



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

A.a. 2020/2021

Sessione di Ottobre 2021

**Simulazione numerica di
componenti
prodotti in Additive
Manufacturing**

Relatori:

Prof. Lorenzo Peroni

Prof.ssa Martina Scapin

Candidati:

Marco Rota Graziosi

Matricola: 264070

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare il Professor Lorenzo Peroni per aver accettato di seguirmi, in un momento molto particolare come quest'anno. La sua preparazione è stata fondamentale nella riuscita di questo progetto.

Un ringraziamento speciale va ai miei amici e ai compagni di università, pronti a dividere ogni sfida che la vita mi ha proposto.

Alla mia famiglia, che con pazienza e amore mi hanno trasmesso valori sinceri e giusti. Nulla di tutto questo sarebbe stato possibile senza di voi.

E infine a te, Olivia, compagna straordinaria, che non smetti di stupirmi ogni giorno che passa. La tua gioia e dolcezza hanno reso momenti difficili in ricordi di cui sorridere. Anche se la distanza ci separa, questa tesi è uno dei tanti legami che ci tiene uniti, perché, come ti avevo detto una volta, tutto questo è anche merito tuo.

Indice

Introduzione	7
1. Il modello di riempimento	9
1.1 G-Code	12
1.2 Traduttore del G-Code	15
1.3 Elaboratore	18
1.4 Selettori e parametri	20
1.5 Creazione e manipolazione delle superfici di interpolazione	24
1.6 Taglio Booleano e triangolazione	33
1.7 Caratterizzazione geometrica	45
1.8 Triangoli e Triesagonale	46
1.9 Linee	47
1.10 Griglia	48
1.11 Suddivisione in cubi	49
1.12 Cubi	50
1.13 Ottagonale	51
1.14 Quarto di cubo	54
2. Elementi finiti	59
2.1 Geometria del componente	61
2.2 Comportamento analizzato	62
2.3 La prova analizzata	63
2.4 Prima parte della simulazione	65
2.5 Materiale	72
2.6 Mesh	76
2.7 Proprietà dei materiali utilizzati	79
3. Risultati	81
3.1 Definizione di rigidità	81
3.2 Verifica del comportamento	82
3.3 Analisi dei risultati	84
3.4 Rigidità	84
3.5 Confronto delle tensioni	85
3.6 Triangoli-Griglia	87
3.7 Cubi-Suddivisione in Cubi	91
3.8 Ottagonale-Quarto di Cubo	96
3.9 Rotazione del Componente	101
4. Conclusione	109

Introduzione

La tecnologia dell'Additive Manufacturing, nata in un contesto di prototipazione, inizia ora a trovare applicazione nei processi produttivi. Sono numerosi infatti i vantaggi che porta con se, a partire da una nuova classe di materiali, prima inaccessibili. Il Titanio per esempio, emblema della categoria "Hard to Cut" è ora disponibile, dal momento che non è più necessario lavorarlo con le macchine utensili. La Additive Manufacturing elimina inoltre dal ciclo produttivo i processi di finitura: la precisione intrinseca nella stampa tridimensionale infatti, porta ad avere un prodotto dotato di una tolleranza superficiale molto bassa, eliminando le fasi finali di ritocco della rugosità, normalmente più costose. Trattandosi inoltre di una tecnologia fortemente legata alla dimensione informatica, permette una buona flessibilità, in particolare consente di maneggiare svariate geometrie in modo intuitivo con i programmi a disposizione. Questi, inoltre, sono tipicamente Open Source, garantendo quindi la manipolazione della sorgente, allo scopo di migliorare la stampa o di aggiungere nuove tipologie di riempimento.

Dal momento che si stanno scoprendo solo ora le potenzialità della Additive Manufacturing all'interno della produzione industriale, le possibilità di ottenere dati o strumenti progettuali legati a essa è molto scarsa, obbligando così il progettista a fare scelte basate su ipotesi che non trovano ancora conferma sperimentale. Il fatto è aggravato ulteriormente dai numerosi parametri che governano la stampa 3D. Focalizzandosi solamente sull'ambito tecnologico, non è infatti immediato stabilire a priori la temperatura del filamento o la velocità di deposizione o addirittura la loro correlazione.

Lo scopo di questo lavoro di tesi è di fornire uno strumento, insieme a una serie di dati, che aiutino il progettista nella scelta della configurazione di riempimento ideale per il pezzo che deve disegnare. La sua importanza è fondamentale nella fase del calcolo strutturale, dal momento che diversi layout porteranno a uno stato di sforzo differente e quindi a caratteristiche resistenziali variabili.

Grazie all'aiuto dei software a elementi finiti, saranno testati diversi provini riempiti in maniera differente, si analizzerà lo sforzo generato e lo si metterà in correlazione con la rigidità globale. Questo parametro infatti è fondamentale per stabilire il campo applicativo di ciascuna struttura interna.

Una fase molto importante è costituita dal campionamento del riempimento tramite Matlab e la sua conversione in un file CAD. I software di Additive Manufacturing sono infatti progettati per ottimizzare la fase tecnologica, senza tenere conto di una possibile verifica numerica. Il primo problema è stato perciò scrivere un codice, in grado di estrarre la geometria e convertirla in un formato CAD, necessario sia per le prove numeriche, sia per fare modifiche progettuali morfologiche, ambito non analizzato in questo lavoro. Si farà perciò un commento preliminare su come lavora il codice e si commenteranno le criticità che le scelte di scrittura comportano. In questo modo è possibile fornire uno strumento che sia il più chiaro possibile all'utente, sia nelle

sue potenzialità, sia nei suoi limiti. Solo così è possibile dare al progettista tutto ciò che è necessario alla progettazione di un pezzo stampato 3D, scopo che si pone questo lavoro di tesi. Trattandosi comunque di un lavoro di tesi sono stati posti dei limiti agli ambiti studiati. In particolare ci si focalizza solo sull'ambito strutturale, tralasciando la fase di ottimizzazione tecnologica. Le strutture di riempimento perciò sono analizzate, senza tener conto dell'influenza dei parametri di processo. Inoltre non sono state svolte prove sperimentali, utili a confermare le ipotesi proposte durante il commento dei risultati, costituendo una lacuna sul lavoro svolto. La struttura della tesi è divisa in 3 grosse parti: il software di estrazione del CAD di riempimento, in cui si commenta il codice e si descrivono le sue potenzialità/limiti; la simulazione numerica, in particolare come è stata delineata e tutte le peculiarità e infine il commento dei risultati ottenuti.

Il modello di riempimento

Una problematica emersa durante il lavoro di tesi è la mancanza di uno strumento in grado di ricreare il CAD costituenti le strutture di riempimento in analisi. Ultimaker Cura infatti non dispone di un tool in grado di effettuare l'esportazione dal momento che si occupa principalmente del processo di stampa. Il file che produce a tale scopo è il G-Code ovvero il codice che costituisce le istruzioni che la macchina deve eseguire per riprodurre il pezzo in esame, rappresentate dal percorso dell'estrusore e dalla quantità di filamento che deve essere deposto, ma non contiene alcuna informazione riguardo alla geometria del componente nel suo complesso. La presenza comunque di una serie di segmenti che costituiscono il percorso dell'ugello, costituisce la base di partenza da cui estrarre la geometria che si vuole ottenere.

Sulla base di queste si è arrivato perciò a scrivere un codice in grado non solo di elaborare le informazioni di input della stampante 3D, ma di rielaborarle e utilizzarle per ricreare a tutti gli effetti il CAD della struttura di riempimento di analisi.

A ciò si associa la possibilità di effettuare la conversione nel minor tempo possibile. Il lavoro di tesi si basa infatti sullo studio della rigidità in funzione della densità di riempimento e sulla configurazione che esso assume all'interno del componente. Trattandosi quindi di un'analisi di sensibilità a tutti gli effetti, ovvero valutazione dell'output al variare dei parametri in input, il ruolo che il tempo gioca è fondamentale. Un codice affidabile, e soprattutto veloce permette di effettuare molti tentativi in breve tempo per raggiungere una rigidità adeguata allo scopo del componente minimizzando la massa in gioco. Il tempo non gioca quindi un ruolo secondario, ma costituisce una parte da tenere in considerazione in tutta la fase di progettazione del software adibito a tale scopo.

In questo capitolo si procede a descrivere in dettaglio tutte le caratteristiche che il codice possiede, a partire dalla filosofia di base e dai vincoli che sono stati imposti da Ultimaker Cura. È sulla base di questi che sono state fatte le principali scelte progettuali, soprattutto per quanto riguarda gli output finali, in particolare il formato di esportazione in .STL e la struttura che il codice andrà ad assumere. Successivamente sono analizzati in dettaglio tutti i passaggi che sono effettuati a partire dalla traduzione del G-Code, fino alle manipolazioni finali svolte sulla matrice che codifica i vertici dei triangoli di discretizzazione finali. A mano a mano sono anche esposti i limiti che il codice possiede. Non è possibile farlo all'inizio dal momento che non sarebbe possibile né capire da dove derivano né sarebbe agevole comprenderli, di conseguenza occorrerà leggere tutti i passaggi descritti.

La parte finale descrive tutte le possibili strutture di riempimento che è in grado di realizzare, a partire dalla loro geometria per finire alle particolarità che ciascuno di esse assume rispetto al caso generale mostrato tra poco. Si tratta perciò di un paragrafo di collegamento tra questa fase e il capitolo che costituisce la modellazione 3D agli elementi finiti con i relativi risultati. Spiegare in dettaglio la struttura geometrica di ciascun piano di base che va a comporre la struttura di

riempimento, è necessario per comprendere il comportamento che la rigidità assume in funzione delle configurazioni provate. La geometria, insieme alla densità è un parametro fondamentale, dal momento che incanala le forze presenti e le ripartisce impattando sulla struttura tensionale. Proprio questa rappresenta il culmine di tutto lo studio svolto in questo lavoro di tesi: senza di essa, in particolare senza una conoscenza approfondita del suo comportamento è impossibile ottenere un componente studiato e di cui si prevede ogni pregio e difetto.

Si procede quindi a descrivere il codice elaborato per questo progetto di tesi.

Il software altro non è che un codice Matlab in grado di leggere un testo G-Code, elaborare le sue informazioni e tradurle in un file .STL che rappresenta il CAD delle superfici costituenti il riempimento del componente da analizzare. La sua peculiarità è costituita quindi dalla capacità di esportare un file a partire dal G-Code ottenuto dai comuni software di Additive Manufacturing.

La sua realizzazione è stata necessaria per 2 motivi fondamentali:

1. I software che si occupano di stampa 3D non permettono di esportare in formato CAD il componente finale stampato, e qualora fosse possibile, il componente è composto da linee. Questa struttura è completamente inutile dal momento che richiederebbe una discretizzazione mediante elementi trave o solidi, il cui peso computazionale è enorme rispetto all'utilizzo di elementi Shell. È bene comunque accennare ad un tentativo di utilizzo di questa peculiare struttura di partenza per ottenere un software in grado di interpolare le linee con la superficie che costituisce il riempimento vero e proprio. Questa filosofia di base ha subito portato all'abbandono di questo tentativo dal momento che sono emerse subito difficoltà nel processo di interpolazione, in particolare per la mancanza di un piano unico in cui giacessero contemporaneamente senza errore.
2. La mancanza di una letteratura o di software a disposizione ha reso fondamentale questo passaggio ancora più del primo punto, perché senza uno strumento atto a svolgere questa mansione, tutta la trattazione fin qui non sarebbe stata possibile. La letteratura scientifica è stata comunque un aiuto fondamentale nella stesura del codice Matlab. Nonostante non sia stata in grado di fornire esattamente ciò di cui avevamo bisogno, è stato un validissimo strumento per la sua creazione. Senza di essa infatti anche l'algoritmo di intersezione sarebbe stato creato manualmente andando a impattare pesantemente sul tempo investito in questa parte. Matlab stessa ha fornito i codici, creati dalla community e completamente open source, per leggere e esportare i file in formato .STL.

La scelta di utilizzare Matlab non è stata casuale.

In primo luogo la sua filosofia basata sull'utilizzo delle matrici si adattava perfettamente alle scelte di creazione del software. Il formato .STL altro non è infatti che un file di testo in cui sono codificate le coordinate di tutti i punti del componente e gli accoppiamenti puntuali che vanno a costituire tutti i triangoli. Il CAD viene così realizzato come una struttura di triangoli mutuamente collegati. Questo modo di ragionare "Cartesiano" è immediato se si opera in un ambiente matriciale come Matlab, quale, a tale scopo mette a disposizione strumenti e operatori perfettamente ottimizzati.

In secondo luogo Matlab permettere di automatizzare in maniera efficace i codici creati su questa piattaforma. Nel paragrafo sopra si parlava appunto dell'importanza del tempo necessario per generare il risultato. Matlab mette a disposizione strumenti, sia in grado di ottimizzare nel modo più veloce l'elaborazione dei dati (tutti gli operatori ottimizzano la memoria usata e hanno velocità di risposta elevata), sia di evidenziare le criticità, attraverso timer che misurano i tempi intercorsi in ogni step. Infine il debugging evidenzia subito gli errori, la loro posizione, sia i riferimenti per trovare strategie risolutive.

La procedura che ha portato alla progettazione del software si basa su 3 cardini fondamentali:

1. Il formato G-Code come input
2. L' implementazione attraverso strumenti computazionali semplici, in particolare le basilari operazioni matriciali e l'esclusione di operatori differenziali, in virtù della loro poca utilità in un contesto relativamente semplice. Tutto questo permette di ridurre i tempi computazionali e un approccio molto più semplice nella gestione degli errori concettuali durante la scrittura del codice.
3. La riduzione al minimo indispensabile di interventi da parte dell'utente per ottenere il risultato finale, tradotto come inserimento di parametri veramente essenziali o poca possibilità di scelta delle opzioni. Tutto si riduce infatti a scegliere il componente da analizzare e al relativo posizionamento nell'interfaccia. Questo porta ad un programma semplice e intuitivo nel suo utilizzo, subito utilizzabile al pieno delle sue potenzialità e con poche funzioni, ma ben definite e perfettamente svolte.

Dal momento che il codice si avvale di un traduttore delle informazioni contenute nei G-Code ottenuti dai programmi 3D, la progettazione passa assolutamente attraverso una fase di studio della struttura di questo linguaggio, delle informazioni contenute e sul modo in cui possono essere lette da Matlab. Non è scontato infatti che le sappia leggere in maniera immediata e la scelta degli tipi di array in gioco è stata cruciale in questo passaggio.

Un paragrafo dedicato a questo linguaggio è quindi fondamentale nella descrizione del funzionamento del codice Matlab elaborato per il progetto di tesi, in particolare per evidenziare alcune ambiguità intrinseche del G-Code e il modo in cui sono state superate.

1.1 G-Code

Il formato di esportazione dei programmi di stampa 3D, come detto sopra, è G-Code. Di conseguenza questo punto costituisce il primo vincolo della stesura dello strumento, dal momento che è impossibile modificare la sorgente di partenza. Fortunatamente è anche una codifica molto semplice, permettendo così anche ai neofiti di comprendere tutte le istruzioni al suo interno e di eseguire manipolazioni senza eccessivi rischi. Il suo studio, la comprensione delle sue istruzioni e il modo in cui queste si concatenano andando a creare alla fine la stampa dell'intero componente, sono state il primo punto nella stesura di tutto il codice Matlab.

Tipicamente un file G-Code si presenta come un testo composto da caratteri alfanumerici, in cui la lettera rappresenta l'elemento da settare/modificare. Più precisamente, le lettere XYZ rappresentano le coordinate di un punto, ma altre possono corrispondere ad istruzioni più complesse come la modifica della velocità di estrusione o all'accensione della ventola di raffreddamento della macchina.

```
G0 Z20.001
G1 F1500 E-6.5
;LAYER_COUNT:199
;LAYER:0
M107|
M204 S625
M205 X10 Y10
G1 F600 Z2.2
;MESH:trave.STL
G0 F2571.4 X77.882 Y9.999 Z2.2
M204 S500
M205 X5 Y5
;TYPE:FILL
G1 F600 Z0.2
G1 F1500 E0
G1 F1200 X57.882 Y-9.999 E0.44689
M204 S625
```

FIGURA 1: PARTE DI UN CODICE G-CODE

Di conseguenza la prima e più importante caratteristica del linguaggio che emerge è che tutte le istruzioni iniziano con una lettera a cui segue un numero. Raramente si trovano eccezioni, e qualora si trovassero, non si tratta di istruzioni che la macchina deve elaborare. Un caso molto

utile è il contatore degli strati fatti: quando si inizia un nuovo layer, si troverà sempre la dicitura ;LAYER che indica appunto l'inizio di un nuovo strato di deposizione del filamento. Il conteggio degli strati inizia con il numero 0.

Il primo passaggio nello studio del G-Code è stata la raccolta e la catalogazione delle istruzioni e il riconoscimento di quelle che hanno un'utilità per la creazione del software:

1. G0, ovvero il movimento in rapido. Situato sempre all'inizio di ogni riga, questa dicitura indica un movimento dell'estrusore per raggiungere un determinato punto ad alta velocità e senza estrusione attiva. Dal momento che si tratta un movimento, nella stessa riga si trovano anche le coordinate del punto di arrivo. Il G-Code infatti indica sempre il punto di arrivo, mentre il punto di partenza è rappresentato dalla posizione dell'estrusore in quel momento.
2. G1 ovvero movimento lineare. Il nome evidenzia subito una peculiarità della stampa 3D, ovvero la possibilità di eseguire movimenti curvilinei. Le stampanti infatti sono macchine a controllo numerico, nate per garantire la possibilità di movimentare più assi contemporaneamente, cosa che non era possibile prima della sua introduzione, dal momento che era l'uomo a effettuare la gestione. Questa nuova abilità permette appunto di eseguire movimenti sempre più complessi con l'aumento degli assi movimentabili nello stesso momento. L'istruzione è normalmente data insieme all'estrusione: il movimento è quindi cruciale perché con esso ha luogo la deposizione del filamento. La specifica del punto finale è ovviamente fondamentale.

Le due istruzioni finora si accompagnano sempre dalle coordinate del punto finale e qualche volta dalla velocità di movimentazione, introdotta con la lettera F seguita dal valore desiderato. La velocità e le rispettive lettere, tuttavia sono un parametro che non ha alcuna utilità nella nostra trattazione: i parametri di macchina, appartenendo all'ambito dell'ottimizzazione tecnologica, sono stati trascurati in tutto il lavoro di tesi.

3. XYZ, seguiti da numeri rappresentano le coordinate dei punti. È una numerazione usata insieme alle istruzioni di movimento sopra elencate, dal momento che codificano il punto finale che deve essere raggiunto. Per inciso il sistema di riferimento tipico utilizzato in Ultimaker Cura (da cui si è estratto il G-Code) è costituito dall'origine, posizionato sul piano su cui poggia il primo strato, z uscente verso l'alto e la coppia XY giacenti sullo stesso. Spesso si trovano a coppie, soprattutto X e Y, dal momento che codificano i movimenti paralleli al piano di estrusione. Non c'è comunque ambiguità perché, qualora mancasse una coordinata, l'estrusore mantiene il valore che possiede in quell'istante. Spesso la coordinata Z rimane costante e cambia solo quando uno strato viene finito.

4. E, che descrive l'estrusione. Situato in fondo a una riga di istruzioni, in presenza della lettera E si ha la deposizione del filamento e di conseguenza l'azione di stampa vera e propria. La peculiarità sta nel numero che lo segue: non si tratta della quantità di materiale deposto in quell'istante, ma della quantità estrusa fino a quel momento. Bisogna tenere in considerazione un'ambiguità di questa istruzione: E infatti non indica solo la deposizione durante il movimento dell'estrusore, bensì anche la fuoriuscita voluta di una piccola quantità di materiale a ugello fermo, per assestare il filamento. Si tratta di una procedura preliminare che viene eseguita spesso in fase iniziale e come tale deve riconosciuta dal software per evitare ambiguità. La lettera E infatti rappresenta l'istruzione più importante, perché permette di riconoscere le linee tracciate nel primo strato, le quali a loro volta identificano il pattern di riempimento in analisi. Il cuore di tutta la procedura, infatti risiede nel riconoscere il pattern di base e associarlo alla rispettiva configurazione di riempimento. La fase di assestamento si riconosce perché l'ugello è fermo. Nel linguaggio G-Code questa informazione si traduce nella mancanza delle lettere che codificano le coordinate (X Y Z).

Una lettera molto presente all'interno degli output di Ultimaker Cura è la lettera M. Questa codifica tutte le istruzioni non direttamente collegate al processo di stampa 3D, bensì cataloga tutte le operazioni ausiliarie, ad esempio la regolazione di organi di raffreddamento, o l'attivazione di ugelli supplementari. Data la variegata possibilità di opzioni, il numero successivo è essenziale per capire quale operazione la macchina deve svolgere. Tuttavia, la sua utilità è praticamente nulla, perché non influenza in nessun modo il CAD che deve essere generato.

A differenza della lettera M esistono una serie di stringhe di testo alfanumeriche che non hanno alcuna utilità al fine della stampa, ma contengono informazioni utili, sia per chi supervisiona la stampante, sia per il codice Matlab. Si tratta di righe di testo la cui struttura è completamente diversa da quelle viste finora, basti pensare al fatto che iniziano tutte con il carattere ";" e il cui significato è immediatamente capibile anche solo leggendo il file G-Code.

1. ;LAYER=. Rappresenta un'indicazione dello strato in corso di stampa. La sua utilità risiede appunto nel numero che segue. Matlab infatti lo riconosce ed è così in grado di associare a ciascuna linea estrusa il corrispettivo layer di appartenenza.
2. ;TYPE=. La comparsa di questa riga di testo indica un cambio della parte del componente in corso di stampa. Si parla tipicamente di SKIN quanto si stampa il primo e l'ultimo strato, OUTER E INNER WALL per le superfici che costituiscono l'involucro laterale e di FILL quando la parte coinvolta è il riempimento.
3. FILL. L'informazione fondamentale per riconoscere il pattern di riempimento è proprio questa. In presenza di questa codifica e insieme alle precedenti, si può associare a ciascuna linea il layer di appartenenza e se costituisce o no il riempimento. Tutte le altre

linee sono completamente trascurate, dal momento che grazie al CAD del componente di interesse si ottengono facilmente le altre superfici.

Una volta compreso il significato di ciascun elemento che compone un file in formato G-Code, è possibile elaborare un traduttore automatico in grado di leggere tutto il testo e convertirlo nel linguaggio tipico di Matlab, ovvero le matrici.

1.2 Traduttore del G-code

La creazione di un traduttore non ha come unico fine la comprensione di tutte le informazioni interne al file da analizzare, ma di riconoscere quali hanno utilità per i propri scopi e infine di elaborarle in un linguaggio allo stesso tempo semplice e di veloce accesso. La stampa di un componente infatti, richiede innumerevoli informazioni, a cui segue di conseguenza un file imponente. Nel caso del parallelepipedo in esame nel lavoro di tesi, le righe di istruzioni superano le 100000 unità, portando così alla luce l'importanza di saper tradurre solo le informazioni strettamente necessarie. Inoltre, tutto ciò che ha una rilevanza per la creazione del CAD finale deve essere codificato in maniera efficace, senza possibilità di ambiguità e mantenendo elevata la velocità di comprensione. Fortunatamente Matlab viene in aiuto con la sua struttura matriciale, che subito impone la strada da intraprendere. Una volta comprese tutte le problematiche in gioco e la struttura di base che l'algoritmo possiede, emerge subito la composizione dell'output che si vuole ottenere, ovvero una matrice e 2 vettori. La prima contiene le coordinate di ciascun punto occupato dall'estrusore durante tutta la fase di stampa, a cui si affianca la quantità estrusa fino a quell'istante. Il primo vettore invece stabilisce quali punti compongono la struttura del riempimento e quali no. Più precisamente, si tratta di una colonna di valori Booleani, ovvero una successione di 1 e 0. L'uso della logica è fondamentale, dal momento che è di comprensione immediata e permette allo stesso modo di fare confronti, al punto da essere usato in molteplici fasi, sia nella traduzione, sia nella creazione a tutti gli effetti del CAD. infine è presente vettore colonna dove è indicato lo strato di appartenenza di ciascun punto presente nella matrice. Si deduce immediatamente che il numero di righe di questi tre elementi è uguale.

Una problematica che deve essere accennata prima di descrivere in dettaglio la procedura, è l'incapacità di Matlab di leggere alcuni caratteri presenti in fondo al G-Code, per la precisione dopo la riga ";End of Gcode": la soluzione consiste nel cancellare tutto quello che compare dopo questa dicitura.

```

;START_OF_HEADER
;HEADER_VERSION:0.1
;FLAVOR:Griffin
;GENERATOR.NAME:Cura_SteamEngine
;GENERATOR.VERSION:4.8.0
;GENERATOR.BUILD_DATE:2020-11-10
;TARGET_MACHINE.NAME:Ultimaker S5
;EXTRUDER_TRAIN.0.INITIAL_TEMPERATURE:200
;EXTRUDER_TRAIN.0.MATERIAL.VOLUME_USED:6703
;EXTRUDER_TRAIN.0.MATERIAL.GUID:506c9f0d-e3aa-4bd4-b2d2-23e2425b1aa9
;EXTRUDER_TRAIN.0.NOZZLE.DIAMETER:0.4
;EXTRUDER_TRAIN.0.NOZZLE.NAME:AA 0.4
;BUILD_PLATE.TYPE:glass
;BUILD_PLATE.INITIAL_TEMPERATURE:60
;BUILD_VOLUME.TEMPERATURE:28
;PRINT.TIME:2690
;PRINT.GROUPS:1
;PRINT.SIZE.MIN.X:-79.999
;PRINT.SIZE.MIN.Y:-9.999
;PRINT.SIZE.MIN.Z:0.2
;PRINT.SIZE.MAX.X:79.999
;PRINT.SIZE.MAX.Y:9.999
;PRINT.SIZE.MAX.Z:20
;END_OF_HEADER
;Generated with Cura_SteamEngine 4.8.0
T0
M82 ;absolute extrusion mode

```

FIGURA 2: STRINGHE INIZIALI NON SUPPORTATE DA MATLAB

```

;End of Gcode
;SETTING_3 {"extruder_quality": [{"general}\\nversion = 4\\nname = Fine #2\\nndef
;SETTING_3 inition = ultimaker_s5\\n\\n[metadata]\\nsetting_version = 16\\nposit
;SETTING_3 ion = 0\\nquality_type = normal\\ntype = quality_changes\\n\\n[values
;SETTING_3 ]\\nbottom_layers = 0\\ninfill_line_distance = 8\\ninfill_pattern = g
;SETTING_3 rid\\ntop_layers = 0\\nwall_line_count = 0\\nzig_zaggify_infill = Fal
;SETTING_3 se\\n\\n", "[general]\\nversion = 4\\nname = Fine #2\\ndefinition = u
;SETTING_3 ltimaker_s5\\n\\n[metadata]\\nsetting_version = 16\\nposition = 1\\nq
;SETTING_3 uality_type = normal\\ntype = quality_changes\\n\\n[values]\\n\\n"},
;SETTING_3 "global_quality": "[general]\\nversion = 4\\nname = Fine #2\\ndefinit
;SETTING_3 ion = ultimaker_s5\\n\\n[metadata]\\nsetting_version = 16\\nquality_t
;SETTING_3 ype = normal\\ntype = quality_changes\\n\\n[values]\\nadhesion_type =
;SETTING_3 none\\n\\n"}

```

FIGURA 3: STRINGHE FINALI NON SUPPORTATE DA MATLAB

Un ulteriore aspetto da tenere in considerazione, è il formato di lettura del G-Code durante l'importazione in Matlab, dal momento che una determinata opzione implica l'esclusione di alcuni operatori. Si è scelto quindi di codificare il formato all'interno di un Cell Array. Tuttavia durante la lettura, la rispettiva riga in analisi è convertita in formato STRING così da poter essere trattata come una normale successione di caratteri alfanumerici.

Fatte tutte le dovute premesse, si può procedere a descrivere i dettagli salienti della procedura che compone la traduzione del file. Si è già accennato sopra che l'analisi è fatta riga per riga, di conseguenza a ogni ciclo verrà estratta in sequenza dal Cell Array e letta.

1. In presenza della dicitura “;LAYER:” viene aggiornato il numero dello strato in corso di analisi.
2. “;TYPE:FILL” riconosce che le linee successive compongono la struttura di riempimento. Di conseguenza ad ogni linea verrà assegnato il Booleano 1 nel rispettivo vettore. Il booleano assegnato torna 0 quando cambia la parte in corso di stampa, e rimane tale finché la riga non coincide di nuovo a “;TYPE:SKIN”.
3. Se la prima lettera della riga è G, siamo in presenza di una movimentazione dell’ugello, a prescindere dall’estrusione. Deve essere perciò inserito il punto finale che andrà ad occupare. Le coordinate si ricavano continuando a leggere la riga e si inseriscono nella matrice. Come detto nel paragrafo precedente, capita spesso che la coordinata Z non sia inserita, di conseguenza basta andare a cercare nella matrice il suo valore nelle righe precedenti. L’altezza dello strato in corso di lavorazione infatti, a meno di casi particolari non cambia fino alla fine del suo completamento. Se compare in fondo alla riga il conto cumulato della quantità estrusa, ovvero la lettera E, si aggiungerà il suo valore nell’ultima riga della matrice.
4. Se la riga inizia con la lettera M viene semplicemente saltata.

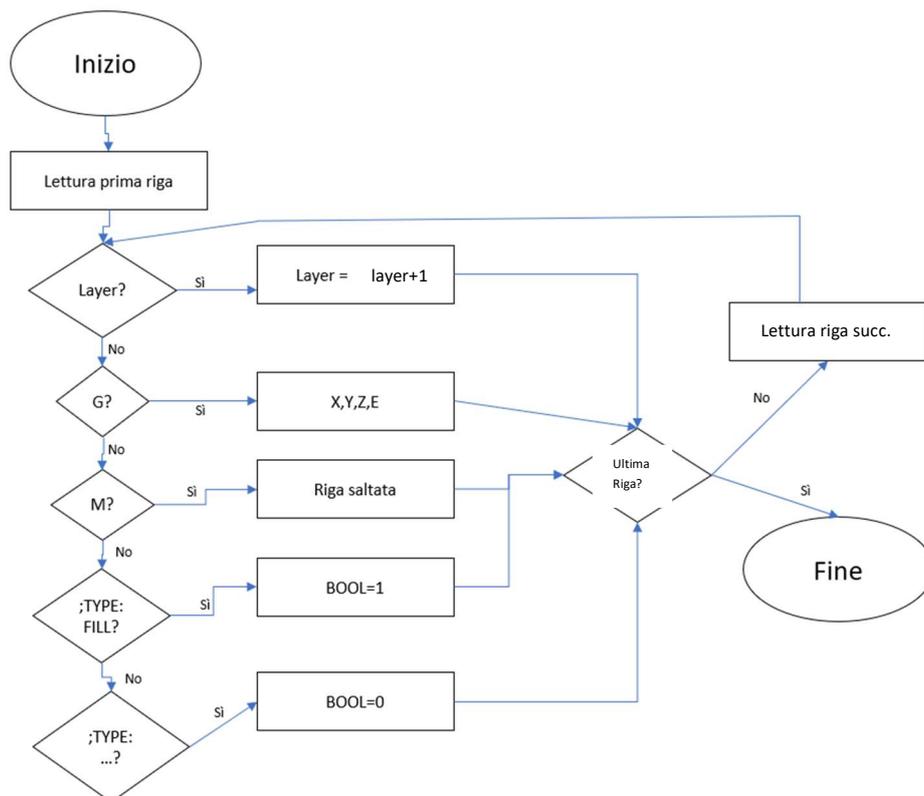


FIGURA 4: FLOW CHART DEL TRADUTTORE

Questa procedura si ripeterà fino alla fine del file G-Code. Sulla base di questa emergono alcune osservazioni:

1. Anche se non strettamente necessario, come si vedrà successivamente, il file G-Code è letto tutto (a meno delle righe che iniziano con M). Ciò tuttavia ha un peso molto modesto sull'onere computazionale e ha permesso anche di effettuare tentativi di ricostruire completamente la struttura e non solo la parte del riempimento, così da avere un unico file CAD e ed evitare di inserire la giunzione involucro esterno - riempimento nel modello ad elementi finiti. Non è stato possibile ottenere questa soluzione a causa della difficoltà di ricavare un algoritmo in grado di ricostruire tutto l'involucro esterno del componente.
2. La matrice contiene tutte i punti percorsi dall'ugello, a prescindere dalla fase di estrusione e dalla parte del componente in corso di stampa. L'importanza del vettore Booleano è lampante per riconoscere quali punti vanno tenuti in considerazione.
3. La matrice di output contiene punti, non linee. Sarà compito dell'elaboratore di stabilire l'accoppiamento.
4. Osservando la colonna dedicata alla quantità estrusa, i valori sono cumulativi, tuttavia sono spesso alternati a degli zeri. Questi perché nelle fasi di non deposizione del filamento la lettera E non compare nella rispettiva riga e si è scelto di non inserire il valore precedente, per una questione di comodità.

La traduzione, una volta arrivata al termine della lettura dell'ultima riga metterà a disposizione perciò una matrice di coordinate di punti, unita alla quantità estrusa cumulata in ciascun istante, il vettore Booleano che identifica gli elementi necessari a ricostruire il riempimento del componente e l'elenco del layer di appartenenza di ciascun punto. Spetta ora all'elaboratore di interpretare questi elementi e utilizzarli al fine di creare il CAD finale del riempimento.

1.3 Elaboratore

Una volta in possesso dei tre elementi ottenuti dalla traduzione del G-Code, è importante essere in grado di elaborare i dati contenuti e utilizzarli per creare il CAD finale. Queste sono le due caratteristiche richieste all'elaboratore, lo strumento cardine di tutto il software Matlab scritto ai fini di tutto il progetto qui trattato. La sua struttura è divisa in due parti: la prima si occupa di catalogare le informazioni ora disponibili nel linguaggio Matlab, per ricreare la struttura di riempimento voluta. La seconda invece, attraverso il CAD del componente in analisi esegue il taglio Booleano delle superfici, la loro triangolazione per ottenere il formato .STL e infine un processo di unione dei vertici non coincidenti ma situati vicini tra loro secondo una tolleranza definita dall'utente. Emerge subito un fatto importante: il codice non è in grado di riconoscere automaticamente il riempimento. È infatti compito dell'utente specificare la tipologia

desiderata, mentre il software riconosce il pattern di base, variabile in funzione della densità di riempimento, e lo implementa creando le rispettive superfici che lo costituiscono. Si tratta di una pesante limitazione sul processo di automatizzazione, ma dal momento che sarebbe stato molto impattante in termini di tempo sulla progettazione del codice, si è deciso di usare un selettore per permettere all'utente di specificare il FILL. Un altro aspetto da tenere in considerazione sono i riempimenti possibili con questo software: sono disponibili infatti tutti quelli basati su superfici piane di qualsiasi tipo, a discapito di tutti quelli che usano strutture più elaborate. Le due limitazioni qui trattate, possono essere un punto di partenza per altri lavori di tesi: può essere infatti interessante valutare il comportamento di componenti stampati in Additive Manufacturing con strutture più complesse delle semplici superfici piane. Per fare ciò occorre, tuttavia, perfezionare il codice Matlab finora disponibile.

Il ruolo dell'utente, come detto sopra, si afferma nell'elaboratore attraverso le sue scelte che impongono le caratteristiche volute all'output finale. Resta sua la decisione della tipologia di riempimento da ottenere, in funzione ovviamente del G-Code che viene introdotto. Il software ovviamente non è in grado di generare un particolare riempimento a partire da dati estranei alle sue caratteristiche e non ha alcuna utilità in questa trattazione. L'utente può influenzare inoltre una serie di parametri che possono velocizzare o meno l'elaborazione dei dati. Si tratta infatti del numero di superfici di interpolazione dell'altezza di superficie e della tolleranza di unione dei punti non perfettamente coincidenti. Questi 3 parametri, spiegati in maniera approfondita nel paragrafo successivo, si richiamano all'idea di base su cui poggia tutto il codice Matlab. Il processo di stampa 3D si basa sulla deposizione di un filamento lungo un percorso ben preciso, fatto di segmenti rettilinei, fino a comporre una serie definita di strati che andranno a comporre il componente desiderato. Tenendo in considerazione la parte di riempimento, si può interpolare con una serie di superfici piane le linee costitutive, ottenendo la stessa struttura di base ma con dei piani. Il cuore dell'elaboratore consiste nel determinare i piani interpolatori, utilizzando il minor numero possibile di linee giacenti. Su questa caratteristica utilizza i segmenti dei primi layer per riconoscere il pattern di base, estrude a partire da queste le superfici interpolatrici e le ripete in modo da avere tutta la struttura di riempimento. I parametri scelti dall'utente influenzano la quantità di ripetizioni e la loro forma, e, di conseguenza, l'impatto che esso hanno sull'onere computazionale, senza però sbagliare la geometria del riempimento omettendo alcune superfici. Emerge alla luce quindi l'importanza dell'utente in queste scelte, insieme all'esperienza che deve avere per padroneggiare fino in fondo il programma. Si tratta comunque di un grado di abilità minimo che si ottiene dopo qualche utilizzo. Ai fini di comprendere fino in fondo sia il funzionamento, sia l'utilizzo di questo modellatore 3D è introdotto un piccolo paragrafo sui selettori e sui parametri modificabili dall'utente, prima di spiegare in dettaglio l'elaboratore, in virtù anche del fatto che i valori sono la prima cosa che deve essere introdotta quando avviato.

1.4 Selettori e parametri

Non essendo in grado di riconoscere la tipologia di riempimento da produrre, è stata introdotto un selettore per lasciare all'utente la scelta. Si tratta di un menù che si apre alla fine del ciclo di traduzione del G-Code con l'elenco degli Infill Pattern disponibili. L'utente ovviamente ha a disposizione una sola scelta.

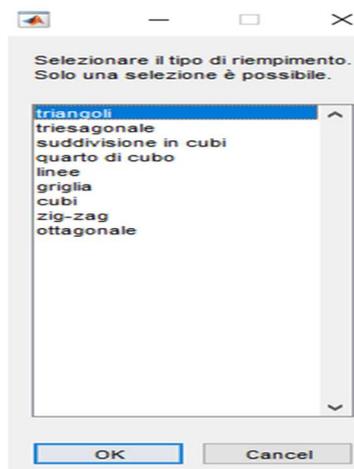


FIGURA 5:SELETTORE DEL RIEMPIMENTO

Dal momento che deve essere effettuato un taglio Booleano per adattare le superfici di interpolazione, il CAD del componente deve essere inserito in Matlab ed elaborato in modo corretto. La scelta progettuale qui fatta è l'utilizzo del formato .STL per il CAD, dal momento che è facilmente assimilabile a una matrice di punti e una di assemblaggio dei triangoli che costituiscono l'involucro esterno. Si è scelto inoltre di fare affidamento agli Add On di Matlab per ottenere un codice in grado di elaborare e tradurre in maniera efficace il formato .STL. Si trattano di codici Open Source che la Community carica sul portale come ausilio alle più svariate attività. Nel nostro caso infatti utilizzeremo un import e un export di STL. Sarà inoltre utilizzato un fondamentale algoritmo di intersezione tra triangoli nello spazio che costituirà il cardine del Taglio Booleano.

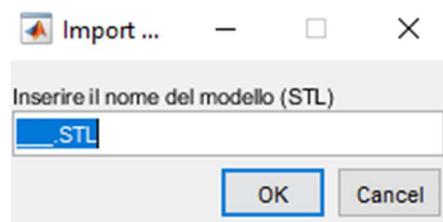


FIGURA 6: SELETTORE DEL CAD DA RIEMPIRE

La conseguenza è che, dopo aver scelto la tipologia di riempimento, si aprirà una seconda finestra, dove è chiesto di scegliere il file CAD da introdurre in Matlab. L'utente dovrà scrivere il nome del file, concludendo con la dicitura ".STL". È bene tenere a mente che deve trovarsi nella cartella di lavoro di Matlab altrimenti non sarà in grado di riconoscerlo.

L'elaborazione del CAD del componente non è tuttavia conclusa dal momento che deve essere posizionato nello spazio di lavoro. La crucialità dei sistemi di riferimento si evidenzia proprio in questo momento, dal momento che ne entrano 2 in competizione: quello del CAD, che deriva dalle scelte fatte dalla modellazione del componente nei rispettivi ambienti e quindi non appartengono al modellatore in esame, e il riferimento di Ultimaker Cura o in generale della stampa 3D. Il riferimento in questo caso ha origine sul piano dove è deposto il filamento del primo strato, gli assi X e Y giacenti sullo stesso e Z normale, parallelo quindi all'altezza di ciascuno strato. Dato che il primo risulta completamente estraneo alle nostre scelte progettuali e perciò completamente imprevedibile, il riferimento utilizzato nell'ambiente di lavoro del nostro modellatore coincide con quello di Ultimaker Cura. Sarà quindi compito dell'utente a questo punto far sì che l'oggetto sia posizionato esattamente come lo era quando è stato generato il G-Code.

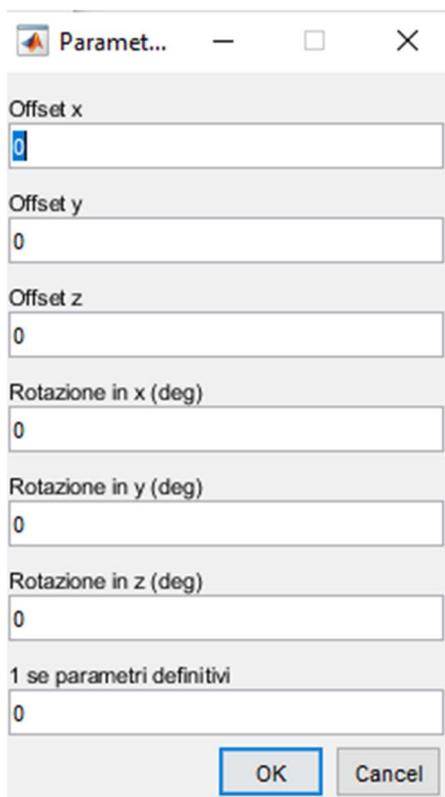


FIGURA 7:PARAMETRI DI POSIZIONAMENTO SPAZIALE

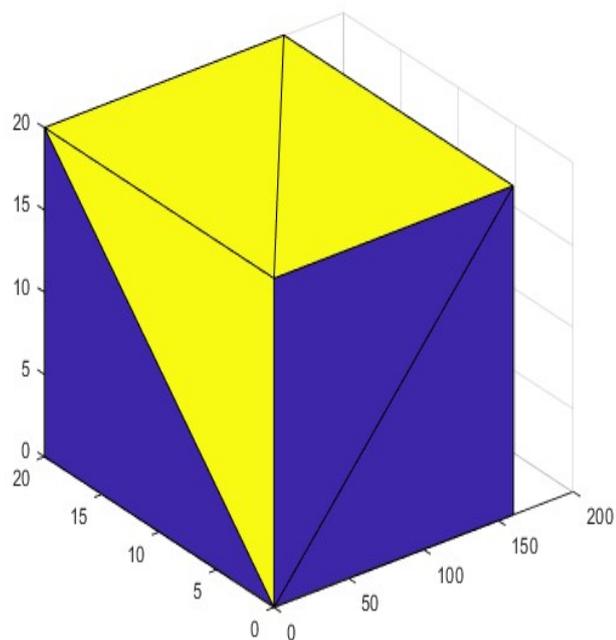


FIGURA 8: INTERFACCIA GRAFICA DI POSIZIONAMENTO

Per fare ciò si aprono due finestre: la prima è una figura che mostra il componente, introdotto in Matlab insieme al sistema di riferimento dello spazio di lavoro, la seconda mostra tutti i parametri geometrici necessari per ruotare o traslare rigidamente in tutte le direzioni spaziali, per un totale di 6 parametri. La settima voce richiede l'introduzione del Booleano 1, se i parametri introdotti sono definitivi, altrimenti, inserendo uno 0, le due finestre sono ricaricate. È bene notare che qualunque parametro introdotto e confermato con 0, rimane inserito alla riapertura delle finestre, di modo che si può vedere non solo numericamente, ma anche graficamente il suo effetto, facilitando così il posizionamento. Il principio di funzionamento dei parametri di traslazione (detti di "Offset") e di rotazione è immediato. Dal momento che il file STL importato è costituito da una matrice di coordinate di punti, l'offset di X (mm) si sommerà alla colonna dei valori X e così per gli altri. Nel caso della rotazione invece l'angolo (rigorosamente in gradi e positivo in senso antiorario rispetto a ciascun asse secondo la regola della mano destra), è necessario per calcolare la rispettiva matrice di rotazione, la quale andrà moltiplicata matricialmente con quella delle coordinate, per ottenere il pezzo nella configurazione ruotata. La capacità di essere trattato come una matrice tipica del formato STL, conferma soprattutto in questo passaggio la nostra decisione di utilizzarlo come formato cardine del software. Qualora si conoscessero già i parametri di offset e rotazione è bene inserirli nella finestra e confermarli almeno una volta con il Booleano 0, per avere la certezza che siano introdotti correttamente.

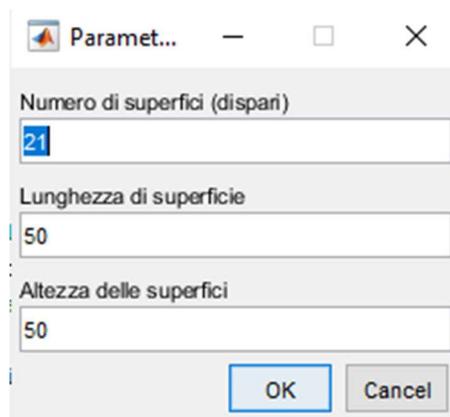


FIGURA 9: PARAMETRI DI SUPERFICIE

L'ultima finestra che si apre permette di scegliere le caratteristiche geometriche delle superfici di interpolazione, ovvero i piani che sono estrusi a partire dal pattern di base. La geometria vera e propria è gestita in particolare da:

1. Altezza di superficie (mm) ovvero l'altezza del piano misurata parallela all'asse Z.
2. Lunghezza di superficie (mm). Si tratta di un parametro che allunga in entrambe le direzioni le linee che costituiscono il pattern di base.

3. Numero di superfici interpolanti. La peculiarità di questo parametro è che il suo valore deve essere necessariamente dispari, per le scelte progettuali fatte, per scrivere il codice Matlab. Prendendo il caso del riempimento “Suddivisione in Cubi” dove il pattern di base è una linea parallela all’ascissa e altre inclinate in modo tale da formare un triangolo equilatero con la prima, il pattern di base è completamente riconosciuto, quando per ciascuna si conosce la distanza dalla stessa in un pattern immediatamente adiacente. Le superfici successive sono generate sempre a coppie lontane dalla prima superficie di un valore multiplo della distanza minima. Di conseguenza il numero di piani in gioco è sempre dispari.

Poiché sulla base in cui si compila questa finestra si determina la buona riuscita o meno della creazione del riempimento, è bene analizzare alcune considerazioni che possono rivelarsi di fondamentale aiuto nella compilazione dei parametri proposti:

1. Data la presenza del taglio Booleano nel processo di creazione del CAD le superfici di interpolazione devono “tagliare” completamente il componente, vale a dire che tutte le estremità non devono giacere all’interno dell’involucro costituito dal pezzo in analisi.
2. Il riconoscimento del pattern di base è possibile in qualsiasi zona del componente. Non è infatti possibile né prevedibile né controllare la posizione, dal momento che il processo di stampa è completamente automatizzato da Ultimaker Cura.

Il primo punto ha la conseguenza immediata di usare superfici con la geometria più grande possibile. Ciò è vero solo parzialmente, visto che l’impatto sull’onere computazione aumenta significativamente utilizzando geometrie di ordini di grandezza molto superiori al componente. È bene perciò mantenere un ordine di grandezza il più simile possibile al pezzo in analisi, al massimo di un ordine in più, ma oltre sarebbe un costo inutile. È fondamentale che la superficie interpolante intersechi completamente il componente, pena il blocco del codice e la ripetizione dell’inserimento dei parametri.

La seconda osservazione rappresenta un ulteriore limite del codice: non si può controllare in alcun modo la posizione in cui si trova il primo pattern riconosciuto. Questo porta subito a dover utilizzare un numero superiore di superfici interpolanti di quello presente effettivamente nel componente. Anche con questa voce è bene non esagerare tuttavia. L’aumento eccessivo delle superfici porta a esasperare i costi computazionali (si tratta della voce più onerosa), dal momento che non solo si tratta di generare superfici, ma di doverle successivamente intersecare tra loro. L’intersezione reciproca è infatti indispensabile per far sì che tutte si riconoscano tra loro e possano essere discretizzate senza compenetrazioni.

È importante mantenere un numero di piani sufficienti, dal momento che un numero troppo scarso sarebbe responsabile di un riempimento incompleto, con tutti gli errori che ne derivano di conseguenza.

La chiusura dell'ultima finestra porta all'avvio completo dell'elaboratore, in particolare ha inizio la procedura che porta al campionamento del pattern di base, all'estrusione delle superfici di interpolazione, alla loro intersezione reciproca e infine al taglio Booleano.

1.5 Creazione e manipolazione delle superfici di interpolazione

La procedura che porta al riconoscimento del pattern di base si differenzia tra le diverse tipologie di riempimento, dal momento che ciascuno di essi ha diverse caratteristiche, sia geometriche, sia sul metodo di identificazione. Tuttavia, è possibile riconoscere un modo di procedere comune che verranno esposto in prima battuta. Successivamente saranno descritte le particolarità di ciascuna struttura, così da garantire una conoscenza globale del codice. Vale la pena di fare un'analisi dettagliata, nella speranza di poter migliorare il software e in futuro di aggiungere strutture non ancora disponibili con questa versione. Come si è accennato sopra infatti, non è stato possibile introdurre superfici più complesse rispetto ai classici piani, ponendo così un limite molto forte alla varietà di configurazioni analizzabili. È comunque bene ricordare che questo lavoro di tesi ha lo scopo di fornire una metodologia preliminare di analisi della rigidità delle strutture stampate, aiutandosi con semplici esempi. L'utilizzo di strutture più elaborate esula dai nostri obiettivi, anzi potrebbe rappresentare una complicazione eccessiva dell'analisi. Chiariti alcuni punti preliminari, si può ora procedere alla spiegazione di come il software arriva a estrudere le superfici di interpolazione.

Prima di tutto occorre ricordare che il traduttore, alla fine del suo ciclo di elaborazione, aveva fornito una matrice dove erano contenute le coordinate di tutte le posizioni occupate dall'estrusore, un vettore che accoppiava ogni coordinata allo strato di appartenenza e un vettore composto da Booleani, il quale specifica quali punti sono fondamentali per ricostruire il riempimento. Fino a questo punto perciò tutta l'analisi si è costruita solo su punti, ma, per ottenere le superfici, occorre un'interpretazione per linee. Solo da queste, infatti, è possibile ottenere l'estrusione di una superficie. Banalmente ciò si dimostra facendo il conto delle dimensioni di ciascuna entità, un elemento tridimensionale come un piano, si ricava aggiungendone una alla linea, ovvero un ente bidimensionale. Per ottenere un codice che ragiona per linee è necessario che l'input che riceva sia quindi una coppia di punti: sulla base del percorso dell'estrusore perciò, ad ogni ciclo si parte da un punto a cui si associa anche il suo precedente, ottenendo così un segmento. L'automazione è quindi immediata: il ciclo FOR partirà dal numero 2, così da permettere di avere una coppia anche nel primo passaggio e si concluderà una volta letta l'ultima riga della matrice di coordinate.

La prima domanda che ci si pone per il riconoscere il pattern di base è quante righe sono necessarie per farlo. Per ottenere questo risultato è necessario avere 2 segmenti adiacenti tra

loro, in modo da poter ricavare la distanza minima e utilizzarla per eseguire la ripetizione. Il problema nasce dal fatto che non è l'utente a gestire il percorso di estrusione, perché è affidata a Ultimaker Cura. Sono infatti i software di stampa 3D ad automatizzare i movimenti dell'ugello. Di conseguenza la condizione in cui le due linee si trovano alla distanza minima è completamente fuori dal nostro controllo, dal momento che l'ordine delle righe della matrice di coordinate rispetta la sequenzialità del moto dell'estrusore. Per avere la sicurezza assoluta di riuscire a calcolare la distanza minima, quindi, basterà analizzare tutte le linee di tutto uno strato, che per una questione di semplicità coincide col primo. La seconda questione è: basta solo il primo strato? Dal momento che si deve anche captare l'inclinazione di ciascuna superficie rispetto al piano XY teoricamente ne servirebbero almeno 2. Per ovviare a questo problema, si è fatto uno studio delle strutture disponibili su Ultimaker Cura. Sono state fatti diversi test di riempimento su vari componenti con diverse configurazioni, ed è emerso che i parametri caratterizzanti le superfici di Infill sono sempre costanti. È bastato quindi ottenerle attraverso considerazioni puramente geometriche fatte su questi CAD, per ricavare tutto il necessario per caratterizzarle. Il secondo strato non è quindi necessario per ricavare l'inclinazione. Resta comunque un passaggio forzato in alcuni tipi di strutture come nel caso di "Linee", ma si rimanda la spiegazione al paragrafo dedicato.

Per evitare che il codice continui ad analizzare la matrice di coordinate basta semplicemente imporre una condizione sul vettore dei layer: un IF blocca il ciclo quando lo strato in analisi corrisponde al numero 2. Si ricorda a questo proposito che la numerazione parte dal numero 0 e non dal numero 1 come ci si potrebbe aspettare.

Il vettore Booleano riduce ulteriormente il numero di linee in analisi. Si ricorda infatti che è responsabile dell'identificazione di quei segmenti che corrispondono alla creazione della struttura di riempimento. l'analisi si riduce quindi non solo ad analizzare le linee del primo strato, bensì a un suo sottoinsieme a cui corrisponde il Booleano 1. A ciò si aggiunge anche il fatto che non tutti i movimenti corrispondono a estrusioni vere e proprie. Spesso, infatti, l'estrusore viene movimentato in rapido, per raggiungere posizioni molto lontane tra loro, oppure per tornare all'origine, per rieseguire un assestamento qualsiasi. Si deve quindi essere in grado di sapere discernere le due grandi categorie di movimentazione e questo compito spetta all'ultima colonna della matrice di coordinate, ovvero quella della quantità estrusa. Si ricorda che si tratta di un vettore, le cui righe sono caratterizzate dall'alternarsi di valori, dove è codificata la quantità cumulata di materiale fuoriuscito a degli zeri. In maniera molto comoda, un IF permette subito di saltare tutte le righe a cui corrisponde il valore nullo, equivalente di un movimento non necessario alla creazione della superficie. È bene ricordare che questa colonna non permette da sola di riconoscere quando l'estrusore emette materiale per deporlo o per altri scopi. Dal momento che per creare uno strato è essenziale che l'ugello si muova, mentre il filamento si attacca alla base, l'ultimo controllo necessario è verificare che il punto in esame non coincida

con il suo precedente. Ciò assolve all'ambiguità che risiede nel G-Code e che non era stata risolta durante la progettazione del traduttore.

I controllori IF presenti in sequenza perciò sono:

1. La linea in esame appartiene al primo layer?
2. È coinvolta nella creazione della struttura di riempimento?
3. Sta avvenendo la fuoriuscita del materiale?
4. Si tratta di un'estrusione con deposizione del filamento?

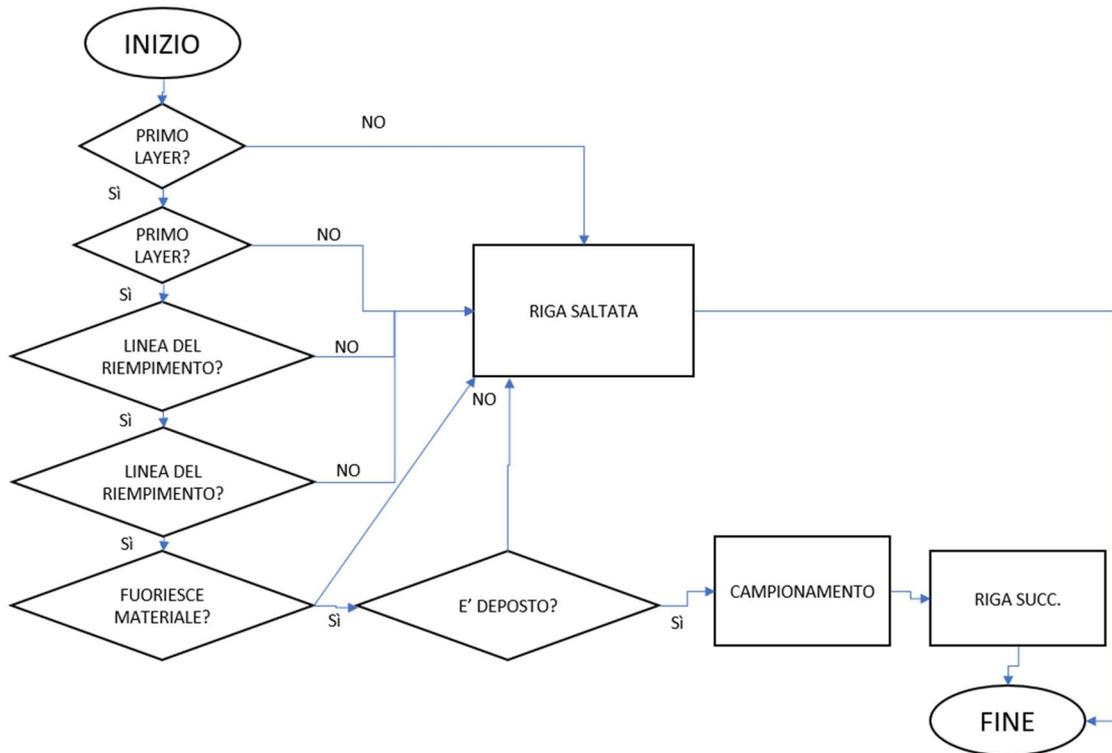


FIGURA 10: FLOW CHART DEI CICLI IF

Se ciascun IF ottiene una risposta positiva, la linea in esame può essere utilizzata per il riconoscimento del pattern di base.

Come si è detto sopra questa procedura si conclude solo una volta completata l'analisi di ogni elemento appartenente al primo strato (al secondo strato solo per casi molto particolari presi in esame successivamente), a garanzia del fatto che, in questo modo si otterrà sicuramente la desiderata distanza minima tra due superfici e procedere così alla creazione delle superfici. Qualora ciò non accadesse, il codice si blocca ed è caldamente consigliato rivedere il G-Code usato come input. Ipotizzando che ciò non accada, si analizza ora come il pattern è riconosciuto.

Dopo aver passato i cicli di controllo sopra elencati, è calcolata la tangenza della linea in esame e sulla base del suo valore, si riconosce la superficie estrudibile da questa. Per comprendere meglio questo aspetto è bene tenere in considerazione 2 aspetti:

1. L'utente si trova a questo punto già ad aver scelto la tipologia di riempimento che vuole ottenere. Di conseguenza, dalle linee che hanno superato tutti gli IF di controllo, sicuramente si ottiene una superficie di interpolazione.
2. Ogni configurazione di riempimento avrà al suo interno già i parametri caratteristici sia delle linee, sia delle superfici di interpolazione, rispettivamente tangente e angoli di Eulero. I piani tuttavia non sono posizionati. Così l'analisi delle linee altro non è che la procedura che porta al posizionamento di questi.

Per agevolare la comprensione della trattazione si utilizzerà come esempio la configurazione "Suddivisione in Cubi", caratterizzata da piani perpendicolari a XY a loro volta suddivisi in tre tipologie, basate sull'angolo che sottendono a partire dall'asse X (positivo in senso antiorario), ovvero 0° (parallelo al piano XZ) 60° e 120°. Di conseguenza, la figura che delimitano con le loro intersezioni è un triangolo equilatero, con un lato parallelo a X. In generale per ciascuna configurazione sono inizializzate un numero di matrici pari ai casi presenti in ciascuno, atte a "ospitare" le superfici di interpolazione ottenute dalle linee in esame. Nell'esempio quindi saranno introdotte automaticamente 3 matrici, ognuna per il diverso angolo. Per semplicità l'angolo è sempre quello sotteso dall'intersezione di ciascun piano con XY, a partire dall'asse X con senso positivo in antiorario.

Il riconoscimento della tipologia di superficie da estrarre quindi è possibile attraverso la tangente appena calcolata dal segmento. Sulla base di questa viene effettuata l'assegnazione alla rispettiva matrice.

Come avviene l'estrusione? Per prima cosa la linea viene allungata, sulla base del parametro "Lunghezza della superficie di interpolazione", analizzato nei paragrafi precedenti. Si ricorda infatti che deve tagliare completamente il componente in esame, per garantire la riuscita del taglio Booleano. La creazione vera e propria avviene in 2 fasi distinte:

1. Si ricavano i 4 punti di estremità del piano, trattandolo quindi come un quadrilatero nello spazio, con 2 lati paralleli a XY. A tale scopo si ricorda della presenza del valore scelto dall'utente "altezza della superficie". Esso coincide con la differenza tra i valori Z dei punti non paralleli tra loro, tenendo conto dell'altezza di strato. Per garantire il principio sopra enunciato, l'estrusione avverrà lungo una direzione, ma in entrambi i versi.
2. La scelta progettuale di ottenere un output in formato .STL, impone l'uso dei triangoli per la discretizzazione. In questa fase tuttavia, non è ancora necessario

trattarle come tali. È necessaria piuttosto una matrice dove sono codificati gli accoppiamenti tra punti che costituiscono il bordo esterno. trattandosi di un quadrilatero si ottiene perciò una 4x2.

Ottenuto il piano interpolatore sono infine ricavati e messi in una matrice apposita i coefficienti numerici che risolvono l'equazione caratteristica, necessari nei passaggi successivi:

$$ax - by + cz = 1 \quad (1)$$

La seguente procedura sarà ripetuta per tutte le righe che compongono tutto lo strato in analisi. L'output alla fine di questo ciclo di operazioni è costituito per ciascuna tipologia di piano da: una matrice dove sono raccolti i punti di ciascuna superficie, una seconda dove trovo gli accoppiamenti costituenti il bordo esterno, infine una terza dove sono catalogati i coefficienti numerici che caratterizzano analiticamente gli stessi. Nel caso dell'esempio quindi, il numero di matrici sarà 9, 3 per tipologia. È bene evidenziare che non si trattano di matrici vere e proprie, bensì di Cell array, la cui peculiarità consiste nel poter inserir al suo interno una variegata possibilità di elementi, utilizzando l'indicizzazione tipica delle matrici (utilizzando però le parentesi graffe invece che le classiche tonde). Si tratta insomma di una matrice di matrici, disposte all'interno non in colonna bensì in riga.

A questo punto è possibile ricavare la distanza minima necessaria per caratterizzare il pattern di base, costituito da una superficie e la distanza da quella adiacente. con questi strumenti è possibile eseguire la ripetizione della stessa tutte le volte che si desidera. L'utente ha infatti scelto in precedenza il numero di ripetizioni. Per ottenere un metodo rapido e di facile implementazione si è scelto di lavorare con le intersezioni con XY, permettendo l'uso dei coefficienti numerici ricavati in precedenza. In secondo luogo, la ripetizione avviene lungo l'asse Y, sempre per questa motivazione. La conseguenza che ne deriva è l'importanza assunta dal parametro b. il suo inverso, infatti, determina il termine noto dell'intersezione in XY.

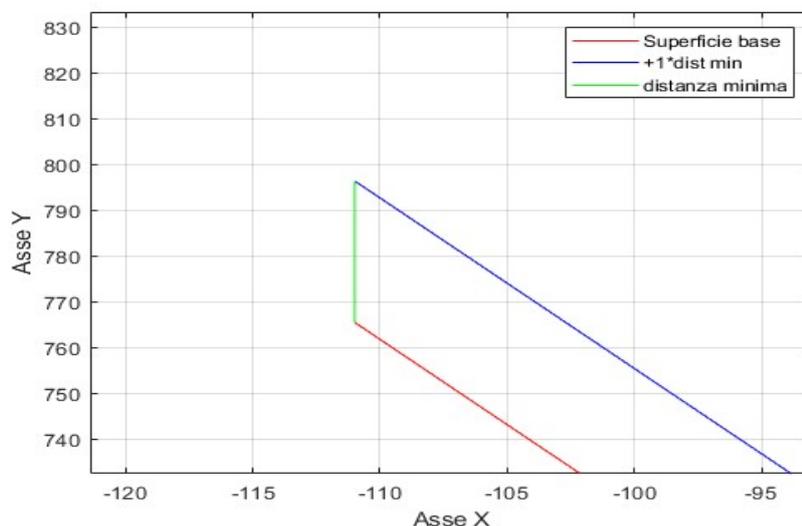


FIGURA 11: PATTERN DI BASE

La distanza minima, misurata quindi lungo Y, si ricava prendendo in considerazione la prima superficie, il cui $1/b$ è confrontato con quello di tutti gli altri. Ricavato il valore minimo in questo modo, la procedura di riconoscimento del pattern sarebbe completa, bisogna tenere in considerazione un'ambiguità che può falsare completamente il risultato. si prenda il caso di una piastra forata che si vuole ottenere attraverso la stampa 3D. L'estrusore si troverà nella situazione di dover interrompere la deposizione del filamento a un'estremità, percorrere il diametro e ricominciare l'estrusione. Si sono generate perciò due linee, perfettamente allineate tra loro. Paradossalmente, il codice, riconoscerebbe la distanza minima come quella esistente tra queste e sarebbe uguale a 0. La ripetizione, quindi, porterebbe ad avere tutte le superfici sovrapposte. Per ovviare a questo problema, basta inserire un IF di controllo: se la distanza minima è nulla o molto piccola, non bisogna considerarla e prendere invece quella immediatamente superiore e infine riapplicare lo stesso ciclo di controllo finché non lo supera. In questo modo si ovvia a un problema estremamente comune, perché non coinvolge solo fori, ma tutte le entità che impongono un'interruzione lungo una linea di estrusione.

In possesso della distanza minima si è quindi in possesso di tutti gli elementi del pattern, vale a dire la prima superficie nel Cell array corrispondente a quella tipologia e la distanza minima. Si può perciò effettuare la ripetizione della superficie (tutta la procedura deve essere ripetuta per ciascuna, nel caso di "Triangoli" quindi altre 2 volte). Prima di tutto gli altri piani vengono cancellati. Ricordando che la ripetizione avviene lungo Y, basta "copiare" il piano base e aggiungere alla coordinata Y di ciascun vertice la distanza minima moltiplicata per un numero intero. La scelta progettuale fatta è che la procedura è svolta, sia con interi positivi, sia negativi. Ciò spiega perché il numero di superfici interpolanti deve essere necessariamente dispari.

Scegliendo infatti di averne 3 la prima sarà quella del pattern di base, le altre due corrispondono alla prima spostata di:

$$\pm 1 * \text{distanza minima}$$

Per quanto bizzarra possa sembrare, questa scelta rappresenta una possibile soluzione al problema della posizione del pattern di base. Dal momento che tutta l'estrusione è gestita da Ultimaker Cura, il suo collocamento è completamente esterno a qualsiasi intervento dell'utente. L'estrusione solo in un verso, fa correre il rischio di non riempire il componente con le superfici di riempimento portando poi a una geometria finale completamente errata. Il numero necessariamente dispari prova a mettere un argine a questo problema, anche se è indubbio che ha le sue criticità. Dal momento che si creano superfici con lo stesso modulo dell'intero, tutte quelle generate lungo Y positiva avranno indice pari, viceversa lungo Y negativo l'indice sarà dispari. Questo aspetto si ripercuote successivamente nel modo in cui si richiamano i piani nel rispettivo Cell Array. Leggendo il codice Matlab, si notano indicizzazioni inusuali o poco intuitive, derivate da questo modo di procedere. La scelta ha portato sì a delle difficoltà nella scrittura del codice, ma ha permesso di ottenere finora sempre la struttura di riempimento corretta, grazie proprio alla sua capacità di riempire completamente il componente.

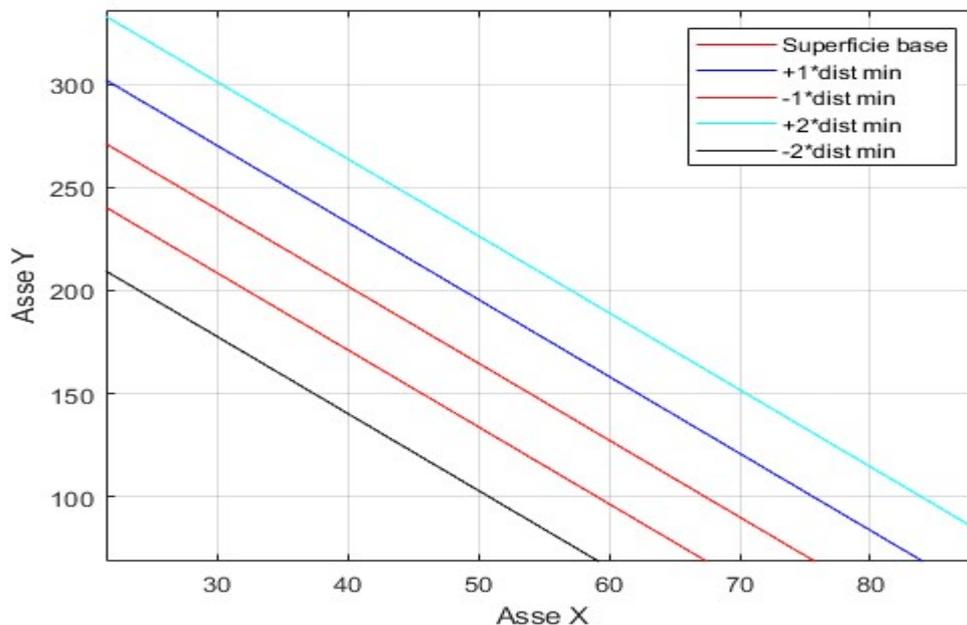


FIGURA 12: SUPERFICI PER INDICIZZAZIONE

Il riconoscimento del pattern non avviene una volta sola. Quando si parla di questo, infatti, ci si riferisce a quello di una determinata tipologia, dal momento che le altre potrebbero essere

differenti. La ripetizione della procedura, quindi, porterà ad avere un numero molto elevato di superfici di interpolazione, per ogni caso previsto dal riempimento.

Come detto sopra il Cell Array di un blocco di superfici è ripulito da quelle che non corrispondono a quella di base, ed è riempito con quelle ottenute tramite ripetizione. Anche le altre 2 matrici, ovvero quella dei bordi e dei coefficienti analitici vengono trattate esattamente allo stesso modo. La struttura del Cell Array, inteso come vettore riga rimane preservato.

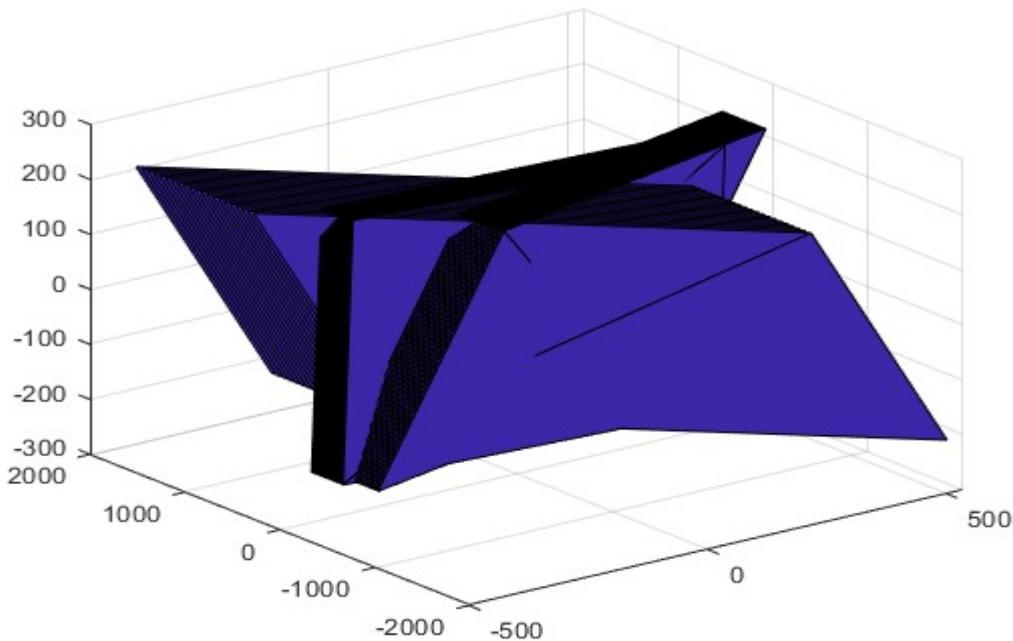


FIGURA 13: SUPERFICI GREZZE ESTRUSE

Osservando il plot, ovvero generando una figura con il risultato ottenuto fino ad ora, si nota subito una criticità, ovvero che le superfici si compenetrano. Questo fatto si evidenzia dalla mancanza di una linea nera che indica la linea di intersezione tra piani. Nasce quindi la necessità di intersecarle reciprocamente in modo da introdurre le giunzioni. Senza questo passaggio, la mesh sarebbe errata perché, non riconoscendo le zone di intersezione automaticamente si compenetra allo stesso modo, bloccando il risolutore degli elementi finiti.

Per ovviare a questo problema è stato implementato un algoritmo in grado, sia di garantire questo risultato, sia di automatizzarlo. A tale scopo, gli input necessari sono rappresentati da tutte le matrici che costituiscono due tipologie di superfici. Di conseguenza sarà coordinato da due cicli FOR, in modo tale che tutti i piani di un tipo si intersechino con tutti i piani dell'altro. Ovviamente l'intersezione di una tipologia con se stessa è senza senso, dal momento che tutti gli elementi che la compongono sono paralleli. Il codice che costituisce l'operazione di intersezione si rifà alla geometria analitica: vengono estratti i coefficienti dei piani in esame e,

utilizzando le comuni operazioni matriciali, si risale alla retta comune. È bene notare che trattandosi di piani ben delimitati, ne deriva che l'intersezione altro non è che un segmento. Di conseguenza non saranno necessari solo i coefficienti numerici analitici, ma anche le coordinate dei vertici degli stessi, o comunque una terza condizione per definire completamente il problema. Analizzando l'insieme dei file che costituiscono il codice Matlab, si nota che sono presenti 3 tipi di algoritmi di intersezione delle superfici: invece di costruire un algoritmo generale, si è deciso di sfruttare le caratteristiche che presentano le intersezioni in ciascuna tipologia di riempimento, al fine di scrivere un programma il più semplice possibile. Da un'analisi attenta delle superfici in tutte le possibili configurazioni si identificano 3 casi:

1. La linea ha un'inclinazione qualsiasi, come nel caso "Suddivisione in Cubi"
2. La linea di intersezione è parallela a XY.
3. La linea è verticale, caso caratteristico di tutti i riempimenti a piani non inclinati.

Sulla base di queste opzioni la differenza tra i 3 algoritmi risiede nelle condizioni che vanno assegnate al fine di ottenere un segmento di intersezione, e per alcuni dettagli secondari.

1. L'assegnazione delle coordinate Z di una coppia di punti ad altezze diverse di una superficie di interpolazione (è indifferente la scelta dal momento che sono "alte" uguali) permette la risoluzione in maniera agevole del problema.
2. Dal momento che un segmento comune orizzontale è possibile avendo due superfici, la cui retta ottenuta intersecando XY è parallela, si utilizza questa proprietà per l'assegnazione della terza condizione. Si ricavano quindi termine noto e tangenti (coincidenti) delle due intersezioni, e tramite l'assegnazione prima dell'una poi dell'altra si ottengono i punti estremi del segmento di intersezione tra i due piani.
3. È bene tenere a mente che questa intersezione si ottiene in tutti i riempimenti a superfici verticali. Per semplificare ulteriormente questo passaggio, perciò, i coefficienti numerici caratteristici non coincidono più con quelli dell'equazione (1), bensì con tangente e termine noto della retta di intersezione con XY. Ricavare l'intersezione in questo modo è immediato, dal momento che si lavora con linee piuttosto che piani. Il risultato sarà quindi un punto giacente su XY. Per ottenere il segmento basta assegnare alla coordinata anche la coppia di valori Z.

Finora si è descritto il procedimento che ha portato a ottenere l'intersezione voluta, la quale si presenta come una coppia di punti. Resta ora da spiegare come si utilizza questa informazione, in particolare come si codifica nelle matrici delle superfici a nostra disposizione. Si è detto in precedenza, le superfici di interpolazione sono definite da 3 elementi: l'elenco delle coordinate dei punti che costituiscono il bordo esterno (al momento costituito da 4 punti situati a coppie

ad altezze differenti), la descrizione di come sono collegati e infine la matrice dei coefficienti numerici costitutivi. Il primo passaggio è inserire i 2 nuovi punti all'interno della matrice di coordinate. Successivamente si deve anche codificare il loro reciproco collegamento. Basterà inserire questa informazione nella seconda matrice: si aggiunge una nuova riga, dove sono inseriti i rispettivi nomi dei due punti. la terza non è necessaria a tale scopo dal momento che ha altre utilità.

L'esecuzione di questa procedura per tutte le superfici porta a creare una grigliatura: ciascun piano sarà costituito dallo stesso e da tutti i segmenti che rappresentano le intersezioni con gli altri.

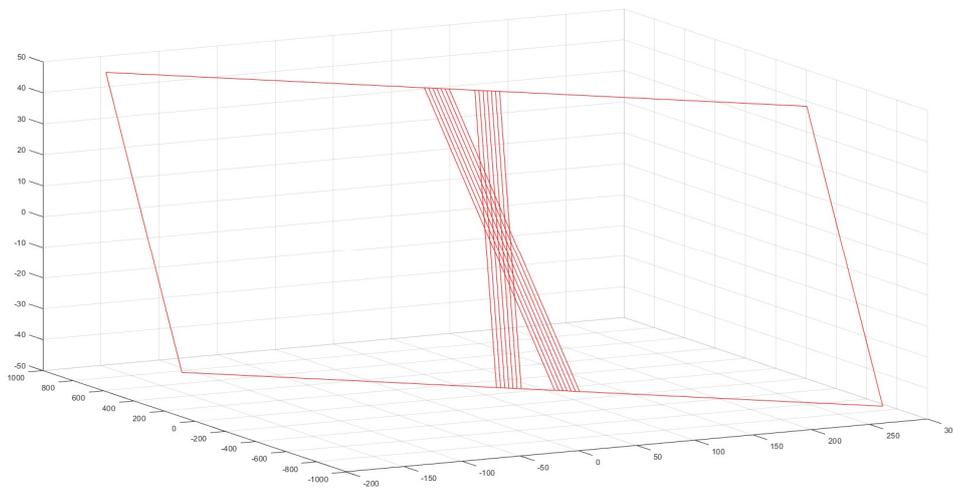


FIGURA 14: SUPERFICIE INTERPOLANTE CON INTERSEZIONI

E' possibile verificare che tutto sia stato fatto correttamente osservando il plot delle superfici: la presenza della linea nera indica il riconoscimento di una superficie da parte di un'altra. È bene sempre effettuare la verifica dal momento che, se ciò non accade si avrà sicuramente un errore all'interno della mesh prodotta dai software che si occupano di elementi finiti. A tale scopo il plot delle superfici elaborate fino a questo punto è automatico. L'utente potrà quindi fare le verifiche senza dover interagire col programma.

Si procede ora a spiegare come il codice esegue questi i passaggi che portano le superfici a essere "tagliate" dal componente in esame e successivamente discretizzate attraverso dei triangoli.

1.6 Taglio Booleano e triangolazione

Nei paragrafi precedenti si è spiegato come, a partire da un G-Code completamente illeggibile, si procede per eseguire tutta la sua traduzione, fino ad ottenere una matrice di coordinate percorse dall'estrusore durante la stampa vera e propria, unita ad alcuni vettori per definire

quali punti sono fondamentali. Grazie a questa è stato possibile identificare i pattern di base costitutivi di ciascuna tipologia di superficie e realizzare una ripetizione per avere molteplici piani interpolatori. Infine, si è affinato il modello introducendo i segmenti che costituiscono le intersezioni tra le reciproche superfici, evitando così la compenetrazione che porta a una mesh completamente inutile.

A questo, dopo avere ottenuto l'output grazie ai passaggi descritti si procede a introdurre a spiegare il Taglio Booleano, in cosa consiste e come è implementato all'interno del codice Matlab qui analizzato. Successivamente sarà anche trattata la triangolazione e l'importanza assunta nel generare il file .STL del riempimento desiderato. Infine, sarà fatto un cenno a come i dati finali sono ulteriormente migliorati e sgravati da alcuni elementi indesiderati, comparsi al succedersi di ogni step.

Emergerà chiaramente in questa parte l'importanza che ha avuto la scelta di utilizzare il formato .STL, come codifica della struttura che compone il riempimento del pezzo in considerazione. L'uso dei triangoli come elemento base, a questo punto andrà a sostituire il ruolo assunto prima dai punti e in seguito dalla linea nei paragrafi precedenti. Ne segue che alla matrice di coordinate, base di tutta la trattazione, andrà aggiunto un ulteriore elenco, il quale dovrà indicare la composizione di tutti i triangoli che compongono le superfici. Ogni riga, perciò, sarà composta dal nome dei punti che rappresentano i vertici di ogni triangolo esistente nel piano di lavoro.

Prima di arrivare a questo punto sarà necessaria svolgere una pulizia e riordino della matrice di coordinate e di tutti i suoi derivati che perderanno così tutta la sequenzialità tipica dell'estrusore. Il legame tra il processo di stampa e il modello numerico si perderà proprio nell'istante, in cui la sequenzialità sarà persa, rendendo necessario l'uso di un punto di vista diverso da quello utilizzato finora. Inviolata è invece l'associazione tra modello numerico e la tipologia di riempimento desiderata, dal momento che il codice perderebbe ogni logica qualora si verificasse.

Una peculiarità di questa parte risiede appunto nell'operatore logico chiamato Taglio Booleano. Si tratta di un'operazione, in cui sono necessari un qualsiasi elemento, e un solido, entrambi posizionati nello spazio. L'operazione consiste nel riconoscere quali parti dell'elemento sono interne al solido e di eliminare quelle esterne. Il risultato, perciò, sarà un ente privato delle sue parti esterne all'involucro costituito dal volume. Emergono chiaramente due aspetti:

1. L'elemento tagliato può essere una qualsiasi entità geometrica.
2. Il solido deve essere assolutamente tale, perché deve essere in grado di delimitare lo spazio in cui è collocato in interno ed esterno. Questa proprietà è tipica di tutti i CAD generati con i modellatori soliti 3D ed è chiamata "Impermeabilità". Gli elementi non solidi, tuttavia, nonostante siano generabili con software di modellazione CAD non sono impermeabili e quindi non sono adatti al ruolo di ente di taglio.

Con la descrizione del taglio Booleano emerge chiaramente il suo ruolo all'interno del codice Matlab. Dal momento che le superfici generate in prima battuta non sono adattate alle misure effettive del componente in esame, si utilizza questo peculiare operatore logico così da portarle alla loro configurazione finale. La procedura che il codice esegue può essere riassunta nei seguenti passaggi:

1. Il CAD finale si comporta esattamente come un involucro che divide lo spazio tra interno a sé ed esterno. Il suo compito coincide esattamente con quello del solido e quindi di ente tagliante.
2. Le superfici grezze sono posizionate rispetto al contenitore nell'esatta posizione finale. Ciò è stato effettuato nei passaggi precedenti riportati sopra. Si ricorda che i piani sono stati estrusi tenendo conto dei parametri scelti dall'utente, per far sì che intersechino completamente il componente, ovvero l'altezza e la lunghezza di superficie.
3. Avviene ora il taglio Booleano vero e proprio. L'operatore rimuove tutto ciò che è esterno all'involucro, "tagliando" tutti gli eccessi delle superfici e lasciando solo il riempimento finale.

Il risultato finale saranno quindi le superfici adattate al componente, le quali sono successivamente sottoposte a triangolazione allo scopo di essere esportate come file .STL.

Il taglio Booleano non sarebbe stato possibile senza l'Add-On di Matlab "Surface Intersection". Si tratta di un codice Open Source realizzato da Jaroslaw Tuszynski, membro della community Matlab, il quale ha codificato in forma matriciale l'algoritmo di intersezione dei triangoli proposto da Tomas Möller nel 1997. Il codice si comporta come una function, dove in input devono essere inserite le superfici, di cui si vuole ottenere l'intersezione e dove l'output è composto da un elenco di punti, a cui è associata una matrice che indica come sono collegati tra loro. Si tratta delle linee in comune ai due piani in esame. Dal momento che si tratta di una risorsa esterna, la spiegazione del principio di funzionamento esula dallo scopo di questa relazione. Sarà quindi trascurato il suo modus operandi e ci si limiterà ad analizzare solamente gli input e gli output che richiede.

Basato su un algoritmo di intersezione tra triangoli, il requisito fondamentale delle superfici da analizzare è la loro triangolazione. Si tratta di una richiesta vincolante, altrimenti non sarebbe in nessun modo in grado di funzionare.

Il primo passaggio consiste perciò nel cambiare la codifica di ogni superficie. Fino a questo momento un piano è descritto attraverso un elenco di punti che costituiscono il suo bordo esterno e le linee di intersezione, affiancata alla matrice che descrive come sono collegati tra

loro. Ovviamente sono presenti i coefficienti numerici dell'equazioni caratteristiche, tuttavia l'utilizzo dell'algoritmo dei triangoli impone due semplificazioni:

1. I coefficienti numerici non sono necessari in questa fase. Non vengono comunque cancellati dal momento che serviranno successivamente.
2. Le linee di intersezione tra piani e di conseguenza i loro vertici estremi non hanno alcuna rilevanza, ma come i coefficienti sono mantenuti per effettuare la triangolazione finale.

Ciò porta a una sensibile riduzione dei dati necessari, in particolare nella matrice di coordinate: i punti necessari a descrivere ogni piano coincide con i 4 che costituivano il quadrilatero ricavato inizialmente, ovvero alle prime 4 righe di ciascun elenco. Trattando quindi un semplice quadrilatero, la sua triangolazione avviene semplicemente attraverso due triangoli con la diagonale come lato in comune. A tale scopo si introduce una matrice che descrive i vertici di ciascuno di essi. Essa coincide con la matrice $\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 4 & 3 \end{bmatrix}$, dove ciascun numero indica la riga dove sono inserite le coordinate. Discretizzate le superfici di interpolazione, la preparazione è praticamente conclusa dal momento che il componente, che svolge la parte del solido, è stato introdotto in Matlab in formato .STL. La sua codifica, perciò, è già basata su triangoli, rendendo inutile qualunque manipolazione preliminare.

Il taglio Booleano inizia una volta avviato l'algoritmo di intersezione triangoli. Dal momento che si tratta di entità molto semplici la velocità di calcolo è molto elevata, anche all'aumento del numero di triangoli che descrivono l'involucro esterno. L'estrema variabilità rappresentata dalla geometria del componente avrebbe potuto costituire infatti un collo di bottiglia per le velocità di calcolo, ma gli elementi costitutivi di base sono così elementari da annullare questa eventualità.

L'output generato è costituito da una serie di punti collegati tra loro, giacenti sull'involucro del pezzo, che costituiscono il bordo esterno della superficie finale, ovvero quella che costituisce in modo definito il riempimento in analisi. La sua codifica è costituita ancora una volta costituita da un elenco di coordinate dei punti e dalla matrice che determina come sono accoppiati tra loro.

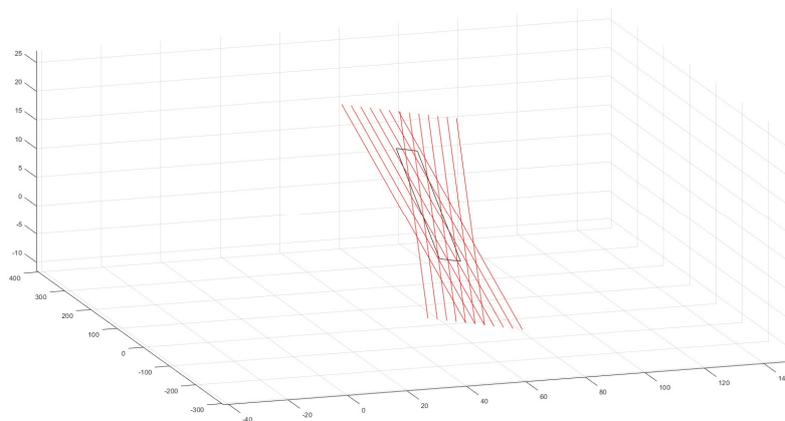


FIGURA 15: BORDO DELLA SUPERFICIE FINALE

A questo punto ha inizio la fase finale del codice Matlab, ovvero l'insieme dei passaggi che costituiscono la triangolazione della superficie finale. Ricostruito il suo bordo esterno, è necessario introdurre le intersezioni con altri piani ricavate in precedenza e che non sono state utilizzate fino a questo punto. Si tratta di un'operazione fondamentale, perché senza di essa la mesh che sarà generata si compenetra rendendola inutilizzabile. La strategia per riuscire in questa operazione si fonda su una Function di Matlab chiamata PolyShape, la quale è in grado di delimitare una regione di piano a partire dai punti che costituiscono il suo bordo esterno e dall'ordine in cui sono elencati. L'ordine in cui sono messi in riga, infatti, rappresentano la sequenza, in cui si presentano percorrendo il bordo in senso antiorario. La corretta redazione della matrice in cui i punti di bordo sono catalogati è fondamentale per determinare il perimetro esterno corretto della regione in analisi. L'utilizzo di PolyShape permette l'accesso a una grande varietà di operazioni Booleane tra regioni nello spazio che si adattano perfettamente ai nostri obiettivi. Inoltre, le regioni hanno a disposizione un triangolatore apposito per discretizzarle. Il difetto principale delle aree che si ottengono tramite questa Function è la loro totale incapacità di essere esportate: la loro esistenza in questo formato è possibile solo in Matlab. Fortunatamente il triangolatore risolve completamente questo problema.

Come accennato prima PolyShape comprende molteplici operazioni Booleane, tra cui Intersect e Subtract. La prima ricava la regione di intersezione a due aree. La seconda si comporta esattamente come una sottrazione: a una è sottratta la parte in comune con un'altra. La caratteristica comune a entrambe è perciò la presenza di uno spazio ben definito in comune a due aree. Per procedere a introdurre le linee di intersezione, si implementa una regione a partire dal bordo esterno finale della superficie di interpolazione. Nel frattempo la superficie interpolante pre-taglio booleano sarà suddivisa in regioni, sulla base delle linee di intersezione tra piani. L'intersezione tra questi due blocchi di regioni suddividerà quella sottesa dal bordo

finale in piccole aree, le quali una volta triangolate avranno i rispettivi bordi coincidenti con le linee di intersezione. I passaggi fondamentali quindi sono 3:

1. La creazione della regione delimitata dal bordo finale della superficie di interpolazione
2. La suddivisione in aree della superficie interpolante grezza usando le linee di intersezioni
3. L'intersezione tra queste due entità e la triangolazione finale.

L'ultima osservazione necessaria prima di procedere alla descrizione più dettagliata è il ruolo degli IF di controllo e sulla struttura generale del codice in questa parte. I passaggi sono svolti in sequenza dall'inizio alla fine, ovvero ogni superficie di input sarà trattata fino al suo stato finale cioè fino alla sua triangolazione definitiva. Non si svolge quindi un solo step su ogni superficie e si passa poi al successivo. L'unico IF di controllo valuta se esiste un'intersezione tra involucro esterno e superficie interpolante: se ciò non si verifica, si passa molto sbrigativamente al piano successivo.

Prima di poter attuare i 3 step occorre effettuare una manipolazione sul bordo finale, in particolare sul modo in cui i suoi punti sono elencati. Si è detto infatti che l'ordine in cui sono messi in riga determina la forma della regione che PolyShape produce. Ciò è in contrasto con l'algoritmo di intersezione triangoli dal momento che l'ordine di elencazione dei punti è casuale, ma a questa si associa una matrice che indica come questi sono collegati tra loro. Si tratta di unire queste due informazioni riordinando tutte le coordinate. Un ulteriore problema sussiste se i bordi non sono unici: nel caso di una superficie con un foro interno infatti, avremo bensì due bordi di delimitazione. Per catalogare questa informazione secondo le istruzioni di Polyshape è sufficiente inserire una riga con NaN tra l'ultimo punto di un bordo e il primo di un altro ad indicare la fine del primo e l'inizio della sequenza che descrive il successivo. Due boundary di cui uno contenuto nell'altro devono avere inoltre l'ordine della sequenza tra loro. Ciò vale a dire che il primo avrà l'elenco dei punti ordinati in senso antiorario, l'altro in senso orario. Il senso di "rotazione" è ottenuto proiettando tali punti sul piano XY. Una peculiarità, infatti, di PolyShape è di lavorare solo nel piano e non nello spazio. È necessario quindi da questo punto lavorare solo con le coordinate XY, mentre la terza sarà recuperata successivamente.

La successione delle operazioni di manipolazione svolte sul bordo preliminare è la seguente:

1. Sulla base degli accoppiamenti la matrice di coordinate del bordo è completamente riordinata, senza dar peso al verso in cui ciò accade. Si riconosce tuttavia la presenza o meno di altri bordi interni
2. Si inseriscono tutte le righe di interruzione per separare i bordi e facilitare inoltre il loro riconoscimento.
3. Si procede a dare un verso ben preciso a ciascuno di essi: il più esterno sarà in verso antiorario, quello immediatamente interno sarà orario. Se a sua volta al suo interno è

contenuto un altro bordo questo sarà a sua volta antiorario. È possibile ricavare un'interpretazione fisica di questo ordinamento: i bordi antiorari descriveranno i pieni, mentre gli orari corrisponderanno ai vuoti.

A questo punto sarà avvenuta l'unione delle informazioni contenute nella matrice delle coordinate del bordo e degli accoppiamenti, rendendo possibile la creazione della prima regione del processo. Si ricorda che la sua caratteristica più importante è quella di giacere sul piano XY. La proiezione dei punti di bordo su tale piano è immediata dal momento che basta cancellare le rispettive coordinate Z. Ciò non costituisce una perdita di informazioni perché tale regione, derivando da una ben precisa superficie di interpolazione, ne adotta anche i coefficienti numerici. Di conseguenza per ricavare le coordinate Z, cosa che verrà effettuata in seguito, basta semplicemente passare attraverso l'equazione caratteristica del piano.

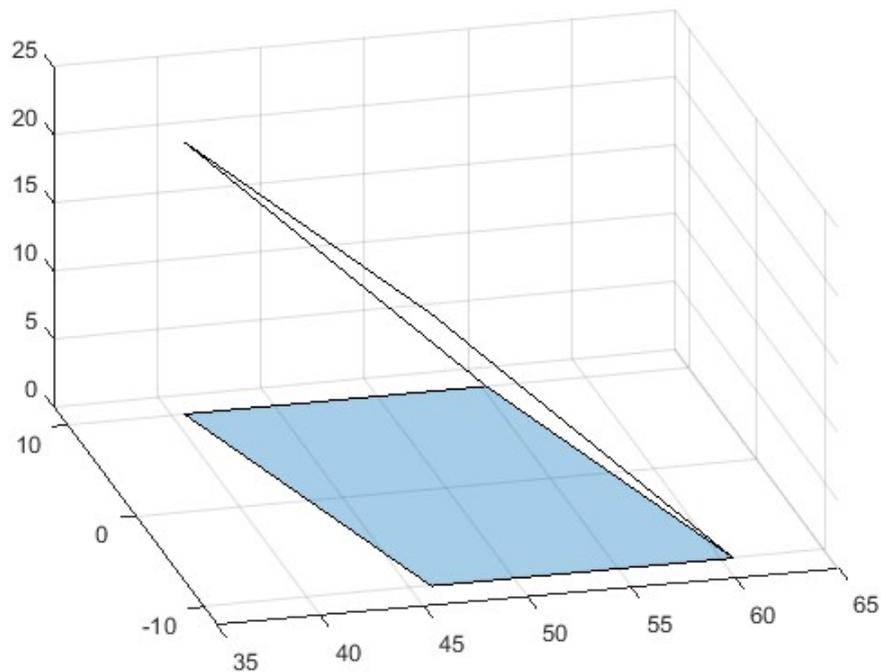


FIGURA 16: REGIONE SU XY DELLA SUPERFICIE FINALE

Costruita così la regione corrispondente alla superficie di riempimento finale proiettata sul piano XY si procede ora a suddividere la superficie grezza di interpolazione per mezzo delle linee di intersezione, in modo da poterle inserire prima di eseguire la triangolazione definitiva.

Prima di tutto occorre ricordare che i piani di interpolazione sono stati ottenuti ripetendo il pattern di base sia nel verso +Y che nel -Y moltiplicando per un intero via via crescente la distanza minima. La generazione di queste però, avveniva per coppia e utilizza anche interi negativi. Per

esempio, se viene estrusa la superficie a distanza $1 \cdot$ distanza minima, contemporaneamente si genera la sua sorella posizionata a $-1 \cdot$ distanza minima. L'impatto ricade sulla numerazione di queste: le superfici che corrono lungo $+Y$ si associano alla numerazione pari nel rispettivo Cell Array (che contiene tutti i piani della stessa tipologia), viceversa le altre corrispondono alla numerazione dispari. Questa proprietà si riflette automaticamente sulle linee di intersezione: un blocco di linee corrisponderà alla numerazione pari, l'altra dispari. Per richiamarle tuttavia bisognerà ricorrere all'elenco che codifica i collegamenti tra i punti di bordo di una superficie interpolante: le linee di intersezione compaiono a partire dalla quinta riga, dal momento che le prime quattro collegano i vertici del quadrilatero esterno del piano.

È bene anche soffermarsi sulla struttura assunta dalla matrice dei bordi che per comodità sarà chiamata "bond", come nel codice Matlab. Le prime 4 righe sono occupate dai legami che intercorrono tra 4 vertici che delimitano il piano di interpolazione. Seguono poi un numero di blocchi di righe corrispondenti al numero di tipologie di superfici di un riempimento meno 1. Nell'esempio "Suddivisione in Cubi", avendo 3 tipologie il numero di blocchi corrisponde a 2. Ciascun blocco sarà composto da un numero di righe pari al quantitativo di superfici appartenenti a ciascuna tipologia, il quale è stato scelto dall'utente. Se la scelta ricade su 7 unità, nel nostro esempio avremo due blocchi da 7 righe. In generale perciò il numero totale di righe di bond si determina con la formula: $4+7(\text{num tipologie}-1)$.

Fatte le dovute premesse si spiega ora la struttura di Cut, ovvero la function appositamente creata su Matlab per suddividere le superfici con le loro linee di intersezioni, trasformarle in regioni e intersecarle con l'area rappresentante la superficie finale che compone il riempimento, proiettata su XZ (chiamata pgon) per semplicità.

Data la complessità di controllo della numerazione, si suddivide la superficie per step, ovvero si comincia partendo dalla numerazione pari a cui segue la numerazione dispari. La sequenza è identica sia per i due casi, sia per ogni blocco di righe corrispondenti alle diverse tipologie di linee in gioco, tuttavia, è necessario dare l'input iniziale prima di avviare un FOR.

Si consideri la numerazione pari. Il primo passo consiste nell'estrarre i punti estremi di una linea. Per fare ciò occorre conoscere il loro identificativo. Si passa perciò da bond, e da lì ottenuti il rispettivo numero di riga nella matrice di coordinate si estrae la loro posizione. A questo punto sono necessari altri due punti per dividere il piano delimitato dal quadrilatero in uno più piccolo. Si procede perciò a una seconda estrazione. Trattandosi della prima volta e analizzando il caso pari, le due linee in esame hanno indicizzazione 5 e 6 nel bond. Con i quattro punti, adeguatamente ordinati si procede a creare una regione e a proiettarla lungo XZ di modo che sia possibile intersecarla con pgon.

Questo accade immediatamente: con il comando intersect si ricava la regione comune e con subtract la si sottrae a pgon. L'area comune e pgon senza di essa sono incolonnate in un vettore apposito.

A questo punto si può automatizzare la procedura per tutte le linee pari. Al fine di poter ottenere tutte sotto-superfici una adiacente all'altra, l'estrazione da bond sarà del tipo 6-8 8-10 10-12, fino alla dimensione massima del blocco di righe -1. Ovviamente ogni volta che si crea una superficie la si interseca con ogni regione presente nel vettore, si sottrae alla stessa l'area comune e infine la si incolonna.

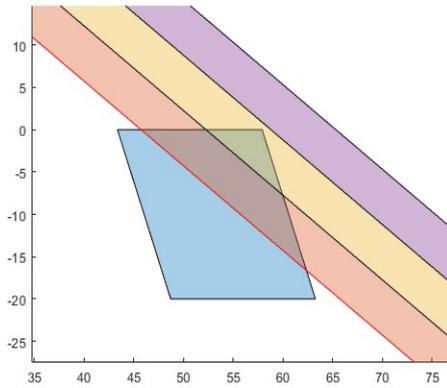


FIGURA 18: REGIONI A NUMERAZIONE PARI

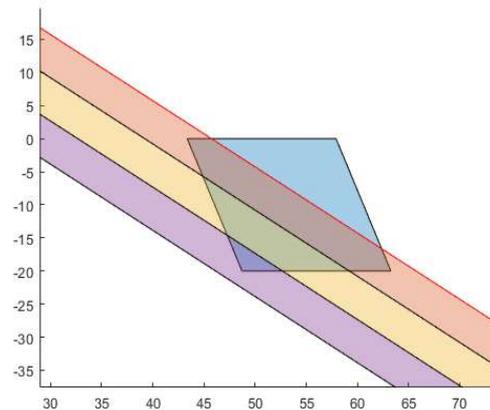


FIGURA 17: REGIONI A NUMERAZIONE DISPARI

Successivamente toccherà alle linee a numerazioni dispari. La prima superficie sarà composta estraendo i punti corrispondenti ai nomi nella riga 5-7 di bond, e successivamente saranno automaticamente generate le superfici corrispondenti 7-9 9-11, fino al valore che corrisponde al numero di righe del primo blocco. Ciascuna di esse andrà a suddividere il vettore contenente le regioni.

La procedura si ripete per ogni blocco. Ovviamente ai numeri di estrazione sarà aggiunto un valore pari al numero di righe che compone ciascuno di essi, per avere l'indicizzazione corretta. Il risultato finale sarà quindi un vettore colonna al cui interno sono state inserite tutte le suddivisioni che compongono la superficie finale del riempimento. Tale rappresentazione permette di ottenere una triangolazione che tenga conto della presenza delle intersezioni con gli altri piani interpolatori.

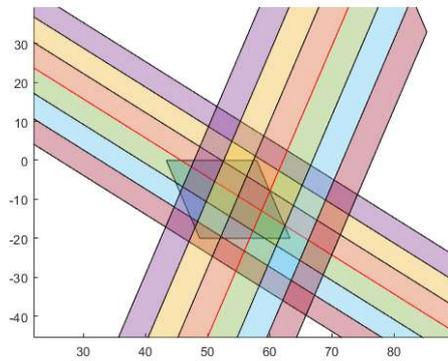


FIGURA 19: TUTTE LE REGIONI PER TIPOLOGIA

Procedendo per sottrazioni di elementi sempre più piccoli con entità costanti, è possibile ottenere delle regioni nulle (Ovviamente non avrebbe senso avere aree negative), la quale si traduce in righe vuote all'interno del vettore delle aree. Per ovviare a questo inconveniente è bastato eliminare tutti gli elementi vuoti del vettore. Questo passaggio non è strettamente necessario, dal momento che tutti i modellatori a elementi finiti, durante la fase di importazione riconoscono le aree nulle (discretizzati con triangoli degenerati in segmenti) e provvedono alla loro eliminazione. Questa operazione porta tuttavia alla comparsa di Warning, la quale, se in presenza molto considerevole, potrebbero nascondere messaggi di errore molto più importanti o di cui si ha interesse. Sulla base di questa previsione si è quindi giustificata l'esistenza di questo step.

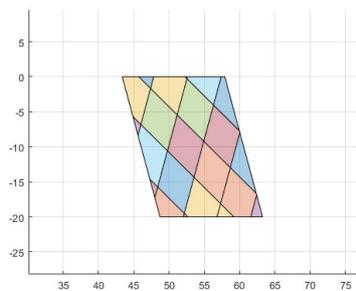


FIGURA 20: SUPERFICIE FINALE DIVISA

Il triangolatore che Polyshape mette a disposizione è ora utilizzato per eseguire la triangolazione: attraverso un ciclo FOR viene presa in esame ogni regione del vettore e triangolata, ovvero viene discretizzata attraverso triangoli. Il modo in cui viene eseguito è proprio della funzione, di conseguenza non viene analizzata. Il risultato di questa operazione è la codifica dei vertici e dei loro collegamenti in 2 matrici separate. Va comunque tenuto in conto un aspetto fondamentale: il triangolatore utilizza un'input bidimensionale, cioè lavora solo su un piano, omettendo così la coordinata spaziale. I triangoli di output, perciò, saranno anch'essi

giacenti sul piano XY, conseguenza delle scelte progettuali fatte in precedenza. Per riportare tutto nello spazio occorre quindi ricalcolare la coordinata Z di ciascun punto. Si ricorda che i coefficienti numerici di ciascuna superficie che risolvono l'equazione caratteristica non sono mai stati cancellati e adempiono a tale scopo. Tramite questi e invertendo la formula, è possibile quindi riottenere la loro tridimensionalità. Alla matrice dei punti triangolari è aggiunta una colonna dove sono contenute le coordinate di questi lungo l'ordinata.

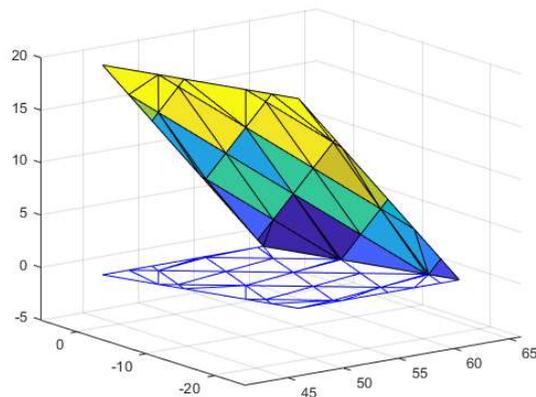


FIGURA 21: SUPERFICIE FINALE TRIANGOLATA

L'ultimo passaggio del codice Matlab coincide con una manipolazione della matrice dei triangoli, allo scopo di avere tutti i nomi corretti. La triangolazione fatta su regioni separate infatti non tiene conto che i punti giacenti sui bordi comuni devono avere lo stesso nome in entrambe le aree. Di conseguenza sarà necessario scorrere tutte le coordinate e assegnare lo stesso nome a tutti i punti coincidenti. La triangolazione in questo modo sarà collegata completamente, e non esisteranno più vertici coincidenti ma sovrapposti.

Un'ulteriore manipolazione è necessaria sul riempimento "Triangoli", dotata di un riempimento a superfici verticale. analizzando la proiezione sul piano XY si nota subito che sono presenti tre tipologie di linee a differente inclinazione rispetto all'ascissa, le quali si intersecano contemporaneamente in un unico punto. Si è descritto prima come, per ricavare le intersezioni tra i piani interpolatori verticali, basta ricavare il punto comune tra le loro proiezioni su XY e assegnargli poi la coordinata Z. Se ne deduce che per un punto dove passano tre segmenti, 2 sono necessari e il terzo è sovrabbondante. Resta comunque fondamentale, per ottenere la geometria corretta il suo passaggio per tale intersezione. L'analisi del G-Code ha portato alla luce che questo non accadeva: il segmento, infatti, non passava per tale punto per pochi centesimi di millimetro, andando a creare quindi 2 ulteriori intersezioni. Il risultato, dopo l'assegnazione a questi dell'altezza è la presenza di 3 piccolissime superfici, che rendono impossibile la generazione di una mesh su tutto il modello, e bloccando così tutte le simulazioni.

A tale scopo è stato necessario introdurre un algoritmo che, attraverso una tolleranza, fosse in grado di riconoscere i vertici molto vicini tra loro e unirli, in modo tale da evitare questo fenomeno. Dal momento che ciò si verifica solo nel caso del riempimento “Triangoli”, non è stato necessario introdurlo per tutti gli altri.

Il codice Matlab finisce ora la sua funzione, dal momento che a questo punto è in possesso di una matrice in cui sono contenuti tutti i triangoli che descrivono ogni superficie del riempimento. Tutti i vertici e i relativi collegamenti sono stati codificati in un unico elenco, in modo da ridurre gli output finali al numero richiesto dall’esportatore di .STL. Spetta infatti a lui il ruolo di riscrivere tutte le informazioni lì contenute e generare il file corrispondente al modello di riempimento desiderato. Come per la sua controparte di input, questo algoritmo è stato trovato all’interno degli Add On di Matlab, ovvero si tratta di un’aggiunta, resa disponibile in formato Open Source dalla community del programma. Perciò il suo funzionamento non ha utilità ai fini della comprensione del codice da noi elaborato.

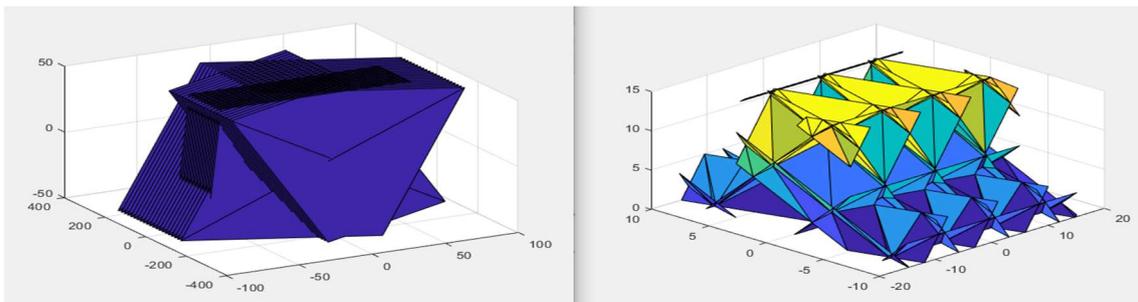


FIGURA 22: CICLO RIEMPIMENTO COMPLETATO

Una volta finita l’esportazione un file in formato .STL comparirà nella cartella di lavoro, permettendo ora di lavorare con il riempimento voluto, sia in qualsiasi ambiente CAD, sia in un programma di elementi finiti.

Si conclude così la spiegazione dettagliata del software elaborato ai fini del lavoro di tesi. La sua progettazione e la sua scrittura hanno costituito una parte fondamentale di tutto il lavoro, sia in tempo investito, sia per la sua importanza per le fasi successive. Non sarebbe stato possibile, senza di esso, svolgere in maniera rapida molte delle analisi FEM presenti in questo elaborato. Resta comunque un’opera ancora molto grezza e con molti difetti, soprattutto non permette la possibilità di creare tutti i riempimenti presenti in Ultimaker Cura. Resta comunque un’ottima base di partenza e con molti sbocchi per svariati studi. Una proposta per eventuali lavori di tesi inerenti alla Additive Manufacturing potrebbe essere appunto il perfezionamento di questo, introducendo tutte le superfici più complesse del classico piano, per studiare la rigidità in funzione della complessità del pattern di riempimento.

Sono introdotte nel paragrafo successivo tutte le caratteristiche geometriche degli Infill disponibili con questo file Matlab. Si riporta insieme anche la descrizione di dettagli aggiuntivi del codice che riportano deviazioni o aggiunte alla metodologia cardine descritta fino a ora.

1.7 Caratterizzazione geometrica

Si introduce un breve paragrafo sulle proprietà che caratterizzano i riempimenti disponibili con il codice Matlab proposto, allo scopo non solo di fornire tutte le generalità geometriche, bensì per descrivere anche le strutture che sono state prese in esame durante il lavoro di tesi. Si tratta infatti di un passaggio necessario per portare successivamente alla luce i perché del comportamento assunto nella rigidità al variare della struttura che compongono i diversi provini in esame. È evidente come gli angoli che caratterizzano le superfici influenzino la risposta del componente alle diverse sollecitazioni, rendendo chiaro lo scopo di analizzarle nel dettaglio. Si aggiunge anche a ciascuna di esse, allo scopo di completare la descrizione funzionamento del codice Matlab sopra riportato, un eventuale approfondimento di tutte le deviazioni o aggiunte rispetto all'algoritmo di base. La procedura, infatti, nonostante sia comunque per tutte le strutture possibili disponibili, si differenzia per alcune crucialità, soprattutto per la parte relativa al campionamento del pattern di base. Si procede perciò a una loro descrizione, nella speranza inoltre che in futuro sia possibile un miglioramento del software.

Al fine di agevolare la caratterizzazione geometrica di elementi prettamente spaziali, si utilizzano alcuni parametri utilizzati anche nella progettazione del codice. Per quanto riguarda gli angoli si userà in particolare quello spazzato dall'intersezione del piano interpolatore con XY a partire dall'ascissa, usando come verso positivo quello antiorario. Tracciando una retta perpendicolare all'intersezione e utilizzando la sua proiezione sulla superficie in esame si ottiene l'inclinazione rispetto a XY. I piani verticali, di conseguenza, avranno angolo pari a 90° secondo questa convenzione. Ogni analisi geometrica è fatta per ciascuna tipologia di riempimento, a cui si affiancano la geometria delle intersezioni reciproche.

1.8 Triangoli e triesagonale

- Tipologie di superfici: 3

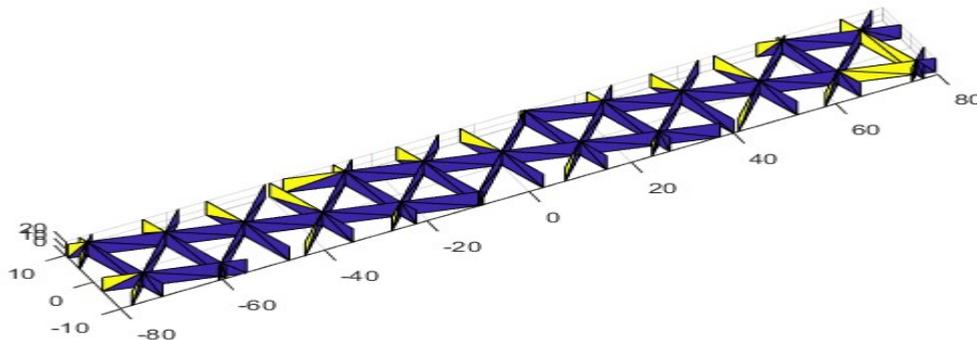


FIGURA 23: TRIANGOLI

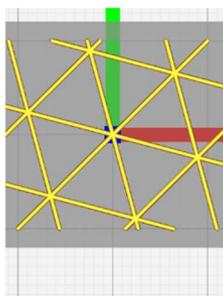


FIGURA 24: PATTERN TRIANGOLI

TIPOLOGIA 1	
Inclinazione	Verticale
Angolo rispetto a X	45°
Geometria linea intersezione con Tip. 2	Verticale
Geometria linea intersezione con Tip. 3	Verticale
TIPOLOGIA 2	
Inclinazione	Verticale
Angolo rispetto a X	105°
Geometria linea intersezione con Tip. 3	Verticale
Geometria linea intersezione con Tip. 1	Verticale
TIPOLOGIA 3	
Inclinazione	Verticale
Angolo rispetto a X	165°
Geometria linea intersezione con Tip. 1	Verticale
Geometria linea intersezione con Tip. 2	Verticale

Come indicato nel titolo la tipologia di riempimento a cui risponde tale caratterizzazione è duplice: la differenza risiede nella posizione che le rispettive superfici hanno reciprocamente. Nel caso del riempimento triangoli, infatti, le proiezioni sul piano XY si intersecano tra loro in un unico punto a differenza del “Tri-esagonale”, dove il terzo segmento è spostato. Nella prima struttura occorrerà perciò prestare attenzione a far sì che nel punto passino 3 linee perfettamente, pena la creazione di superfici piccole che bloccano la discretizzazione dei programmi a elementi finiti.

Dal momento che possiede le stesse caratteristiche geometriche, qualora l’utente dovesse rappresentare la seconda tipologia, dovrà selezionare nell’elenco la tipologia “Triangoli”.

1.9 Linee

- Tipologie di superfici: 2

TIPOLOGIA 1	
Inclinazione	Verticale
Angolo rispetto a X	45°
Geometria linea intersezione con Tip. 2	Verticale
TIPOLOGIA 2	
Inclinazione	Verticale
Angolo rispetto a X	45°
Geometria linea intersezione con Tip. 1	Verticale

La peculiarità del riempimento di tipo “Linee” risiede nel numero di strati analizzati durante la prima fase campionamento. Non è più abbastanza infatti fermarsi al primo strato, ma occorre anche il secondo. Ciò è dovuto infatti all’estrusore che crea una struttura intrecciata per estrudere i piani. In maniera alternata infatti depone il filamento su un gruppo di superfici, mentre nello strato successivo ricoprirà le altre. Il difetto di modellare questo riempimento è l’incapacità del codice Matlab di inserire all’interno del file STL esportato l’alternarsi della deposizione in ciascuno strato. Ciò è dovuto al modo di ragionare per superfici con cui si è deciso di implementare l’algoritmo, con la conseguenza di perdere tutte le proprietà intrinseche delle linee. Si consiglia perciò l’uso di “Griglia” piuttosto che questa tipologia.

1.10 Griglia

- Tipologie di superfici: 2

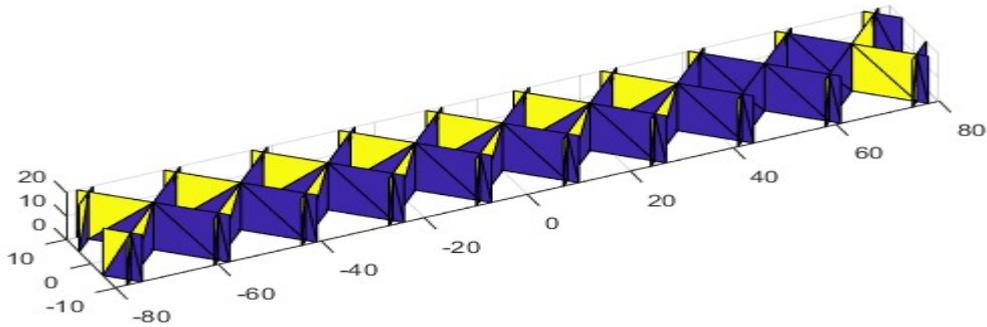


FIGURA 25: GRIGLIA

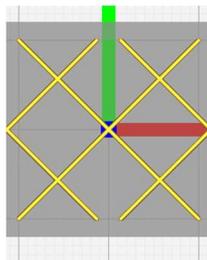


FIGURA 26: PATTERN GRIGLIA

TIPOLOGIA 1	
Inclinazione	Verticale
Angolo rispetto a X	45°
Geometria linea intersezione con Tip. 2	Verticale
TIPOLOGIA 2	
Inclinazione	Verticale
Angolo rispetto a X	45°
Geometria linea intersezione con Tip. 1	Verticale

La differenza con il riempimento di tipo “Linee” si evidenzia nell’estrusione in maniera continua dei piani. Non si tratta perciò di una struttura dove le superfici alternano vuoti e pieni tra uno strato e l’altro. Di conseguenza, basterà di nuovo il primo strato per ricavare il pattern di base.

1.11 Suddivisione in cubi

- Tipologie di superfici: 3

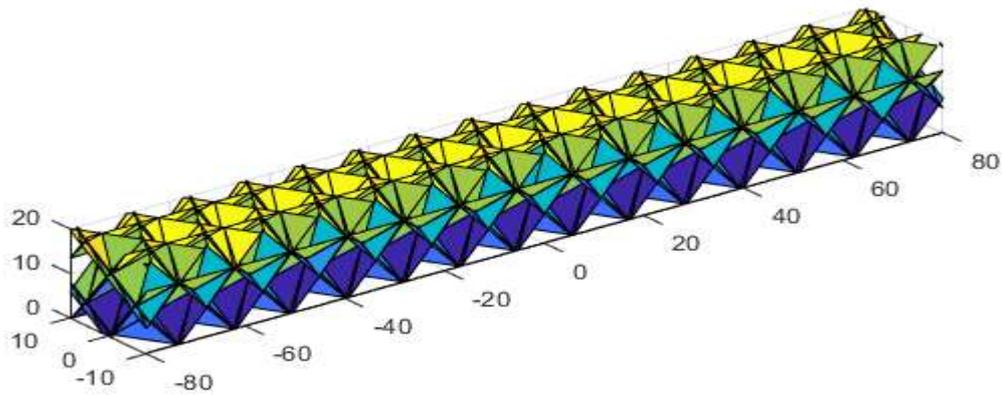


FIGURA 27: SUDDIVISIONE IN CUBI

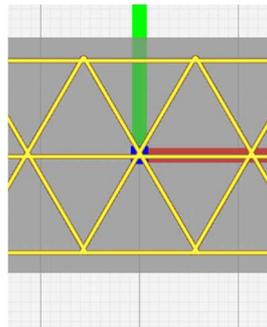


FIGURA 28: PATTERN SUDDIVISIONE IN CUBI

TIPOLOGIA 1	
Inclinazione	54.625°
Angolo rispetto a X	0°
Geometria linea intersezione con Tip. 2	Obliqua
Geometria linea intersezione con Tip. 3	Obliqua
TIPOLOGIA 2	
Inclinazione	54.625°
Angolo rispetto a X	60°

Geometria linea intersezione con Tip. 3	Obliqua
Geometria linea intersezione con Tip. 1	Obliqua
TIPOLOGIA 3	
Inclinazione	54.625°
Angolo rispetto a X	120°
Geometria linea intersezione con Tip. 1	Obliqua
Geometria linea intersezione con Tip. 2	Obliqua

1.12 Cubi

- Tipologie di superfici: 3

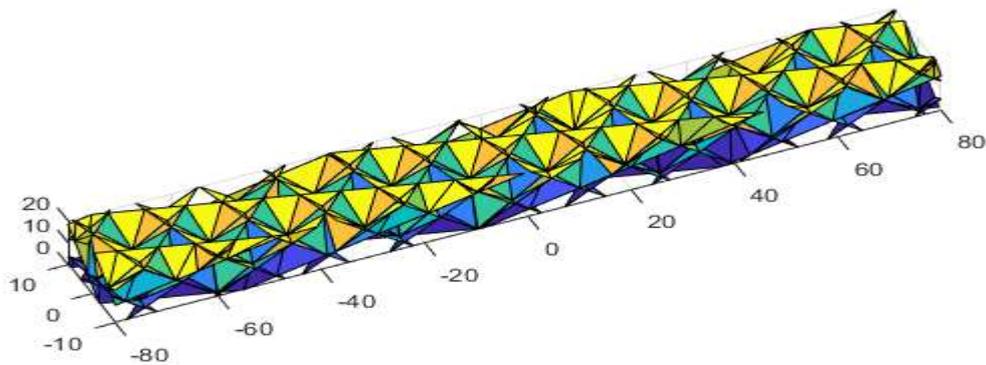


FIGURA 29: CUBI

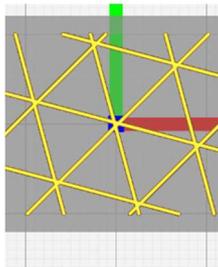


FIGURA 30: PATTERN SUDDIVISIONE IN CUBI

TIPOLOGIA 1	
Inclinazione	54.854°
Angolo rispetto a X	45°
Geometria linea intersezione con Tip. 2	Obliqua
Geometria linea intersezione con Tip. 3	Obliqua
TIPOLOGIA 2	

Inclinazione	54.854°
Angolo rispetto a X	105°
Geometria linea intersezione con Tip. 3	Obliqua
Geometria linea intersezione con Tip. 1	Obliqua
TIPOLOGIA 3	
Inclinazione	54.854°
Angolo rispetto a X	165°
Geometria linea intersezione con Tip. 1	Obliqua
Geometria linea intersezione con Tip. 2	Obliqua

La differenza principale che esiste tra i due riempimenti appena definiti, risiede nell'inclinazione delle linee di intersezione ottenute tra i piani con XY. Si nota infatti come il pattern coincida con un triangolo equilatero in entrambe le tipologie. Nel secondo caso tutta risulta ruotato di 45°. Il componente in entrambi i casi sarà suddiviso in tanti cubi, ma varierà la loro inclinazione e di conseguenza la loro direzione di "impilamento".

1.13 Ottagonale

- Tipologie di superfici: 4

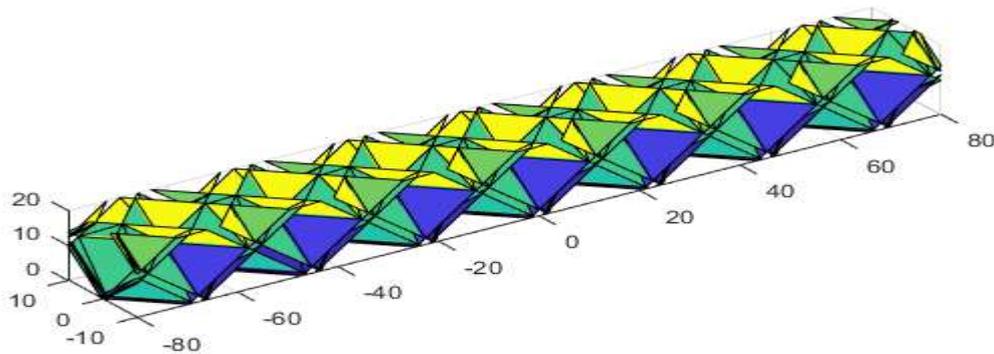


FIGURA 31: OTTAGONALE

TIPOLOGIA 1	
Inclinazione	54.625°
Angolo rispetto a X	45°
Geometria linea intersezione con Tip. 2	Obliqua

Geometria linea intersezione con Tip. 3	Verticale
Geometria linea intersezione con Tip. 4	Orizzontale
TIPOLOGIA 2	
Inclinazione	-54.625°
Angolo rispetto a X	45°
Geometria linea intersezione con Tip. 1	Obliqua
Geometria linea intersezione con Tip. 3	Orizzontale
Geometria linea intersezione con Tip. 4	Verticale
TIPOLOGIA 3	
Inclinazione	54.625°
Angolo rispetto a X	-45°
Geometria linea intersezione con Tip. 1	Verticale
Geometria linea intersezione con Tip. 2	Orizzontale
Geometria linea intersezione con Tip. 4	Obliqua
TIPOLOGIA 4	
Inclinazione	-54.625°
Angolo rispetto a X	-45°
Geometria linea intersezione con Tip. 1	Orizzontale
Geometria linea intersezione con Tip. 2	Verticale
Geometria linea intersezione con Tip. 3	Obliqua

Insieme al riempimento di tipo “Quarto di Cubo”, la tipologia “Ottagonale” richiede, allo scopo di riconoscere il pattern di base, una procedura di riconoscimento delle linee, sulla base della superficie a cui sono associate. Sulla base dell’inclinazione rispetto a X, si nota infatti che nei riempimenti precedenti, la corrispondenza piano-segmento era univoca. Più precisamente, ad ogni angolo è possibile associare una sola e unica tipologia di superficie di interpolazione. Nel riempimento Ottagonale, come in Quarto di Cubi, l’univocità viene meno: le linee corrispondenti alle tipologie 1 e 2 infatti condividono lo stesso angolo spazzato rispetto a X, così come nella 3 e 4.

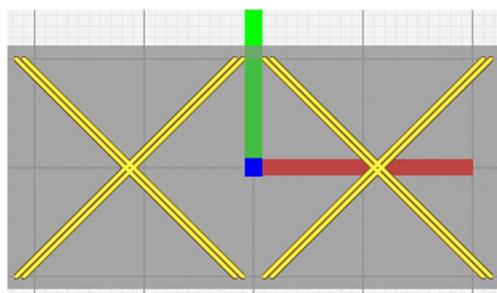


FIGURA 32: PATTERN BASE OTTAGONALE

È possibile quindi distinguere solo una determinata coppia dall'altra, senza identificare in maniera univoca l'elemento interpolatore di interesse. È stato necessario, a questo scopo

introdurre un algoritmo in grado di identificare una condizione ulteriore, al fine di indentificare la rispettiva superficie di interpolazione associata alla determinata linea.

Prima di spiegare in dettaglio l'algoritmo implementato a risolvere questo problema, si evidenzia, osservando i dati geometrici il segno negativo dell'inclinazione. Si ricorda perciò come tale angolo è stato ottenuto. Si consideri la retta di intersezione tra un piano interpolatore e XY. Da un punto qualsiasi di questa si tracci la perpendicolare e dallo stesso punto la proiezione di questa sulla superficie di interpolazione. L'inclinazione coincide con tale angolo, il quale, se spazzato "sopra" XY, assume segno positivo. La sua controparte posizionata "al di sotto" adotterà invece il segno negativo. Tale convenzione assolve a tutte le ambiguità che tale misura può assumere nel corso della trattazione.

Il problema posto in precedenza ha reso perciò necessario la creazione di un algoritmo in grado di ricavare una condizione necessaria per rendere univoco il legame esistente tra linea e la sua superficie di interpolazione. Si descrive ora in dettaglio il suo principio di funzionamento.

Si procede perciò a suddividere le linee del primo strato in esame sulla base della loro inclinazione rispetto all'ascissa: se l'angolo spazzato sarà di 45° , gli estremi del segmento in esame saranno inseriti in una matrice, viceversa nel caso di -45° . Per ciascuno di questi segmenti sarà calcolato anche rispettivo termine noto, che risolve la corrispondente equazione caratteristica della retta. Tale valore ha un ruolo chiave per tutti i passaggi successivi.

In secondo luogo, è effettuato un controllo per verificare che le linee campionate non appartengono alla stessa retta. Ciò si verifica tipicamente con strutture dove è presente un foro. L'estrusore infatti depone il filamento fino a raggiungere il foro, supera il diametro e riprende la deposizione. Se si traccia una retta passante per uno dei due segmenti, emergerà subito il transito anche per il secondo. Le due linee, perciò, avranno lo stesso termine noto e basterà eliminarne una, cancellando la riga di matrice corrispondente ai due estremi che la delimitano. Tale procedura costituisce una pulizia preliminare che viene effettuata anche successivamente, per evitare la generazione di superfici interpolatrici sovrapposte. Risulta perciò facoltativa, tuttavia è un modo per semplificare i passaggi successivi dell'algoritmo di trattamento preliminare.

A questo punto si può procedere a distinguere, due tipologie di superfici differenti a partire dalla matrice che le contiene entrambe in maniera indiscriminata. Questa parte dell'algoritmo si basa sull'osservazione di come il riempimento Ottagonale è strutturato. Ultimaker Cura, a questo scopo, mette a disposizione un'interfaccia grafica che, tra le varie funzioni in grado di svolgere, stampa a schermo il percorso dell'estrusore scelto un determinato strato che si vuole analizzare. Si osserva in particolare che, nel primo strato dell' "Ottagonale" le linee di intersezione dei piani con XY con angolo uguale sono posizionate adiacenti tra loro. Inoltre, emerge dall'analisi complessiva di tutti gli strati che le tipologie ad inclinazione positive secondo la convenzione sopra riportata, hanno sempre i segmenti di intersezione con ordinate di valore inferiore rispetto alla linea adiacente.

Sulla base di questa osservazione bisognerà perciò, l'algoritmo prenderà in considerazione il primo segmento di filamento deposto e ricaverà la distanza rispetto a tutte le altre presenti nella stessa matrice, ottenuta facendo la differenza tra termini noti. Il valore più piccolo identifica lo spazio che si interpone tra la prima linea e la sua controparte immediatamente adiacente. A questo punto si procede a effettuare il confronto tra le ordinate, mediante l'utilizzo del termine noto: la superficie a inclinazione positiva avrà il termine noto col valore inferiore rispetto alla sua controparte. In questo modo è stato possibile identificarla in maniera univoca. Si procede perciò a inserirla nella matrice a cui corrisponde la sua determinata tipologia e a estrarre la sua corrispondente superficie di interpolazione. Allo stesso modo la sua controparte a inclinazione negativa sarà trattata analogamente e tutta la procedura si ripeterà per ogni linea e per l'altra matrice.

L'algoritmo, perciò, riesce a stabilire un legame necessario per identificare la superficie estrusa dalla linea giacente su XY. La procedura elaborata però pone anche un limite sul numero minimo di coppie che devono essere presenti nel primo strato ovvero 2 per ogni angolo, per un totale di 4. Questo perché, in possesso di una sola coppia è possibile identificare l'appartenenza alla tipologia, ma non sono presenti abbastanza elementi per identificare il pattern di base necessario a eseguire le ripetizioni. Si ricorda infatti che sono necessari almeno 2 piani per ricavare la distanza minima tra questi. Di conseguenza il numero minimo di coppie di segmenti deve essere almeno 2 (2 per ogni angolo), in modo che siano presenti 2 superfici per tipologia.

1.14 Quarto di cubo

- Tipologie di superfici: 4

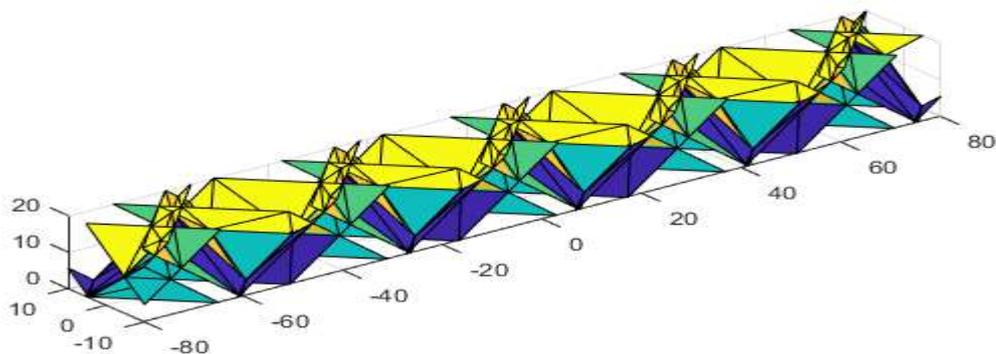


FIGURA 33: QUARTO DI CUBO

TIPOLOGIA 1	
Inclinazione	54.625°
Angolo rispetto a X	45°
Geometria linea intersezione con Tip. 2	Obliqua
Geometria linea intersezione con Tip. 3	Verticale
Geometria linea intersezione con Tip. 4	Orizzontale
TIPOLOGIA 2	
Inclinazione	-54.625°
Angolo rispetto a X	45°
Geometria linea intersezione con Tip. 1	Obliqua
Geometria linea intersezione con Tip. 3	Orizzontale
Geometria linea intersezione con Tip. 4	Verticale
TIPOLOGIA 3	
Inclinazione	54.625°
Angolo rispetto a X	-45°
Geometria linea intersezione con Tip. 1	Verticale
Geometria linea intersezione con Tip. 2	Orizzontale
Geometria linea intersezione con Tip. 4	Obliqua
TIPOLOGIA 4	
Inclinazione	-54.625°
Angolo rispetto a X	-45°
Geometria linea intersezione con Tip. 1	Orizzontale
Geometria linea intersezione con Tip. 2	Verticale
Geometria linea intersezione con Tip. 3	Obliqua

Dall'osservazione dei dati in esame emerge in maniera lampante come la geometria delle superfici del riempimento "Quarto di Cubo" sia identica alla struttura "Ottagonale". La differenza sostanziale tra le 2 risiede nel modo in cui sono disposte le intersezioni su XY. Si nota infatti come le linee a inclinazione di 45° rispetto a X, siano ancora disposte a coppie molto vicine tra loro. Questa caratteristica, tuttavia, è persa per la loro controparte inclinata a -45°: osservando il primo strato depresso si nota subito come la disposizione a coppie molto vicine è persa. Resta comunque un alternarsi di due distanze, di cui una minore e una maggiore, il cui ordine di grandezza in questo caso è simile.

L'impatto di tale geometria risiede nell'algoritmo che identifica le tipologie di superfici: il modello Ottagonale non sarà più in grado di identificare le superfici inclinate di -45° e occorrerà introdurre una correzione. Resta comunque corretto, sia per la suddivisione dei segmenti in coppie di tipologie di piani, sia per la procedura di campionamento delle linee con inclinazione a 45°. La struttura, infatti, non è variata rispetto alla controparte Ottagonale, di conseguenza non è necessario introdurre alcuna modifica per questa parte di codice.

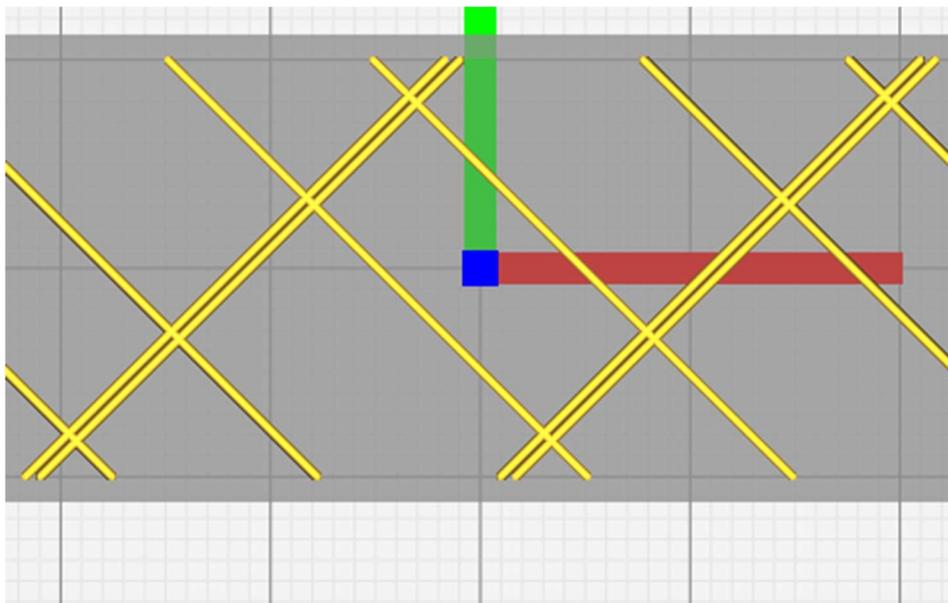


FIGURA 34: PATTERN BASE QUARTO DI CUBO

Resta invece necessario un nuovo approccio per le superfici la cui intersezione con XY è inclinata di 45°. Dopo avere ottenuto la matrice dove sono codificate insieme linee che caratterizzano la tipologia 3 e 4 e dopo aver applicato il filtro per fori introdotto nel paragrafo precedente, si procede a creare un vettore dove sono identificate le distanze di tutti i segmenti rispetto a uno di questi, ovvero il primo che è stato estruso. Per ottenere tale elenco basta considerare il vettore dei termini noti già calcolati in precedenza, sottrargli il valore della linea in esame ed estrarre il valore assoluto. A partire da tale output si procede a estrarre i due valori minimi immediatamente superiori a 0, il quale non avrebbe senso dal momento che rappresenta la distanza dalla linea campione con se stessa. Fisicamente tali valori identificano lo spazio lungo Y che intercorre tra il segmento in esame e quello immediatamente inferiore e superiore. La problematica che subito emerge è che tale rappresentazione non è valida per tutte le linee che non sono poste in mezzo ad altre 2. È questo il caso in cui il campione si trova in un angolo del componente. Di conseguenza il termine noto associato avrà, a meno del segno, il valore più alto di tutti. Per identificare tale problematica basterà utilizzare un IF apposito: se ci si trova in questo caso la coppia di distanze minime sarà la più piccola e la differenza tra questa e la immediatamente superiore ricavata in precedenza. Per esigenze di ordine all'interno del codice il valore più piccolo è chiamato min1 mentre la sua controparte maggiore min2. Ciò vale anche per la particolarità descritta sopra.

Si procede ora a distinguere le superfici della tipologia 3 dalla 4. Per fare ciò si utilizzerà un doppio ciclo for in modo che ogni segmento è confrontato con tutti gli altri. Si distinguono ora due casi:

1. I segmenti sono distanti del valore $\min 1$: in questo caso la linea con il termine noto minore dei due, tenendo conto del segno, appartiene alla tipologia 3.
2. I segmenti sono distanti del valore $\min 2$: a differenza del caso precedente il segmento con termine noto maggiore della coppia in esame corrisponde alla tipologia 3.

Si riesce così a identificare in maniera univoca ciascuna tipologia. Non è necessario descrivere i passaggi successivi, dal momento che le manipolazioni che seguono sono identiche a tutte le strutture descritte in precedenza.

Anche in questo riempimento è richiesto un numero minimo di coppie pari 2 per angolo come in precedenza, benchè non si possa trattarle strettamente come tali. Per essere più rigorosi è necessario avere 2 coppie per le tipologie 1 e 2. Per i casi 3 e 4 occorrono due segmenti per tipo.

Elementi finiti

Il carattere progettuale di questo lavoro di tesi ha richiesto l'uso di uno strumento, in grado di dare una previsione sul comportamento del componente in fase operativa. La geometria del riempimento e la sua densità, infatti, impattano sulle caratteristiche meccaniche del componente: un pezzo cavo sarà in grado di esibire un'evidente deformazione elastica, a discapito tuttavia del carico massimo in grado di sopportare. Viceversa,, una densità molto elevata si traduce in estrema rigidità e alta resistenza meccanica. Può tuttavia manifestarsi in questa configurazione una tendenza a esibire la rottura di tipo fragile, molto pericolosa vista la sua imprevedibilità, data la scarsa energia necessaria a svilupparsi. È necessario, perciò, essere in grado di prevedere sia in maniera qualitativa, ma soprattutto quantitativa la risposta del pezzo di fronte alle condizioni operative per cui è stato pensato.

In tale contesto emerge quindi il ruolo degli elementi finiti, ovvero una teoria matematica in grado di risolvere le principali equazioni della fisica moderna, la cui importanza risiede nell'essere dei modelli predittivi semplici ed efficaci di qualsiasi fenomeno naturale. La loro criticità, tuttavia, consiste nella mancanza di una soluzione analitica semplice. Sono rare appunto le situazioni in cui si può ottenere una legge tramite la loro integrazione, e nei casi in cui accade si tratta di casistiche estremamente semplificate, le quali conservano molto poco della complessità del reale.

Data l'incapacità di ottenere una soluzione analitica eccetto per casi molto semplificati, la scelta di una strada alternativa alla normale integrazione diventa cruciale. A tale scopo l'utilizzo della teoria degli elementi finiti permette una riscrittura delle equazioni cardinali della fisica moderna e, attraverso l'introduzione di un funzionale, la forma finale assunta sarà molto semplice, senza perdere alcuna delle informazioni contenute al loro interno.

Analizzando le equazioni indefinite di equilibrio che governano la meccanica del continuo, l'utilizzo degli elementi finiti porta a una loro traduzione che si avvale del principio dei lavori virtuali. Attraverso questo filtro è possibile, infatti, ottenere un'unica equazione scalare, la quale, una volta integrata, permette di avere accesso in maniera completa allo stato di sforzo del componente in esame. Per essere più precisi il PLV assume il ruolo del funzionale, ovvero un teorema che deriva direttamente dall'equazione in analisi, la quale permette una riscrittura più semplificata e più compatibile con una risoluzione numerica. Proprio questa costituisce il secondo cardine della teoria degli elementi finiti e allo stesso un limite: l'utilizzo di una strategia numerica, infatti, porta a una soluzione in maniera veloce ed efficace, tuttavia, non costituendo una soluzione analitica del problema, introduce un errore nei valori finali. La conseguenza che emerge è che l'utente deve essere in grado di saperlo minimizzare, e soprattutto di saper dare una valutazione critica della soluzione proposta. Fortunatamente il governo dell'imprecisione spetta al calcolatore, il quale sceglie automaticamente un metodo numerico in grado di ridurlo al minimo. Sono molteplici, infatti, gli algoritmi risolutivi la cui convergenza verso la soluzione

esatta è garantita matematicamente. Resta tuttavia uno strumento incapace di filtrare i risultati e di indicare le zone affette da errore eccetto per casi molto specifici. Il ruolo dell'utente, perciò, insieme alla sua formazione tecnica, è fondamentale in questo tipo di analisi.

L'uso di un software a elementi finiti non consente solo di risolvere agevolmente le equazioni della meccanica del continuo, bensì di essere uno strumento efficace per l'utente nella progettazione. Nel nostro caso, l'utilizzo di Ansys permette di definire in maniera semplice la geometria da analizzare, di stabilire i vincoli costitutivi del problema e infine i carichi in gioco. L'approccio grafico permette una comprensione delle logiche del programma in maniera immediata ed evita all'utente l'elaborazione di tutte le condizioni al contorno in complesse formule matematiche. Si capisce perciò come il suo utilizzo sia fondamentale anche nelle analisi della rigidità: la semplicità si traduce in tempi sia progettuali, sia di implementazione risparmiati, il quale può essere reinvestito in ulteriori studi dove si variano o le tipologie di riempimento o la densità.

L'importanza che assumono gli elementi finiti insieme a tutte le conseguenze che derivano dalla loro introduzione non deve far dimenticare l'importanza della sperimentazione all'interno della progettazione. Il calcolatore e insieme il software sono strumenti incredibilmente potenti, che permettono l'accesso a innumerevoli campi di studi, ma creano un distacco tra la fase progettuale e la realtà operativa. L'ottenimento in maniera agevole e immediata alla soluzione di un problema può portare facilmente il progettista a trarre in maniera precipitosa delle previsioni effettive sul comportamento del componente, dimenticando come la realtà dei fatti è ben diversa dai modelli. Perché il calcolatore alla fine può comprendere solo questi, e di conseguenza le soluzioni restano valide solo per quelli. Uno studio di sensitività porta sì a una valutazione di molte condizioni operative, ma non tengono conto di quanto complessa sia la realtà in confronto alla matematica. Si evidenzia perciò il contributo che porta la sperimentazione. Senza di essa non sarebbe possibile creare un ponte tra le due realtà che facilmente viene dimenticato dal progettista. Una prova sperimentale in grado di riprodurre le condizioni analizzate numericamente, non solo è in grado di valutare la bontà del modello scelto, ma permette di effettuare una valutazione molto più simile alle condizioni operative. Alla luce di questo fatto perciò, tutte le simulazioni che verranno presentate devono essere accompagnate a una verifica sperimentale per garantire che la teoria abbia un riscontro anche nel mondo reale.

In questo capitolo viene descritto nel dettaglio tutte le fasi che hanno contribuito alla creazione del modello numerico per effettuare le analisi di rigidità. A partire dalla geometria del componente si osserveranno quindi i passaggi che costituiscono i vincoli geometrici tra involucro esterno e le superfici di riempimento. Verrà spiegato come il materiale è stato caratterizzato sia sperimentalmente sia numericamente all'interno di Ansys, in particolare è analizzata l'importanza assunta dai sistemi di riferimento, aspetto imprescindibile quando si lavora nel campo dei materiali ortotropi. Si introduce un modello semplice per valutare il comportamento

meccanico, ovvero la prova di flessione a 4 punti, la quale attraverso la curvatura che impone al provino, ha permesso di ricavare la rigidezza dell'elemento in esame. Infine, si procede a un breve commento sull'andamento della rigidezza in funzione dei parametri in gioco e sulle possibili cause che lo determinano.

2.1 Geometria del componente

La scelta della forma del componente in esame deve rispondere a 2 esigenze fondamentali:

1. Semplicità: essendo nel campo dell'Additive Manufacturing, il ruolo rivesto dalla creazione del pezzo non è trascurabile. L'aumento della complessità morfologica non si traduce solo nel tempo necessario per stamparlo, ma anche in risorse investite nello studio di ottimizzazione del processo di stampa. Forme particolari possono infatti causare direzioni di raffreddamento inconsuete che si traducono alla fine in distorsioni. Questi aspetti creano una discrepanza tra il modello numerico e la prova sperimentale, dal momento che, svolgendo analisi semplificate non terranno conto numericamente di tutto questo.
2. Si deve tenere in considerazione che la geometria ha delle conseguenze sulla tipologia di prova che si utilizzerà per validare i dati. Se il test finale sarà una prova di trazione, bisognerà essere in grado di identificare in maniera immediata sul pezzo l'asse di cui si vuole studiare l'allungamento, pena l'incapacità di riconoscere il comportamento in funzione delle condizioni operative.

La scelta progettuale fatta perciò ricade su un semplice provino a forma di parallelepipedo delle dimensioni di 160mm x 20mm x 20mm.

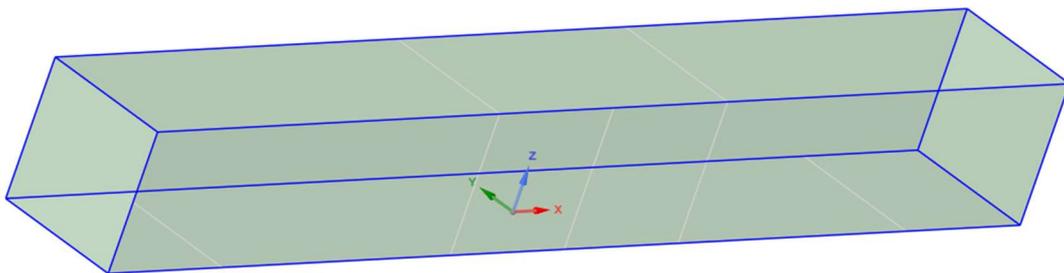


FIGURA 35: CAD PARALLELEPIPEDO

Dal momento che si deve studiare la rigidezza in funzione del riempimento, la morfologia di base sarà quindi un parallelepipedo cavo, il cui spessore sarà assegnato successivamente quando si prenderà in considerazione il materiale.

La scelta di un pezzo molto semplice, come quello preso in considerazione in questa fase, non esclude l'uso di morfologie più complesse nelle fasi successive. Si ricorda che il lavoro di tesi ha lo scopo di identificare il comportamento assunto dalla rigidità in funzione della composizione interna al fine di semplificare la scelta della tipologia di riempimento. Di conseguenza, uno studio che non tiene conto inizialmente dell'influenza dell'involucro esterno, permette di afferrare più facilmente il legame che sussiste tra questi due grandi fattori. La fase successiva sarà quella di verificare che, all'aumentare della complessità dell'elemento, tale relazione non vari, o comunque conservi il carattere che aveva in pezzi elementari. Se tale legame si preserva, si ha raggiunto lo scopo di ottenere una metodologia progettuale più immediata per l'Additive Manufacturing. Riempire il pezzo sarà quindi una fase più semplice durante l'iter progettuale. Si anticipa ora che il limite fondamentale di tale procedura è l'aver omesso tutti i parametri caratteristici di stampa. Ciò costituisce un limite dal momento che, come nell'esempio precedente, una determinata configurazione può portare a problemi di raffreddamento e quindi alla presenza di distorsioni, le quali riducono molto le caratteristiche meccaniche. Tutto questo è comunque accettato dal momento che il lavoro di tesi ha uno scopo di ottimizzazione progettuale e trascura ogni aspetto tecnologico, ovvero l'universo che si occupa della produzione del componente.

2.2 Comportamento analizzato

L'analisi della rigidità costituisce preventivamente un vincolo sugli studi possibili sul componente in questo lavoro di tesi. Dal momento che lo scopo consiste nel ricavare tale valore e vedere la sua variazione, l'analisi che ne deriva è di tipo statico. Non saranno perciò tenute in considerazione e nemmeno accennate tutti gli studi legati alla dinamica: l'analisi modale non sarà perciò trattata, e di conseguenza anche tutti i transitori.

Per esigenza di semplicità lo studio si focalizzerà sul comportamento flessionale del componente. La simulazione consisterà nel sollecitare il pezzo con un momento flettente sulle estremità e valutare lo stato di sforzo in una zona di tratto utile stabilità in precedenza. La sua definizione è fondamentale perché permette di valutare la sollecitazione flessionale depurata da effetti di bordo o da fenomeni imprevedibili nelle vicinanze dei punti di applicazione della forza. Si capisce istintivamente che utilizzando un parallelepipedo il tratto utile sarà situato nella parte centrale. Non si può tuttavia indicare a prescindere dove sarà situata, dal momento che occorre decidere prima come imporre la sollecitazione flessionale.

2.3 La prova analizzata

Dopo aver deciso che il pezzo sarà sollecitato a flessione, occorre progettare le condizioni di carico da cui deriva l'applicazione del momento flettente. Qui si manifesta lo scontro tra le 2 realtà coinvolte, ovvero la simulazione numerica e l'approccio sperimentale. Occorre ideare un modello che sia semplice da implementare numericamente e allo stesso tempo facilmente riproducibile nella realtà. La riproducibilità non comprende solo la capacità di riprodurre le condizioni del modello, ma di essere in grado di farlo in maniera immediata e contemporaneamente di poter effettuare numerose prove in poco tempo. Non occorre dimenticare inoltre che aumentando la complessità di modellazione aumenta anche la difficoltà a reperire una macchina in grado di realizzare tali condizioni. Di conseguenza si è optato per una prova molto semplice e allo stesso tempo molto efficace per introdurre il momento flettente sul componente: la prova di flessione a 4 punti.

Si tratta di un dispositivo composto da due rulli di appoggio a distanza predefinita dove si posiziona il componente, e da due rulli di spinta, separati anche loro da un valore scelto in precedenza. Collegati a un motore di spinta il loro compito è di entrare in contatto con il pezzo e imporre sulla superficie il carico, che sarà ripartito tra i due cilindri. La particolarità di tale prova risiede prima di tutto nella morfologia che la sollecitazione assume lungo il componente: il momento flettente crescerà da 0 a partire dal primo rullo di appoggio, fino a raggiungere il valore massimo dove si trova il primo rullo di spinta. Successivamente si manterrà costante fino al secondo per poi decrescere fino al secondo appoggio annullandosi. La configurazione simmetrica perciò determina una distribuzione del carico agente sul componente completamente simmetrica e costante nella zona compresa tra i due rulli di spinta.

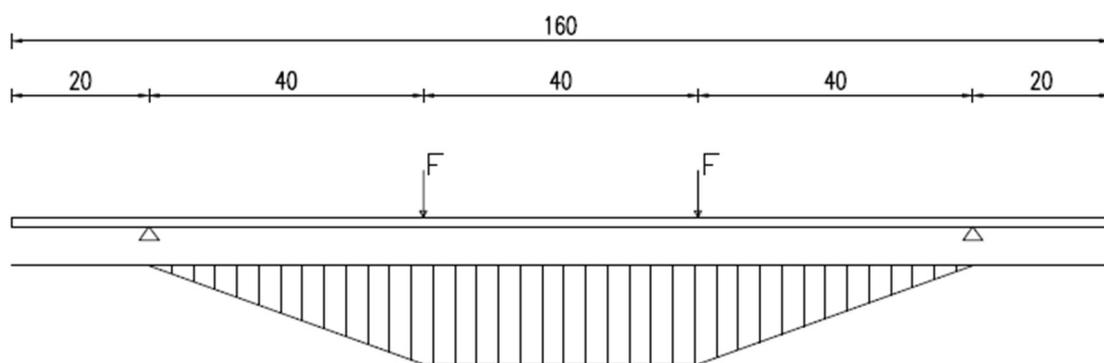


FIGURA 36: DIAGRAMMA DEI MOMENTI SUL PARALLELEPIPEDO

La distanza che li separa è quindi fondamentale dal momento che determina il tratto utile del provino. Il momento flettente costante in una zona morfologicamente simile a una trave permette inoltre il confronto con la soluzione semplificata della meccanica del continuo proposta di DSV. Le sue ipotesi fondamentali ovvero la forma a trave (una dimensione prevale

sulle altre 2), insieme a un approccio che considera le forze intese solo come risultanti (si dimentica perciò come queste sono distribuite sull'estremità), giustificano l'andamento delle tensioni proposto dall'equazione di Bernoulli-Navier, la quale mette in relazione gli sforzi con i carichi agenti. Si tratta di un risultato notevole perché, scegliendo la prova di flessione a 4 punti, si è in possesso anche di una soluzione analitica e quindi esatta. Perciò siamo già in grado anticipatamente di prevedere l'andamento degli sforzi lungo il tratto utile del provino. È doveroso fare una precisazione: la soluzione esatta è stata definita per una trave con sezione piena o cava, ma nel nostro caso il parallelepipedo è riempito con una struttura che rende immediatamente impossibile una soluzione analitica delle equazioni del continuo. L'uso degli elementi finiti resta quindi imprescindibile nella trattazione. La soluzione esatta rimane comunque fondamentale perché il componente deve rispettare qualitativamente la configurazione degli sforzi della sua controparte. Di conseguenza è molto utile per capire se il modello è stato formulato correttamente. Se, ad esempio, lo stato di sollecitazione nel tratto utile non presenta la tipica configurazione a farfalla, ovvero simmetrica rispetto all'asse neutro, si è automaticamente in presenza di qualche errore. Nell'ambito di questo lavoro è stato necessario per verificare che il CAD del layout di riempimento ottenuto da Matlab interagisse in maniera corretta con l'involucro esterno. L'andamento a farfalla insieme a un incremento di tensione nelle giunzioni con lo spessore del parallelepipedo, è una chiara dimostrazione sia del corretto funzionamento del CAD, sia della corretta formulazione delle giunzioni pezzo-riempimento. Questo aspetto sarà analizzato in maniera più approfondita successivamente. La prova utilizzata e quindi simulata numericamente sarà il test di flessione a 4 punti. Resta ora da caratterizzare geometricamente e dinamicamente la prova.

Il primo passaggio per determinare la configurazione di lavoro è la scelta del sistema di riferimento. L'origine giacerà sulla superficie inferiore del parallelepipedo e sarà posizionata a metà della lunghezza e dello spessore. L'asse X è scelto in modo tale da essere parallelo all'asse del parallelepipedo, mentre Z corre perpendicolare a ciascuno strato. Infine, Y sarà ricavato in modo tale che la terna di riferimento sia destrorsa. Così posto, 2 piani che costituiscono il sistema (XZ e YZ) saranno di simmetria per il componente. Tale configurazione sarà molto utile per identificare le proprietà elastiche dell'involucro esterno. Si ricorda infatti che il campo di lavoro è quello dei materiali ortotropi, di conseguenza sarà sempre necessario specificare il materiale in funzione della direzione.

Come si è detto in precedenza la distanza che si interpone tra i due rulli di spinta determina in prima approssimazione la lunghezza del tratto utile. Di conseguenza sarà necessario che essa sia la più grande possibile in modo che lo stato di sforzo non sia influenzato dal punto di azione del carico. Allo stesso tempo occorre tenere a mente che la creazione del momento flettente avviene tramite la generazione di una coppia composta dalla spinta sul pezzo dei rulli di carico insieme alla reazione vincolare dei cilindri di appoggio. Per generare un momento flettente quindi è necessario in prima battuta che la reazione vincolare e la spinta non giacciono sulla

stessa direzione. In secondo luogo, la spinta non può prescindere dalla potenza che la macchina adibita a effettuare la prova è in grado di erogare. Ragionando a parità di momento flettente imposto, se la distanza tra rulli di appoggio e di spinta sono tra loro simili, si assisterà a un incremento notevole della forza impressa dalla macchina rispetto al caso in cui i distanziamenti sono molto diversi, a causa della definizione di coppia. L'incremento dell'intensità di carico porta ovviamente a un aumento di potenza erogata dalla macchina, la quale è dimensionata sulla base di un valore nominale. È quindi importante tenere in considerazione anche questo parametro per progettare una prova che sia realizzabile.

Sulla base di queste osservazioni si è imposta la distanza di 40mm tra i due rulli di spinta e di 120mm tra i due appoggi. Ovviamente per mantenere la condizione di simmetria tali distanze devono ripartirsi in maniera equa rispetto all'origine del riferimento e saranno valutate lungo l'asse X. Con queste dimensioni i due appoggi saranno distanti dalle estremità del parallelepipedo di un valore pari a 20mm. Sulla base di queste scelte il tratto utile avrà una lunghezza lungo X pari a 40mm e sarà posizionato a cavallo del piano di simmetria YZ, così da renderlo simmetrico rispetto all'origine. Il posizionamento del tratto utile è fondamentale, dal momento che sarà necessaria per ottenere gli spostamenti del componente lungo la direzione Z, dai quali è possibile calcolare la rigidezza. La caratterizzazione geometrica della prova di flessione a 4 punti, in particolare le distanze tra i rulli, permette ora la possibilità di eseguire la modellazione nell'ambiente Ansys, soprattutto per la parte che costituisce l'imposizione delle condizioni al contorno e dei carichi.

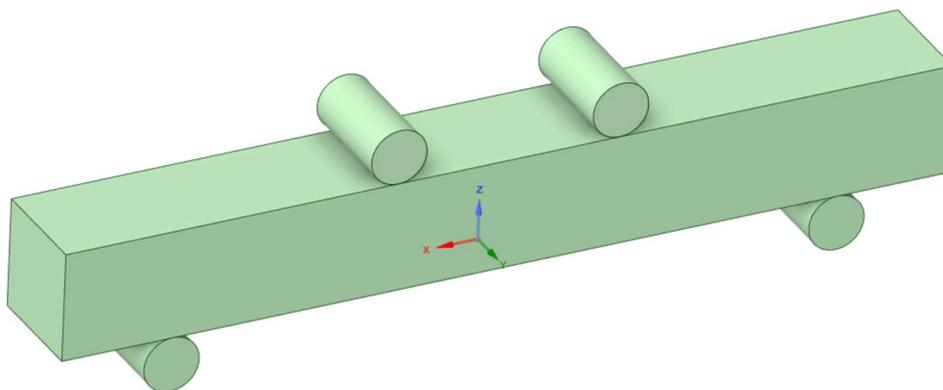


FIGURA 37: 3D PROVA FLESSIONE A 4 PUNTI

2.4 Prima parte della simulazione

Prima di poter introdurre nell'ambiente di Ansys i carichi e i vincoli che andranno a modellare la prova di flessione a 4 punti occorre inserire la geometria dell'involucro esterno, il CAD del

riempimento scelto e scegliere il tipo di contatto con cui si interfacciano reciprocamente. A tale scopo Ansys mette a disposizione un ambiente chiamato SpaceClaim, il quale predispone gli strumenti per lavorare con i CAD dei componenti di analisi.

Si comincia perciò introducendo in tale ambiente il la geometria del parallelepipedo insieme alle superfici di riempimento. Si ricorda che entrambi i file sono stati esportati in precedenza in formato .STL, ovvero una codifica di tutte le superfici per mezzo di triangoli. Il file altro non è che un blocco di testo dove sono elencati tutti i vertici e una matrice che identifica i collegamenti. Il software, perciò, si occuperà della lettura di tutte le informazioni inserite e ricostruirà successivamente il componente all'interno dell'interfaccia. Procedendo in tale maniera si otterrà così il pezzo e il suo riempimento associato all'interno di Ansys e sarà possibile procedere a effettuare ulteriori manipolazioni. L'inizializzazione della geometria, infatti, è il primo di una serie di passaggi che porta alla verifica del corretto funzionamento del CAD del riempimento e a una eventuale correzione qualora si verificano malfunzionamenti. Si ricorda infatti che l'Infill deriva da un codice Matlab scritto apposta per questo lavoro di tesi, assumendo il ruolo a tutti gli effetti di un grossolano programma di modellazione CAD indipendente. Dato che lo scopo di questo lavoro di tesi è l'elaborazione di un tool progettuale per l'Additive Manufacturing e non di programmare un software completo di modellazione tridimensionale, il codice Matlab è stato pensato per funzionare solo in ambiti ben circoscritti e non di costituire un programma perfettamente funzionante per ogni caso in analisi. Ne deriva quindi la possibilità che i file .STL ottenuti con questa procedura possano contenere al loro interno qualche errore non previsto, rendendo quindi indispensabile un controllo preliminare sulla geometria. Ansys SpaceClaim è un programma di ausilio fondamentale a tale scopo dal momento che è in grado di riconoscere molteplici errori durante la fase di importazione. Di conseguenza prima di ogni simulazione agli elementi finiti si è utilizzato tale software allo scopo di fare un controllo del CAD e verificare in particolare il corretto collegamento di ciascun vertice che discretizza la geometria. In generale l'importazione di elementi semplici non ha evidenziato problemi di alcun tipo, permettendo quindi il passaggio diretto alla fase di creazione della mesh e di imposizione delle condizioni al contorno. È capitato un paio di volte per modelli di riempimento molto complessi o fitti la presenza di superfici compenetranti. Tale errore si verifica in superfici discretizzate in maniera imprecisa, le quali portano alla compenetrazione reciproca e alla mancata creazione di una giunzione tra le due. La criticità emerge tuttavia durante la fase di creazione della mesh, dal momento che questa, discretizzando la geometria di input, si compenetrerà portando al collasso della risoluzione e quindi al blocco della simulazione. Si è notato come questa problematica sia stata risolta nella maggior parte delle volte, agendo sul parametro di tolleranza che regola il merging di nodi molto vicini tra loro che tuttavia dovrebbero coincidere (Si rimanda ai paragrafi precedenti per eventuali approfondimenti). Per la precisione, utilizzando un valore superiore la problematica è stata subito risolta. Restano comunque tuttavia dei casi dove questo accorgimento ha solo ridotto la compenetrazione senza risolverla del tutto. Fortunatamente il

numero di triangoli coinvolti dopo la correzione risulta bassissimo, e addirittura pari a 2. A questo punto viene aiuto Ansys SpaceClaim, il quale mette a disposizione uno strumento in grado di analizzare la discretizzazione, rilevare i triangoli autointersecanti e apportare automaticamente la correzione. Il suo utilizzo, perciò, elimina definitivamente il problema portando così la geometria al corretto funzionamento. Una precisazione a questo punto è doverosa, perché il primo impulso di fronte alla presenza di questo tool è di utilizzarlo senza fare delle modifiche alla tolleranza di Merging. Si è constatato che il funzionamento è perfetto quando si è in presenza di pochissimi triangoli difettosi. Un numero troppo elevato infatti, porta a una modifica radicale della geometria del componente, la quale perde così lo scopo di simulare il riempimento che si va a creare con lo stampaggio tridimensionale. Lavorando con meno di una decina di elementi autointersecanti, la morfologia non viene assolutamente intaccata e il problema è comunque risolto.

Il CAD che simula il riempimento a questo punto è perfettamente funzionante e pronto per essere trasformato in un elemento Superficie, tipica configurazione che Ansys utilizza per codificare geometrie superficiali. Anche l'involucro esterno deve essere perciò valutato allo stesso modo dal software. Emerge tuttavia una differenza dalla sua controparte in esso contenuta, ovvero il suo essere "Impermeabile". Già definita durante l'analisi del taglio Booleano, si definisce un elemento impermeabile, quando è in grado di dividere lo spazio tra esterno e interno alla sua geometria. Il componente in esame deve essere un volume ben definito, in modo tale da essere in grado di comportarsi come un involucro. Come si è detto appunto il provino scelto possiede questa proprietà, data la sua forma di parallelepipedo cavo. Ansys, come normalmente tutti i programmi ad elementi finiti che lavorano con i CAD, riconosceranno l'impermeabilità del componente e come conseguenza lo trasformano come un elemento di tipo Solido. Se il pezzo in esame fosse pieno, questa discretizzazione non rappresenterebbe un errore, tuttavia, data la presenza del riempimento, conviene mantenere la codifica tramite Superfici. di conseguenza sarà necessario utilizzare l'opzione "Separa Elementi" di SpaceClaim, per codificare solo la superficie esterno del parallelepipedo.

A questo punto tutta la geometria del componente è completamente codificata per mezzo di superfici, cosa che permetterà in seguito la creazione di una mesh basata sull'elemento Shell. Prima di poter effettuare in maniera effettiva alla discretizzazione tramite elementi finiti però, occorre stabilire il comportamento che le superfici avranno con l'interazione reciproca. Fino a questo punto infatti non è stata imposta ancora nessuna condizione riguardo al contatto, facendo sì che i due blocchi geometrici, ovvero infill e involucro esterno non siano in grado di riconoscersi. Avendo inoltre scelto di utilizzare le Superfici per la trave risulta necessario stabilire anche per la legge di contatto.

Per procedere al legame da imporre è prima doveroso ricordare che il componente verrà prodotto per mezzo della Additive Manufacturing, ovvero attraverso alla deposizione di un filamento caldo, il quale raffreddandosi andrà a creare una giunzione con tutti gli altri

immediatamente adiacenti. La struttura finale, perciò, è realizzata attraverso una saldatura di un insieme di tante piccole parti. La modellazione che immediatamente deriva da tale configurazione è quella dell'incastro, ovvero la completa unione di due parti senza possibilità di movimenti relativi. Tutte le superfici in esame che costituiscono il modello devono essere unite senza che vi sia alcuna possibilità di movimento reciproco. L'approccio, tuttavia, sarà di due tipi, dal momento che di ognuna delle due parti in esame ci interesseranno solo determinati aspetti:

1. Superfici dell'involucro esterno: la giunzione tra i bordi che uniscono i piani dell'involucro esterno reciprocamente sarà fatto imponendo una condivisione della topologia geometrica. Questa condizione si traduce nella condivisione nodale della mesh, lungo le linee in comune.
2. La giunzione tra il riempimento e le superfici esterne sarà, come detto prima, fatta attraverso un incastro imposto sui bordi dei primi, ma non avverrà per mezzo della condivisione topologica, bensì attraverso un accoppiamento dei movimenti.

L'utilizzo di un accoppiamento differente rispetto alla condivisione topologica ha il notevole vantaggio di disaccoppiare la mesh tra i due blocchi geometrici. Questo porta quindi alla possibilità di realizzare una discretizzazione più fine nei punti critici del riempimento, senza dover aumentare la finezza anche nelle superfici superiori. Trattandosi comunque di una simulazione di una prova relativamente semplice, l'affinamento della mesh nella zona interna del provino non è stata necessaria e ci si è limitati a usare una dimensione della mesh uguale per tutto il componente. Si ricorda infine che il collegamento tra riempimento e involucro esterno non viene fatto più all'interno di SpaceClaim, bensì in Ansys Mechanical, il quale costituisce l'ambiente, dove è possibile inserire le condizioni al contorno, i carichi e infine avviare la risoluzione attraverso gli elementi.

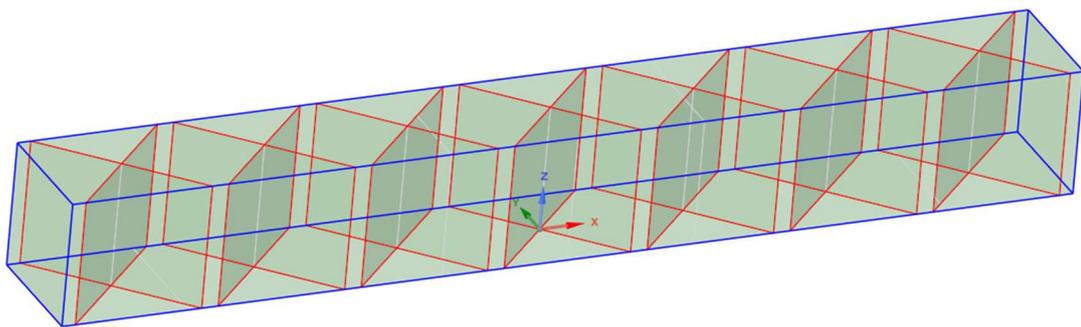


FIGURA 38: VINCOLI DI CONTATTO

La geometria, ora convertita in un insieme di superfici, viene trasferita all'interno di Mechanical, al fine di procedere con la simulazione della prova vera e propria. Tale passaggio costituisce il nucleo centrale dell'applicazione degli elementi finiti, dal momento che la struttura deve essere

discretizzata attraverso gli elementi Shell, prima di poter essere valutata sotto l'effetto dei carichi. Prima della creazione della mesh occorre aprire una parentesi sulla modellazione dei vincoli da applicare al modello. Per fare ciò occorre ritornare alla prova di flessione a 4 punti e, in particolare, al contatto tra il pezzo e i rulli. Si è detto in precedenza il parallelepipedo è solo appoggiato sui cilindri di sostegno, garantendo così al componente di ruotare intorno all'asse Y (il sistema di riferimento rimane quello descritto durante la manipolazione all'interno di SpaceClaim. Essa è infatti semplicemente importata nell'ambiente attuale). Analizzando in dettaglio la superficie dove i due elementi si interfacciano, emerge subito la somiglianza con un rettangolo dove la lunghezza supera di molti ordini di grandezza l'altezza, portando così ad approssimarsi con una linea. Il primo appoggio, perciò, sarà modellato attraverso una cerniera, la quale blocca tutti i gradi di libertà traslazionali, lasciando liberi i duali rotazionali. Il secondo invece sarà modellato con un carrello, il quale possiede tutte le caratteristiche della cerniera eccetto per una traslazione libera, posta lungo l'asse X.

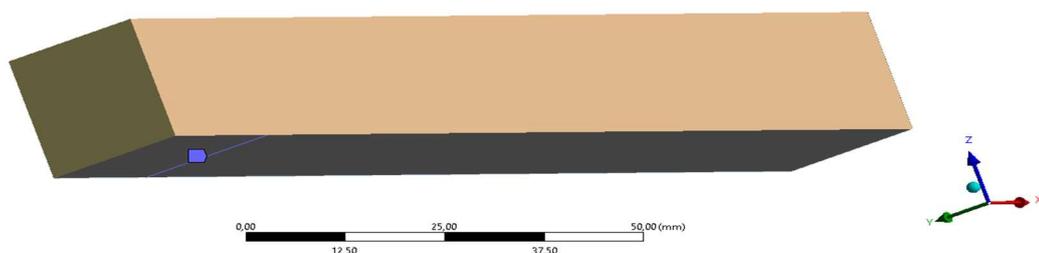


FIGURA 39: VINCOLO CERNIERA

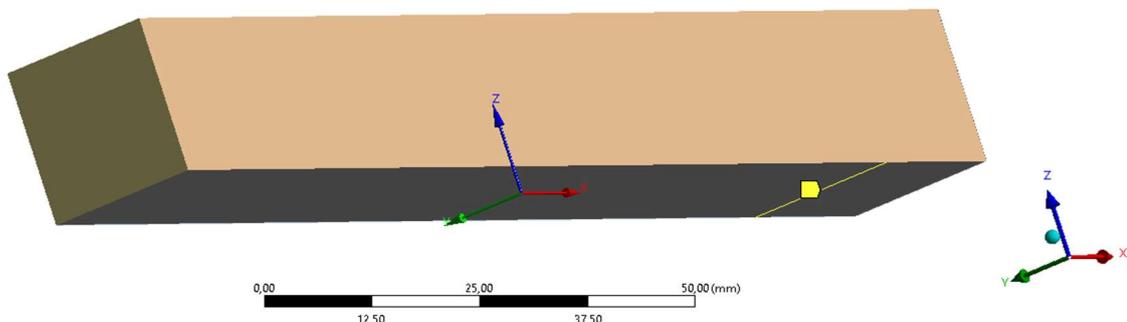


FIGURA 40: VINCOLO CARRELLO

Le conseguenze di questo approccio portano a due approssimazioni necessarie:

1. L'approssimazione del rettangolo di contatto con una linea esclude totalmente le equazioni della meccanica del contatto durante la risoluzione. Tale conseguenza ha il vantaggio di abbassare notevolmente i tempi computazionali durante l'elaborazione. Una soluzione ottenuta senza la meccanica del contatto è infatti ottenuta nell'arco di pochi secondi, contro l'ordine di grandezza dei minuti. La penalizzazione tuttavia ricade sui rulli, i quali non possono così essere più introdotti all'interno del modello a causa di

questa scelta. Di conseguenza si assiste a un calo della qualità della simulazione dal momento che si è introdotta un'approssimazione importante. Resta tuttavia da notare che i vincoli introdotti sono comunque il miglior sostituto possibile, di conseguenza la qualità resta comunque molto elevata. Il risparmio di tempi computazionali elevati inoltre rappresenta un guadagno immenso per tutto il lavoro di tesi, dal momento che permette di effettuare un numero molto elevato di test e di analisi di sensitività in un lasso di tempo molto breve.

2. L'approssimazione del contatto attraverso una linea impone l'uso di una legge di attrito lineare o addirittura l'uso di un modello senza la sua presenza. Nel caso in esame si è deciso di trascurare completamente l'attrito, portando ancora una volta a un beneficio sugli oneri computazionali che traduce nella possibilità di osservare molteplici casi di studio. L'impatto, tuttavia, ricade immediatamente sull'andamento delle tensioni. L'attrito infatti implica la generazione di una forza che si oppone al movimento. Nel nostro caso, perciò, il punto di applicazione corrisponde alla linea dove è posizionato il carrello, giace lungo l'asse X e punta sempre verso l'esterno del provino. La mancanza di questo carico porta subito a una diminuzione degli sforzi tangenziali nelle vicinanze del punto dove avrebbe dovuto esserci il rullo di appoggio, portando così a una tensione di Von Mises più bassa e quindi a una minore probabilità di snervamento. È importante, tuttavia, osservare che la mancanza della frizione porta subito alla definizione in maniera più semplificata del tratto utile del parallelepipedo. Si ricorda infatti che la zona di applicazione del carico ha ovviamente un impatto sulle tensioni circostanti, cosa che non deve verificarsi nel tratto utile. Questa osservazione vale soprattutto quando si modellano i rulli di spinta, la cui distanza è cruciale nella sua definizione.

Come si è potuto analizzare perciò la scelta di un modello di vincolo semplice degli appoggi ha portato subito all'obbligo di omettere i rulli inferiori. Una conseguenza che emerge successivamente, ma che riveste comunque un'importanza fondamentale nella scelta del modello, è il mantenimento della coerenza nell'applicazione del carico. Ciò vale a dire che se i cilindri inferiori sono stati completamente trascurati, allora sarà necessario fare la stessa cosa anche per i rulli di spinta. Sulla base di questa osservazione si è deciso di adottare un'alternativa alla teoria del contatto e di inserire i carichi mediante uno spostamento concentrato nei punti dove si trova la linea di interfaccia. Si è infatti osservato anche questa volta che il rettangolo di contatto assume le stesse caratteristiche della sua controparte situata negli appoggi, portando così al suo collasso in una linea. I rulli di spinta saranno così sostituiti con l'applicazione di uno spostamento imposto lungo l'asse Z, lasciando le altre direzioni libere di muoversi.

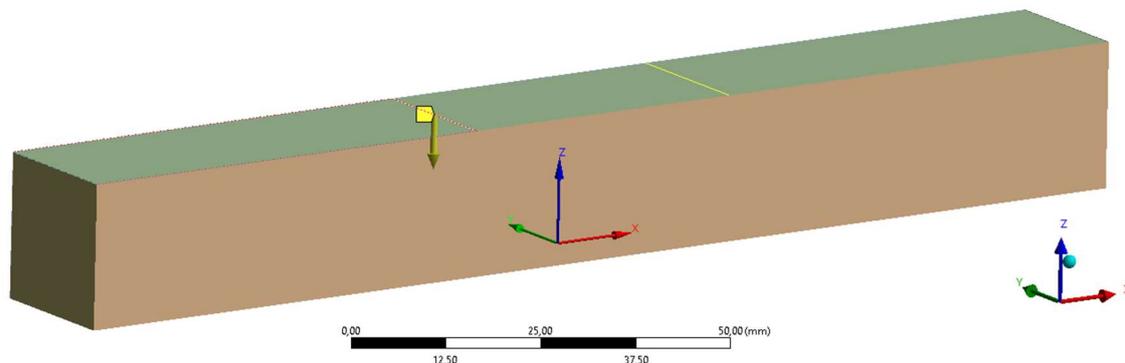


FIGURA 41: SPOSTAMENTI IMPOSTI

L'uso di una traslazione ben definita piuttosto che il posizionamento di due forze di pari intensità nasce prima di tutto con la facilità con cui è possibile interfacciarsi con essa. Ragionare in millimetri è molto più semplice che pensare in Newton, dal momento che è possibile avere un riscontro immediato con la realtà. In secondo luogo, questa scelta è dettata da due aspetti molto importanti del lavoro di tesi:

1. Il calcolo della rigidezza: avendo a che fare con questa grandezza, la quale possiede a denominatore un parente dello spostamento, è immediato che l'utilizzo di un riferimento di tipo spaziale piuttosto che dinamico rende più facile l'approccio.
2. Nelle prove sperimentali è molto più facile ricavare tale grandezza piuttosto che la forza agente sul provino. Questo perché consente di utilizzare strategie di tipo grafico per ottenerla. Banalmente basta segnare il provino in un determinato punto, fissare un riferimento per ottenere la sua posizione iniziale e misurare lo spostamento a fine della prova. Il calcolo delle forze invece rende indispensabile l'utilizzo di strumenti molto più sofisticati come dinamometri.

I carichi applicati perciò saranno definiti per mezzo di uno spostamento lungo le due linee che rappresentano il contatto cilindro di spinta-pezzo. Le conseguenze, e i limiti, che ne derivano sono quelli elencati in precedenza, ovvero la mancanza della teoria del contatto nella risoluzione e l'omissione delle forze di attrito. Tutto questo porta ancora una volta a un poderoso beneficio degli oneri computazionali, senza comunque impattare in maniera eccessiva sugli andamenti degli sforzi. È bene tenere a mente, tuttavia, che le forze perpendicolari ai piani dove sono applicati, portano inevitabilmente a un incremento delle tensioni lungo le linee di applicazione. Ciò non impatta sulla qualità, dal momento che le zone alterate sono limitate e si riversano in pochissimo spazio occupato dal tratto utile.

Prima di poter passare alla discretizzazione è bene ricordare che la giunzione pezzo-riempimento viene codificata in questa fase, dal momento che si tratta a tutti gli effetti di un vincolo, a differenza delle superfici che costituiscono l'involucro esterno, per le quali è stata usata la condivisione topologica. Questa opzione, infatti, concepisce i bordi come non esistenti e permette così una mesh non interrotta lungo tutti i piani esterni. Si è detto in precedenza che si è optato per un approccio che lasciava libero l'utente di scegliere la grandezza di mesh preferita per ciascuna parte della struttura. Conseguenza la giunzione tra riempimento ed esterno sarà ancora una volta un incastro, ma realizzato attraverso un "incollaggio" vero e proprio dei gradi di libertà: si specificherà in Ansys che i gradi di libertà dei nodi posti sul bordo esterno del riempimento dovranno essere uguali agli spostamenti sulla superficie esterna. Questo porterà così a un accoppiamento vero e proprio, senza dover passare per la creazione di un'unica mesh su tutto il componente, procedura molto più laboriosa, perché deve tenere conto di tutte le particolarità geometriche. Si ricorda infatti che in alcune zone si ha la presenza di intersezioni di più superfici, condizione che porta immediatamente alla creazione di elementi molto distorti che impattano sulla qualità dell'andamento delle tensioni.

Fino a questo momento si è passati attraverso alla procedura di generazione del CAD di riempimento, seguito alla sua manipolazione per renderlo compatibile e di conseguenza interfacciabile con l'involucro esterno. In seguito, si sono applicati tutti gli accorgimenti che portano al corretto collegamento delle parti mediante l'introduzione di giunzioni. Infine, facendo le dovute approssimazioni sulla meccanica del contatto e sull'attrito si sono creazioni i vincoli e i carichi che modellano a tutti gli effetti la prova di flessione a 4 punti. Il modello in esame resta ancora privo della mesh necessaria per la sua risoluzione, ma sarà introdotta successivamente, in particolare dopo l'introduzione degli spessori e del materiale. Questa parte rappresenta il nucleo di tutta il lavoro di tesi superando di importanza la creazione della mesh, dal momento che la caratterizzazione del materiale deve rappresentare negli aspetti principali il processo di produzione mediante Additive Manufacturing. La sua importanza è tale perché influenza prima di tutto lo spessore che ciascuna parete andrà ad assumere, conseguenza della tecnologia di realizzazione di ciascuna parte. In secondo luogo, è responsabile delle ipotesi più limitanti del modello, le quali permetteranno uno studio solo parziale del comportamento operativo del componente. Nel paragrafo successivo, perciò, prenderanno corpo gli assunti più importanti della simulazione numerica e saranno spiegati i motivi per cui sono state fatte determinate scelte.

2.5 Materiale

La definizione del materiale non rappresenta solo uno degli ultimi passaggi che precedono la simulazione vera e propria, ma costituisce il cardine di tutta la teoria su cui si basa l'intero lavoro. Non si tratta di assegnare solo un'equazione che regola il comportamento di ciascuna superficie, ma di determinare anche il limite di validità della soluzione, sulla base della scelta tra campo

elastico ed elastoplastico. Proprio questa opzione determina cosa è possibile dedurre dal risultato elaborato dal calcolatore, dal momento che ritenendo valida solo l'ipotesi di elasticità lineare, trascurando così l'influenza della plasticità, non sarà più possibile, ad esempio, valutare il carico massimo che il provino sarà in grado di reggere prima del suo collasso. La scelta è ricaduta per esigenze di semplicità del modello sul campo lineare elastico, la cui legge cardinale è rappresentata dall'equazione di Hooke. Il focus dell'analisi sarà perciò la valutazione della rigidità del componente e la variazione delle tensioni in funzione dell'incremento/decremento della densità di riempimento. Questa ipotesi forte permette ottenere comunque risultati coerenti con il comportamento del componente in fase operativa e allo stesso tempo l'utilizzo della teoria della meccanica del continuo elastico lineare. Proprio per mezzo di essa sarà possibile definire le proprietà elastiche del materiale in maniera immediata e, attraverso le classiche prove di trazione, è possibile fare una caratterizzazione molto rapida. Da tenere a mente è il legame che sussiste tra le principali grandezze elastiche, grazie alla teoria semplificata del continuo, cosa che riduce il numero di prove sperimentali necessarie per ottenerle.

La caratterizzazione del materiale passa prima di tutto attraverso la sua scelta. Questo dovrà essere compatibile con il processo di Additive Manufacturing, così da mantenere la coerenza dell'analisi. Si è deciso perciò di optare per il Nylon Carbon, ovvero un materiale composito, composto da una matrice di Nylon in cui sono annegate fibre di carbonio. Si tratta di un componente estremamente versatile, vista la sua capacità di garantire buone proprietà meccaniche, unite alla facilità di utilizzo nella produzione di componente attraverso la stampa additiva. La sua particolarità più importante, tuttavia, risiede appunto nel suo comportamento ortotropo. La presenza di una struttura composta da una matrice di natura diversa dalle fibre di rinforzo in essa contenuta, rendono le proprietà fortemente direzionate, portando così a diverse caratteristiche di resistenza sulla base del tipo di carico imposto. La principale conseguenza è rappresentata dalla variazione della matrice che descrive il legame costitutivo. L'ortotropia, infatti, introduce per la prima volta un accoppiamento tra le tensioni normali e gli sforzi tangenziali, cosa che non avviene nel caso di un materiale completamente isotropo. Il numero di accoppiamenti determina la differenza tra un materiale ortotropo e anisotropo: la presenza di piani di simmetria nei materiali compositi determina un accoppiamento solo parziale tra le grandezze normali e tangenziali, introducendo così nella matrice del legame costitutivo alcuni zeri che, matematicamente descrivono appunto il disaccoppiamento. Al contrario nei casi limite rappresentati da anisotropia e isotropia, la presenza di termini nulli si verifica solo nel secondo caso, dal momento che il materiale possiede infiniti piani di simmetria. Al contrario tutti gli sforzi saranno completamente accoppiati nel caso di un materiale anisotropo. Allo scopo di chiarire maniera esaustiva il rapporto che esiste tra il comportamento e la sua controparte rappresentata dal legame costitutivo, è necessario ricordare che nei materiali ortotropi gli zeri si presentano solo con un riferimento ben preciso. Se tale condizione è violata, come accadrà successivamente, il materiale in esame sarà descritto come anisotropo. Questa osservazione è

necessaria perché spesso la tipologia di riempimento possiede le sue superfici inclinate, rendendo inevitabile l'uso di una rotazione delle proprietà. Tutto questo si traduce in un approccio completamente diverso nell'inserimento delle grandezze elastiche all'interno di Ansys e soprattutto, nell'importanza di utilizzare il sistema di riferimento corretto per ciascun elemento. Nel paragrafo dedicato alla mesh questo aspetto sarà analizzato in maggior dettaglio. La scelta di un materiale non porta in maniera automatica all'ottenimento delle sue proprietà, dal momento che i dati forniti dal produttore si riferiscono normalmente solo alla fibra di rinforzo, la quale si occupa di resistere alla maggior parte delle sollecitazioni presenti. Ne consegue perciò che devono essere fatte prima di tutto delle ipotesi semplificative, e, successivamente elaborare le prove sperimentali atte a estrapolare i moduli di elasticità. Si deve ritornare perciò alla struttura costitutiva del Nylon Carbon, e soprattutto metterlo in relazione con la tecnologia di applicazione.

Come si è specificato in precedenza il Nylon Carbon è costituito da una matrice di Nylon che avvolge le fibre di rinforzo costituite da carbonio, da cui deriva appunto il suo nome. Così descritto il materiale è anisotropo dal momento che non è stata specificata la direzione delle fibre, cosa che porta a un comportamento diverso per ogni direzione di sollecitazione. Emerge appunto in questo momento l'importanza di filtrare le proprietà in funzione della tecnologia per cui sarà utilizzato, perché il processo è appunto in grado di modificarle.

Il processo di stampa di un componente tramite Additive Manufacturing si basa sulla deposizione di un filamento caldo, il quale andrà a costituire uno strato. La sovrapposizione di una moltitudine di layer porterà così alla creazione definitiva del pezzo. Emerge subito la direzionalità di questa tecnologia: il movimento dell'ugello, infatti, impone al filamento caldo un percorso di deposizione, portando inevitabilmente all'orientazione delle fibre in esso contenute grazie agli sforzi di taglio agenti. Il carbonio, perciò, avrà inevitabilmente una direzione, lungo la quale esibirà non solo le sue caratteristiche di resistenza migliore, ma impone automaticamente al materiale un piano di simmetria, rendendolo ortotropo.

La realizzazione di un componente porta inevitabilmente alla deposizione di molti filamenti adiacenti tra loro, in modo da riprodurre la struttura elaborata negli ambienti CAD nel modo più fedele possibile. L'estrusione di un materiale inevitabilmente caldo lo porterà automaticamente a interagire con l'ambiente circostante, in particolare con i filamenti immediatamente vicini. Questa interazione innesca una saldatura che porterà le matrici a unirsi e ad affiancare di conseguenza le fibre di rinforzo. Il fenomeno è esasperato nel caso in cui l'ugello interseca il suo percorso, portando così il filamento a saldarsi in maniera completa con sé stesso, creando così delle giunzioni isotrope. Ne risulta quindi che, il materiale potrà essere considerato come isotropo lungo il piano di deposizione, assumendo così una struttura a Sandwich dove lamine di matrice si alternano a strati di carbonio. Il Nylon Carbon, tendenzialmente anisotropo è modellizzato perciò come un materiale trasversalmente isotropo, ovvero le sue proprietà non variano finché la direzione di sollecitazione giace sul piano di estrusione. Di conseguenza i piani

di simmetria saranno infiniti finchè rimangono perpendicolari ai layer. Si ricorda che tale modellazione costituisce un'approssimazione del reale comportamento, ma risulta essere molto efficace per la manipolazione della matrice del legame costitutivo. Avendo istituito un piano dove le costanti di rigidità non variano in funzione della direzione scelta, si assume come conseguenza un legame matematico tra le stesse, riducendo così il numero delle prove necessarie per ricavarle.

A questo punto perciò è possibile, per mezzo della prova di trazione, ottenere le costanti elastiche. Tuttavia, il materiale, per quanto sia stato semplificato, si comporta ancora in modo ortotropo, rendendo così necessario fare almeno 2 test, uno che impone uno sforzo assiale lungo una direzione che giace sul piano per ricavare le proprietà forti derivanti dalla sollecitazione delle fibre di rinforzo, e uno perpendicolare per le deboli. Queste, infatti, sviluppano parallele al piano di crescita dei layer dal momento che, a essere messa alla prova risulta soprattutto la matrice.

Per avere i provini in grado di sollecitare il materiale in due configurazioni differenti basterà ricorrere alla Additive Manufacturing: un provino sarà stampato con l'asse giacente sul piano di estrusione XY in modo che il piano di carbonio costituirà la parte resistente del tratto utile. Viceversa, stampando il provino con l'asse perpendicolare a XY, la prova di trazione solleciterà la matrice di nylon, lasciando le fibre praticamente intaccate. In questo modo non solo si vanno a ottenere le proprietà in funzione di direzioni ben precise, ma attraverso la stampa 3D, si lavora con provini adeguati all'ipotesi di isotropia trasversale formulata per la modellazione. Con questa procedura sarà possibile ottenere il modulo di Young e le costanti di Poisson lungo le direzioni proposte dal riferimento scelto, mentre il modulo di elasticità tangenziale sul piano XY sarà ricavato dal legame che sussiste tra le grandezze a causa dell'ipotesi di isotropia. I moduli di taglio definiti lungo la direzione Z sono invece estrapolati dalla formula di interpolazione sperimentale proposta da Huber, risparmiando così l'onere di realizzare un'ulteriore prova sperimentale.

Il materiale ora possiede le sue proprietà elastiche lungo le direzioni del riferimento cartesiano, il quale possiede gli assi X e Y, giacenti sul piano di estrusione e Z perpendicolare. Ne risulta così che i primi due sono responsabili della descrizione delle proprietà forti del modello, derivanti dalle fibre di Carbonio e spettano a Z le caratteristiche più deboli governate dalla matrice. La scelta delle direzioni, tuttavia, è valida solo per una parte di superfici che compongono il parallelepipedo, dal momento che molti piani di riempimento sono inclinati rispetto a XY. I wall laterali avranno le proprietà elastiche lungo direzioni ruotate di 90° rispetto a quelle descritte in precedenza. Sorge perciò il problema di ruotare le caratteristiche del materiale in funzione di un angolo, ovvero passare dal riferimento di default utilizzato nelle prove di trazione a uno generale.

Le proprietà elastiche sono introdotte attraverso la matrice di cedevolezza, la quale permette di ricavare le deformazioni a partire dagli sforzi. Scelto perciò il sistema di riferimento finale, è

possibile applicare le regole di rotazione dei vettori, ottenendo così la sua formulazione adattata per ciascuna superficie. L'angolo di rotazione sarà determinato dal piano che l'elemento finito deve discretizzare. Per la sua definizione si fa riferimento alla convenzione utilizzata per trattare l'estrazione del riempimento. Per Semplificare i calcoli, è stato scelto come asse di rotazione il versore X dal momento che giace parallelo agli strati che compongono il materiale ortotropo. Avendo a che fare con strutture "rettilinee", Y e Z sono esclusi dalla trattazione. La nuova matrice delle componenti elastiche infine è ottenuta da un codice Matlab che, sulla base dell'angolo inserito, ruota le proprietà della quantità desiderata. Il cambio del riferimento porta il materiale a comportarsi in maniera apparentemente anisotropa: ciò è dovuto infatti alla comparsa di termini extra-diagonali che legano le componenti di taglio con le tensioni normali. Tuttavia, si tratta solo di una conseguenza matematica, il materiale infatti conserva ancora la sua ortotropia, ma non è captata con il nuovo riferimento. Ansys tratta in maniera molto semplice i materiali anisotropi: dopo aver scelto se utilizzare una formulazione di rigidità o di cedevolezza, viene proposto uno spazio dove inserire i valori che compongono la matrice inferiore. Si ricorda infatti che tali matrici devono per forza essere simmetriche, pena la violazione dell'equilibrio alla rotazione del cubetto infinitesimo, alla base della teoria del continuo. È importante infine tenere a mente che le componenti di sforzo utilizzate da Ansys sono definite secondo il riferimento locale dell'elemento, quindi dovranno a loro volta essere orientate, allo scopo di ottenere la struttura a layer tipica di un componente prodotto per Additive Manufacturing. Avendo infatti scelto X come asse parallelo a ogni strato sarà necessario che i riferimenti di ciascun elemento rispettino questa condizione. Per fare ciò è stato utilizzato un codice Ansys in grado di riconoscere l'inclinazione spaziale di ogni Shell e adattare il suo asse X. Questo passaggio, nonostante sia effettuato durante la discretizzazione è stato descritto nel paragrafo dedicato al materiale, visto il loro stretto legame.

La scelta dello spessore da assegnare a ciascuna superficie si basa sull'osservazione sperimentale di provini stampati in Additive manufacturing in materiale Nylon Carbon con la stessa geometria qui analizzata.

Superficie	Spessore (mm)
Superiore	1
Inferiore	1.2
Laterali	1.2
Riempimento	0.85

2.6 Mesh

Avendo utilizzato un CAD costituito da una struttura superficiale, il tipo di elemento usato per la discretizzazione sarà uno Shell, in particolare è stato usato lo Shell181. Utilizzando elementi piastra non saranno perciò prese in considerazione le tensioni agenti nella direzione dello

spessore, riducendo così gli oneri computazionali, senza avere comunque un errore eccessivo sui risultati.

La relazione di forma che costituisce Shell181 è di tipo lineare: ciò porterà a una velocità di convergenza minore, tuttavia, non costituisce un problema dal momento che basta una mesh poco fitta per ottenere il risultato corretto.

La problematica principale legata alla creazione della mesh è la quantità di elementi necessari per avere il corretto andamento delle tensioni. Una discretizzazione molto fitta infatti interpolerà in maniera corretta i risultati, ma impatterà molto sui tempi di calcolo. Spesso inoltre non è nemmeno necessario una quantità di nodi molto elevata per avere la convergenza. Al contrario, una mesh poco fitta può portare a una sovrastima molto forte della rigidità del componente, assolutamente non voluta in questo ambito, dove è il principale parametro da analizzare.

La dimensione della mesh, perciò, deve essere un compromesso tra correttezza e velocità di calcolo. Nella nostra trattazione si è deciso di usare un mesh size compreso tra 1.2 mm e 1.5 mm. L'intervallo, oltre a tenere in considerazione i requisiti sopra elencati, tiene conto delle "imperfezioni" geometriche che andranno a distorcere gli elementi. Nel caso dei riempimenti "Ottagonale" e "Quarto di Cubo" infatti, le intersezioni tra superfici portano ad avere zone a forma triangolari, distorcendo la mesh in quelle parti, portando a un incremento insensato di tensione o addirittura alla presenza di elementi triangolari. Una riduzione della mesh size porta perciò a una parziale risoluzione del problema: data la forma peculiare, infatti, è spesso impossibile avere una mesh completamente sana. È stato perciò necessario prestare maggiore attenzione durante l'analisi dei risultati.

I riempimenti a superfici perpendicolari come "Griglia" o "Cubo" non hanno portato alla luce nessun tipo di problema legato alla discretizzazione. Il loro parametro di mesh, infatti, sarà sempre il più grande possibile o comunque leggermente inferiore quando la densità diventa molto alta.

Come si è detto in precedenza alla creazione degli elementi segue la fase di ordinamento dei riferimenti locali, così da ottenere l'asse X parallelo a ciascun layer. Ogni tipologia di riempimento ha richiesto l'uso di un codice Ansys apposito in cui si riconoscono alcuni passaggi comuni:

1. Viene fatta un'analisi di appartenenza su ciascun elemento. Se costituisce le superfici esterne del componente viene saltato. In questo modo è possibile risparmiare molto tempo visto che il ciclo FOR ha un ordine di grandezza pari a 100000 unità
2. Degli Shell che discretizzano il riempimento, sono ricavati i coefficienti numerici dell'equazione caratteristica del piano, dai quali è possibile ricavare la rispettiva tangente sul piano XY (si pone $Z=0$). Secondo il valore ottenuto si orienta nel modo corretto l'asse X. In presenza dei casi "Ottagonale" e "Quarto di Cubo" sarà calcolata

anche la tangente dell'intersezione col XZ, dal momento che la pendenza in XY non basta.

Con questa procedura non si ordina solo l'ascissa ponendola parallela agli strati, ma le si assegna anche il verso tale da avere la rotazione del materiale secondo un angolo positivo.



FIGURA 42: CONVENZIONE ANGOLARE PER AVERE X SEMPRE USCENTE

Nel caso del riempimento "Quarto di Cubo" infatti, i coefficienti numerici dei piani sono uguali a coppie con c discorde. Ciò implica che avranno la stessa tangente in XY e opposta in XZ. Di conseguenza i versi dell'ascissa dovranno essere discordi, per avere angolo positivo secondo la convenzione angolare scelta. Con questa metodologia è possibile, perciò, inserire una sola matrice di cedevolezza ruotata, dal momento che sono stati adattati i versi.

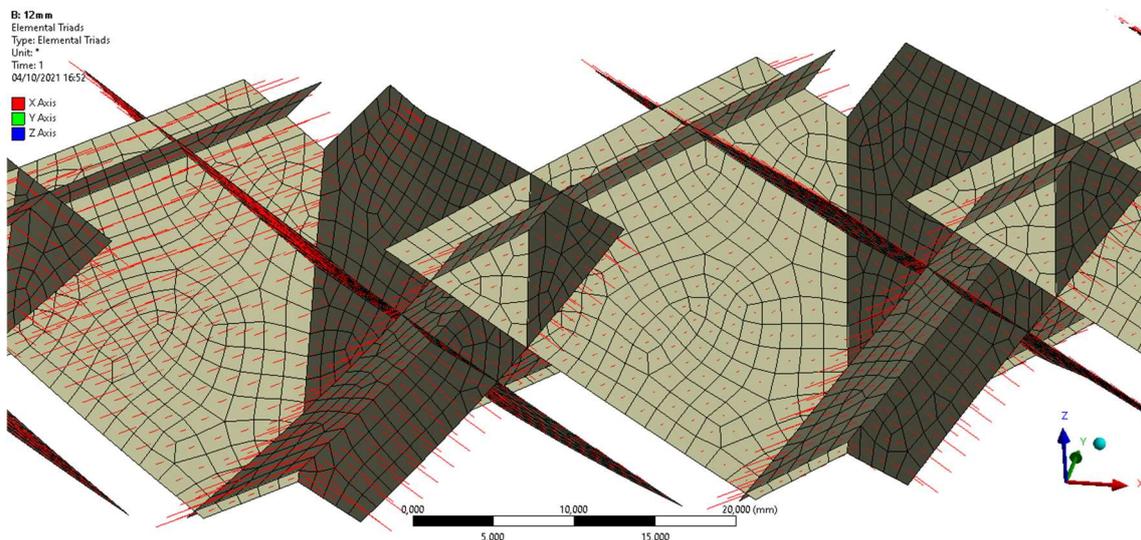


FIGURA 43: VERSI DI X SU QUARTO DI CUBO

2.7 Proprietà dei materiali utilizzati

MATRICE DI CEDEVOLEZZA NC_54,625°						
0,00045147	//	//	//	//	//	Sigma xx
-0,00018059	0,00069228	//	//	//	//	Sigma yy
-0,00018059	-0,00016751	0,00056638	//	//	//	Sigma zz
0	0,00018939	0,00017113	0,0016396	//	//	Tau yz
0	0	0	0	0,0013725	//	Tau xz
0	0	0	0	0,0001525	0,001479	Tau xy

MATRICE DI CEDEVOLEZZA NC_54,8544°						
0,00045147	//	//	//	//	//	sigma xx
-0,00018059	0,00069379	//	//	//	//	sigma yy
-0,00018059	-0,0001675900	0,00056501	//	//	//	sigma zz
0	0,00018906	0,00017043	0,0016393	//	//	tau yz
0	0	0	0	0,0013713	//	tau xz
0	0	0	0	0,00015208	0,0014802	tau xy

Proprietà	NC_p (superficie parallela a XY)
Ex (MPa)	2215
Ey (MPa)	2215
Ez (MPa)	1200
Nuxy, Nuyz, Nuxz	0.4, 0.22, 0.22
Gxy (MPa)	791
Gyz (MPa)	630
Gxz (MPa)	630

Proprietà	NC_np (superficie perpendicolare a XY)
Ex (MPa)	2215
Ey (MPa)	1200
Ez (MPa)	2215
Nuxy, Nuyz, Nuxz	0.22, 0.22, 0.4
Gxy (MPa)	630
Gyz (MPa)	630
Gxz (MPa)	791

Risultati

La valutazione dei risultati costituisce la parte finale del lavoro di tesi. La sua struttura è divisa in due parti:

1. la verifica del corretto comportamento del modello. Saranno analizzate tensioni e rigidità allo scopo di validare la scelta dei vincoli imposti, soprattutto il collegamento tra riempimento e involucro esterno. Verrà inoltre utilizzata la soluzione di DSV, LA quale, essendo analitica, costituisce una soluzione esatta e può essere usata come metro di paragone. Una particolare rilevanza è assunta dal CAD del riempimento, il quale, essendo prodotto con un codice Matlab, può presentare imperfezioni o comportamenti inaspettati.
2. Sulla base della rigidità e degli andamenti tensionali sono tratte le conclusioni effettive sulle simulazioni effettuate. In particolare, si darà una spiegazione sui comportamenti assunti dal provino a seconda della sua configurazione. Infine, scelta la densità di riempimento migliore, si farà il confronto con la sua controparte sollecitata trasversalmente. Si valuterà quindi la sua reazione in condizioni operative non ottimali rispetto alla sua direzione di stampa.

Prima di procedere con gli step proposti occorre però dare una definizione della rigidità utilizzata all'interno di questo lavoro e di come essa viene estrapolata a partire dai risultati.

3.1 Definizione di rigidità

Si definisce rigidità il rapporto tra il carico applicato dalla macchina di flessione a 4 punti e la curvatura assunta dal provino nel suo tratto utile, dove per curvatura si intende l'inverso del raggio della circonferenza che interpola gli spostamenti. L'unità di misura di questa grandezza sarà perciò $N/(1/m)$.

La scelta di fare uno studio di rigidità del componente deriva dalle ipotesi di partenza, in particolare dalla scelta di rimanere in campo lineare elastico. Trascurare la plasticità, infatti, implica l'impossibilità di calcolare il carico di rottura del componente e quindi di caratterizzarlo in maniera completa. L'utilizzo della rigidità resta comunque un ottimo indicatore del comportamento operativo e un ottimo parametro di confronto tra le varie configurazioni. Ciò è dovuto alla globalità di questo parametro: non si tratta infatti di una caratteristica puntuale come lo sforzo, ma caratteristica di tutto il componente, dal momento che viene ricavato con parametri immediati e che hanno ben poco in comune con gli elementi costitutivi infinitesimi. Non si deve inoltre trascurare la semplicità con cui è possibile ricavarlo. Nonostante la prova di flessione sia realizzata a spostamento imposto, i macchinari sono muniti di dinamometri da cui

è possibile ottenere il carico applicato al provino. Nella controparte numerica risulta ancora più immediato dal momento che è possibile ottenere sempre la forza applicata.

Diverso invece è ottenere gli spostamenti conseguenti dall'azione del macchinario. Per definizione della rigidezza, il tratto utile viene approssimato attraverso una circonferenza. Nasce quindi la necessità di ottenere i 3 punti fondamentali per ricavare i coefficienti numerici e infine il raggio. Per facilitare il rilievo sperimentale, si è deciso che i 3 punti avranno X rispettivamente pari a -20mm 0mm e +20mm, Z pari a 0mm e Y uguale a -20mm. Le coordinate giacciono tutte sullo spigolo inferiore del tratto utile. Con questa procedura è immediato rilevare gli spostamenti nella sperimentazione: marcando i 3 punti basterà fotografare in sequenza ogni step e infine estrapolare il valore. Il punto centrale inoltre avrà teoricamente spostamenti lungo X e Y nulli, visto che viene applicata solo momento flettente. È bene tuttavia ricordare che ciò avviene solo in configurazioni di riempimento simmetriche, cosa che accade in pochissimi layout.

3.2 Verifica del comportamento

La rigidezza è un ottimo indicatore per capire in maniera intuitiva se il modello numerico è stato implementato in maniera corretta. Si riconosce immediatamente come all'aumento della densità di riempimento del componente, debba corrispondere un aumento della rigidezza. Una situazione stazionaria o addirittura una decrescita suggeriscono la possibilità di un distacco tra le superfici interne e l'involucro esterno e quindi la violazione del vincolo di incastro reciproco con cui si è definita la loro interazione.

La supposizione fatta trova immediato riscontro nel diagramma delle rigidezze ottenute dalle simulazioni numeriche:

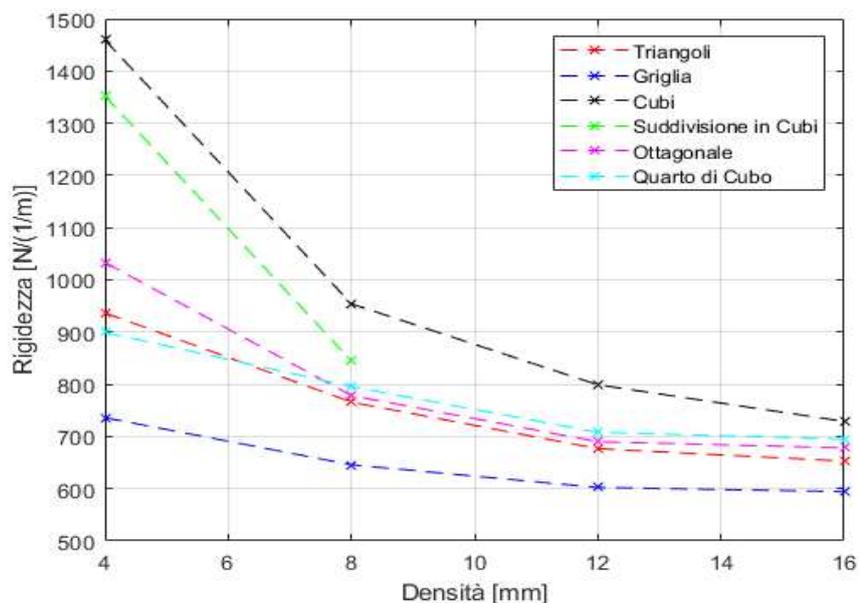


FIGURA 44: DIAGRAMMA DI RIGIDEZZA

Senza soffermarsi sulle gerarchie delineate, si nota subito come a una densità crescente, si affianchi un aumento più o meno regolare della rigidezza. Ciò rappresenta una prima garanzia di successo della modellazione, almeno nella parte di impostazione dei vincoli di contatto. Per analizzare il corretto andamento delle tensioni si fa riferimento ora al riempimento griglia con una densità di 8mm. Per verificare che il comportamento sia adeguato al tipo di sollecitazione imposta si richiama la teoria di DSV, il quale ha proposto una soluzione analitico per una trave caricata alle estremità. In particolare, si ricorda che, in caso di azione di puro momento flettente, gli sforzi lungo la sezione avranno l'andamento a farfalla, ovvero dal massimo nell'estradosso decresce linearmente fino ad annullarsi presso l'asse neutro e infine raggiunge il valore minimo all'intradosso. Tutto ciò deve verificarsi senza la presenza del taglio, dal momento che si assume il disaccoppiamento dell'azione tangenziale dalle altre tensioni. Osservando la tensione di Von Mises lungo il tratto utile del riempimento griglia 8mm, si nota subito come lo stato di sforzo presenti la morfologia a farfalla prima descritta:

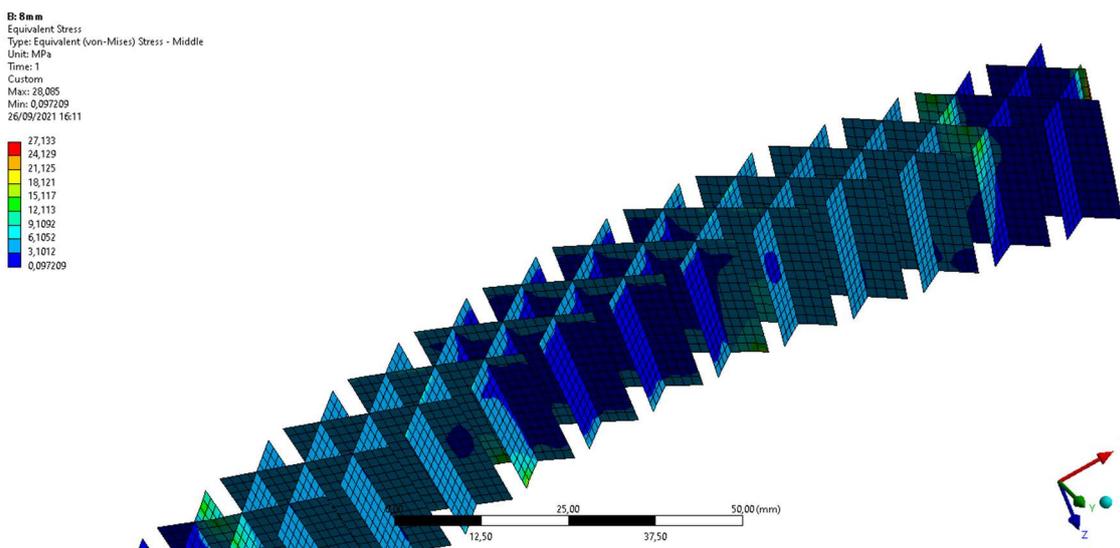


FIGURA 45: GRIGLIA 8MM

Emerge in maniera lampante la simmetria dei colori assunti rispetto all'asse del componente, che lo porta a comportarsi esattamente come un asse neutro. L'assenza di taglio inoltre è garantita proprio dalla simmetria dello sforzo secondo VM, il quale in presenza di esso, perderebbe immediatamente la specularità che lo contraddistingue in questo caso. Se ne deduce perciò che anche i vincoli sono stati formulati in maniera corretta, dal momento che nel tratto utile si verifica la condizione garantita dall'applicazione del puro momento flettente. È bene ricordare tuttavia che la configurazione analizzata è simmetrica sia rispetto al piano YZ che rispetto al piano XY posto nella mezzeria. Sono infatti molteplici le strutture dove tale

caratteristica è persa, e di conseguenza anche l'andamento a farfalla. Tuttavia questo non è dovuto a una modellazione errata, ma solamente alla morfologia del riempimento.

Si può quindi concludere dagli esami svolti che tutte le condizioni di carico e di vincolo, sia esterni che interni, sono state svolte in maniera corretta, perché riportano in maniera simile la distribuzione di tensione della trave di DSV. Si può procedere quindi all'analisi vera e propria dei risultati.

3.3 Analisi dei risultati

Per poter procedere alla discussione delle soluzioni numeriche ottenute dalle simulazioni, occorre prima di tutto spiegare quali saranno i principali confronti svolti, e quali sono i dati di maggior interesse in vista di una conclusione.

Il primo step consiste in una visione d'insieme delle rigidità, in particolare quali gerarchie si sviluppano tra i vari riempimenti. Si osserveranno quindi pendenze e valori numerici e si metteranno in relazione prima tra la stessa configurazione e poi con le altre.

L'analisi delle tensioni è svolta in 2 modi: in prima battuta si osservano valori di tensione massimi e come essi variano in funzione della densità per ciascun layout. Successivamente saranno confrontati per tipologie di riempimento simili, come nel caso triangoli-griglia, dove le superfici sono perpendicolari a XY. Infine, sarà possibile identificare quali sono le densità migliori, confrontarle tra loro e infine verificare il loro comportamento in una condizione operativa non ideale.

Riprendendo quindi il diagramma delle rigidità si procede ora con l'analisi globale.

3.4 Rigidezza

Come si è detto in precedenza, e come era possibile prevedere senza simulazioni numerica, l'aumento della densità porta immediatamente con sé l'aumento della rigidità. Questo, tuttavia, non avviene in maniera uniforme. Dirigendosi verso la destra del grafico, infatti, il componente decresce la sua rigidità raggiungendo un asintoto. Questo è dovuto all'approssimarsi della sezione del provino sempre di più a un tubo cavo, ovvero a un componente senza riempimento. Il valore che si tende assumere verso destra sarà quello della sezione cava sollecitata con puro momento flettente.

Andando verso sinistra invece il ragionamento è esattamente opposto: il componente aumenterà la sua rigidità, fino a comportarsi come una trave a sezione quadrata piena. Gli andamenti, perciò, saranno sempre compresi tra due asintoti, di cui uno verticale e uno orizzontale.

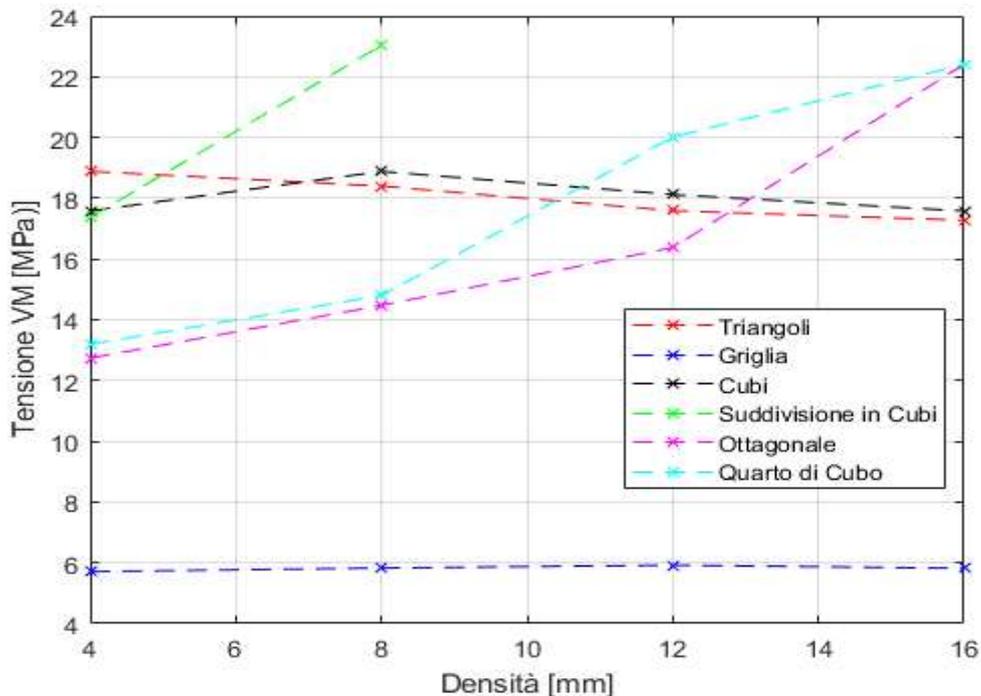
L'irrigidimento non risulta essere costante per tutte le configurazioni: basta osservare che Cubi, ad esempio, ha un impennamento molto forte passando da 8mm a 4mm. Questo è dovuto alle morfologie dei vari layout: il raddoppio della densità implica infatti il raddoppio delle

superfici che sono sollecitate direttamente sul loro piano, portando così a un aumento molto forte sia di rigidità, sia di tensione. Questa caratteristica è tipica delle suddivisioni che generano una struttura a cubo, ma non delle altre. Infatti, osservando gli altri andamenti, l'incremento è ancora forte, ma non in maniera così marcata. Anzi, nel caso delle strutture con piani verticali come Triangoli-Griglia, la derivata cresce pochissimo: questo perché le loro configurazioni sono poco coinvolte nello stato di sollecitazione a momento flettente. Anche Quarto di Cubo e Ottagonale hanno una crescita simile a Griglia, dal momento che presentano una struttura simmetrica che permette una ripartizione equa della sollecitazione. I valori maggiori di rigidità sono quindi assunti dalle configurazioni cuboidi, le quali, avendo le superfici parallele al piano XZ, sono posizionate quindi secondo la configurazione di maggior resistenza.

3.5 Confronto delle tensioni

L'analisi dello stato tensionale, e in particolare il valore massimo raggiunto nel tratto utile, è necessario non solo a identificare il punto in cui si innescherà la rottura, ma permette di stabilire, quale configurazione di riempimento è la migliore per determinate applicazioni. Nell'impiego strutturale non basta infatti un componente con una rigidità molto elevata, ma deve essere garantito un massimo tensionale il più basso possibile. In questo modo si avrà a disposizione non solo un pezzo che garantisce estrema rigidità, ma anche un adeguato grado di ripartizione degli sforzi, fattore fondamentale per evitare l'insorgere di una frattura o snervamento. In questo paragrafo saranno analizzati tutti gli aspetti più importanti legati allo stato di sforzo per ciascuna configurazione di riempimento. Saranno fatti in particolare confronti sia sull'andamento del valore massimo al variare della densità, sia sul punto a maggior sollecitazione. Per avere una maggior coerenza saranno comparati tipologie di riempimento con caratteristiche comuni. Da questo punto sarà possibile definire il parametro di densità ideale e valutare il suo comportamento sollecitando il componente in un'altra direzione. Si ricorda in questa introduzione che il valore massimo non corrisponde in alcun modo al carico di rottura sopportabile dal provino. L'ipotesi di campo lineare elastico, infatti, esclude la possibilità di ottenerlo attraverso le simulazioni numeriche. Il valore tensionale massimo sarà quindi un indicatore dell'aumento o della diminuzione degli sforzi sul componente. Infine, per rendere possibile il confronto tra elementi diversi, gli stati di sforzo corrispondono a una curvatura pari

a 1 1/m secondo la definizione utilizzata per il lavoro di tesi.



La prima conclusione che si può dedurre dal grafico che riassume lo sforzo massimo di tutti i riempimenti in funzione della densità e che non è possibile stabilire a priori un andamento comune. Intuitivamente ci si potrebbe aspettare che l'aumento della densità comporti un aumento della tensione agente sulle superfici interne: ciò si verifica solamente nel caso triangoli, dove la crescita rimane costante man mano che la distanza tra i piani viene ridotta. La decrescita costante è caratteristica dei riempimenti Ottagonale e Quarto di Cubo: partendo da un valore di sforzo tra i più elevati intorno a 22 MPa, si ha un calo fino a circa 13 MPa, ponendosi a cavallo tra la Griglia e tutti gli altri. La configurazione grigliata costituisce un'eccezione ai casi finora descritti: la tensione, infatti, rimane circa costante per tutti i 4 casi analizzati intorno a un'intensità di 6 MPa, il più basso presente. Tenendo in considerazione il suo valore di rigidezza sempre crescente, questo layout è ottimo per impieghi strutturali, dal momento che riesce a distribuire in maniera ottimale le tensioni mantenendole al minimo.

I cuboidi infine hanno un andamento ibrido: la crescita avviene fino al valore 8 mm, poi avviene un crollo della tensione. Come si vedrà successivamente, questo fenomeno è imputabile a un cambio radicale della morfologia passando ai 4 mm. La mancanza delle configurazioni 12 e 16 mm per Suddivisione in Cubi, è dovuta all'incapacità del software CAD scritto su Matlab di rilevare queste tipologie di riempimento molto diradate. Si può comunque ipotizzare che il suo andamento sarà simile al suo parente Cubi, vista la loro geometria molto comune.

3.6 Triangoli-Griglia

Si procede ora a effettuare il confronto per coppie, dove ci si propone di scegliere la miglior tipologia, analizzando tutte le configurazioni con geometrie comuni. Partendo dal caso a superfici perpendicolari rispetto al piano di estrusioni, si vuole osservare l'andamento tensionale su involucro esterno e superfici interne per i casi Triangoli e Griglia.

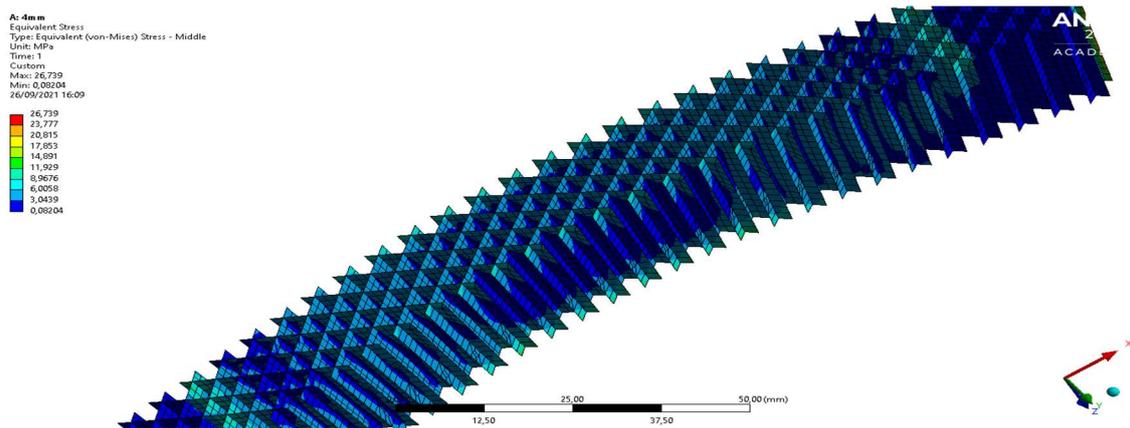


FIGURA 46: GRIGLIA 4MM

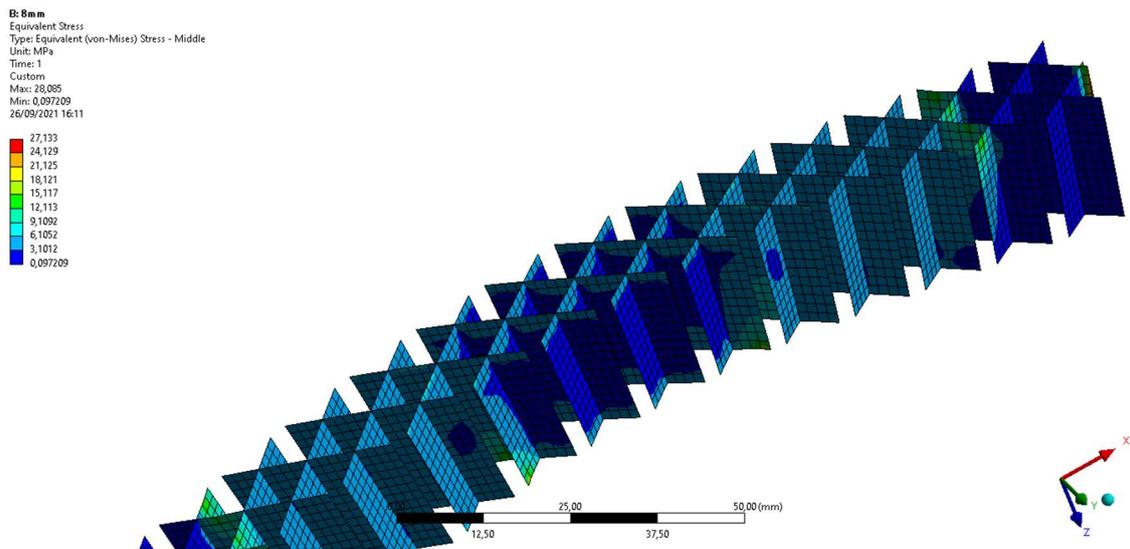


FIGURA 47: GRIGLIA 8MM

C: 12mm
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Middle
 Units: MPa
 Time: 1
 Custom
 Max: 33,027
 Min: 0,011282
 26/09/2021 16:12

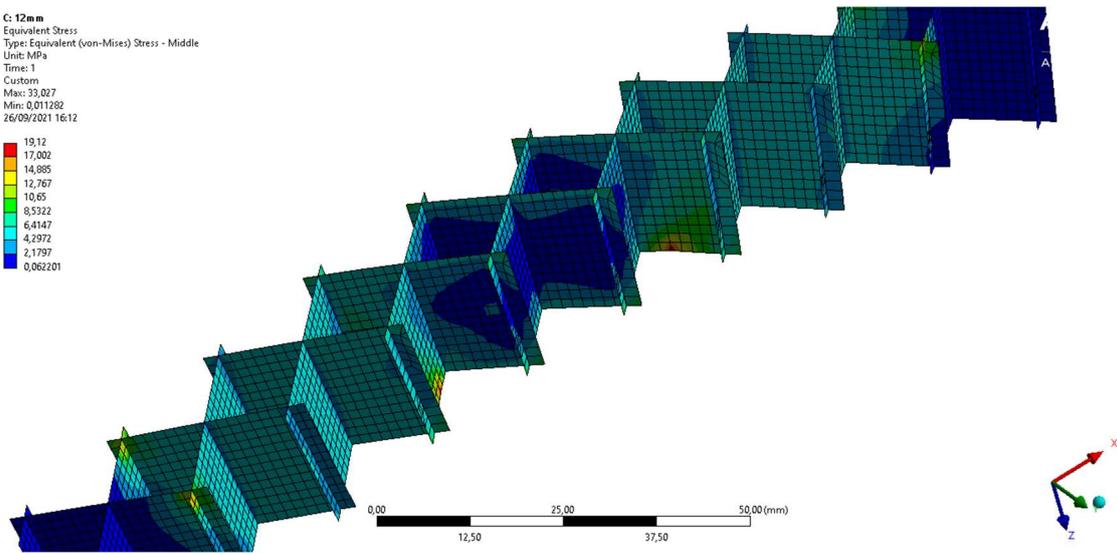
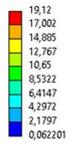


FIGURA 48: GRIGLIA 12MM

A: 4mm
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Middle
 Units: MPa
 Time: 1
 Custom
 Max: 27,274
 Min: 0,015181
 25/09/2021 19:40

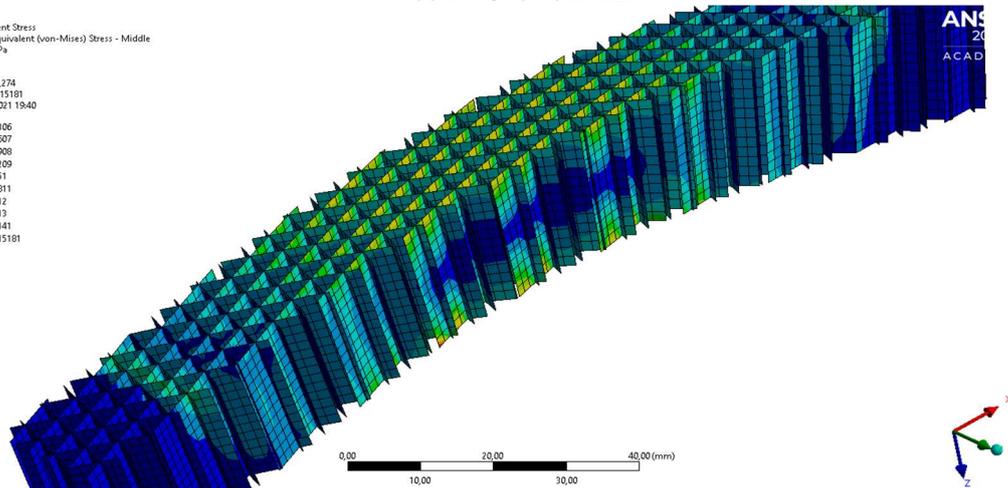
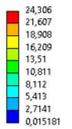


FIGURA 49: TRIANGOLI 4MM

B: 8mm
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Middle
 Units: MPa
 Time: 1
 Custom
 Max: 29,622
 Min: 0,0098877
 25/09/2021 19:39

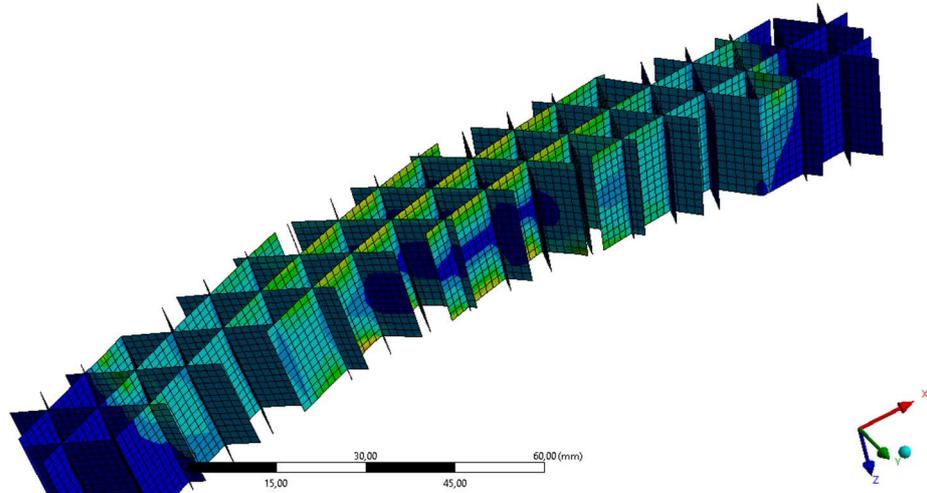
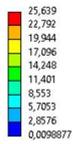


FIGURA 50: TRIANGOLI 8MM

C: 12mm
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Middle
 Units: MPa
 Time: 1
 Custom
 Max: 30,887
 Min: 0,015825
 25/09/2021 19:38

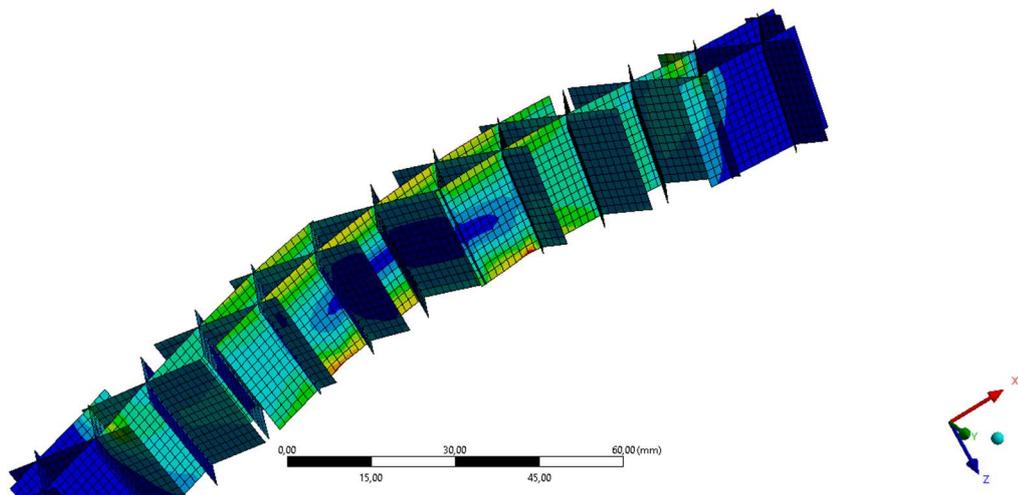
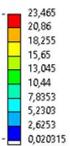


FIGURA 51: TRIANGOLI 12MM

Con la sua configurazione simmetrica, la griglia permette una ripartizione molto efficiente dello sforzo, il cui valore non oltrepassa i 6 Mpa. L'aumento di densità, inoltre, mantiene questa caratteristica garantendo un aumento di rigidità tale da renderlo molto appetibile negli impieghi strutturali.

Il caso Triangoli invece, utilizzando 3 superfici, comporta la presenza di numerose intersezioni, le quali, dovendo garantire la coerenza di forma, incrementano le tensioni nelle immediate circostanze. La zona di contatto tra la pelle e il riempimento, infatti, è il punto di localizzazione dello sforzo, che incrementa fino alla densità 8mm. La superficie maggiormente stressata è quasi parallela all'asse del provino, la quale risulta così la più coinvolta, facendo ricadere su di sé tutta la sollecitazione. È inoltre, direttamente responsabile della decrescita nel caso 4mm: osservando

il numero di piani quasi paralleli a X giacenti nel tratto utile, si nota come avvenga un raddoppio dal caso 4mm a 8mm, il quale non si presenta negli altri casi. Associando un aumento di rigidità meno che proporzionale, il risultato è un leggero abbassamento delle tensioni. È bene comunque ricordare che si tratta di un caso particolare: le tensioni, infatti, ricominceranno a salire immediatamente aumentando il numero di superfici.

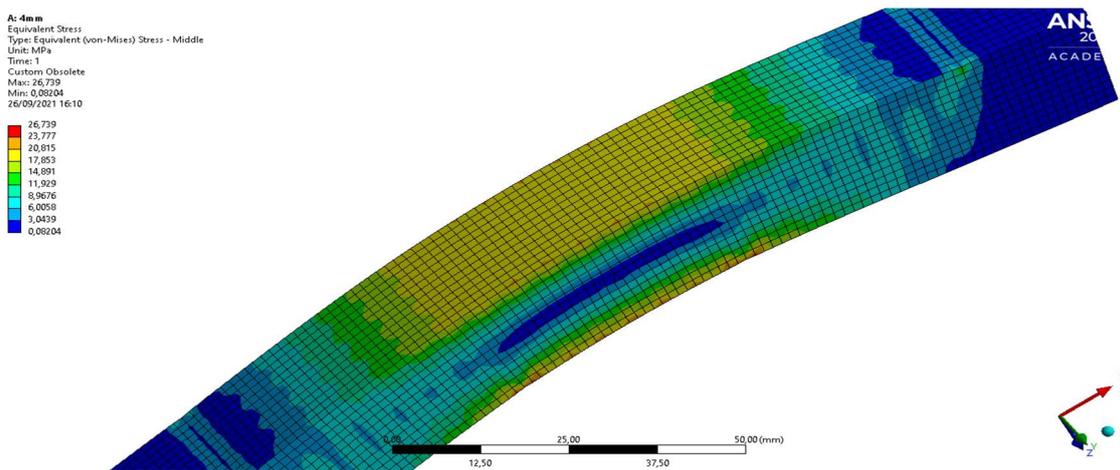


FIGURA 52: GRIGLIA PELLE 4MM

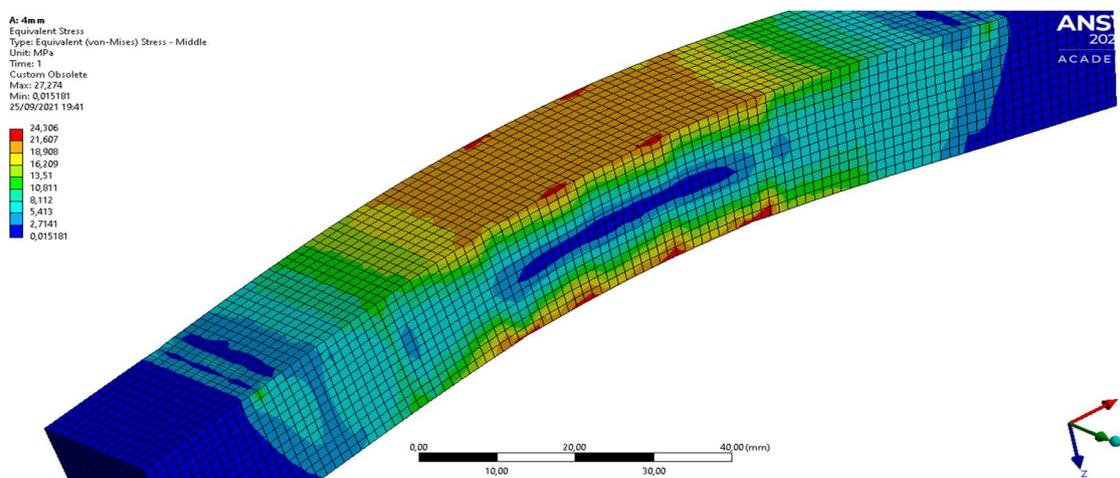


FIGURA 53: TRIANGOLI PELLE 4MM

Analizzando infine le pelli di Griglia e poi Triangoli, si nota come la distribuzione rimane praticamente costante lungo tutta la superficie superiore, salvo leggeri incrementi dovuti agli effetti di bordo vicino agli spigoli, che non sono stati tenuti in considerazione per il rilievo delle tensioni massime.

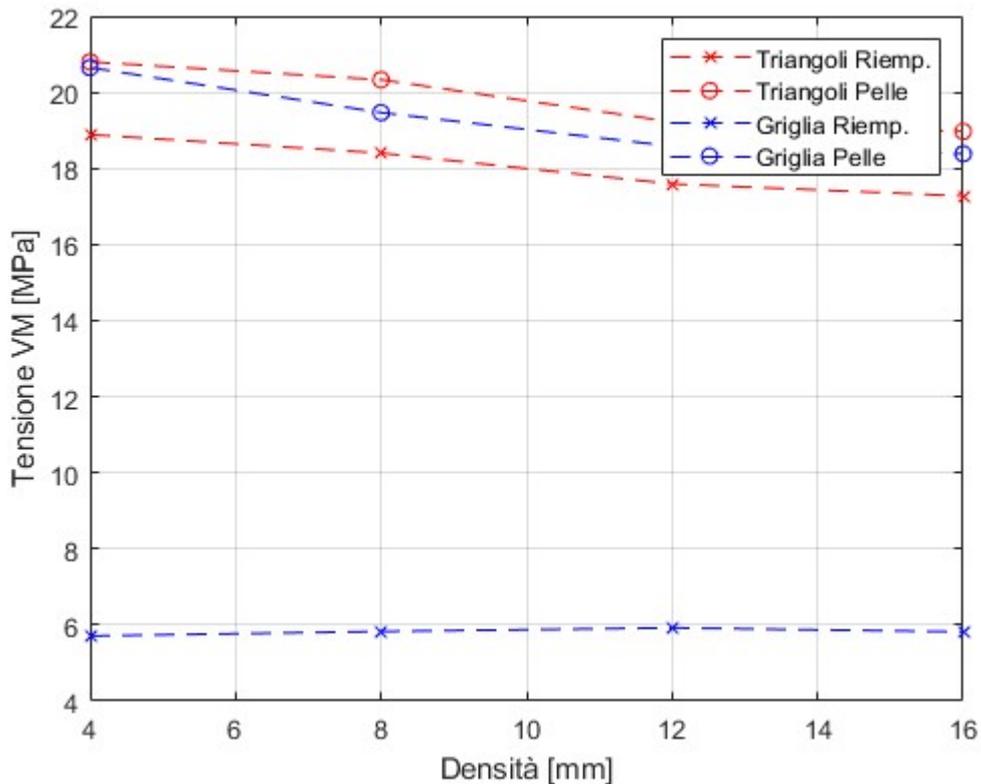


FIGURA 54: TENSIONI GRIGLIA-TRIANGOLI

Il comportamento in superficie rimane poco influenzato dalla tipologia di riempimento, dal momento il valore rimane circa intorno ai 20MPa a prescindere dal layout analizzato. Sulla base dei dati è comunque possibile prevedere che sarà sulla superficie esterna che si svilupperà un danno, dal momento che rimane sempre superiore alla sua controparte interna. Sia per Triangoli sia per la Griglia, inoltre, si ha una crescita costante del massimo, man mano che la densità aumenta.

3.7 Cubi-Suddivisione in Cubi

I layout Cuboidi, ovvero tutte le strutture che delimitano cubi orientati in maniera differente, rappresentano la categoria dove la rigidità raggiunge i valori più elevati. Inoltre, si ha l'innalzamento del valore passando da 8mm di distanza tra superfici a 4mm, dovuta a un fenomeno simile a quello presente in triangoli. Avendo una superficie orientata come X, sarà questa la più coinvolta nella resistenza meccanica. Tuttavia, il numero di esse rimane costante fino a 8mm, oltre il quale il numero raddoppia, innescando così l'aumento repentino della crescita della rigidità. Questo fenomeno ha inoltre risvolti sulla distribuzione tensionale.

Raddoppiando infatti la capacità resistenziale, insieme all'aumento non lineare di rigidezza, si assiste a un affievolimento della tensione massima passando ai 4mm, dopo una fase di crescita che ha caratterizzato tutte le precedenti configurazioni.

Ancora una volta la maggior sollecitazione si presenta lungo l'interfaccia riempimento-pelle, la quale è esasperata dalla presenza di numerose intersezioni, portando al diffondersi dello sforzo di taglio nelle immediate vicinanze. Lo stato tensionale rimane in entrambi i casi molto forte in quella zona, per poi decrescere avvicinandosi verso l'asse del parallelepipedo.

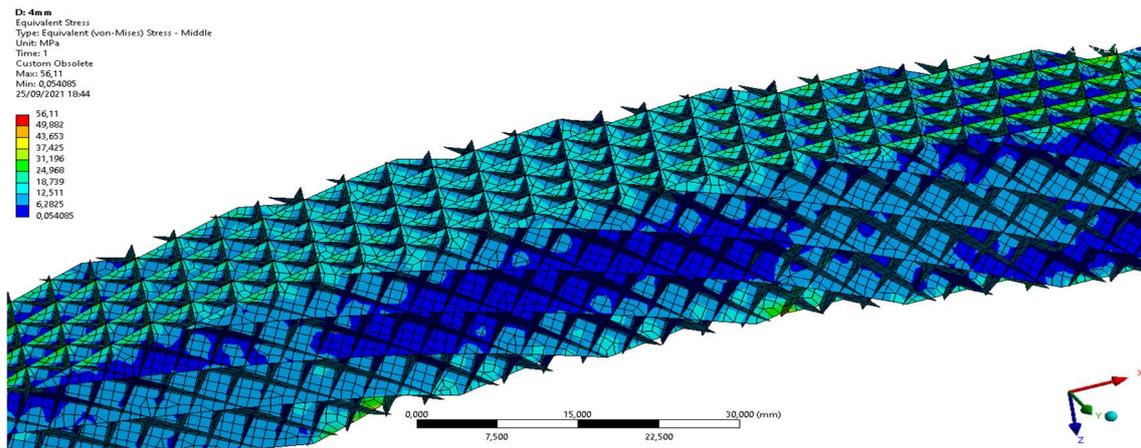


FIGURA 55: CUBI 4MM

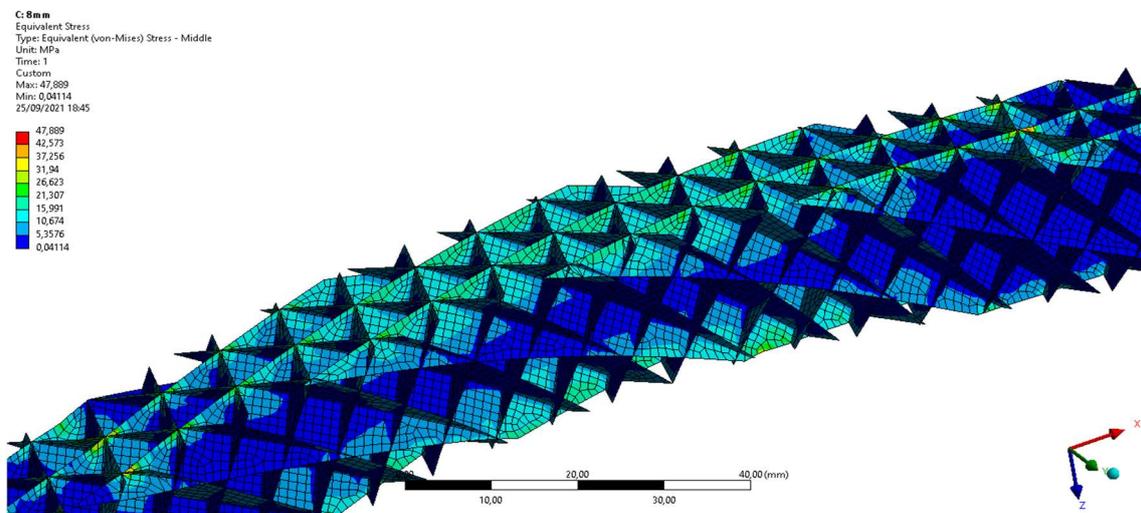


FIGURA 56: CUBI 8MM

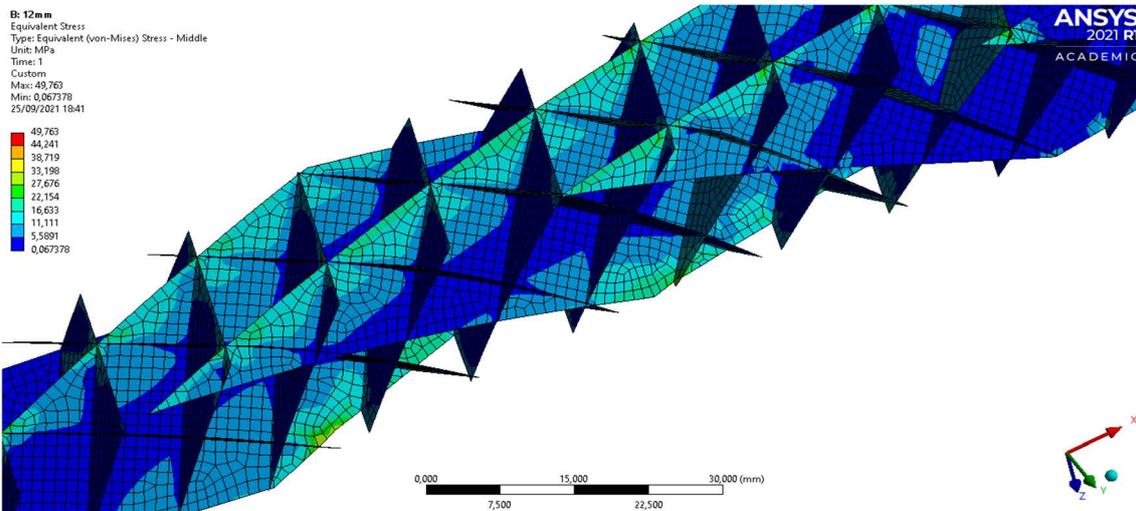


FIGURA 57: CUBI 12MM

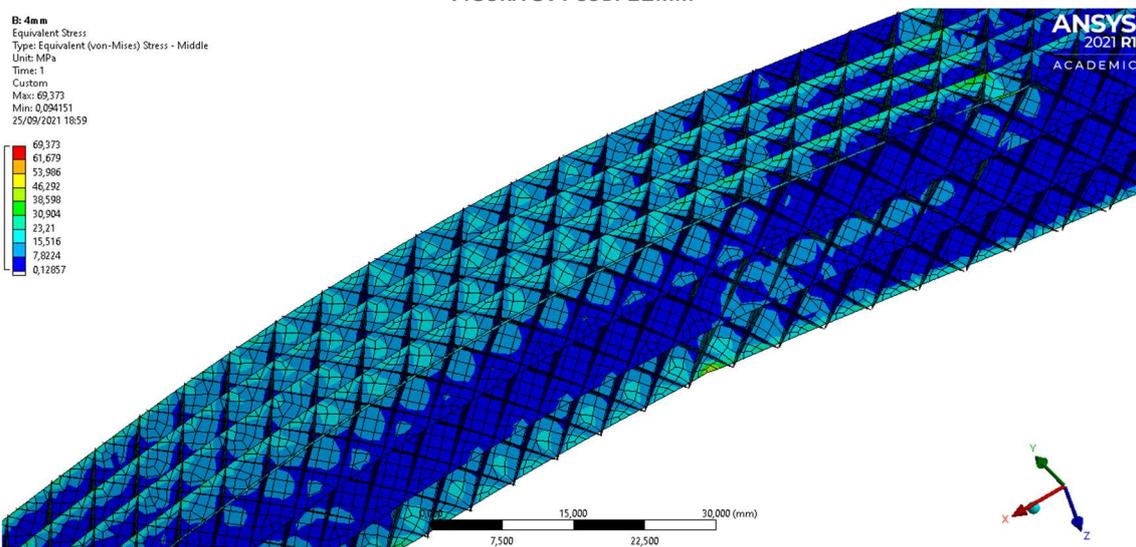


FIGURA 58: SUDD. IN CUBI 4MM

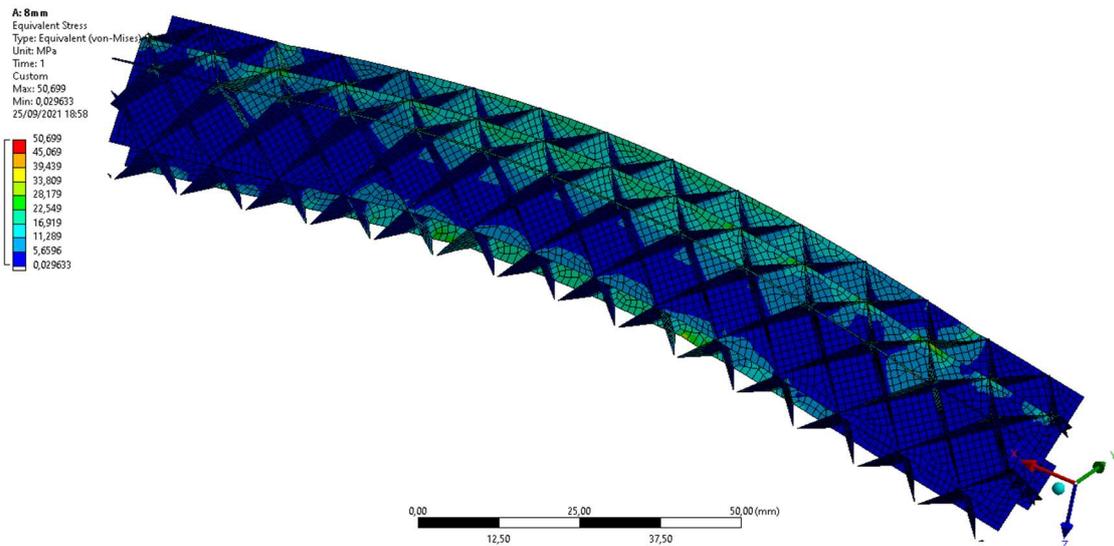


FIGURA 59: SUDD. IN CUBI 8MM

La configurazione tipicamente inclinata porta ad avere estremità appuntite come giunzioni pelle riempimento, le quali sono fonte di incremento tensionale, soprattutto nel caso Cubi dove la superficie leggermente inclinata rispetto a X interseca gli spigoli laterali. Ciò si traduce in punti molto deboli della struttura, la quale sarà più propensa ad avere difetti in quelle zone. Ciò spiega inoltre il valore di superficie molto più elevata rispetto all'interno nel caso Cubi, cosa che non si verifica invece nella Suddivisione in Cubi.

Per un impiego strutturale sarà perciò consigliata la Suddivisione in Cubi, perché riduce i punti critici e garantisce una rigidità elevata mantenendo sotto controllo lo sforzo. Resta tuttavia consigliato spingere molto sulla densità fino a usare un valore tale da portare alla redistribuzione tensionale come nel 4mm. Non conviene andare oltre, perché non si ha più convenienza sia sull'aumento di rigidità, sia perché le tensioni ricominciano poi a salire.

D: 4mm
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Middle
 Unit: MPa
 Time: 1
 Custom Obsolete
 Max: 56,11
 Min: 0,054085
 25/09/2021 18:44

56,11
 49,882
 43,653
 37,425
 31,196
 24,969
 18,739
 12,511
 6,2825
 0,054085

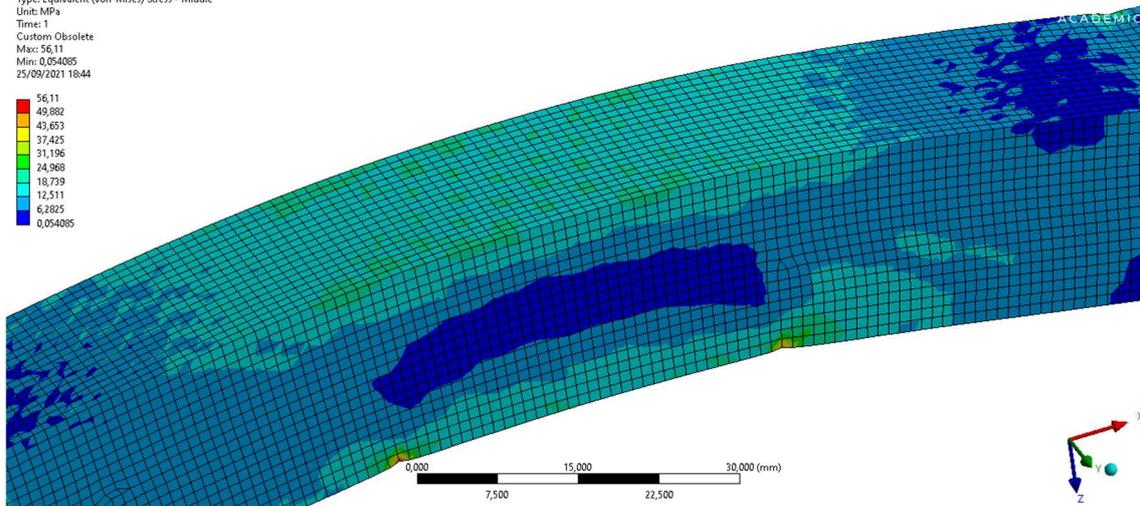


FIGURA 60: CUBI PELLE 4MM

B: 4mm
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Middle
 Unit: MPa
 Time: 1
 Custom Obsolete
 Max: 69,373
 Min: 0,094151
 25/09/2021 19:00

69,373
 61,679
 53,986
 46,292
 38,598
 30,904
 23,21
 15,516
 7,8224
 0,12857

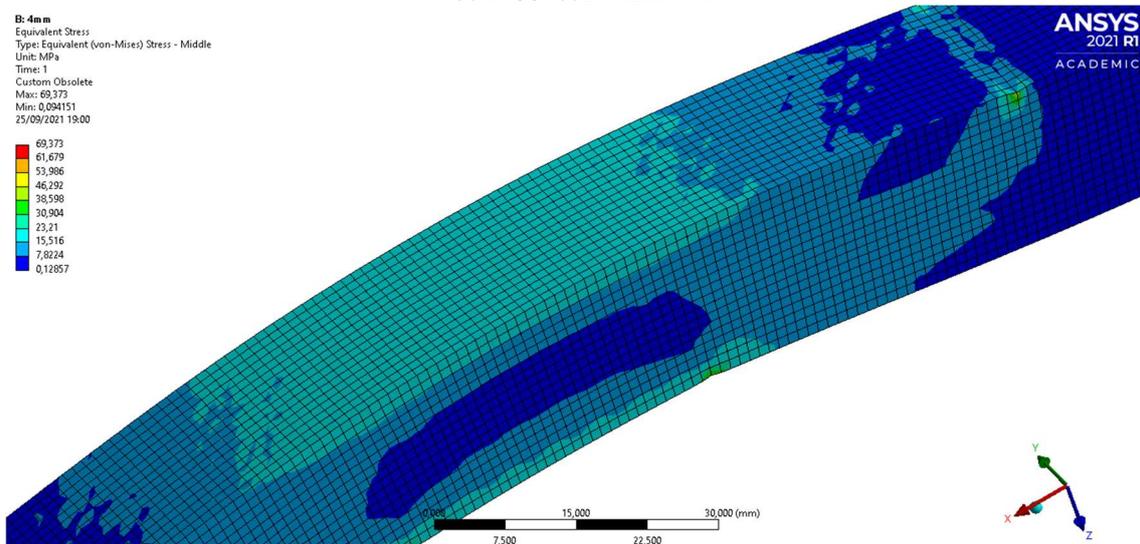


FIGURA 61: SUDD. IN CUBI PELLE 4MM

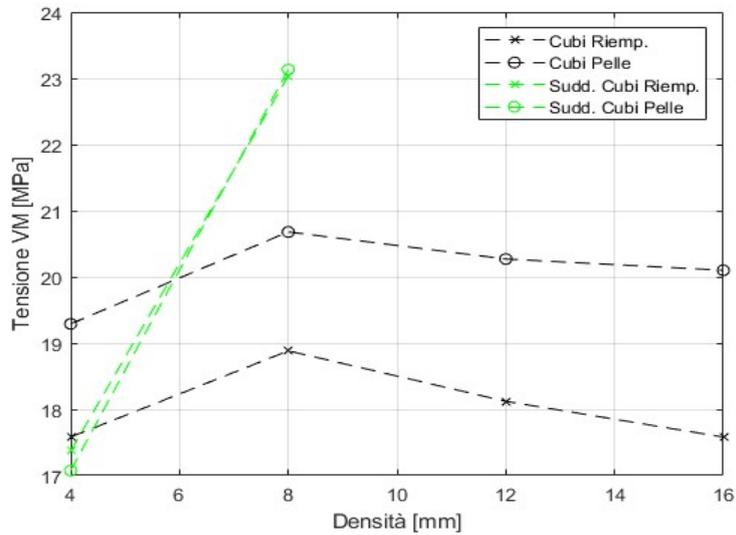


FIGURA 62: TENSIONI CUBI-SUDD. IN CUBI

3.8 Ottagonale-Quarto di Cubo

L'ultima tipologia in analisi è costituita dalla coppia Ottagonale-Quarto di Cubo, caratterizzate da avere 4 superfici inclinate di 45° rispetto al piano di estrusione e inclinate nello spazio di un angolo opposto. Utilizzando un layout simmetrico sono in grado di garantire una buona ripartizione di tensione, unita a una maggiore rigidità rispetto alla struttura a griglia.

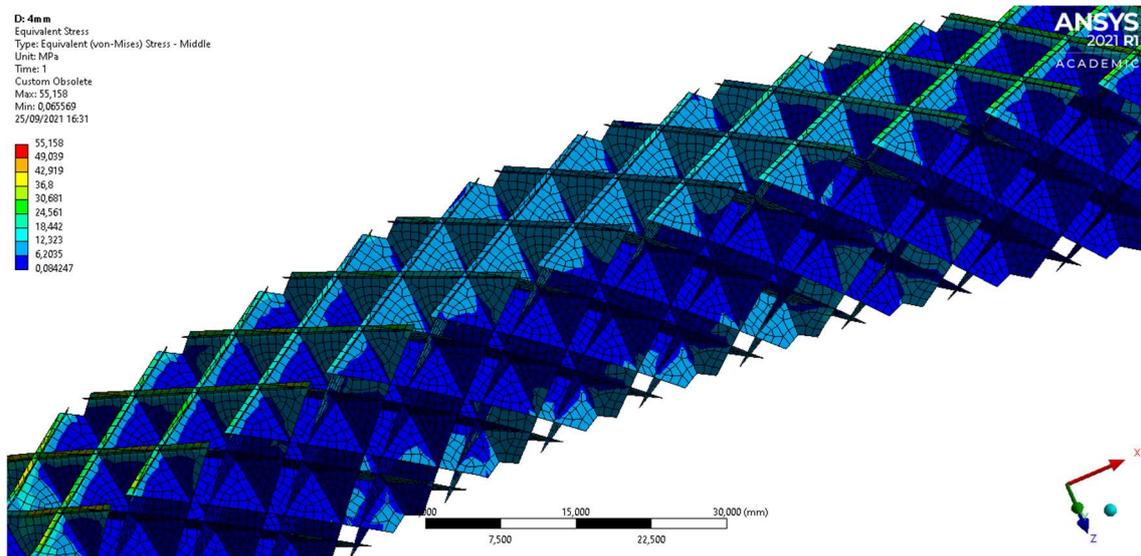


FIGURA 63: OTTAGONALE 4MM

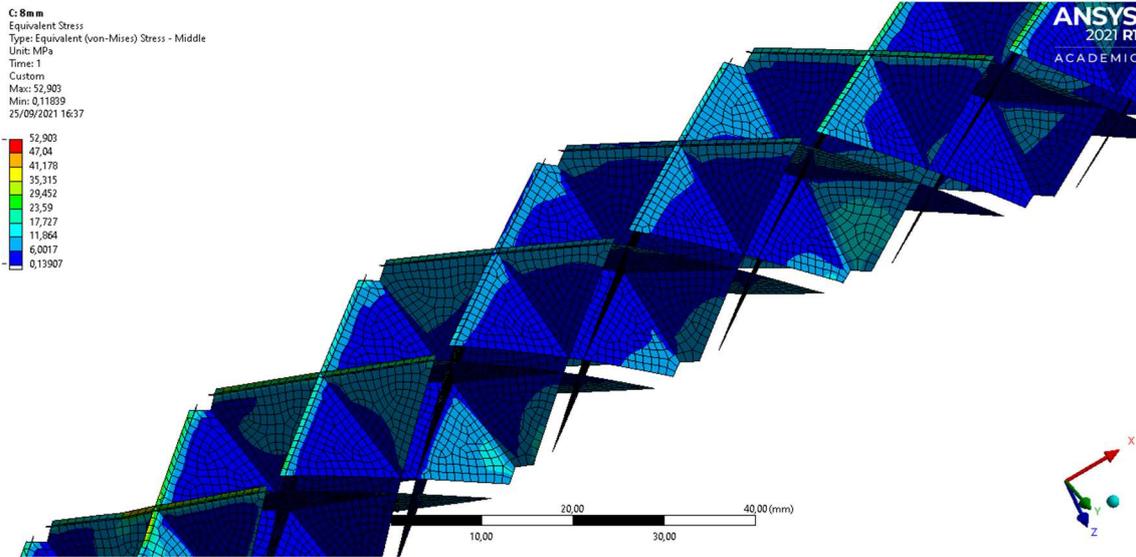


FIGURA 64: OTTAGONALE 8MM

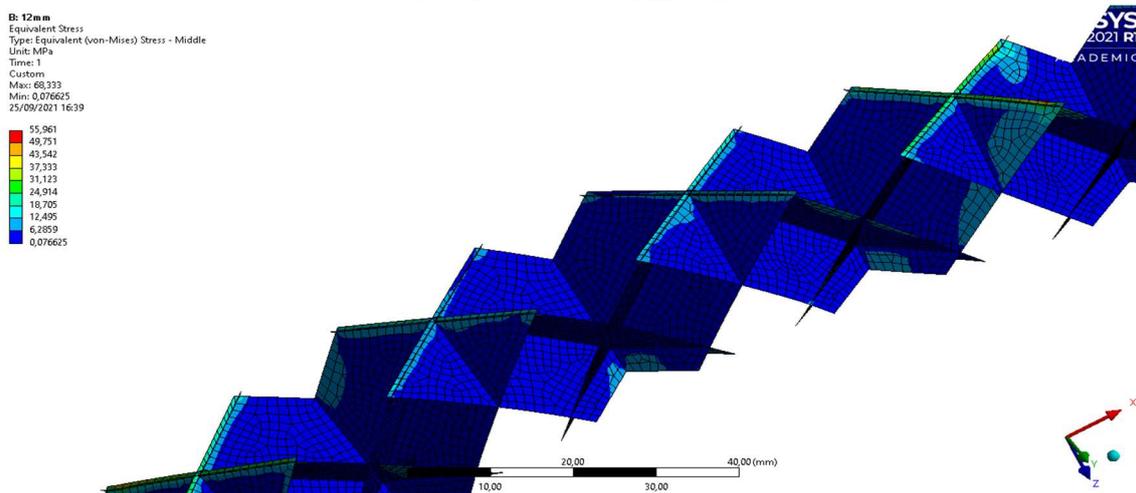


FIGURA 65: OTTAGONALE 12MM

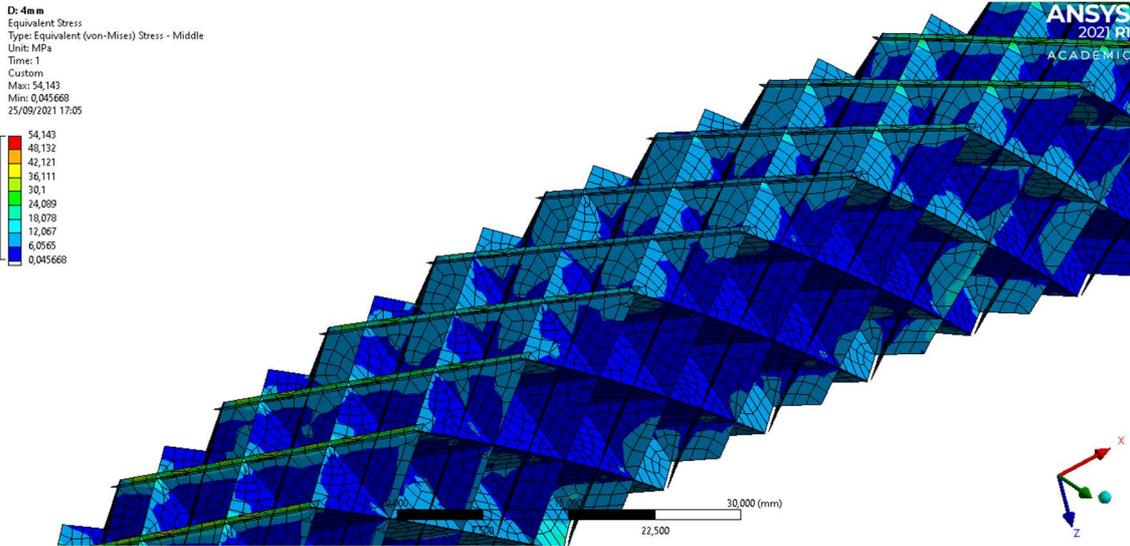


FIGURA 66: QUARTO DI CUBO 4MM

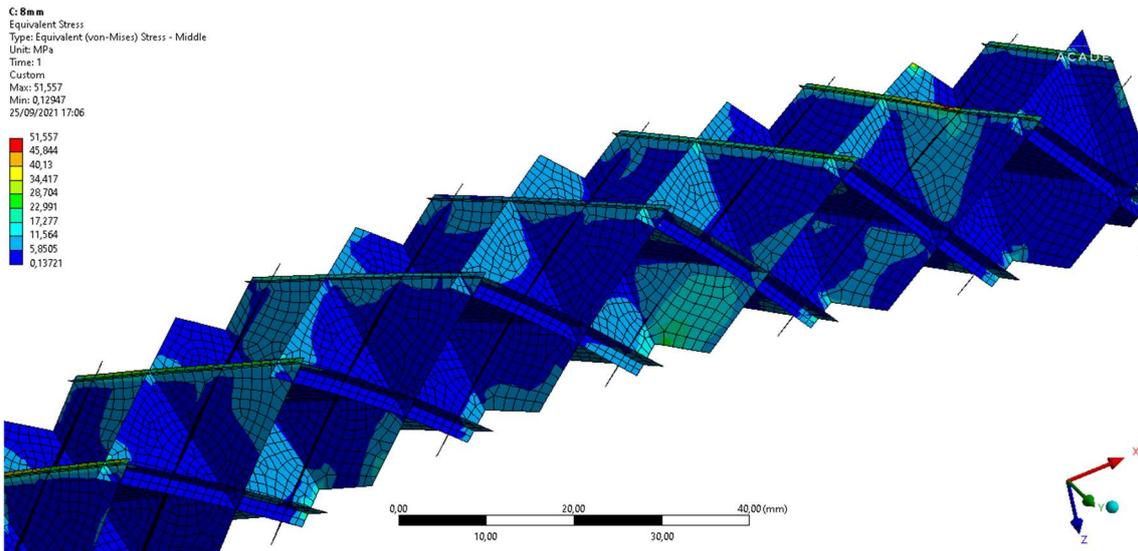


FIGURA 67: QUARTO DI CUBO 8MM

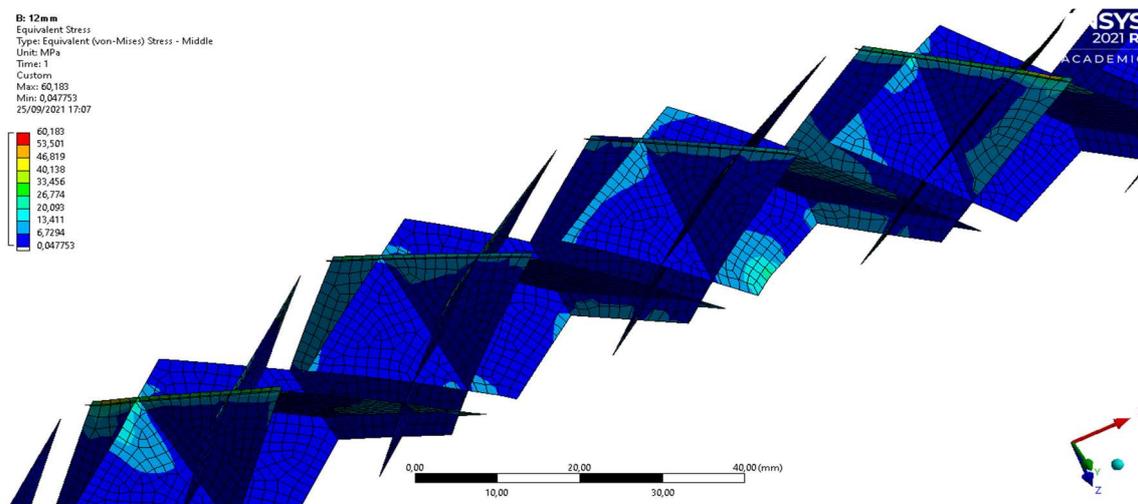


FIGURA 68: QUARTO DI CUBO 12MM

La simulazione agli elementi finiti ha evidenziato un andamento curioso rispetto a tutti gli altri casi: si nota infatti come la tensione decresce aumentando la densità. Questa osservazione controintuitiva è spiegata attraverso l'osservazione dell'interfaccia pelle-riempimento. si può notare infatti la presenza di una piccola striscia, la quale essendo in una zona con molte intersezioni e a ridosso dell'interfaccia, sarà punto di localizzazione delle tensioni. essendo inoltre di dimensioni piccole sarà sottoposta per di più a un valore molto alto di sforzo. L'aumento di densità, unito a un aumento modesto di rigidità, comporterà in prima battuta all'aumento di queste zone di localizzazione e di conseguenza a un abbassamento della sollecitazione locale. Governando loro il valore massimo, l'andamento sarà di conseguenza una decrescita.

La presenza di queste zone è ovviamente non voluta e deriva dalle scelte fatte in automatico da Ultimaker Cura, il quale riempie il componente secondo parametri a noi sconosciuti. Sta quindi al progettista effettuare dei ritocchi per evitare il verificarsi di queste situazioni pericolose, dal momento che, inevitabilmente, saranno sede di inizio frattura o plasticità non voluta.

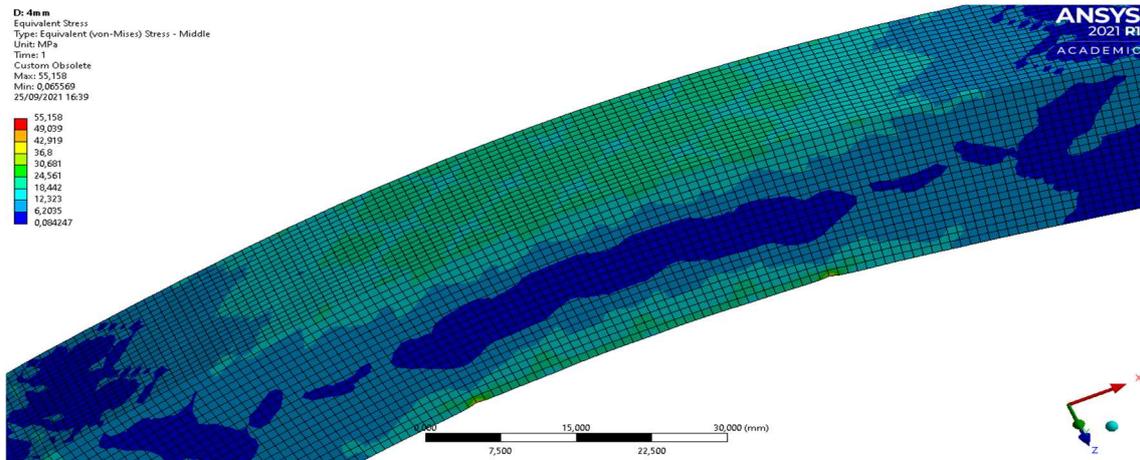


FIGURA 69: OTTAGONALE PELLE 4MM

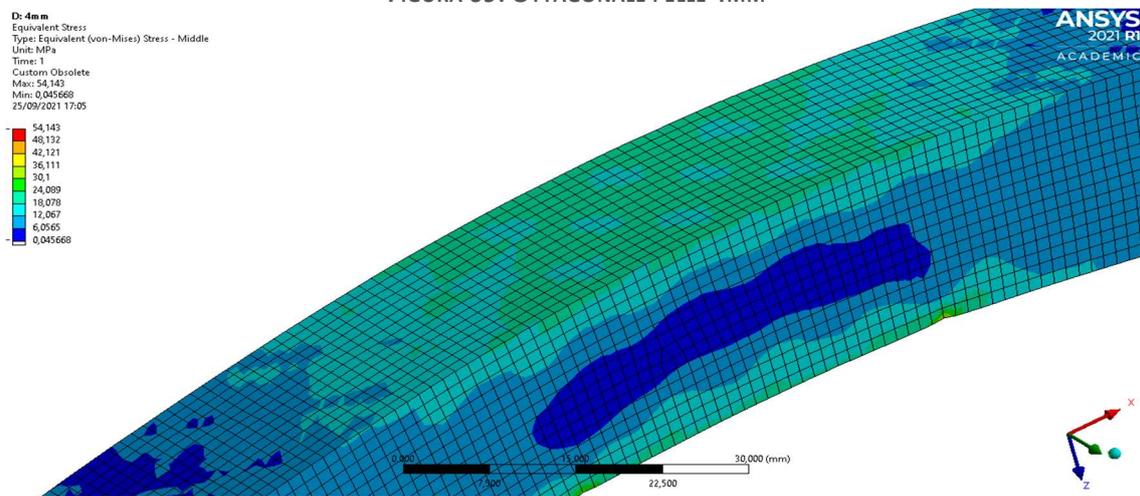


FIGURA 70: QUARTO DI CUBO PELLE 4MM

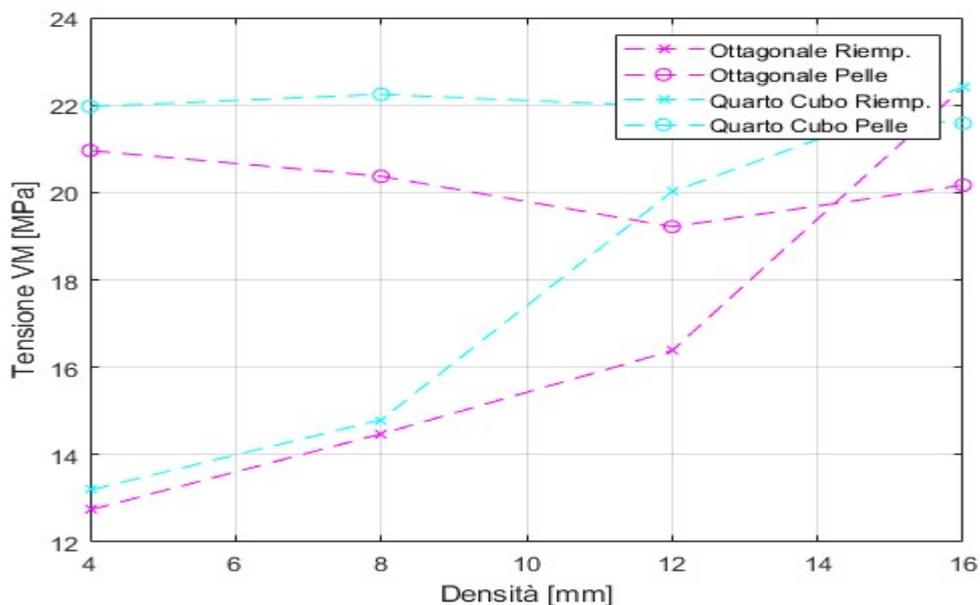


FIGURA 71: TENSIONI OTTAGONALE-QUARTO DI CUBO

L'osservazione delle densità 4mm e 8mm resta comunque molto interessante per ricavare delle conclusioni, in particolare sul punto di innesco della rottura. Si nota infatti che, nonostante la presenza di zone critiche nel riempimento, l'involucro esterno resta comunque il punto più critico. Il gap che esiste tra gli sforzi massimi infatti fa pendere la criticità verso le superfici esterne, le quali anche se con valori simili agli altri layout, risulta con buona certezza il punto di collasso o rottura.

La rigidità moderata rispetto alle altre configurazioni, unita a uno sforzo relativamente elevata e facilmente influenzabile da difetti geometrici, rendono sia Ottagonale, sia Quarto di Cubo una scelta sconsigliata per impieghi strutturali, anche rispetto al caso grigliato, dove la semplicità progettuale assolve la scarsa rigidità.

Se comunque indispensabile da utilizzare, si consiglia di verificare la geometria, eliminando possibili strisce, zone di localizzazione tensionale e puntare su una distanza tra superfici di circa 8mm.

3.9 Rotazione del componente

Grazie all'analisi degli stati di sforzo e delle rigidità è possibile concludere che il valore di densità ideale è di 8mm. Tale valore rappresenta quindi la distanza nominale, misurata sul piano di estrusione, di due superfici dello stesso pattern. Questo valore rappresenta un compromesso tra il valore di rigidità e la tensione massima, la quale normalmente si abbassa proprio con questa configurazione per molti layout.

Si procede ora a discutere tensioni e rigidzze quando il provino è sottoposto a una spinta lungo l'asse Y. Ciò si traduce in una prova di flessione a 4 punti a componente ruotato. Lo scopo è di verificare il comportamento in una condizione non ottimizzata. Il confronto a questo punto sarà fatto con la controparte sollecitata in maniera convenzionale e riempita della stessa quantità di materiale.

TRIANGOLI			
Asse sollecitazione	Rigidezza	Tensione interna max	Tensione pelle max
Z	765.85	18.4	20.327
Y	802.41	13.504	24.782

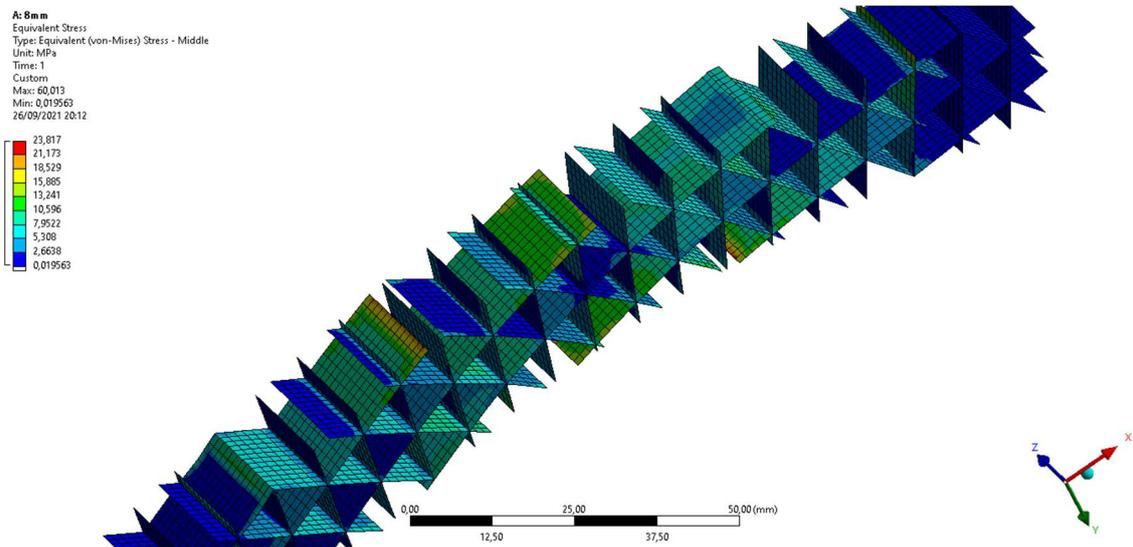


FIGURA 72: TRIANGOLI 8MM RUOTATO

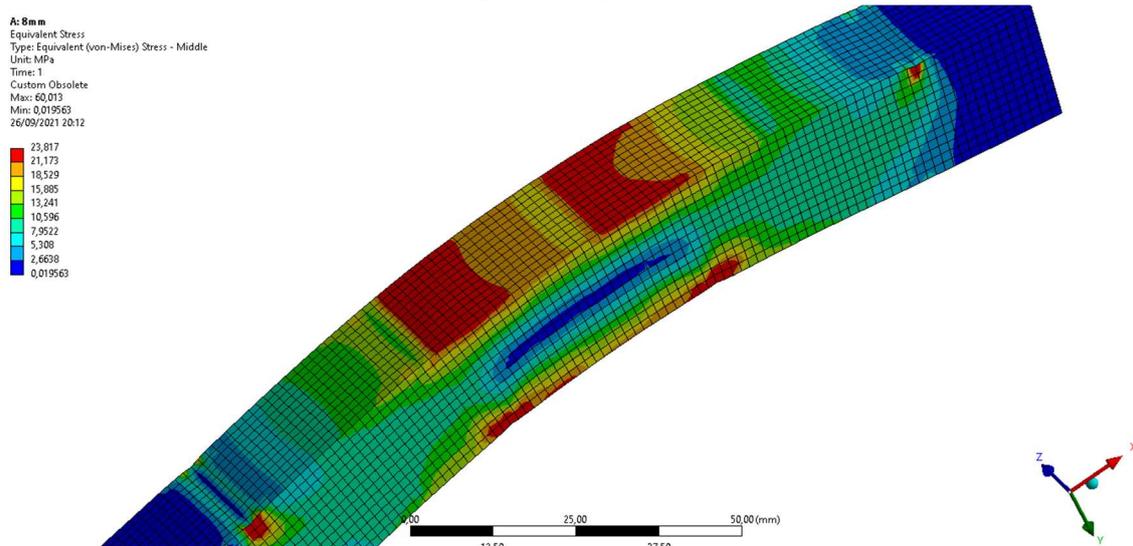


FIGURA 73: TRIANGOLI PELLE 8MM RUOTATO

La struttura triangolare, insieme alla grigliata rappresentano le tipologie maggiormente stravolte, dal momento che il comportamento del riempimento passa da membranale a flessionale. Tutti i piani infatti sono sollecitati non più lungo il piano medio, ma in maniera perpendicolare. Ne risulta quindi un forte abbassamento delle sollecitazioni interne a discapito della pelle, la quale ora subirà in maniera decisa la tensione/compressione dovuta all'interno. A conseguenza di ciò ne deriva una rigidità aumentata a discapito della tensione sull'esterno. La zona critica, tuttavia, non cambia rispetto al caso a sollecitazione normale. La pelle sarà quindi ancora una volta la parte più delicata in fase progettuale.

GRIGLIA			
Asse sollecitazione	Rigidità	Tensione interna max	Tensione pelle max
Z	645.76	5.8287	19.463
Y	650.79	1.6624	20.035

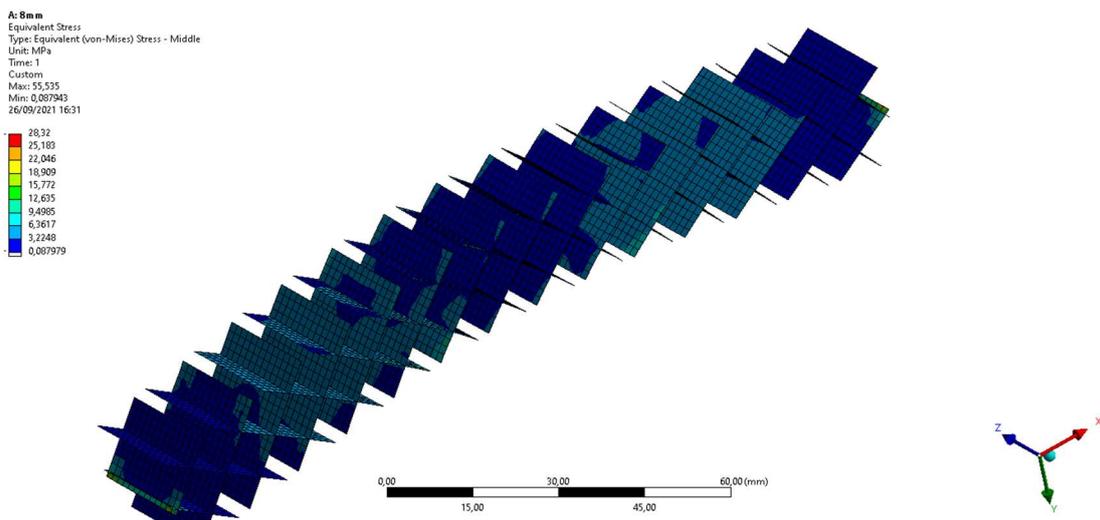


FIGURA 74: GRIGLIA 8MM RUOTATO

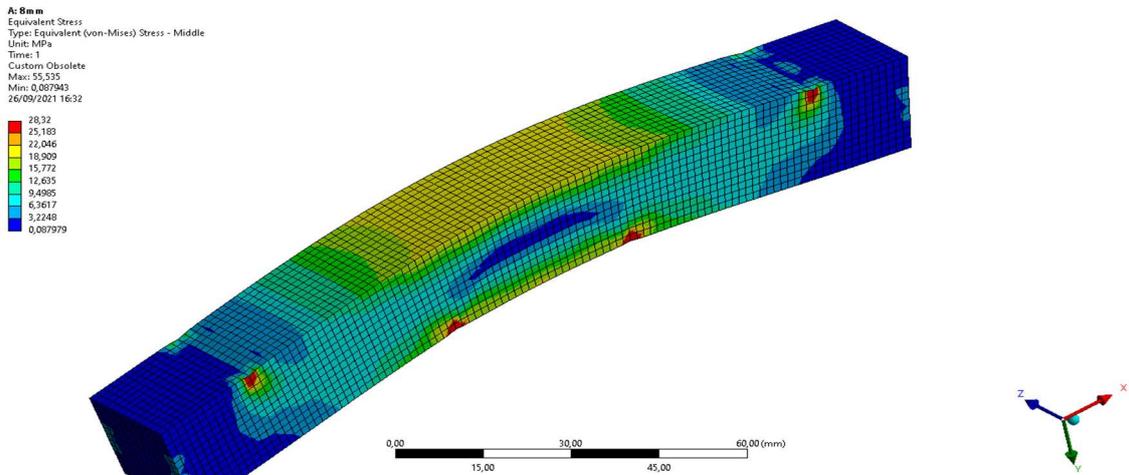


FIGURA 75: GRIGLIA PELLE 8MM RUOTATO

La configurazione grigliata beneficia di tutti i vantaggi descritti in precedenza, in particolare dell'azione flessionale e non membranale, senza tuttavia incrementare le tensioni sulla pelle, grazie alla simmetria rispetto al piano XZ. Il calo dello sforzo interno è tale da poter consigliare l'uso in questa modalità rispetto alla configurazione normale. L'abbassamento infatti è di circa 4 volte, mantenendo la rigidità globale invariata.

CUBI			
Asse sollecitazione	Rigidezza	Tensione interna max	Tensione pelle max
Z	954.03	18.883	20.679
Y	912.16	16.762	22.360

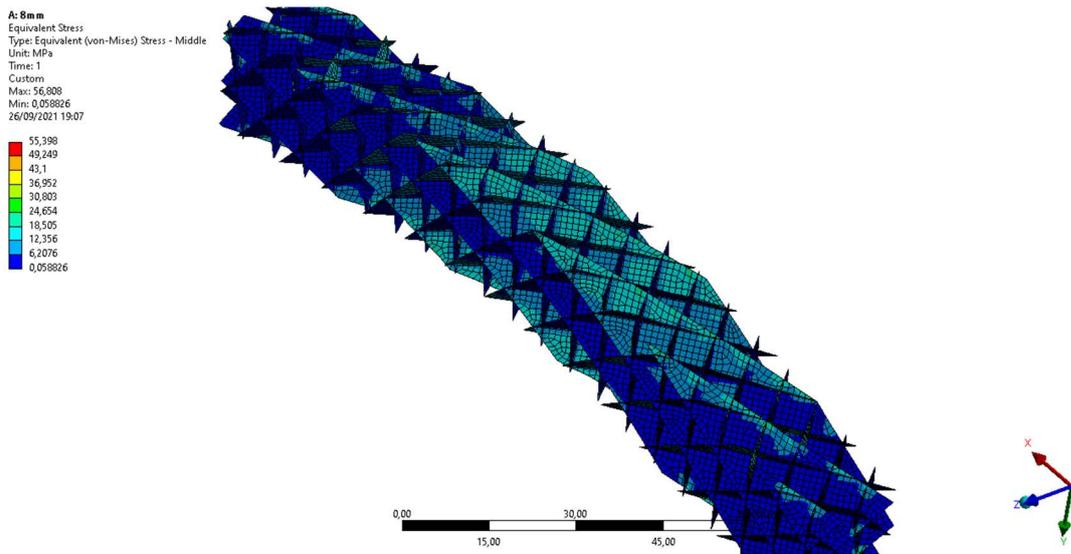


FIGURA 76: CUBI 8MM RUOTATO

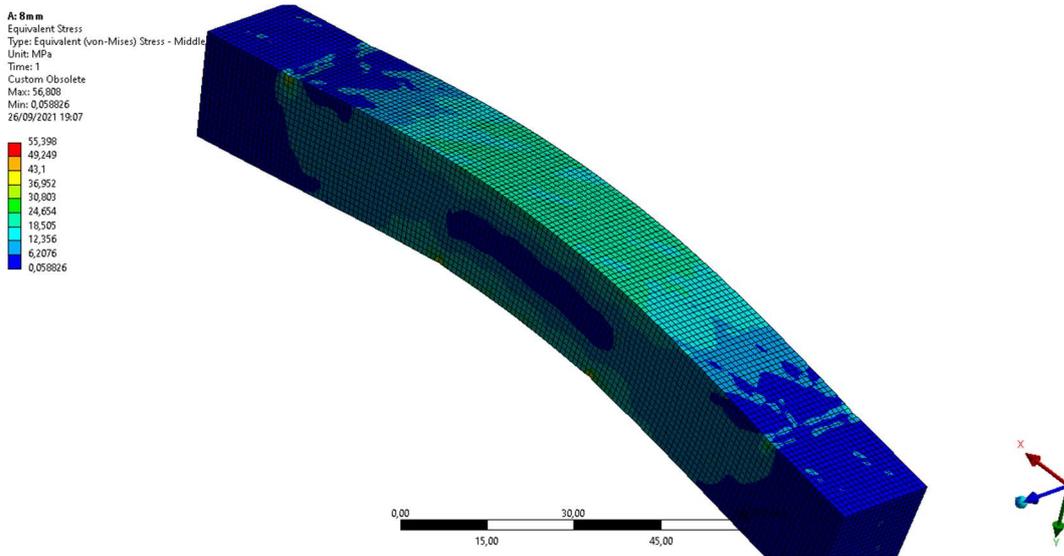


FIGURA 77: CUBI PELLE 8MM RUOTATO

A differenza della sua controparte classica, Cubi ruotato ha le superfici “longitudinali”, maggiormente ruotate rispetto a X, portandole a essere meno coinvolte nel contrasto del momento flettente. Ne deriva un abbassamento sia della tensione nel riempimento interno, sia della rigidità totale. Resta comunque maggiore il valore della tensione in superficie, mantenendo quindi la criticità del componente. Resta tuttavia sconsigliato utilizzare questa configurazione, dal momento che la sua controparte possiede le caratteristiche migliori senza impattare troppo sulle tensioni.

SUDDIVISIONE IN CUBI			
Asse sollecitazione	Rigidità	Tensione interna max	Tensione pelle max
Z	844.77	23.033	23.131
Y	867.08	21.952	21.630

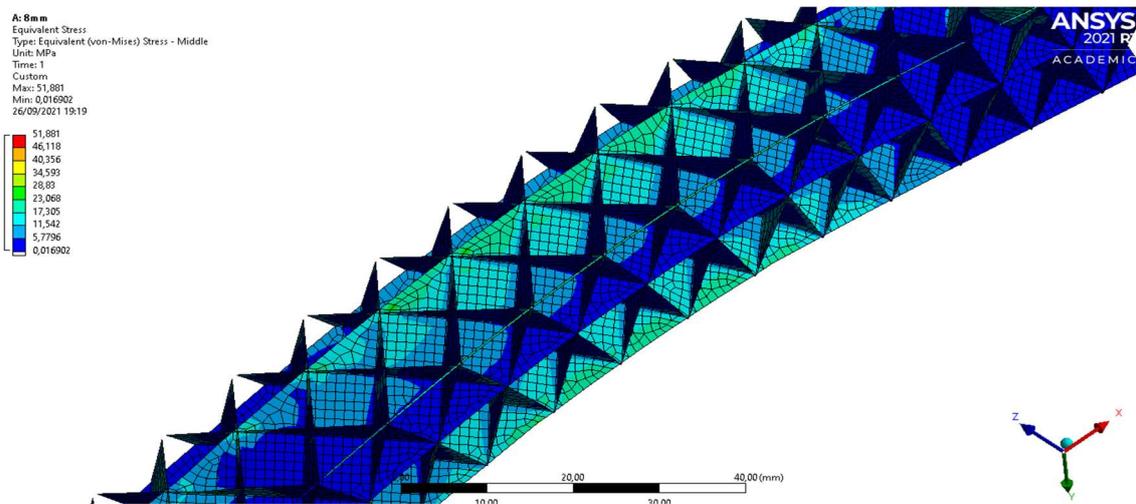


FIGURA 78: SUDD. IN CUBI 8MM RUOTATO

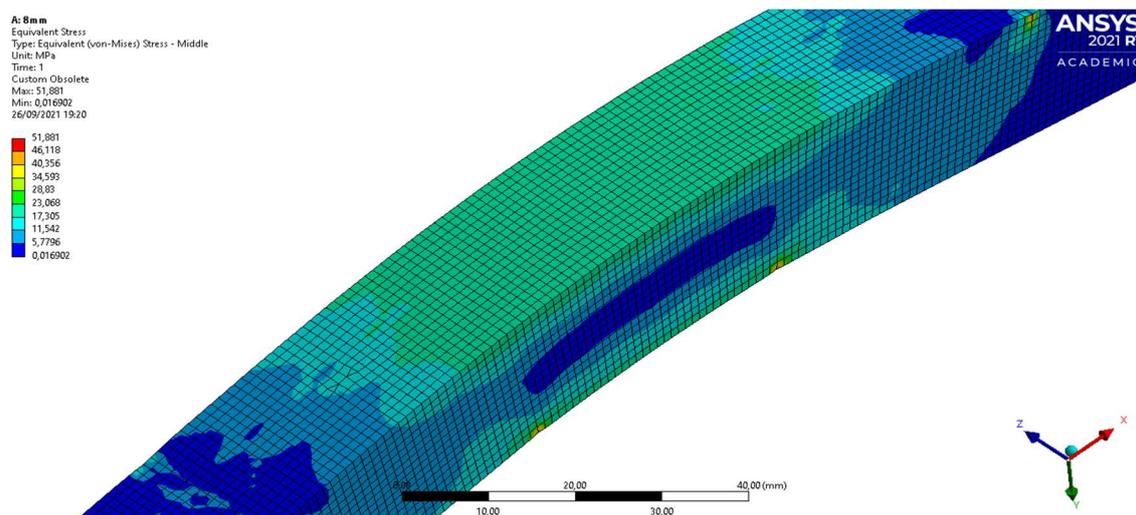


FIGURA 79: SUDD. IN CUBI PELLE 8MM RUOTATO

La rotazione della Suddivisione in Cubi conferma la correlazione tensionale che esiste tra la superficie parallela a X e la pelle a lei collegata. Il calo si spiega con la riduzione del numero di piani paralleli insieme alla costanza della rigidezza. Questa comunque avrà un valore pressoché costante grazie alla geometria che viene ora maggiormente coinvolta nella resistenza. Tutto ciò la rende migliore del caso normale, la quale a parità di risultato, peggiora il suo stato tensionale.

OTTAGONALE			
Asse sollecitazione	Rigidezza	Tensione interna max	Tensione pelle max
Z	778.36	14.475	20.369
Y	739.81	9.3874	20.757

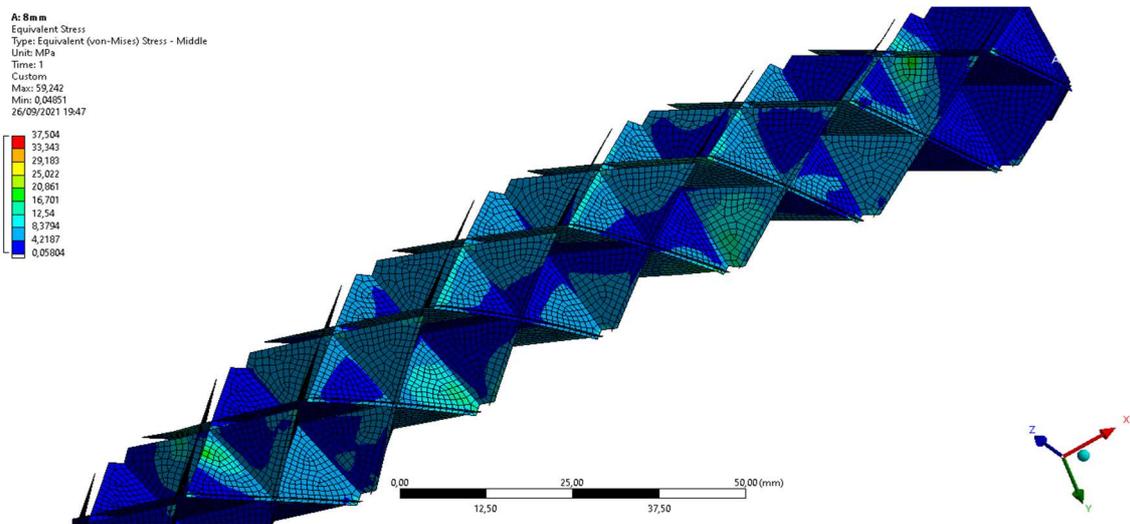


FIGURA 80: OTTAGONALE 8MM RUOTATO

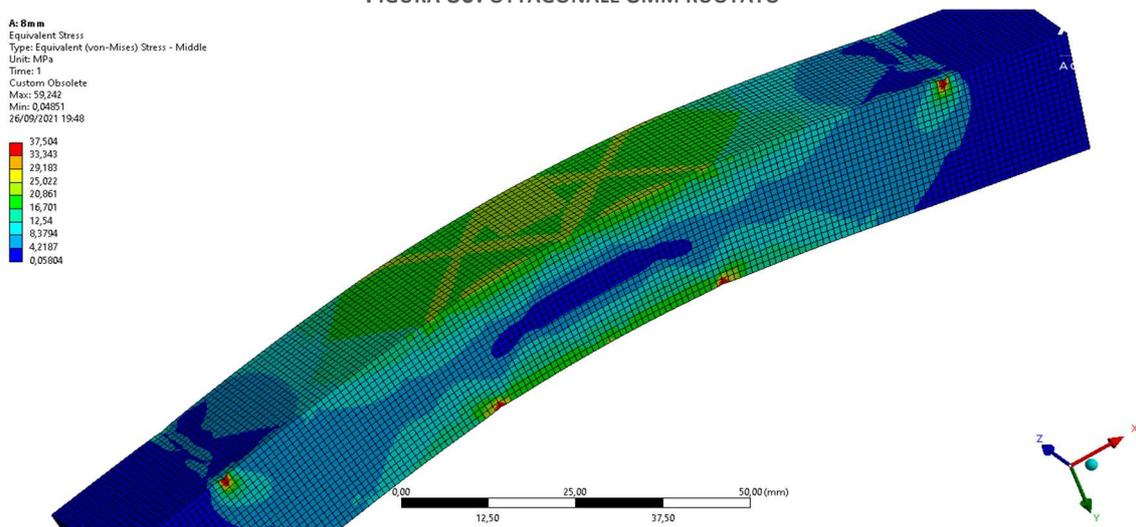


FIGURA 81: OTTAGONALE PELLE 8MM RUOTATO

Nonostante la rotazione, Ottagonale e Quarto di Cubo approssimano fedelmente la configurazione di partenza e di conseguenza la rigidità di base. Il vantaggio di questa simulazione è la mancanza delle strisce che alteravano lo stato tensionale alzando il valore massimo. Emerge infatti un valore molto più basso, ma comunque superiore solo a Griglia come era stato previsto in precedenza. Si conferma quindi un layout sconsigliato, sia per la rigidità bassa, sia per lo sforzo elevato. Altre configurazioni, infatti danno proprietà migliori con valori tensionali adeguati, a partire dalla stessa griglia. Si può infatti spingere molto sulla densità per ottenere una buona rigidità senza impattare molto sugli sforzi agenti.

QUARTO DI CUBO			
Asse sollecitazione	Rigidezza	Tensione interna max	Tensione pelle max
Z	795.54	14.797	22.244
Y	737.42	8.976	24.034

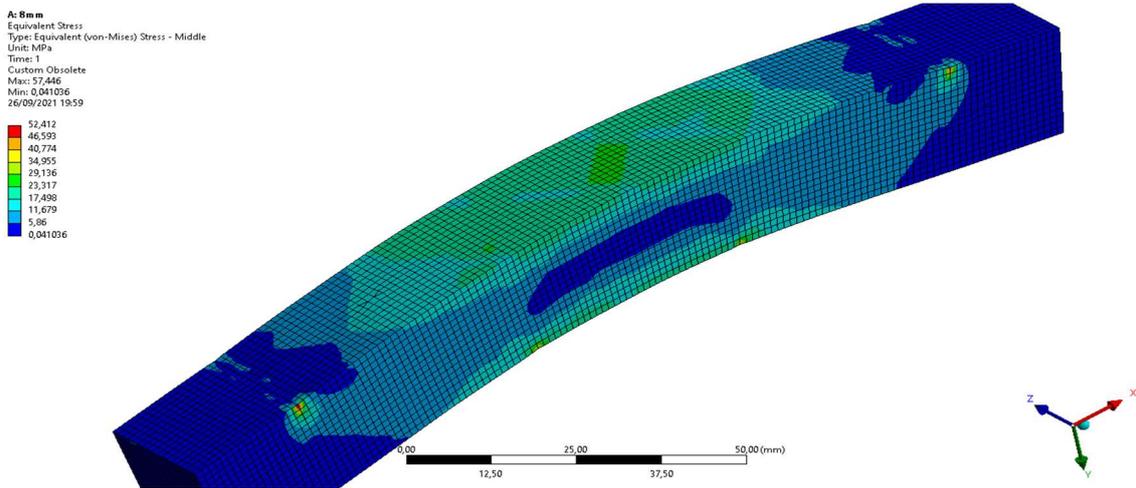


FIGURA 82: Q.TO DI CUBO 8MM RUOTATO

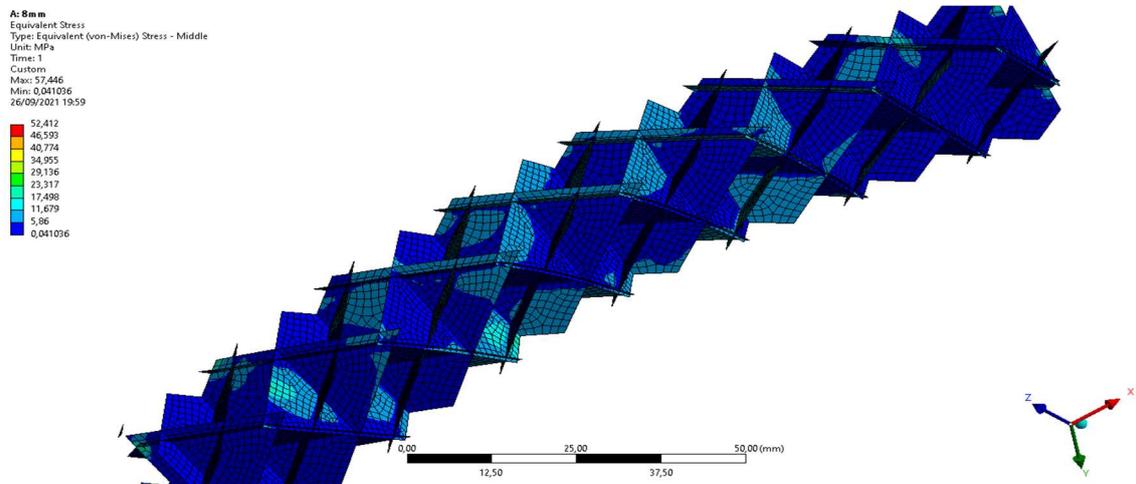


FIGURA 83: Q.TO DI CUBO PELLE 8MM RUOTATO

Le previsioni fatte sulla configurazione Ottagonale valgono anche per il Quarto di Cubo, ovvero l'abbassamento tensionale dovuto all'eliminazione delle strisce e il relativo abbassamento di tensione, non compensano una rigidezza modesta, rispetto ad altri casi. La situazione è peggiorata inoltre sulla pelle, dove lo sforzo cresce a causa dell'asimmetria che viene a mancare rispetto alla configurazione precedente.

Conclusione

La recente introduzione della tecnologia di Additive Manufacturing, ha portato alla necessità di fornire degli strumenti, in grado di aiutare il progettista ad interfacciarsi con essa. La mancanza di una bibliografia rende ulteriormente complicato questa necessità, dal momento che sono necessarie prove sperimentali a sostegno di questi.

Si è perciò analizzata la fase primaria di questa problematica, svolgendo un'analisi dettagliata dei principali riempimenti, proposti da Ultimaker Cura. Tralasciando i parametri tecnologici, sono state fatte delle prove agli elementi finiti su un provino a forma di parallelepipedo, dentro il quale sono stati posti vari tipi di layout, a densità via via maggiore.

Simulando inoltre la prova di flessione a 4 punti, è stato creato inoltre un modello numerico molto semplice e facilmente riproducibile in una prova sperimentale.

È stato utilizzato un materiale comune nella Additive Manufacturing, il Nylon Carbon, allo scopo di rendere il più veritiero possibile il contesto progettuale. È stato tuttavia trascurato il fenomeno della plasticità del componente, escludendo la possibilità di rilevare il carico a rottura. Per identificare le applicazioni produttive e per stabilire una gerarchia tra i diversi riempimenti è stata utilizzata la rigidità globale, sia per la sua semplicità di estrapolazione, sia per l'adeguata sintesi del comportamento nel campo lineare elastico.

Le simulazioni hanno confermato la previsione fatta all'inizio del lavoro di tesi, ovvero l'aumento della tensione, insieme alla densità e alla rigidità. Sono emersi tuttavia comportamenti particolari, non immediatamente ipotizzabili senza la simulazione numerica. Le strutture cuboidi in particolari evidenziano una densità limite, oltre il quale si ha un leggero calo della tensione. Questo fatto è dovuto a un aumento più marcato rispetto ai valori precedenti delle superfici maggiormente sollecitate. Non si deve comunque immaginare che l'aumento ulteriore della densità di riempimento comporti un continuo calo dello sforzo massimo: si tratta solo di un leggero stazionamento nell'ambito di una crescita sempre continua del massimo, insieme alla rigidità globale.

L'analisi dei risultati ha portato alla luce anche l'influenza dei difetti geometrici. La presenza di piccole strisce, poste prima dell'attacco sulla pelle esterna, costituisce un punto di localizzazione delle tensioni che innalzano il massimo sul componente. Si consiglia perciò di verificare sempre la geometria dopo averla estratta, così da fare una modifica preliminare allo scopo di eliminare le zone critiche descritte.

La densità ottimale, sulla base delle simulazioni, risulta pari a una distanza tra superfici di 8 mm. Utilizzando questo valore si sono fatte prove di carico in direzione trasversale, per valutare il comportamento in una condizione operativa non ottimale. È emerso che il pezzo mantiene o abbassa leggermente la rigidità, a discapito tuttavia della tensione in superficie, la quale spesso incrementa.

In conclusione, la tipologia di riempimento ideale per applicazioni strutturali è la Griglia, dal momento che abbina una discreta rigidità a un'ottima distribuzione tensionale, vantaggio che le permette di essere usata con valori molto spinti di densità.

Questo lavoro ha costituito un primo tentativo di elaborare uno strumento adeguato di progettazione per Additive Manufacturing. In particolare, la creazione di un codice per l'estrazione del CAD di riempimento, permette ora di applicare gli elementi finiti su queste strutture particolari. Tuttavia, manca ancora la validazione sperimentale di tutte le ipotesi proposte. Si auspica quindi che venga svolta in futuro, magari in altri lavori di tesi, così da poter costituire insieme agli strumenti qui riportati, una visione approfondita del comportamento strutturale delle principali strutture di riempimento. Successivamente sarebbe interessante verificare il comportamento di componenti veri e propri, così da poterli confrontare con i provini utilizzati finora.

Resta infine la possibilità di lavorare sul codice Matlab, uno strumento con grandi potenzialità, ma con ancora grossi limiti, in particolare sul numero di layout disponibili. Ci si augura la possibilità di automatizzarlo ancora di più, magari eliminando l'intervento dell'utente sui parametri di campionamento. Nonostante i suoi difetti, non esclude in alcun modo la possibilità di lavorare su pezzi reali e può costituire già ora, una valida base per i lavori di tesi successivi.