



Ricerca di Sistema elettrico

Studio sulle tecnologie di fabbricazione additiva dei metalli con fascio laser

Fabrizia Caiazza

Vittorio Alfieri

STUDIO SULLE TECNOLOGIE DI FABBRICAZIONE ADDITIVA DEI METALLI CON FASCIO LASER

Fabrizia Caiazza e Vittorio Alfieri

Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Salerno

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: Materiali di frontiera per usi energetici

Work package: WP3 - Sviluppo dei materiali per Additive Manufacturing, per la produzione di componenti metallici in sostituzione dei prodotti di fonderia

Linea di attività: LA3.18 - Studio sulle tecnologie di fabbricazione additiva dei metalli

Responsabile del Progetto: Daniele Mirabile Gattia

Responsabile del Work package: Daniele Mirabile Gattia

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione ""

Responsabile scientifico ENEA: Daniele Mirabile Gattia

Responsabile scientifico Università degli Studi di Salerno : Prof.ssa Fabrizia Caiazza

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 PRINCIPI DELL'OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA.....	5
2.2 REDESIGN FOR MANUFACTURING.....	6
2.3 SCHEMA LOGICO DI RIPROGETTAZIONE E VERIFICA.....	7
2.4 GENERAZIONE DEI FILE CAD DELLE SCHIUME METALLICHE.....	8
2.5 GENERAZIONE DEI FILE STL.....	11
3 CONCLUSIONI.....	12
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	12

Sommario

Nel periodo in oggetto, il gruppo di ricerca TESEO ha svolto uno studio sulle tecniche di ottimizzazione topologica e sulle geometrie di alleggerimento opportune per i componenti metallici realizzati attraverso fabbricazione additiva con tecnologia a letto di polvere con fascio laser.

Nel contesto dell'ottimizzazione topologica, si è verificato come, attraverso svariati algoritmi basati su opportune funzioni obiettivo, si possa pervenire alla forma geometrica che meglio risponde a determinati requisiti di progetto. Nel rapporto, vengono illustrate le metodologie individuate.

Nel contesto dell'alleggerimento, invece, si è posto particolare interesse sulle caratteristiche delle schiume metalliche. Queste strutture, già largamente utilizzate in aeronautica e biomedicina esibiscono un alto rapporto fra resistenza e peso. Il gruppo di ricerca ha messo in evidenza come l'impiego di schiume metalliche possa consentire l'alleggerimento opportuno di componenti anche per il settore elettrico e come alcuni aspetti delle schiume metalliche risultino maggiormente interessanti rispetto ad altre geometrie di alleggerimento, come per esempio le strutture reticolari oppure quelle a curvatura media costante.

Sulla base di questo, ha stilato una procedura per la determinazione delle coordinate dei livelli di fabbricazione delle schiume; tale procedura va applicata in funzione degli impieghi dei componenti; è stata infine verificata la fattibilità della progettazione finalizzata alla specifica tecnologia di stampa individuata.

1 Introduzione

Nel periodo in oggetto, il gruppo di ricerca TESEO ha svolto uno studio sulle tecniche di ottimizzazione topologica e sulle geometrie di alleggerimento opportune per i componenti metallici realizzati attraverso fabbricazione additiva con tecnologia a letto di polvere con fascio laser [1]. Questa tecnologia consente di raggiungere adeguata accuratezza nella fabbricazione, rispetto ad altre tecniche, come per esempio la deposizione diretta di filo metallico oppure di polvere metallica [2, 3], che per quanto più economiche sono più adeguate alla riparazione e al rivestimento superficiale [4, 5].

Attraverso l'analisi della letteratura disponibile nel settore e attraverso lo studio di vari casi applicativi, si è verificato che gli obiettivi concomitanti di alleggerimento dei componenti e risparmio delle materie prime si possono perseguire attraverso due strade: la prima prevede l'ottimizzazione topologica, la seconda l'alleggerimento delle parti mediante adozione di geometrie di riempimento specifiche; non è da escludersi la possibilità di adottare i due approcci simultaneamente, ovvero fabbricare componenti di forma ottimizzata, con riempimento a trame e geometrie non convenzionali e non massive.

Nel rapporto, vengono illustrate le metodologie individuate. In particolare, con riferimento alle geometrie di alleggerimento, si è posto interesse sulle caratteristiche delle schiume metalliche. Queste strutture, già largamente utilizzate in aeronautica e biomedicina esibiscono un alto rapporto fra resistenza e peso. È opportuno sottolineare che alcuni aspetti delle schiume metalliche risultino maggiormente interessanti rispetto ad altre geometrie di alleggerimento, come per esempio le strutture reticolari [6] oppure quelle a curvatura media costante, che determinano complessità progettuali più spinte, non giustificate se non in applicazioni specifiche come gli innesti ossei o l'assorbimento delle vibrazioni libere.

Tuttavia, la necessità di pori interconnessi e il preciso controllo della frazione di vuoti rendono impraticabile l'utilizzo di tecnologie convenzionali, circostanza che pertanto suggerisce l'impiego di tecnologie innovative come la fabbricazione additiva, per esempio attraverso la tecnica a letto di polvere.

Il gruppo di ricerca, sulla base della ricerca bibliografica, ha messo in evidenza come l'impiego di schiume metalliche possa consentire l'alleggerimento opportuno di componenti anche per il settore elettrico [7], in particolare di qualsiasi componente a geometria complessa, ai fini dell'efficientamento delle prestazioni di scambio termico e raffreddamento.

È opportuno precisare tuttavia che in letteratura si è posta limitata attenzione sulla generazione di schiume metalliche con pori a distribuzione casuale, caratteristica che invece risulta determinante ai fini dell'ottenimento di caratteristiche fisiche e meccaniche isotrope per le applicazioni del progetto [8].

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Principi dell'ottimizzazione topologica

La riprogettazione topologica, oppure ottimizzazione topologica, è una tecnica interdisciplinare che mira a perseguire forme snelle e più efficaci ai fini della resistenza meccanica. Per anni questo approccio è stato seriamente limitato dalle potenzialità delle tecnologie di fabbricazione tradizionali che hanno imposto ostacoli non sormontabili e quindi vincoli sulle forme ottenibili. Con l'avvento della fabbricazione additiva, basata sull'aggiunta di materiale livello per livello, la progettazione si è aperta a nuove configurazioni caratterizzate da personalizzazione e complessità spinte, nelle quali il materiale viene impiegato solo dove necessario, limitando quindi il peso finale del componente e, al tempo stesso, massimizzando alcune funzioni come la resistenza meccanica, per esempio evitando la presenza di zone di intensificazione del coefficiente d'intaglio.

I campi di impiego dell'ottimizzazione topologica strutturale sono innumerevoli, ma quello ingegneristico è senza dubbio il più significativo; in questo settore è infatti fondamentale ottenere elevate prestazioni minimizzando la massa dei componenti. La riprogettazione finalizzata alla fabbricazione additiva quindi ha

preso piede in maniera evidente nell'ingegneria aerospaziale o automobilistica, campi nei quali il favorevole rapporto fra prestazioni e peso è cruciale.

Evidentemente, la riprogettazione non può prescindere dalla verifica di resistenza meccanica, motivo per cui ogni step di ottimizzazione deve necessariamente prevedere una verifica di resistenza opportuna, allo scopo di stabilire se lo stato tensionale dell'elemento da realizzare è tale da provocarne il cedimento, in termini di deformazione plastica oppure rottura, in funzione dell'applicazione. Il problema quindi va impostando correlando i parametri critici del materiale, per esempio la sollecitazione al limite di snervamento o la resistenza a trazione ottenuti attraverso prove monoassiali di trazione o compressione, con la resistenza richiesta all'elemento sulla base dei carichi nominali in gioco, in stato di tensione biassiale o triassiale. Sotto questo aspetto, la letteratura offre diverse soluzioni di criteri di resistenza [9].

2.2 Redesign for manufacturing

Se da un lato la fabbricazione additiva ha aperto alla possibilità di realizzare forme complesse, spingendo la riprogettazione topologica al limite, va anche segnalato che in funzione della tecnica di realizzazione del componente non si può prescindere dalle adeguate verifiche di fabbricabilità. Questo porta alla necessità di definire i principi di *redesign for manufacturing*, che non possono stilarsi in senso assoluto ma vanno riferiti alla tecnologia specifica di fabbricazione.

Poiché lo studio ha individuato come tecnologia più versatile la fabbricazione a letto di polvere con laser, le tecniche di verifiche di fabbricabilità sono state approfondite con riferimento a quest'applicazione specifica e vengono illustrate in sintesi nel prosieguo del rapporto.

Innanzitutto, occorre accertarsi che in funzione della direzione di crescita stabilita, le parti non presentino sottosquadri non autosostenuti; il parametro di riferimento da considerare in questo caso è l'angolo che la faccia presenta rispetto alla piattaforma di costruzione (Figura 1). La soglia critica non è univoca perché dipende dal materiale e dal peso del componente che viene scaricato sulla parte sottostante; laddove la parte non sia autosostenuta, occorre intervenire con la predisposizione di supporti di tenuta che vengono fabbricati con la stessa polvere del componente primario e quindi determinano inevitabilmente uno spreco di materia prima.

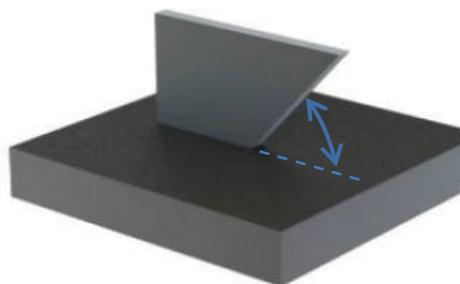


Figura 1. Angolo di inclinazione di sottosquadri rispetto alla piattaforma di costruzione.

Considerazioni analoghe si possono condurre per fori e, più in generale per i vuoti (Figura 2): occorre impiegare supporti interni laddove la forma oppure la massa da sostenere non siano compatibili con la resistenza offerta automaticamente dal componente. Tali osservazioni risultano cruciali per il prosieguo, ovvero per l'applicazione delle geometrie di alleggerimento, che inevitabilmente producono vuoti interni alla struttura.



Figura 2. Elementi di supporto per il sostegno di vuoti.

Infine, si tenga anche presente che l'assenza di supporti determina comunque una superficie non omogenea, per via del contatto diretto con la polvere non fusa: in effetti, il metallo che viene fuso dal laser penetra per capillarità nell'intercapedine offerta fra granelli di polvere adiacenti, per cui il risultato è la presenza di una bava (Figura 3) che va rimossa con operazioni post processo al termine della fabbricazione.

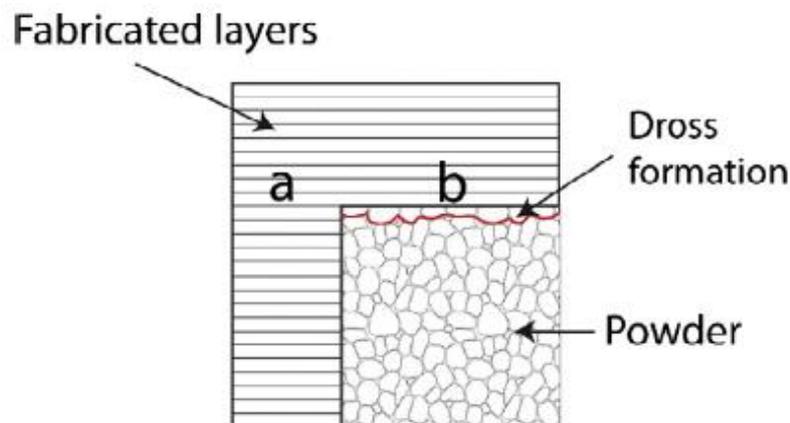


Figura 3. Formazione di bave sulle superfici non supportate, a diretto contatto con la polvere non fusa.

2.3 Schema logico di riprogettazione e verifica

Sulla base di quanto esposto, è possibile dare uno schema logico di guida per il progettista nella fase di riprogettazione topologica (Figura 4). In particolare, si noti che a partire dal componente originale, il redesign può prevedere sia l'alleggerimento, con tecniche che vengono approfondite nella seconda parte di questo rapporto, sia l'ottimizzazione topologica.

A seguito del redesign è d'obbligo il primo test di carico: in caso di esito negativo è necessario rivedere la riprogettazione, in caso di esito positivo è concesso proseguire con il diagramma di flusso provvedendo al redesign for manufacturing, in funzione della tecnica di fabbricazione prescelta; dopodiché va pianificata la lavorazione impostando i parametri di processo opportuni; si noti che in questa fase, al fine di assolvere ai vincoli tecnici di fabbricazione, può essere necessario un secondo test di carico laddove si sia intervenuti su caratteristiche geometriche determinanti ai fini della resistenza del componente.

Per completezza, si fa presente che in caso di errori di fabbricazione, ovvero stop del processo di costruzioni o collasso del componente, la riprogettazione va rivista. Ad ogni modo, al termine della fabbricazione, è necessario procedere con metodi di miglioramento della qualità superficiale ed eventuali trattamenti termici, operazioni non evitabili, che allo stato attuale costituiscono una delle ragioni di dilatazione del lead time nelle tecnologie di fabbricazione additiva.

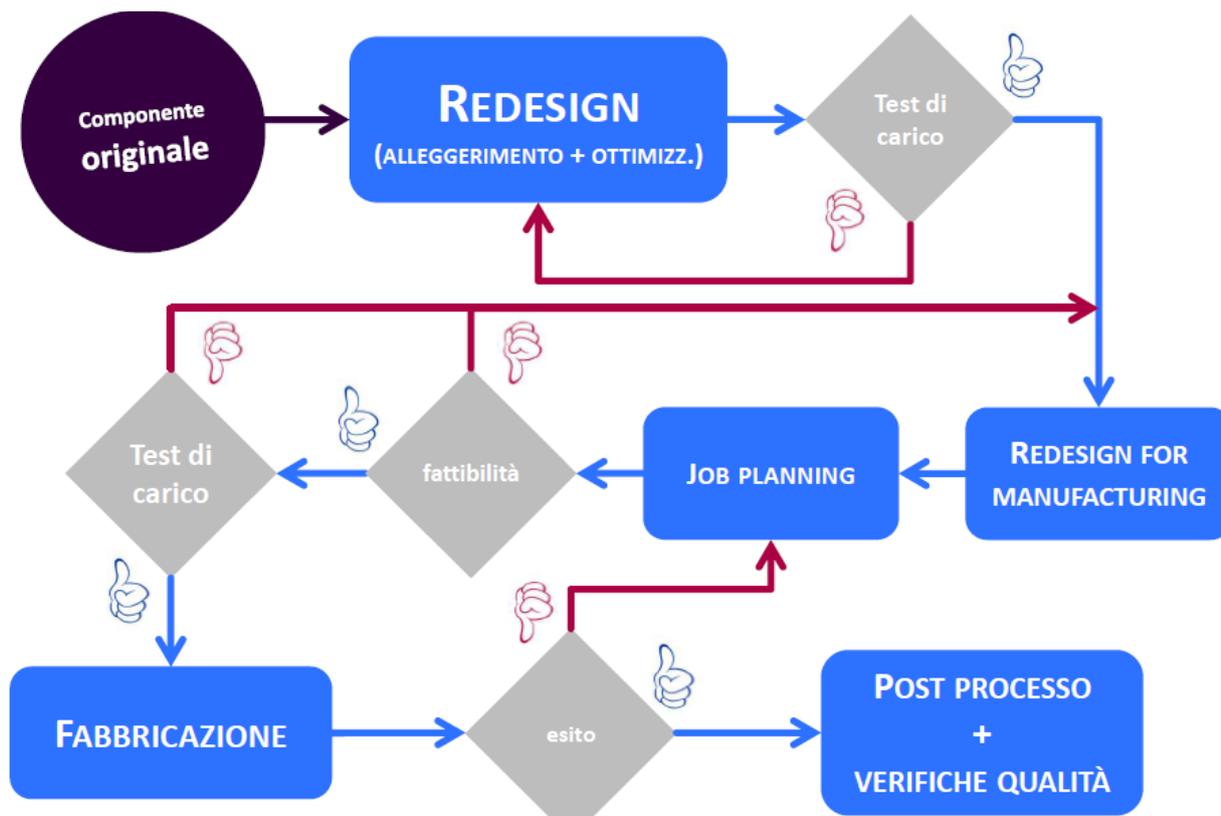


Figura 4. Diagramma di flusso per la riprogettazione e la verifica topologica

2.4 Generazione dei file CAD delle schiume metalliche

La letteratura offre diverse soluzioni per l'alleggerimento delle masse, ovvero diverse geometrie di riempimento fattibili attraverso la fabbricazione additiva a letto di polvere con laser [6], per esempio le strutture reticolari di varia geometria (Figura 5) e quelle a curvatura media costante, per esempio i giroidi (Figura 6), che determinano tuttavia complessità progettuali spinte, non giustificate se non in applicazioni specifiche come gli innesti ossei o l'assorbimento delle vibrazioni libere.

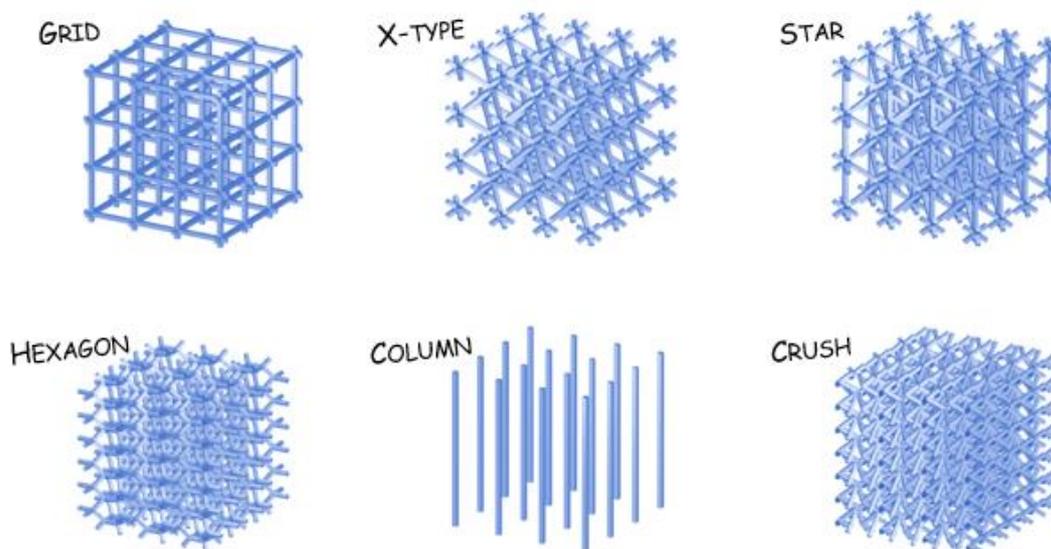


Figura 5. Strutture reticolari a varia geometria.

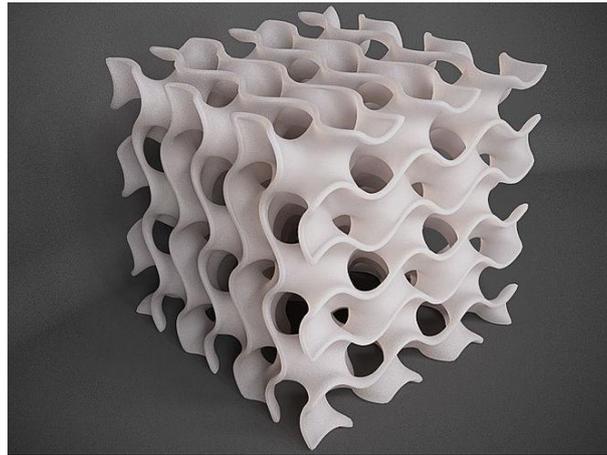


Figura 6. Esempio di struttura giroide.

Per questo motivo, le schiume metalliche sono state selezionate per il prosieguo dello studio. Esse, per via della distribuzione casuale dei pori, hanno comunque una geometria interna alquanto complessa; sono presenti infatti pareti di spessore molto sottile e volume vuoto nell'ordine del 90%. Di conseguenza, la fabbricazione attraverso tecniche additive è una sfida con altissima probabilità di generazione di componenti difettosi. Pertanto, è stata elaborata dal gruppo di ricerca una strategia opportuna basata sulle regole del processo di fabbricazione additiva a letto di polvere con fascio laser. In particolare, si richiede:

- Interconnessione dei pori (Figura 7) ai fini dell'estrazione della polvere non sinterizzata dopo la lavorazione;
- Minima frazione solida per prevenire il collasso della struttura su ogni livello di fabbricazione,
- Minimo spessore di parete compatibile con le dimensioni effettive del diametro di solidificazione.

Con riferimento all'ultimo punto, inoltre, si precisa che da studi di ottimizzazione e set-up della lavorazione è emerso che il diametro effettivo di solidificazione, ovvero il diametro reale di lavoro del fascio laser, risulta incrementato di una percentuale variabile in funzione della velocità di scansione, rispetto al diametro teorico del fascio laser, per effetto dei fenomeni di conduzione che si verificano in camera di lavoro fra granelli adiacenti di polvere e che non sono trascurabili.

Emerge quindi la necessità di un compromesso tecnico fra secondo e terzo requisito funzionale, affinché la lavorazione sia fattibile e la schiuma generata sia effettivamente utilizzabile.

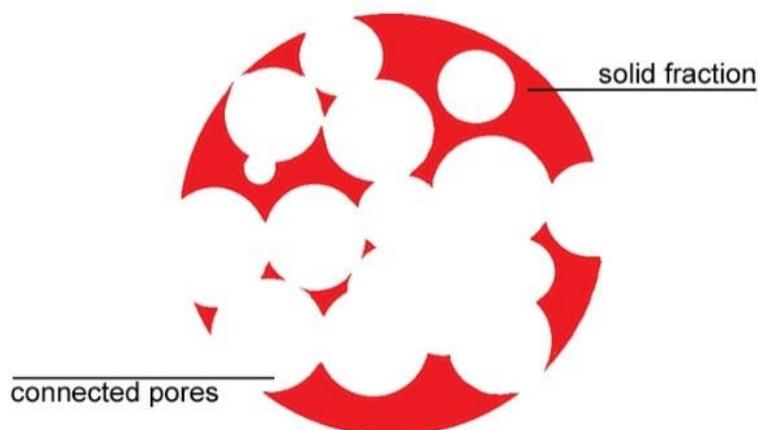


Figura 7. Sezione trasversale di una schiuma metallica con pori interconnessi e frazione di vuoto.

Una progettazione opportuna di una schiuma metallica deve consentire all'utente di impostare la dimensione dei pori richiesta ai fini delle caratteristiche fisiche e meccaniche necessarie alle applicazioni, da determinarsi eventualmente sulla base di simulazioni a corredo della progettazione. Questo impatta direttamente sulla densità frazionaria risultante della schiuma, tuttavia la progettazione deve essere compatibile con le caratteristiche costruttive della macchina di fabbricazione additiva.

In generale, la costruzione di campioni di schiume metalliche si basa sulla generazione preliminare di immagini bidimensionali o tridimensionali. L'idea suggerita dal gruppo di ricerca è determinare il file CAD nella stessa maniera in cui il prodotto deve essere realizzato, ovvero attraverso la sovrapposizione tridimensionale di più livelli, per ciascuno dei quali si proceda alla verifica dei requisiti di progetto individuati precedentemente.

Il numero totale dei livelli da modellare dipende chiaramente dall'altezza del componente da realizzare, ma è opportuno precisare che un numero elevato di livelli potrebbe risultare ingestibile al calcolatore, per via dell'elevata quantità di punti coinvolti. All'interno di ciascun livello, viene generata infatti una nuvola di punti in modo casuale (Figura 8); intorno a ciascun punto viene generata una sfera (Figura 9) il cui diametro varia nel range assegnato dal progettista, secondo una distribuzione normale, nel rispetto dei requisiti funzionali. Infine, ogni sfera viene chiaramente convertita in un vuoto, ovvero viene generato il componente complementare per inversione delle masse (Figura 10).

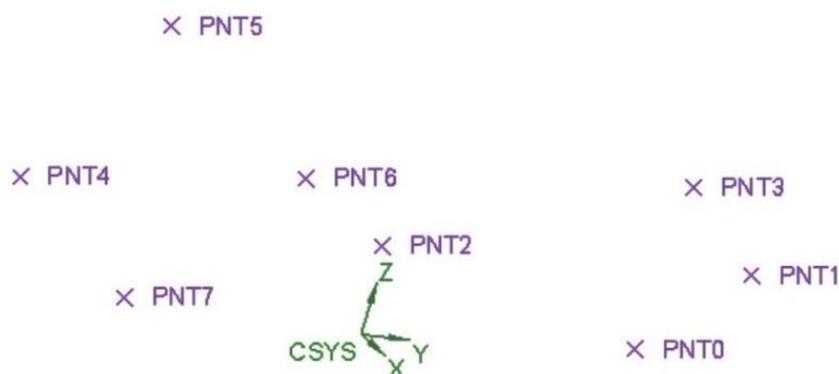


Figura 8. Generazione casuale di punti all'interno del generico livello.

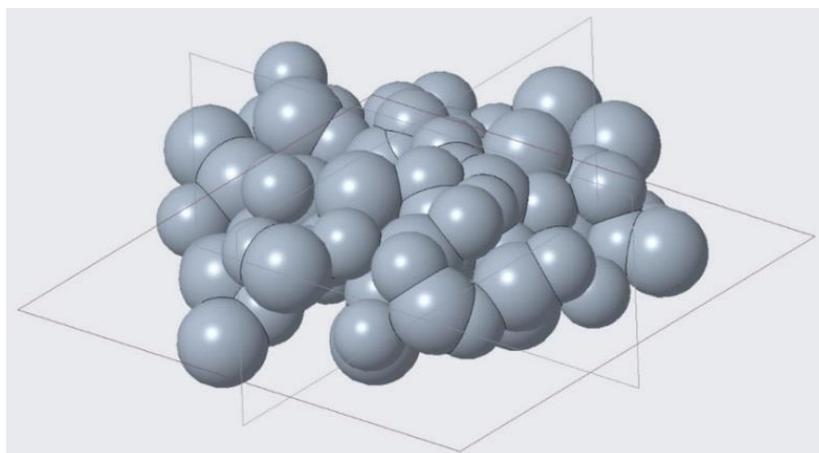


Figura 9. Generazione di sfere a diametro casuale intorno a ciascun punto.

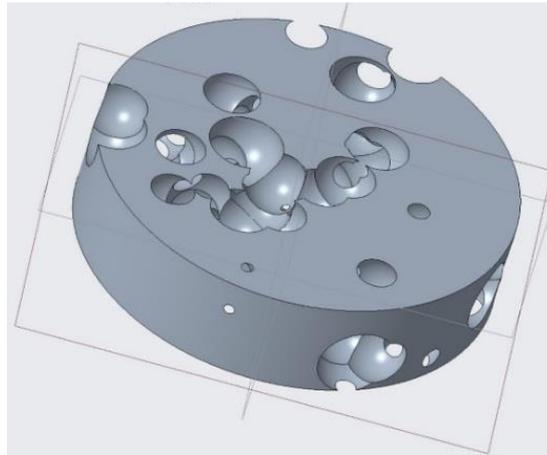


Figura 10. Generazione dei pori, ovvero inversione delle masse rispetto alla generazione delle sfere.

Se la condizione di interconnessione viene rispettata, allora è possibile procedere alla generazione del livello successivo; altrimenti, il livello deve essere rigenerato ovvero occorre rigenerare nuovamente la nuvola di punti, poi le sfere e poi i pori. Quest'approccio deve essere seguito livello per livello fino alla generazione del file CAD da mandare in stampa, ovvero fino alla generazione del componente opportunamente alleggerito, da stamparsi attraverso tecnologia additiva a letto di polvere con fascio laser.

2.5 Generazione dei file STL

Una volta ottenuto il file CAD, è necessario procedere con la generazione di un file in estensione stl affinché la macchina di sinterizzazione laser possa gestirlo. Il gruppo di ricerca ha potuto sperimentare che l'approccio normalmente utilizzato in fase di progettazione di lavorazioni additive, ovvero la triangolarizzazione delle superfici, nel caso delle schiume può condurre ad anomalie che necessitano opportuni accorgimenti di correzione, per via della complessità delle geometrie. Molti nodi, tuttavia, sono superflui e possono essere rimossi.

A questo scopo, il gruppo ha valutato diverse possibilità automatiche di semplificazione delle geometrie ovvero della nuvola di punti (Figura 11). Quello che si ritiene più appropriato è l'approccio di Pauly, già descritto adeguatamente in letteratura per strutture diverse dalle schiume a pori casuali. L'approccio si è rivelato adeguato anche per queste applicazioni e la riduzione del numero dei punti della nuvola non ha determinato riduzione di precisione del modello analitico da mandare in stampa. Si è beneficiato, invece, di una notevole semplificazione con impatto positivo anche sulla gestione del file.

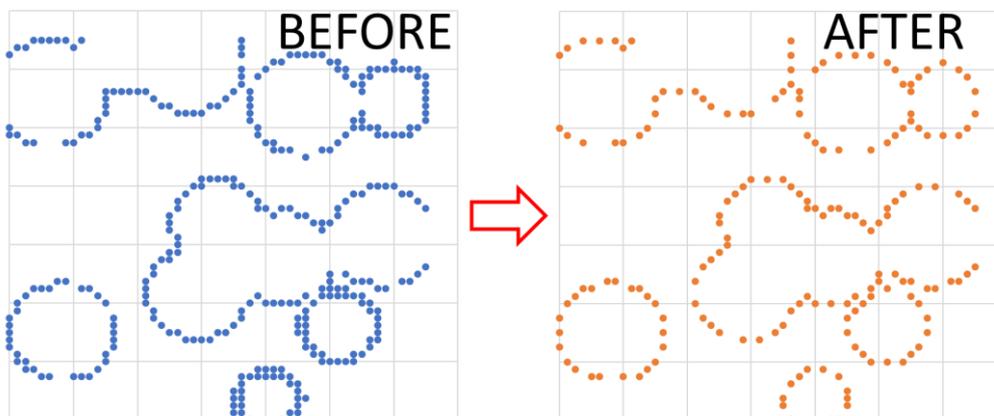


Figura 11. Semplificazione della nuvola di punti con approccio di Pauly.

Sulla nuvola di punti che risulta, livello per livello, dall'applicazione dell'approccio di Pauly, si procede con le tecniche convenzionali di triangolarizzazione. Si è notata in questa fase la comparsa di difetti di triangoli distorti, ovvero di segmenti perimetrici non condivisi e non sovrapposti, con violazione del principio di solido legale; queste anomalie tuttavia sono agevolmente risolvibili attraverso usuali software di part-fixing, ovvero software che intervengono localmente sulla geometria anche in termini di gusci non perfettamente sovrapposti oppure di normali invertite.

A questo punto, il file generato viene riconvertito in livelli: è opportuno precisare che lo spessore dei livelli di progettazione rappresenta un concetto diverso dallo spessore di lavorazione che è una funzione dell'accuratezza della macchina e della distribuzione granulometrica della polvere metallica impiegata come materia prima. In questa fase si è reso necessario intervenire occasionalmente con ulteriori azioni ai fini della fabbricabilità del componente: infatti, per ciascun livello, lo spessore di parete ovvero il gap fra pori adiacenti (Figura 12), deve rispettare la dimensione minima concessa dalla macchina, ovvero non può essere inferiore al diametro reale di lavoro. Se la condizione non viene rispettata, è necessario intervenire localmente maggiorando lo spessore, il che comporta obbligatoriamente un nuovo controllo anche per il rispetto degli altri requisiti funzionali.

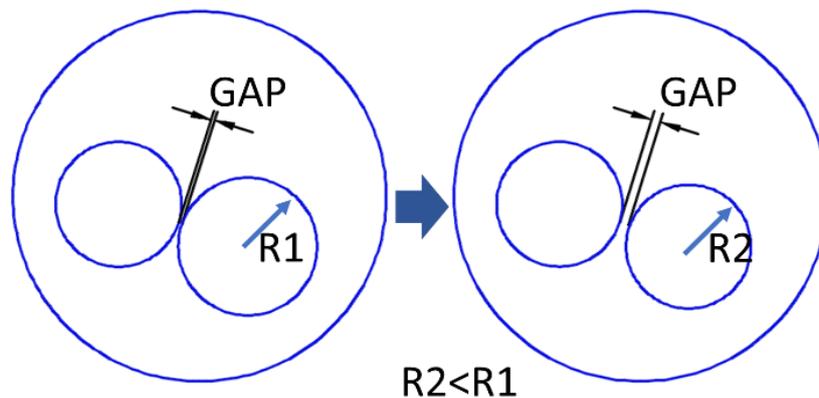


Figura 12. Gap fra pori adiacenti.

3 Conclusioni

Nel prosieguo delle attività svolte dal gruppo di ricerca si prevede di applicare i principi esposti in questo rapporto tecnico, per la fabbricazione di campioni, nonché per l'alleggerimento di componenti specifici, anche sulla base delle indicazioni degli altri partner coinvolti nel progetto.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] F. Caiazzo, V. Alfieri, G. Corrado e P. Argenio, «Laser powder-bed fusion of Inconel 718 to manufacture turbine blades,» *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology* , vol. 93, p. 4023–4031, 2017.
- [2] F. Caiazzo, «Additive manufacturing by means of laser-aided directed metal deposition of titanium wire,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 96, p. 2699–2707, 2018.
- [3] W. Syed, A. Pinkerton e L. Li, «Combining wire and coaxial powder feeding in laser direct metal deposition for rapid prototyping,» *Applied Surface Science*, vol. 252, n. 4803–4808, 2006.
- [4] A. Garcia-Colomo, D. Wood, F. Martina e S. Williams, «A comparison framework to support the selection

of the best additive manufacturing process for specific aerospace applications,» *International Journal of Rapid Manufacturing*, vol. 9, n. 3, 2019.

- [5] I. Paoletti, «Mass customization with Additive Manufacturing: new perspectives for multi performative building components in architecture,» *Procedia Engineering*, vol. 180, pp. 1150-1159, 2017.
- [6] L. Hao, D. Raymont, C. Yan, A. Hussein e P. Young, «Design and additive manufacturing of cellular lattice structures,» in *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping*, CRC Press, 2012, pp. 249-254.
- [7] D. Usera, V. Alfieri, F. Caiazza, P. Argenio, G. Corrado e E. Ares, «Redesign and manufacturing of a metal towing hook via laser additive manufacturing with powder bed,» *Procedia Manufacturing*, vol. 13, pp. 825-832, 2017.
- [8] H. Wang, S. Zhang e X. Wang, «Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components,» *Chinese Journal of Lasers*, vol. 36, n. 12, pp. 3204-3209, 2009.
- [9] L. Vergani, *Meccanica dei Materiali*, Milano: McGraw-Hill, 2006.

Fabrizia Caiazzo è Professore Associato del settore scientifico disciplinare ING-IND/16 Tecnologie e Sistemi di Lavorazione. I principali temi di ricerca svolti riguardano: sviluppo di tecniche innovative per l'analisi quantitativa dei sistemi di produzione; qualità nelle misure in produzione effettuate con macchina di misura a coordinate; lavorazioni di sinterizzazione laser di polveri metalliche; lavorazioni mediante laser. L'attività scientifica è stata svolta, per tutti i temi trattati, nell'ambito di progetti di ricerca coordinati con altre sedi universitarie, supportati da contratti del MIUR e da collaborazioni con Enti di Ricerca (ENEA, Consorzio CALEF, CIRA Centro Italiano Ricerche Aerospaziali) e aziende (Alenia Aermacchi S.p.A., Avio S.p.A, EMA Europea Microfusioni Aerospaziali S.p.A). E' stata responsabile scientifico di un progetto di ricerca, finalizzato dalla Regione Campania sull' "Integrazione in un sistema di produzione di una macchina di misura a coordinate per il miglioramento della qualità dei prodotti". Attualmente partecipa ai Progetti di ricerca: PON01_01269 ELIOS Emergent Laser fiber Optic welded Structures capofila CALEF, PON_01_00895 LABREP Laboratorio sul repair capofila Avio S.p.A Brindisi e PON_a3_00007 NAFASSY NAtional FACility for Superconducting Systems capofila Università di Salerno ed è responsabile di un assegno di ricerca nell'ambito della area scientifica "Proprietà meccaniche dei materiali". E' responsabile dei progetti di ricerca PON02_00609 DAC Distretto Aerospaziale Campano Progetto Sifurtec capofila Alenia Aermacchi S.p.A. e PON02_00040 RITAM Ricerca su Tecnologie Avanzate per Motori capofila EMA S.p.A. Nel 2012 ha brevettato un nuovo apparato automatizzato di saldatura laser.

Vittorio Alfieri è Ricercatore al Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Salerno. Ha conseguito con lode la Laurea Specialistica in Ingegneria Meccanica nel 2009 e il titolo di Dottore di ricerca in Ingegneria ed Economia dell'Innovazione nel 2013, è risultato vincitore di Borse di studio e Assegni di Ricerca inerenti le tematiche del settore scientifico disciplinare Tecnologie e Sistemi di Lavorazione. Ha discusso i suoi lavori a congressi scientifici internazionali, nel 2011 ha ricevuto a Bratislava il premio World Association for Innovative Technologies Award per trasferimento tecnologico. Svolge attività di docenza anche per corsi di formazione professionali, è revisore di articoli scientifici per la rivista Materials & Design edita da Elsevier; è membro dell'AITeM (Associazione Italiana delle Tecnologie Manifatturiere). L'attività di ricerca riguarda i processi speciali con fascio laser, saldatura, taglio, foratura e fabbricazione additiva; è documentata da numerose pubblicazioni su riviste internazionali con referee.