



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di laurea triennale in INGEGNERIA MECCANICA

***Studio di strumenti e metodi per la modellazione e
simulazione di strutture reticolari solide nel Design for Additive
Manufacturing***

***Study of tools and methods for modeling and
simulation of solid lattice structures in Design for
Additive Manufacturing***

Relatore:
Prof.
Michele Germani

Tesi di laurea di:
Santini Mirco

Correlatori:
Marco Mandolini
Paolo Cicconi

Anno accademico 2020-2021

Indice

INTRODUZIONE	4
1. ADDITIVE MANUFACTURING	6
1.1 ADDITIVE MANUFACTURING: EVOLUZIONE STORICA E PRINCIPALI TECNOLOGIE.....	7
1.2 PRINCIPALI TECNOLOGIE UTILIZZATE NEL SETTORE ADDITIVE MANUFACTURING	10
1.3 TIPOLOGIE DI MATERIALI PRESENTI NELL'AM	13
1.4 VANTAGGI E SVANTAGGI	15
1.5 HYBRID MANUFACTURING	15
2. ADDITIVE MANUFACTURING IN AMBITO METALLICO – STATO DELL'ARTE	17
2.1 DIRECTED ENERGY DEPOSITION	17
2.2 POWDER BED FUSION	18
2.2.1 Laser Powder Bed Fusion (LPBF)	19
2.3 INCONEL 718: CARATTERISTICHE CHIMICO- FISICHE E CAMPI DI APPLICAZIONE	21
3. GEOMETRIE E STRUTTURE DISUPPORTO LATTICE ANALIZZATE E UTILIZZATE – STATO DELL'ARTE	24
3.1 CELLA FCCZ	25
3.2 CELLA FCC	26
3.3 SOFTWARE UTILIZZATI PER LA CREAZIONE DELLE CELLE ELEMENTARI UTILIZZATE POI NELLA REALIZZAZIONE DEI SUPPORTI	27
3.3.1 SOLID EDGE 2021	27
3.3.2 NTOPOLOGY	27
3.3.3 ANSYS ADDITIVE PRINT	28
4.WORKFLOW.....	29
4.1 SOLID EDGE 2021: COSTRUZIONE CELLA FCCZ COLLEGATA AI SUOI PARAMETRI E RICONOSCIMENTO DELLE GEOMETRIE STUDIATE	30
4.1.1 NTOPOLOGY: IMPORTAZIONE DELLA CELLA FCCZ E DELLE GEOMETRIE STUDIATE	31
4.1.2 SELEZIONE DELLE SUPERFICI DI COSTRUZIONE E REALIZZAZIONE DELLE CELL MAP	34
4.1.3 COSTRUZIONE DEI SUPPORTI PER LE GEOMETRIE ANALIZZATE CON CELLA FCCZ	36
4.1.4 UNIONI BOOLEANE TRA GEOMETRIE E SUPPORTI	39
4.1.5 GENERAZIONE DELLE MESH PER LE GEOMETRIE ANALIZZATE E I SUPPORTI REALIZZATI	40
4.2 SOLID EDGE 2021: RICONOSCIMENTO DELLE GEOMETRIE STUDIATE.....	42
4.2.1 NTOPOLOGY: COSTRUZIONE DEI SUPPORTI PER LE GEOMETRIE CONSIDERATE CON CELLA FCC	43
4.2.2 INSPESAMENTO DEI SUPPORTI CON CELLA FCC E INTERSEZIONI BOOLEANE.....	46
4.2.3 UNIONI BOOLEANE TRA LE GEOMETRIE E I SUPPORTI	48
4.2.4 GENERAZIONE DELLE MESH PER LE GEOMETRIE ANALIZZATE E I SUPPORTI REALIZZATI	49

5. CASO STUDIO	51
5.1 REQUISITI DI PARTENZA E PARAMETRI DI PROCESSO.....	51
5.2 GEOMETRIA.....	52
5.3 ANALISI DI STAMPABILITÀ DEL CANALE DI GIRANTE E DEL VANO TAGLIATO CON I LORO RELATIVI SUPPORTI	54
5.3.1 ANSYS ADDITIVE PRINT: VERIFICHE SUL PROCESSO DI SIMULAZIONE DI STAMPA SULLE GEOMETRIE CONSIDERATE E I LORO SUPPORTI.....	55
5.3.2 ANALISI SU TENSIONI, DEFORMAZIONI E SPOSTAMENTI IN BASE ALLE GEOMETRIE CONSIDERATE E I LORO SUPPORTI.....	60
6. CONCLUSIONI	74
7. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	76

Introduzione

Il progetto si è realizzato in collaborazione con l'azienda Baker Hughes (Nuovo Pignone). Questa azienda ha l'obiettivo di realizzare giranti per compressori centrifughi in INCONEL 718 mediante la tecnologia di additive manufacturing denominata "Power Bed Fusion" (a letto di polvere). Nello specifico si utilizzerà il processo chiamato "Selective Laser Beam Melting".

Sono stati presi in considerazione diversi requisiti e problemi che tipicamente possono insorgere con l'utilizzo della tecnologia scelta:

- Orientare orizzontalmente la girante rispetto al piatto di stampa per poter contenere i costi di produzione e per conservarne il più possibile l'isotropia.
- Utilizzare come materiale l'INCONEL 718 che è una lega di nichel resistente ad alte temperature e corrosione. Inoltre è ideale per applicazioni ad alte temperature come parti di turbine a gas ed impianti industriali, come in questo caso, oltre che per applicazioni criogeniche.
- Verificare la stampabilità del pezzo assicurando che il recoater non impatti con la geometria deformata.
- Controllare che le deformazioni e le tensioni equivalenti di Von Mises siano contenute entro i limiti delle tolleranze al termine del processo.

Come primo step sono state effettuate delle ricerche nell'ambito dello stato dell'arte del design for additive manufacturing sia per quanto riguarda la geometria sia per quanto riguarda i supporti. Su questi ultimi ci si è soffermati a lungo, studiando in particolar modo la morfologia e l'ottimizzazione della geometria. I supporti, infatti, sono fondamentali per diversi aspetti, quali: ancorare il pezzo al piatto di stampa, supportare le superfici con un angolo al di sotto di 45° , dissipare calore evitando distorsioni del pezzo e resistere alle sollecitazioni meccaniche. L'analisi è proseguita studiando la libreria di supporti presenti in nTopology. A questo punto valutando che non risultava essere presente la tipologia di cella che si voleva considerare che era l'FCCZ ma era solamente presente la tipologia di cella FCC; pertanto si è dovuto costruire tale cella in Solid Edge 2021 con i suoi appositi parametri per poi essere importata e riconosciuta da nTopology. Mentre molto più semplice è stato con l'altra tipologia di cella in quanto già presente all'interno del programma e quindi più semplice nel modificarne i parametri. Contemporaneamente si è simulato il processo di stampa nel modulo Ansys Additive (Print) introducendo tutti gli opportuni parametri di stampa. In questo modo si è potuto stabilire quale fosse la migliore morfologia di supporto che permettesse di ottenere valori di tensioni e deformazioni equivalenti

più vicini agli intervalli di tolleranza richiesti. Inoltre, è stato possibile verificare la stampabilità della geometria come richiesto nei prerequisiti iniziali.

1. Additive manufacturing

L'Additive Manufacturing è un termine coniato che racchiude i concetti di:

- Rapid Prototyping
- Rapid Tooling
- Rapid Manufacturing

con lo scopo di identificare le tre principali destinazioni di utilizzo di questa tecnologia.

Si parla di una famiglia di tecnologie basate sul principio di funzionamento della **stratificazione progressiva di materiale** su livelli sovrapposti lungo "l'asse Z" (verso l'alto), al fine di ottenere un oggetto tridimensionale.

Inoltre è una tecnica che crea singoli strati di materiale sovrapposti che vengono generati con diversi metodi in base alla tecnologia applicata.

Andiamo a vedere nel dettaglio i tre concetti:

1. Rapid Prototyping

Si parla di un insieme di tecniche industriali volte alla realizzazione fisica del prototipo, in tempi relativamente brevi, a partire da una definizione matematica tridimensionale dell'oggetto (CAD).

Prima la costruzione era affidata ad artigiani o modellisti con aumento dei costi e dei tempi di realizzazione.

Sono dei processi con l'obiettivo di ridurre sia i costi di realizzazione che i tempi di costruzione del prototipo stesso.

2. Rapid Tooling

È una tecnica che consente, in tempi molto più rapidi, di realizzare attrezzature per la creazione di prototipi come alternativa allo stampo metallico.

3. Rapid Manufacturing

Si intende la produzione rapida di prodotti personalizzati per il cliente.

Inoltre si è visto che contrariamente a quello che avviene nel Rapid Prototyping, con il Rapid Manufacturing non viene realizzato alcun modello, bensì prodotti finali per l'utilizzo in condizioni reali.

Vediamo nel dettaglio come avviene un ciclo di lavorazione con la tecnologia dell'Additive Manufacturing.

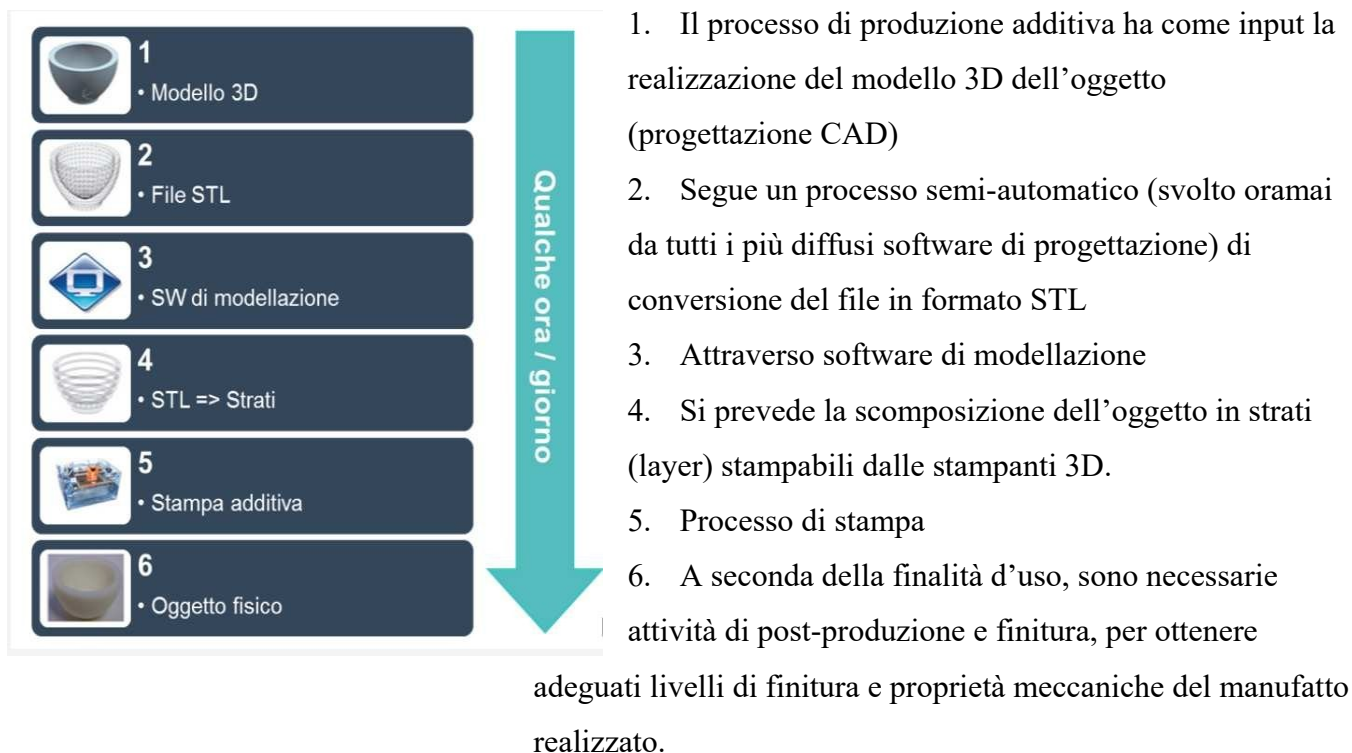


Figura 1.1 Passaggi fondamentali nell'ambito dell'Additive Manufacturing

1.1 Additive Manufacturing: evoluzione storica e principali tecnologie

Nasce questa tecnologia come evoluzione dei metodi di prototipazione, velocizzando e ottimizzando un processo realizzato in modo quasi del tutto manuale (Rapid Prototyping). Tali tecnologie sono state applicate con successo anche in diversi settori industriali, per la produzione di oggetti e attrezzature come componenti per il settore automotive, strumentazione da laboratorio....

Negli ultimi anni esiste una nuova frontiera di utilizzo dell'AM: Rapid Manufacturing, ovvero la produzione di componenti/prodotti destinati a uso diretto. **L'AM è destinata ad affiancare e/o sostituire le più comuni tecniche di fabbricazione industriale inoltre prevede un utilizzo sempre più pervasivo e conveniente, con tempi di processo sempre più bassi.**

Oltre a questa breve spiegazione dell'evoluzione storica che ha avuto l'Additive Manufacturing, un altro fondamentale aspetto di questa tecnologia lo sono le sue principali caratteristiche che ora illustrerò con una serie di immagini per poi entrarci meglio nel dettaglio.

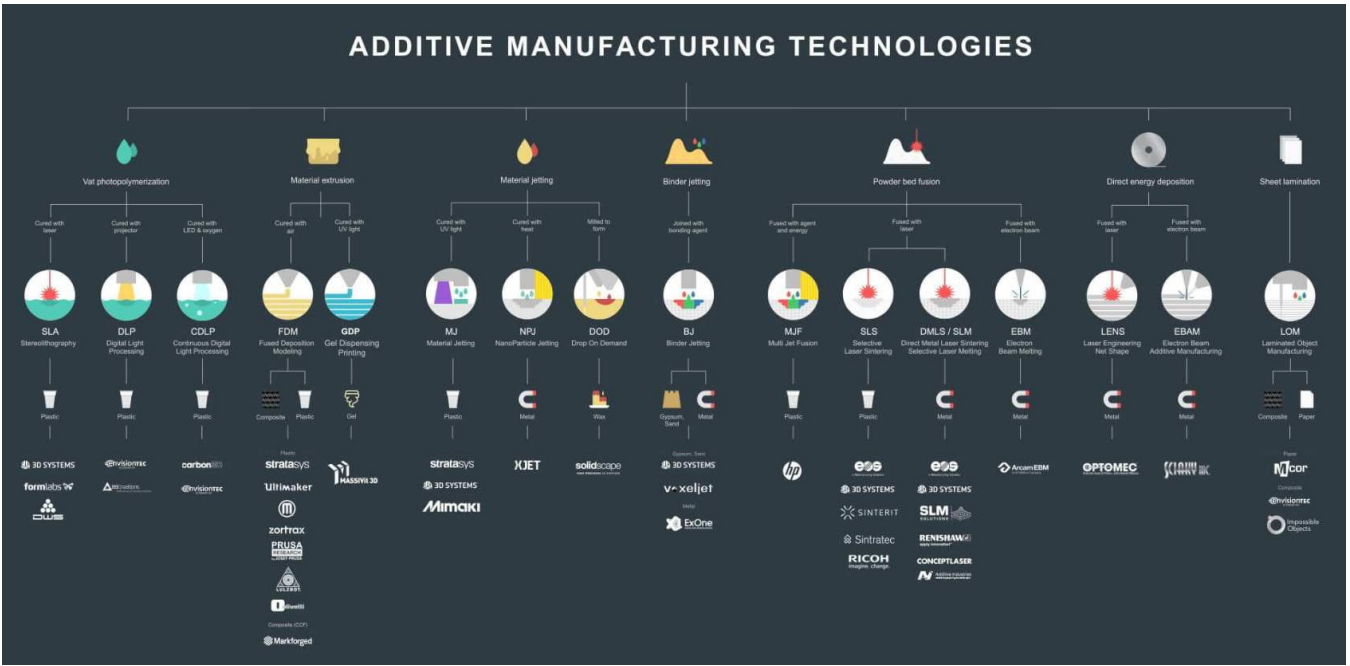


Figura 1.1.1 Principali Tecnologie dell'Additive Manufacturing



Figura 1.1.2 Dettagli delle varie tecnologie AM

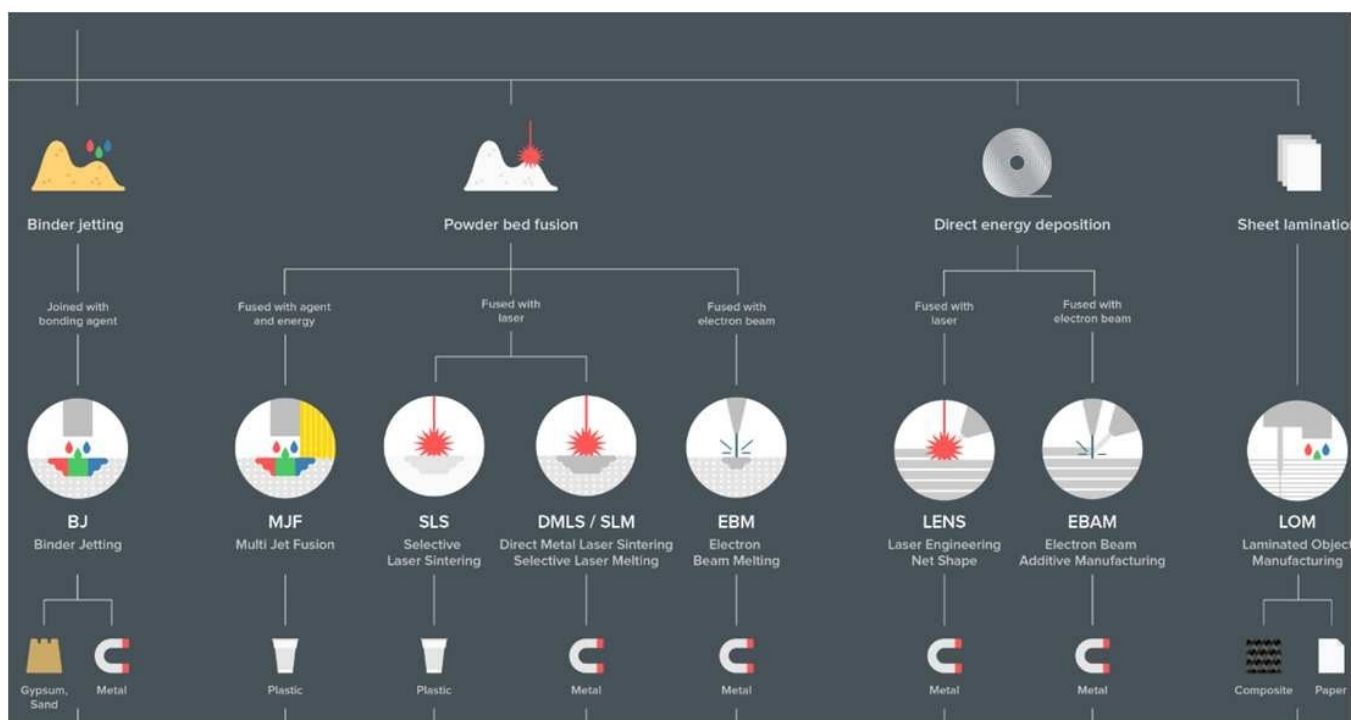


Figura 1.1.3 Dettagli delle varie tecnologie AM

Le tecnologie additive sono suddivise in tre macro aree che si basano sulle caratteristiche di consistenza della materia prima e sono:

- **POLVERI:** tecniche basate sulla sinterizzazione o fusione delle polveri (attraverso laser o fascio di elettroni) o sulla deposizione di un legante chimico su un letto di polvere omogeneo.
- **SOLIDI:** tecniche che prevedono l'incollaggio stratificato di fogli o l'estrusione di un materiale solido o semi solido.
- **LIQUIDI:** tecniche di fotopolimerizzazione tramite lampade UV o di stampaggio a getto. Il materiale subisce una reazione chimica creando legami tra molecole separate.

L'impiego di una specifica tecnologia è una scelta da effettuare in base ad una serie di parametri, che sono:

- tipo di materiale
- resistenza meccanica del pezzo
- finitura superficiale desiderata del pezzo
- velocità di produzione
- investimento necessario
- costo finale

L' ASTM International (American Society for Testing and Materials), organismo di normalizzazione statunitense, suddivide le tecnologie di fabbricazione additiva nelle seguenti famiglie di processi:

- **VAT POLYMERIZATION**
- **MATERIAL EXTRUSION**
- **MATERIAL JETTING**
- **BINDER JETTING**
- **POWDER BED FUSION**
- **DIRECT ENERGY DEPOSITION**
- **SHEET LAMINATION**

1.2 Principali tecnologie utilizzate nel settore Additive Manufacturing

A. VAT POLYMERIZATION

Le principali tecnologie utilizzate sono:

1. Stereolithography (SLA)
2. Digital Light Processing (DLP)

Si parla di una tecnica in cui una sorgente luminosa attiva il fotopolimero, direzionando il fascio lungo la traiettoria che percorre la sezione dell'oggetto tramite uno specchio in rapido movimento. Tale tecnica è costituita da un laser puntiforme per SLA che foto polimerizza punto per punto la sezione, inoltre da un proiettore per la DLP che attiva il polimero su tutta la sua sezione in modo uniforme.

Il fotopolimero è contenuto in una vasca con una piattaforma orizzontale che supporta la parte e si abbassa di uno step dopo la solidificazione di ogni strato.

Alcuni valori tipici di questa tecnologia sono:

- Materiale: **Plastica (polimerizzata)**
- Dimensione minima: **0.1 mm**
- Tolleranze tipiche: **± 0.15 mm**
- Spessore minimo dei layer: **0.016 mm**

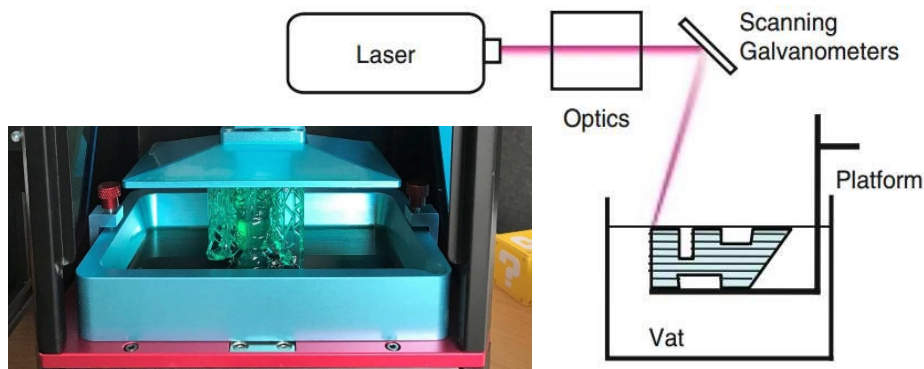


Figura 1.2.1 Rappresentazione della tecnologia Vat Polymerization

B. MATERIAL EXTRUSION

La principale tecnologia utilizzata è: **Fused Deposition Modeling (FDM)**, dove si parla di una resina termoplastica malleabile in uno stato semi-solido depositata, attraverso un estrusore, su uno strato di materiale sottostante dove si era depositato in precedenza. Inoltre questa tecnica sfrutta un materiale di supporto per evitare il collasso della struttura. La capacità di poter depositare e indurire progressivamente gli strati consente la fabbricazione dal basso verso l'alto. Si è notato che permette l'utilizzo di materiali speciali come l'Ultem (polietereimmide, anche indicato con la sigla PEI) per prodotti e attrezzature avanzate per i settori medico, automobilistico, aerospaziale e alimentare. La finitura superficiale risulta grezza con in evidenza i diversi strati dei filamenti. Per finire la superficie migliora attraverso procedimenti di sabbiatura, abrasione chimica o verniciatura.

Vediamo alcuni valori tipici di questa tecnica:

- Materiale: **Plastica, Materiale composito**
- Dimensione minima: **0.2 mm**
- Tolleranze tipiche: **± 0.2 mm**
- Spessore minimo dei layer: **0.15mm**

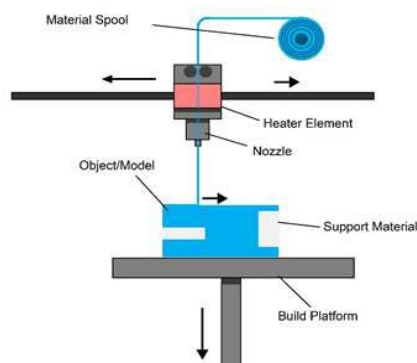
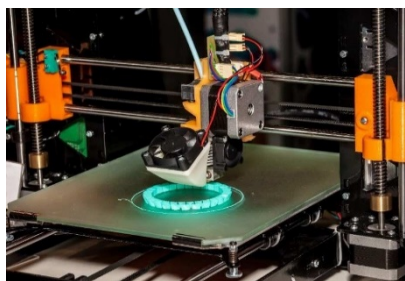


Figura 1.2.2 Rappresentazione della tecnologia Material Extrusion

C. MATERIAL JETTING

Le principali tecnologie adottate sono:

- **Material Jetting Modeling (MJM)**
- **Photopolymer Jetting (PolyJet)**

La testina di stampa è simile alle stampanti Inkjet. Inoltre il materiale utilizzato si trova allo stato liquido e quindi si parla di cera e resine acriliche per la Multi Jet Modeling mentre per la Polyjet si parla di un fotopolimero che viene attivato da una fonte di luce ultravioletta. Il secondo materiale, solubile, utilizzato per gli elementi di supporto a perdere. Inoltre hanno un elevato livello estetico e, a seconda del materiale, medie/alte proprietà meccaniche.

Alcuni valori tipici sono:

- Materiale: **Plastica (polimerizzata)**
- Dimensione minima: **0.1 mm/0.15 mm**
- Tolleranze tipiche: **± 0.025 mm**
- Spessore minimo dei layer: **0.015 mm**

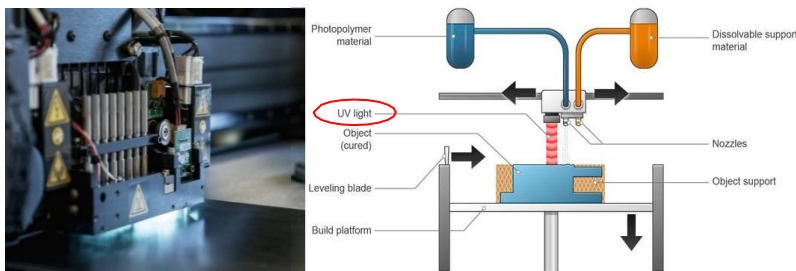


Figura 1.2.3 Rappresentazione della tecnologia Material Jetting

D. BINDER JETTING

In questa tecnica viene rilasciato un legante chimico in grado di unire in maniera puntiforme e progressiva i singoli granelli di un letto omogeneo di polvere. La polvere non trattata dal legante rimane sospesa sullo strato sottostante e viene rimossa al termine del procedimento per essere riutilizzata. Infatti qua si parla di Polveri plastiche, compositi e polveri metalliche. Nel Binder Jetting si ottengono manufatti molto porosi e piuttosto fragili, ma ottimi modelli estetici a scopo dimostrativo. Questa tipica tecnologia è più economica rispetto alle altre.

Alcuni valori tipici di questa tecnica sono:

- Materiale: **Sabbia, Plastica, Metallo, uniti da leganti**
- Dimensione minima: **0.1 mm**
- Tolleranze tipiche: **± 0.13 mm**

- Spessore minimo dei layer: **0.09 mm**

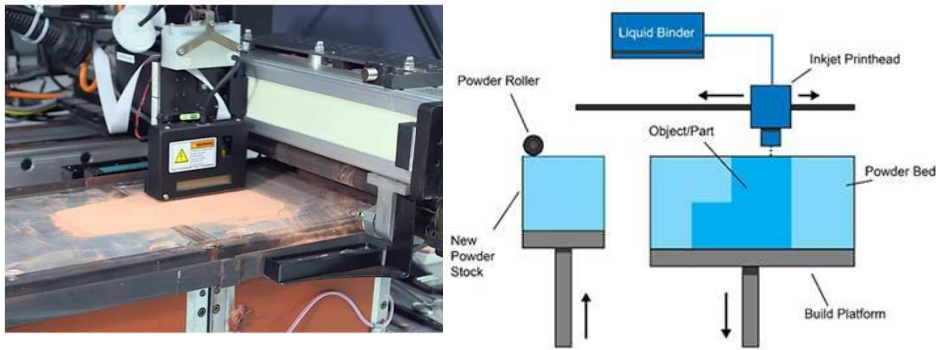


Figura 1.2.4 Rappresentazione della tecnologia Binder Jetting

1.3 Tipologie di Materiali Presenti nell'AM

Le tecnologie dell'AM prevedono l'utilizzo di varie tipologie di materiali, di cui due in particolare risultano di grande interesse nel settore dell'ingegneria industriale:

- **Polimeri:** resine termoplastiche che garantiscono costi inferiori sia per l'acquisto del materiale stesso sia in termini di tecnologie di stampa.
- **Metalli:** prestazioni di livello più elevato per le proprietà meccaniche, ma richiedono tecnologie più costose e complesse.

MATERIALI POLIMERICI

Tra i polimeri, solo i termoplastici possono essere utilizzati per l'AM. Tra i più interessanti troviamo:

- **PLA:**

Il PLA risulta essere molto flessibile e adatto a molte applicazioni. Inoltre è un derivante dell'amido, risulta essere eco-friendly, ha una buona stabilità coniugata ad un ritiro ridotto, ha buone caratteristiche meccaniche ed infine risulta essere stampabile anche a basse temperature derivante dall'amido.

- **ABS:**

L'ABS ha ottime proprietà meccaniche, inoltre ha anche alta resistenza meccanica e al graffio. Inoltre tale materiale ha una buona resistenza al calore, è molto rigido, può essere lucidato e verniciato facilmente ed infine ha un elevato ritiro.

- **NYLON:**

Il Nylon ha delle proprietà meccaniche molto buone, inoltre si salda bene su sé stesso rendendo meno visibili i layer. Tale materiale non ha la necessità di un piatto riscaldato per essere stampato, lavora su temperature di stampaggio superiori a 250°, infine risulta essere molto sensibile all'umidità.

- **HDPE:**

L'HDPE è un materiale atossico utilizzato nei settori alimentari, chimici ed elettrici. Risulta avere un basso assorbimento dell'acqua ma ha una grande resistenza agli agenti chimici.

- **PVA:**

Il PVA è utilizzato come materiale di supporto solubile. Il materiale è idrosolubile ma resistente agli idrocarburi, inoltre è più complesso da estrarre per le alte temperature di stampa ed infine va conservato in un luogo asciutto per evitarne il degrado.

MATERIALI METALLICI

- **ALLUMINIO:**

L'Alluminio viene utilizzato nell'automotive e nell'aeronautica, risulta essere molto leggero e ha un buon compromesso fra capacità termiche e peso contenuto.

- **COBALTO-CROMO:**

Viene usato in molte applicazioni ingegneristiche ad elevata temperatura, come ad esempio motori per aerei e ambito biomedico. Ha delle proprietà meccaniche e termiche elevatissime, inoltre le proprietà meccaniche migliorano con il salire della temperatura fino a 500-600°C ed infine ha un'ottima resistenza alla corrosione.

- **NICHEL:**

Viene utilizzato nel settore aerospaziale ed energetico ad esempio per le turbine. Inoltre sappiamo che resistono ad elevatissime temperature spesso anche utilizzate fino a 1200°C, ed infine ha un'ottima resistenza meccanica ed all'ossidazione.

- **ACCIAIO:**

È una lega che ha un rapporto costo/prestazioni ottime, con una notevole flessibilità applicativa. Gli acciai AM hanno le stesse caratteristiche che possiedono gli acciai normali forgiati, possono anche essere inossidabili e sottoposti a tempra, come quelli derivanti dalla forgiatura.

- **TITANIO:**

È ideale per applicazioni biomediche ma anche in ambito motorsport e aerospaziale. Risulta essere una lega con bassa densità, con notevoli proprietà meccaniche, un'elevata resistenza alla corrosione, un'ottima purezza ottenibile in alcune polveri ed infine una buonissima biocompatibilità.

1.4 Vantaggi e Svantaggi

Per quanto riguarda i vantaggi dell'Additive Manufacturing sappiamo che sono:

1. Massima libertà in fase di progettazione (permette la realizzazione di forme complesse, non realizzabili con altre tecnologie).
2. Massima leggerezza del componente grazie alla possibilità di “mettere il materiale solo dove serve”.
3. Massima personalizzazione dell'oggetto.
4. Nessun costo per la realizzazione di stampi, utensili ed attrezzature di produzione.
5. Riduzione dei costi e tempi dal disegno al prototipo
6. Riduzione dei set up per passare alla lavorazione di un prodotto a quello successivo
7. Indipendenza dei costi di produzione dalla quantità da produrre
8. Abbattimento degli sfridi di produzione

Per quanto riguarda gli svantaggi dell'Additive Manufacturing possiamo vedere che sono:

1. Numero limitato di materiali utilizzabili, la produttività delle macchine è generalmente bassa, la qualità dei prodotti varia notevolmente, con la necessità di effettuare operazioni di finitura.
2. Costo relativamente alto delle attrezzature e dei materiali di consumo.
3. Non sempre adattabile a pezzi molto semplici o di grandi dimensioni, oppure a serie di produzione con volumi elevati.
4. Non sempre adatto per fabbricare pezzi a basso valore aggiunto.
5. Esposizione dei lavoratori a materiali pericolosi, calore, fonti laser.

1.5 Hybrid Manufacturing

Questa tipologia di tecnologia di produzione ibrida combina i punti di forza dell'AM con quelli della tradizionale lavorazione CNC/sottrattiva, per creare un singolo flusso produttivo che utilizza efficacemente entrambe le tecniche. Questi sistemi ibridi sono spesso costituiti da una macchina utensile, fresa, tornio o braccio robotico, dotata di una testa per la Direct Energy Deposition (DED) in grado di depositare polvere o filo metallico.

La combinazione delle due tecnologie può prevedere:

- Un processo additive seguito da lavorazioni sottrattive, ad esempio per realizzare fori o levigare e superfici.

- Operazioni di machining seguite da tecniche additive ad esempio per creare una struttura di base dove poi deve essere realizzato un pezzo complesso.

Inoltre sappiamo che esistono altri sistemi che combinano le lavorazioni con la fusione a letto di polvere (PBF) per i metalli e che utilizzano l'estrusione di materiale come processo additivo per la lavorazione di polimeri.



Figura 1.5.1 Rappresentazione della nuova tecnologia dell'Hybrid Manufacturing

2. Additive Manufacturing in ambito metallico – Stato dell’arte

Dalla figura 2.1 si può notare come l’Additive Manufacturing è una tecnologia che in ambito metallico si divide in tre principali sottocategorie, ma che nel nostro caso studio andremo ad analizzare due di queste più importanti tecnologie, e sono:

- ***Directed Energy Deposition (DED)***
- ***Powder Bed Fusion (PBF)***

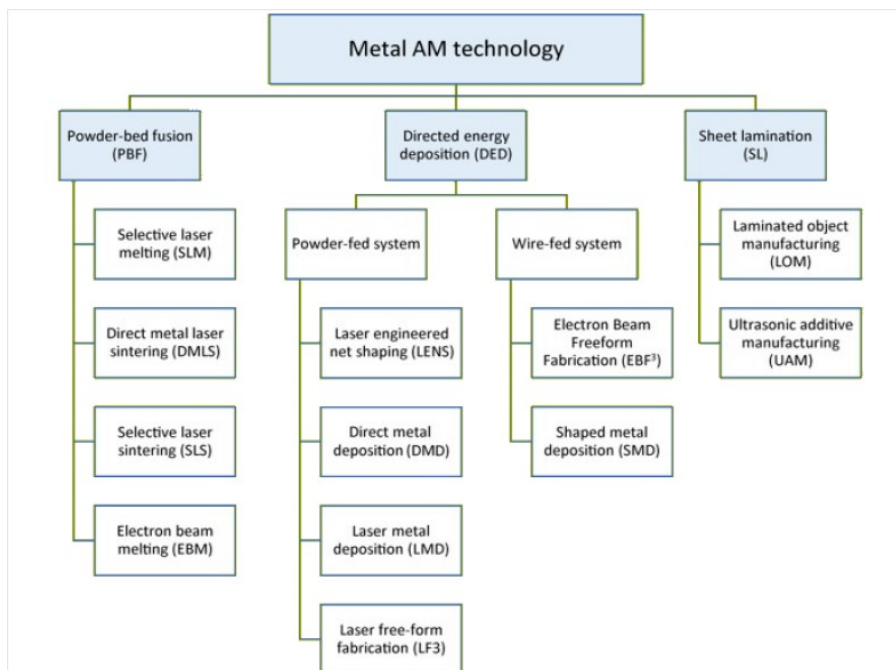


Figura 2.1 Classificazione delle tecniche di Additive Manufacturing utilizzate in ambito metallico

2.1 Directed Energy Deposition

La principale tecnologia utilizzata è: Laser Metal Deposition (LMD). Vengono utilizzate delle polveri metalliche, con gas di protezione ma anche laser erogati simultaneamente attraverso un ugello. La polvere viene trasportata da un gas inerte che permette al materiale di essere soffiato lungo la traiettoria del fascio laser in modo selettivo. L’energia del laser fonde parzialmente le particelle di metallo, che a loro volta si fondono completamente a contatto con il bagno di fusione creando così un legame metallico tra la polvere e il substrato. Successivamente il substrato o il laser vengono spostati per permettere al bagno di fusione di solidificarsi e di produrre così una piccola zona rialzata di metallo solido (traccia). Ora possiamo analizzare alcuni valori tipici di questa tecnologia:

- Materiale: **Polvere metallica fusa da laser**
- Dimensione minima: **0.001 mm**
- Tolleranze tipiche: **±0.02 mm**
- Spessore minimo dei layer: **0.02 mm**
- Finitura superficiale: **40 μm RA**
- Densità: **fino a 99.9%**

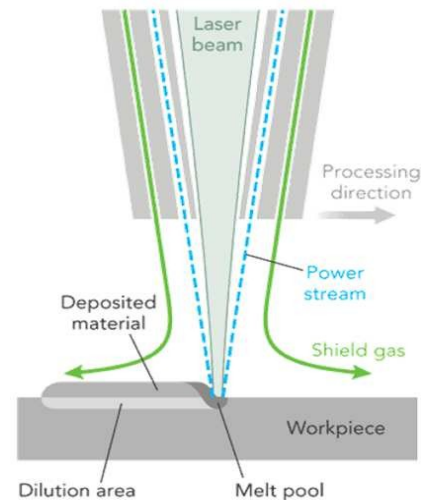


Figura 2.1.1 Rappresentazione della tecnologia Directed Energy Depositi

2.2 Powder Bed Fusion

Il Powder Bed Fusion è un processo che sfrutta l'energia termica per fondere e solidificare una regione di un letto di polvere, posizionata su un piano mobile in direzione verticale. Una volta completato uno strato, la piattaforma mobile si muove verso il basso e un elemento mobile orizzontale deposita nuova polvere per lo strato successivo e così via. La polvere non processata viene poi recuperata e riutilizzata.

Alcune principali tecnologie utilizzate:

- Selective Laser Sintering (SLS): si tratta di uno specchio mobile che dirige un fascio laser colpendo la polvere che viene sinterizzata per poi legarsi ai granelli circostanti con legami molecolari.
- La Selective Laser Melting (SLM), nota anche come Direct Metal Laser Melting (DMLM) o Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), è una tecnica di prototipazione rapida, stampa 3D o produzione additiva (AM) progettata per utilizzare un laser ad alta intensità di potenza con la capacità di sciogliersi e fondere insieme a polveri metalliche.
- Electron Beam Melting (EBM): si tratta di un fascio di elettroni direzionati da due magneti rotanti ad anello.

È importante sapere che i pezzi realizzati con (SLS) hanno una porosità maggiore rispetto a quelli realizzati tramite (SLM) e (EBM), ma quest'ultimi hanno una struttura molecolare più omogenea con migliori proprietà meccaniche.

Valori Tipici:

- Materiale: **Polvere metallica**
- Dimensione minima: **0.04 mm / 0.2 mm**
- Tolleranze tipiche: **±0.02 mm / 0.2 mm**
- Spessore minimo dei layer: **0.025 mm / 0.05 mm**
- Finitura superficiale: **4÷10 µm RA, 20.0÷25.0 µm RA**
- Densità: **fino a 99.9%**

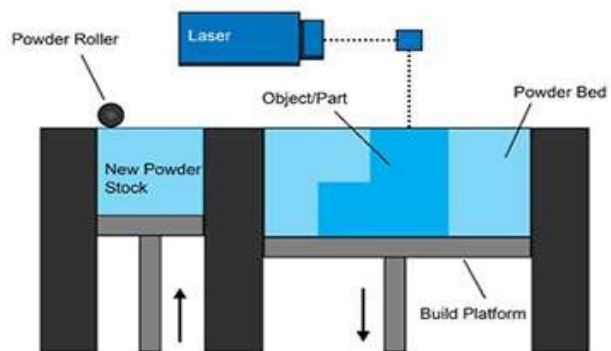


Figura 2.2.1 Rappresentazione della tecnologia Powder Bed Fusion

2.2.1 Laser Powder Bed Fusion (LPBF): Generalità sulla tecnologia utilizza e gli aspetti inerenti alle proprietà della polvere e ai parametri di processo

Il sistema LPBF (Laser Powder Bed Fusion) prevede un sistema di lenti e uno scanner per indirizzare il fascio laser. La dimensione dello spot del laser è solitamente compresa tra 50 µm e 180 µm. La polvere contenuta in apposite tramogge viene inviata con un sistema di alimentazione sulla superficie di costruzione e viene distribuita attraverso una racla in uno strato generalmente di 20-60 µm, che verrà poi selettivamente investito dal fascio laser secondo la geometria desiderata. Il substrato ha lo scopo di fornire, assieme al letto di polvere che non viene colpito dal fascio laser, un supporto meccanico per il pezzo in costruzione; infatti dopo che il primo strato è stato completato, la piattaforma si abbassa, viene distribuita nuova polvere e gli strati che sono già depositati non devono muoversi. La piastra di costruzione ha anche l'importante compito di dissipare il calore che si crea durante il processo e in alcuni casi può anche essere riscaldata, al fine di abbassare il gradiente termico con il pezzo in costruzione, che potrebbe portare alla formazione di elevate tensioni residue e conseguente deformazione del componente. Al fine di sfruttare al meglio l'area di lavoro è anche possibile la costruzione di più pezzi all'interno dello stesso letto di polvere. Solitamente il processo LPBF viene condotto in una camera in cui viene insufflato gas inerte al fine di prevenire l'ossidazione del materiale. Quando la costruzione del particolare è completata, è

necessario rimuovere la polvere in eccesso e provvedere alla separazione dal substrato. In alcuni casi è possibile anche effettuare un trattamento termico aggiuntivo volto a distendere le tensioni residue che si sono formate durante il processo di AM. Sebbene sia quindi necessario un post processo nel caso delle tecniche PBF, esse garantiscono una finitura superficiale generalmente superiore a quella che si ottiene tramite DED, questo è dovuto al fatto che nelle macchine a letto di polvere le potenze impiegate sono inferiori a causa della taglia granulometrica più fine delle polveri. In alcuni casi la polvere non utilizzata può essere riutilizzata per un nuovo processo di costruzione, dopo aver effettuato però un'operazione di setacciatura volto a eliminare le particelle più grandi, generate dall'aggregazione di più particelle per effetto dell'interazione con il fascio laser. Il processo LPBF è caratterizzato da diversi fattori che determinano le proprietà finali dei componenti prodotti, in termini di densità, microstruttura e proprietà meccaniche. In Tabella 2 vengono riassunte le principali variabili del processo LPBF che possono essere divise in proprietà della polvere e parametri di processo. La forma sferica viene comunemente preferita per questa tecnica in quanto garantisce una migliore scorrevolezza, grazie alla quale si ottiene un'ottima uniformità dell'altezza dello strato di polvere, in modo da garantire un assorbimento uniforme del fascio laser. Per queste ragioni viene comunemente usata l'atomizzazione a gas che presenta un costo superiore rispetto all'atomizzazione ad acqua, la quale però porta alla produzione di particelle di forma più irregolare, che non consentono di ottenere una buona uniformità del letto di polvere. Inoltre risulta conveniente avere un'ampia distribuzione granulometrica che può avere un effetto positivo sulla densità del compatto di polvere, permettendo così di raggiungere densità maggiori sui componenti finiti usando una potenza più ridotta del fascio laser. Un altro aspetto che risulta importante nel processo LPBF è il controllo della composizione chimica della polvere, infatti l'elevata area superficiale delle particelle è altamente reattiva e può portare a una contaminazione della polvere attraverso la presenza di umidità, gas adsorbiti, molecole organiche o film di ossidi che possono portare a una scarsa densificazione dei pezzi prodotti oltre a un decremento delle proprietà meccaniche.

Parametri di processo	Proprietà della polvere
Potenza laser	Forma delle particelle
Velocità di scansione	Dimensione e distribuzione granulometrica
Hatching distance	Composizione chimica
Atmosfera protettiva	Conducibilità termica
Raggio del fascio laser	Temperatura di fusione
Tipologia laser	Assorbività / Riflettività
Spessore dei layer	
Strategia di scansione	
Orientazione di crescita	
Flusso del gas	
Temperatura del letto di polvere	

Figura 2.2.1.1 Rappresentazione dei parametri relativi al processo e alle proprietà della polvere per LPBF.

Risulta molto importante ottimizzare i parametri di processo al fine di ottenere una crescita omogenea del materiale in costruzione ed evitare la formazione di difetti e porosità. Nel caso vengano utilizzate basse potenze, elevate velocità di scansione ed elevati spessori del layer da fondere si può incorrere nel fenomeno del *balling*. Questo comporta un'instabilità all'interno della pozza fusa che porta alla creazione di un deposito irregolare costituito da piccole gocce di metallo. Questo fenomeno oltre a deteriorare l'uniformità della superficie può anche influenzare negativamente la deposizione del layer successivo, causando delle disomogeneità all'interno del componente.

2.3 Inconel 718: Caratteristiche chimico- fisiche e campi di applicazione

Il progetto di tesi introdotto dai nostri collaboratori Marco Mandolini e Paolo Cicconi, era quello di voler realizzare in collaborazione con l'azienda Baker Hughes (Nuovo Pignone) una girante di un compressore centrifugo con l'utilizzo di un particolare materiale che è l'Inconel 718. Prima di mostrare cos'è questo tipo di materiale e le sue caratteristiche vi mostro attraverso la Figura 2.3.1 un'immagine dettagliata del materiale esaminato e preso in considerazione nel nostro caso studio.



Fig. 2.3.1 Polvere di Inconel 718

A questo punto introduciamo il materiale trattato in esame. L'Inconel è un marchio dell'azienda statunitense Special Metals Corporation e fa riferimento alla famiglia delle superleghe a struttura austenitica a base di nichel-cromo. L'Inconel è una lega, principalmente a base di nichel (48%-72%) e cromo (14%-29%). Presenta un'ottima resistenza all'ossidazione alle alte temperature ed alla corrosione; inoltre hanno una buona resistenza alla rottura da scorrimento alle alte temperature, miglior resistenza rispetto all'Inconel X-750, miglior proprietà meccaniche alle basse temperature rispetto a Nimonic 90 e Inconel X-750, induribile per precipitazione ed infine resistente alle alte temperature anche in applicazioni dinamiche. Pertanto queste sue caratteristiche viene impiegato in parti di turbine a gas, nel settore petrolifero (per esempio per il rivestimento interno dei tubi), negli inceneritori di rifiuti RSU/industriali tossico-nocivi, per la protezione dei tubi di caldaia a recupero, fissato con saldatura o con thermal spraying, per la realizzazione delle scatole nere degli aerei e nell'industria chimica.

Proprietà INCONEL 718

Densità	8.19 g/cm ³	0.296 lb/in ³
Punto di fusione	1336°C	2437°F
Coefficiente di espansione	13.0 µm/m °C (20-100°C)	7.2×10 ⁻⁶ in/in °F (70-212°F)
Modulo di rigidità	77.2 kN/mm ²	11197 ksi
Modulo di elasticità	204.9 kN/mm ²	29719 ksi

Composizione chimica:

- Elemento:
- 1. Nichel: Min: 50% Max: 55%
- 2. Cromo: Min: 17% Max: 21%
- 3. Molibdeno: Min: 2.80% Max: 3.30%
- 4. Niobio: Min: 4.75% Max: 5.50%
- 5. Titanio: Min: 0.65% Max: 1.15%
- 6. Alluminio: Min: 0.20% Max: 0.80%

3. Geometrie e strutture di supporto lattice analizzate e utilizzate

Una volta analizzata nel dettaglio la tecnologia studiata e presa in considerazione, cioè LPBF, lo step successivo del progetto affrontato in collaborazione con l'azienda è stato quello di poter capire quali erano le celle elementari da poter utilizzare per la realizzazione dei supporti per poter sorreggere una girante di un compressore centrifugo, mostrata in Figura 3.1; ma alla fine la geometria di riferimento sarà l'1-12 di girante del compressore centrifugo, vedi Figura 3.2.

A questo punto lo studio delle celle elementari si è svolto su tre principali tipologie che poi nel mio percorso di formazione di tirocinio si è concluso con l'analisi di due sole tipologie che adesso andremo vedere nel dettaglio e saranno la cella FCCZ e la cella FCC. La terza tipologia vista di cella sarà la GYROID che però su di essa farò solamente degli accenni.

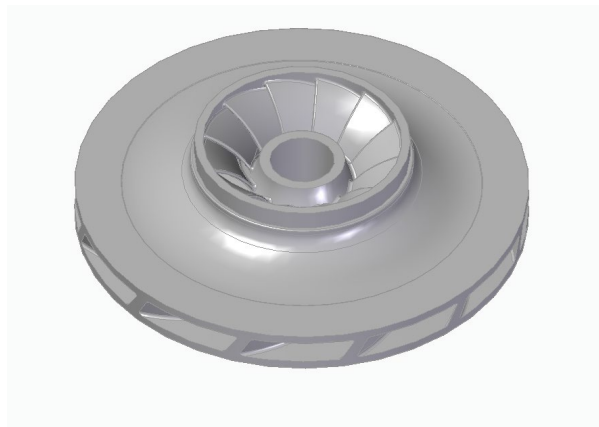


Figura 3.1 Girante di un compressore centrifugo

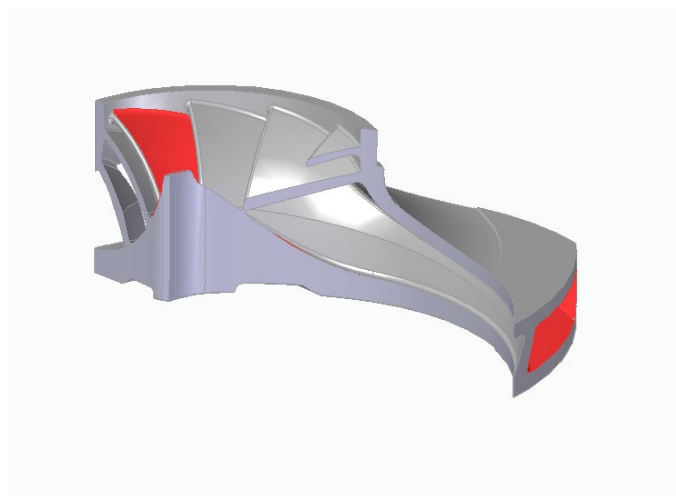


Figura 3.2 Vano di un compressore centrifugo

3.1 Cella FCCZ

Le peculiarità della struttura FCCZ, vedi Figura 3.1.1, sono di essere costruita con un particolare materiale, cioè una superlega di Nichel chiamata INCONEL 718.



Parametro	Valore	UoM	Descrizione
Thickness	0,5	mm	Diametro strut
xDimension	2	mm	Dimensione cella in x
yDimension	2	mm	Dimensione cella in y
zDimension	2	mm	Dimensione cella in z
xQuantity	3	mm	Numero di celle in x
yQuantity	3	mm	Numero di celle in y
zQuantity	3	mm	Numero di celle in z
BasePlateThickness	0,8	mm	Spessore piatto superiore
TopPlateThickness	3	mm	Spessore piatto inferiore
SpecimenType	1	-	Tipo di provino (0: Cilindrico; 1: Rettangolare)
xSpecimenDimension	6	mm	Dimensioni del provino in x
ySpecimenDimension	6	mm	Dimensioni del provino in y
zSpecimenDimension	9,8	mm	Dimensioni del provino in z

Figura 3.1.1 Cella FCCZ con associati i suoi parametri di costruzione.

Tuttavia la struttura subisce delle deformazioni molto rilevanti, ma al tempo stesso risulta essere molto leggera. Si aggirano su valori di compressione pari a 0.8 fino a 10.9 Mpa con un modulo che varia tra 22.1 a 1246 Mpa. Inoltre per quanto riguarda la loro densità si è visto che si aggirano su valori in percentuale pari a 2.5 fino a un massimo di 13.8. Vedi Tabella 3.1.2 per la rappresentazione dei dati sulla cella FCCZ.

Table 4
Quasi-static compressive test data for SLM lattice data collected from literature, ordered by unit cell topology. Data represents ranges of values reported. Dash (–) indicates an absence of data.

Topology	Material	Relative density (%)	Cell size (mm)	Strut diameter (mm)	Geometry (N = nominal, M = measured)	Compressive strength (MPa)	Modulus (MPa)	Reference	Data points
BCC	316L SS	3.5–13.8	1.25	0.19–0.22	N	0.36–5.89	17.89–378	[125]	21
BCC	316L SS	2.3–4.3	–	0.162–0.23	N	0.2–1	8.68–57.56	[64]	18
BCC, BCCZ	316L SS	5.3–16.6	1.5–2.5	0.25	N	0.92–15	50–2700	[123]	8
BCC, BCCZ	AlSi10Mg	0.7–22.2	10	1	N, M	0.46–4.36	21.71–490.22	[73]	8
BCC, BCCZ, FCC, FCCZ	Inconel 625	2.5–13.8	2–4	0.3	N, M	0.8–10.9	22.1–1246	[45]	13
BCC, BCCZ, FCC, FCCZ, FBCCZ, FBCCXYZ	Ti6Al4V, AlSi12Mg	7.5–39.7	2–7.5	0.3–1	N, M	4–124	110–2780	[126]	18
BCC, Octet-truss	SS 630 (17-4PH)	43	–	–	N, M	–	9710–13,960	[68]	5
Diamond	Ti6Al4V	3.6–26.5	–	–	N	8.2–99.64	370–4240	[13]	4
Dodecahedron	Ti6Al4V	15.78–314.55	–	–	N, M	19.4–117.2	550–3490	[127]	4
Gyroid	CP titanium	26.7–31.3	2–3	–	N	44.9–54.5	1465–2676	[76]	3
Gyroid, Schwartz diamond	Ti6Al4V	5–95	3–7	–	N	47–1559	120–17,190	[71]	4
Octet-truss, Rhombicuboctahedron	AlSi10Mg	10.4–14.7	–	–	N, M	4.7–9.1	690–1250	[75]	2
Schwartz primitive, cylinder grid	Ti6Al4V	70–90	1.5	0.37–0.58	N, M	–	920–2420	[69]	4
Simple cubic	Ti6Al4V	19.4–36.2	–	0.54–0.64	N, M	108–170	5360–8730	[72]	5
Truncated cuboctahedron, simple cubic, diamond	Ti6Al4V	20–34	–	–	N, M	31.7–112.6	2180–4578	[4]	12
Total									129

Tabella 3.1.2 Parametri relativi alla struttura FCCZ e FCC

Inoltre rispetto alle strutture GYROID, vedi Figura 3.1.3, che si stampano molto bene e le deformazioni sono molto basse, le FCCZ pesando di più risulta più difficile togliere il supporto in delle geometrie molto complesse. Inoltre questo comporterebbe dei maggior costi, maggior tempo di stampa e maggior tempo di rimozione dei supporti.



Figura 3.1.3 Cella elementare GYROID

3.2 Cella FCC

Le strutture FCC essendo costruite dello stesso materiale delle FCCZ, mi permettono di ottenere valori analoghi riguardo compressione, modulo e densità. Tuttavia si sono notate nel nostro caso alcune differenze. Innanzitutto le strutture FCC sono semplici da manovrare e realizzare in quanto già presenti di default nel programma. Inoltre si è visto che come tipo di strutture subiscono delle piccole deformazioni che possiamo essere considerate nulle rispetto alle FCCZ, che invece subiscono maggior deformazioni e problemi nel supportare una determinata geometria che risulta essere molto complessa come il vano della girante di un compressore centrifugo.

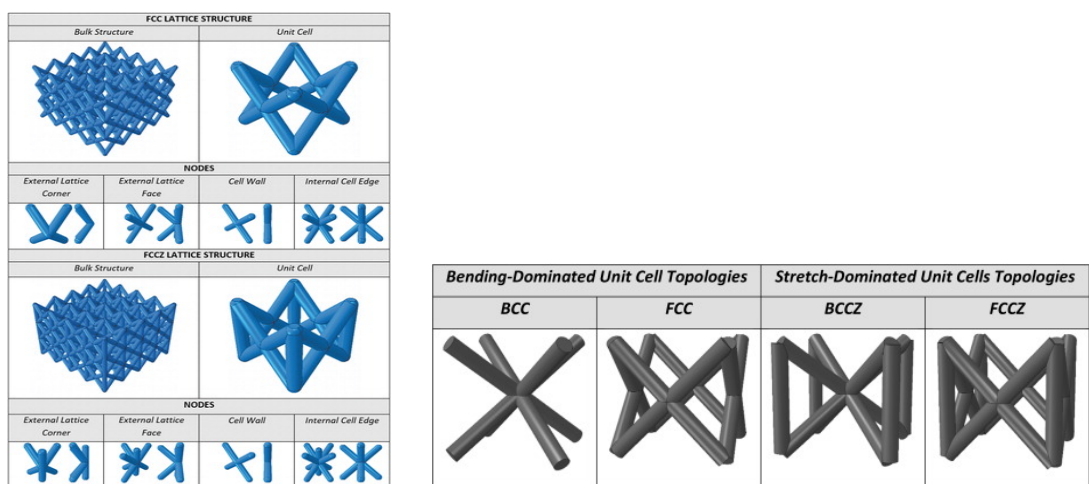


Figura 3.2.1 Rappresentazione cella elementare FCC

3.3 Software utilizzati per la creazione delle celle elementari utilizzate poi per la realizzazione dei supporti

Ora introdotto le diverse tipologie di celle elementari, è il momento di vedere come sono state realizzate attraverso i diversi software messi a disposizione dai nostri diversi collaboratori, nello specifico parleremo di tre software principali che sono:

- Solid Edge 2021
- nTopology
- Ansys Additive Print

3.3.1 Solid Edge 2021

Solid Edge è un software di progettazione ibrida 2D/3D sviluppato da Siemens PLM Software.

Offre evolute funzionalità di modellazione e di progettazione dei componenti e degli assiemi, gestione trasparente dei dati e un ambiente integrato di analisi ad elementi finiti.



Figura 3.3.1.1 Rappresentazione del programma Solid Edge 2021

3.3.2 nTopology

È tra i più apprezzati strumenti software generativi. La nuova piattaforma nTop permette agli utenti di realizzare parti leggere, ottimizzate e con requisiti funzionali integrati.

Consente di realizzare facilmente geometrie performanti come reticoli, nervature strutturali, giroidi o topologie solide.

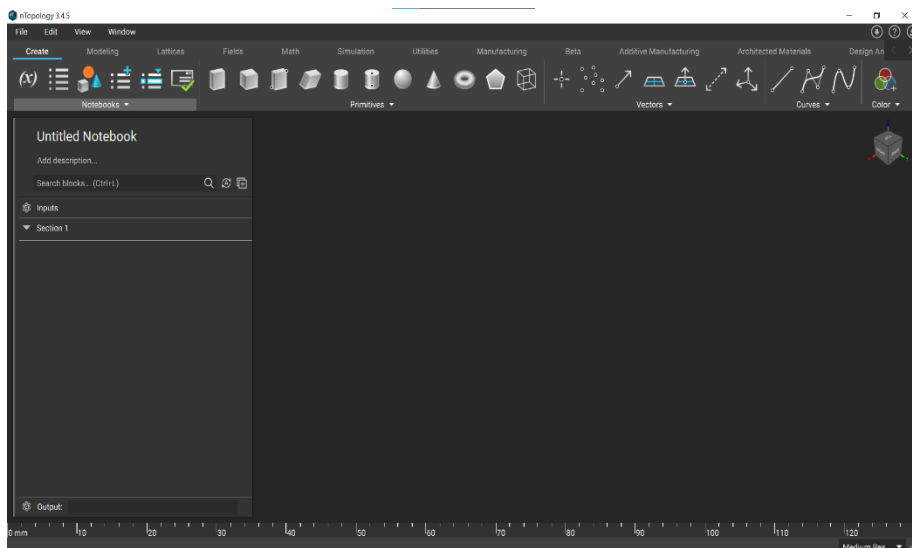


Figura 3.3.2.1 Rappresentazione del programma nTopology

3.3.3 Ansys Additive Print

Ansys offre una soluzione software completa e scalabile che minimizza il rischio dei processi di Additive Manufacturing e garantisce componenti certificati di alta qualità. Crea e ottimizza progetti adatti alla produzione additiva, includendo anche, e non solo, l'ottimizzazione topologica e reticolare della parte. Simula il processo di produzione Metal Additive per stampare le parti in esame per la prima volta e ridurre significativamente i tempi del ciclo di sviluppo del prodotto. Prepara e ottimizza i Build Files e li invia direttamente all'Additive Manufacturing Equipment. Additive Print può caricare supporti generati da altri strumenti software. Per simulazioni termiche ad alta fedeltà sono disponibili materiali aggiuntivi, come la lega di alluminio battuto termotrattabile Al357, AlSi10Mg e Ti64. Ulteriori miglioramenti del solver includono tempi di simulazione più rapidi e una maggiore robustezza per le strutture a pareti sottili. Gli ultimi miglioramenti includono la possibilità di leggere i file di build da produttori di macchine come EOS e SLM e wizard per trasferire i risultati a Ansys Workbench Additive per simulazioni avanzate come cut-off.

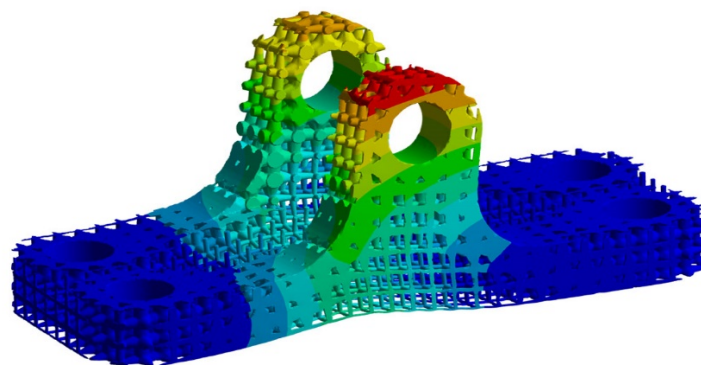


Figura 3.3.3.1 Rappresentazione del programma Ansys Additive Print

4.Workflow

Il workflow eseguito è stato innanzitutto ricevere il materiale di lavoro da parte dei professori riguardo alla geometria da studiare e in particolare la girante completa del compressore centrifugo, vedi Figura 4.1, ed l'1-12 di girante del compressore centrifugo con il file in formato .STL, vedi Figura 4.2, inoltre il provino costruito in Solid Edge da parte dei professori con la cella elementare FCCZ sempre in formato .STL, vedi Figura 4.3, con allegato i parametri di costruzione della cella FCCZ presenti nel foglio .Excel, vedi Figura 4.4. A questo punto lo step successivo era una volta ottenuto il materiale di supporto come poter costruire i supporti nelle zone più critiche per le due geometrie considerate precedentemente attraverso l'utilizzo di un particolare software chiamato nTopology. Dopo un attento studio effettuato si è visto che costruire supporti per l'intera girante del compressore centrifugo risultava essere impossibile in quanto il software non reggeva i comandi che mandavamo come input. Notato questo problema l'attenzione si è focalizzata solamente nel realizzare i supporti per l'1-12 di girante, però dato che anche qui il problema era quello di avere molte superfici su livelli diversi di costruzione si è deciso di effettuare un taglio su questa geometria in modo da avere una geometria molto più semplice chiamata "Taglio Vano Girante del Compressore Centrifugo" sempre in formato .STL, vedi Figura 4.5. Quindi il percorso finale intrapreso è stato studiare questa ultima geometria e realizzare i supporti con celle FCCZ e FCC, poi successivamente si è passato alla seconda geometria andando anche qui a costruire i supporti con celle FCCZ e FCC. Infine l'ultimo step finale è stato di simulare il tutto realizzato per ottenere i risultati finali, questo step si analizzerà più in dettaglio nel caso studio.

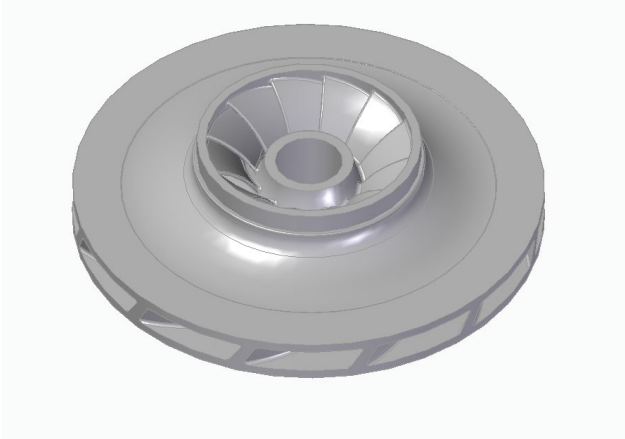


Figura 4.1 Girante compressore centrifugo

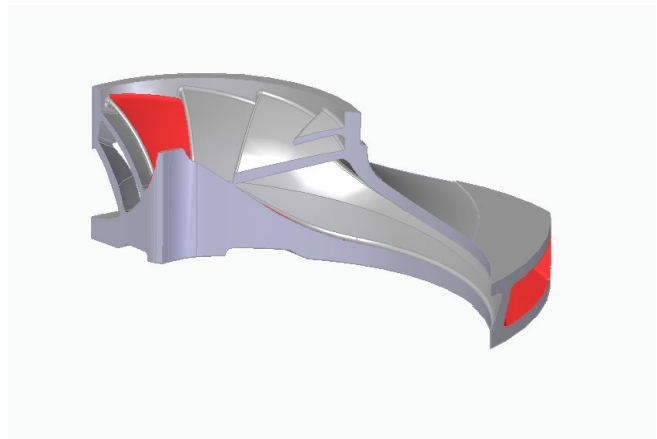


Figura 4.2 Vano del compressore centrifugo

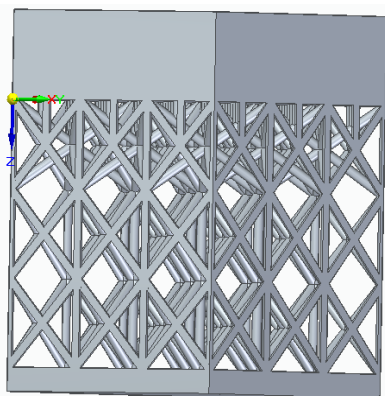


Figura 4.3 Provino con Celle FCCZ

Parametro	Valore	UoM	Descrizione
Thickness	0,5	mm	Diametro strut
xDimension	2	mm	Dimensione cella in x
yDimension	2	mm	Dimensione cella in y
zDimension	2	mm	Dimensione cella in z
xQuantity	3	mm	Numero di celle in x
yQuantity	3	mm	Numero di celle in y
zQuantity	3	mm	Numero di celle in z
BasePlateThickness	0,8	mm	Spessore piatto superiore
TopPlateThickness	3	mm	Spessore piatto inferiore
SpecimenType	1	-	Tipo di provino (0: Cilindrico; 1: Rettangolare)
xSpecimenDimension	6	mm	Dimensioni del provino in x
ySpecimenDimension	6	mm	Dimensioni del provino in y
zSpecimenDimension	9,8	mm	Dimensioni del provino in z

Figura 4.4 Parametri utilizzati per la costruzione della cella FCCZ

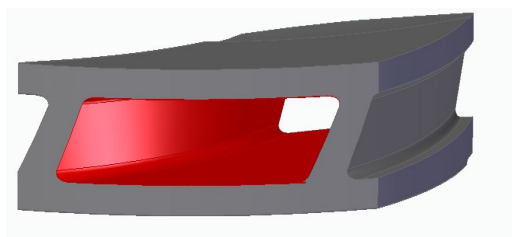
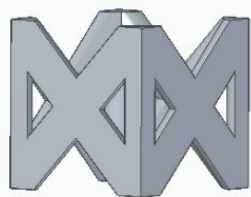


Figura 4.5 Taglio Vano Girante del Compressore Centrifugo

4.1 SOLID EDGE 2021: Costruzione cella FCCZ collegata ai suoi parametri e riconoscimento delle geometrie studiate

SOLID EDGE 2021 è un software in grado di creare delle singole parti su un modello CAD per poi essere esportare e riconosciute da moltissimi altri software presenti in commercio. Vediamo ora il workflow eseguito per ottenere la singola cella FCCZ con i suoi relativi parametri, vedi Figura 4.1.1, e le due geometrie studiate, vedi Figura 4.1.2.



Parametro	Valore	UoM	Descrizione
Thickness	0,5	mm	Diametro strut
xDimension	2	mm	Dimensione cella in x
yDimension	2	mm	Dimensione cella in y
zDimension	2	mm	Dimensione cella in z
xQuantity	3	mm	Numero di celle in x
yQuantity	3	mm	Numero di celle in y
zQuantity	3	mm	Numero di celle in z
BasePlateThickness	0,8	mm	Spessore piatto superiore
TopPlateThickness	3	mm	Spessore piatto inferiore
SpecimenType	1	-	Tipo di provino (0: Cilindrico; 1: Rettangolare)
xSpecimenDimension	6	mm	Dimensioni del provino in x
ySpecimenDimension	6	mm	Dimensioni del provino in y
zSpecimenDimension	9,8	mm	Dimensioni del provino in z

Figura 4.1.1 Costruzione cella FCCZ con i suoi relativi parametri

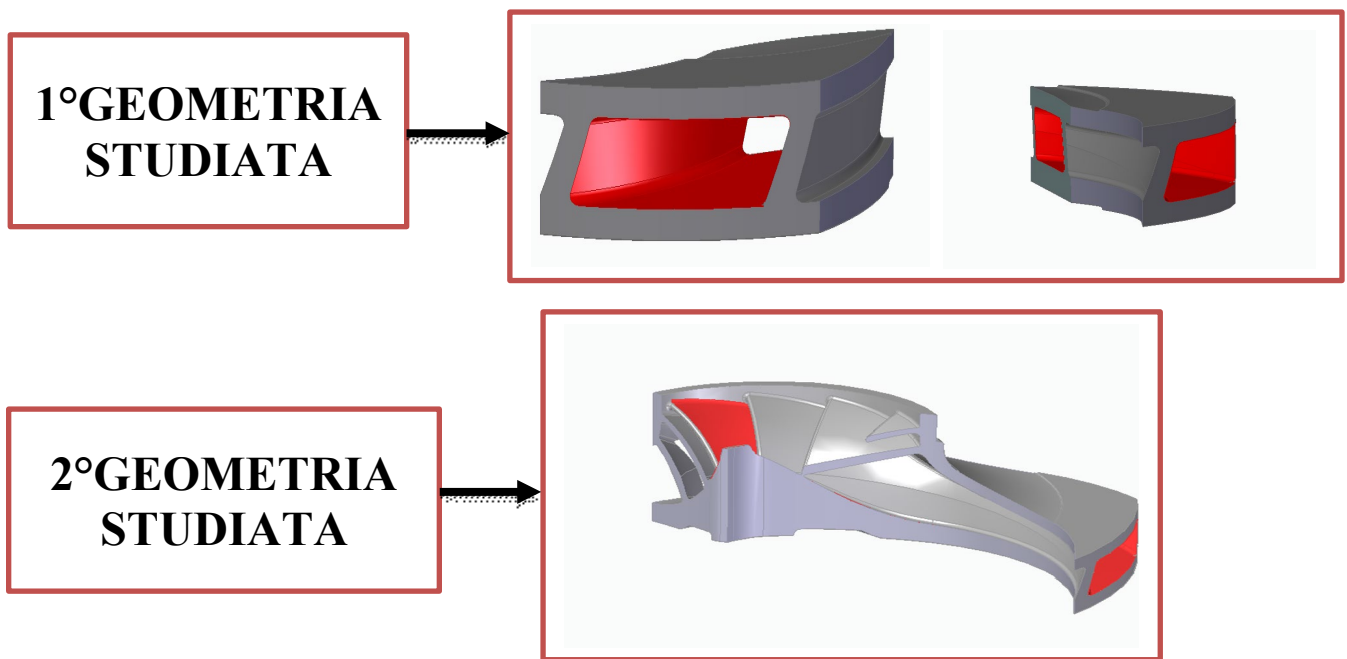
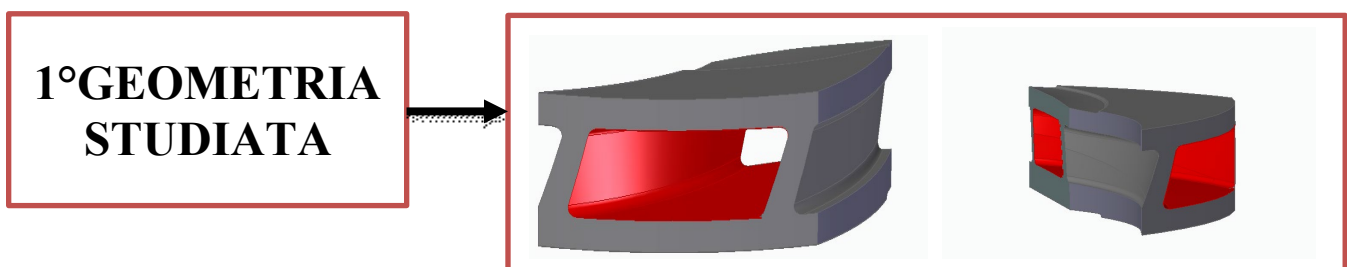


Figura 4.2.1 Geometrie studiate

4.1.1 nTopology: Importazione della cella FCCZ e delle geometrie studiate



A questo punto lo step relativo a SOLID EDGE 2021 risulta essere finito, pertanto ora il passo successivo è stato appunto di capire come poter costruire i supporti con la cella FCCZ per tale 1°geometria studiata. Per poter fare questo si è passato al secondo software utilizzato che risulta essere nTopology, andando prima di tutto a importare la cella FCCZ costruita in SOLID EDGE 2021 andando così a farla riconoscere al programma e trasformarla poi in un corpo implicito, vedi Figura 4.1.1.1. Successivamente lo stesso step si è ripetuto per la geometria studiata, vedi Figura 4.1.1.2.

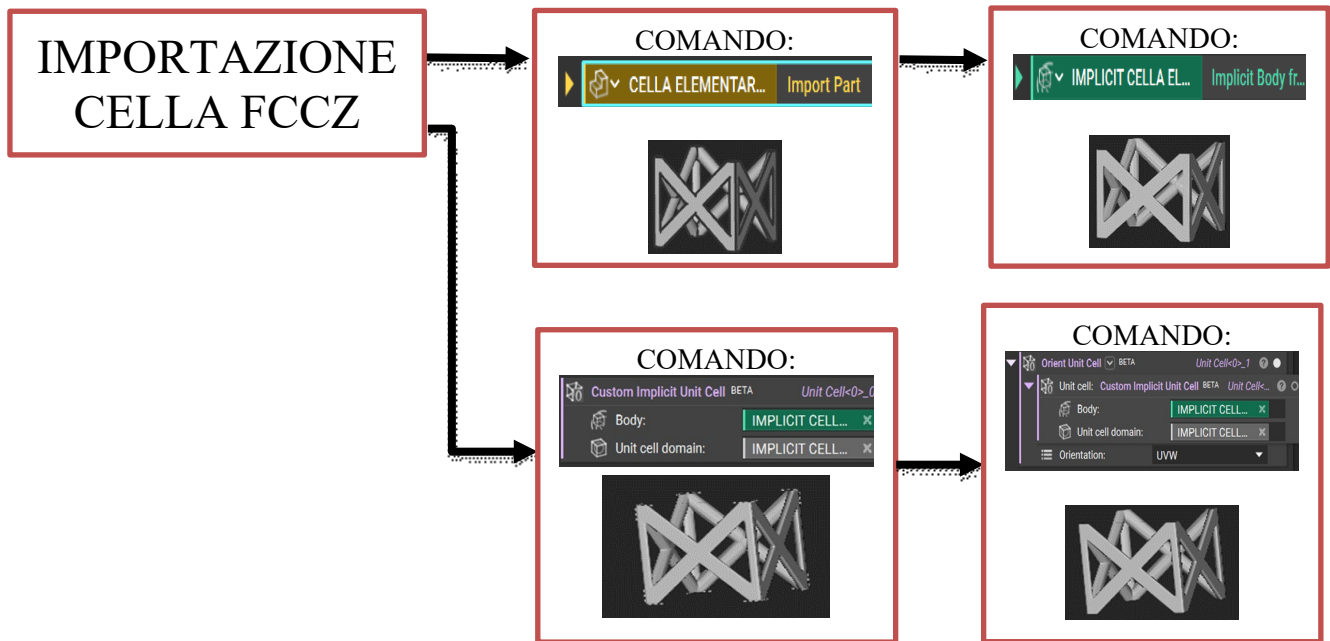


Figura 4.1.1.1 Rappresentazione importazione cella FCCZ

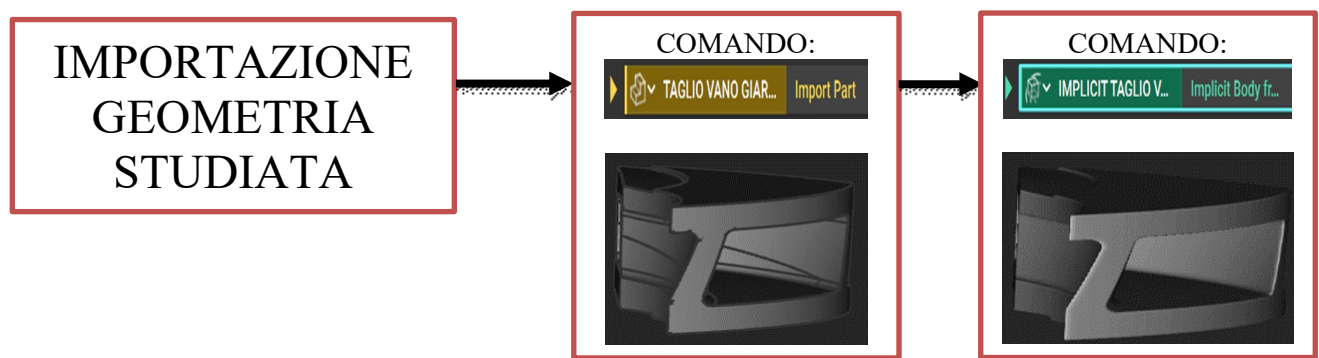
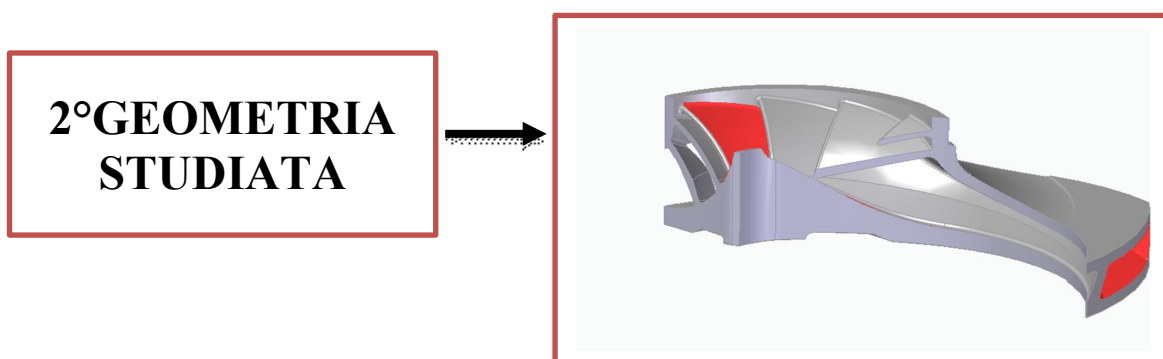


Figura 4.1.1.2 Rappresentazione importazione geometria studiata



A questo punto lo step per questa tipologia di geometria su SOLID EDGE 2021 risulta essere di dividere la geometria in due componenti per via delle superfici inferiori che si trovano su due livelli diversi. Fatto ciò i due taglio vengono riportati su nTopology e trasformati in due corpi impliciti, vedi Figura 4.1.1.3. Ora ultimo step da effettuare è quello di importare di nuovo la cella FCCZ per farla riconoscere al software, non essendoci di default all'interno del programma, vedi Figura 4.1.1.1.

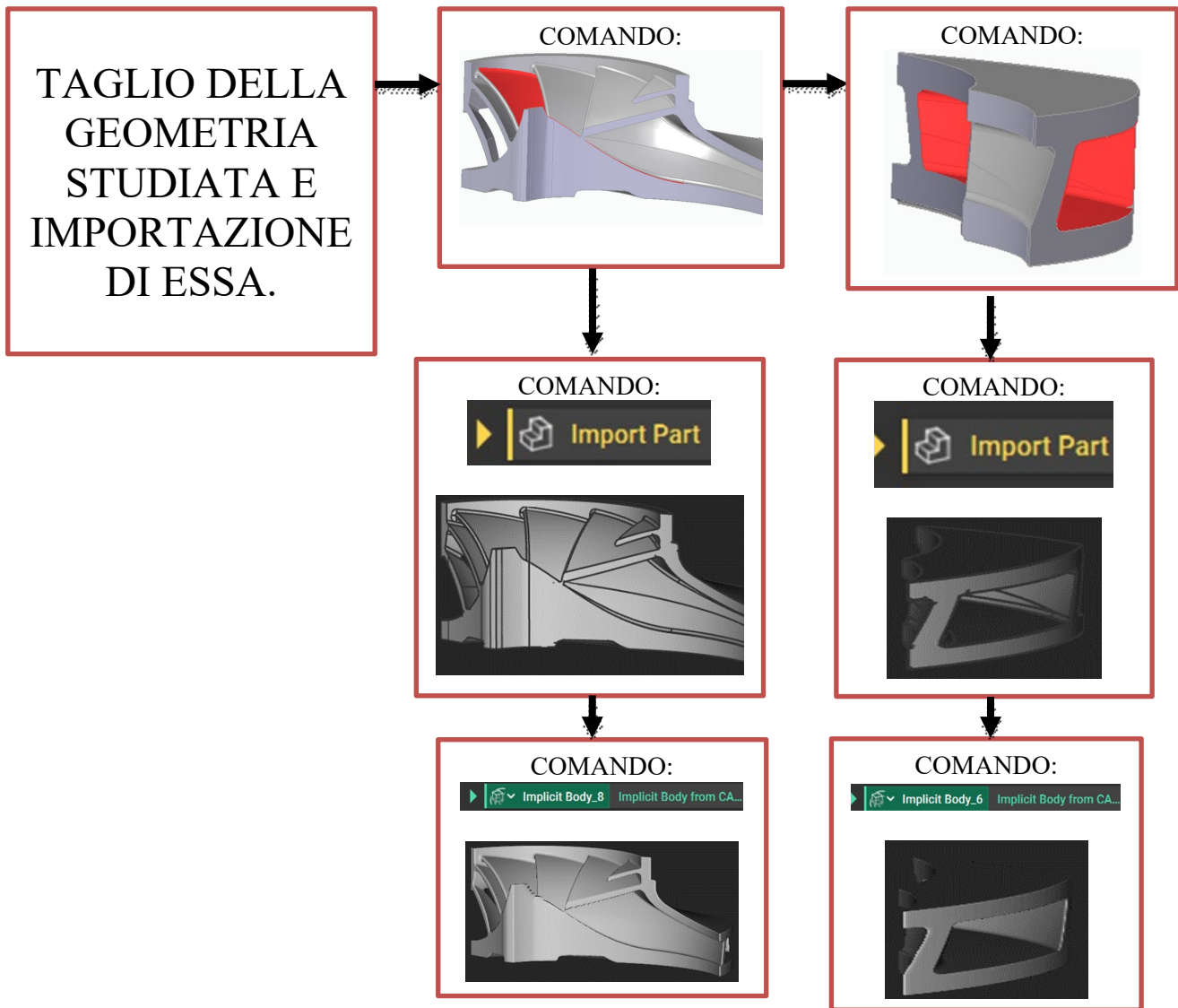


Figura 4.1.1.3 Rappresentazione sullo studio della seconda geometria

4.1.2 Selezione delle superfici di costruzione e realizzazione delle cell map

Ottenuto il corpo implicito della 1° geometria studiata, vedi capitolo 4.1, la fase successiva è stata di selezionare le superfici di riferimento per la costruzione del reticolo lattice e una volta eseguita questa fase poter costruire il reticolo lattice con cella FCCZ ripetuto nelle direzioni UVW, vedi Figura 4.1.2.1.

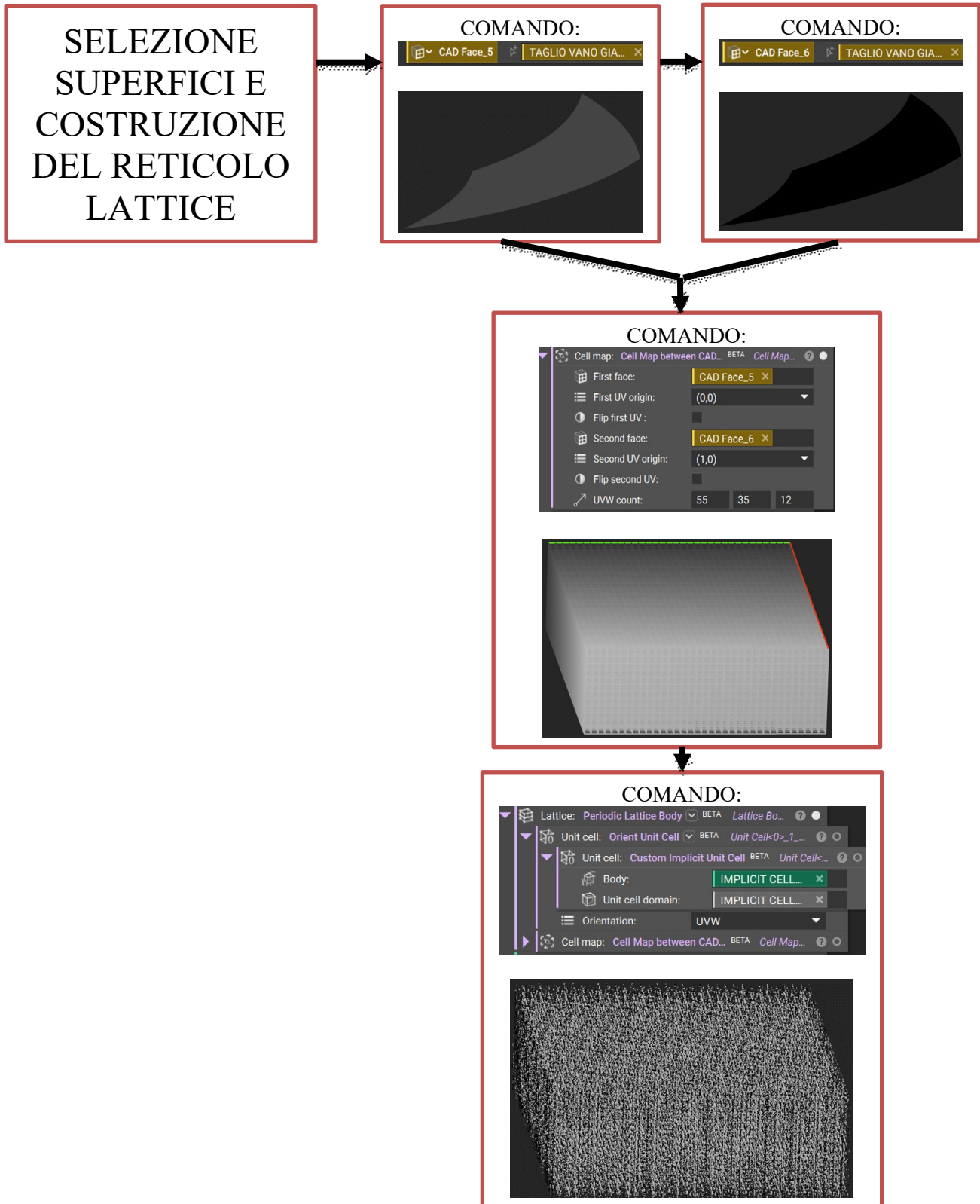


Figura 4.1.2.1 Rappresentazione delle superfici selezionate e costruzione del reticolo lattice

A questo punto passiamo alla 2° geometria studiata, vedi capitolo 4.1, dove ottenuto i due tagli sotto forma di corpo implicito, lo step successivo è stato di selezionare le due superfici di costruzione per la struttura reticolare lattice con cella elementare FCCZ orientata secondo le direzioni UVW, vedi Figura 4.1.2.2.

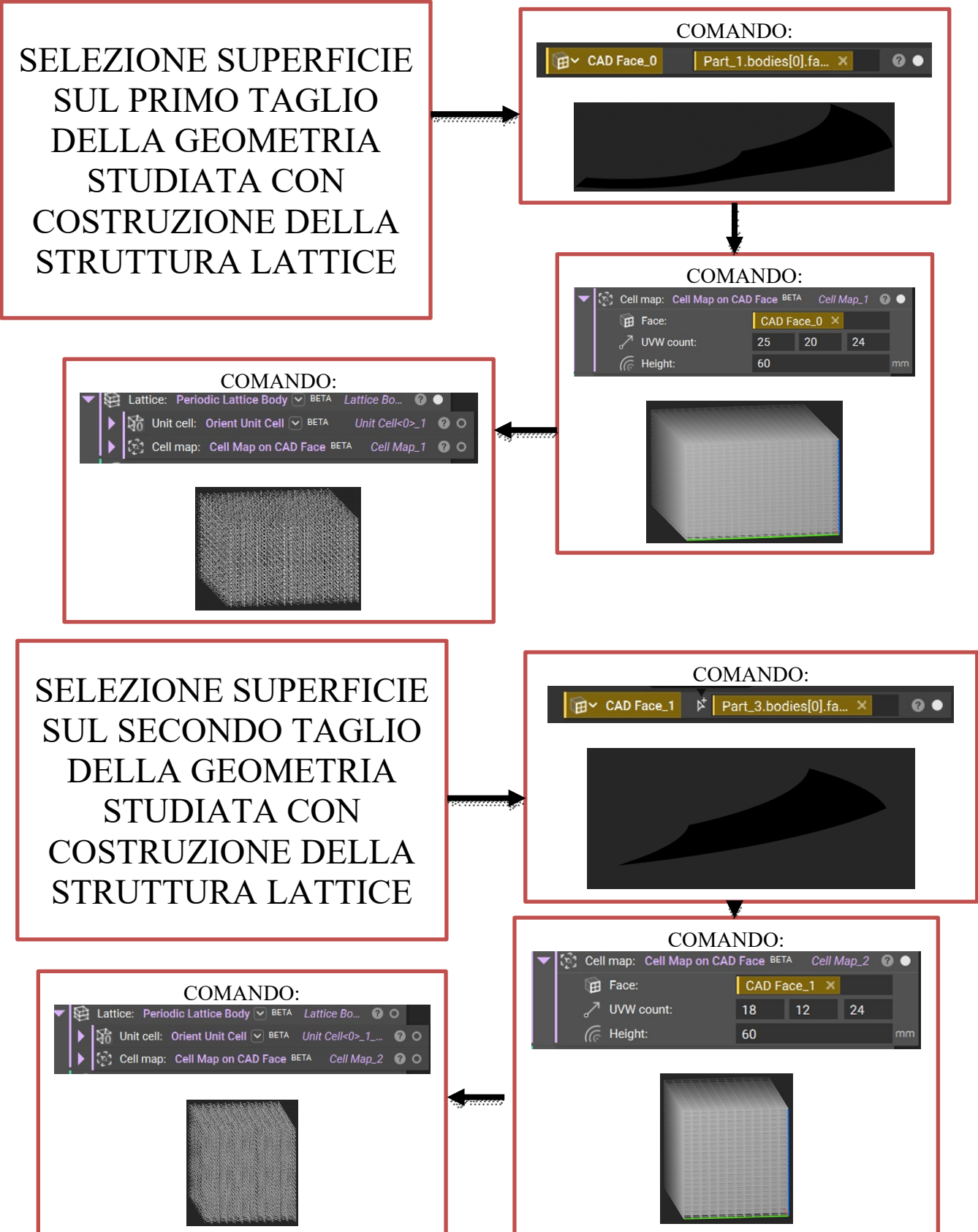


Figura 4.1.2.2 Rappresentazione della selezione superfici e costruzione del reticolo lattice

4.1.3 Costruzione dei supporti per le geometrie analizzate con cella FCCZ

Arrivati a questo punto il penultimo step da eseguire è costruire il supporto con l'utilizzo della cella elementare FCCZ per la 1° geometria studiata, vista nel capitolo 4.1. Andiamo ora ad analizzare in dettaglio i diversi passaggi, vedi Figura 4.1.3.1.

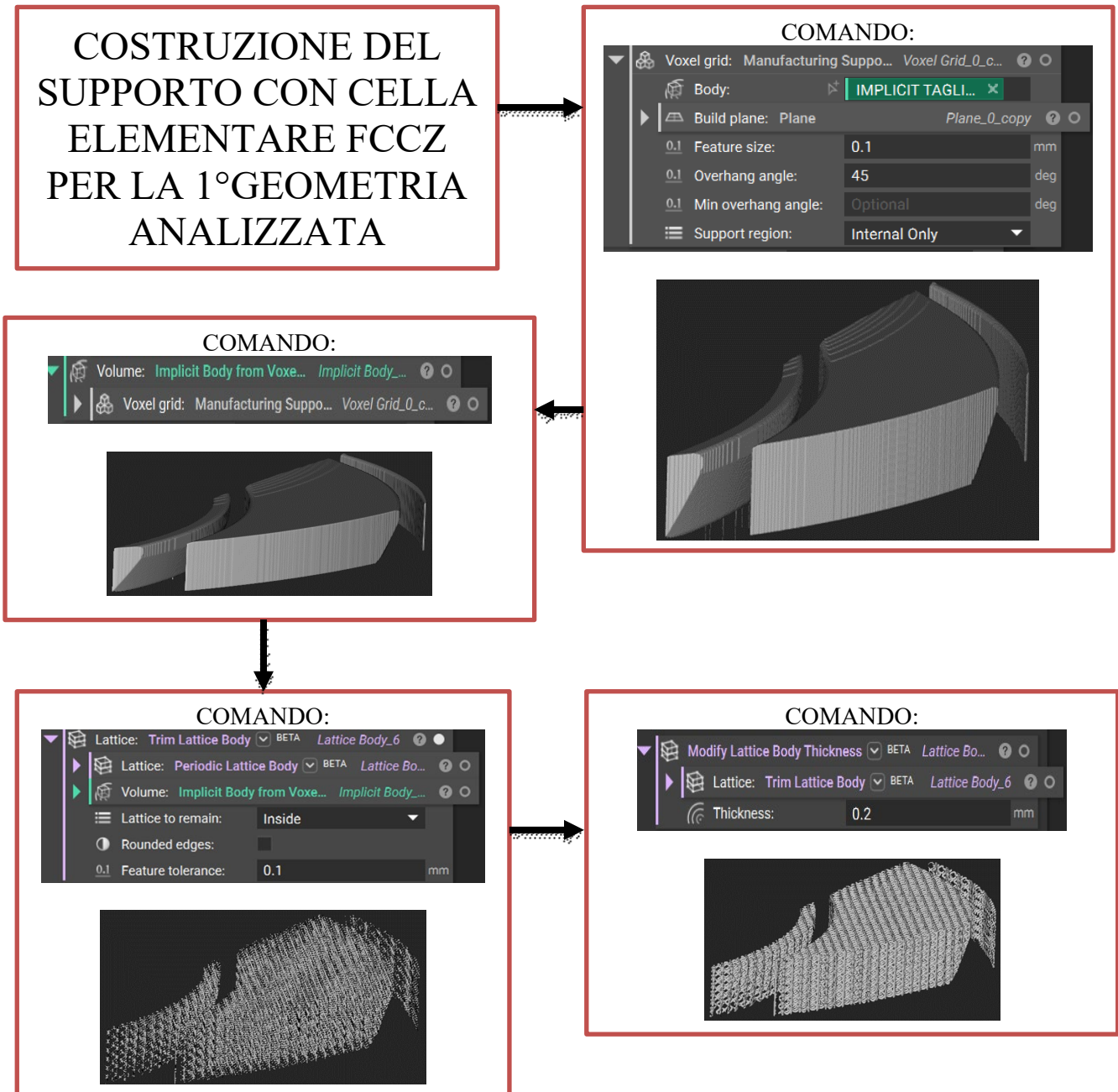
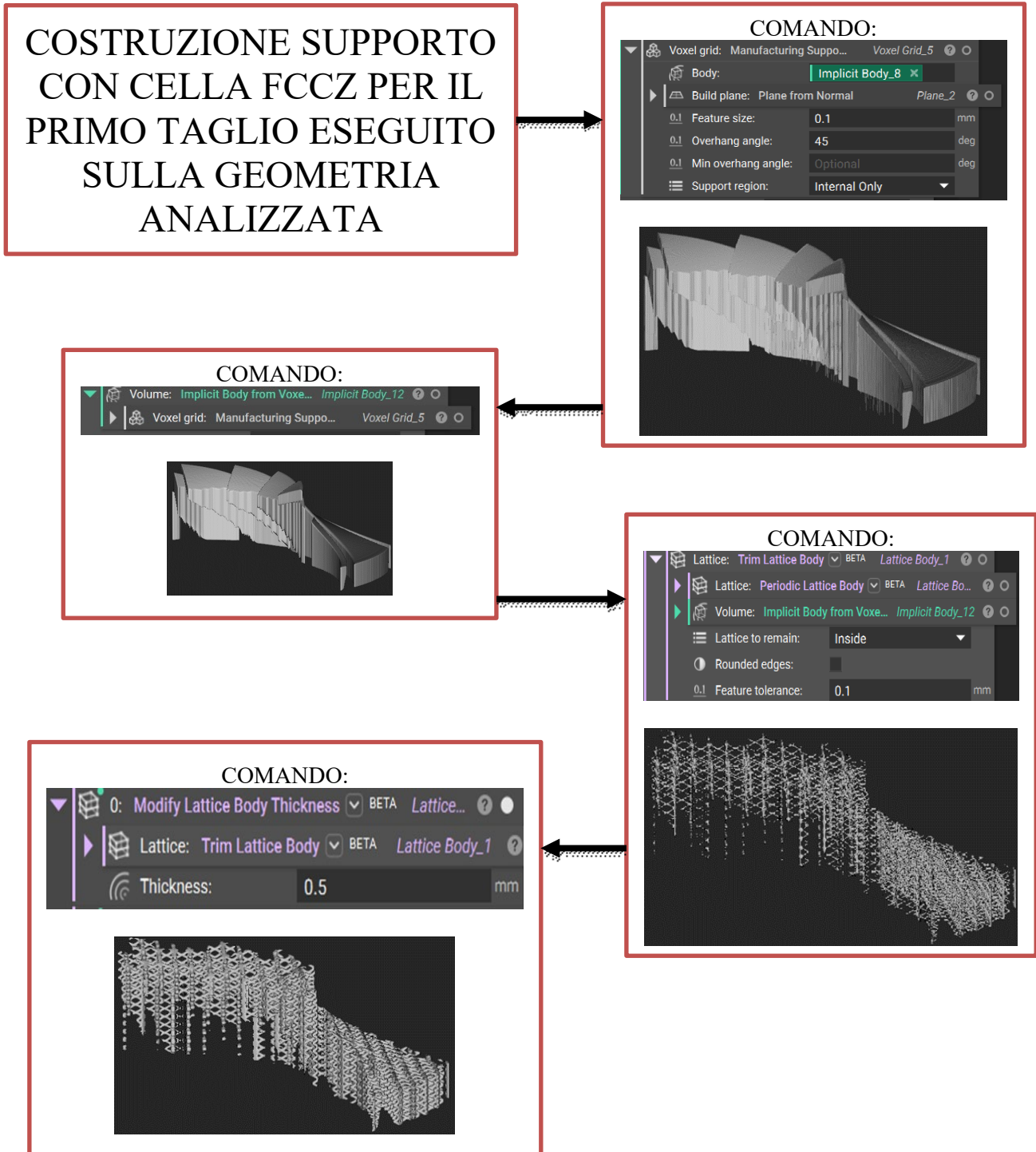


Figura 4.1.3.1 Rappresentazione per la realizzazione del supporto con cella FCCZ per la 1° geometria analizzata

Ora una volta realizzato il supporto per la 1° geometria studiata, andiamo ad eseguire gli stessi step per poter ottenere così il supporto con cella FCCZ per la 2° geometria studiata. In particolare costruiremo il supporto per il primo taglio eseguito sulla geometria e successivamente per il secondo taglio, vedi Figura 4.1.3.2.



**CONSTRUZIONE SUPPORTO
CON CELLA FCCZ PER IL
SECONDO TAGLIO
ESEGUITO SULLA
GEOMETRIA**

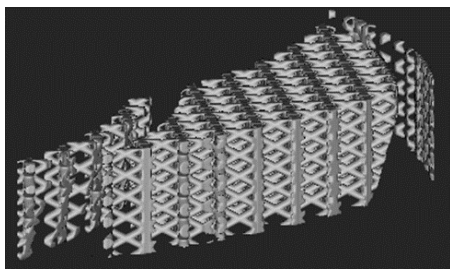
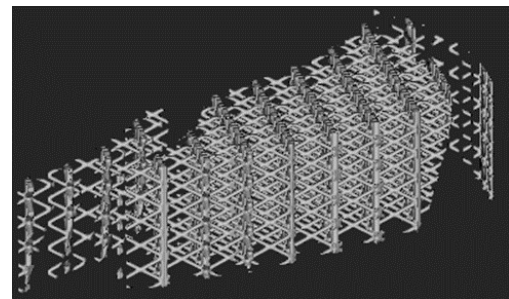
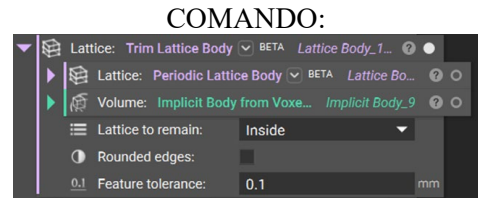
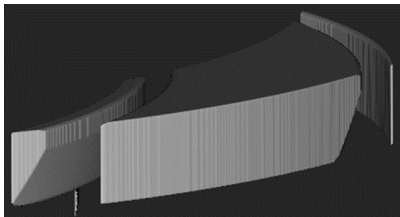
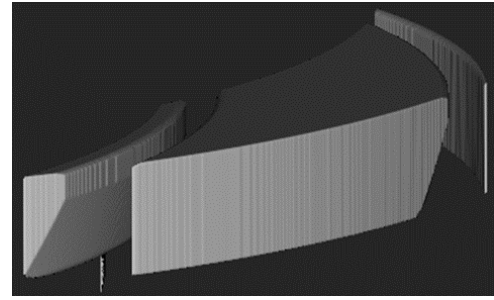
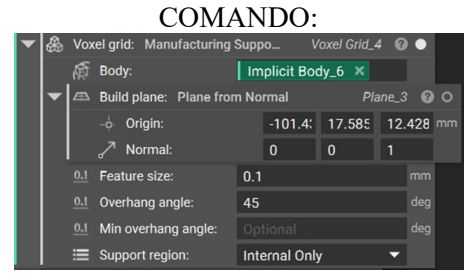


Figura 4.1.3.2 Rappresentazione della costruzione del supporto con cella FCCZ utilizzando i due tagli effettuati sulla 2° geometria analizzata

4.1.4 Unioni booleane tra geometrie e supporti

Una volta che si è realizzato il supporto per la 1° geometria studiata, quello che ci rimane da fare è unire in un unico corpo implicito geometria e supporto, vedi Figura 4.1.4.1.

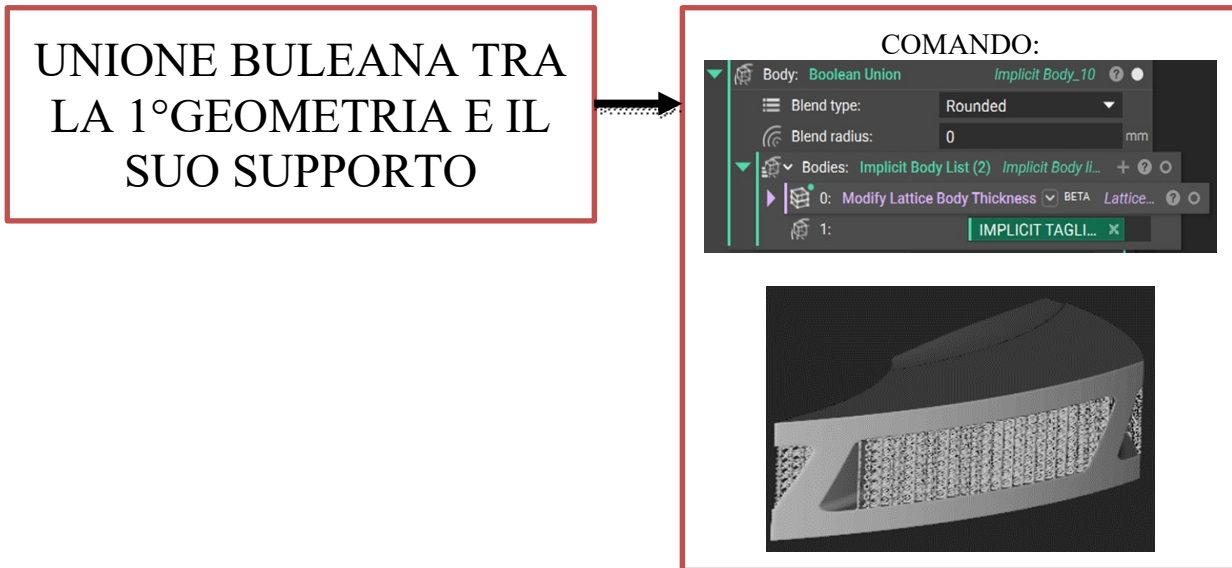


Figura 4.1.4.1 Rappresentazione dell'unione tra la 1° geometria e il suo supporto

Ora realizzato anche il supporto per la 2° geometria studiata, quello che ci rimane da fare è unire in due supporti in un unico corpo implicito, poi successivamente unire i due tagli anch'essi in un unico corpo implicito, ed infine unire il supporto e la geometria studiata, vedi Figura 4.1.4.2.

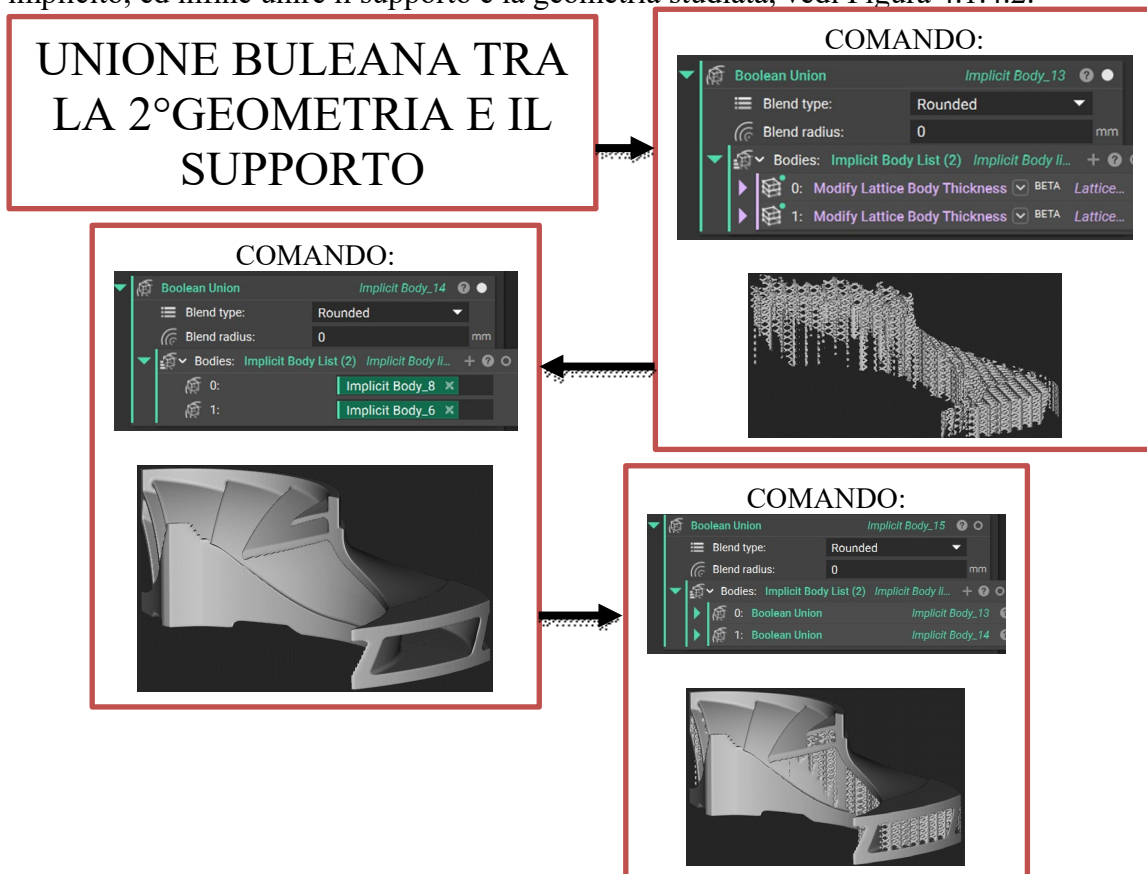


Figura 4.1.4.2 Rappresentazione dell'unione booleana tra la 2° geometria e il supporto

4.1.5 Generazione delle mesh per le geometrie analizzate e per i supporti realizzati

L'ultimo step da dover realizzare, per preparare la 1° geometria studiata e il supporto creato al processo di simulazione di stampa, è quello di creare la mesh per la geometria e per il supporto, vedi figura 4.1.5.1. I file successivamente della geometria e del supporto dovranno essere esportati in formato . STL, questo perché così risultano essere pronti a poter eseguire il processo di simulazione di stampa. Questo passaggio finale verrà ripreso poi nel caso studio per poter analizzare meglio i risultati delle simulazioni di stampa.

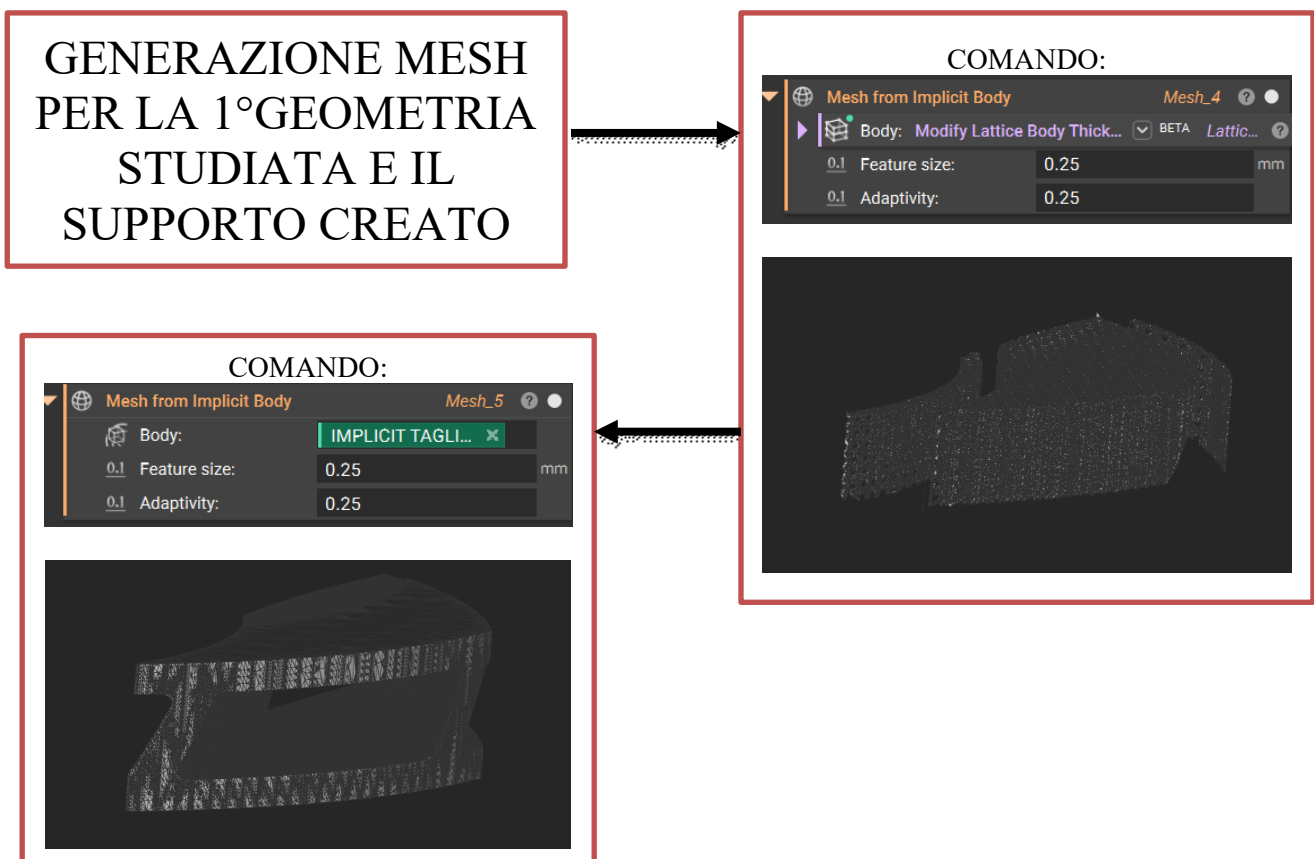


Figura 4.1.5.1 Rappresentazione della mesh generata per la geometria e per il supporto

L'ultimo step da realizzare per la 2° geometria studiata e il suo supporto è quello di generare una mesh per entrambi i corpi ottenuti preparandoli così al processo di simulazione di stampa, vedi Figura 4.1.5.2. Infatti per eseguire il processo di simulazione sarà necessario esportare le mesh realizzate in file con formato . STL. Come visto in precedenza anche qui possiamo dire che questo step finale sarà visto più in dettaglio nel caso studio.

GENERAZIONE MESH
PER LA 2° GEOMETRIA
STUDIATA E IL
SUPPORTO CREATO

COMANDO:

Mesh from Implicit Body Mesh_1

Body: Boolean Union Implicit Body_13

Feature size: 0.25

Adaptivity: 0.25



COMANDO:

Mesh from Implicit Body Mesh_0

Body: Boolean Union Implicit Body_14

Feature size: 0.25 mm

Adaptivity: 0.25

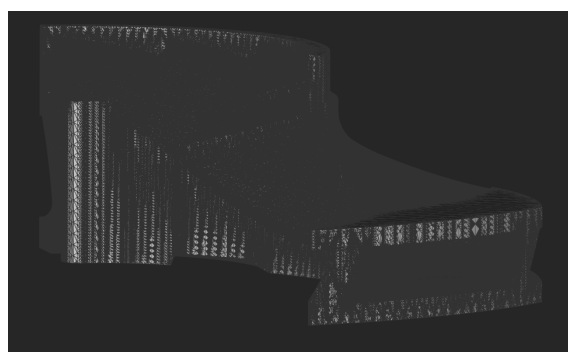


Figura 4.1.5.2 Rappresentazione della mesh generata per la geometria e il supporto

4.2 SOLID EDGE 2021: Riconoscimento delle geometrie studiate

Tornando al primo software introdotto per la trattazione del progetto di tesi andiamo nuovamente a riconoscere le geometrie studiate che ci serviranno per realizzare i supporti con cella elementare FCC, vedi Figura 4.2.1.

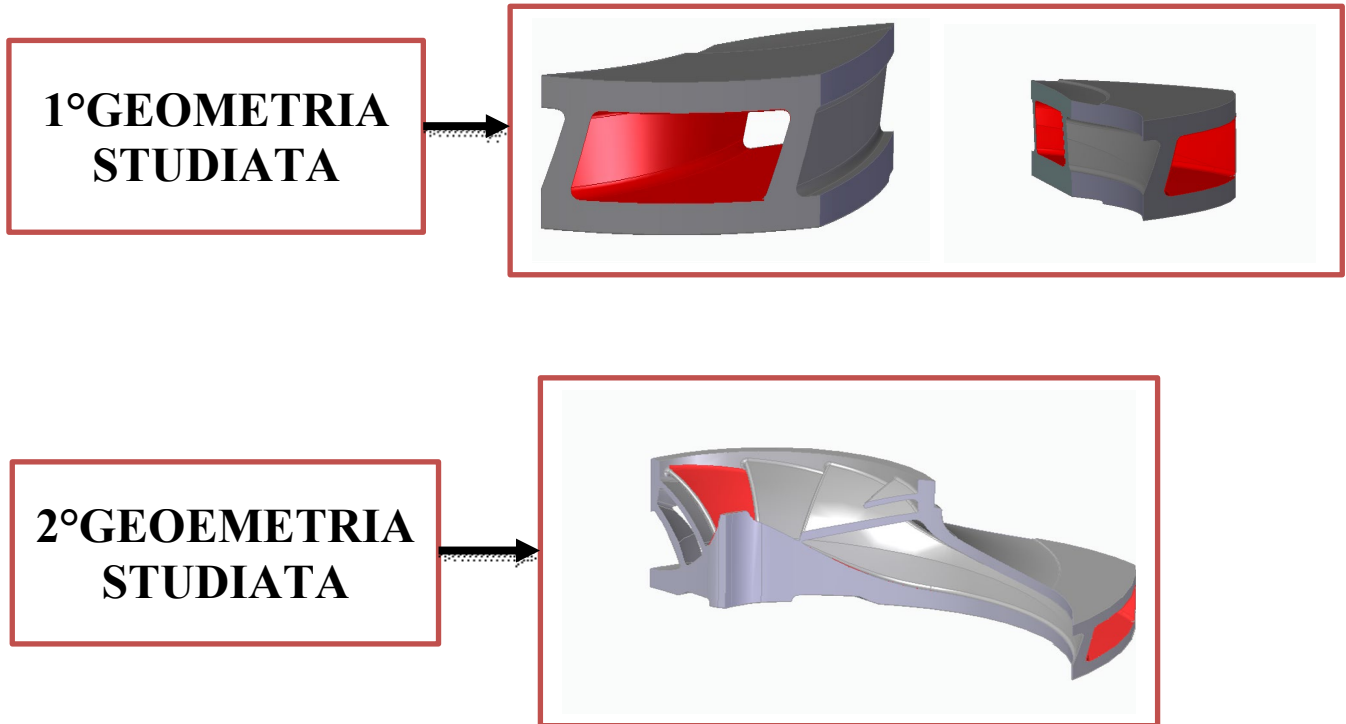
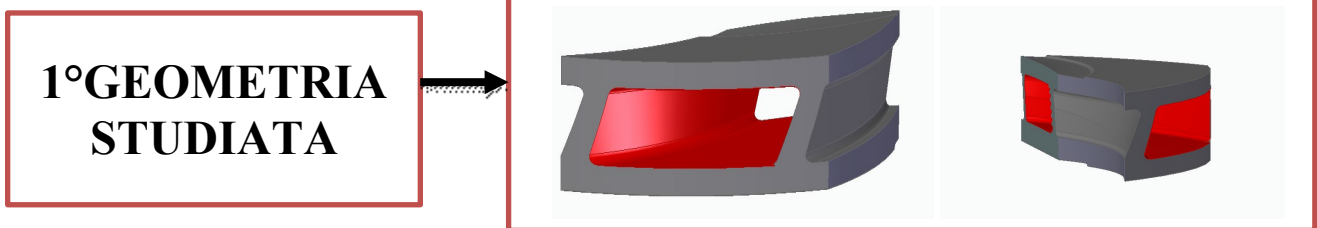


Figura 4.2.1 Rappresentazione relativa alle geometrie studiate

4.2.1 nTopology: Costruzione dei supporti per le geometrie considerate con cella FCC



Pe quanto riguarda lo studio per la 1°geometria analizzata, i primi passaggi svolti sono gli stessi che avevamo già visto nei capitoli 4.1.1 e 4.1.3 eccetto la parte relativa all'importazione della cella FCCZ e la parte relativa al taglio del supporto e modifica cioè i comandi: Trim Lattice Body e Modify Lattice Body Thickness. Detto questo andiamo a vedere la parte più importante di questa fase che risulta essere la costruzione del supporto con cella FCC, vedi Figura 4.2.1.1.

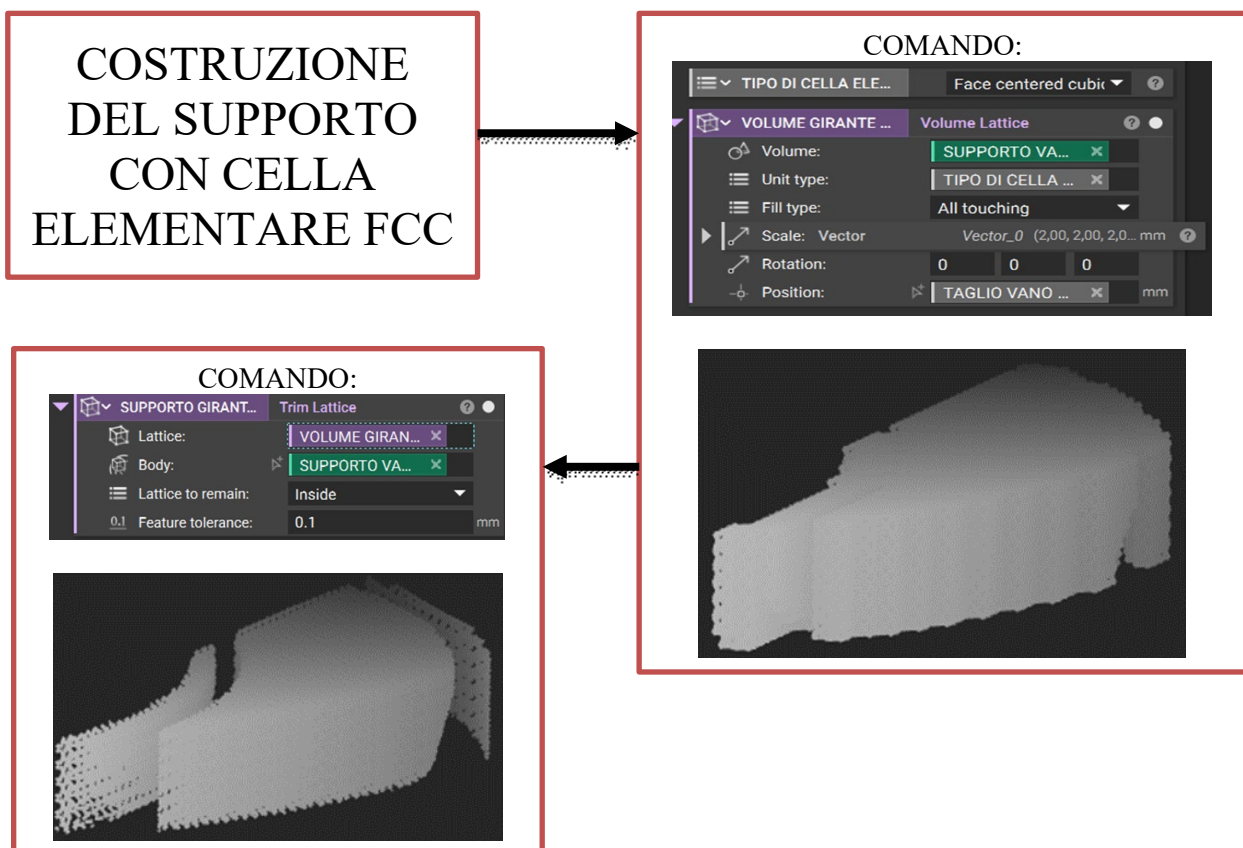
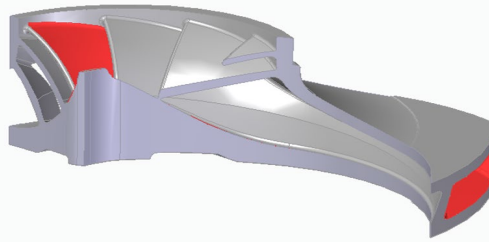


Figura 4.2.1.1 Rappresentazione del supporto FCC creato

2°GEOEMETRIA STUDIATA



Per quanto riguarda la 2° geometria studiata, gli step effettuati sono molto simili a quanto visto nel capitolo 4.1.1, a differenza del fatto che mentre lì si erano eseguiti due tagli sulla geometria, qui riusciamo ad analizzare la geometria completa senza dover effettuare nessun tipo di taglio, vedi Figura 4.2.1.2.

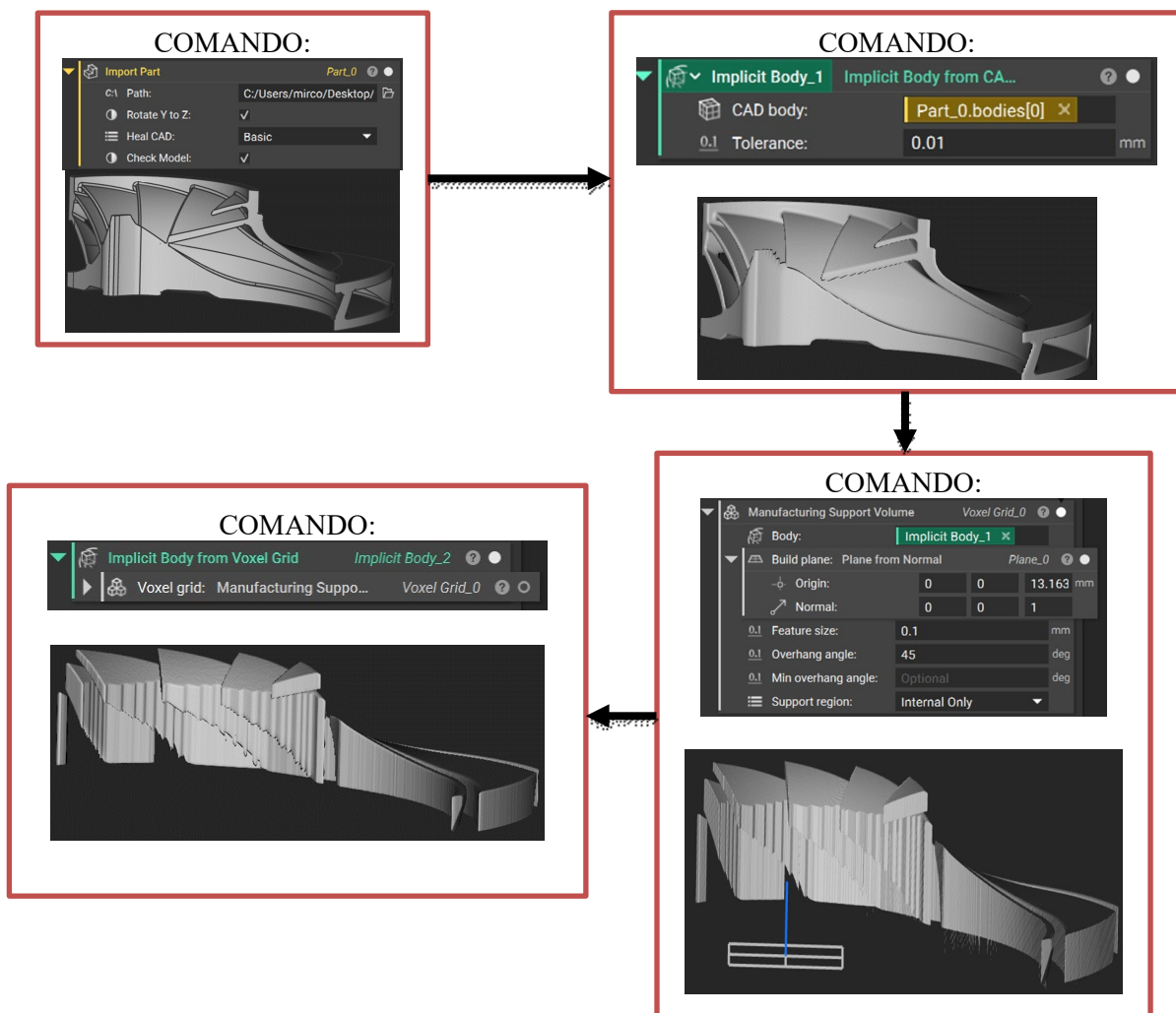


Figura 4.2.1.2 Passaggi iniziali per il riconoscimento della geometria e per impostare la creazione del supporto

A questo punto creiamo il supporto per questa tipologia di geometria, come si vede nella Figura 4.2.1.3.

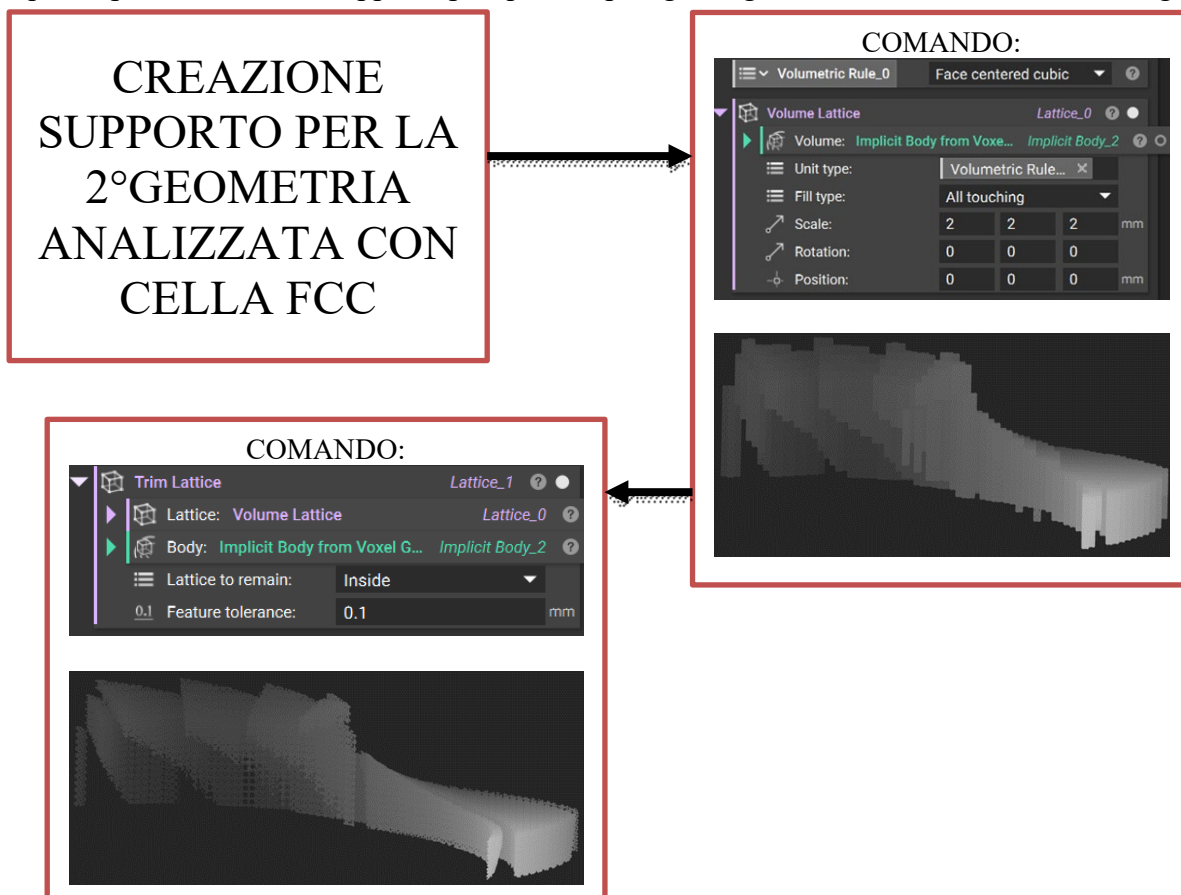


Figura 4.2.1.3 Costruzione del supporto lattice con cella FCC

4.2.2 Inspessimento dei supporti con cella FCC e intersezioni booleane

Torniamo ora ad analizzare la 1° geometria, vista nel capitolo 4.2, andando ora a creare un inspessimento del supporto per poi arrivare ad ottenere un'intersezione booleana tra il supporto realizzato e l'inspessimento utilizzato, vedi Figura 4.2.2.1.

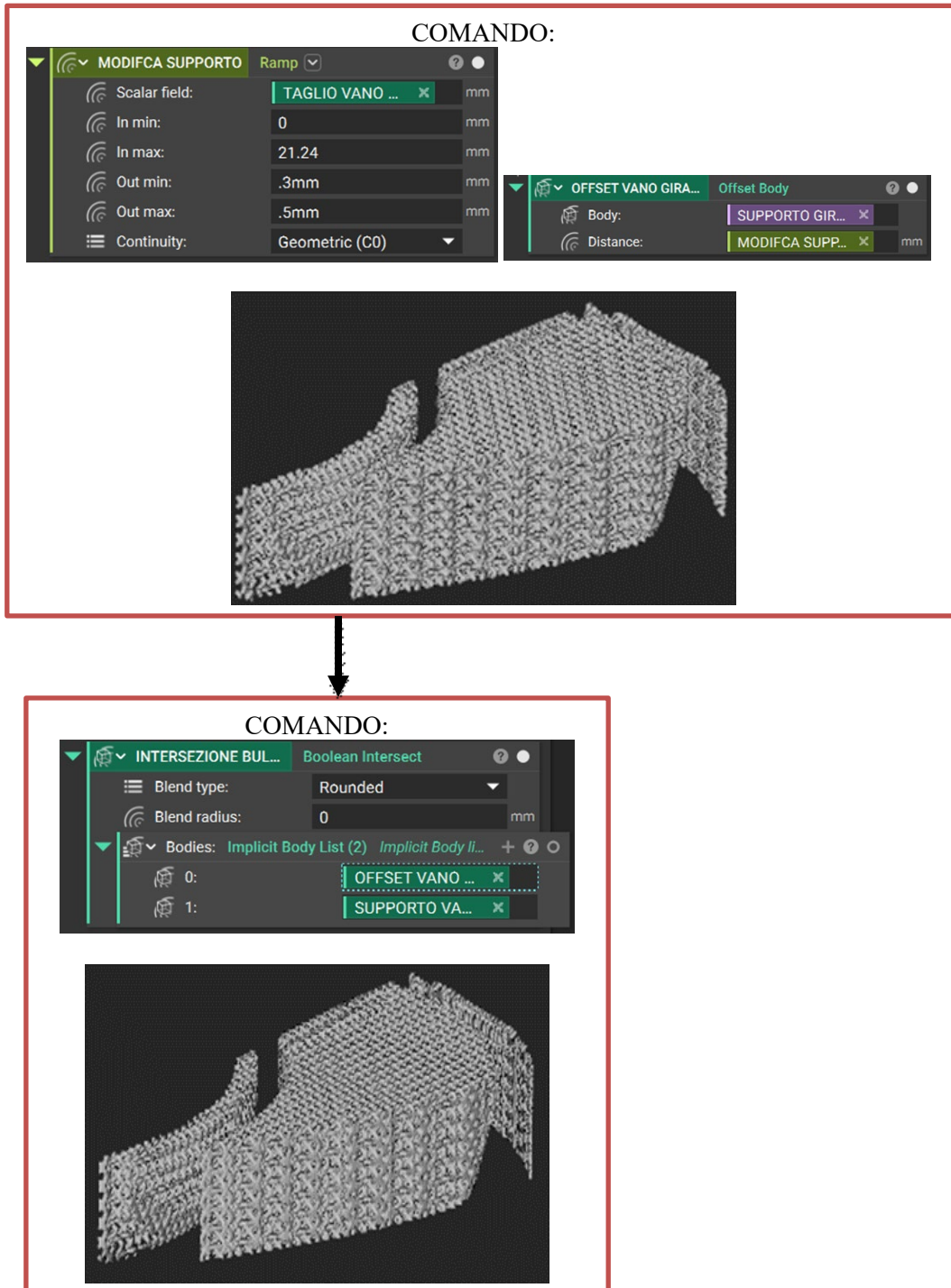


Figura 4.2.2.1 Inspessimento del supporto creato sulla 1° geometria con cella FCC e intersezione booleana

Ora passiamo alla 2° geometria analizzata e vista nel capitolo 4.2, andando ad eseguire gli stessi passaggi realizzati per la geometria precedente, vedi Figura 4.2.2.2.

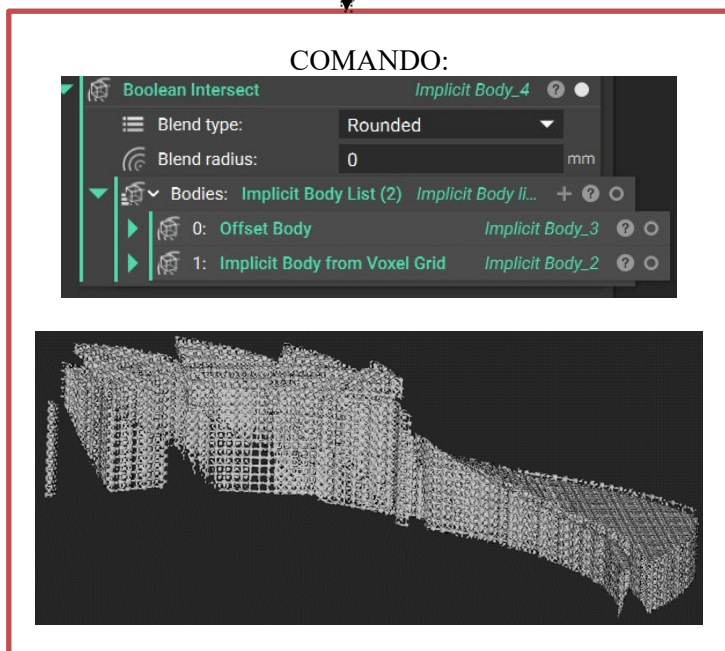
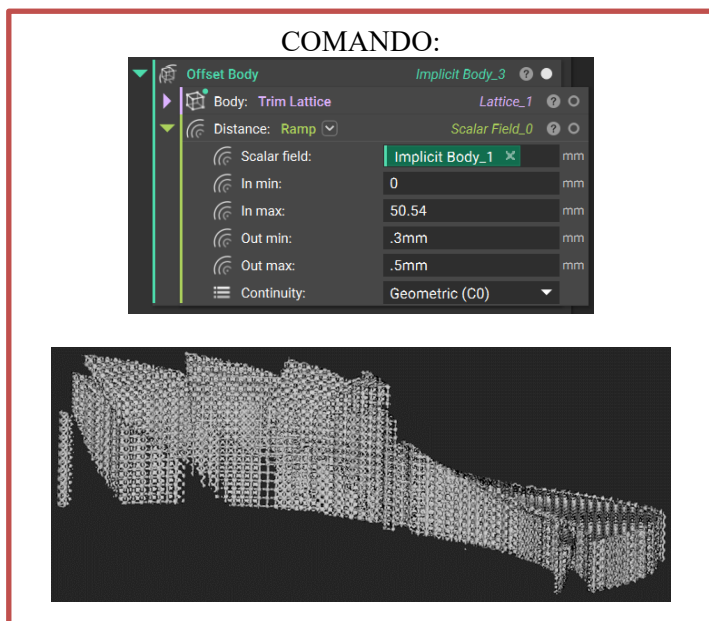


Figura 4.2.2.2 Inspessimento del supporto creato sulla 2° geometria con cella FCC e intersezione booleana

4.2.3 Unioni booleane tra le geometrie e i supporti

Una volta creato il supporto per la 1° geometria analizzata, vista nel capitolo 4.2, quello che si deve eseguire ora è creare un unico corpo implicito tra la geometria studiata e il supporto realizzato, vedi Figura 4.2.3.1.

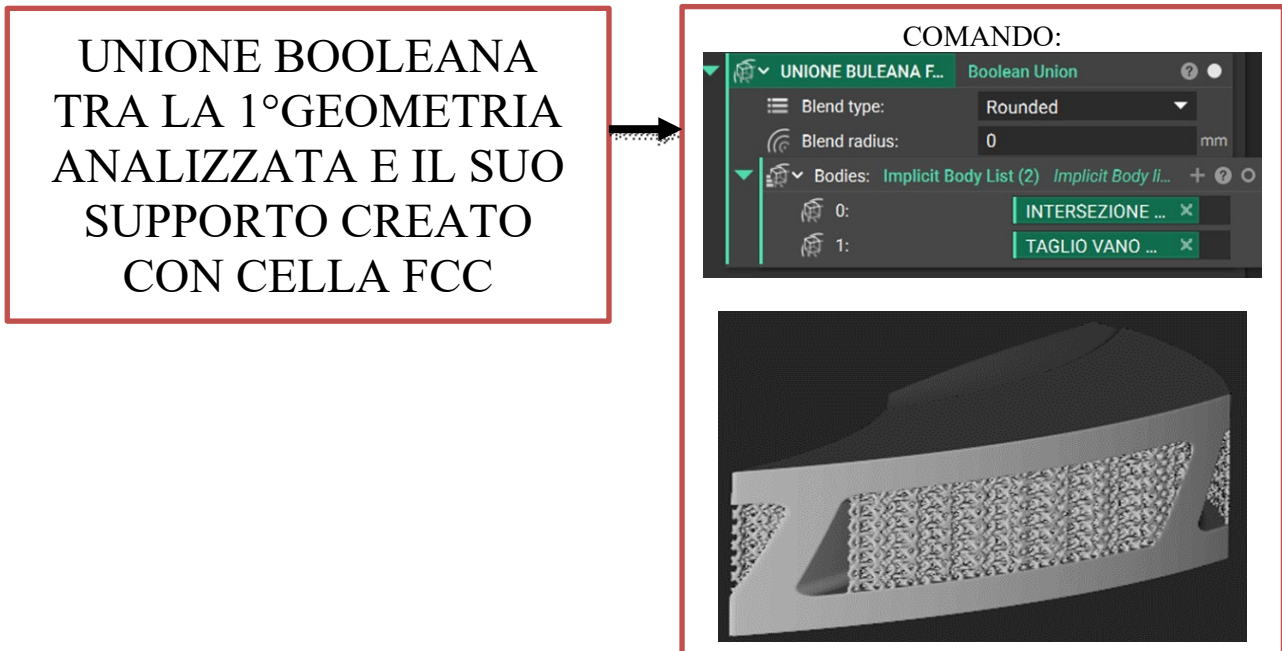


Figura 4.2.3.1 Unione booleana tra la 1° geometria analizzata e il suo supporto creato con cella FCC

Ora passiamo alla 2° geometria analizzata, vista nel capitolo 4.2, anche qui si esegue un'unione booleana tra la geometria studiata e il supporto realizzato con cella FCC, vedi Figura 4.2.3.2.

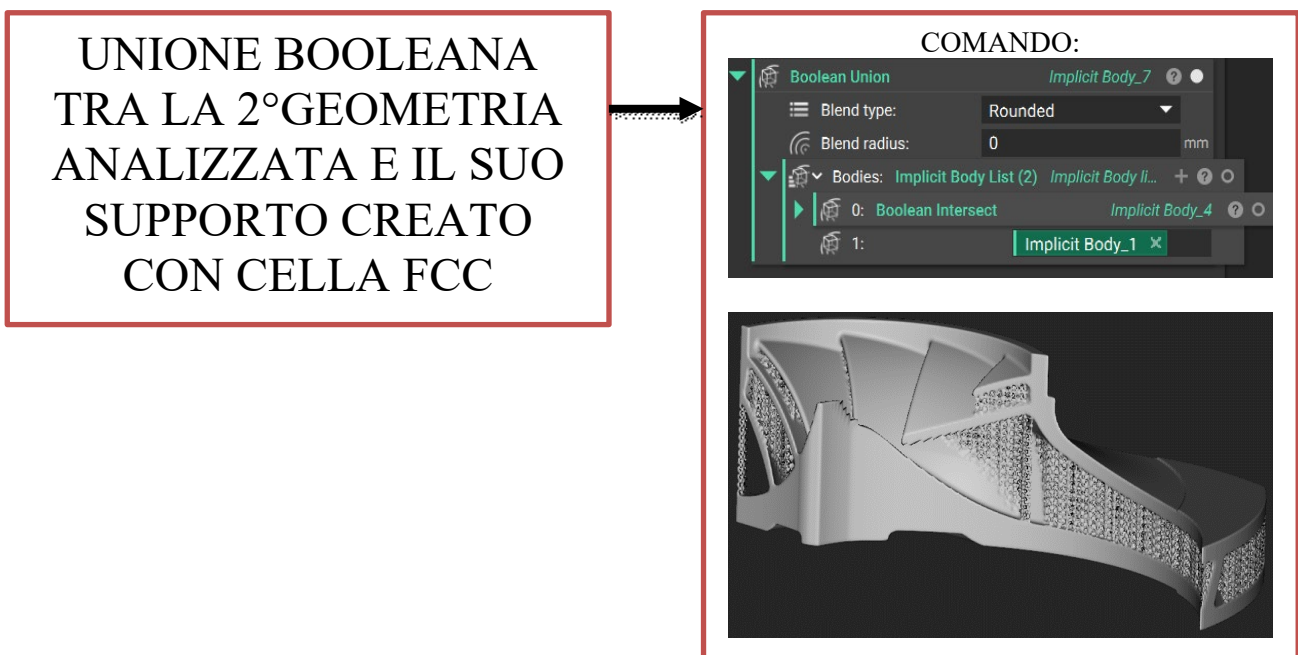


Figura 4.2.3.1 Unione booleana tra la 2° geometria analizzata e il suo supporto creato con cella FCC

4.2.4 Generazione delle mesh per le geometrie analizzate e i supporti realizzati

Ora passiamo all'ultimo step da eseguire per la 1° geometria studiata, vista già nel capitolo 4.2, andando a creare due mesh una relativa solamente alla geometria e una relativa solamente al supporto realizzato con cella FCC, vedi Figura 4.2.4.1. Poi una volta realizzate queste mesh dovranno essere esportate in file di formato. STL, in modo tale da essere pronte ad eseguire il processo di simulazione di stampa.

GENERAZIONE DELLA MESH PER LA 1° GEOMETRIA STUDIATA E IL SUO SUPPORTO REALIZZATO CON CELLA FCC

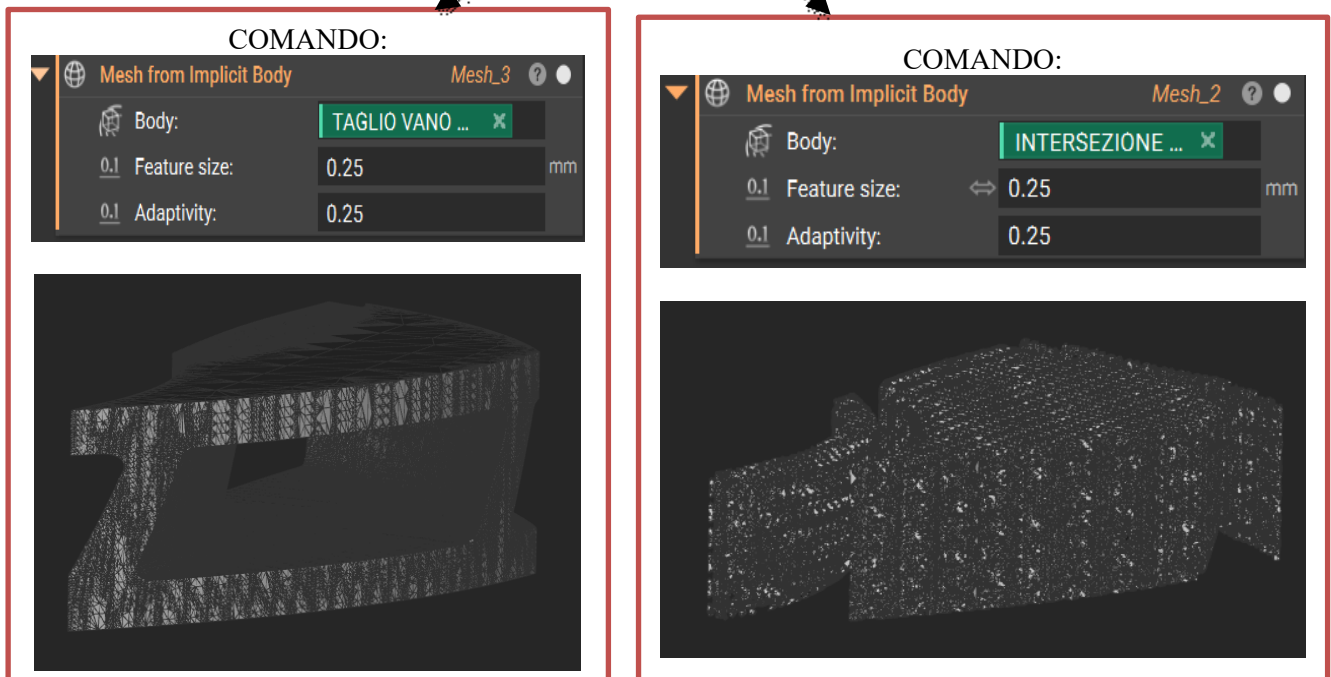


Figura 4.2.4.1 Generazione della mesh per la 1° geometria studiata e il suo supporto realizzato con cella FCC

A questo punto si esegue l'ultimo step anche per la 2° geometria studiata, vedi capitolo 4.2, andando anche qui a generare due mesh una relativa alla geometria e una relativa al supporto realizzato con cella FCC, vedi Figura 4.2.4.2. Poi una volta realizzate queste mesh dovranno essere esportate in file di formato. STL, in modo tale da essere pronte ad eseguire il processo di simulazione di stampa.

GENERAZIONE DELLA MESH PER LA 2° GEOMETRIA STUDIATA E IL SUO SUPPORTO REALIZZATO CON CELLA FCC

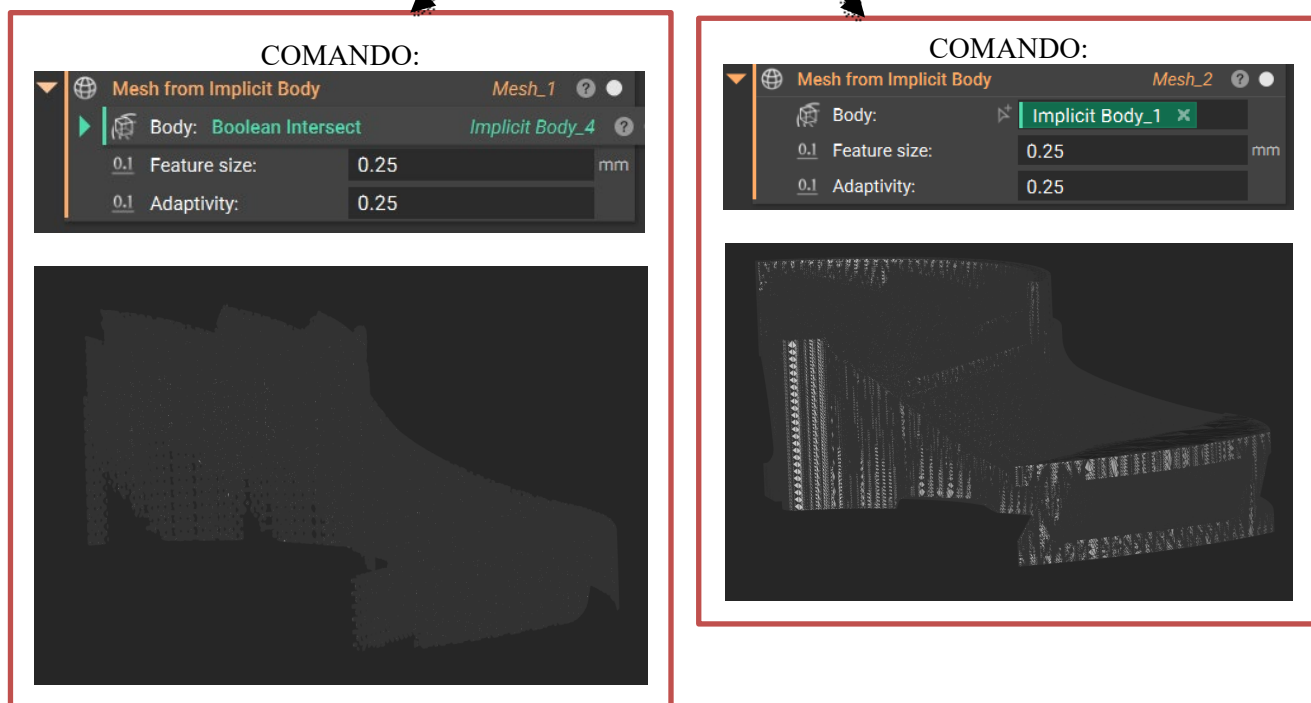


Figura 4.2.4.2 Generazione della mesh per la 2° geometria studiata e il suo supporto realizzato con cella FCC

5. Caso studio

Il seguente caso studio è basato sull'analisi di stampabilità di una girante per compressori centrifughi in Inconel 718. Essa è stata studiata considerando la tecnologia AM denominata "Powder Bed Fusion" (a letto di polvere), nello specifico il processo chiamato "Selective Laser Beam Melting" o meglio dire "Laser Powder Bed Fusion".

Tale analisi è stata intrapresa prendendo in considerazione diversi requisiti forniti dall'azienda, ma anche i problemi che potrebbero insorgere utilizzando questa tipologia di tecnologia.

Inizialmente sono state effettuate delle valutazioni, attraverso analisi su modelli comparativi realizzati dai nostri collaboratori nel loro laboratorio, riguardo ai parametri che possono migliorare il processo di stampa. Una volta definite le condizioni al contorno, è stato impostato il caso studio definitivo che prende in esame tutte le ipotesi fatte.

Su questo sono state tratte le considerazioni finali, analizzando gli obiettivi e le criticità designati inizialmente.

5.1 Requisiti di partenza e parametri di processo

Come punto di partenza sono stati prefissati dei requisiti:

- Analizzare la stampabilità della girante in orizzontale
- Verificare una possibile collisione del job con il recoater durante la fase di stampa
- Controllare che la tensione equivalente di Von-Mises sia inferiore rispetto quella di snervamento del materiale
- Verificare che lo spostamento massimo equivalente del componente alla fine del processo di stampa sia contenuto all'interno dell'intervallo di tolleranza
- Utilizzare una struttura di supporto facilmente removibile all'interno dei van

Nella tabella 5.1.1 sono evidenziati i parametri di processo inizialmente forniti dall'azienda.

Parametri di processo	
Layer thickness	40 μm
Laser power	285 W
Velocity	960 mm/s
Stripe width	10 mm
Hatching space	0,11 mm
Stripe overlap	0,8 mm

Tabella 5.1.1 Parametri di processo

5.2 Geometria

La geometria utilizzate nel nostro caso studio è illustrata nella immagine 5.2.1.

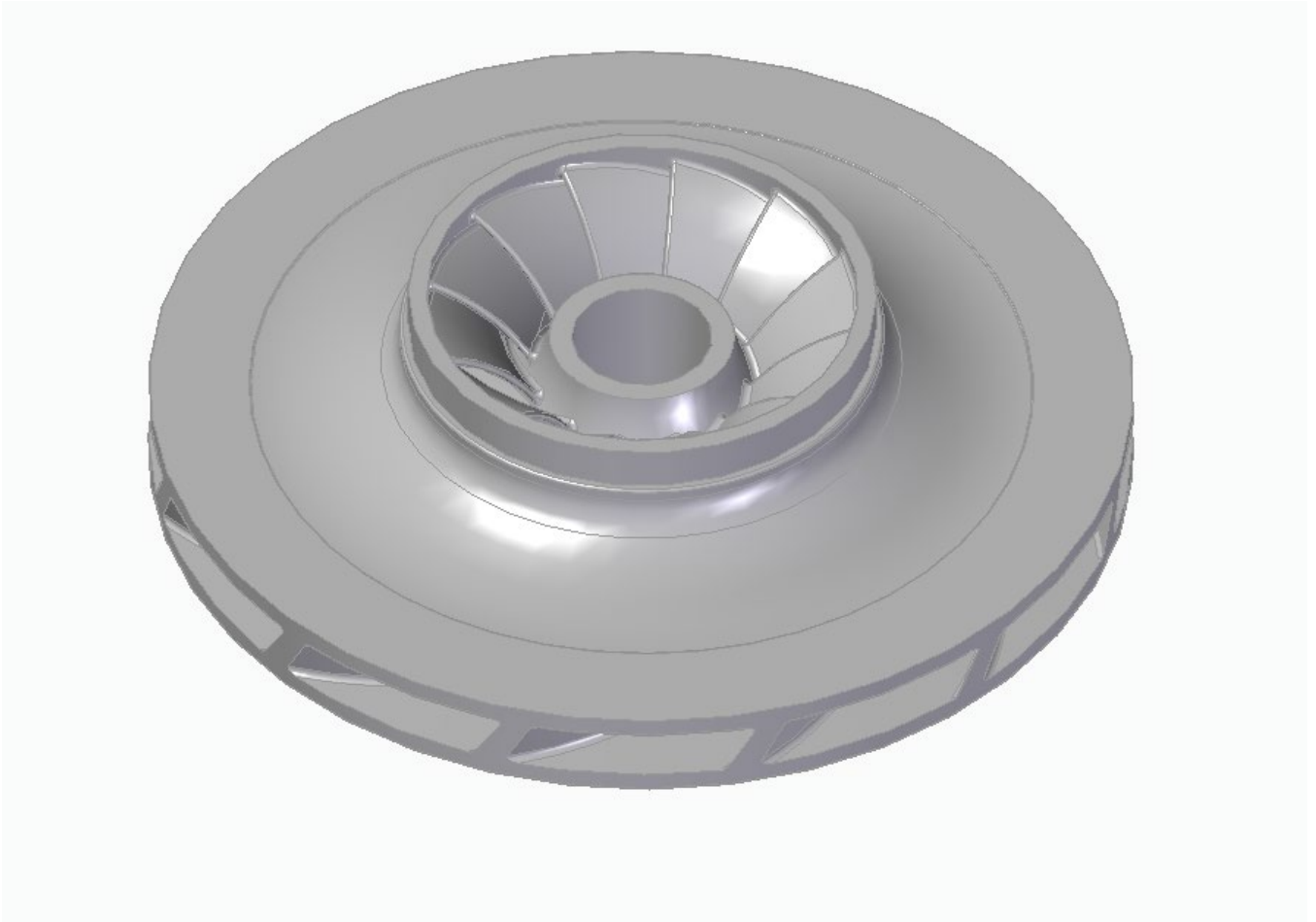


Fig.5.2.1. Vista isometrica girante di un compressore centrifugo

Si tratta di una girante a 12 pale che possiede diverse caratteristiche di costruzione. Di seguito si possono notare le diverse dimensioni geometriche nelle viste considerate.

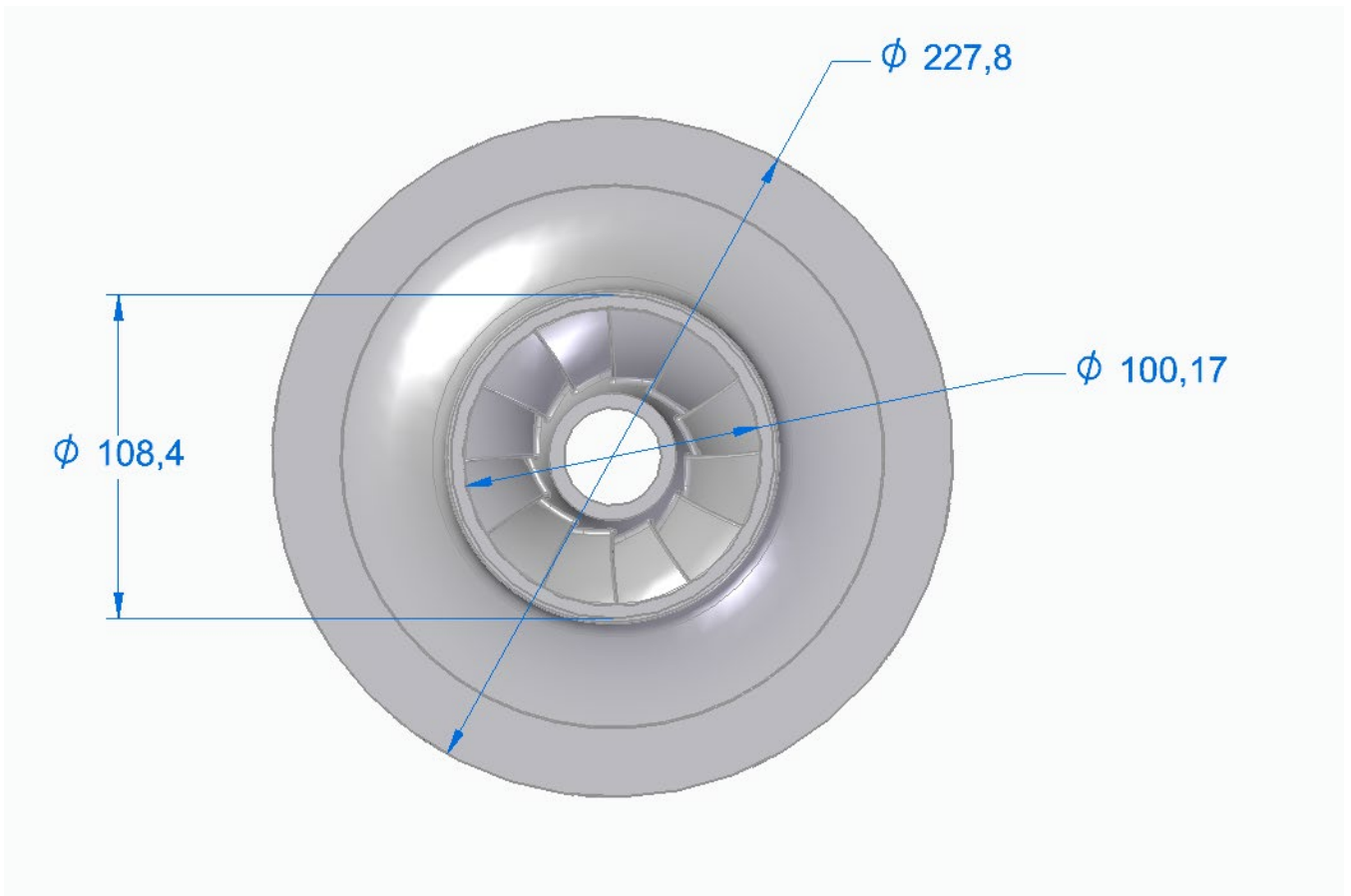


Fig.5.2.2 Vista dall'alto girante

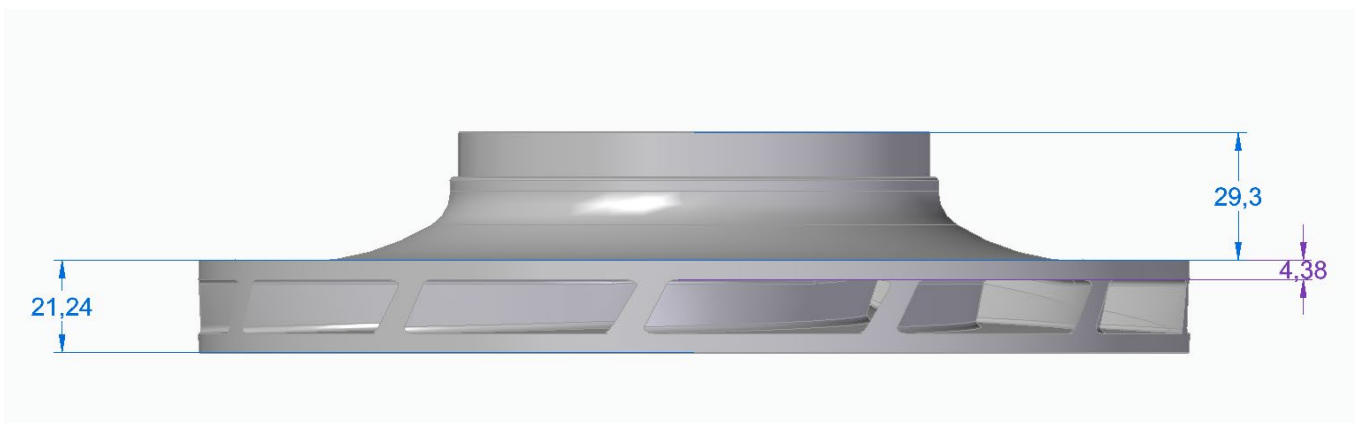


Fig.5.2.3 Vista laterale girante

Per evitare tempi di calcolo eccessivi si è pensato di studiare un singolo canale dell'intera girante considerata in quanto in questo modo si sono ridotti i tempi di simulazione stampa e anche di costruzione dei supporti, inoltre viste le difficoltà di studio analizzate pure con questa geometria si è pensato di partire da una geometria molto più semplice e cioè facendo un taglio sul canale di tale girante. Di seguito qui vi mostro le geometrie finale che si sono studiate e analizzate.

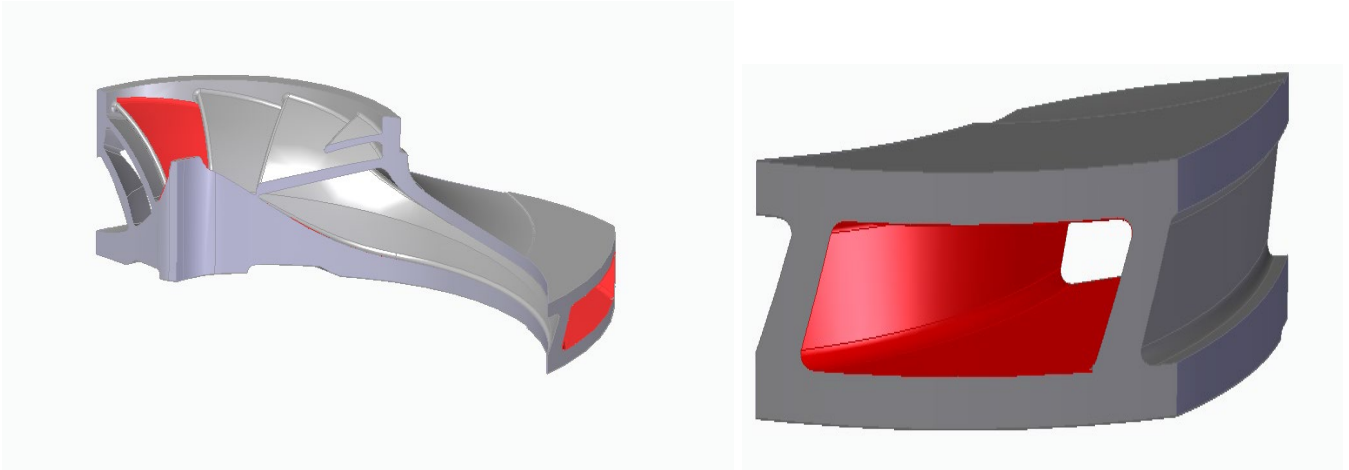


Fig.5.2.4 Geometrie considerate

5.3 Analisi di stampabilità del canale e del vano tagliato di girante di un compressore centrifugo con i loro relativi supporti

In questo capitolo ci concentreremo ad analizzare meglio i risultati ottenuti di simulazione di stampa attraverso il software Ansys Additive Print per le geometrie che abbiamo analizzato e visto nel caso studio, vedi capitolo 5.2. In particolare andremo ad analizzare le deformazioni e tensioni in Mpa che subiscono sia le geometrie ma anche i loro supporti, inoltre andremo ad analizzare anche gli spostamenti che subiscono geometrie e supporti in mm. Una volta che abbiamo eseguite questi step finali passiamo a fare delle considerazioni finali sul nostro caso studio analizzato e come poter migliorare le problematiche riscontrate durante i diversi processi di simulazione di stampa. Vediamo ora in dettaglio i passaggi eseguiti per creare le simulazioni di stampa, vedi Figura 5.3.1.

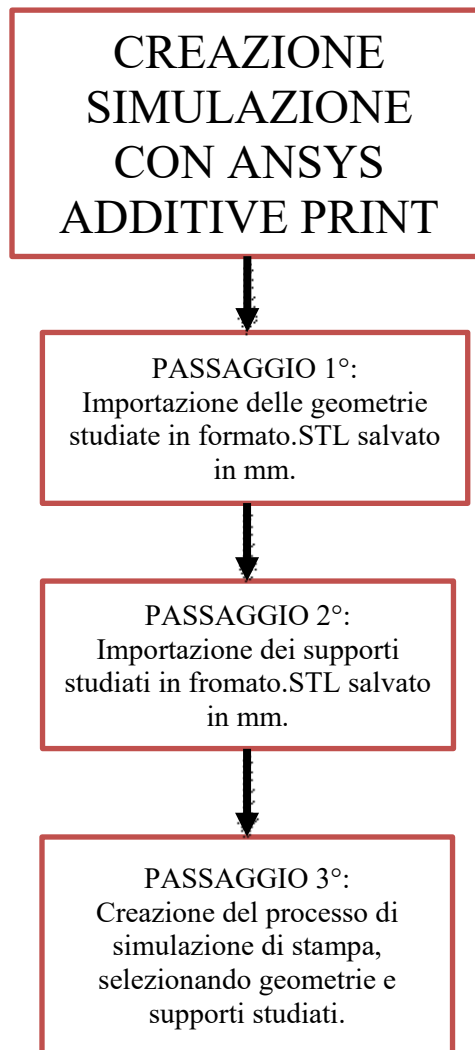


Figura 5.3.1 Percorso di realizzazione per il processo di simulazione di stampa con Ansys Additive Print

5.3.1 Ansys Additive Print: verifiche sul processo di simulazione di stampa sulle geometrie considerate e i loro supporti

Ora andiamo a parlare nel dettaglio dei diversi parametri e scelte fatte per eseguire in maniera ottimale le diverse simulazioni per i supporti e per le geometrie studiate. A questo punto partiamo nell'andare ad analizzare la 1° geometria studiata con il suo relativo supporto con cella elementare FCC e successivamente con cella elementare FCCZ. Qui in dettaglio nella Figura 5.3.1.1, possiamo analizzare in dettaglio tutti i parametri impostati per procedere al processo di simulazione di stampa.

FASE 1: PREPARAZIONI SIMULAZIONI

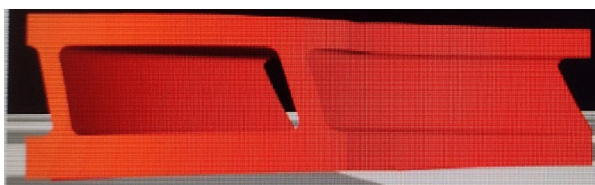
IMPORTAZIONE 1°GEOMETRIA STUDIATA
FORMATO.STL IN MM

Specification

Volume: 22.500.4 (mm³)

Size (x, y, z): 32.01 mm, 104.32 mm, 21.45 mm

Triangle Count: 245,720



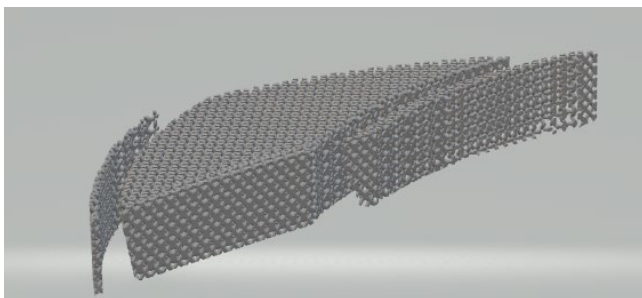
IMPORTAZIONE DEL SUPPORTO CON CELLA
ELEMENTARE FCCZ IN FORMATO.STL IN MM

Specification

Volume: 16.346.0 (mm³)

Size (x, y, z): 32.36 mm, 100.73 mm, 16.63 mm

Triangle Count: 0



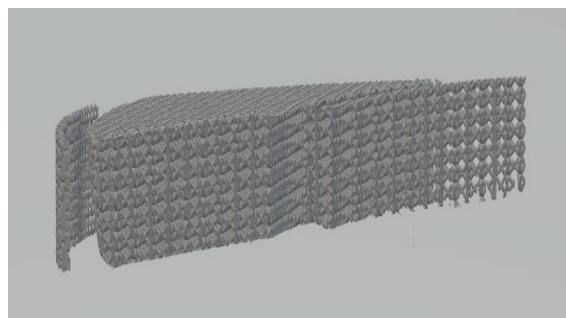
IMPORTAZIONE DEL SUPPORTO CON
CELLA ELEMENTARE FCC IN
FORMATO.STL IN MM

Specification

Volume: 18.304.38 (mm³)

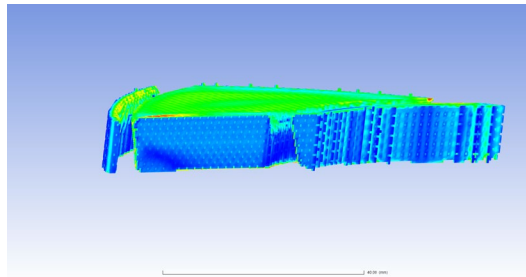
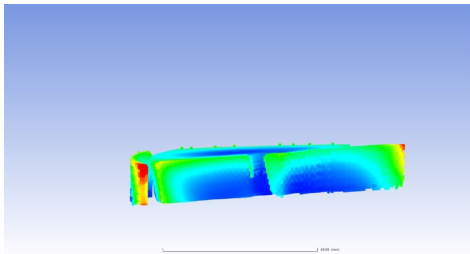
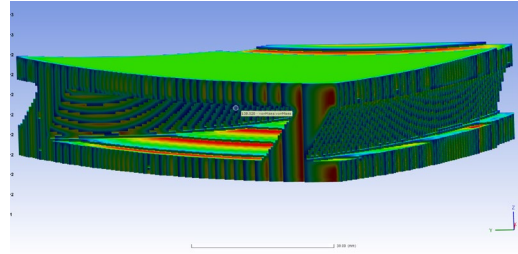
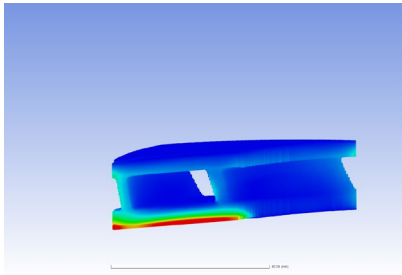
Size (x, y, z): 32.05 mm, 104.05 mm, 13.2 mm

Triangle Count: 0



FASE 2: SIMULAZIONI COMPLETATE

DIMOSTRAZIONE DI ALCUNI RISULTATI SULLA SIMULAZIONE DELLA GEOMETRIA STUDIATA E SUPPORTO CON CELLA FCC



DIMOSTRAZIONE DI ALCUNI RISULTATI SULLA SIMULAZIONE DELLA GEOMETRIA STUDIATA E SUPPORTO CON CELLA FCCZ

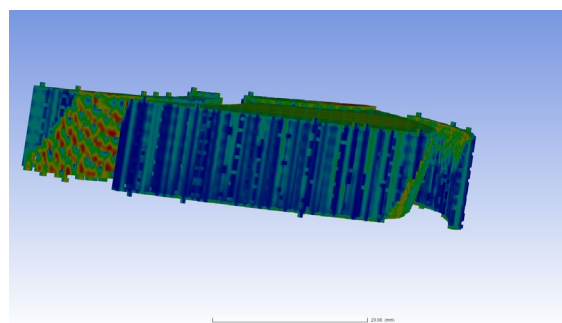
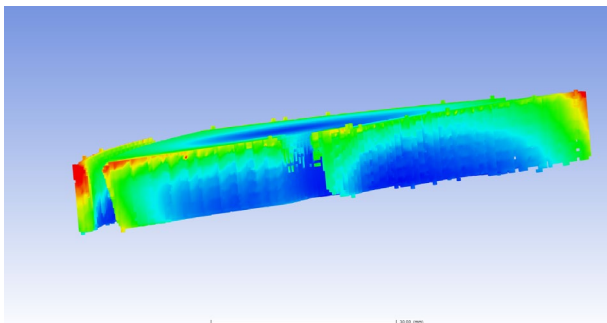
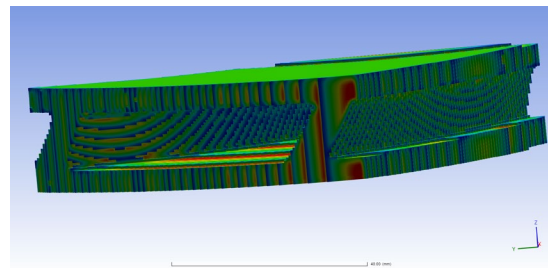
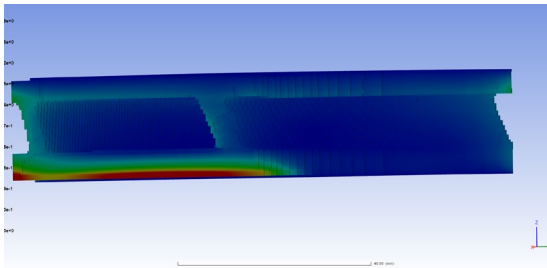


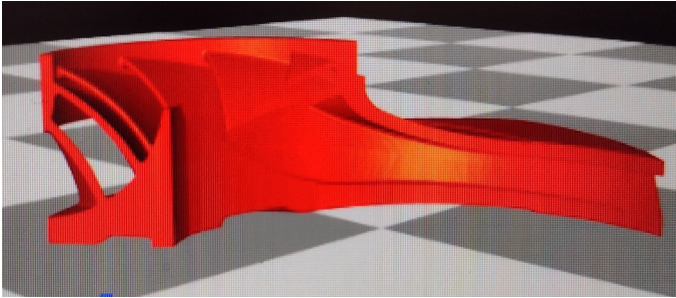
Figura 5.3.1.1 Preparazione delle geometrie e supporti per le simulazioni

Arrivati a questo punto andiamo ad analizzare la 2° geometria studiata con il suo relativo supporto con cella elementare FCC e successivamente con cella elementare FCCZ. Qui in dettaglio nella Figura 5.3.1.2, possiamo analizzare in dettaglio tutti i parametri impostati per procedere al processo di simulazione di stampa.

FASE 1: PREPARAZIONI SIMULAZIONI

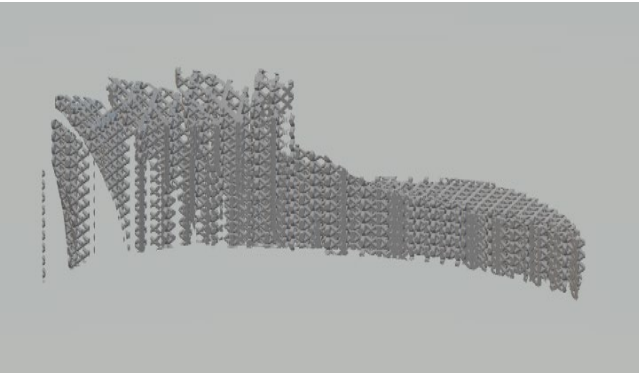
IMPORTAZIONE 2° GEOMETRIA STUDIATA
FORMATO.STL IN MM

Specification
Volume: 82,635.45 (mm³)
Size (x, y, z): 145.03 mm, 126.28 mm, 50.55 mm
Triangle Count: 2,214,832



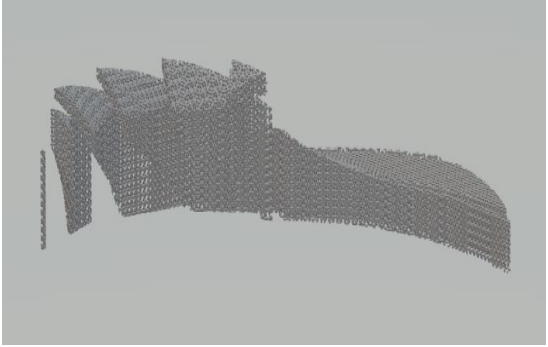
IMPORTAZIONE DEL SUPPORTO CON CELLA
ELEMENTARE FCCZ IN FORMATO.STL IN MM

Specification
Volume: 60,141.0 (mm³)
Size (x, y, z): 144.91 mm, 126.11 mm, 40.63 mm
Triangle Count: 0



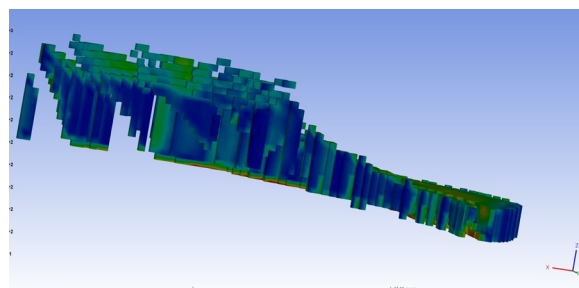
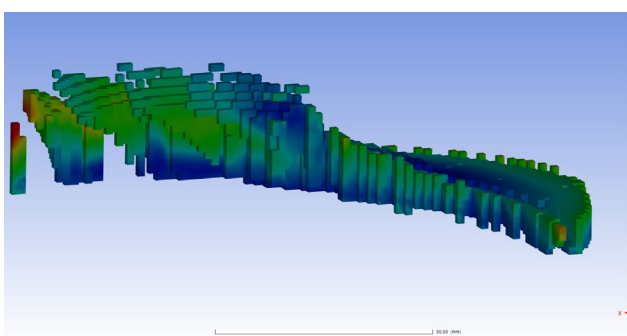
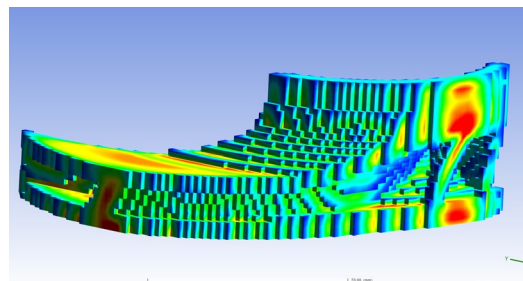
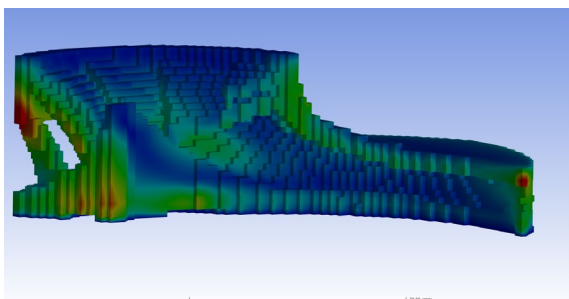
IMPORTAZIONE DEL SUPPORTO CON
CELLA ELEMENTARE FCC IN
FORMATO.STL IN MM

Specification
Volume: 43,475.0 (mm³)
Size (x, y, z): 143.07 mm, 123.39 mm, 40.23 mm
Triangle Count: 0



FASE 2: SIMULAZIONI COMPLETATE

DIMOSTRAZIONE DI ALCUNI RISULTATI SULLA SIMULAZIONE DELLA GEOMETRIA STUDIATA E SUPPORTO CON CELLA FCCZ



DIMOSTRAZIONE DI ALCUNI RISULTATI SULLA SIMULAZIONE DELLA GEOMETRIA STUDIATA E SUPPORTO CON CELLA FCC

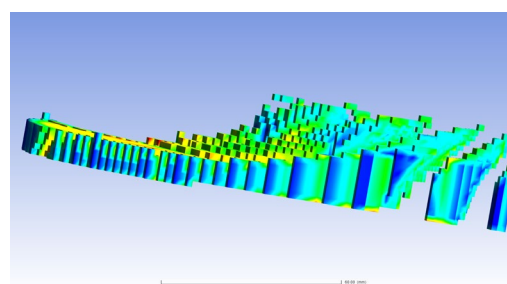
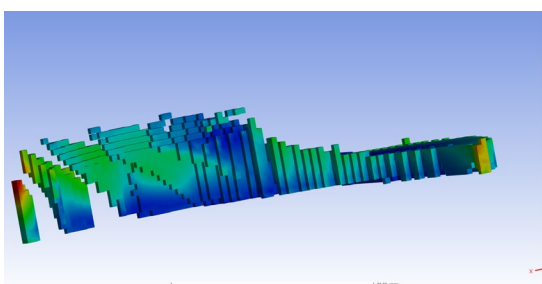
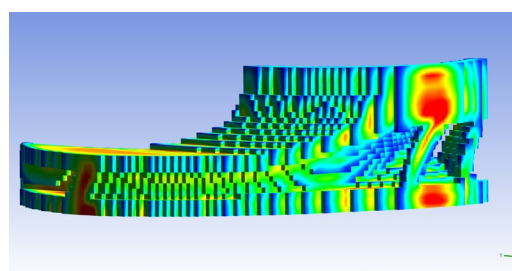
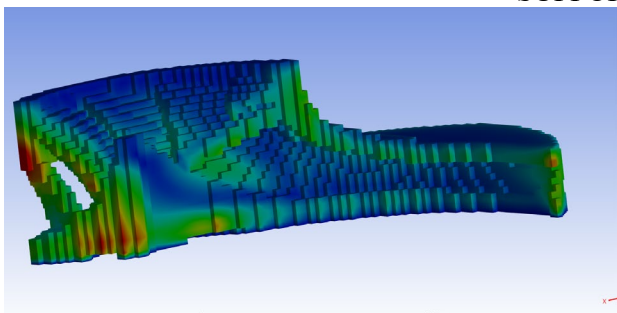


Figura 5.3.1.2 Preparazione delle geometrie e supporti per la simulazione

5.3.2 Analisi su tensioni, deformazioni e spostamenti in base alle geometrie considerate e i loro supporti

Passiamo ora a vedere in dettaglio le deformazioni, tensioni e spostamenti che subiscono le geometrie analizzate e i loro supporti. Innanzitutto, partiamo nell'analizzare i risultati ottenuti per la 1° geometria studiata e cioè il taglio vano della girante, vista nel capitolo 5.2, con i suoi supporti realizzati utilizzando la cella elementare FCC e FCCZ. A questo punto passiamo ad analizzare in dettaglio la geometria andando a considerare spostamenti e deformazioni, vedi Tabella 5.3.2.1.

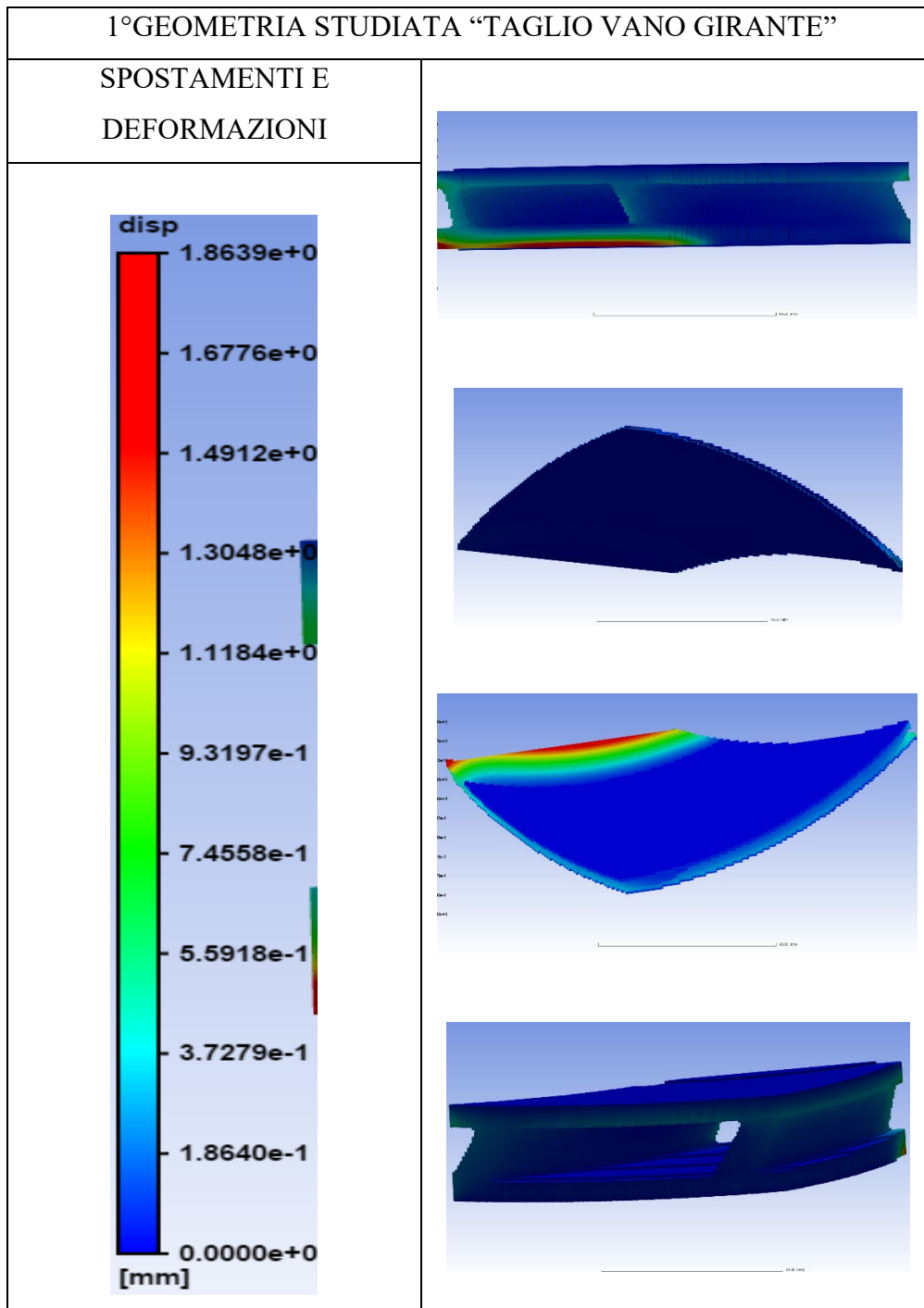


Tabella 5.3.2.1 Rappresentazione degli spostamenti e deformazioni subite dalla geometria studiata

Dalla Tabella 5.3.2.1 si può notare che la geometria studiata subisce poche deformazioni soprattutto nella zona interna del vano e parte esterna, infatti andiamo a leggere valori bassi che si aggirano sui 0.1864 mm fino ad un massimo di 0.2/0.3 mm. La zona più critica analizzando bene le figure riportate, risulta essere dove si è svolto il taglio della geometria di partenza che è l'1-12 di girante. Qui si nota che le deformazioni e spostamenti partano da valori intorno a 1.1184 mm fino ad un massimo di 1.4912mm. In conclusione a quanto visto si può concludere che tale zona critica non è necessaria considerarla in quanto risulta essere soggetta a delle imperfezioni come lo scalino presente, pertanto di conseguenza risulta avere maggiori spostamenti e deformazioni.

Passiamo ora ad analizzare le tensioni subite dalla geometria studiata nella Tabella 5.3.2.2.

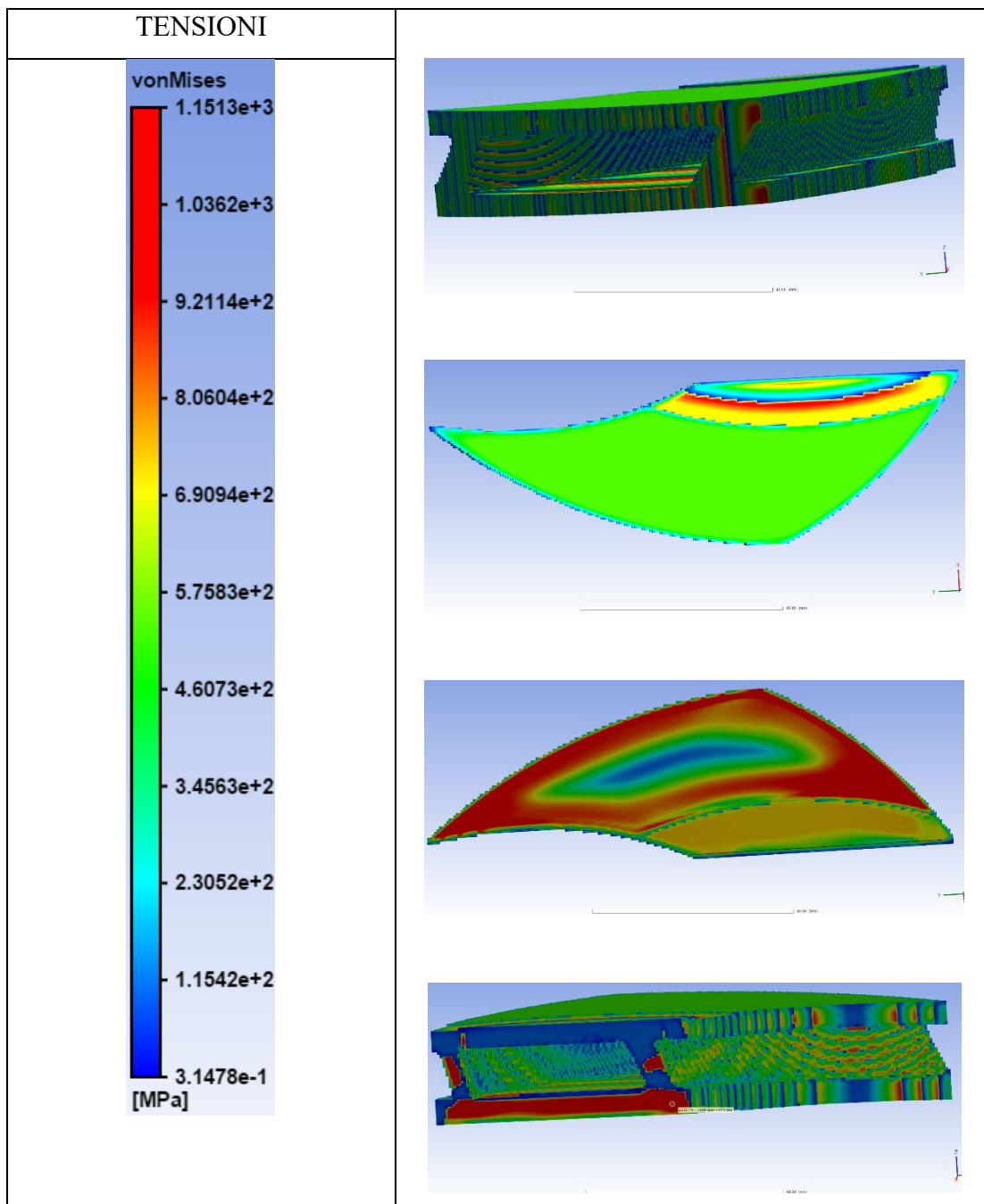


Tabella 5.3.2.2 Rappresentazione delle tensioni subite dalla geometria studiata

Dalla Tabella 5.3.2.2 possiamo notare in dettaglio il comportamento delle tensioni sulla geometria studiata, si può notare che nella zona esterna del vano ci aggiriamo su valori di tensione per la maggior parte di 575.83 MPa tranne in due particolari zone come si vede nel taglio effettuato dove si parla di valori da 115.42 MPa a 1036.2 MPa. L'altra zona critica è la parte inferiore a contatto con il piatto di stampa in cui si vede per la maggior parte della geometria una zona completamente rossa sui valori di 806.04 MPa fino ad un massimo di 1036.2 MPa.

A questo punto si deve effettuare un confronto di risultati tra i due supporti realizzati sia con cella FCC e sia con cella FCCZ.

Partiamo nell'analizzare il supporto FCCZ parlando di deformazioni e spostamenti, vedi Tabella 5.3.2.3.

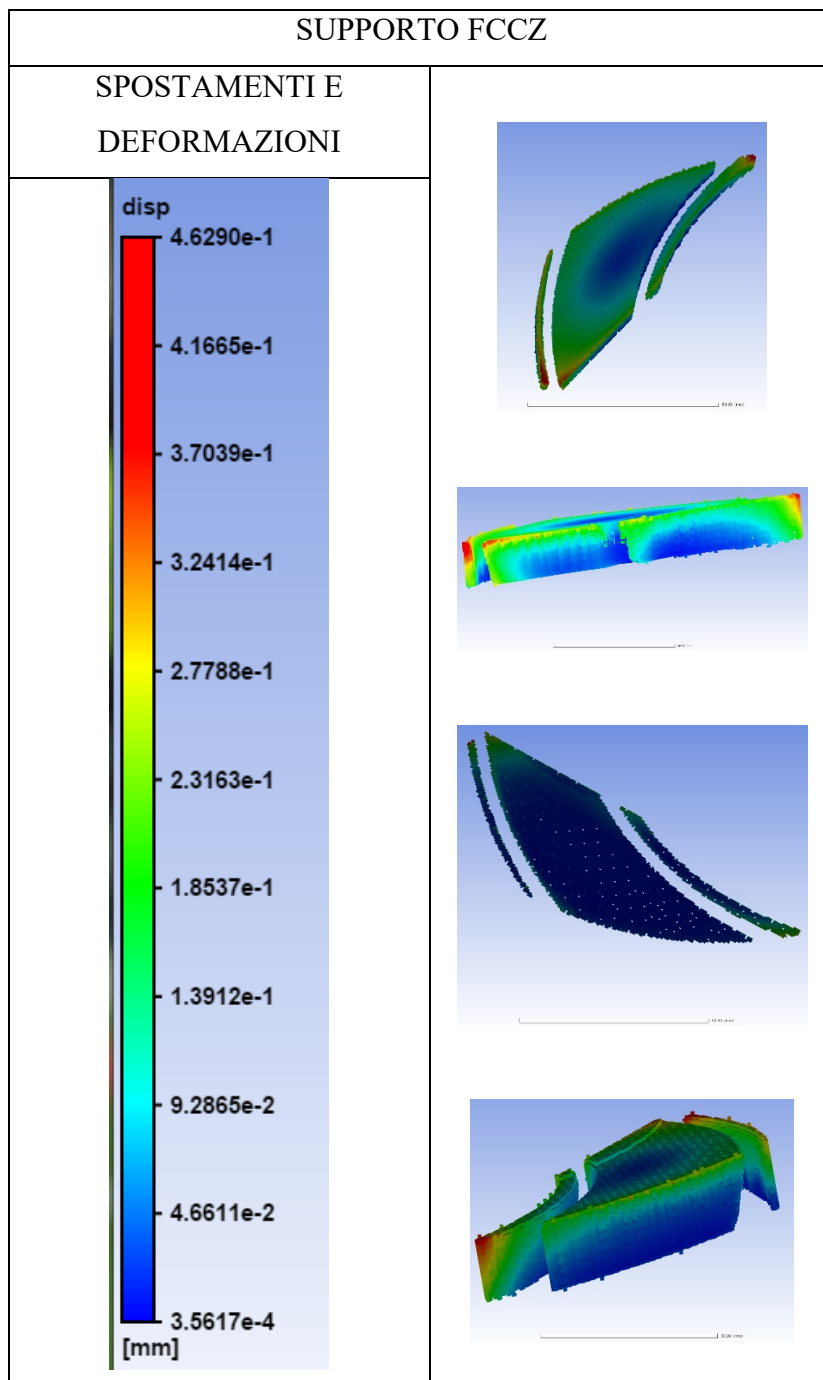


Tabella 5.3.2.3 Rappresentazione degli spostamenti e deformazioni per il supporto FCCZ

Dalla Tabella 5.3.2.3 si nota il comportamento degli spostamenti e deformazioni, dove si vede che le zone critiche dei supporti sono soprattutto la parti superiori a contatto con la superficie superiore del vano infatti si può notare che ci aggiriamo su valori di 0.18537 mm fino ad arrivare 0.046611 mm. Nelle zone più estreme del supporto si notano dei valori purtroppo superiori ma questo per via del taglio effettuato e dello spigolo presente soggetto ad imperfezioni, pertanto si hanno valori intorno ai 0.37039 mm.

Ora sempre per questa tipologia di supporti andiamo ad analizzare le tensioni, nella tabella 5.3.2.4.

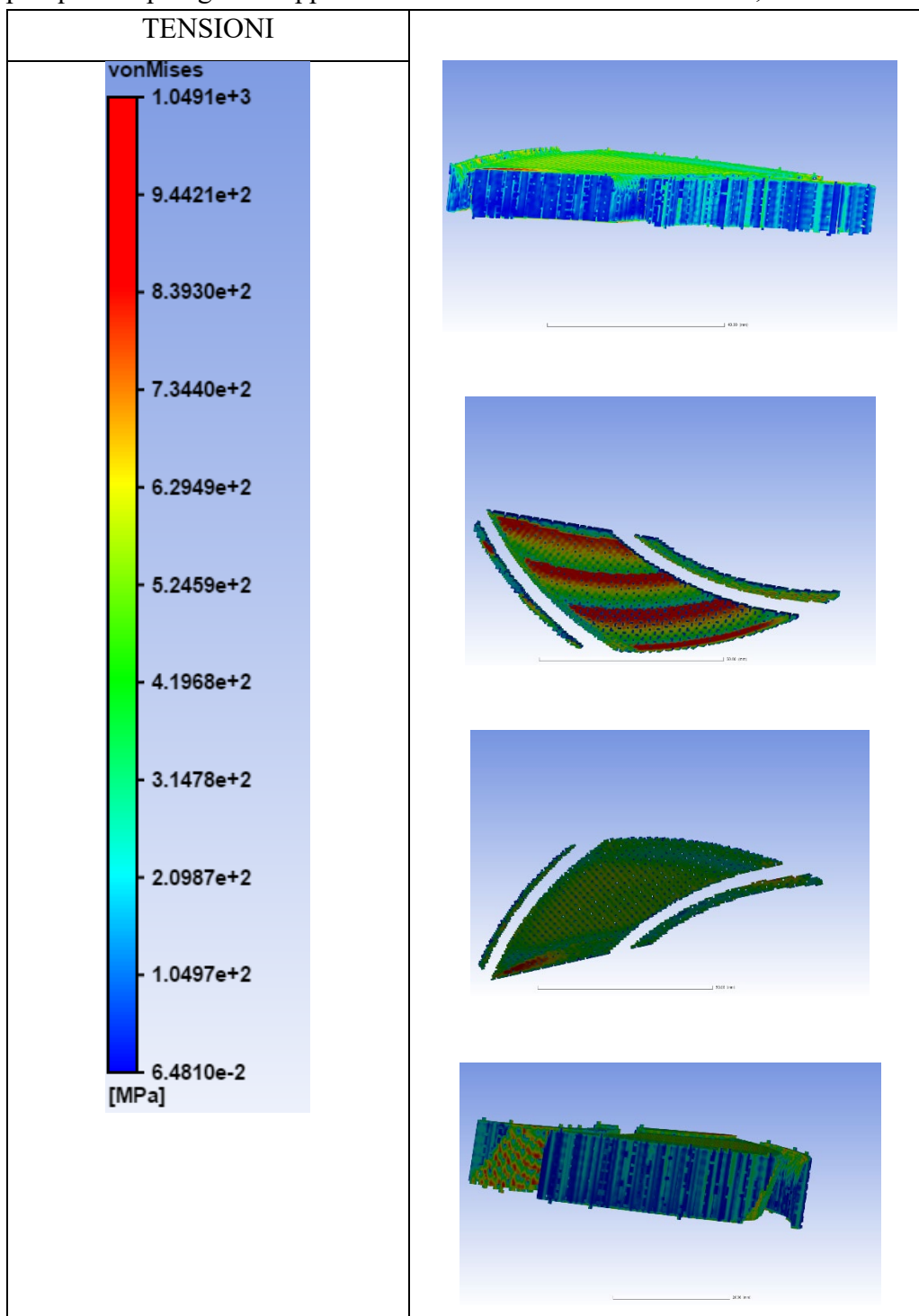


Tabella 5.3.2.4 Rappresentazioni delle tensioni per il supporto FCCZ

Dalla Tabella 5.3.2.4, si nota il comportamento delle tensioni per il supporto realizzato. Si può notare come le parti esterne del supporto realizzato hanno delle tensioni molto basse infatti ci aggiriamo su valori di 104.97 MPa fino al massimo di 209.87 MPa. Mentre le zone più critiche sono la parte superiore e inferiore del supporto cioè quelle strettamente a contatto con le pareti della geometria. Nella zona superiore ci aggiriamo su valori di 419.68 Mpa, mentre la parte inferiore si aggira su valori di tensione dai 419.68 MPa ai 839.3 MPa, quindi una zona molto sollecitata.

Analizziamo ora il supporto FCC realizzato sempre per la stessa geometria. Prima di tutto analizziamo gli spostamenti e le deformazioni subite, vedi Tabella 5.3.2.5.

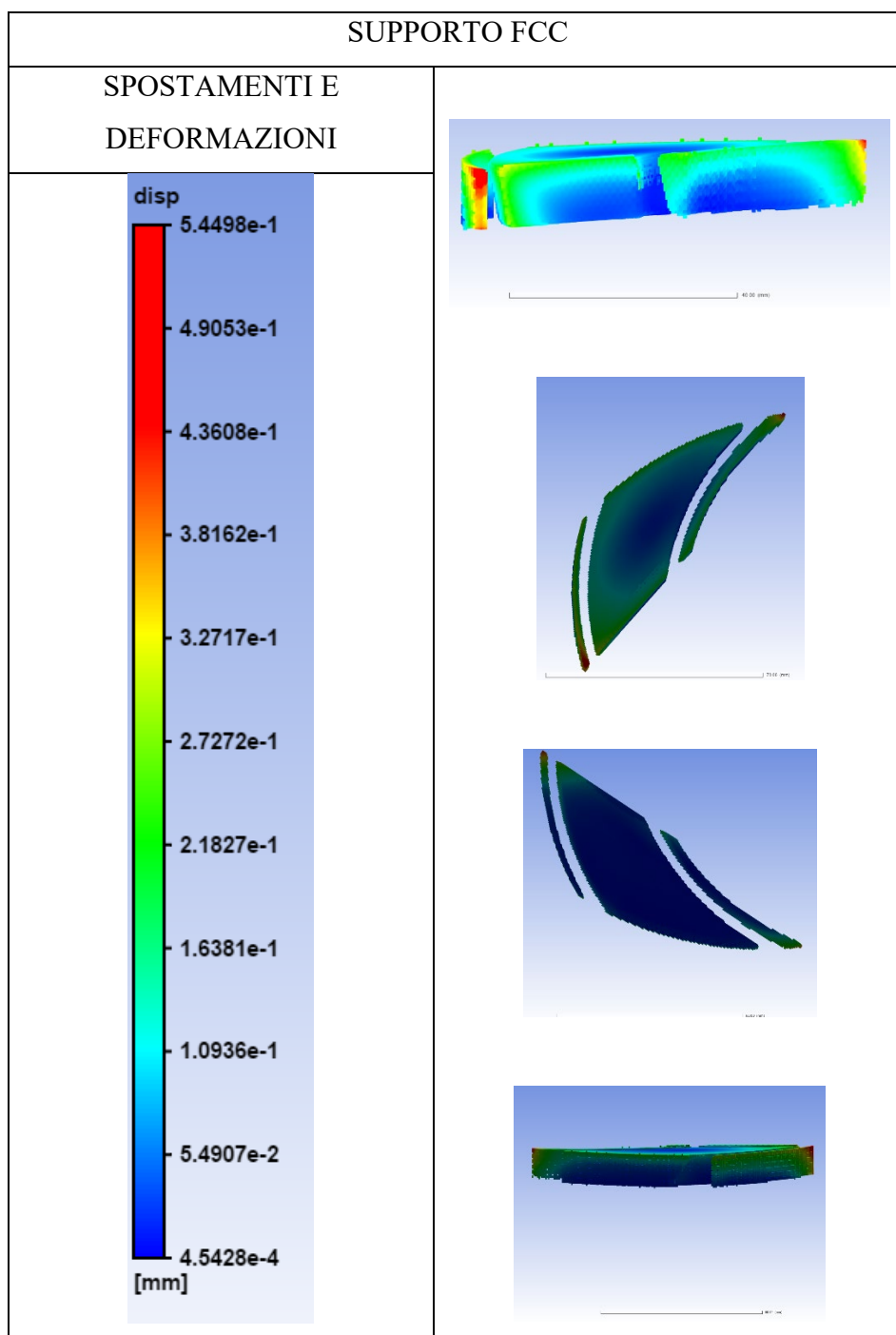


Tabella 5.3.2.5 Rappresentazione spostamenti e deformazioni supporto FCC

Dalla Tabella 5.3.2.5, si nota il comportamento del supporto FCC in termini di spostamenti e deformazioni. Si può vedere che le zone più critiche risultano essere la zona esterna dei supporti e la parte superiore a contatto con la geometria da supportare. Qui in questa zona superiore parliamo di valori dell'ordine di 0.054907 mm fino ad un massimo di 0.27272 mm. Possiamo subito notare le differenze che otteniamo tra i due supporti in quanto salta subito all'occhio vedere che il supporto con celle FCCZ risulta essere meno deformativo in quanto si parla di un range tra 0.18537 mm e 0.046611 mm, rispetto al supporto appena visto che risulta avere una maggior deformazione. Nelle zone più estreme del supporto si notano dei valori purtroppo superiori ma questo per via del taglio effettuato e dello spigolo presente soggetto ad imperfezioni, pertanto si hanno valori intorno ai 0.43608 mm. Quindi qui si ha un maggior problema nello spigolo vivo del taglio rispetto al supporto FCCZ. Passiamo ad analizzare le tensioni relative al supporto FCC, vedi Tabella 5.3.2.6.

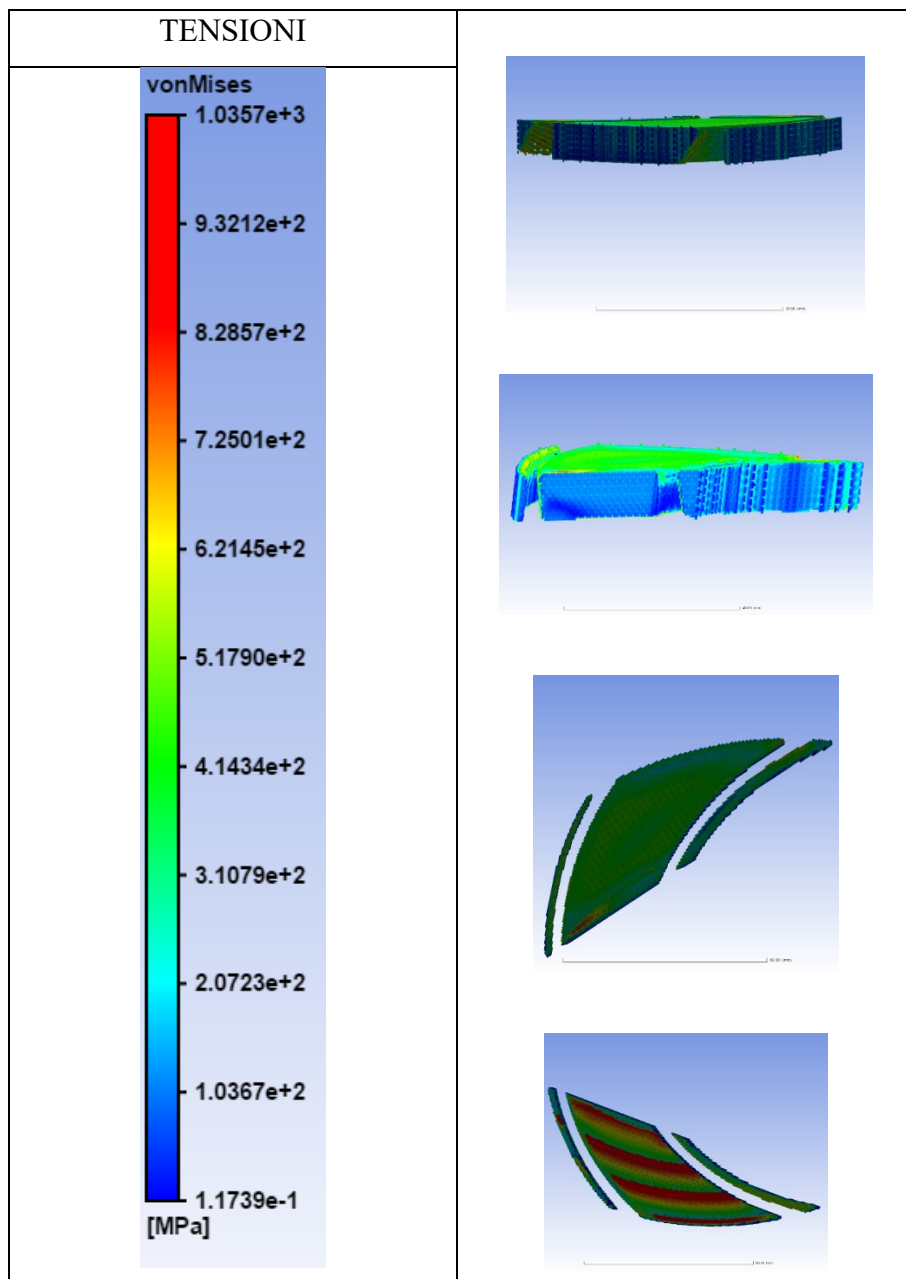


Tabella 5.3.2.6 Rappresentazione stato tensionale supporto FCC

Dalla Tabella 5.3.2.6, si nota lo stato tensionale del supporto FCC. Si può visualizzare che le parti meno in tensione sono le zone esterne con valori che si aggirano sui 207.23 MPa. Possiamo capire subito che rispetto ai supporti FCCZ che hanno valori di tensioni al massimo di 209.87 MPa, tali supporti hanno minor tensioni pertanto risultano essere migliori dal punto di vista dello stato tensionale. Mentre le due zone critiche di supportazione alla geometria risultano essere la parete superiore e inferiore. Nella parete superiore si parla di valori di 517.9 MPa, mentre nella parete inferiore si registrano valori di 828.57 MPa. Qui rispetto a prima si nota una differenza rispetto ai supporti FCCZ, in quanto nella zona superiore ad avere minor tensioni sono gli FCCZ con un valore di 419.68 MPa, mentre nella zona inferiore si nota che il supporto ad avere maggior tensioni è l'FCCZ con valore che arriva al massimo di 839.3 MPa.

Ora ci manca da analizzare la 2° geometria studiata e cioè l'1-12 di girante del compressore centrifugo, vista nel capitolo 5.2. Anche qui andremo ad analizzare nel dettaglio tensioni, deformazioni e spostamenti per quanto riguarda sia la geometria. Successivamente vedremo nel dettaglio i supporti realizzati con cella elementare FCC e FCCZ.

Iniziamo ad analizzare la geometria andando a vedere nel dettaglio il comportamento degli spostamenti e deformazioni, vedi Tabella 5.3.2.7.

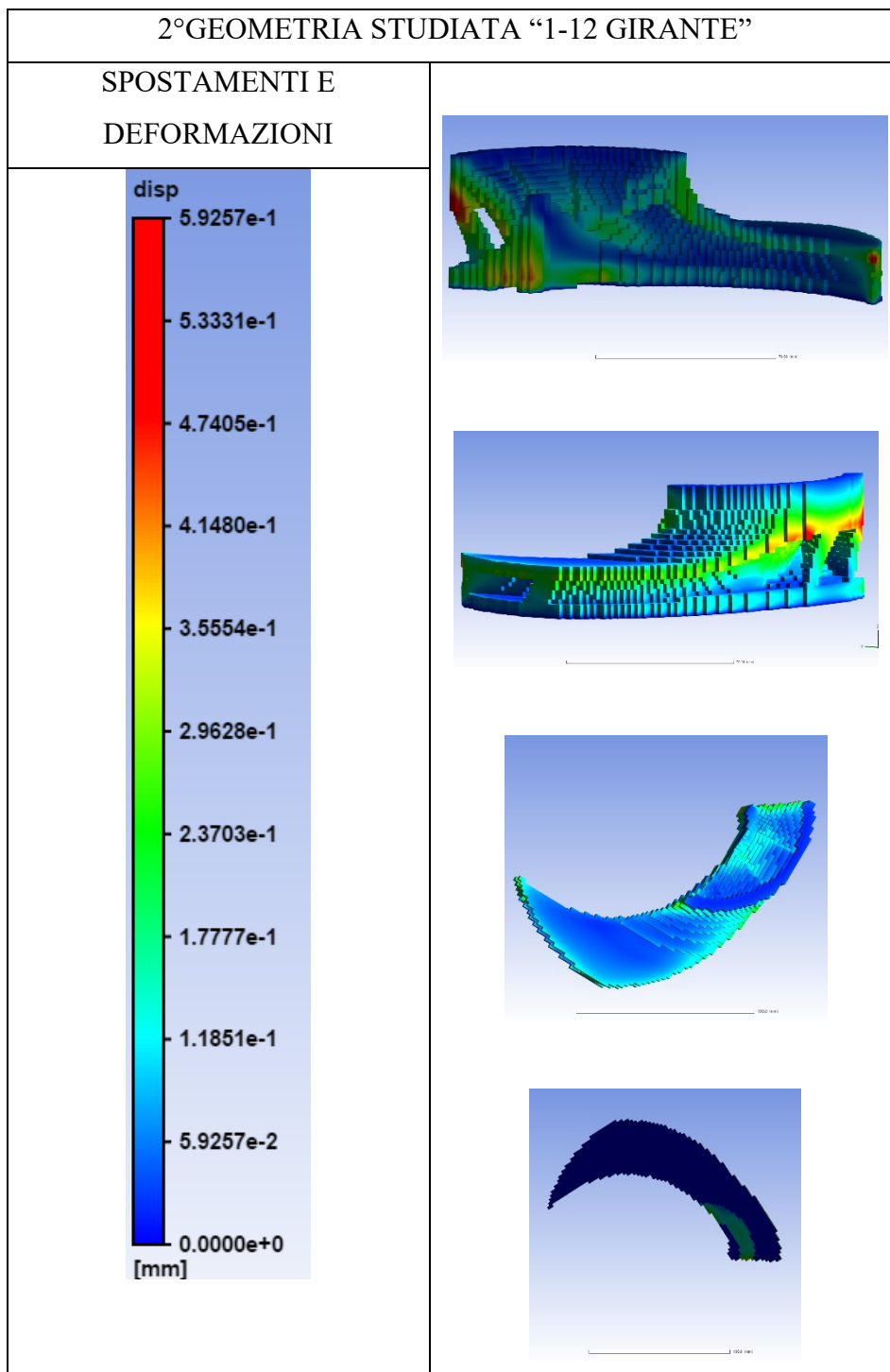


Tabella 5.3.2.7 Rappresentazione spostamenti e deformazioni della geometria studiata

Dalla Tabella 5.3.2.7, si possono notare nel dettaglio gli spostamenti e deformazioni subiti dalla geometria considerata. Si vede dall'immagini come ci sia un mix di deformazioni, cioè nel senso che si parte dalle zone più esterne che sono soggette a deformazioni più importanti, infatti ci aggiriamo su valori di 0.47405 mm fino ad arrivare a 0.23703 mm. Nel resto della geometria e soprattutto nella zona centrale le deformazioni assumano valori differenti infatti ci troviamo sui 0.059257 mm che sono molto bassi come valori rispetto a quanto vista prima.

A questo punto passiamo a vedere nel dettaglio il comportamento delle tensioni sulla geometria studiata, vedi Tabella 5.3.2.8.

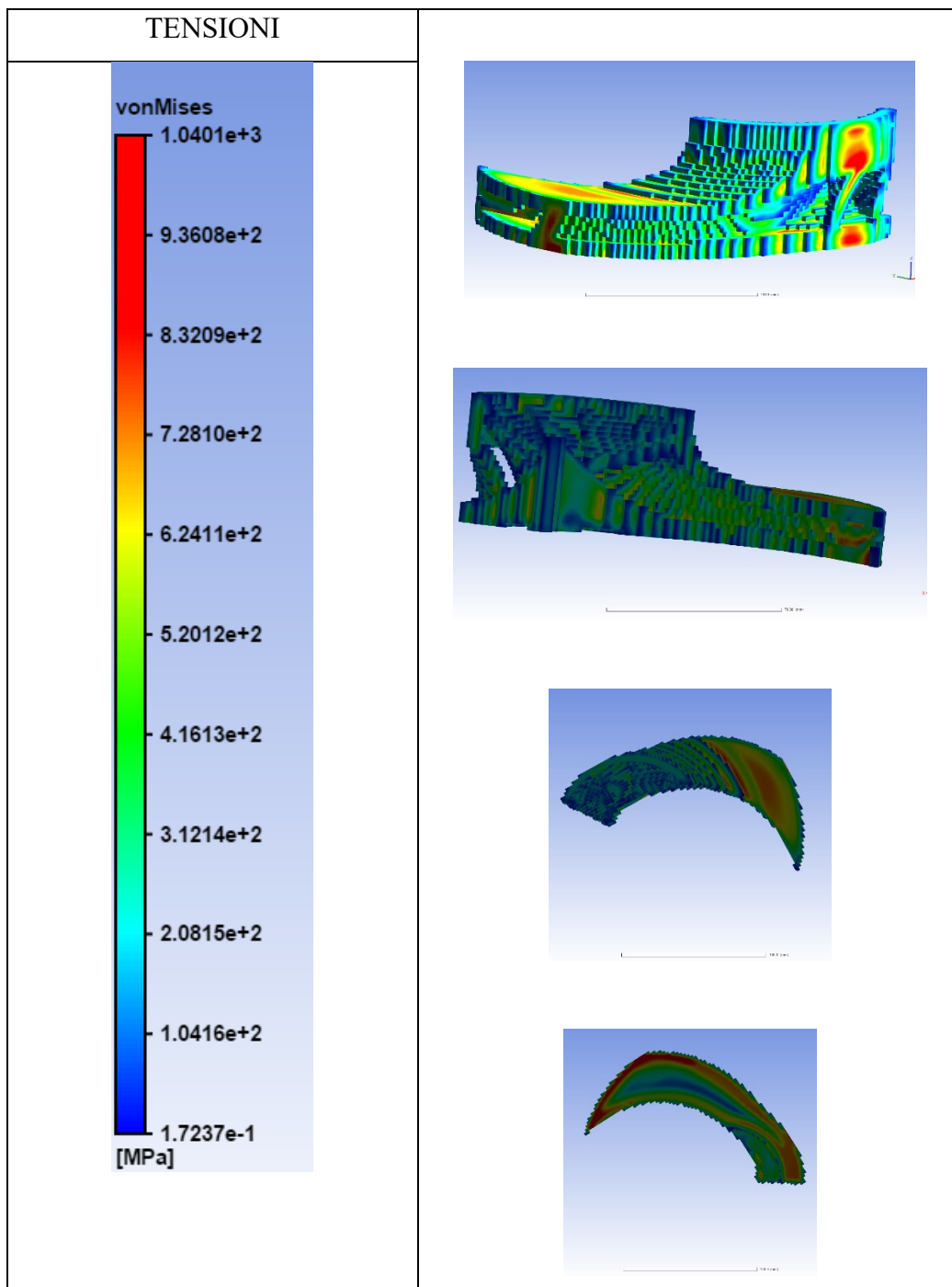


Tabella 5.3.2.8 Rappresentazione delle tensioni sulla geometria studiata

Dalla Tabella 5.3.2.8, si nota il comportamento delle tensioni per la geometria studiata. Si vede subito dall'immagini che le tensioni subite maggiormente risultano essere: la zona superiore al vano della girante, la parte estrema nella zona posteriore della girante ed infine la zona inferiore collegata al piatto di stampa. Qui infatti si registrano valori che vanno da un minimo di 728.1 MPa ad un massimo di 832.09 MPa. Nelle restanti zone della geometria considerata ci aggiriamo su valori molto più bassi che vanno da 208.15 MPa fino ad arrivare a 520.12 MPa.

A questo punto passiamo ad analizzare i supporti realizzati per poi effettuare un confronto di risultati ottenuti.

Prima di tutto analizziamo nel dettaglio il supporto FCCZ andando a valutare spostamenti e deformazioni subite, vedi Tabella 5.3.2.9.

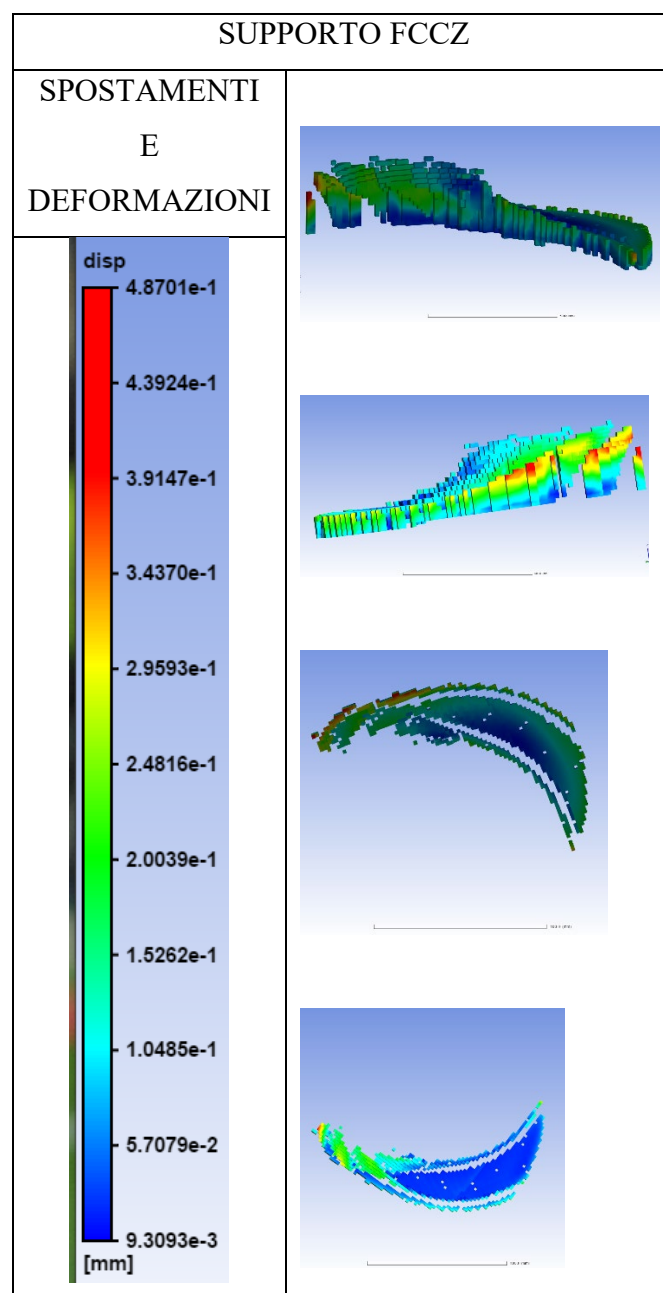


Tabella 5.3.2.10 Rappresentazione degli spostamenti e deformazioni subite dal supporto FCCZ

Dalla Tabella 5.3.2.10, si mette in risalto il comportamento degli spostamenti e deformazioni subite dal supporto. Si può notare dall'immagini che le maggior parti delle zone del supporto si aggirano su dei valori di 0.24816 mm fino ad arrivare a 0.29593 mm. Inoltre la parte superiore del supporto è quella più in sicurezza in quanto si registrano valori molto bassi 0.057079 mm fino al massimo di 0.10485 mm. Le zone più a rischio sono le parti estreme del supporto dove si registrano valori di 0.39147 mm. Ora analizziamo le tensioni subite dal supporto realizzato nella Tabella 5.3.2.11.

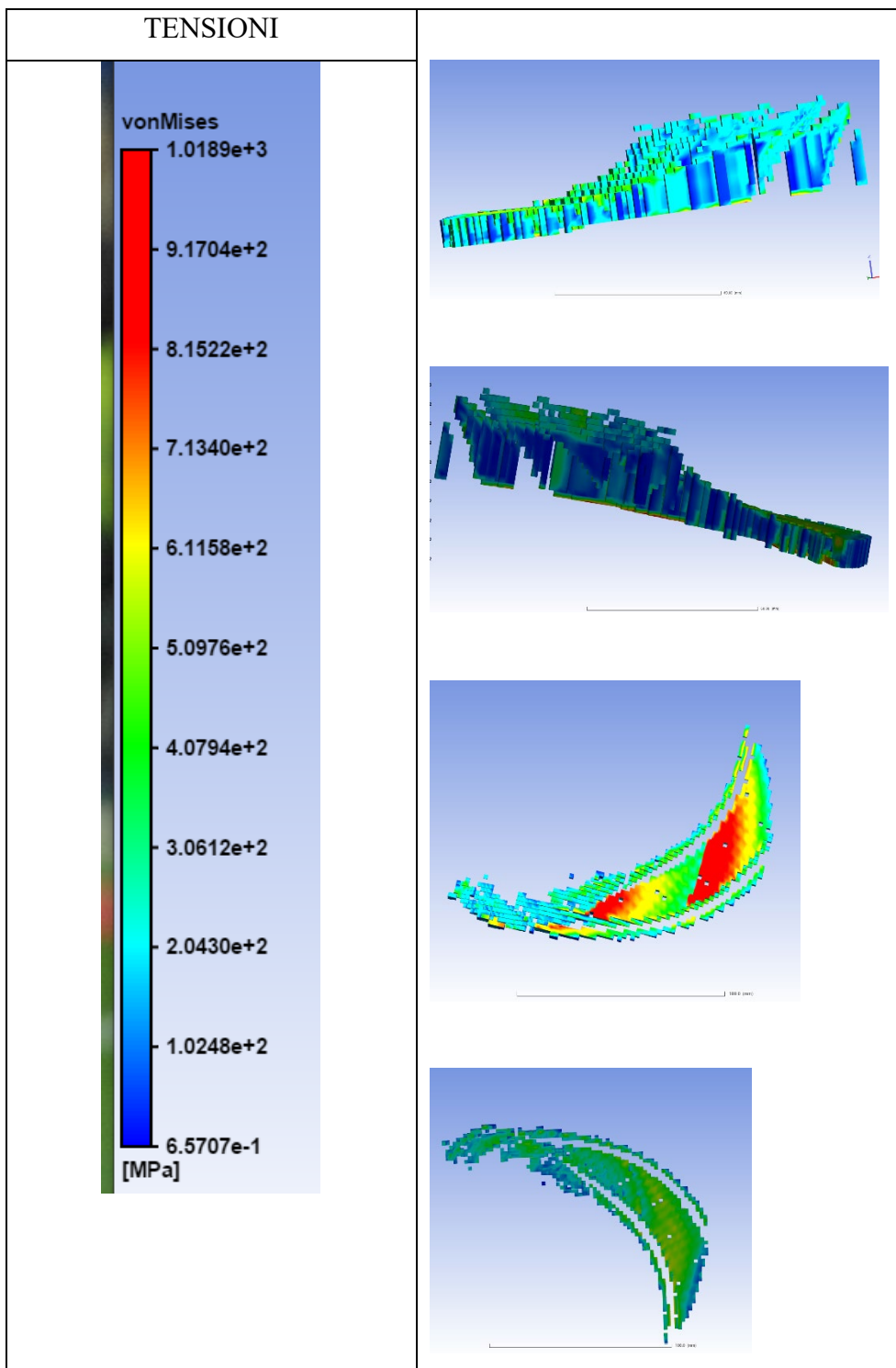


Tabella 5.3.2.11 Rappresentazione dello stato tensionale del supporto FCCZ

Dalla Tabella 5.3.2.11, si mette in evidenza il comportamento dello stato tensionale subito dal supporto. Si nota che per la maggior parte delle zone del supporto le tensioni registrate sono su valori contenuti infatti si parla di un range che va da 102.48 MPa a 407.94 MPa. Possiamo poi vedere nel dettaglio che le zone critiche risultano essere la zona inferiore e superiore. Infatti nella zona superiore registriamo dei valori di tensione 509.76 MPa, mentre la zona inferiore che poi è la più critica essendo a stretto contatto con il piatto di stampa ha valori di 713.4 MPa fino al massimo di 815.22 MPa.

A questo punto analizziamo il secondo supporto realizzato per poi confrontarlo con quello appena visto.

Partiamo nel vedere nel dettaglio spostamenti e deformazioni subite dal supporto FCC, vedi Tabella 5.3.2.12.

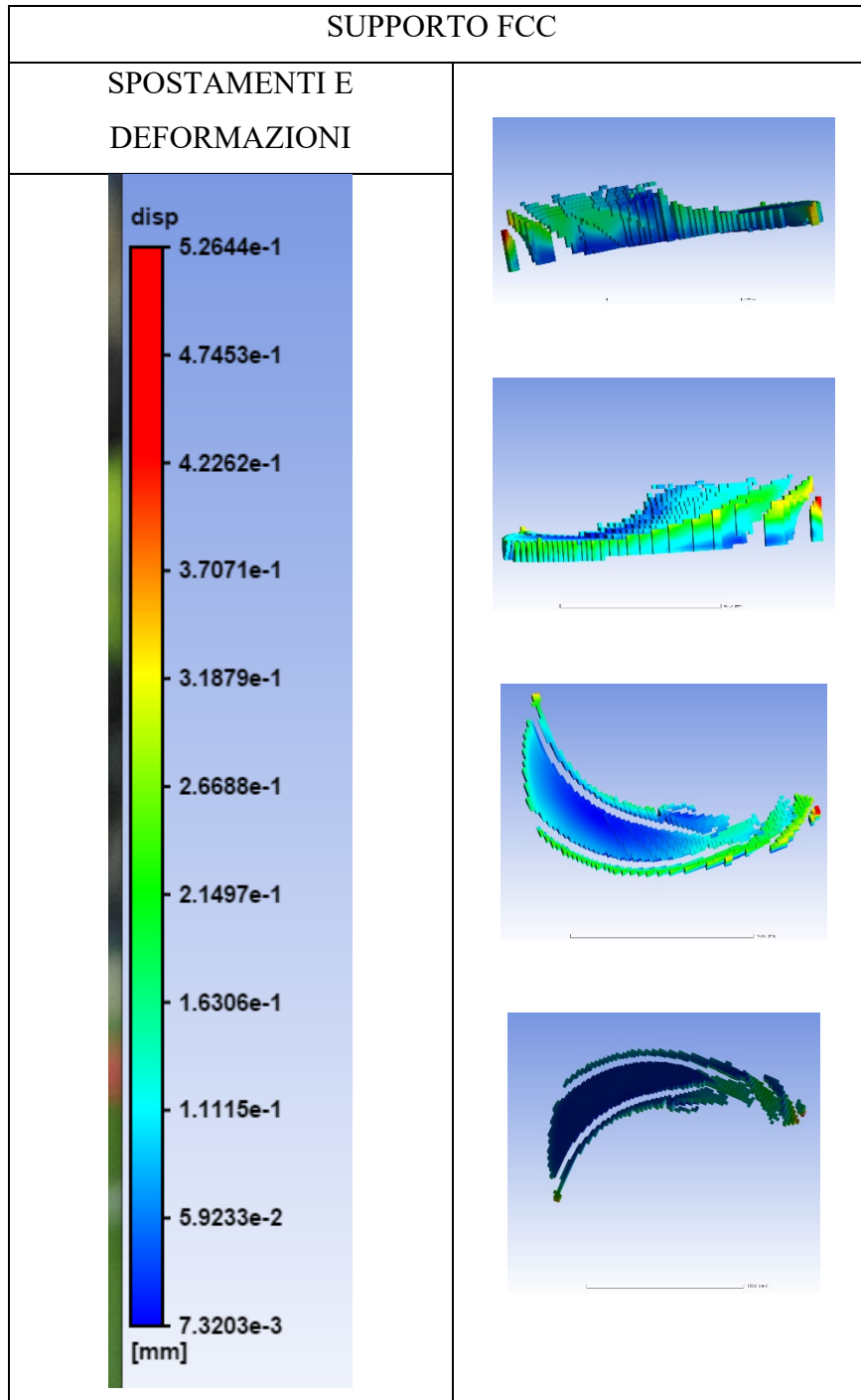


Tabella 5.3.2.12 Rappresentazione spostamenti e deformazioni subite dal supporto FCC

Dalla Tabella 5.3.2.12, si può visualizzare nel dettaglio il comportamento degli spostamenti e deformazioni subite dal supporto. Si può notare dall'immagini che le maggior parti delle zone del supporto si aggirano su dei valori di 0.26688 mm fino ad arrivare a 0.31879 mm. Questo ci permette subito di dire che il supporto FCC subisce maggior deformazioni e spostamenti rispetto al FCCZ in quanto li avevamo un range da 0.24816 mm fino a 0.29593 mm. Le zone più esterne del supporto sono quelle soggette a maggior criticità infatti si registrano valori di 0.42262 mm contro i 0.39147 mm visti nel supporto FCCZ. Inoltre la zona più in sicurezza risulta essere la parte superiore del supporto dove si registrano valori da 0.059233 mm fino a 0.11115 mm. In questa stessa zona il supporto FCCZ registra valori da 0.057079 mm a 0.10485 mm che sono più bassi rispetto a quanto visto ora.

Concludiamo nell'analizzare le tensioni del supporto FCC per poi confrontarlo con quanto visto nel supporto FCCZ, vedi Tabella 5.3.2.13.

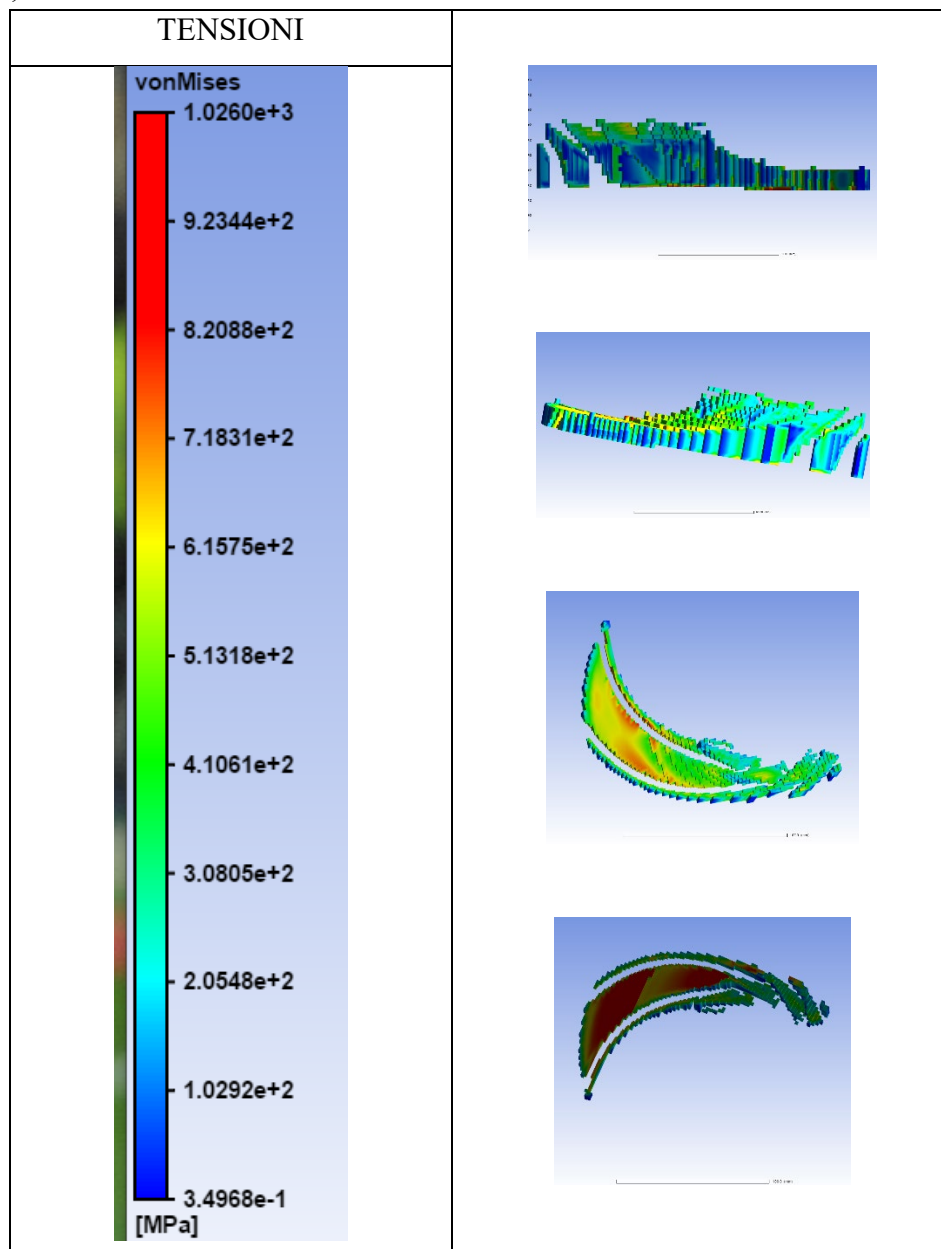


Tabella 5.3.2.13 Rappresentazione dello stato tensionale del supporto FCC

Dalla Tabella 5.3.2.13, si visualizza nel dettaglio lo stato tensionale del supporto FCC. Si nota che per la maggior parte delle zone del supporto le tensioni registrate sono su valori contenuti infatti si parla di un range che va da 102.92 MPa a 410.61 MPa. Facendo un confronto con il supporto FCCZ si vede che alle basse tensioni resiste meglio ma andando alle alte tensioni si nota che anche qui che risulta essere migliore il supporto FCCZ. Possiamo poi vedere nel dettaglio che le zone critiche risultano essere la zona inferiore e superiore. Infatti nella zona superiore registriamo dei valori di tensione 615.75 MPa, mentre la zona inferiore che poi è la più critica essendo a stretto contatto con il piatto di stampa ha valori di 718.31 MPa fino al massimo di 820.88 MPa. In conclusione su queste due zone si nota che nella parte superiore a una maggior resistenza alle tensioni il supporto FCCZ, mentre nella zona inferiore si nota che lavorando a bassi valori resiste meglio il supporto FCCZ e questo rimane invariato pure andando a valori di tensione maggiori.

6. Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di verificare la stampabilità di una girante di un compressore centrifugo per mezzo della tecnologia denominata Selective Laser Beam Melting o meglio dire Laser Powder Bed Fusion. In particolar modo l'obiettivo finale era studiare la stampabilità dei supporti realizzati con cella FCC e FCCZ, per le geometrie studiate e analizzate.

I punti sui quali si è basato lo studio sono stati:

- Analizzare la stampabilità della girante in orizzontale
- Verificare una possibile collisione del job con il recoater durante la fase di stampa
- Controllare che la tensione equivalente di Von-Mises sia inferiore rispetto quella di snervamento del materiale
- Verificare che lo spostamento massimo equivalente del componente alla fine del processo di stampa sia contenuto all'interno dell'intervallo di tolleranza
- Utilizzare una struttura di supporto facilmente rimovibile all'interno dei vani.

In conclusione, si evince che per ottenere i migliori risultati in termini di deformazioni e stress residuo è opportuno:

- Orientare la girante orizzontalmente rispetto al piatto di stampa con il condotto di aspirazione rivolto verso il basso.
- Considerare come strategia di supportazione delle strutture con celle elementari FCC e FCCZ all'interno del vano e nelle pareti esterne.

Posizionando così la geometria oltre ad avere benefici in termini di deformazioni e stress viene posto in primo piano il tempo di stampa e viene conservata l'isotropia della girante.

A questo punto vorrei spendere alcune osservazioni sulle due geometrie osservate in quanto nel capitolo precedente e cioè 5.3.2, ci siamo focalizzati di più sul confronto tra i diversi supporti realizzati. Per quanto riguarda la 1° geometria studiata "Taglio Vano Girante" le deformazioni subite erano molto basse rispetto alla 2° geometria studiata "1-12 Girante". Solo che per la 1° geometria si sono riscontrati problemi di imperfezione soprattutto nella zona di taglio e per via della presenza dello spigolo in quanto sia in termini di tensione che di deformazione ottenevamo risultati troppo grandi con un ampio range di errore. Pertanto con lo studio della 2° geometria tutte queste problematiche sono state risolte andando ad avere tensioni e deformazioni ben distribuite lungo tutta la geometria analizzata.

Invece in termine di supporti la situazione è ben differente, questo perché per quanto riguarda la 1° geometria studiata in termini di spostamenti e deformazioni risulta essere migliore la struttura di supportazione FCCZ, ma invece in termini di tensione la struttura di supportazione FCC. Però in questo specifico caso di verifica dello stato tensionale analizzando bene nel dettaglio le zone superiore e inferiore del supporto risulta essere di nuovo la struttura di supportazione FCCZ.

Per concludere l'analisi sui supporti realizzati abbiamo visto che per quanto accade per le strutture FCC e FCCZ ci sono delle differenze nella 2° geometria studiata. Infatti si è visto che sia in termini di spostamenti e deformazioni risultava essere migliore la struttura di supportazione FCCZ e ciò accade anche in termini di tensione.

Quindi possiamo concludere che sapendo che la geometria di nostro interesse risultava essere di più lo studio del 1-12 di Girante del compressore centrifugo, le conclusioni da poter riferire all'azienda con cui abbiamo collaborato e lavorato è quella di dover realizzare la struttura di supportazione con celle elementare FCCZ, in quanto ci sono vantaggi in termini di spostamenti, deformazioni e tensioni.

7. Bibliografia e sitografia

- 1) *Tesi di Laurea Magistrale, Stefano d'Accurzio, 2019-2020, "Tecniche e strumenti per la progettazione di supporti nella realizzazione di componenti in additive manufacturing"*.
- 2) *Ansys Help, <https://ansyshelp.ansys.com/>*
- 3) *Tecnologia meccanica, Lezione su Additive Manufacturing di Archimede Forcellese, https://learn.univpm.it/pluginfile.php/392177/mod_resource/content/1/Additive%20manufacturing%202020_21.pdf*
- 4) *Vantaggi e Svantaggi su l'Additive Manufacturing, articolo di Confindustria Veneto SIA S.P.A con la collaborazione di Fondirigenti, [http://www.factoryofknowledge.net/web/fok/contents.nsf/\(\\$linkacross\)/AA6025B5BCE6EC98C1258234002DB7EE/\\$file/5.Scheda%20Stampa3D.pdf?openelement#:~:text=Gli%20svantaggi%20sono%20la%20necessit%C3%A0,limitata%20variet%C3%A0%20di%20materiali%20disponibili.](http://www.factoryofknowledge.net/web/fok/contents.nsf/($linkacross)/AA6025B5BCE6EC98C1258234002DB7EE/$file/5.Scheda%20Stampa3D.pdf?openelement#:~:text=Gli%20svantaggi%20sono%20la%20necessit%C3%A0,limitata%20variet%C3%A0%20di%20materiali%20disponibili.)*
- 5) *Tesi di Laurea Magistrale, Jacopo Carlo Sisti, Marzo 2018, "Effetto dei principali parametri di processo sulla stabilità della pozza fusa durante un processo additivo di una lega di alluminio", <https://webthesis.biblio.polito.it/6918/1/tesi.pdf>*
- 6) *Caratteristiche della superlega di Nichel "Inconel 718", <https://it.wikipedia.org/wiki/Inconel>*
- 7) *Informazioni aggiuntive sulla superlega di Nichel "Inconel 718", <https://www.alloywire.it/products/inconel-718/>*
- 8) *nTopology Support, <https://support.ntopology.com/hc/en-us>*
- 9) *Canale Youtube di nTopology, <https://www.youtube.com/channel/UCvQBakwCIAG2YujJKYIJs7Q>*

Ringraziamenti

Un sincero e doveroso ringraziamento va alla mia famiglia e ai miei parenti, ai professori dell'Università Politecnica delle Marche tra cui il professor Germani, Mandolini, Alberto Santoni e Cicconi che mi hanno dato una mano per la realizzazione di questa tesi e per il completamento dei miei studi.