i fori si intersechino tra loro creando geometrie scorrette o dei fori spezzati. Questo limite è stato superato realizzando un nuovo algoritmo che permettesse, la proiezione dei pattern di Voronoi considerando la normale della superficie punto per punto piuttosto che un'unica normale fissa. In caso la soluzione precedente non fosse sufficiente l'algoritmo procede alla suddivisione delle superfici complesse in sotto-superfici più facili da gestire. Per valutare il funzionamento di questo nuovo metodo si è proceduto, mediante un secondo

caso di studio, all'ottimizzazione di un dispositivo FHR (Front Head Restraint). Anche in questo caso il dispositivo ottimizzato è stato considerato in lega di titanio e progettato per essere prodotto con un processo di sinterizzazione laser selettiva in Additive Manufacturing. Dopo quattro iterazioni, si è osservata una importante riduzione di peso che risulta essere pari al 37,5% rispetto al modello originale, massimizzando la resistenza nei punti più sollecitati. Una volta realizzati gli algoritmi per l'ottimizzazione delle superfici si è proceduto alla realizzazione di metodi che permettono l'ottimizzazione di componenti 3D. L'ottimizzazione di una biella è stata ottenuta mediante la tassellazione di Voronoi 3D. una volta valutati i carichi in gioco si è proceduto alla distinzione di tre casi studio, ognuno dei quali differisce dagli altri per la variazione di alcuni parametri implementati all'interno dell'algoritmo stesso. Ad ogni caso si è variato il numero di punti, la loro distribuzione all'interno dell'area considerata e il fattore di scala dei poligoni realizzati con diagramma di Voronoi. In tutti e tre i casi si è ottenuta una diminuzione del peso della biella senza mai superare la tensione di snervamento. Tra i tre casi esaminati, il più performante ha permesso una riduzione del peso del fusto di biella del 27,6%.

Successivamente si è realizzato un nuovo metodo che permette la realizzazione di strutture reticolari stocastiche. In questo caso l'algoritmo inserisce all'interno delle zone da ottimizzare dei semi che rappresentano i punti di collegamento tra i reticoli. Si è scelto come caso studio una trave monolitica caricata in un estremo ed incastrata nell'altro. La trave viene ottimizzata solo al suo interno lasciando le pelli, aventi uno spessore fisso, invariate. All'aumentare del numero dei semi, aumenta il numero di travi, e di conseguenza la struttura diventa più robusta ma anche più pesante. All'ultima iterazione l'algoritmo ha realizzato un sandwich caratterizzato da una importante riduzione di peso (fino al 50% rispetto alla trave non ottimizzata) pur mantenendo delle ottime prestazioni meccaniche.

Infine, si è realizzato un nuovo metodo di Ottimizzazione Topologica basato su uno svuotamento monoparametrico. A differenza dei casi precedenti l'algoritmo in questo caso non utilizza la tassellazione Voronoi per svuotare il componente, quest'ultimo viene invece scavato con dei fori circolari di dimensione inversamente proporzionale rispetto alle tensioni ottenute dall'analisi FE. Si parte da una griglia equidistante di punti che rappresentano i semi da cui partirà lo svuotamento del componente. Come caso studio è stata ottimizzata una

trave rettangolare. Il provino non ottimizzato e quello ottimizzato sono stati prototipati mediante l'utilizzo di una stampante 3D FDM. Una volta prototipati i provini rettangolari sono stati testati con delle prove di flessione tramite una macchina di prova. Si può affermare quindi che il provino ottimizzato ha ottenuto buon incremento del rapporto tensione/peso ma anche del rapporto tempo di stampa/peso. Il vantaggio di questo metodo è rappresentato dalla possibilità di poter realizzare il pezzo ottimizzato sia con tecnologie di AM che tradizionali, come ad esempio mediante l'utilizzo di foratrici o fresatrici CNC.

In conclusione, tutti gli algoritmi sviluppati in questo lavoro di tesi hanno permesso di ottenere dei componenti ottimizzati dalle alte prestazioni meccaniche, ottenendo una metodologia molto facile da usare, robusta e veloce, che permette di raggiungere una drastica riduzione del peso in modo alternativo rispetto alle altre metodologie di Ottimizzazione Topologica.

## 9. Bibliografia

1. Sigmund, O., Petersson, J.: Numerical instabilities in topology optimization: A survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima. *Struct. Optim.* 1998 161. 16, 68–75 (1998). <https://doi.org/10.1007/BF01214002>.
2. M.C.E., A.G.M.M.: LVIII. The limits of economy of material in frame-structures. <https://doi.org/10.1080/14786440409463229>. 8, 589–597 (1908). <https://doi.org/10.1080/14786440409463229>.
3. Bendsøe, M.P.: Optimal shape design as a material distribution problem. *Struct. Optim.* 1989 14. 1, 193–202 (1989). <https://doi.org/10.1007/BF01650949>.
4. Xia, L., Breitkopf, P.: Concurrent topology optimization design of material and structure within FE2 nonlinear multiscale analysis framework. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 278, 524–542 (2014). <https://doi.org/10.1016/J.CMA.2014.05.022>.
5. Xia, L., Breitkopf, P.: Recent Advances on Topology Optimization of Multiscale Nonlinear Structures. *Arch. Comput. Methods Eng.* 2016 242. 24, 227–249 (2016). <https://doi.org/10.1007/S11831-016-9170-7>.
6. Bendsøe, M.P.: Optimization of Structural Topology, Shape, and Material. *Optim. Struct. Topol. Shape, Mater.* (1995). <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03115-5>.
7. Mackerle, J.: Topology and shape optimization of structures using FEM and BEM: A bibliography (1999–2001). *Finite Elem. Anal. Des.* 39, 243–253 (2003).

[https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(02\)00071-9](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(02)00071-9).

8. Rozvany, G.I.N.: Topology Optimization in Structural Mechanics. *Topol. Optim. Struct. Mech.* (1997). <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2566-3>.
9. Rozvany, G.I.N.: A critical review of established methods of structural topology optimization. *Struct. Multidiscip. Optim.* 2008 373. 37, 217–237 (2008). <https://doi.org/10.1007/S00158-007-0217-0>.
10. Rozvany, G.I.N., Bendsø, M.P., Kirsch, U.: Layout Optimization of Structures. *Appl. Mech. Rev.* 48, 41–119 (1995). <https://doi.org/10.1115/1.3005097>.
11. Bendsøe, M.P., Díaz, A., Kikuchi, N.: Topology and Generalized Layout Optimization of Elastic Structures. *Topol. Des. Struct.* 159–205 (1993). [https://doi.org/10.1007/978-94-011-1804-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-94-011-1804-0_13).
12. Suzuki, K., Kikuchi, N.: A homogenization method for shape and topology optimization. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 93, 291–318 (1991). [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(91\)90245-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(91)90245-2).
13. Duysinx P, B.M.: Topology optimization of continuum structures with local stress constraints - Duysinx - 1998 - International Journal for Numerical Methods in Engineering - Wiley Online Library, [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/\(SICI\)1097-0207\(19981230\)43:8%3C1453::AID-NME480%3E3.O.CO;2-2](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/(SICI)1097-0207(19981230)43:8%3C1453::AID-NME480%3E3.O.CO;2-2), last accessed 2021/12/21.
14. Beckers, M.: Topology optimization using a dual method with discrete variables. *Struct. Optim.* 1999 171. 17, 14–24 (1999). <https://doi.org/10.1007/BF01197709>.
15. Gea, H.C., Fu, Y.: Optimal 3D stiffener design with

frequency considerations. *Adv. Eng. Softw.* 28, 525–531 (1997). [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(97\)00033-1](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(97)00033-1).

16. Chen, T.Y., Wu, S.C.: Multiobjective optimal topology design of structures. *Comput. Mech.* 1998 216. 21, 483–492 (1998). <https://doi.org/10.1007/S004660050327>.
17. Luo, J., Gea, H.C.: Optimal Stiffener Design for Interior Sound Reduction Using a Topology Optimization Based Approach. *J. Vib. Acoust.* 125, 267–273 (2003). <https://doi.org/10.1115/1.1569512>.
18. Pedersen, N.L.: Maximization of eigenvalues using topology optimization. *Struct. Multidiscip. Optim.* 2000 201. 20, 2–11 (2014). <https://doi.org/10.1007/S001580050130>.
19. Hammer, V.B., Olhoff, N.: Topology optimization of continuum structures subjected to pressure loading. *Struct. Multidiscip. Optim.* 2000 192. 19, 85–92 (2014). <https://doi.org/10.1007/S001580050088>.
20. Buhl, T.: Simultaneous topology optimization of structure and supports. *Struct. Multidiscip. Optim.* 2002 235. 23, 336–346 (2014). <https://doi.org/10.1007/S00158-002-0194-2>.
21. Bendsøe, M.P., Kikuchi, N.: Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 71, 197–224 (1988). [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(88\)90086-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(88)90086-2).
22. Patnaik, S.N., Guptill, J.D., Berke, L.: Merits and limitations of optimality criteria method for structural optimization. *Int. J. Numer. Methods Eng.* 38, 3087–3120 (1995).

<https://doi.org/10.1002/NME.1620381806>.

23. Ma, Z.D., Kikuchi, N., Hagiwara, I.: Structural topology and shape optimization for a frequency response problem. *Comput. Mech.* 1993 133. 13, 157–174 (1993). <https://doi.org/10.1007/BF00370133>.
24. Collet, M., Noël, L., Bruggi, M., Duysinx, P.: Topology optimization for microstructural design under stress constraints. *Struct. Multidiscip. Optim.* 58, 2677–2695 (2018). <https://doi.org/10.1007/S00158-018-2045-9/FIGURES/16>.
25. Fritzen, F., Xia, L., Leuschner, M., Breitkopf, P.: Topology optimization of multiscale elastoviscoplastic structures. *Int. J. Numer. Methods Eng.* 106, 430–453 (2016). <https://doi.org/10.1002/NME.5122>.
26. Xia, L.: Topology Optimization Framework for Multiscale Nonlinear Structures. *Multiscale Struct. Topol. Optim.* 1–19 (2016). <https://doi.org/10.1016/b978-1-78548-100-0.50001-x>.
27. Xia, L., Breitkopf, P.: Recent Advances on Topology Optimization of Multiscale Nonlinear Structures. *Arch. Comput. Methods Eng.* 24, 227–249 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11831-016-9170-7>.
28. Sigmund, O., Maute, K.: Topology optimization approaches: A comparative review, (2013). <https://doi.org/10.1007/s00158-013-0978-6>.
29. Barone, S., Cucinotta, F., Sfravara, F.: A comparative life cycle assessment of utility poles manufactured with different materials and dimensions. (2017). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-45781-9\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45781-9_10).
30. Gardan, J.: Additive manufacturing technologies: State of the art and trends. *Int. J. Prod. Res.* 54, (2016).

<https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1115909>.

31. Cucinotta, F., Guglielmino, E., Longo, G., Risitano, G., Santonocito, D., Sfravara, F.: Topology optimization additive manufacturing-oriented for a biomedical application. In: Lecture Notes in Mechanical Engineering (2019). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-12346-8\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12346-8_18).
32. Singh, S., Ramakrishna, S.: Biomedical applications of additive manufacturing: Present and future. *Curr. Opin. Biomed. Eng.* 2, 105–115 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2017.05.006>.
33. Graziosi, S., Rosa, F., Casati, R., Solarino, P., Vedani, M., Bordegoni, M.: Designing for Metal Additive Manufacturing: A Case Study in the Professional Sports Equipment Field. *Procedia Manuf.* 11, 1544–1551 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.288>.
34. Reddy, S.N., Maranan, V., Simpson, T.W., Palmer, T., Dickman, C.J.: Application of Topology Optimization and Design for Additive Manufacturing Guidelines on an Automotive Component. *Proc. ASME Des. Eng. Tech. Conf.* 2A-2016, (2016). <https://doi.org/10.1115/DETC2016-59719>.
35. Zhu, J.H., Zhang, W.H., Xia, L.: Topology Optimization in Aircraft and Aerospace Structures Design. *Arch. Comput. Methods Eng.* 23, (2016). <https://doi.org/10.1007/s11831-015-9151-2>.
36. Müller, T.E., van der Klashorst, E.: A quantitative comparison between size, shape, topology and simultaneous optimization for truss structures. *Lat. Am. J. Solids Struct.* 14, 2221–2242 (2017). <https://doi.org/10.1590/1679-78253900>.

37. Savio, G., Meneghello, R., Concheri, G.: Optimization of lattice structures for Additive Manufacturing Technologies. In: Eynard, B., Nigrelli, V., Oliveri, S.M., Peris-Fajarnes, G., and Rizzuti, S. (eds.) *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing: Proceedings of the International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing (JCM 2016)*, 14-16 September, 2016, Catania, Italy. pp. 213–222. Springer International Publishing, Cham (2017). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-45781-9\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45781-9_22).
38. Subramaniam, S.R., Samykano, M., Selvamani, S.K., Ngui, W.K., Kadirgama, K., Sudhakar, K., Idris, M.S.: 3D printing: Overview of PLA progress. *AIP Conf. Proc.* 2059, 020015 (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5085958>.
39. Gardan, J.: Additive manufacturing technologies: state of the art and trends. <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2015.1115909>. 54, 3118–3132 (2015). <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1115909>.
40. Yao, T., Deng, Z., Zhang, K., Li, S.: A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations. *Compos. Part B Eng.* 163, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.025>.
41. Ahn, D., Kim, H., Lee, S.: Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 47, (2007). <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.05.004>.
42. Gardan, N., Schneider, A.: Topological optimization of internal patterns and support in additive manufacturing. *J. Manuf. Syst.* 37, (2015).

<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.07.003>.

43. Saboori, A., Gallo, D., Biamino, S., Fino, P., Lombardi, M.: An Overview of Additive Manufacturing of Titanium Components by Directed Energy Deposition: Microstructure and Mechanical Properties. *Appl. Sci.* 7, 883 (2017). <https://doi.org/10.3390/app7090883>.
44. Cucinotta, F., Guglielmino, E., Risitano, G., Sfravara, F.: Assessment of Damage Evolution in Sandwich Composite Material Subjected to Repeated Impacts by Means Optical Measurements. *Procedia Struct. Integr.* 2, 3660–3667 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.455>.
45. Cucinotta, F., Paoli, A., Risitano, G., Sfravara, F.: Optical measurements and experimental investigations in repeated low-energy impacts in powerboat sandwich composites. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ.* (2017). <https://doi.org/10.1177/1475090217720619>.
46. Murr, L.E., Gaytan, S.M., Ceylan, A., Martinez, E., Martinez, J.L., Hernandez, D.H., Machado, B.I., Ramirez, D.A., Medina, F., Collins, S., Wicker, R.B.: Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting. *Acta Mater.* 58, 1887–1894 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.11.032>.
47. Eos: Material data sheet EOS Titanium Ti64 Material data sheet Technical data. 49, 1–5 (2011). <https://doi.org/10.1099/mic.0.051441-0>.
48. SFI Specification 39.2 Racine seats. (2017).
49. Chen, F., Brown, G.M., Song, M.: Overview of 3-D shape

measurement using optical methods. 39, 13–39 (2000).

50. Barone, S., Paoli, A., Razionale, A.V.: Three-dimensional point cloud alignment detecting fiducial markers by structured light stereo imaging. *Mach. Vis. Appl.* 23, 217–229 (2012). <https://doi.org/10.1007/s00138-011-0340-1>.
51. Dobbins, T., Rowley, I., Campbell, L.: *High Speed Craft Human Factors Engineering Design Guide*. 120 (2008). <https://doi.org/10.1093/mp/ssq038>.
52. Creality's CR30 Belt 3D Printer, CR-30 3DPrintMill! – Creality3D Store® Official Store for Creality 3D Printers and Accessories, <https://www.creality3dofficial.com/products/cr-30-infinite-z-belt-3d-printer>.
53. Kaul, A., Abbas, A., Smith, G., Manjila, S., Pace, J., Steinmetz, M.: device in professional auto racing. 25, 756–761 (2016). <https://doi.org/10.3171/2015.10.SPINE15337.756>.
54. Abrami, S., Cucinotta, F., Guglielmino, E., Sfravara, F.: *Human Factors Assessment for Comfort and Safety in the XCAT Powerboats Rules*. Springer International Publishing (2019). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-12346-8>.
55. Cucinotta, F., Paoli, A., Risitano, G., Sfravara, F.: Optical measurements and experimental investigations in repeated low-energy impacts in powerboat sandwich composites. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ.* 147509021772061 (2017). <https://doi.org/10.1177/1475090217720619>.
56. Cucinotta, F., Sfravara, F., Neri, P., Razionale, A.: Composite sandwich impact response: experimental

and numerical analysis. *Frat. ed Integrità Strutt.* 13, 367–382 (2019). <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.47.27>.

57. Valerga, A.P., Batista, M., Salguero, J., Girot, F.: Influence of PLA filament conditions on characteristics of FDM parts. *Materials (Basel)*. 11, (2018). <https://doi.org/10.3390/ma11081322>.
58. Jullanun, P., Yoksan, R.: Morphological characteristics and properties of TPS/PLA/cassava pulp biocomposites. *Polym. Test.* 88, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106522>.
59. Seol, K.-S., Zhao, P., Shin, B.-C., Zhang, S.-U.: Infill Print Parameters for Mechanical Properties of 3D Printed PLA Parts. *Korean Soc. Manuf. Process Eng.* 17, 9–16 (2018). <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.4.009>.
60. Overview of materials for Polylactic Acid (PLA) Biopolymer, <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab96a4c0655c4018a8785ac4031b9278>.