



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica LM-33

Tesi di laurea in

***PROGETTAZIONE MECCANICA DI SCAMBIATORI DI CALORE
AVANZATI REALIZZATI IN ADDITIVE MANUFACTURING:
STRUTTURA LATTICE TPMS***

Relatore:

Prof.ssa Cristiana Delprete

Candidato:

Giuseppe Di Matteo
S314425

Correlatori:

Prof.ssa Chiara Gastaldi

Ing. Luca Cibrario

A.A 2024/2025

“Believe you can and you’re halfway there”

T.R.

Abstract

Nel seguente lavoro di tesi viene proposta un'analisi circa la progettazione meccanica di scambiatori di calore avanzati realizzati in Additive Manufacturing caratterizzati da strutture a superficie minima tripla periodica (TPMS), analizzandone i punti di forza e gli sviluppi futuri. Nel dettaglio, tramite una ricerca spinta riguardo i recenti studi e prove sperimentali condotti sulle strutture reticolari "lattice", è stato redatto un articolo in grado di offrire una panoramica completa dell'argomento, dalle tecniche di fabbricazione utili per la realizzazione delle nuove strutture reticolari, ai test necessari per determinarne le proprietà meccaniche e di scambio termico. Viene proposto, infine, un approfondimento riguardo i risultati ottenuti e gli sviluppi futuri di tali strutture nel campo delle applicazioni che riguardano lo scambio termico, per la realizzazione di scambiatori di calore avanzati: più compatti, più performanti e più efficienti.

Sommario

1	L'ADDITIVE MANUFACTURING	1
1.1	Introduzione.....	1
1.2	Materiali per la fabbricazione additiva	1
1.3	Proprietà e tecniche di fabbricazione additiva.....	2
1.4	Applicazioni.....	3
2	STRUTTURE RETICOLARI “LATTICE”	5
2.1	Introduzione.....	5
2.2	Classificazione e tipologie di strutture reticolari	5
2.3	Progettazione, modellazione e ottimizzazione delle strutture Lattice.....	7
2.4	La fabbricazione additiva per le strutture Lattice	8
2.4.1	Selective Laser Melting	9
2.4.2	Difetti comuni nei componenti stampati in AM	9
2.5	Proprietà e applicazioni delle strutture Lattice	11
3	STRUTTURE A SUPERFICIE MINIMA TRIPLA PERIODICA (TPMS).....	13
3.1	Le strutture reticolari TPMS.....	13
3.1.1	Primitive	16
3.1.2	Diamond	18
3.1.3	Gyroid.....	20
3.1.4	I-WP.....	21
3.2	Proprietà.....	23
3.2.1	Rugosità superficiale	24
3.2.2	Tensioni residue e distorsione	27
3.2.3	Inaccuratezza dimensionale.....	27
4	SCAMBIATORI DI CALORE AVANZATI IN STRUTTURA LATTICE TPMS	28
4.1	Introduzione agli scambiatori di calore	28
4.2	Tecnologia	29
4.3	Analisi dei fattori di cedimento degli scambiatori di calore	29
4.3.1	Colpi d'ariete e onde di pressione.....	30
4.3.2	Fouling e incrostazioni.....	30
4.3.3	Sollecitazioni termiche e meccaniche: fenomeno del Creep e della Fatica	30
4.3.4	Erosione e vibrazioni meccaniche	31
4.4	Scambiatori di calore con strutture TPMS.....	31
5	PROGETTAZIONE E INTEGRITA' STRUTTURALE	34

5.1	Introduzione.....	34
5.2	Analisi delle curve sforzo-deformazione.....	35
5.2.1	Spessore della parete	37
5.2.2	Densità relativa.....	39
5.2.3	Porosità.....	40
5.2.4	Residui di polvere.....	40
5.2.5	Dimensioni della cella unitaria.....	40
5.3	Test per la determinazione delle proprietà meccaniche.....	41
5.3.1	Modelli predittivi basati sull'intelligenza artificiale.....	42
5.3.2	L'anisotropia nelle strutture reticolari TPMS.....	42
5.3.3	Meccanismi di deformazione.....	46
5.3.4	Risposta alle sollecitazioni impulsive.....	47
5.3.5	Resistenza a fatica e durabilità	50
5.3.6	Prestazioni energetiche e capacità di smorzamento.....	54
5.4	Analisi numerica e ottimizzazione dei modelli	57
5.5	Materiali	61
5.5.1	Strutture ibride.....	64
5.5.2	Strutture "meta-materiali"	65
6	PROPRIETA' DI SCAMBIO TERMICO.....	69
6.1	Introduzione.....	69
6.2	Test per la determinazione delle proprietà termiche.....	72
6.3	Influenza dei parametri geometrici e del fluido sulle prestazioni.....	81
6.3.1	Diametro idraulico e dimensioni della cella	82
6.3.2	Spessore della parete	82
6.3.3	Porosità.....	83
6.3.4	Fluido di lavoro	84
6.4	Validazione sperimentale	84
6.5	Design avanzati e ottimizzazione	85
7	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	94
7.1	Mercato degli scambiatori di calore in struttura Lattice TPMS	94
7.2	Sfide e sviluppi delle strutture reticolari TPMS	94
7.3	Sfide e sviluppi futuri per gli scambiatori di calore in struttura Lattice TPMS.....	96
7.4	Metodologia.....	97
	Riferimenti	129

1 L'ADDITIVE MANUFACTURING

1.1 Introduzione

L'Additive Manufacturing è una tecnologia di produzione innovativa che consente la realizzazione di oggetti con geometria anche piuttosto complessa a partire da un modello matematico dell'oggetto, precedentemente realizzato su un software CAD 3D. Questo processo si differenzia dalla manifattura tradizionale poiché il prodotto finale è ottenuto mediante deposizione di materiale, strato su strato, anziché sulla sottrazione di materiale come avviene nei normali processi di tornitura o fresatura. In questo modo si realizza un pezzo riducendo gli sprechi di materiale e consentendo la produzione di geometrie altrimenti impossibili da ottenere. Lo standard universale utilizzato nella fabbricazione additiva è il formato STL, *Standard Triangulation Language*, in cui il modello CAD 3D è convertito in un modello "shell" caratterizzato da una superficie esterna approssimata attraverso triangoli di diverse dimensioni. Le dimensioni dei triangoli varia a seconda della risoluzione richiesta, in modo da seguire il profilo del modello da realizzare. Attualmente, i materiali utilizzati sono suddivisi in: metalli, polimeri e materiali emergenti[1].

I principali vantaggi legati a questo processo di produzione riguardano:

- Rapidità e libertà di prototipazione
- Riduzione degli scarti rispetto ai metodi tradizionali
- Alto grado di personalizzazione e geometrie complesse
- Applicazioni valide in diversi settori: medicina, aerospaziale, automotive, moda e design

1.2 Materiali per la fabbricazione additiva

Nella fabbricazione additiva è possibile utilizzare una vasta gamma di materiali, ciascuno dei quali può essere processato appositamente mediante tecniche specifiche. I materiali impiegati sono in grado di offrire prestazioni differenti, a seconda dell'applicazione dell'oggetto finale da realizzare. Pertanto, a seconda della natura del materiale, si utilizzano: polimeri termoplastici, materiali metallici, resine fotopolimeriche, materiali compositi.

Le tecnologie AM consentono la realizzazione di design innovativi attraverso la deposizione controllata di materiali nuovi, come superleghe metalliche e a base di nichel. In questo modo si riesce ad ottenere una riduzione del numero di passaggi di produzione, minimizzando lo spreco di materiale rispetto ai metodi di fabbricazione tradizionale [2]. Nella *tabella 1* che segue sono riassunti i principali materiali e le rispettive proprietà.

POLIMERI TERMOPLASTICI	
Acido Polilattico (PLA)	Biodegradabile, economico e facile da stampare. Utilizzato prevalentemente per prototipi estetici
Acrilonitrile Butadiene Stirene (ABS)	Offre maggiore resistenza agli urti e alle alte temperature
Poliammide (Nylon)	Flessibile, resistente all'usura e agli agenti chimici, impiegato in componenti funzionali e meccanici
Polietilene Tereftalato Glicole (PETG)	Materiale con buona resistenza meccanica e chimica, adatto per applicazioni che richiedono durabilità
Poliuretano Termoplastico (TPU)	Materiale flessibile, simile alla gomma, utilizzato per componenti elastici e resistenti all'impatto
METALLI	
Acciaio INOX	Elevata resistenza alla corrosione e alle alte temperature, impiegato nell'industria medica e automobilistica
Alluminio	Leggero e resistente, ideale per componenti strutturali in ambito aerospaziale e automobilistico
Titanio	Materiale biocompatibile con elevata resistenza meccanica, utilizzato in impianti medicali e aerospaziali
Leghe di Nichel	Resistenti alle alte temperature e alla corrosione, utilizzate in turbine e impianti industriali
RESINE FOTOPOLIMERICHE	
Standard	Offrono elevata precisione e superfici lisce, ideali per prototipi estetici
Ad alte prestazioni	Resine con proprietà specifiche come resistenza al calore, flessibilità o biocompatibilità
MATERIALI COMPOSITI	
Polimeri rinforzati con fibre di carbonio	Alta resistenza e leggerezza, utilizzati in applicazioni aerospaziali e automobilistiche
Polimeri rinforzati con fibre di vetro	Maggiore rigidità e resistenza all'usura rispetto ai polimeri standard

Tabella 1: Riepilogo materiali e proprietà

1.3 Proprietà e tecniche di fabbricazione additiva

Nell'ambito dell'ingegneria meccanica e dei materiali sono state sviluppate diverse tecniche di fabbricazione additiva, con l'obiettivo futuro di promuovere una produzione spinta su larga scala. I componenti realizzati mediante AM devono possedere caratteristiche che ne consentano e giustifichino l'utilizzo in sostituzione dei dispositivi tradizionali. Pertanto, a seconda del campo di applicazione, il componente realizzato in stampa 3D deve presentare:

- *Resistenza Meccanica*: determina la capacità del materiale di sopportare carichi senza deformarsi o rompersi

- *Resistenza Termica*: indica la stabilità del materiale alle alte temperature
- *Biocompatibilità*: fondamentale per applicazioni mediche come protesi e impianti
- *Flessibilità*: importante per componenti elastici o soggetti a deformazioni
- *Resistenza Chimica*: necessaria per materiali esposti a sostanze ed ambienti aggressivi

Tuttavia, i prodotti finali non sono completamente esenti da difetti, sia interni che esterni. La microstruttura può essere influenzata da porosità e tensioni residue, che ne riducono la resistenza meccanica se non adeguatamente controllata. La finitura superficiale, invece, è influenzata dalla rugosità e dalla precisione delle attrezzature, che possono determinare uno scostamento dalle tolleranze dimensionali richieste dalle specifiche applicazioni.

Nella *tabella 2* sono riassunte le principali caratteristiche dei processi utilizzati.

Tecnica	Principio	Materiali	Vantaggi	Limiti
Fused Deposition Modeling (FDM)	Estrusione di filamenti termoplastici riscaldato che si deposita strato su strato	ABS, PLA, PETG, TPU, materiali compositi	Basso costo, disponibilità elevata di materiali	Elevata rugosità superficiale, anisotropia
Selective Laser Sintering (SLS)	Laser che sinterizza e fonde localmente polveri termoplastiche	PA12, TPU, materiali caricati (alluminio, carbonio)	Elevata resistenza meccanica, buona finitura superficiale, assenza supporti	Costi elevati, necessità di post-processing
Stereolithography (SLA)	Polimerizzazione di resine fotosensibili mediante luce UV	Resine acriliche, materiali biocompatibili	Alta precisione, eccellente finitura superficiale	Fragilità dei pezzi realizzati, resistenza meccanica limitata
Selective Laser Melting (SLM)	Fusione completa mediante laser ad alta potenza	Leghe di alluminio (AlSi10Mg), acciai (316L, 17-4PH), titanio (Ti6Al4V), superleghe (inconel)	Componenti metallici ad alta resistenza, possibilità di realizzare superfici complesse	Costi elevati, necessità di trattamenti termici post-stampa
Electron Beam Melting (EBM)	Fusione completa mediante fascio di elettroni	Titanio, cobalto-cromo, acciai ad alta resistenza	Minori tensioni residue, minor tempo di realizzazione prodotto	Elevati costi dei macchinari, risoluzione limitata

Tabella 2: Riepilogo tecniche di fabbricazione additiva

1.4 Applicazioni

La varietà di materiali utilizzabili, le geometrie complesse ottimizzate e possibilità di personalizzare il design, consente l'applicazione dei prodotti dell'AM in numerosi settori ingegneristici. In campo automotive ed aerospaziale, la ricerca prosegue nella produzione e nell'integrazione di componenti leggeri e resistenti in metallo o polimeri avanzati, al fine di migliorare le prestazioni delle strutture. In particolare [2] :

- *Aerospace*: le tecnologie AM sono particolarmente rilevanti grazie alla loro efficienza meccanica per sistemi leggeri e ad alta resistenza. Tramite FDM vengono stampati ali e

fusoliere per piccoli veicoli aerei senza pilota (UAV) grazie al basso costo e all'alta velocità di stampa. Gli sviluppi più recenti in materia aerospaziale riguardano la possibilità di integrare l'Additive Manufacturing per la realizzazione di microsattelliti e scudi termici. Inoltre, risulterebbe particolarmente adatta per la colonizzazione di altri pianeti, come Marte, poiché consentirebbe l'uso di risorse localizzate per la costruzione, riducendo la necessità di trasporto spaziale.

- *Automotive*: il settore automobilistico si sta evolvendo nelle applicazioni della stampa 3D per la prototipazione rapida, la creazione di utensili e la produzione di componenti finiti. Con la fabbricazione additiva si riduce tempo e si risparmia nei costi legati alla prototipazione. Tramite FDM si realizzano prototipi rapidi di utensili per la lavorazione di parti automobilistiche (come utensili per trafilatura profonda). Inoltre, l'AM contribuisce alla sostenibilità promuovendo un'economia circolare per i rottami metallici. Le applicazioni più comuni nel settore riguardano strutture a reticolo in grado di proteggere i pacchi batteria dai carichi di impatto e migliorare la resistenza agli urti del veicolo e ottimizzare topologicamente parti come i bracci di sospensione in modo da ridurre notevolmente il peso.
- *Biomedico*: in ambito biomedico l'Additive Manufacturing trova un forte riscontro grazie alla possibilità di ottenere geometrie personalizzabili, che consentono la progettazione e la fabbricazione di parti, come protesi, su misura per i pazienti. Le soluzioni ortopediche beneficiano dell'ingegneria computazionale per configurare le strutture in funzione delle esigenze uniche del paziente, riducendo il lavoro e migliorando l'adattamento. Per le applicazioni di medicina rigenerativa, è possibile creare scaffold tissutali, meccanicamente efficienti e personalizzabili.
- *Robotica*: anche nel settore della robotica, la fabbricazione additiva trova impiego per la realizzazione di "robot morbidi" in materiali come fluidi, gel e polimeri funzionali, caratterizzati da grandi deformazioni. L'AM ne consente una realizzazione più veloce e affidabile. Nella chirurgia, la possibilità di ricreare la percezione tattile mediante sensori di pressione morbidi stampati in AM ha consentito la prototipazione di robot chirurgici per il trattamento di lesioni cerebrali.

2 STRUTTURE RETICOLARI “LATTICE”

2.1 Introduzione

Grazie al continuo progresso dell'Additive Manufacturing, negli ultimi anni è stato possibile realizzare nuove strutture con geometrie estremamente complesse e altrimenti impossibili da ottenere mediante i tradizionali metodi di produzione. In tal senso, ha preso sempre più piede la realizzazione di strutture reticolari “Lattice”: architetture complesse caratterizzate da una geometria interna formata da celle unitarie disposte e connesse tra loro tramite barre o superfici in sezioni ripetibili, formando un insieme integrato. L'interesse verso tali configurazioni deriva dal fatto che sono capaci di coniugare leggerezza e resistenza, rendendole in grado di ricoprire diversi ruoli per applicazioni in ambito ingegneristico, soprattutto nell'automotive, aerospace e biomedico. Presentano una vasta gamma di proprietà, tra le quali: elevato rapporto rigidità-peso, dissipazione del calore e capacità di assorbimento di energia meccanica. Inoltre, le proprietà meccaniche e fisiche delle strutture in lattice dipendono strettamente da quelle del materiale di base e dalle loro caratteristiche geometriche, come le dimensioni delle celle, la topologia e la densità relativa [3].

2.2 Classificazione e tipologie di strutture reticolari

Le strutture reticolari possono essere classificate in base al design della cella unitaria, che ne determina le proprietà meccaniche, la resistenza e, di conseguenza, i potenziali campi di applicazione. Di seguito sono presentate le principali tipologie:

- *Strut-based*: comunemente note come materiali a telaio reticolare, sono tra le più diffuse e generalmente vengono create mediante l'utilizzo di un software CAD. Sono composte da una rete di nodi (*vertici*) connessi tra loro mediante barre (*struts*), formando geometrie come celle cubiche, ottaedriche o tetraedriche. Le proprietà meccaniche, tra cui rigidità, resistenza e assorbimento di energia, sono strettamente legate alle dimensioni geometriche (spessore barre), alla forma e alla disposizione spaziale delle celle unitarie [4]. L'utilizzo di queste strutture è particolarmente adatto per applicazioni in cui è richiesto un elevato rapporto resistenza/peso, come componenti aerospaziali o impianti biomedicali. Tuttavia, la presenza di giunzioni nodali può amplificare la concentrazione di tensione, limitandone le prestazioni in condizioni di carico ciclico.
- *Strutture TPMS*: rappresentano una soluzione avanzata per applicazioni che richiedono superfici continue e proprietà isotrope migliorate. Sono caratterizzate da superfici

infinite, non autointersecanti e periodiche lungo tre direzioni ortogonali. La loro caratteristica peculiare è presentare una curvatura media nulla in ogni punto. Tra le strutture più comuni vi sono: *Diamond*, *Gyroid*, *Primitive* e *I-WP* (*I-graph-Wrapped Package*), ognuna delle quali presenta ottime proprietà da sfruttare per applicazioni specifiche. Ad esempio: la struttura *Gyroid* viene impiegata per la realizzazione di scambiatori di calore o scaffold biomedicali, in quanto si sfrutta l'ottima resistenza a torsione e la permeabilità della struttura; l'architettura *Primitive*, grazie all'elevata rigidità, è adatta a componenti strutturali; infine, l'*I-WP* rappresenta una struttura capace di realizzare un buon compromesso tra resistenza e densità. Inoltre, le strutture lattice basate su TPMS possono essere di tipo scheletrico (*network*) con pareti sottili ed elevata porosità, o a foglio (*sheet*), caratterizzate da superfici spesse e adatte a sopportare carichi più gravosi.

- *Strutture organizzate topologicamente*: strutture lattice il cui design è ottenuto mediante algoritmi di ottimizzazione al fine di realizzare specifiche prestazioni sotto vincoli prestabiliti. A differenza delle geometrie tradizionali, queste architetture non seguono schemi periodici fissi, ma adattano la distribuzione del materiale in funzione delle sollecitazioni attese.

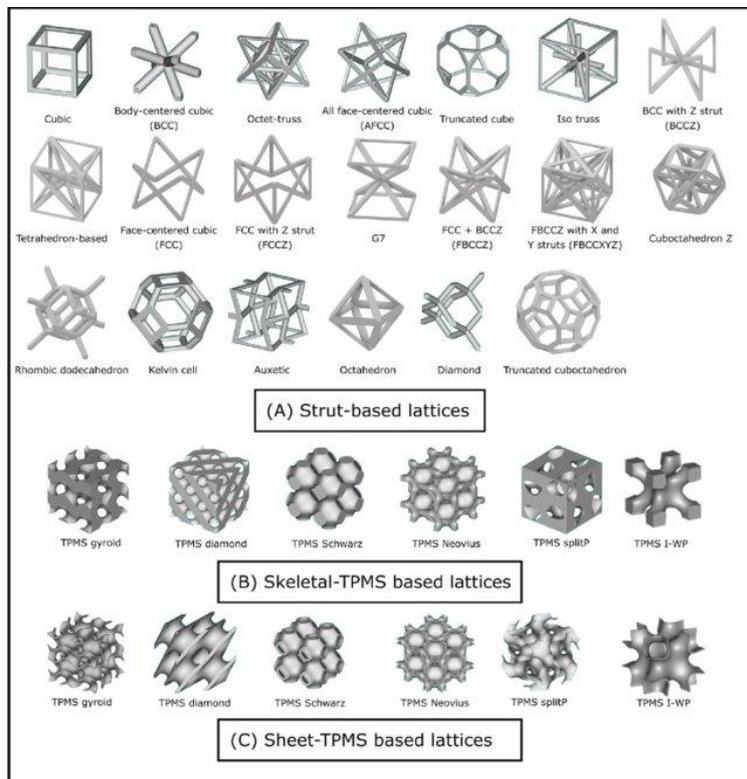


Figura 1: Classificazione strutture Lattice

2.3 Progettazione, modellazione e ottimizzazione delle strutture Lattice

La progettazione delle strutture Lattice richiede l'ausilio di software specializzati e metodologie avanzate per garantire e controllarne le proprietà meccaniche e funzionali. Per la progettazione di queste strutture si può impiegare:

- *Parametrizzazione*: in cui le strutture TPMS, ad esempio, possono essere attivamente progettate mediante un approccio parametrico, attraverso una relazione che leghi un parametro, C , e la densità della struttura. In questo modo è possibile regolare parametri quali lo spessore delle pareti, le dimensioni dei pori e l'area superficiale. Ciò consente di adattare le TPMS a diverse applicazioni nei settori ingegneristici.
- *Gradiente di proprietà*: è possibile progettare strutture lattice con gradienti controllati di densità in modo da ottimizzare ulteriormente le prestazioni. Si agisce su: densità relativa, in modo da ottenere zone più rigide o deformabili; dimensione della cella, per adattare la microstruttura a carichi localizzati.
- *Software dedicati*: esistono diversi strumenti software come MSLattice, nTopology e Altair Inspire, che permettono la creazione di reticoli uniformi e a gradienti basati su TPMS utilizzando equazioni di approssimazione level-set. Tali software non solo automatizzano la creazione di geometrie complesse, ma permettono anche l'esportazione di modelli compatibili con la tecnologia di stampa 3D.

La complessità geometrica delle strutture lattice rende la modellazione e la simulazione computazionale strumenti essenziali per poter comprendere ed approfondire lo studio sul comportamento di tali strutture. Le tecniche di simulazione più utilizzate prevedono:

- *Analisi degli elementi finiti (FEA)*: utilizzata per valutare le prestazioni meccaniche, termiche e fluidodinamiche delle strutture in lattice sotto diverse condizioni di carico e al contorno.
- *Modellazione surrogata*: per ottimizzare l'efficienza computazionale nella progettazione strutturale TPMS. Tali modelli, calibrati mediante prove sperimentali, consentono di simulare il comportamento di strutture complesse con un minore sforzo computazionale [5].
- *Fluidodinamica computazionale (CFD)*: Utilizzata per analizzare il flusso di fluidi e il trasferimento di calore all'interno dei canali di raffreddamento e degli scambiatori di calore basati su strutture in lattice [4].

Ottimizzare il design delle strutture reticolari lattice consente di massimizzare le prestazioni finali dei componenti stampati in diversi contesti di applicazione. Attualmente sono impiegate differenti metodologie, tra cui:

- *Design of Experiments* (DOE): utilizzato per determinare sistematicamente l'impatto dei parametri di processo e design sulle proprietà delle strutture in lattice, riducendo la quantità dei test necessarie a identificare le condizioni ottimali [6].
- *Response Surface Methodology* (RSM): tecnica statistica impiegata per ottimizzare i parametri di fabbricazione e post-cura, al fine di ottenere le proprietà meccaniche desiderate, come la resistenza a trazione e l'energia assorbita [6].
- *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems* (ANFIS): approccio di modellazione intelligente che può superare i modelli matematici tradizionali nella previsione delle prestazioni meccaniche, tenendo conto delle imperfezioni di stampa [7].

2.4 La fabbricazione additiva per le strutture Lattice

La fabbricazione additiva (AM), o stampa 3D, nel tempo si è rivelata una tecnologia chiave per la realizzazione di strutture lattice di geometrie interne complesse [4]. La scelta del processo di fabbricazione dipende dal materiale utilizzato, dalla complessità della geometria da realizzare e dalle esigenze prestazionali che l'applicazione finale richiede. Esistono diverse tecniche di fabbricazione in grado di realizzare le strutture reticolari lattice. Tra le più utilizzate vi sono:

- *Selective Laser Melting* (SLM): tecnica che prevede l'utilizzo di un laser per fondere selettivamente polveri metalliche, strato dopo strato, consentendo la produzione di strutture complesse in: Ti6Al4V [8], acciaio inossidabile 316L e leghe di alluminio [3]. È un processo consigliato per la produzione di reticoli metallici grazie alla maggior accuratezza geometrica che offre rispetto agli metodi di AM per materiali metallici [9].
- *Selective Laser Sintering* (SLS): simile alla SLM, ma utilizza polveri polimeriche come il TPU. Tuttavia, tramite la SLS, le strutture realizzate possono presentare anisotropia dovuta al legame tra gli strati [10].
- *Fused Filament Fabrication* (FFF): questa tecnica estrude un filamento termoplastico che viene depositato strato dopo strato. È utilizzata per la fabbricazione di strutture in lattice polimeriche come quelle in PLA e CFRPLA (PLA rinforzato con fibra di carbonio) [7].

- *Electron Beam Melting* (EBM): tecnica che prevede l'utilizzo di un fascio di elettroni per fondere le polveri metalliche. È impiegata per la fabbricazione di strutture reticolati in Ti6Al4V, soprattutto in campo biomedico [11].
- *Masked Stereolithography* (MSLA): utilizzata per ottimizzare i parametri di stampa della stereolitografia tradizionale, consente di migliorare l'accuratezza dimensionale e le proprietà meccaniche di parti stampate in 3D, tramite controllo sullo spessore dello strato e il tempo di post cura [6].

2.4.1 Selective Laser Melting

Tra le tecniche più utilizzate nella manifattura additiva industriale, la tecnica del *Selective Laser Melting* (SLM) ha rivoluzionato la capacità di creare strutture leggere e resistenti. Ciò è dovuto alla possibilità di controllare diversi parametri strutturali del reticolo, come la topologia della cella (connettività) o la geometria (dimensione della cella), per permettere di alterare significativamente la risposta fisica di queste strutture, conferendo loro proprietà uniche. Al fine di ottimizzare i risultati ottenuti sui componenti stampati tramite SLM, è dunque necessario continuare nella ricerca e nei test per ottimizzare i parametri di processo, come velocità del laser, potenza, dimensione del fascio laser e proprietà della polvere. In particolare, il laser che si muove costantemente lungo la piattaforma trasferisce un flusso di calore elevato a quest'area. Il materiale viene così riscaldato e raffreddato ad alta velocità. La solidificazione rapida e direzionale influisce sulla microstruttura locale, che può portare ad un orientamento cristallografico preferenziale che è in grado di alterare le proprietà meccaniche [3], [9]. È stato dimostrato che le proprietà meccaniche delle parti realizzate mediante SLM sono ortotropiche e dipendono dalla direzione di stampa [12].

Nel campo della gestione termica, la tecnologia SLM facilita la produzione e la sostituzione dei tradizionali dispositivi di trasferimento di calore in favore di nuovi concept in grado di ottimizzare lo scambio termico, aumentandone l'area superficiale a parità di dimensioni [3].

2.4.2 Difetti comuni nei componenti stampati in AM

È possibile riscontrare nei componenti stampati in 3D difetti geometrici causati da parametri subottimali, riempimento incompleto e tensioni residue. Tali difetti influenzano la producibilità, l'accuratezza dimensionale e la rugosità superficiale.

I tipi di difetti più comuni presenti nelle strutture reticolari possono essere classificati nei seguenti gruppi:

- *Inaccuratezze dimensionali*: consistono in una deviazione nella lunghezza o nel volume complessivo.
- *Difetti superficiali*: correlati a qualsiasi deviazione dalla superficie ideale e spesso quantificati mediante parametri di texture superficiale che forniscono una descrizione quantitativa della texture superficiale.
- *Porosità*: conseguenza dell'assenza di materiale sotto forma di vuoto chiuso all'interno della parte o di un vuoto superficiale.

Ad esempio, esistono vincoli come l'angolo minimo di inclinazione (spesso semplificato a 45°) e una dimensione minima degli elementi. Possono esserci discrepanze tra la geometria prevista e quella fabbricata a causa di restringimento, adesione di particelle non fuse e rugosità superficiale. Quest'ultima è influenzata dall'orientamento della superficie rispetto al fascio laser. Le superfici rivolte verso il basso tendono ad avere una maggiore rugosità a causa dell'adesione di particelle non fuse. Tuttavia, in alcune applicazioni, la rugosità non rappresenta necessariamente uno svantaggio: in campo biomedico, ad esempio, è richiesta una certa rugosità superficiale per migliorare l'adesione cellulare [9].

2.5 Proprietà e applicazioni delle strutture Lattice

Nell'ambito delle strutture reticolari, le proprietà meccaniche quali resistenza a trazione, carico di snervamento, modulo elastico e allungamento, rappresentano caratteristiche macroscopiche apparenti dell'intera struttura. Il comportamento meccanico delle strutture lattice è influenzato da molteplici fattori, tra cui: topologia della cella unitaria, densità relativa, materiale costituente e processo di fabbricazione impiegato. Quando sottoposte a sollecitazioni, tali strutture subiscono deformazioni determinate dalla combinazione di flessione, torsione e trazione. Di conseguenza, i reticoli vengono generalmente classificati in base alla loro modalità di deformazione predominante: dominati dalla flessione; dominati dalla trazione. Da prove sperimentali di compressione, emerge che le strutture dominate dalla flessione presentano un comportamento più duttile, mentre quelle dominate dalla trazione mostrano una maggiore resistenza meccanica. Queste ultime risultano particolarmente adatte ad applicazioni in cui è richiesto un elevato rapporto resistenza-peso, poiché garantiscono maggiore rigidità e resistenza a parità di densità relativa rispetto alle strutture dominate dalla flessione [3].

Le strutture reticolari basate su superfici minime triple periodiche (TPMS) hanno dimostrato prestazioni meccaniche superiori rispetto alle strutture reticolari convenzionali. Studi sperimentali evidenziano una maggiore stabilità strutturale, nonché migliori prestazioni in termini di rigidità, snervamento e tenacità (come nel caso della variante *sheet-Gyroid*). Tali strutture, in particolare le *sheet-based*, trovano applicazione in contesti in cui sono richieste elevate proprietà meccaniche [13].

Le strutture lattice, specialmente quelle caratterizzate da elevata porosità, si rivelano particolarmente promettenti per applicazioni in cui è fondamentale l'assorbimento di energia. L'efficacia di questa proprietà dipende da diversi parametri, tra i quali vi sono: tipo di TPMS, porosità e gradiente di porosità della struttura. In particolare, all'aumentare della porosità e dello spessore delle pareti, si osserva un incremento nella capacità di assorbimento energetico; tuttavia, è necessario valutare attentamente tali parametri per evitare un eccessivo indebolimento strutturale [6].

Per quanto concerne la conducibilità termica, ricerche hanno dimostrato che tali strutture presentano valori significativamente più elevati rispetto a materiali convenzionali, grazie all'eccellente connettività garantita dalla curvatura interconnessa. Tuttavia, le prestazioni termiche differiscono in funzione della topologia adottata. In generale, però, le prestazioni delle strutture TPMS superano quelle delle schiume metalliche stocastiche e dei reticoli prodotti con metodi tradizionali [13].

A seconda delle applicazioni di interesse, il modulo elastico delle strutture lattice può essere modulato attraverso un'attenta selezione della topologia, densità relativa e del materiale. Ad esempio, strutture a bassa densità relativa tendono ad esibire un modulo elastico ridotto, rendendole potenzialmente idonee per applicazioni in campo biomedico, ove è richiesta corrispondenza tra modulo elastico e tessuto osseo [5].

Le proprietà uniche offerte dalle strutture lattice le rendono particolarmente vantaggiose per una vasta gamma di applicazioni ingegneristiche [5]:

- *Biomedico*: utilizzati grazie alla possibilità di modulare le proprietà meccaniche per replicare quelle del tessuto osseo.
- *Scambiatori di calore*: grazie all'elevata superficie specifica e percorsi di flusso interconnessi rendono le strutture molto valide in termini di scambio termico, con prestazioni superiori rispetto ai tradizionali scambiatori di calore a piastre.
- *Assorbimento di energia*: Utilizzati per componenti per la protezione da impatto, come imbottiture per caschi e strutture antiurto in campo automobilistico e aerospaziale.
- *Isolamento acustico e smorzamento delle vibrazioni*: La geometria interna di queste strutture può favorire la dissipazione dell'energia sonora e lo smorzamento delle vibrazioni.

3 STRUTTURE A SUPERFICIE MINIMA TRIPLA PERIODICA (TPMS)

3.1 Le strutture reticolari TPMS

Grazie alle eccezionali proprietà fisiche, meccaniche, termiche e acustiche, le strutture reticolari hanno preso sempre più piede nelle applicazioni ingegneristiche, realizzando componenti con forme che precedentemente erano ingiustificabili sia dal punto di vista tecnico che economico. Il progresso ingegneristico ha portato allo studio e alla realizzazione di strutture reticolari *Triply Periodic Minimal Surfaces* (TPMS). Si tratta di reticoli ispirati a strutture già presenti in natura e ampiamente studiate in ambito biologico. Grazie alla loro struttura intricata, le TPMS massimizzano l'area superficiale a parità di volume, rendendole ideali per applicazioni che richiedono: resistenza strutturale, scambio termico e filtrazione. Le strutture TPMS presentano superfici continue che massimizzano il volume coperto con la minima superficie, migliorando resistenza e funzionalità, con annesso risparmio di materiale durante la fabbricazione. Il vantaggio di tali strutture, dunque, risiede nella possibilità di poter essere descritte da espressioni matematiche di superfici che si ripetono periodicamente in tre direzioni spaziali e che presentano curvatura media, H , nulla in ogni punto:

$$H = \frac{k_1 + k_2}{2} = 0$$

Ove, k_1 e k_2 rappresentano le curvature principali nei due piani ortogonali.

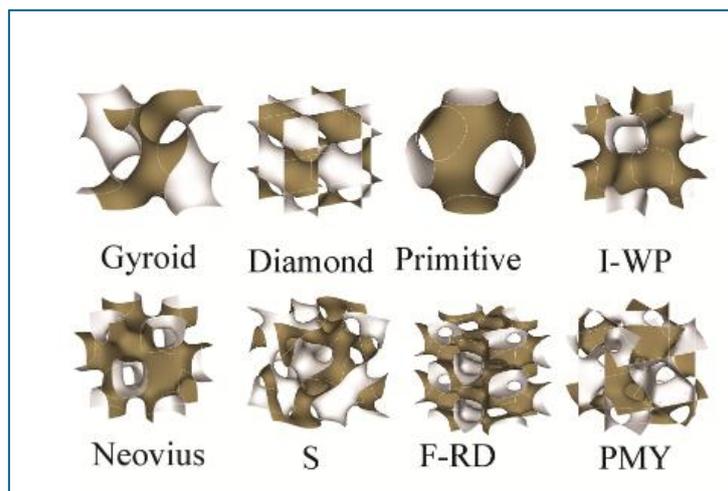


Figura 2: Strutture Lattice TPMS

Il metodo più semplice ed efficace per poter definire matematicamente una TPMS è un'equazione approssimata derivata da una serie di Fourier, del tipo:

$$\Psi(r) = \sum_k F(k) \cos[2\pi k \cdot r - \alpha(k)] = 0$$

in cui, k è il vettore reciproco, $\alpha(k)$ rappresenta uno sfasamento e $F(k)$ è il fattore di struttura, ossia un'ampiezza associata al vettore k [14].

Troncando la serie al termine principale si ottiene una funzione composta, f , caratterizzata da una combinazione di funzioni trigonometriche che soddisfa l'uguaglianza:

$$f(x,y,z) = c$$

pertanto, la funzione f definisce una superficie valutata all'isovalore c , con una topologia analoga a quella di una superficie minima. È possibile, dunque, tracciare insieme due o più superfici TPMS senza che queste si intersechino. Rappresentando due superfici con isovalori opposti, queste avranno lo stesso offset, ma in direzioni opposte rispetto ad una ipotetica superficie calcolata come media dei due valori.

È possibile definire le superfici minime attraverso equazioni matematiche in cui x , y e z rappresentano le coordinate spaziali e C è la costante che determina lo spessore e il volume del reticolo.

- Quando $C = 0$, la superficie minima ha spessore nullo e non occupa volume, dividendo lo spazio in due parti uguali.
- Quando $C \neq 0$, le isosuperfici sono separate da una distanza $2C$. Se questo spazio viene riempito, si genera una superficie minima solida.

La prima descrizione matematica delle superfici minime fu proposta da Schwartz e Neovius nel XIX secolo, replicando un blocco elementare lungo le tre direzioni principali. Come già citato, lo spessore delle pareti dipende dalla costante C : maggiore è lo spessore, maggiore è la densità relativa della TPMS. Le configurazioni principali delle TPMS sono:

- *Sheet-Networks* (rete a fogli): costituita da pareti sottili che separano due domini vuoti. È ottenuta solidificando il volume racchiuso tra due superfici minime valutate a valori diversi di c .
- *Solid-Networks* (rete solida): in cui uno dei due domini viene sostituito da materiale solido, l'altro è vuoto (canali continui).

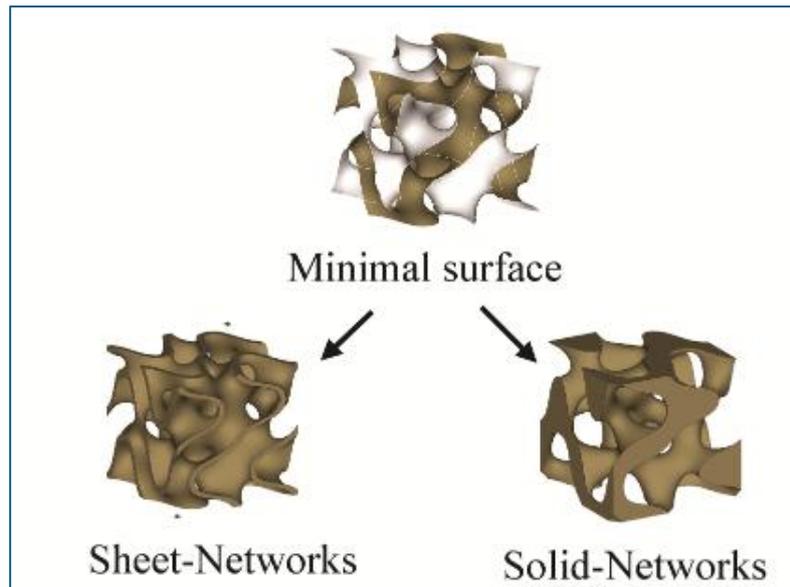


Figura 3: Classificazione strutture Lattice Sheet-Networks e Solid-Networks

Pertanto, le TPMS dividono un dato volume in due regioni congruenti, separate da una superficie infinitamente sottile. Le geometrie così realizzate, sebbene complesse, presentano un profilo liscio, mediante il quale si ottiene una drastica riduzione delle concentrazioni di sollecitazione in corrispondenza giunzioni. A supporto di quanto detto, test di compressione condotti sulle strutture lattice TPMS (*Liang et. al*) hanno mostrato una tendenza alla distribuzione più uniforme di sollecitazioni e deformazioni sotto carico rispetto ad altre tipologie. I test eseguiti sulle strutture TPMS realizzate mediante tecnologia Additive Manufacturing hanno rivelato che proprio grazie all'elevato rapporto superficie/volume, si ottiene una notevole riduzione del peso delle strutture, abbinando comunque caratteristiche di elevata rigidità e resistenza [15].

Attraverso la proprietà di gradazione funzionale di tali geometrie è possibile far variare la frazione volumetrica, l'area superficiale o la dimensione dei pori per soddisfare particolari esigenze legate a specifiche applicazioni. Ciò è reso possibile facendo variare il parametro della costante c nello spazio cartesiano, secondo la relazione:

$$f = c(x, y, z)$$

La gradazione funzionale modifica anche le proprietà meccaniche della struttura. Tuttavia, un metodo attraverso il quale è possibile controllare l'area superficiale e la dimensione dei pori senza che vi sia una variazione delle proprietà meccaniche è quello della gradazione della cella elementare, per cui variando la dimensione della cella unitaria spazialmente secondo $l(x, y, z)$, si mantiene costante la frazione volumetrica solida.

Esiste poi un approccio per gestire le proprietà dei reticoli basati su TPMS, che è l'ibridazione. Consiste nella transizione graduale tra due o più superfici minime per ottenere strutture multi-morfologiche. Ciò può avvenire all'interno di una singola cella o attraverso un dominio di transizione graduale che si estende su più celle unitarie. Domini differenti possono anche presentare diversi livelli di ibridazione, determinati da una funzione di ponderazione che ne stabilisce il contributo relativo a ciascuna superficie TPMS considerata, secondo la relazione:

$$f_{hy6} = \gamma \cdot f_1 + (1-\gamma) \cdot f_2$$

dove γ è una funzione di ponderazione spaziale che varia tra 0 e 1 [3].

È possibile generare i reticoli delle strutture lattice TPMS mediante software come MSLattice, che permette la creazione dei reticoli mediante due approcci: reti a foglio (sheet networks) e reti solide (solid networks). MSLattice nasce come piattaforma di progettazione completa basata sull'implementazione di equazioni level-set per rappresentare matematicamente le TPMS. Il software facilita significativamente il processo di progettazione e consente l'esportazione di file STL, pronti per la stampa 3D e le simulazioni numeriche. Inoltre, i file STL possono essere utilizzati per analisi agli elementi finiti o per analisi CFD [16].

3.1.1 Primitive

Scoperta da Schwarz, la struttura reticolare Primitive è definita secondo l'equazione matematica:

$$f(x,y,z) = \cos(x) + \cos(y) + \cos(z) = C$$

A differenza di altre superfici TPMS, la struttura Primitive si distingue per i suoi canali interni meno curvilinei, che porta ad avere un pattern di flusso più rettilineo [17]. Tuttavia, può presentare alcuni limiti, come il fenomeno del “*pinch-off*”, che può generare criticità progettuali, in termini strutturali, e concentrazione di stress localizzate [18]. Nonostante ciò, la sua architettura è al tempo stesso complessa ed elegante, costituita da una superficie minima tripla periodica, continua e senza autointersezioni. Il design è contraddistinto da un modello ripetitivo di punti sella e tunnel che conferiscono alla struttura porosità senza comprometterne la robustezza [19].

Dal punto di vista meccanico, studi recenti hanno evidenziato che le strutture Primitive possono superare le tradizionali reticolari in termini di rigidità, resistenza specifica e assorbimento di energia [20]. Il comportamento sotto carico dipende dalla tipologia di deformazione: le strutture “scheletriche” sono dominate dalla flessione, mentre quelle a foglio dalla trazione. Sotto compressione, la deformazione tende a propagarsi per strati. In quest’ottica, parametri come la topologia, la dimensione della cella e lo spessore influenzano significativamente le prestazioni meccaniche. Ad esempio, in prove di trazione, l’aumento dello spessore ha avuto effetti variabili a seconda del pattern TPMS considerato [21]. Se confrontata con altre geometrie come la Diamond o la Gyroid, la Primitive mostra in alcuni casi moduli elastici e resistenze inferiori, ma in uno studio specifico, fonte, ha dimostrato la migliore capacità di assorbimento di energia [7].

Anche nelle applicazioni termiche emergono peculiarità interessanti. Negli scambiatori di calore, ad esempio, la struttura Primitive offre minore resistenza al flusso rispetto a Gyroid, I-WP e Diamond a parità di parametri geometrici [3], ma i suoi canali meno curvi e il flusso rettilineo riducono l’efficienza dello scambio termico, limitando il trasferimento di calore [17].

Nell’ambito dell’accumulo termico latente, l’utilizzo di strutture Primitive accelera la fusione dei materiali a cambiamento di fase (PCM), sebbene in misura minore rispetto a strutture come l’I-WP. Tuttavia, la sua elevata connettività tra celle unitarie può favorire la formazione di "isole di calore".

In termini di prestazioni globali, la struttura Primitive risulta meno efficiente rispetto alla Diamond, Gyroid e I-WP se valutata attraverso il coefficiente di prestazione (PEC) per applicazioni che riguardano gli scambiatori di calore.

Non mancano però applicazioni in cui questa geometria eccelle. In ingegneria biomedica, ad esempio, la sua porosità controllata la rende ideale per la progettazione di scaffold che promuovono la crescita cellulare e la diffusione di nutrienti. Inoltre, il suo design estetico e la solida integrità strutturale ne favoriscono l’adozione nel settore dell’architettura, dove è richiesto il binomio tra forma e funzionalità [19].

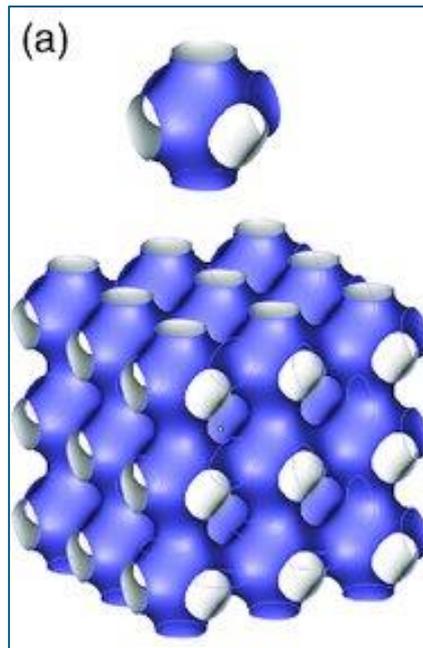


Figura 4: Struttura Lattice TPMS: Primitive

3.1.2 Diamond

La geometria delle strutture reticolari Diamond è espressa mediante la relazione definita come:

$$f(x,y,z) = \cos(x) \cdot \cos(y) \cdot \cos(z) - \sin(x) \cdot \sin(y) \cdot \sin(z) = C$$

Analogamente alle altre strutture TPMS, anche il tipo di struttura Diamond vanta proprietà intrinseche eccezionali. Presenta infatti [19]:

- *Rete intricata*: la superficie è composta da una rete intricata e interconnessa di tunnel e vuoti, che permettono di formare un telaio altamente poroso e strutturalmente robusto. Elevato rapporto rigidità-peso
- *Elevata superficie*: la struttura offre un elevato rapporto superficie-volume, particolarmente vantaggioso per applicazioni che richiedono trasferimento di massa efficiente, come convertitori catalitici e sistemi di filtrazione (per applicazioni relative a scambiatori di calore compatti, in letteratura sono presenti valori superiori a $400 \text{ m}^2/\text{m}^3$)

- *Assorbimento energia*: offre buone prestazioni in applicazioni volte all'assorbimento di energia meccanica

La geometria Diamond risulta dunque particolarmente vantaggiosa in diversi campi di applicazione. Rappresenta un candidato ideale per: dispositivi compatti e strutturalmente leggeri; dispositivi biomedicali a causa della porosità e compatibilità con i tessuti biologici; applicazioni catalitiche e di filtrazione.

Inoltre, come riportato da *Gado et al.*, la topologia delle strutture TPMS rende tortuosi i percorsi di flusso che contribuiscono a migliorare il trasferimento di calore. In particolare, il pattern di flusso elicoidali e sinusoidali che riescono a generare intensificano in maniera significativa il trasferimento di calore. Tale fenomeno prende il nome di “merge-split”, in cui si ha una fusione-divisione o biforcazione del flusso che provoca un disturbo dello strato limite [17].

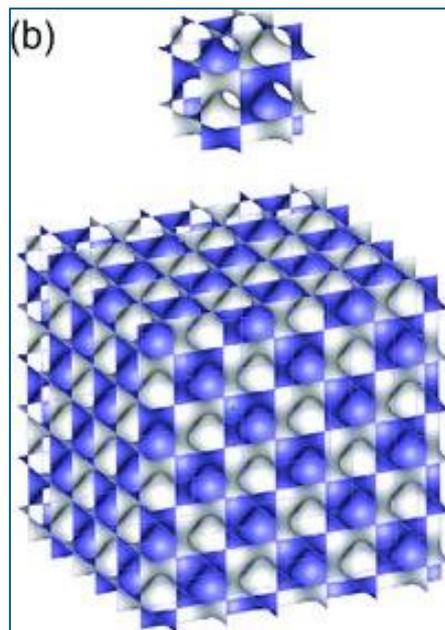


Figura 5: Struttura Lattice TPMS: Diamond

3.1.3 Gyroid

Scoperta da Schoen negli anni '70, è un tipo di struttura che presenta una geometria complessa caratterizzata da curvature interconnesse, senza linee rette o simmetrie planari e pori non tortuosi, vantaggiosi per applicazioni che richiedono trasferimento di massa o permeabilità [4]. È rinomata per la sua combinazione unica di elevata superficie, curvatura continua e resistenza meccanica, rendendola particolarmente ricercata in ambiti avanzati dell'ingegneria, come: dispositivi aerospaziali, automobilistici e biomedici [19]. Dal punto di vista matematico, la struttura può essere descritta mediante

l'equazione:

$$f(x, y, z) = \cos(x) \sin(y) + \cos(y) \sin(z) + \cos(z) \sin(x) = C$$

Che rappresenta il blocco fondamentale della superficie minima. Introducendo le dimensioni caratteristiche della cella elementare L_x , L_y , L_z , attraverso una ripetizione di queste lungo le tre coordinate principali porta alla realizzazione di una struttura TPMS in lattice [3]:

$$f(x, y, z) = \cos\left(\frac{2\pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{2\pi y}{L_y}\right) + \cos\left(\frac{2\pi y}{L_y}\right) \sin\left(\frac{2\pi z}{L_z}\right) + \cos\left(\frac{2\pi z}{L_z}\right) \sin\left(\frac{2\pi x}{L_x}\right) = C$$

Studi effettuati sulle strutture Gyroid hanno permesso di evidenziare diverse caratteristiche peculiari di tale struttura reticolare [19]:

- *Elevata superficie*: la geometria continua e intricata fornisce un'elevata superficie in un volume relativamente piccolo
- *Resistenza meccanica*: presenta buone proprietà di resistenza meccanica, in particolare a trazione, e può essere progettato per ottenere anche buona flessibilità. Sotto carico di compressione, il pattern risulta dominato dalla flessione
- *Distribuzione ottimizzata del materiale*: la geometria consente di distribuire il materiale in maniera efficiente in tutta la struttura, ottimizzando così il peso senza comprometterne la resistenza
- *Scambio termico*: la rete intricata facilita lo scambio termico tra fluidi che lo attraversano. Per applicazioni di scambio termico, offre una grande superficie e sottovolumi ben distribuiti, migliorando il trasferimento di calore [17]
- *Realizzazione*: dal punto di vista realizzativo, risultano più semplici da produrre con tecniche di fabbricazione additiva [5]

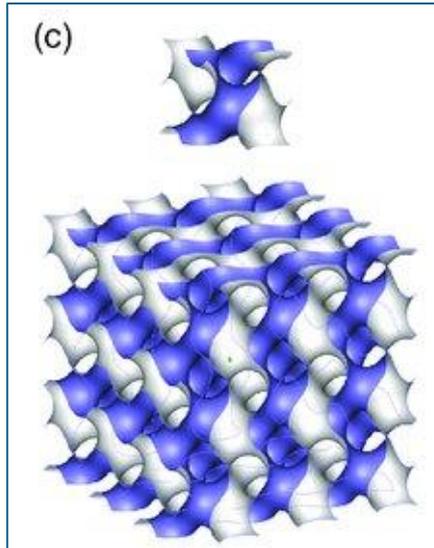


Figura 6: Struttura Lattice TPMS: Gyroid

3.1.4 I-WP

L'I-WP è un'altra tipologia comune di TPMS. La geometria è espressa da un'equazione del tipo:

$$f(x,y,z) = 2(\cos(x) \cdot \cos(y) + \cos(y) \cdot \cos(z) + \cos(z) \cdot \cos(x) - (\cos(2x) + \cos(2y) + \cos(2z))) = C$$

Come nel caso della struttura *Primitive*, anche l'*I-WP* può presentare il problema del "pinch-off". Le sue connessioni tra le celle unitarie sono più strette rispetto al *Primitive*, ma la loro angolazione può promuovere un migliore flusso di calore verso l'alto in alcune applicazioni. L'*I-WP* può presentare pattern di flusso sinusoidali negli scambiatori di calore [17].

Studi hanno analizzato l'anisotropia dell'*I-WP*, riscontrando che è la più significativa tra *Gyroid* e *Primitive*. Questa caratteristica può essere sfruttata per migliorare le prestazioni meccaniche in direzioni specifiche, ma può anche portare a una diminuzione in altre direzioni [18].

Le strutture scheletriche *I-WP* sono dominate dalla deformazione per flessione, mentre quelle a foglio dalla deformazione per trazione. In alcuni confronti, l'*I-WP* ha mostrato una buona resistenza meccanica, superiore al *Primitive* [8].

L'*I-WP* è stato studiato per applicazioni destinate alla realizzazione di scambiatori di calore, mostrando un buon numero di *Nusselt*, simile a *Gyroid*, e superiore al *Primitive*[17]. Tuttavia, ha anche mostrato una maggiore caduta di pressione in alcuni casi [22].

Nell'accumulo termico latente, l'*I-WP* presenta un rapido tasso di fusione del *PCM* (materiali a cambiamento di fase), il più alto rispetto a *Gyroid* e *Primitive* in alcuni studi. Le differenze nella distribuzione del calore, la geometria e le connessioni più strette tra le celle unitarie e, infine, la dinamica di fusione/solidificazione possono influenzare la distribuzione della temperatura nel reticolo [17].

L'*I-WP* mostra una significativa anisotropia meccanica, che può essere utilizzata nella progettazione di strutture a rotazione gradiente per migliorare la piattaforma di snervamento sotto compressione [18].

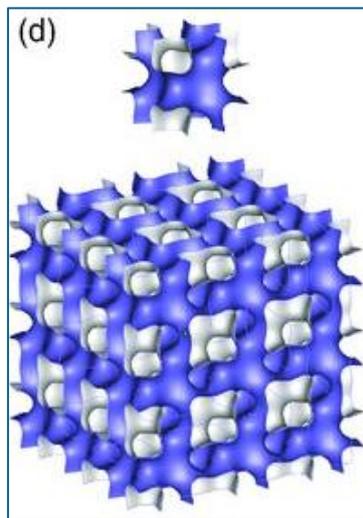


Figura 7: Struttura Lattice TPMS: *I-WP*

In sintesi, *Primitive*, *Diamond*, *Gyroid* e *I-WP* sono quattro distinte tipologie di strutture TPMS con caratteristiche geometriche, meccaniche e termiche uniche.

- Il reticolo *Primitive* è geometricamente più semplice ma può soffrire di limitazioni nel trasferimento di calore a causa dei suoi canali meno tortuosi e presentare problemi di "pinch-off". Presenta, tuttavia, valori del modulo elastico superiori rispetto alle altre topologie [23]
- Il reticolo *Diamond* risulta particolarmente adatto per profili legati alla gestione termica, grazie principalmente alle caratteristiche di compattezza e di elevata area superficiale specifica dei dispositivi realizzati.

- Il reticolo *Gyroid* si distingue per le sue curvature interconnesse e le buone prestazioni sia meccaniche che termiche, trovando applicazioni promettenti in: scambiatori di calore, dispositivi per l'accumulo di energia, scaffold biomedicali e sistemi fonoassorbenti.
- Il reticolo *I-WP* offre buone prestazioni meccaniche e un rapido tasso di fusione del *PCM*, ma la sua elevata anisotropia richiede un'attenta considerazione nella progettazione per applicazioni meccaniche. Inoltre, risultano vantaggiose per applicazioni legate all'assorbimento di energia e carico di impatto. La scelta della struttura TPMS più adatta dipende fortemente dai requisiti specifici dell'applicazione.

3.2 Proprietà

Le proprietà macroscopiche delle strutture a reticolo sono definite tali quando il numero di celle unitarie è sufficientemente grande. Rispetto alle strutture a reticolo convenzionali, i reticoli TPMS presentano una serie di proprietà meccaniche e termiche uniche, derivanti dalla loro struttura geometrica altamente ordinata e dalla capacità di ottimizzare la distribuzione del materiale nello spazio. Dal punto di vista delle proprietà meccaniche, consentono una distribuzione delle sollecitazioni più uniforme, il che si traduce in un maggior incremento di resistenza ai carichi. Quando sottoposte a carico, la struttura si deforma a causa di una combinazione di flessione, torsione o stiramento delle travi (strutture basate su travi) o del foglio (strutture basate su superfici), come nel caso delle TPMS. Nonostante ciò, realizzare tali strutture reticolari mediante tecniche di produzione tradizionali è molto difficile a causa della complessità delle geometrie [15]. Queste caratteristiche le rendono particolarmente adatte per applicazioni ingegneristiche avanzate. Di conseguenza, la produzione dei reticoli TPMS viene realizzata mediante fabbricazione additiva che porta con sé alcuni limiti da superare. Dal momento che il processo di stampa richiede processi fisici come transizioni di fase, fusione e solidificazione in presenza di elevate temperature, è probabile riscontrare la presenza di difetti quali: stress residui, superfici ruvide e micro-vuoti interni. La presenza di tali difetti influenza inevitabilmente le proprietà meccaniche delle strutture TPMS fabbricate. Attualmente, la ricerca sulle strutture TPMS si concentra principalmente sulla progettazione strutturale, mentre la ricerca sulle proprietà meccaniche e sull'influenza dei difetti non è ancora del tutto completa.

Poiché la fabbricazione additiva richiede molto tempo ed energia, i ricercatori utilizzano per lo più una combinazione di analisi tramite elementi finiti ed esperimenti al fine di analizzare i problemi meccanici riscontrabili nelle strutture TPMS [23].

3.2.1 Rugosità superficiale

Un parametro a cui bisogna far particolarmente attenzione è la rugosità superficiale degli oggetti stampati in 3D con struttura TPMS. Mediante osservazioni condotte sulla qualità superficiale delle strutture realizzate mediante Selective Laser Melting (SLM), si riscontra che la presenza di difetti superficiali può influenzare il comportamento meccanico di tali strutture [3].

Generalmente il fenomeno è dovuto a diversi aspetti, che comprendono:

- Materiale base: tipo di lega, distribuzione e dimensioni delle particelle
- Design: geometria, orientamento del pezzo e strutture di supporto
- Processo produttivo: scelta del processo e parametri (sorgente di potenza termica, velocità di spostamento, spessore dello strato)
- Post-processing: rimozione del supporto, lucidatura

Nel caso dell'Additive Manufacturing, le principali causa che generano rugosità superficiali sono [3]:

- “*effetto scalino*”: l'approssimazione a gradini per strati di superfici curve e inclinate comporta una rugosità superficiale che può essere migliorata adoperando uno spessore di strato più piccolo e un angolo di costruzione adeguato.
- Fusione impropria e “*balling*”: le strutture TPMS realizzate mediante SLM presentano particelle di polvere che aderiscono alla superficie. Ciò è dovuto al fenomeno del “*balling*” (formazione di sfere) o da una parziale fusione delle particelle di materia prima durante il processo. Tali particelle aumentano la rugosità superficiale delle strutture e influenzano le proprietà meccaniche delle strutture [23]. Può essere indotto da una potenza laser insufficiente per fondere completamente le particelle di polvere.

Nello specifico, in riferimento alla realizzazione di una struttura P, durante il processo di stampa, la superficie inferiore tende ad essere più ruvida rispetto alla superficie superiore. Tale fenomeno è riconducibile alla mancanza di un supporto solido durante la fase iniziale di stampa, con la struttura che si ritrova appoggiata unicamente sul letto di polvere. La polvere sottostante può accumularsi e interagire con il materiale in solidificazione, causando una parziale fusione

della polvere sciolta con conseguente incremento di rugosità. Per eliminare la presenza della polvere è necessario eseguire post-trattamenti sulle strutture come sabbiatura o ricottura sottovuoto [23], oppure adoperare con una maggiore potenza in ingresso, minore velocità di scansione e adoperando con una polvere più fine. Analisi condotte dopo il trattamento di sabbiatura su strutture TPMS Gyroid “skeletal” hanno evidenziato un aumento del modulo elastico, dello sforzo di snervamento e di plateau, rispettivamente del 5,9%, 9,3% e 5,6% [23]. L’esame tramite microscopio elettronico a scansione (SEM) rivela la presenza di particelle di polvere sparse e adese alla superficie delle strutture. Ciò è dovuto al processo stesso, in quanto viene a realizzarsi una zona termicamente alterata intorno al bagno di fusione durante la scansione laser, che fa aderire la polvere circostante. La quantità di polvere presente sulla superficie è principalmente correlata alla dimensione dell’area superficiale dei campioni analizzati [11].

- Spaziatura di “*hatching*”: riscontrabile a causa della spaziatura tra più tracce laser singole, rilevabili da grandi creste a forma di “costola” tra i passaggi laser
- “Bava” (“*dross*”): è causata dal materiale in eccesso a seguito di un controllo improprio del bagno fuso. È particolarmente rilevante sulle superfici a sbalzo (rivolte verso il basso), a causa dell’effetto della gravità e delle superfici costruite su polvere non supportata.

Le curvature lisce delle strutture TPMS sono vantaggiose perché sono in grado di eliminare la concentrazione di stress tipiche delle strutture a montanti. Una superficie ruvida, con le sue irregolarità e spigoli, potrebbe agire come punto di innesco per concentrazioni di sollecitazione sotto applicazione di carico meccanico. Tali concentrazioni potrebbero causare cedimento prematuro della struttura, riduzione della resistenza a fatica e frattura più veloce [4].

Anche l’orientamento di costruzione è riportato in letteratura come parametro che influenza in maniera impattante sulla finitura superficiale dei componenti realizzati attraverso Additive Manufacturing. Nello specifico, gli studi di *Wildgoose et al.* e di *Snyder et al.* hanno evidenziato come la rugosità superficiale abbia una diretta influenza sul fattore di attrito riguardo il trasferimento di calore: valori comuni di rugosità delle parti stampate in AM variano tra i 5 e 50 μm , misurando valori più elevati per superfici rivolte verso il basso e con canali stampati con un angolo inferiore a 60° . In particolare, i risultati migliori si osservano con un angolo di costruzione di 45° [3].

La densità relativa (spessore delle pareti) e la dimensione della cella unitaria influenzano la rigidità e resistenza (comportamento *stretch-dominated* per alte densità) e la conduttività termica efficace (legata alla porosità e alla connessione dei canali).

Inoltre, dalle prove di compressione condotte ed analizzate da *Zhang et al.* [20] si riscontra frattura fragile. Pertanto, le imperfezioni superficiali derivanti dal processo di fabbricazione (rugosità, polvere aderente e altri difetti) sono presenti e hanno la capacità di alterare la risposta meccanica prevista.

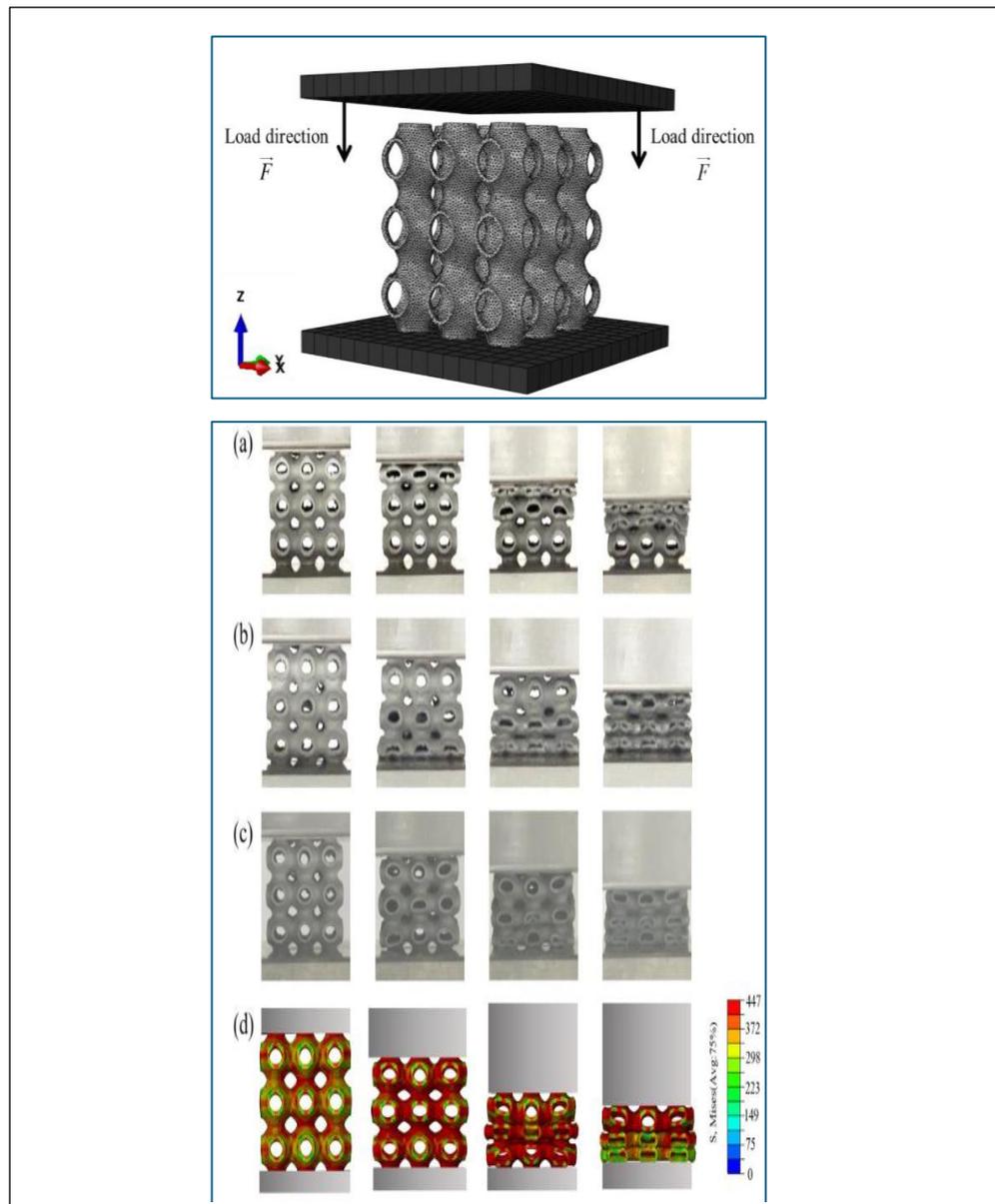


Figura 8: Esempio prova di compressione per struttura Lattice TPMS Primitive

3.2.2 Tensioni residue e distorsione

A seguito della deposizione di polvere su un substrato relativamente più freddo, o su strati precedentemente depositati, si genera un gradiente di temperatura elevato che porta con sé una serie di conseguenze critiche: deformazioni termiche e tensioni residue. Le tensioni residue possono indurre distorsioni del componente, perdita di tolleranza geometrica e delaminazione degli strati durante la deposizione. Ciò influenza negativamente anche le prestazioni in termini di fatica e di resistenza alla frattura.

Le tensioni residue sono classificate in base alla scala in cui si verificano [3]:

- Tipo I: deformazioni su lunghe distanze che si traducono in deformazioni della parte
- Tipo II: deformazioni sulla scala del grano
- Tipo III: deformazioni su scala atomica

Le deformazioni microscopiche (tipo II e III) sono generalmente presenti anche prima del processo di costruzione a causa delle disuguaglianze elastiche e termiche. Tuttavia, ogni processo di produzione induce inevitabilmente una certa quantità di tensioni residue. In particolare, i processi basati su laser sono noti per introdurre grandi quantità di tensioni residue, a causa del gradiente termico elevato tipico del processo di produzione. Come evidenziato da *Mercelis et al.* le parti che restano connesse alla piastra di base contengono livelli di stress molto elevati, nell'ordine del limite di snervamento del materiale. Al contrario, quelle che vengono rimosse dalla piastra di base presentano livelli di stress molto più bassi, sebbene subiscano deformazioni durante la rimozione. Risulta particolarmente rilevante la strategia di scansione sulle tensioni residue: queste risultano maggiori lungo la direzione di scansione e il livello di stress complessivo può essere minimizzato mediante alcune accortezze (riscaldando la piastra di substrato, posizionando strutture di supporto, aumentando la velocità di scansione e diminuendo lo spessore dello strato) [24].

3.2.3 Inaccuratezza dimensionale

Nei componenti realizzati mediante fabbricazione additiva è possibile riscontrare una certa inaccuratezza dimensionale dovuta principalmente alla distorsione termica. Quest'ultima è causata dall'espansione e contrazione non uniformi di diverse regioni della parte che subiscono variazioni di temperatura. Durante il processo di deposizione del materiale, la distorsione termica dipende da una serie di fattori, quali: proprietà della lega, apporto di calore, dimensioni del substrato, geometria della parte [3].

4 SCAMBIATORI DI CALORE AVANZATI IN STRUTTURA LATTICE TPMS

4.1 Introduzione agli scambiatori di calore

Uno scambiatore di calore è un dispositivo volto a realizzare un trasferimento di energia termica in maniera efficiente mediante l'utilizzo di uno o più fluidi in moto, a temperatura diversa. Nei diversi campi di applicazione, la presenza di uno scambiatore di calore è necessaria se si vuole:

- *Riscaldare un fluido più freddo*
- *Raffreddare un fluido più caldo*
- *Recuperare energia termica dai processi industriali*

Il principio di funzionamento è costituito da uno scambio termico che avviene attraverso due modalità:

- *Conduzione*: con le pareti separatrici del tubo
- *Convezione*: nei due fluidi

La quantità di calore che si riesce a scambiare è funzione della superficie di scambio termico S , dello spessore del tubo all'interno del quale circolano i fluidi t , del coefficiente globale di scambio termico λ , che dipende dalla natura dei fluidi e dai materiali utilizzati, e della differenza di temperatura dei due fluidi utilizzati ΔT . La legge è esprimibile come segue:

$$\dot{Q} = \lambda \frac{S}{t} \Delta T$$

Nella pratica ingegneristica, gli scambiatori vengono classificati secondo diverse categorie, ognuna con specifiche caratteristiche e campi di applicazione. La scelta è influenzata da molteplici fattori, tra cui: proprietà dei fluidi impiegati, condizioni operative e vincoli economici. L'efficienza di uno scambiatore, inoltre, dipende da alcuni fattori, quali:

- *Pulizia delle superfici di scambio*: le incrostazioni riducono l'efficienza di scambio termico
- *Portata e velocità dei fluidi*: la turbolenza aiuta lo scambio termico
- *Design*: migliora l'efficienza dello scambiatore
- *Manutenzione*: pulizia, ispezioni e monitoraggio delle perdite di pressione

4.2 Tecnologia

Esistono diverse configurazioni di scambiatori di calore che trovano applicazione in base alle specifiche richieste. È possibile distinguere, a seconda di alcuni parametri di funzionamento riportati di seguito, le modalità di utilizzo degli scambiatori di calore. In base a:

- *Evoluzione del fluido all'interno dei tubi:*
 - Flusso parallelo: i fluidi scorrono nella stessa direzione
 - Flusso controcorrente: i fluidi scorrono in direzione opposta (miglior efficienza termica)
 - Flusso incrociato: i fluidi si incrociano perpendicolarmente
- *Costruzione dello scambiatore:*
 - A tubi concentrici: due tubi coassiali, uno dentro l'altro (semplice, ma efficienza limitata)
 - A fascio tubiero: fascio di tubi all'interno di un involucro (utilizzo in larga scala)
 - A piastre: serie di piastre sottili con canali per i fluidi (compatto ed efficiente)
 - Alettoni o lamelle (utilizzato nei radiatori di automobili e convettori)
 - A spirale: costituito da due nastri metallici avvolti a spirale (per fluidi ad alta viscosità)
- *Meccanismo di scambio termico:*
 - Contatto indiretto: i fluidi sono separati da una parete metallica
 - Contatto diretto: i fluidi entrano in contatto tra loro (utilizzo nelle torri di raffreddamento)

4.3 Analisi dei fattori di cedimento degli scambiatori di calore

Gli scambiatori di calore sono soggetti a diversi fattori che possono indurre cedimenti strutturali o funzionali, con conseguenze in termini prestazionali e, in alcuni casi, rischi per la sicurezza. In riferimento alla causa che li ha generati, i cedimenti si possono classificare per origine termica, origine chimica, o l'insieme di entrambi i fattori.

4.3.1 Colpi d'ariete e onde di pressione

I colpi d'ariete causati dall'improvvisa e rapida accelerazione o decelerazione di un liquido possono provocare il fenomeno del martellamento idraulico "water hammer". È possibile che vengano a generarsi delle sovrappressioni che risultano molto pericolose per il corretto funzionamento degli scambiatori. Il fenomeno prevede che l'acqua di raffreddamento viene surriscaldata oltre il suo punto di ebollizione generando vapore. Quando il flusso riprende, la condensazione del vapore provoca una pericolosa sovrappressione, nota come colpo d'ariete [3].

4.3.2 Fouling e incrostazioni

Può accadere che particelle insolubili presenti nel fluido che scorre all'interno dei canali degli scambiatori possano aderire alla superficie interna e ridurre l'area della sezione trasversale del tubo. Si verifica, pertanto, un'ostruzione al normale passaggio del fluido all'interno dei tubi dello scambiatore di calore. Tale fenomeno prende il nome di "fouling" e comporta una riduzione nello scambio termico, a seguito di un aumento di temperatura del fluido. Inoltre, è preferibile che le superfici interne dei canali siano lisce. È stato osservato, infatti, che superfici texturizzate sono più inclini a fouling.

Quando si forma un film di sali sulla superficie interna di un tubo, si riscontra la formazione di incrostazioni che prendono il nome di "scaling". All'aumentare della temperatura, la solubilità dei sali in acqua diminuisce, favorendone il deposito sulle pareti. È un fenomeno da evitare, in quanto tali incrostazioni risultano essere particolarmente tenaci e difficili da rimuovere meccanicamente.

A causa dell'affinità tra i materiali e i fluidi, gli scambiatori di calore sono particolarmente suscettibili al fenomeno dell'ossidazione, promosso da elevate temperature e ambienti ossidanti [3].

4.3.3 Sollecitazioni termiche e meccaniche: fenomeno del Creep e della Fatica

Il fenomeno del Creep rappresenta la tendenza alla deformazione di un materiale sottoposto all'applicazione di un carico prolungato nel tempo. Il fenomeno è promosso specialmente dalle alte temperature. I fattori che influenzano il comportamento del materiale sono: temperatura, tempo di applicazione del carico. Nel caso di scambiatori di calore, i tubi esposti al passaggio dei fluidi sono inclini al fenomeno del creep e mostrano, pertanto, una vita utile meno duratura.

Il fenomeno della fatica, invece, si presenta per materiali sottoposti a carichi ciclici che portano al collasso del materiale. I carichi ciclici dovuti ai processi di avviamento e raffreddamento degli scambiatori inducono questi ultimi a carichi di fatica importanti [3].

4.3.4 Erosione e vibrazioni meccaniche

L'eccessiva velocità del fluido sul lato del guscio o sul tubo dello scambiatore può provocare asportazione di materiale superficiale. Si tratta del fenomeno di erosione. Generalmente, la perdita di materiale può verificarsi nelle aree di ingresso dei tubi, quando il fluido principale si divide in flussi più piccoli mentre entra nello scambiatore. Si può attenuare il fenomeno se si evita l'ingresso del fluido con proprietà di velocità e temperatura superiori ai limiti prescritti dal materiale costituente lo scambiatore di calore.

L'elevata velocità di passaggio del fluido all'interno dei canali può inoltre promuovere vibrazioni indesiderate dei tubi, generando dapprima cricche che, propagandosi nel componente, possono portare il dispositivo a cedimento strutturale [3].

4.4 Scambiatori di calore con strutture TPMS

Gli scambiatori di calore tradizionali presentano limitazioni in termini di efficienza, peso e complessità geometrica. In quest'ottica, i pattern delle strutture TPMS rappresentano una rivoluzione nella progettazione di scambiatori di calore, in quanto riescono a combinare insieme efficienza termica, leggerezza e resistenza meccanica. L'idea è infatti quella di sfruttare la geometria complessa di queste architetture per massimizzare la superficie di contatto tra due fluidi in uno spazio limitato, mantenendo al contempo una "permeabilità" per il flusso. L'avvento della fabbricazione additiva ha consentito la possibilità di produrre corpi metallici monolitici con l'eliminazione della resistenza di contatto che si verifica negli assemblaggi tradizionali [25]. Mediante fabbricazione additiva è possibile ottenere strutture TPMS che

superano i limiti delle geometrie tradizionali grazie alla loro morfologia autoportante e alla superficie estesa, offrendo vantaggi significativi in termini di:

- *Efficienza scambio termico*: L'elevato rapporto superficie/volume aumenta l'area di contatto tra fluido e solido, migliorando lo scambio termico [26].
- *Turbolenza indotta*: La geometria complessa dei canali dei reticoli TPMS promuove un flusso turbolento che riduce lo strato limite termico e aumenta il coefficiente di scambio termico [13].
- *Perdite di pressione contenute*: Rispetto ai reticoli tradizionali (es. a nido d'ape), le TPMS hanno un flusso più uniforme con perdite di carico contenute.
- *Materiali più efficienti*: Le TPMS possono essere progettate con densità relative basse (10-30%) mantenendo alta rigidità (*stretch-dominated*), ideali per applicazioni in cui è richiesto un connubio efficiente tra leggerezza e resistenza delle strutture (aerospaziale e automotive). Inoltre, con la produzione additiva è possibile realizzare tali pattern in un unico pezzo, eliminando saldature e assemblaggi.
- *Resistenza a fatica*: Le superfici lisce riducono la propagazione di cricche rispetto a strutture a travi (es. lattice BCC/FCC)
- *Gradazione Funzionale*: La densità o la dimensione delle celle può variare lungo lo scambiatore per ottimizzare il flusso termico in zone critiche

La tecnica più utilizzata per la fabbricazione di strutture TPMS è La Selective Laser Melting, ovvero la fusione laser selettiva, attraverso la quale è possibile ottenere geometrie complesse. Sotto la protezione di un gas inerte, un raggio laser fonde selettivamente la polvere metallica distribuita sul substrato o sullo strato precedentemente fuso. Dopo aver scansionato lo strato corrente, la piattaforma di lavoro si abbassa di un'altezza prestabilita mentre il sistema di alimentazione della polvere distribuisce un nuovo strato di polvere metallica, ripetendo il processo di fusione laser selettiva. Tale processo di fusione, solidificazione e alimentazione della polvere viene ripetuto strato dopo strato, fino alla realizzazione dell'oggetto di cui era stato precedentemente realizzato un prototipo su modelli CAD 3D [23].

Questa tipologia di scambiatori trova impiego in diversi settori ingegneristici, quali:

- *Aerospaziale*: Le TPMS in leghe di alluminio (AlSi10Mg) o rame sono usate per raffreddamento di motori e sistemi elettronici, dove peso ed efficienza sono critici. Dallo studio di Jiang et al. (2022), le Gyroid in rame hanno mostrato un aumento del 40% nello scambio termico rispetto a schiume stocastiche.

- *Biomedico*: Scambiatori miniaturizzati per dispositivi medici (es. ossigenatori) sfruttano la biocompatibilità e l'elevata superficie delle TPMS in Ti6Al4V.
- *Energetico*: Scambiatori per celle a combustibile o reattori chimici, dove le TPMS in acciaio Inox 316L resistono a corrosione e alte temperature.

In sintesi, le TPMS rappresentano una promettente frontiera per l'innovazione nel campo degli scambiatori di calore e della gestione termica. La loro complessa geometria offre un elevato rapporto superficie-volume e la possibilità di manipolare il flusso del fluido per migliorare il trasferimento di calore. Grazie ai progressi nella fabbricazione additiva, è ora possibile realizzare queste strutture complesse e studiarne le prestazioni in dettaglio. La ricerca attuale è focalizzata allo sviluppo di correlazioni predittive accurate, sull'ottimizzazione dei parametri di progettazione per diverse applicazioni e sull'esplorazione di nuove geometrie con prestazioni superiori. Nonostante le sfide legate alla previsione oculata delle perdite di carico e all'influenza della rugosità superficiale, il potenziale delle TPMS per la realizzazione di scambiatori di calore compatti, efficienti e leggeri è notevole e continua a stimolare un intenso interesse scientifico e industriale.

5 PROGETTAZIONE E INTEGRITA' STRUTTURALE

5.1 Introduzione

Lo studio degli scambiatori di calore può essere contraddistinto in due diverse finalità: la prima, di “*sizing*”, consiste nel ricercare l’area della superficie di scambio necessaria affinché, note le temperature dei fluidi in ingresso e in uscita, si realizzi un determinato scambio di potenza termica; la seconda consiste nel ricercare la potenza termica scambiata al variare delle condizioni in ingresso (portate massiche e temperatura), si parla, allora, di “*rating*”. La progettazione meccanica degli scambiatori di calore in struttura lattice TPMS richiede una comprensione approfondita di aspetti differenti, tra cui: scelta della topologia TPMS, ottimizzazione dei parametri geometrici, analisi numerica per la valutazione dell’integrità strutturale e test condotti sui campioni per la determinazione delle prestazioni termo-fluidodinamiche e considerazioni legate al processo di fabbricazione additiva.

Le tecniche di simulazione per le strutture reticolari Triply Periodic Minimal Surfaces sono fondamentali per comprenderne le proprietà meccaniche e fluidodinamiche.

In quest’ottica, l’analisi agli elementi finiti (FEA) rappresenta uno strumento fondamentale per la progettazione e l’ottimizzazione delle prestazioni meccaniche delle strutture TPMS impiegate per la realizzazione di scambiatori di calore. Attraverso la discretizzazione del volume della struttura in un numero finito di elementi, è possibile simulare il comportamento del materiale sottoposto a diversi tipi di carico (trazione, compressione, flessione) e condizioni al contorno [25].

Attraverso l’utilizzo della Digital Image Correlation (DIC) è possibile monitorare in tempo reale i campi di deformazione durante i test, fornendo dati preziosi per la convalida del modello. Infine, la caratterizzazione modale viene eseguita attraverso diversi metodi di modellazione, tra i quali: modelli a guscio, solido e di omogeneizzazione. Successivamente, tali metodi vengono confrontati in termini di efficienza e precisione computazionale, rivelando che la scelta della tecnica di modellazione influisce in maniera significativa sui risultati ottenuti [27].

5.2 Analisi delle curve sforzo-deformazione

Nella scienza dei materiali, le analisi delle curve sforzo-deformazione rappresentano uno strumento cruciale per comprendere il comportamento elastico, plastico e di rottura dei campioni sotto carichi applicati. Nel contesto delle strutture TPMS, predire le proprietà meccaniche basandosi esclusivamente sulla modellazione risulta difficile a causa della complessità della geometria. I fattori chiave che influenzano il comportamento a deformazione delle strutture TPMS includono il tipo di struttura, lo spessore della parete, la densità relativa, la dimensione della cella unitaria, la presenza di strutture ibride, la direzione di stampa, la direzione di carico, il materiale e la porosità.

Sotto carico di compressione, il tipo di struttura TPMS influenza il comportamento di deformazione del materiale. In tal senso, risulta determinante approfondire le risposte esibite per poter estendere ai dispositivi finali, in questo caso agli scambiatori di calore, quanto ottenuto sui singoli campioni.

In generale, le risposte sforzo-deformazione osservate in strutture come *Diamond* e *I-WP* sottolineano l'importanza dell'uniformità nella distribuzione delle celle, capace di ridurre i punti di concentrazione dello stress e consentire una transizione più omogenea del comportamento da elastico a plastico. Ciò è particolarmente rilevante, al fine di ottenere strutture in grado di esibire un efficiente assorbimento di energia e capacità portante [28].

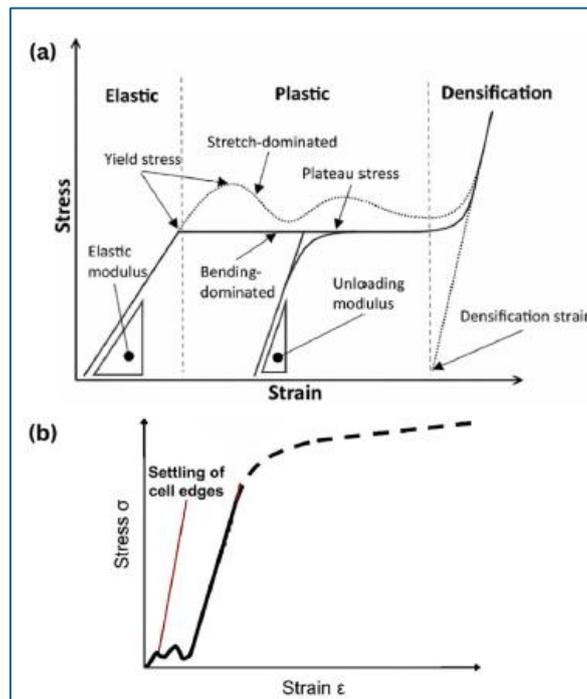


Figura 9: a) Fasi della curva sforzo-deformazione per reticoli dominati dalla flessione e dalla trazione; b) Evidenza fase di assetamento delle celle del reticolo TPMS sotto carico

Riguardo al comportamento delle strutture TPMS sottoposte a compressione statica, lo studio condotto da *Li et al* dimostra come le strutture “skeletal” siano dominate dalla deformazione per flessione, mentre quelle a “foglio” dalla deformazione per trazione. Il test è rappresentato da prove di compressione monoassiale a velocità di traslazione controllata. Sebbene le immagini SEM delle strutture analizzate evidenzino che il processo SLM consente di ottenere strutture con buona fabbricabilità, tutte le superfici dei campioni presentano residui di polvere (Ti6Al4V) non fusa. La presenza della polvere, in quantità proporzionale all’area superficiale, influenza inevitabilmente il peso di ciascun campione. Si è notata, infatti, una discrepanza tra il peso teorico (ottenuto dal prodotto del volume del campione e la densità relativa) ed il peso effettivo. Nonostante le piccole variazioni di peso, si ritiene che la densità relativa teorica possa essere utilizzata per studiare il comportamento delle diverse strutture. I risultati ottenuti definiscono che le strutture a “foglio” rappresentano una struttura molto valida in applicazioni che richiedono elevate prestazioni meccaniche sotto compressione, in particolar modo la struttura *Sheet Diamond*. Le strutture “skeletal”, come la *Skeletal Gyroid*, invece, offrono comunque prestazioni interessanti, soprattutto in relazione al peso contenuto [8].

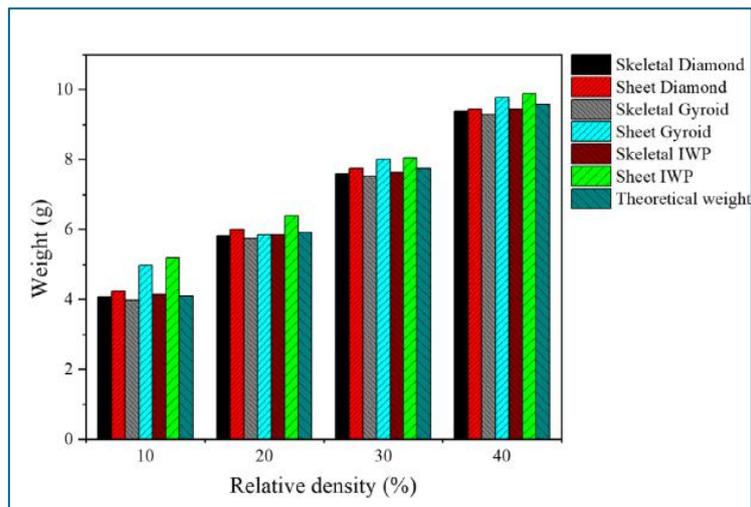


Figura 10: Confronto peso di ciascun campione con il relativo peso teorico

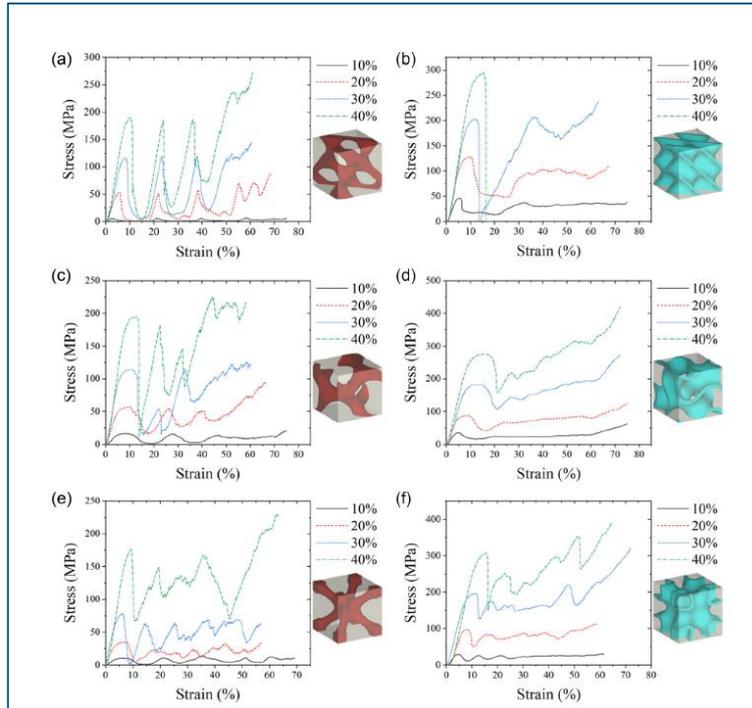


Figura 11: Analisi tensione-deformazione per diverse strutture cellulari. a) Skeletal Diamond, b) Sheet Diamond, c) Skeletal Gyroid, d) Sheet Gyroid,

Sebbene siano state condotte numerose ricerche sulle prestazioni quasi-statiche delle strutture TPMS, le loro performance dinamiche non sono state ancora pienamente analizzate. Nello specifico, le proprietà di smorzamento, fondamentali per attenuare le vibrazioni, non sono ancora completamente comprese, ostacolando potenziali applicazioni in ambiti come l'ingegneria civile e la rete ferroviaria. Tuttavia, un recente studio condotto da *Hao Fu et al*, ha provato a colmare questa lacuna, provando ad analizzare proprietà come la frequenza naturale, dinamica e rapporto di smorzamento rispetto a diversi tipi di struttura TPMS realizzate in resina fotosensibile composita, sotto condizioni di servizio [29].

5.2.1 Spessore della parete

Lo spessore della parete è un parametro cruciale che incide in maniera significativa sulle proprietà meccaniche della struttura TPMS. In accordo con i risultati sperimentali, l'aumento dello spessore della parete comporta generalmente un miglioramento delle prestazioni delle strutture. In particolare, denota un miglioramento della resistenza allo snervamento e un miglior supporto strutturale, riducendo il rischio di instabilità (*buckling*) e le concentrazioni di stress,

distribuendo in maniera più uniforme il carico. Pareti più spesse mostrano un plateau di stress ridotto con attenuazione di fluttuazioni, indicando una maggiore stabilità meccanica con una transizione più rapida dal comportamento elastico a quello plastico. Inoltre, riducono la concentrazione di deformazione e promuovono un collasso uniforme [28].

- *Schwarz Primitive (P)*: è la struttura che offre maggiore stabilità nella gestione dello stress e nell'assorbimento di energia attraverso i suoi strati cavi e intersecanti. Tuttavia, a causa della presenza di sottostrati con connessioni ad arco più deboli, tale struttura, analizzata con spessore di parete compreso tra 0.50-2.10 mm, esibisce un aumento progressivo dello stress con fluttuazioni dovute al collasso sequenziale dei sottostrati, e caratterizzati dalla presenza di cedimento iniziale con un picco del valore di stress pari a 1.55 MPa [28].

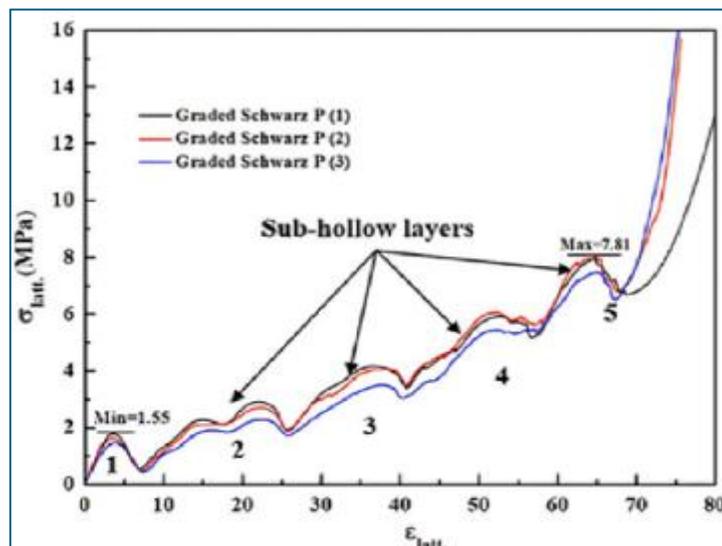


Figura 12: Curva sollecitazione-deformazione struttura Graded Schwarz-P con spessore di parete 0.50-2.10mm

- *Gyroid (G)*: il suo design continuo e interconnesso consente di ottenere una distribuzione uniforme dello stress, ottenendo una distribuzione omogenea del carico attraverso la struttura. Si è rilevata una regione lineare iniziale seguita da un plateau di stress relativamente costante con fluttuazioni minime a 2.90 MPa, per spessori di parete gradualmente da 0.50 a 1.50 mm [28].

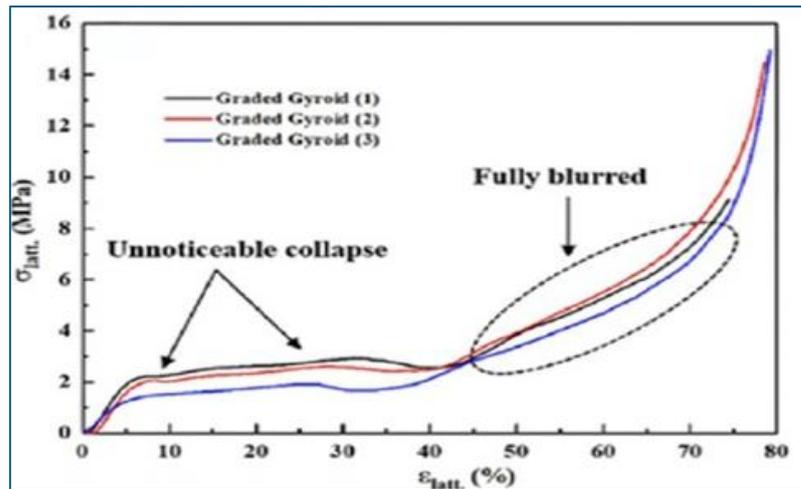


Figura 13: Curva sollecitazione-deformazione struttura Graded Gyroid con spessore di parete 0.50-1.50mm

5.2.2 Densità relativa

Altro parametro cruciale sul comportamento sforzo-deformazione è la densità relativa. Gli studi mostrano che un aumento della densità relativa dei reticoli TPMS comporta un aumento complessivo della resistenza meccanica, in quanto consente una distribuzione più uniforme dello stress, riducendo le variazioni nelle fluttuazioni della sollecitazione. Il modello di Gibson-Ashby è in grado di fornire un quadro teorico per comprendere meglio la relazione che sussiste tra la densità relativa e le proprietà meccaniche, suggerendo che il modulo elastico e la resistenza allo snervamento delle strutture porose possono essere regolati modificando la densità relativa per adattare la struttura al carico specifico. In generale, all'aumentare della densità relativa, al limite per un solido completamente denso, le proprietà intrinseche del materiale diventano più importanti del design geometrico del reticolo. Campioni con maggiori densità mostrano picchi di stress iniziali più elevati e fluttuazioni di stress meno pronunciate durante la deformazione. In particolare, campioni con densità 16-21% mostrano un picco di stress (90.1 MPa) superiore a campioni con densità inferiori, 10-16% (43 MPa) e 13-19% (67.8 MPa) [28].

- *Diamond* (D): insieme alla *Gyroid*, rappresentano le strutture che esibiscono le migliori prestazioni. Il comportamento delle strutture *Diamond* con diverse densità relative mostra un aumento costante dello stress di plateau all'aumentare della densità. In particolare, aumenta da 33.39 MPa fino a 62.35 MPa. Inoltre, nelle strutture uniformi si osserva un cedimento per taglio improvviso [28].

- *I-WP*: la struttura *I-WP* con porosità inferiore (60%) è in grado di raggiungere uno stress di plateau più elevato (36MPa) rispetto al caso di un'analogia struttura più porosa (80%) che presenta uno stress di plateau ridotto e pari a 16.4 MPa [28].

5.2.3 Porosità

La porosità è il parametro che definisce la porzione di spazi vuoti all'interno della struttura ed è direttamente correlata alla densità relativa del materiale. All'aumentare dell'una, l'altra diminuisce. In particolare, un aumento della porosità riduce la resistenza della struttura e ciò è dovuto alla minore quantità di materiale solido per unità di volume disponibile per distribuire i carichi ed assorbire lo stress. Minore densità significa, dunque, anche meno percorsi per distribuire il carico, causando concentrazioni di stress.

Ad evidenziare tale comportamento, lo studio condotto da *Samudin et al.* mostra che a porosità più basse (26.9%) corrispondono resistenze di snervamento più elevate (667.68 MPa), mostrando un aumento del 57% rispetto ad un'analogia struttura con porosità più alta (53.7%) e resistenza allo snervamento più bassa (370.56 MPa) [28].

Inoltre, per strutture *Gyroid*, al diminuire della porosità, lo stress di plateau aumenta in maniera significativa: si passa da 360.2 MPa per una porosità di 0.61 a 511.2 MPa per porosità di 0.48. Nelle strutture *Gyroid*, il plateau di stress presenta fluttuazioni, attribuite a frattura periodica e densificazione degli strati, con porosità accentuate che denotano una sostanziale deformazione plastica. Dai risultati ottenuti si rileva che una minore porosità è in grado di rinforzare significativamente le strutture dal punto di vista della resilienza meccanica. In quest'ottica diventano fondamentali anche le dimensioni dei pori. Pori di dimensioni inferiori fanno in modo che si riducano le aree suscettibili a deformazione plastica, minimizzando i punti deboli della struttura [28].

5.2.4 Residui di polvere

Infine, residui di polvere possono restare intrappolati durante il processo di fabbricazione, inducendo una certa eterogeneità della struttura. In questo modo si riduce la porosità della struttura, causando la presenza di segmenti iniziali non lineari nelle curve sforzo-deformazione e inducendo cedimento localizzato durante le prime fasi di deformazione [28].

5.2.5 Dimensioni della cella unitaria

Un ulteriore parametro che influisce sulla resistenza delle strutture TPMS è la dimensione della cella unitaria. Nello specifico, celle unitarie di dimensioni più piccole tendono a mostrare valori

più elevati di resistenza allo snervamento. Ad esempio, una cella di 0.6 mm presenta una resistenza allo snervamento di 317.48 MPa superiore del 93% circa rispetto ad un'analoga cella di dimensioni pari a 2 mm. In generale, un aumento delle dimensioni della cella corrisponde anche ad un aumento delle dimensioni dei pori presenti, riducendo la densità del materiale. Il tutto comporta una minore resistenza allo snervamento e un minore capacità di supporto strutturale [28].

5.3 Test per la determinazione delle proprietà meccaniche

Per semplicità, la maggior parte dei test meccanici condotti sulle strutture reticolari realizzate tramite fabbricazione additiva, in particolare con tecnica SLM, viene eseguita mediante prove di compressione. Ciò è dovuto principalmente al fatto che per i test di trazione è richiesto un opportuno design dell'interfaccia campione-banco di prova. In compressione, invece, i test possono essere eseguiti semplicemente schiacciando il reticolo tra due piastre [3].

❖ *MODELLO DI GIBSON-ASHBY*

Il modello più comune e universalmente accettato per la previsione delle proprietà delle strutture cellulari, comprese quelle reticolari, è il modello di *Gibson-Ashby*. In funzione della densità relativa della struttura si possono prevedere una serie di proprietà meccaniche, termiche ed elettriche. A seconda poi dal comportamento esibito dalla struttura, se dominata da flessione o trazione, vengono fornite differenti relazione per le varie proprietà meccaniche. Il modello di Gibson-Ashby fa riferimento alla densità relativa come parametro principale che influenza le proprietà meccaniche delle strutture[3]. La densità relativa è definita come il rapporto tra le densità della struttura reticolare (ρ_L) e la densità del materiale di base solido (ρ_S), stampato mediante fabbricazione additiva ($\rho_S < \rho_{bulk}$).

$$\rho^* = \left(\frac{\rho_L}{\rho_S} \right) \cdot 100\%$$

La curva sollecitazione-deformazione prevede, dunque tre differenti zone esprimibili in funzione del comportamento esibito dalla struttura:

1. la sezione elastica lineare è correlata alla flessione per le pareti cellulari inclinate e alla trazione per le pareti cellulari verticali.
2. la sezione di plateau è correlata alla creazione di cerniere plastiche nelle sezioni o giunzioni delle pareti cellulari. Per materiali plastici è una sezione quasi piatta, mentre i materiali fragili mostrano una fluttuazione attorno a un valore di sollecitazione.

3. superato il punto di densificazione corrispondente a ϵD , la struttura entra nella sezione di densificazione, dove avviene il collasso delle singole pareti. In questo modo, la sollecitazione si trasferisce attraverso tutta la struttura, vedendo incrementare la sollecitazione, con danneggiamento finale dell'oggetto.

Gli studi sperimentali sono in accordo con il modello di Gibson-Ashby, tuttavia:

- le sollecitazioni residue derivanti dal processo di fabbricazione (SLM) possono indurre deformazioni a livelli di sollecitazione inferiori a quelli previsti
- la densità del reticolo può essere sovrastimata a causa del fatto che i componenti fabbricati con SLM, spesso, presentano polvere fusa che aderisce alla superficie. Ciò implica un aumento di volume senza ottenere nessun contributo attivo per la resistenza, introducendo, pertanto, un errore di calcolo della densità relativa effettiva con discrepanze rispetto ai risultati attesi
- le strutture reticolari, sotto carico, possono esibire sia comportamento elastico lineare che non, rendendo difficile l'identificazione del modulo corretto

5.3.1 Modelli predittivi basati sull'intelligenza artificiale

Tra le più recenti prove condotte sulle strutture reticolari, a Cincinnati in Ohio, nel centro di ricerca di Vixiv i risultati sperimentali ottenuti sono significativamente utili per cercare di sviluppare modelli AI in grado di migliorare la progettazione dei reticoli. L'obiettivo proposto è quello di condurre prove di rottura per compressione su tanti piccoli campioni di strutture lattice con geometria differente realizzati appositamente, in modo da fornire una quantità consistente di dati volti all'implementazione di un modello di intelligenza artificiale. Tale modello dovrà quindi essere in grado di fornire una risposta concreta per la progettazione e simulazione numerica dei reticoli, in funzione delle diverse condizioni di carico a cui sono sottoposti [30].

5.3.2 L'anisotropia nelle strutture reticolari TPMS

L'anisotropia delle strutture porose influenza le proprietà meccaniche, e, per tale motivo, è necessario ricercare le cause che inducono il fenomeno e quali effetti comporta. La causa principale risiede nel processo di fabbricazione delle strutture a reticolo: nei processi di

Additive Manufacturing, a causa della realizzazione strato su strato del reticolo, è inevitabile riscontrare anisotropia nelle strutture.

Molti esperimenti hanno dimostrato una differenza della microstruttura nel piano orizzontale (perpendicolare alla direzione di costruzione) e quella nel piano parallelo alla direzione di costruzione. L'anisotropia delle proprietà meccaniche è causata principalmente dall'anisotropia della microstruttura. In aggiunta, l'orientamento delle celle rispetto alla direzione di applicazione del carico influisce significativamente sulla risposta delle strutture a reticolo anisotrope [3].

Dalle prove meccaniche condotte sulle strutture reticolari è possibile definire le risposte esibite dai componenti per trarre informazioni utili a spiegare il comportamento e le proprietà delle strutture analizzate. Tramite le prove condotte da *David W. Et al.* è stato applicato un set di carichi di compressione sia in direzione verticale che orizzontale a strutture *Gyroid* stampate in 3D. Dall'analisi delle curve forza-spostamento è emerso che l'anisotropia indotta dall'orientamento degli strati nella stampa 3D influenza la struttura *Gyroid*, che in precedenza, in maniera approssimativa, era stata considerata teoricamente quasi isotropa. È possibile, inoltre, ottimizzare i parametri geometrici delle strutture TPMS: ad esempio, regolando il gradiente della frazione di volume, lo studio condotto da *Nan Li et al.*, sul TPU propone un'ottimizzazione per far in modo di superare l'influenza dell'anisotropia causata dall'orientamento degli strati della struttura reticolare. I risultati ottenuti, attraverso un'analisi agli elementi finiti, mostrano che [10]:

- la distribuzione degli sforzi sul pattern *Gyroid* è simile per diverse frazioni di volume analizzate
- la distribuzione degli sforzi interni risulta più uniforme
- la concentrazione degli sforzi interni si riscontra sui bordi esterni appuntiti o sulle pareti sottili

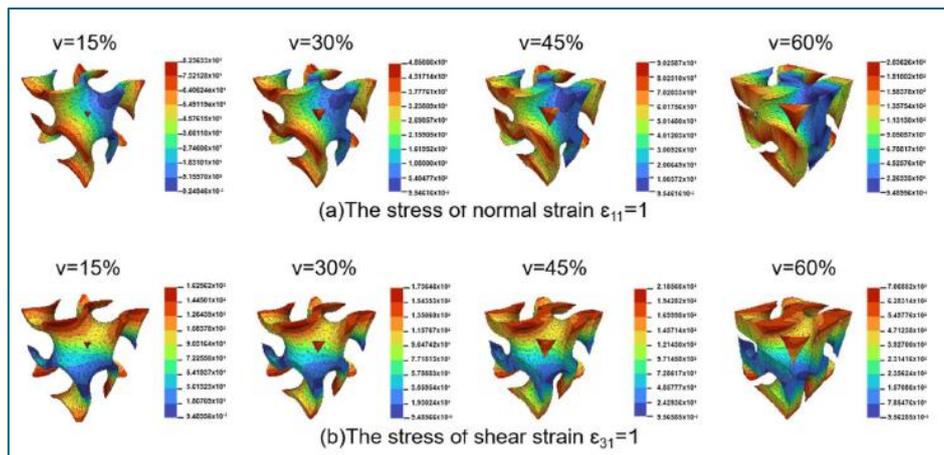


Figura 10: Analisi delle distribuzioni di sollecitazioni interne alla struttura Gyroid per differenti frazioni di volume

Attraverso l'esecuzione di test di compressione nelle direzioni X, Y e Z, i risultati definiscono che il modulo elastico presenta un'evidente tendenza all'anisotropia nella direzione orizzontale. Rispetto all'orientamento degli strati nella direzione Z (direzione di costruzione della stampa) la risposta nelle direzioni X e Y è leggermente inferiore [10].

In altre parole: per una struttura isotropa le prestazioni meccaniche delle parti stampate in 3D dipendono sempre dalla direzione di costruzione.

Dal momento che le proprietà meccaniche delle strutture sono principalmente influenzate dall'anisotropia della microstruttura, è necessario adottare alcune contromisure per contenere tale fenomeno. Si può pensare, infatti, di:

- *Ottimizzare i parametri del processo di stampa*
- *Migliorare e rendere più efficiente l'intero processo di stampa*
- *Introduzione di un modello anisotropo reale nel modello di ottimizzazione per garantire alte performance delle strutture ottenute [31]*

In accordo con gli studi condotti, i risultati ottenuti dall'analisi mediante elementi finiti condotta da Zhang *et al.* eseguendo un test di compressione su diverse strutture reticolari TPMS (Gyroid, Diamond, Primitive e I-WP) ha dimostrato che l'anisotropia della struttura I-WP ruotata nella direzione (110) è la più significativa, con un incremento del modulo elastico relativo del 275,33% per una rotazione di 60° in tale direzione. Ciò indica che le prestazioni sotto compressione unidirezionale delle strutture TPMS possono essere notevolmente migliorate sfruttandone l'anisotropia. Tuttavia, è importante evidenziare che tale condizione può anche ridurre drasticamente le prestazioni in direzioni specifiche. Ad esempio, dopo una rotazione

di 60° nelle direzioni (111) e (110) , il modulo elastico relativo della struttura *Primitive* è diminuito rispettivamente del 72,66% e del 77,6%. Pertanto, in condizioni operative complesse, è essenziale valutare adeguatamente la capacità di carico lungo le direzioni più critiche.

Sfruttando l'anisotropia dei reticoli, sono state progettate e realizzate strutture TPMS a gradiente con tre angoli di rotazione, utilizzando la tecnologia di *Selective Laser Melting* (SLM). I test di compressione hanno rivelato la comparsa di picchi multipli nella struttura *Primitive* con rotazione graduale da 0° a 40° nella direzione (111) , mentre nella struttura *I-WP* con rotazione graduale da 0° a 60° nella direzione (110) si è osservato un comportamento a fasi successive. Questi risultati dimostrano che è possibile migliorare il plateau di snervamento ottimizzando la rotazione gradiente, sfruttando proprio l'anisotropia delle strutture porose TPMS.

I risultati ottenuti da tale prova possono essere riassunti nei seguenti punti [18]:

- La simulazione FEM ha verificato la relazione di simmetria cristallografica delle strutture *Gyroid*, *Diamond*, *Primitive* e *I-WP*. In particolare, è stata riscontrata una significativa anisotropia nelle strutture *Gyroid* e *Diamond* ruotate attorno alla direzione (111) , con il più alto modulo elastico relativo ottenuto ruotando la struttura di 60° , mentre per la struttura *I-WP* si ottiene attorno alla direzione (110) .
- Le prestazioni sotto compressione unidirezionale delle TPMS possono essere notevolmente migliorate mediante rotazione attorno ad un orientamento specifico. Tuttavia, è importante notare che, a causa della marcata anisotropia, le prestazioni delle TPMS diminuiscono significativamente in direzioni specifiche. Pertanto, nella progettazione di strutture per condizioni operative complesse, è necessario valutare adeguatamente la capacità di carico nelle direzioni più fragili.

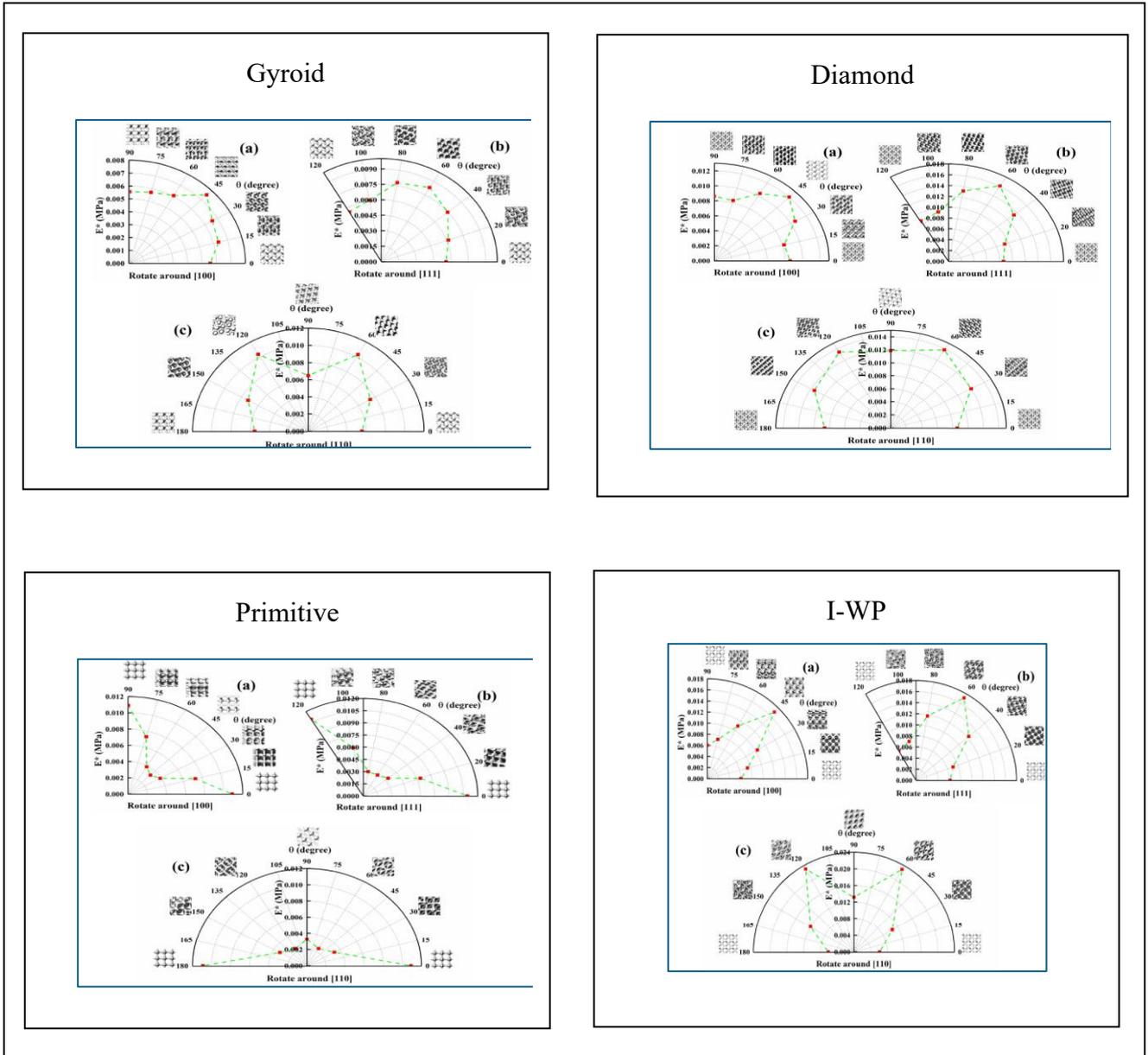


Figura 11: Diagramma polare del modulo elastico delle diverse strutture orientate secondo le direzioni [100],[111] e [110]

5.3.3 Meccanismi di deformazione

Le proprietà meccaniche dei reticoli TPMS dipendono dalle proprietà dei materiali costituenti, dalla densità relativa, dalla topologia esibita, dalla scala di lunghezza e possono essere espresse in funzione della densità relativa mediante una legge di potenza di scala:

$$\theta = C \cdot \theta_s \cdot \rho_r^n$$

Ove, θ e θ_s rappresentano rispettivamente le proprietà del materiale e del solido costituente. C , invece, è un parametro geometrico e n è un esponente di adattamento. I valori assunti sono strettamente correlati all'architettura della struttura.

Le geometrie TPMS presentano coefficienti esponenziali più piccoli rispetto alle geometrie strut-based. Inoltre, il comportamento delle TPMS a foglio è più vicino al comportamento dominato dalla trazione.

Pertanto, i reticoli sono classificati a seconda della loro modalità di deformazione. Le strutture dominate dalla trazione tendono ad avere maggiore rigidità e resistenza a parità di densità relativa rispetto ai reticoli dominati dalla flessione. Test di compressione statica hanno dimostrato che, alla stessa densità relativa, le strutture a strati hanno proprietà meccaniche migliori rispetto alle strutture scheletriche e sono dominate da fratture compressive, mentre le strutture scheletriche sono dominate da fratture stratificate [3].

5.3.4 Risposta alle sollecitazioni impulsive

Un ulteriore aspetto di cui bisogna tener conto è la risposta esibita dalle strutture TPMS a sollecitazioni impulsive ad alta velocità di deformazione. Lo studio condotto da *Novak et al.* prevede prove di compressione a quattro diverse velocità di deformazione: quasi statico, bassa dinamica, alta velocità e altissima velocità. Le curve sforzo-deformazione ricavate, evidenziano un limitato incrudimento per velocità di deformazione quasi statiche e dinamiche basse, mentre il modo di deformazione a shock ad altissima velocità di deformazione induce un significativo incrudimento delle strutture. Tale aumento di resistenza è attribuibile sia all'incrudimento intrinseco del materiale base, soggetto al carico, sia agli effetti di inerzia. I test condotti sui provini ibridi definiscono in che modo l'orientamento del campione influenza significativamente la risposta meccanica ad alta velocità di deformazione. Inoltre, tale risposta può essere progressiva (struttura meno rigida all'estremità di impatto) o regressiva (struttura più rigida all'estremità di impatto). I risultati sperimentali, in accordo con quelli computazionali, evidenziano che la deformazione plastica è dominata da una combinazione di flessione e trazione, caratterizzata da comportamento duttile e senza segni di fratture macroscopiche. Pertanto, sia i classici pattern TPMS che le strutture ibride, presentano una significativa sensibilità alla velocità di deformazione [32].

Mediante gli andamenti delle curve sforzo nominale – deformazione nominale delle prove di compressione quasi-statica a strutture TPMS è possibile determinarne le proprietà relative alla compressione. Similmente a quanto accade per i materiali porosi convenzionali, la curva di compressione presenta una fase elastica, un “plateau” e una fase di densificazione. Nella fase elastica, le strutture TPMS subiscono piccole deformazioni e lo sforzo aumenta linearmente. Raggiunto la zona di plateau, lo sforzo rimane pressoché costante, mentre la deformazione aumenta rapidamente. In termini di modalità di deformazione, la maggior parte delle strutture TPMS presenta una deformazione uniforme, dove ogni strato di cella unitaria si deforma in maniera simile. I diversi tipi di strutture a cella unitaria presentano anche differenti modalità di deformazione. Ad esempio, la struttura *P* ha pareti sottili particolarmente inclini ad instabilità, che portano ad un fenomeno indebolimento nella fase di plateau durante la compressione. Tale fenomeno non è evidente nelle curve di strutture multicellulari, mentre le strutture di tipo *G* e *D* mostrano una tendenza al rafforzamento. Analogamente, una struttura *P* con frazione di volume del 20% presenta bande di taglio a forma di “X” durante la compressione, mentre una struttura di tipo *D* con la stessa frazione di volume presenta una banda di taglio esagonale. In una struttura I-WP, nelle fasi iniziali della compressione, la deformazione avviene principalmente nelle celle unitarie situate al centro e perpendicolari alla direzione di carico [23].

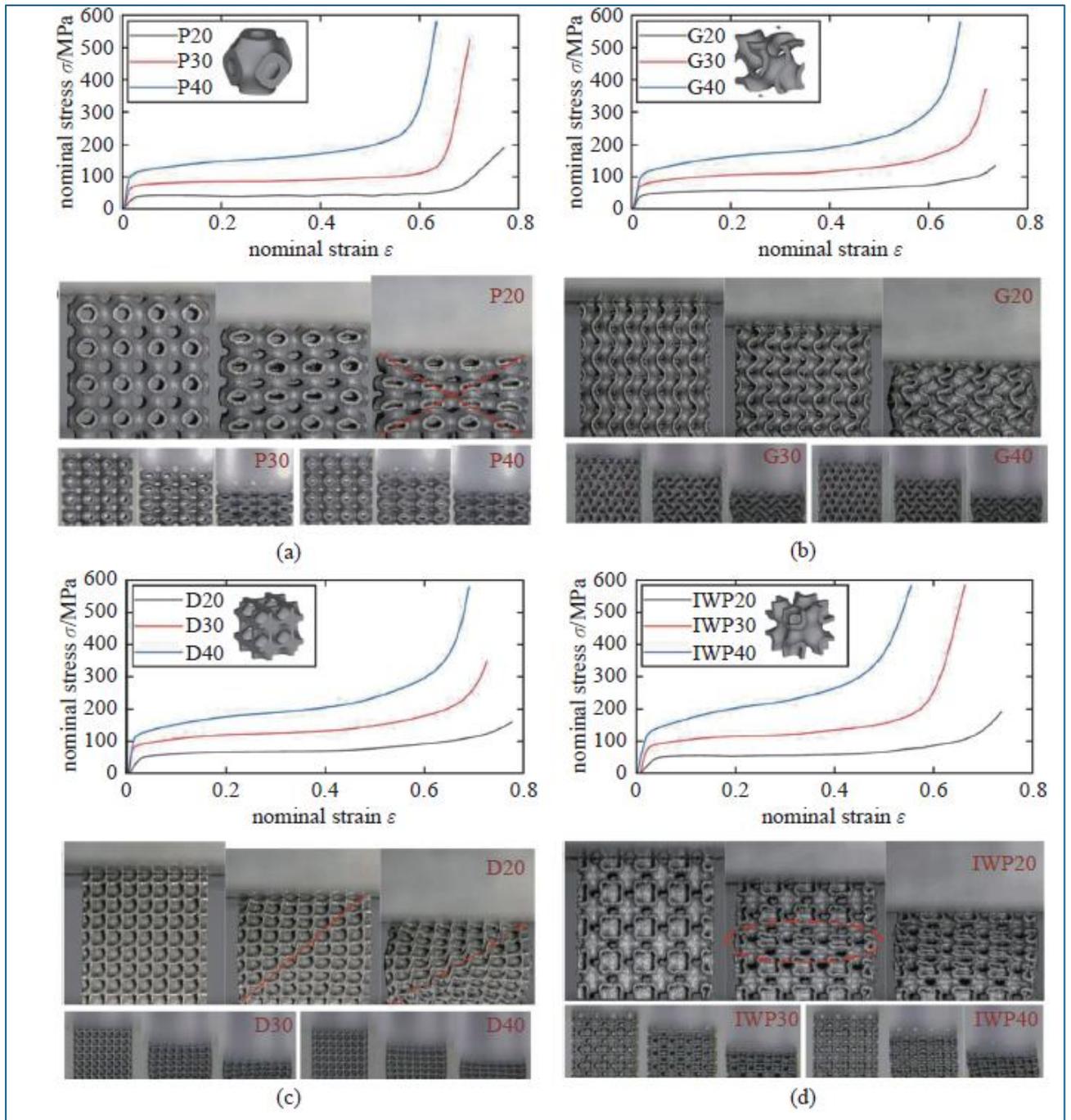


Figura 12: Analisi curve sforzo-deformazione e verifica cedimento per strutture reticolari a differenti frazioni di volume: Primitive, Gyroid, Diamond e I-WP

Attraverso simulazioni agli elementi finiti, si dimostra che in compressione le celle unitarie delle strutture TPMS di tipo di *D* e *G* presentano una distribuzione dello sforzo relativamente uniforme. Pertanto, tali strutture esibiscono un meccanismo di collasso stabile e prestazioni ideali in termini di assorbimento energetico [23].

5.3.5 Resistenza a fatica e durabilità

Per poter definire le proprietà a fatica delle strutture reticolari basate su TPMS, si effettua una simulazione dell'Elemento di Volume Rappresentativo (RVE) dell'intera struttura. Questo deve contenere tutte le caratteristiche rilevanti sulla descrizione statistica della microstruttura e deve essere sufficientemente grande da avere le proprietà macroscopiche medie del materiale, indipendentemente dalla posizione all'interno del pezzo. Noto poi il comportamento dell'RVE, la teoria consente di collegare le scale di lunghezza e di risalire alle proprietà macroscopiche del materiale.

Tramite tecniche di omogeneizzazione, che mirano a fornire un comportamento complessivo del materiale, si possono ottenere sollecitazioni e deformazioni in materiali compositi, in cui le diverse fasi si comportano in maniera differente microscopicamente. Il risultato della tecnica consta nella sostituzione del materiale eterogeneo con uno fittizio omogeneo, le cui caratteristiche globali derivano da una buona approssimazione di quelle macroscopiche. Generalmente, il processo di omogeneizzazione può essere diviso in due passaggi:

1. Si risolve il problema locale mediante sostituzione con materiale omogeneizzato caratterizzato da proprietà equivalenti
2. Si risolve il problema complessivo mediante sostituzione con materiale omogeneizzato caratterizzato da proprietà equivalenti

Complessivamente, il comportamento è ottenuto attraverso la ripetizione dell'RVE lungo i tre assi principali. Per far in modo che le facce opposte dell'RVE combacino tra loro come parti di un puzzle sia in situazioni non deformate che deformate, si applicano condizioni al contorno periodiche (PBC). Tale condizione si realizza numericamente, imponendo la medesima discretizzazione ad elementi finiti su facce opposte dell'RVE e collegando i gradi di libertà corrispondenti all'interno di ogni coppia di facce. In questo modo le PBC riescono a garantire la continuità di sollecitazione e spostamento in tutta la struttura composta da differenti RVE.

I campi di stress e deformazione microscopici sono fortemente disomogenei, essendo influenzati da parametri microstrutturali, come: l'orientamento dei grani, le disparità nella rigidità elastica delle diverse fasi e le proprietà dei bordi dei grani e di altre interfacce. Se si presume che la scala della frattura sarà molto maggiore della scala microscopica, allora le sollecitazioni possono essere calcolate come quantità medie, trascurando le loro variazioni locali. Tuttavia, è noto che molti processi di rottura avvengono su scala microstrutturale, come

nel regime HCF. Pertanto, la teoria delle Distanze Critiche (CD) mira a modificare la meccanica del continuo per considerare le scale di lunghezza cruciali in un materiale. L'obiettivo della teoria CD è la determinazione della distanza critica (L) e della sollecitazione critica (σ_0) [3].

Dalle prove condotte da *Maskery et al.* su strutture reticolari a doppio giroide (*DG*) realizzate mediante fusione laser selettiva in AlSi10Mg, lega di alluminio ad alta resistenza, si valuta la modalità di rottura per compressione associata alle dimensioni delle celle costituenti il reticolo. La modalità di collasso successivo degli strati è stata riscontrata nei provini con celle di dimensioni 4.5 mm e 6 mm, in cui il collasso avviene nei piani perpendicolari alla direzione di fabbricazione e carico (asse z). Le relative curve sforzo-deformazione associate a questo tipo di rottura mostrano un'aliquota di forza persa e recuperata ripetutamente man mano che ogni strato collassava e veniva compresso in quello sottostante. Dopo la densificazione di ogni strato, la struttura diventa sempre più resistente, recuperando fino a circa il 90% della resistenza iniziale, prima di raggiungere il 50% di deformazione [33].

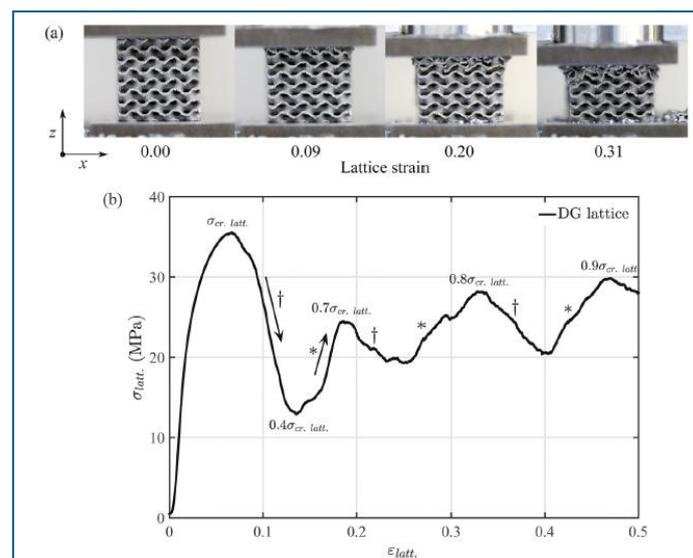


Figura 13: Evidenza collasso di strati successivi in struttura reticolare DG sottoposta a prova di compressione

Nelle celle di dimensioni maggiori, 6 mm e 9 mm, è stata evidenziata una rottura di tipo fragile, caratterizzata dalla propagazione di una o più cricche all'interno del reticolo, in direzione parallela al carico applicato. La complessità della geometria DG non aiuta nell'identificazione del punto di inizio della propagazione della cricca, sebbene sia molto probabile che si origini da un difetto preesistente. Attraverso analisi più approfondite è stato possibile determinare la propagazione della cricca: essa può biforcarsi perpendicolarmente alla sua direzione di propagazione attraverso le pareti della cella, realizzando un percorso di propagazione tortuoso attraverso la struttura [33].

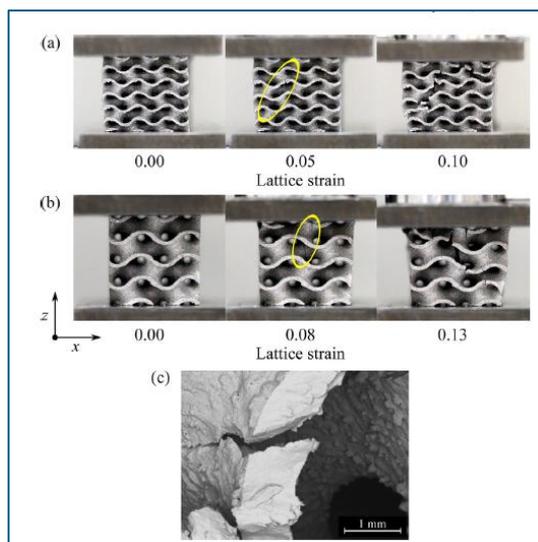


Figura 14: Innesco e propagazione della frattura in strutture lattice DG

Nei provini con reticoli caratterizzati da celle più piccole, di dimensioni di 3 mm, si è riscontrata una modalità di rottura caratterizzata da un taglio diagonali a 45° rispetto alla direzione di carico. Le rispettive curve sforzo-deformazione mostrano una perdita iniziale del 50% della forza, seguita da un rinforzo relativamente uniforme attraverso la densificazione. [33].

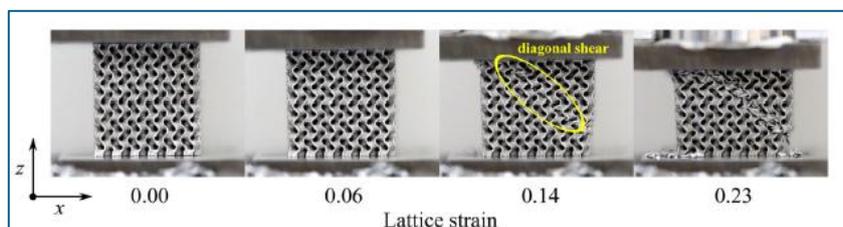


Figura 15: Visualizzazione cedimento per taglio diagonale

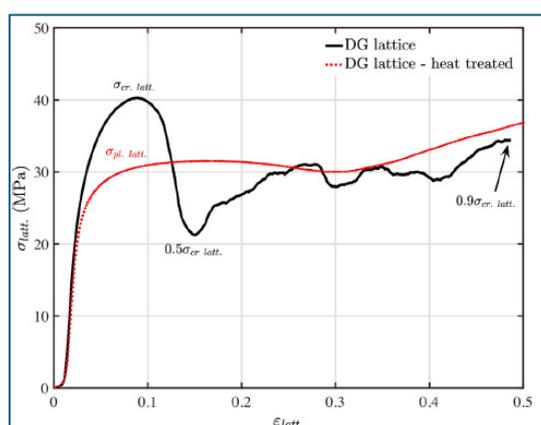


Figura 16: Confronto curva stress-deformazione per campione "as-built" e sottoposto a trattamento termico

Appare evidente, dunque, che la modalità di rottura per compressione del reticolo DG è correlata alle dimensioni delle celle costituenti il reticolo. In generale, per evitare la rottura strutturale a bassa deformazione dovuta a frattura localizzata e propagazione delle cricche,

occorre scegliere una dimensione più piccola di cella. Tuttavia, ciò implica un problema pratico, in quanto le caratteristiche più piccole delle celle non devono avvicinarsi alla risoluzione di fabbricazione della piattaforma AM [33].

In generale, il comportamento a fatica delle strutture reticolari soggetti a carico dinamico può essere suddiviso in tre fasi principali:

1. La deformazione aumenta repentinamente con una redistribuzione plastica delle sollecitazioni di picco in punti critici del reticolo caratterizzati da elevate concentrazioni di sollecitazioni, seguita da una stabilizzazione elastica (elastic-shakedown). La parte più ampia di questa fase è dominata dal ratcheting, ovvero un accumulo progressivo di deformazione anelastica, che in letteratura è imputato a fenomeni di creep viscoso. Boniotti et al. hanno osservato che tale fenomeno è caratterizzato da un valore costante dell'ampiezza di deformazione (sa) e un valore crescente della deformazione media (sm).
2. Si verifica un improvviso aumento del tasso di ratcheting solitamente correlato all'inizio della propagazione del danno in una o poche posizioni critiche del materiale reticolato. Il numero di cicli all'inizio del danno è definito come un incremento dell'1% rispetto al valore iniziale costante dell'ampiezza di deformazione. La deformazione cumulativa rimane approssimativamente costante per circa 10^4 - 10^6 cicli.
3. L'ultima fase prevede che la deformazione cumulativa aumenta in maniera esponenziale, culminando nella rapida rottura del provino a causa dell'improvviso aumento della deformazione media prodotta dalla coalescenza di diverse cricche.

Il numero di cicli a rottura è definito come il punto di intersezione tra la linea di ratcheting e la linea che si adatta agli ultimi punti di sm prima della fine del test.

I parametri che influenzano in maniera significativa le proprietà a fatica delle strutture reticolari sono:

- le proprietà meccaniche del materiale
- la densità relativa del reticolo
- la topologia della cella
- la geometria della cella

Le strutture reticolari con maggior densità relativa potrebbero sostenere carichi maggiori per un numero maggiore di cicli rispetto alle analoghe con densità relativa inferiore.

Dalle prove condotte da *Bobbert et al.* è emerso che biomateriali metallici porosi basati su TPMS hanno evidenziato che schiume TPMS presentano una resistenza a fatica a compressione significativamente migliorata rispetto ai reticoli a base di montanti, grazie a geometrie lisce e continue che inibiscono l'inizio e lo sviluppo di cricche di fatica.

Il ritardo nella formazione e nella crescita delle cricche di fatica può essere ottenuto inducendo sollecitazioni residue di compressione nella sotto-superficie dei componenti metallici. Diversi metodi si sono rivelati utili: sabbiatura, lucidatura a bassa plasticità, pallinatura, pallinatura laser e pallinatura a getto d'acqua. È possibile osservare tre differenti fasi nella rottura a fatica [3]:

- In pochi cicli, la deformazione aumenta rapidamente
- La deformazione accumulata non cambia significativamente (10^4 - 10^6 cicli)
- La deformazione cumulativa aumenta esponenzialmente, causando la rottura del provino dopo pochi cicli

5.3.6 Prestazioni energetiche e capacità di smorzamento

Per valutare le prestazioni delle strutture reticolari TPMS in termini di assorbimento di energia, lo studio condotto da *She et al.* prevede la simulazione di una struttura reticolare a cubo semplice (SC) cava e ottimizzata, traendo ispirazione dalla geometria del bambù. L'obiettivo è quello di ottenere un miglioramento simultaneo delle proprietà di carico e assorbimento di energia. Le strutture SC convenzionali presentano limitazioni significative sotto carichi di compressione, in particolare l'elevata concentrazione di stress ai nodi e l'instabilità di deformazione indotta, che compromettono la loro capacità di assorbimento di energia. Sfruttando le caratteristiche tipiche delle geometrie delle strutture TPMS, il design è volto a mitigare efficacemente questi problemi e migliorare l'assorbimento di energia. La struttura ibrida è stata ottenuta dalla combinazione di due diverse TPMS: la *Schwarz Primitive* (P), per via della sua somiglianza strutturale con la SC, e il termine di correzione derivato dalla superficie FR-D di Schoen. L'equazione implicita risultante per la superficie TSC incorpora due parametri costanti, A e C [34].

Le simulazioni agli elementi finiti dinamiche esplicite sono state condotte mediante il software *ABAQUS* per poter valutare l'influenza dei parametri geometrici sulle prestazioni di

assorbimento delle strutture TSC. I campioni reticolari sono stati stampati additivamente in acciaio inox 316L utilizzando la tecnica SLM [34].

Per poter validare i risultati numerici, sono stati fabbricati campioni di strutture P, SC e TSC aventi spessore uniforme di 0.3mm. Le prove di compressione quasi-statica sono state eseguite con velocità di discesa di 4mm/min, identica a quella utilizzata nelle simulazioni [34].

Dall'analisi approfondita delle simulazioni si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Il parametro di forma C influenza in modo significativo le prestazioni in termini di assorbimento di energia della struttura TSC. Il valore ottimale è pari a 0.6, che si traduce nella massima efficienza di assorbimento di energia e in uno sforzo di plateau più alto. Sebbene anche il parametro A abbia un'influenza sulle prestazioni, in particolare per valori compresi tra 0.45 e 0.5 migliora le prestazioni, risulta meno significativa rispetto al parametro C .
- La struttura TSC mitiga la concentrazione di stress, aumenta la stabilità della deformazione e risolve i problemi di *buckling* prematuro, contribuendo ad un migliore assorbimento di energia.
- Il confronto con le strutture metalliche tramite il grafico Ashby dimostra che la struttura TSC in 316L offre prestazioni in termini di assorbimento specifico superiori a densità relative molto basse, evidenziando il potenziale per applicazioni leggere ad alte prestazioni.

In definitiva, i risultati ottenuti dal confronto con altre strutture reticolari metalliche esistenti, hanno evidenziato notevoli prestazioni in termini di energia assorbita specifica, vantando caratteristiche di assorbimento delle strutture in acciaio 316L addirittura superiori rispetto ad alcune strutture in lega di titanio. Ciò esalta i vantaggi della struttura TSC in termini di leggerezza ed elevata capacità di assorbimento di energia [34].

Lo studio condotto da *Yu et al.* ha investigato su strutture TPMS a gradazione funzionale di densità, attraverso i reticoli Primitive e Gyroid stampati mediante SLA in resina fotopolimerica, valutandone proprietà meccaniche e capacità di assorbimento energetico. I risultati ottenuti attraverso prove di compressione uniassiale evidenziano che la struttura P a gradiente è in grado di assorbire 1,5 volte l'energia assorbita rispetto all'analogia struttura P uniforme (2.47 MJ/m³ contro 1.64 MJ/m³). Al contrario, per le strutture Gyroid, le analisi hanno mostrato poca differenza nell'assorbimento di energia tra le strutture a gradiente e uniforme (circa 2.49 MJ/m³ per l'uniforme e 2.51 MJ/m³ per il graduato). In conclusione, le strutture Primitive a gradiente

offrono una capacità di assorbimento dell'energia notevolmente superiore rispetto alle loro controparti uniformi, grazie al meccanismo di collasso progressivo strato su strato. Le strutture Gyroid, al contrario, mostrano valori di assorbimento di energia simili sia per le strutture uniformi che a gradiente, a causa della distribuzione dello stress più uniforme garantita dalla geometria. In ambito industriale questi risultati sono importanti per la progettazione di strutture leggere e per applicazioni di protezione dagli impatti [35].

Il vantaggio dell'utilizzo di materiali come resine e polimeri per applicazioni leggere e robuste in cui è richiesto un miglioramento dell'assorbimento di energia è stato evidenziato anche dallo studio condotto da *Todoh et al.* in cui è stato esaminato il PLA, biopolimero biodegradabile, per strutture a reticolo TPMS Gyroid combinate, realizzate mediante Fused Filament Fabrication (FFF) [36].

5.4 Analisi numerica e ottimizzazione dei modelli

Nell'ambito degli scambiatori di calore, l'analisi agli elementi finiti può essere impiegata per:

- Valutare la resistenza meccanica e la rigidità della struttura in funzione del materiale, della topologia, della porosità e dello spessore delle pareti. Quest'analisi è cruciale affinché venga garantita integrità strutturale del dispositivo durante le condizioni di funzionamento, in particolar modo se sottoposto a pressioni elevate del fluido o soggetto a carichi esterni molto intensi [13].
- Analizzare la distribuzione delle sollecitazioni all'interno della struttura, identificando eventuali zone critiche soggette a concentrazioni di stress che potrebbero portare a fenomeni di fatica o rottura [37].
- Ottimizzare la topologia e i parametri geometrici della struttura al fine di massimizzare la rigidità, minimizzare il peso e soddisfare specifici requisiti di resistenza meccanica [25]. Mediante implementazione con algoritmi di ottimizzazione, l'analisi FE può diventare uno strumento decisivo a identificare le configurazioni più idonee per garantire prestazioni ottimali in riferimento a specifiche applicazioni [37].
- Studiare il comportamento termo-meccanico, analizzando come le variazioni di temperatura, dovute allo scambio termico con il fluido, influenzano le proprietà meccaniche e la sua deformazione [25].

Tuttavia, per modellare accuratamente i reticoli, è fondamentale tener conto dei difetti di fabbricazione. Numerose ricerche si concentrano sulla validazione di modelli che incorporino difetti, o la presenza di rugosità superficiale, utilizzando dati da micro-tomografia computerizzata per poter quantificare le irregolarità geometriche[23].

Ad esempio, il modello di Gibson-Ashby è il più noto e accurato per la predizione delle proprietà delle strutture cellulari. In funzione della densità relativa della struttura è in grado di predire diverse proprietà meccaniche, termiche ed elettriche [9].

Lo studio condotto da *Santiago et al.* si è focalizzato sulla caratterizzazione meccanica e la modellazione numerica di strutture reticolari TPMS in acciaio INOX 316L realizzati tramite Additive Manufacturing, con l'obiettivo di sviluppare un modello numerico in grado di

investigare sulla risposta di tali strutture sotto carichi d'impatto. Per prima cosa, è stato necessario caratterizzare meccanicamente il materiale, realizzato mediante Selective Laser Melting (SLM). Le prove sono state condotte mediante una macchina di prova universale (UTM) per carichi quasi statici (0.001 s^{-1}) e una Split Hopkinson Pressure Bar per carichi dinamici (fino a 4000 s^{-1}). Si è osservata la risposta del materiale sia in compressione che in trazione, ove il materiale ha esibito una risposta elasto-plastica simile in entrambe le prove. Per la misurazione del campo di deformazione, è stata impiegata la tecnica Digital Image Correlation (DIC). Infine, dai test quasi-statici e dinamici, è stato possibile ricavare i parametri costitutivi del materiale. In particolare, i parametri del modello di plasticità di Johnson-Cook, dalle curve sforzo-deformazione. In tabella sono riassunti tutti i risultati della caratterizzazione.

Young's modulus, E (GPa)	Yield Stress, σ_y (MPa)	Ultimate strength, σ_{UTS} (MPa)	Fracture Stress, σ_f (MPa)	Fracture strain, ϵ_f
155±7	490±17	1070±47	1044±51	0.57±0.04
Poisson's ratio, ν	A (MPa)	B (MPa)	n	C
0.33±0.01	490±17	871±60	0.57±0.02	0.0072

Tabella 3: Riepilogo parametri costitutivi del materiale

Il modello agli elementi finiti è stato realizzato mediante il software Abaqus CAE. Per la validazione del modello sono state utilizzate delle strutture reticolari TPMS del tipo *Schwarz-Diamond* (S-D) di dimensioni cubiche di 16 mm. I modelli di simulazione sono stati realizzati per tre diverse densità relative medie: 27.1%, 34.5% e 44.8%.

Il modello agli elementi finiti ha dimostrato di essere in grado di predire il comportamento complessivo osservato sperimentalmente, sia sotto carico quasi-statico che dinamico, ottenendo una deviazione complessiva tra i risultati numerici e sperimentali per la tensione di plateau e di energia assorbita pari al 5.25%.

In aggiunta, è stato possibile prevedere anche i meccanismi di deformazione sotto carico delle strutture, come l'espansione laterale, per elevati livelli di deformazione, e la deformazione dominata dal taglio, costituita da deformazioni diagonali a plateau. In accordo con i test sperimentali, infine, non è stata prevista rottura evidente del materiale [38].

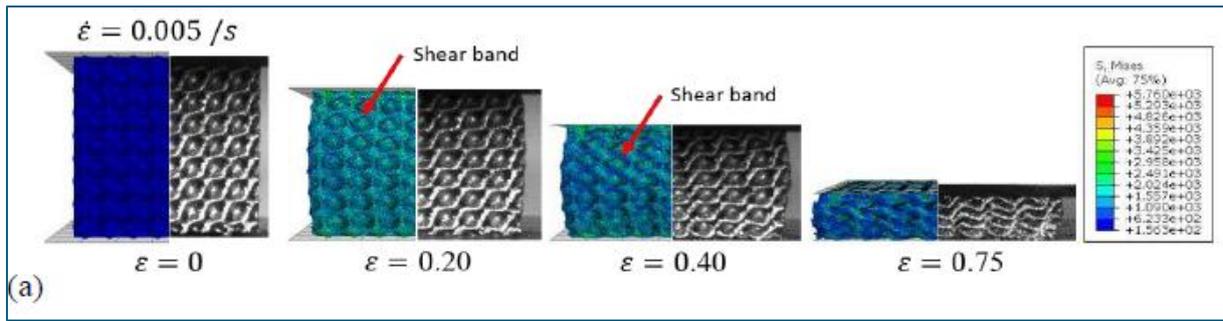


Figura 17: Confronto risultati numerici e sperimentali da prova di compressione quasi-statica per struttura TPMS SD

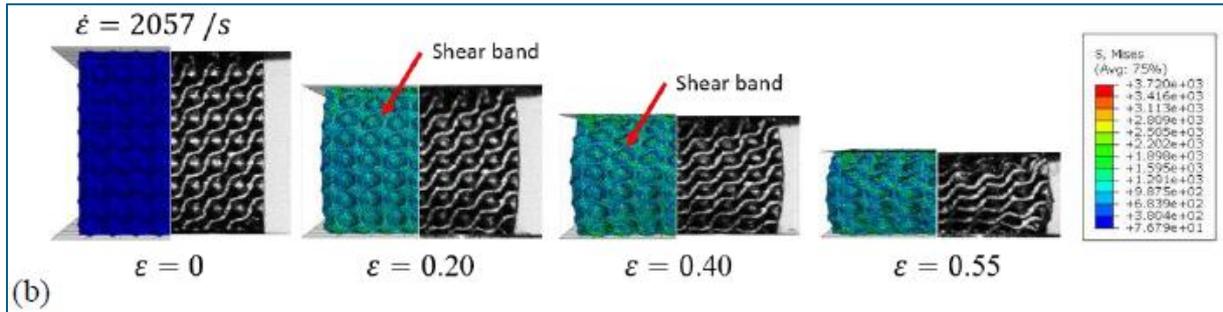


Figura 18: Confronto risultati numerici e sperimentali da prova dinamica per struttura TPMS SD

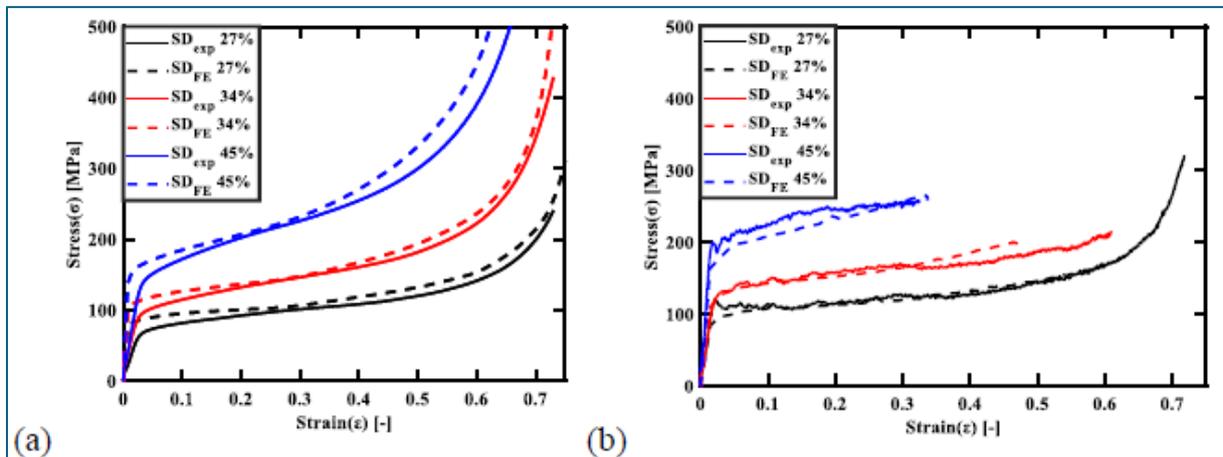


Figura 19: Risposta esibita dalla struttura TPMS SD: a) sotto carico statico; b) sotto carico dinamico

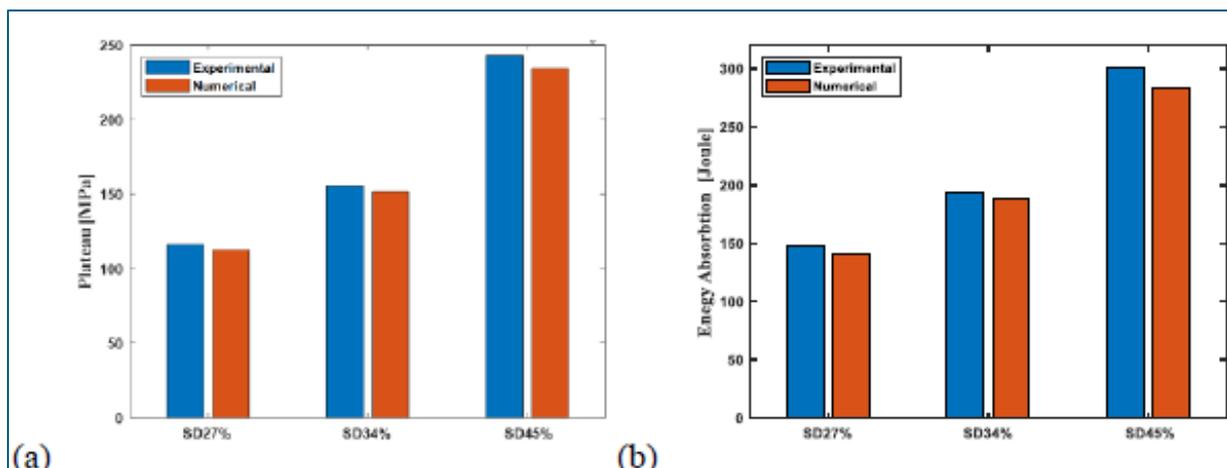


Figura 20: Confronto numerico e sperimentale: a) valore dello stress di plateau; b) valore dell'energia assorbita sotto carico dinamico

L'analisi agli elementi finiti delle TPMS ha mostrato quanto questa tipologia di struttura sia di gran lunga più efficiente in termini di resistenza meccanica abbinata alla leggerezza delle strutture ed efficienza termica rispetto ai tradizionali scambiatori di calore. Tuttavia, la complessità geometrica richiede maggiore integrazione tra progettazione computazionale e verifica sperimentale, nonché sviluppo di solutori FEM più efficienti per geometrie multiscala.

Con l'obiettivo di sviluppare e validare un approccio di modellazione surrogata per la simulazione di strutture TPMS in grado di colmare il divario tra la simulazione a livello di microstruttura e la loro applicazione in componenti reali, lo studio condotto da *Janpheng et al.* si concentra sull'applicazione di prove meccaniche quali: prove di compressione quasi-statica (250kN a velocità costante 0.033 mm/s), prove di compressione dinamica (velocità di impatto di 3340 mm/s), prova di flessione a quattro punti (trave di PLA con densità a gradiente tra 25% e 75%, per la validazione del modello). L'idea è quella di semplificare la struttura reale sostituendola con un modello di materiale surrogato per ridurre lo sforzo numerico. I risultati ottenuti sperimentalmente evidenziano come il modulo di Young vari a seconda della sezione trasversale considerata. Inoltre, il valore è significativamente influenzato dalla densità. Durante le prove di compressione è stato possibile notare anche la formazione di cricche interstrato. I risultati numerici ottenuti hanno evidenziato che il modello surrogato è in grado di descrivere adeguatamente il comportamento del materiale sotto compressione. In aggiunta, il vantaggio del modello surrogato è particolarmente rilevante, in quanto la simulazione di compressione

condotta sul modello surrogato può essere implementata e ottenuta in pochi minuti. La validazione del metodo, infine, è stata condotta mediante una simulazione di prova di flessione a quattro punti, evidenziando una buona approssimazione delle curve sforzo-deformazione: nella regione elastica, le curve risultano perfettamente allineate; nella regione plastica, la simulazione denota fluttuazioni maggiori (probabilmente a causa della dimensione elevata degli elementi); vicino al punto di rottura, i risultati differiscono e la causa è imputabile al fatto che i parametri del modello sono stati ottimizzati esclusivamente per una prova di compressione. Nonostante ciò, le differenze tra i risultati simulati e sperimentali sono piccole da confermare l'accuratezza del modello surrogato [39].

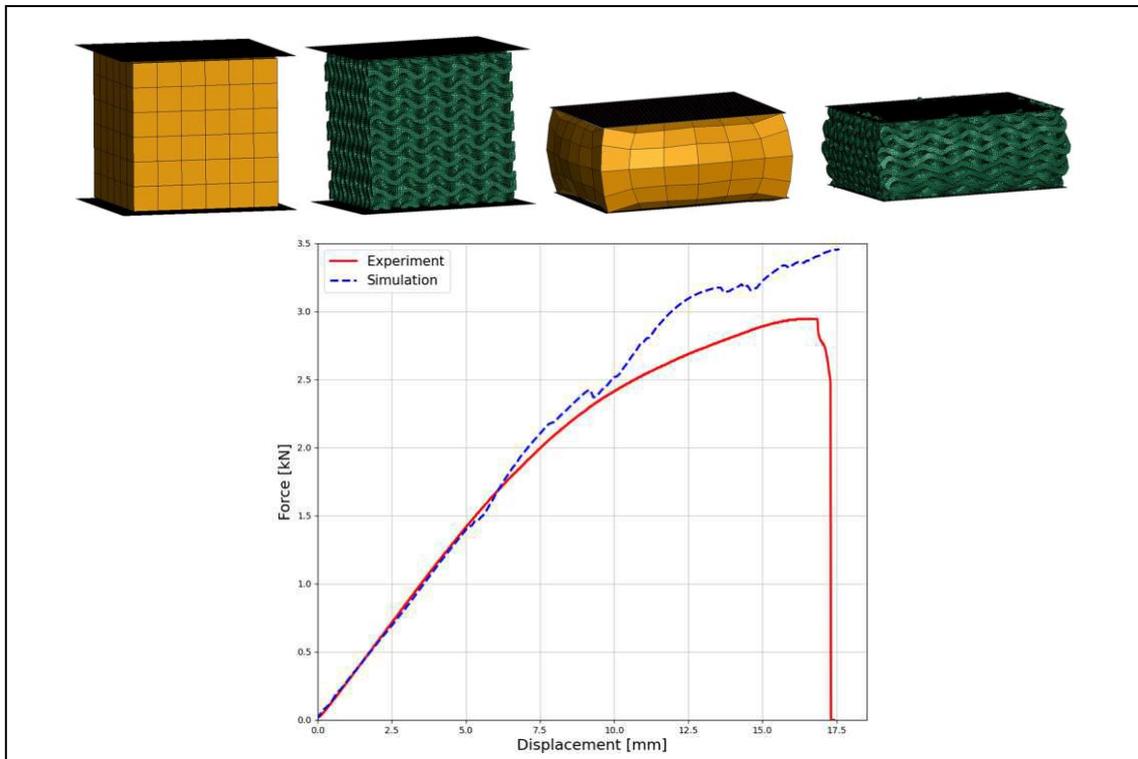


Figura 21: Confronto della simulazione della prova di compressione di una struttura TPMS su modello surrogato e su micro-modello

5.5 Materiali

La scelta dei materiali da utilizzare per la realizzazione degli scambiatori di calore rappresenta una fase delicata nella progettazione di questi dispositivi. Vi sono infatti una serie di fattori, delle volte anche contrastanti, che bisogna prendere in considerazione: costo, resistenza meccanica, conducibilità termica, durabilità e resistenza alla corrosione. Appare evidente, dunque, che uno scambiatore di calore sia il risultato di un compromesso che porterà alla realizzazione di un dispositivo efficace ed efficiente.

I materiali di comune impiego per la realizzazione di dispositivi destinati alle applicazioni di scambio termico sono:

- *Leghe ferrose*: come SS347 e SS316L, sono materiali piuttosto economici ma che rappresentano una valida opzione per la realizzazione di dispositivi di trasferimento di calore, anche realizzati mediante fabbricazione additiva.
- *Rame*: ottima conducibilità, è noto per le sue eccellenti proprietà di conducibilità termica, la più elevata fra i metalli di impiego comune. È, infatti, particolarmente richiesto per applicazioni come gli scambiatori di calore e per i canali di raffreddamento interni. Tuttavia, la lavorabilità con tecniche di fabbricazione additiva può presentare ostacoli da superare, che sono tuttora obiettivo di ricerca per la realizzazione di scambiatori di calore TPMS in rame [25]. Infatti, il basso assorbimento della radiazione laser e l'alta conducibilità termica, richiedono un maggior apporto energetico [3].
- *Acciai*: gli acciai al carbonio, economici e robusti, rappresentano la scelta preferita per diverse applicazioni industriali. Tuttavia, risultano molto vulnerabili alla corrosione, che ne impone l'uso solo attraverso adeguate strategie protettive. Per ambienti più aggressivi, gli acciai inossidabili rappresentano una buona soluzione, e tra questi vi è l'AISI 316 che, grazie al suo contenuto di molibdeno, offre buone prestazioni in termini di resistenza meccanica e resistenza alla corrosione [25]. Nonostante ciò, possono subire anch'essi fenomeni di corrosione localizzata in condizioni particolarmente severe.
- *Leghe di alluminio*: leggere ed economiche, risultano, favorevoli per applicazioni in cui viene richiesto elevato rapporto resistenza/peso e alta diffusività termica. In particolare, l'AlSi10Mg, utilizzato per la sua elevata conducibilità termica e il suo peso specifico relativamente basso [13], e grazie alla presenza del magnesio, risulta resistente anche alla corrosione. Inoltre, le leghe di alluminio vengono impiegate nella fabbricazione additiva grazie alla buona stampabilità. Studi hanno dimostrato l'efficacia di scambiatori di calore TPMS in alluminio, con prestazioni termiche superiori rispetto alla tradizionale apparecchiatura [25]. D'altro canto, dal punto di vista della resistenza meccanica, l'alluminio può essere limitante in condizioni di pressioni o carichi elevati.
- *Titanio*: estremamente resistente alla corrosione, ma costoso. Ad esempio, Ti6Al4V, sono leghe apprezzate per la loro eccezionale resistenza meccanica e il basso peso specifico. Il campo di applicazione di questi materiali è pressoché ristretto alle applicazioni aerospaziali e in condizioni estreme, come nel caso di impianti di desalinizzazione o nell'industria chimica. Tuttavia, la conducibilità termica è inferiore a quella delle leghe

di alluminio e dell'acciaio e il costo di produzione è elevato. L'impiego è tuttavia limitato a causa dell'eccessivo costo, ma la resistenza alla corrosione che è in grado di offrire ne giustifica l'utilizzo e l'investimento.

- *Inconel 718*: si tratta di una superlega di Nichel che presenta ottima resistenza alle alte temperature e buona resistenza meccanica, rendendola adatta per applicazioni di scambio termico in contesti gravosi [40].
- *Argento*: più che a scopo pratico, l'utilizzo dell'argento è ristretto al contesto sperimentale, ove si è dimostrato un notevole incremento dello scambio termico per strutture TPMS, anche superiore al rame. Tuttavia, l'elevato costo ne limita l'applicazione industriale su larga scala [26].

Per quanto riguarda i materiali polimerici, il vantaggio è legato ad applicazioni a temperature contenute e dove è richiesta particolare resistenza alla corrosione:

- *Resine fotopolimerizzabili*: ad esempio WIC100A, è una resina utilizzata per processi come la Stereolitografia (SLA) e la Digital Light Processing (DLP) per la fabbricazione di prototipi o componenti per micro-scambiatori di calore, in quanto presentano proprietà meccaniche e termiche generalmente inferiori a quelle dei metalli [13].
- *Termoplastici*: come l'ABS, possono essere processati tramite Fused Deposition Modeling (FDM) per la realizzazione di scambiatori di calore con geometrie TPMS. Le proprietà in termini di resistenza termica e meccanica sono limitate, ma offrono un buon compromesso in termini di costo e facilità di produzione per alcune applicazioni [13].

La scelta del materiale dipende strettamente dai requisiti specifici dell'applicazione a cui è destinato. Sebbene l'aspetto cruciale sia quello di consentire un trasferimento di calore in modo efficiente, non è da escludere l'aspetto legato all'analisi strutturale. È necessario, infatti, considerare anche i vincoli legati alla resistenza meccanica, peso, costo e fabbricabilità. Ad esempio, in applicazioni aerospaziali è previsto l'utilizzo di materiali come il titanio, in grado di offrire un eccellente rapporto resistenza/peso, nonostante vi sia una conducibilità termica moderata [25].

È necessario sottolineare che le proprietà meccaniche delle strutture TPMS non dipendono solo dal materiale costitutivo, ma anche dalla topologia della superficie minima, dalla porosità, dallo spessore delle pareti e dalle dimensioni della cella unitaria. In particolare, strutture con elevata porosità tendono ad essere più leggere, ma anche meno rigide [13].

5.5.1 Strutture ibride

La possibilità di poter variare i parametri di design delle TPMS offre un grado di libertà aggiuntivo al fine di ottimizzare le prestazioni meccaniche e termiche in base alle esigenze specifiche.

Di recente sono state condotte diverse prove che mirano all'ottenimento di strutture ibride, date dalla combinazione di diverse morfologie TPMS per migliorare le performance degli oggetti finali. Nei reticoli ibridi *Gyroid-Diamond*, si osservano risposte meccaniche distinte a seconda della configurazione (longitudinale o radiale). Le strutture ibride longitudinali, oltre una certa deformazione, mostrano che la densificazione precoce all'interno del reticolo *Gyroid* facilita il trasferimento del carico, mentre il reticolo *Diamond*, con la sua maggiore rigidità, fornisce ulteriore supporto strutturale. Questa interazione sinergica ritarda il cedimento e migliora lo stress di plateau. Le strutture ibride longitudinali hanno raggiunto uno stress di plateau di 37.17 MPa, un aumento fino al 21% rispetto alle strutture uniformi. La configurazione ibrida radiale mostra uno stress di plateau più uniforme (33.53 MPa), con un miglioramento fino all'11% rispetto alla struttura uniforme [28].

La risposta meccanica del materiale è ulteriormente influenzata dalla differenza della direzione di gradazione (*grading*) rispetto alla direzione di stampa e di carico. Per direzione di gradazione si intende l'orientamento spaziale lungo il quale avviene una variazione controllata di parametri geometrici o di proprietà dei materiali all'interno della struttura. Quando la gradazione è trasversale alla direzione di stampa e il carico è applicato longitudinalmente, la curva sforzo-deformazione mostra un collasso sequenziale strato per strato, creando variazioni nella rigidità strutturale e cedimenti localizzati. Ciò si traduce in un picco di stress inferiore (43 MPa) che è circa il 37% inferiore rispetto alla gradazione lungo la direzione di stampa. Tuttavia, il collasso progressivo massimizza l'assorbimento di energia, con un aumento del 41% circa rispetto ad una struttura uniforme in test dinamico. Quando la gradazione è lungo la direzione di stampa, la curva sforzo-deformazione mostra un calo del 33% dopo il picco iniziale, seguito da una regione di stress di plateau con fluttuazioni minime. Ciò è da attribuire all'allineamento uniforme lungo la direzione di gradazione che minimizza le debolezze localizzate. La gradazione trasversale, se testata lungo il carico, beneficia dell'allineamento della densità relativa di ciascuno strato con la forza applicata, aumentando la resistenza ad ogni strato e generando una risposta incrementale allo stress [28].

In sintesi, il comportamento sforzo-deformazione delle strutture reticolari TPMS sotto compressione è un fenomeno complesso influenzato da un insieme interconnesso di fattori. Il tipo di struttura (*Schwarz P*, *Gyroid*, *Diamond*, etc.) determina il modo in cui avviene la deformazione e la distribuzione dello stress, influenzando la stabilità e la capacità di assorbimento di energia. L'aumento dello spessore della parete migliora notevolmente la resistenza e la stabilità. Una maggiore densità relativa aumenta la capacità portante e lo stress di plateau, riducendo le fluttuazioni. La relazione è supportata dal modello di *Gibson-Ashby*. La porosità, inversamente correlata alla densità relativa, diminuisce la resistenza e la rigidità all'aumentare del volume dei vuoti. La dimensione della cella unitaria influenza la resistenza allo snervamento, con celle più piccole generalmente più resistenti. Le gradazioni nella dimensione delle celle modificano i meccanismi di collasso. Le strutture ibride possono offrire prestazioni migliorate, in particolare in termini di stress di plateau e assorbimento di energia. La direzione della gradazione e del carico è fondamentale per la risposta meccanica e l'assorbimento di energia. Il materiale di base e i suoi compositi determinano le proprietà intrinseche di rigidità, resistenza e duttilità. La comprensione di questi fattori è essenziale per progettare strutture TPMS con prestazioni meccaniche mirate. La sintonizzazione di questi parametri consente di adattare la curva sforzo-deformazione per scopi specifici, bilanciando resistenza, elasticità e dissipazione di energia. Le proprietà uniche delle strutture TPMS, come la porosità regolabile, gli elevati rapporti resistenza-peso e l'efficienza di assorbimento di energia, le posizionano come soluzioni innovative in diverse industrie [28].

5.5.2 Strutture “meta-materiali”

Uno studio interessante condotto da *Wei et al.* si è proposto di progettare una struttura a superficie curva minima tripla periodica utilizzando il metodo della migrazione superficiale e di fabbricare metamateriali reticolari in acciaio 316L mediante Additive Manufacturing. Attraverso test di compressione quasi-statica è stato possibile determinare le proprietà meccaniche, indagando anche sul meccanismo di smorzamento sulle strutture TPMS. Per condurre lo studio sono stati progettati due tipi di strutture reticolari: una struttura a travi con cella unitaria cubica a corpo centrato (*BCC cell*) e una struttura TPMS del tipo *Split-P*. Entrambi i campioni presentano le medesime caratteristiche: 55 mm di diametro, 50 mm di altezza e porosità della struttura pari al 70%. Le prove di compressione sono state condotte con una

velocità di compressione pari ad 1 mm/min. Per poter testare il modo di vibrazione e i rapporti di smorzamento, è stato utilizzato un analizzatore di segnale dinamico, disponendo uniformemente i punti di percussione sul campione e colpendoli in successione tramite un martello. Ciascun punto di test viene colpito in media tre volte al fine di ottenere un valore medio, che sia sufficientemente coerente. Il segnale di vibrazione ottenuto è stato raccolto da un accelerometro, amplificato e trasmesso all'analizzatore per essere elaborato. Dopodiché, si ottengono la funzione di risposta in frequenza e i parametri modali: frequenza naturale e rapporto di trasmissione. La combinazione dei test modali, per l'ottenimento del rapporto di smorzamento, e degli elementi finiti, per ottenere una maggiore precisione del valore della frequenza naturale, consente di valutare l'accuratezza dei risultati ottenuti [41].

Dal punto di vista delle proprietà meccaniche si denota un miglioramento nel caso di strutture TPMS. Inoltre, prima dello snervamento, le due strutture mostrano pendenze sostanzialmente simili, da cui si può evincere che il modulo elastico equivalente non è molto diverso. Per quanto riguarda, invece, la resistenza allo snervamento, questa differisce notevolmente, indicando una miglior risposta per la struttura *Split-P*. Nella regione di plateau la curva della struttura BCC appare relativamente liscia durante la compressione, mentre la struttura *Split-P* mostra delle fluttuazioni. Inoltre, in quest'ultima vi è una regione in cui la tensione scende e poi risale in modo marcato, manifestando una certa "rigidità negativa" che ne indica il collasso strutturale. Ciò è dovuto sostanzialmente all'instabilità da "*buckling*" per via della presenza di difetti di fabbricazione. Tuttavia, il valore di tensione risale con il progredire della compressione, poiché l'area "difettosa" entrando a contatto con l'area stabile, riduce in maniera graduale l'influenza dei difetti interni [41].

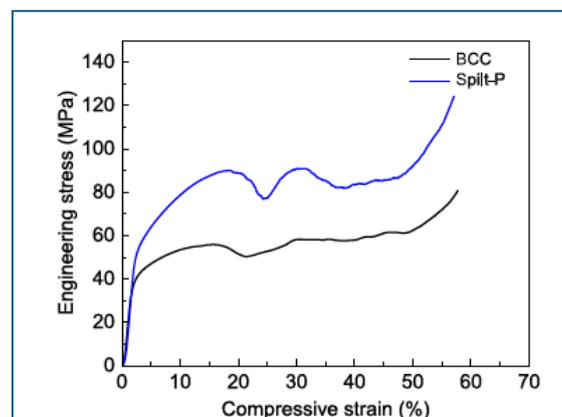


Figura 22: Confronto curve stress-deformazione di strutture reticolari BCC e *Split-P*

Al termine della prova, la struttura *BCC* presenta una chiusura lineare (a), mentre la *Split-P* presenta una chiusura curva (b). I metodi di chiusura riflettono il comportamento di collasso,

con le strutture a travi che tendono a raddrizzarsi e le strutture TPMS che, invece, tendono a piegarsi [41].

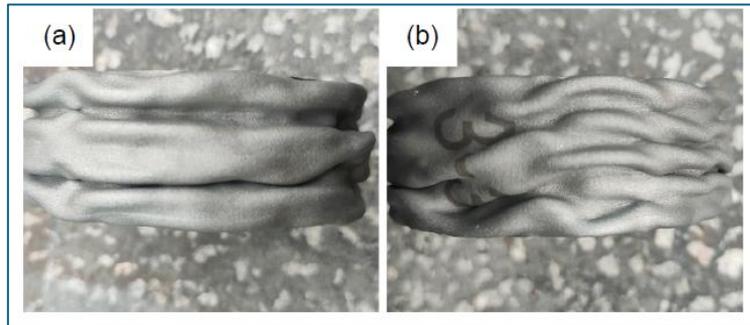


Figura 23: Morfologia delle strutture dopo prova di compressione: a) BCC; b) Split-P

Per quanto riguarda l'assorbimento di energia, durante la compressione entrambe le strutture esibiscono un trend che cresce in maniera lineare, con la struttura *Split-P* che presenta un valore superiore rispetto alla struttura a travi. Ciò indica la struttura a superficie minima tripla periodica vantaggiosa per ottenere un miglioramento delle proprietà meccaniche e di assorbimento di energia. In tal senso, la struttura TPMS essendo circondata da superfici curve con curvatura media nulla, quando è sottoposta a sollecitazione, può disperdere la forza in modo più efficace [41].

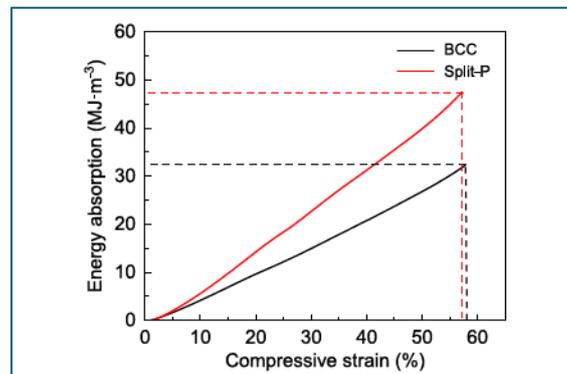


Figura 24: Confronto tra le curve di assorbimento energetico delle strutture BCC e Split-P

Al fine di determinare le caratteristiche di smorzamento, mediante simulazioni agli elementi finiti è stato possibile determinare le frequenze naturali di primo ordine delle strutture BCC e Split-P. La frequenza naturale, in assenza di smorzamento, è determinata principalmente dalla rigidità, k , e dalla massa, m , della struttura.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Dal momento che i campioni analizzati presentano medesima massa, la frequenza naturale è stata valutata principalmente in funzione della rigidità k . Dalle simulazioni è emerso un valore di frequenza naturale pari a 8.041 Hz per la struttura *BCC* e un valore di 12.141 Hz per la *Split-P*. Testando i campioni, invece, i risultati ottenuti mostrano una frequenza naturale per la struttura *BCC* pari a 8.021 Hz, con rapporto di smorzamento dello 0.5%. Per la struttura *Split-P*, invece, la frequenza naturale misurata è pari a 12.650 Hz, con rapporto di smorzamento di 0.99% [41].

Entrambe le strutture mostrano caratteristiche di smorzamento elevate. Nelle strutture reticolari metalliche la presenza di attrito interno è dovuta alla presenza di aria, considerata come seconda fase in questa struttura non uniforme quando viene applicato un carico vibratorio. Poiché l'attrito interno è legato all'area superficiale, maggiore è quest'ultima, maggiore è il percorso di trasmissione dello sforzo e maggiore sarà l'attenuazione della vibrazione. Conseguentemente, si ottengono maggiori valori in termini di rapporti di snervamento. In tal senso, la vasta area superficiale della struttura *Split-P* ne giustifica gli elevati valori in termini di rapporto di smorzamento. Ciò è migliorato anche dal punto di vista del design strutturale di un reticolo ordinato periodico. Tra gli altri fattori di attrito che possono contribuire a migliorare lo smorzamento vi sono: particelle di polvere granulare con legame metallurgico sulla superficie (risultato del processo di fabbricazione additiva) e micro-cricche o difetti interni [41].

6 PROPRIETA' DI SCAMBIO TERMICO

6.1 Introduzione

Come già discusso nei capitoli precedenti, l'impiego di strutture reticolari basate su Superfici Minime Triple Periodiche per la progettazione e realizzazione di scambiatori di calore rappresenta una nuova frontiera per lo sviluppo e il miglioramento delle proprietà di scambio termico di questi dispositivi. Il fatto che le geometrie presentino curvature interconnesse e lisce, rendono queste strutture candidati ideali per applicazioni in cui vengono richieste elevate efficienze di scambio termico. Ad esempio, la curvatura nulla crea canali interconnessi che migliorano il mixing del fluido, riducendo strati limite e, di conseguenza, aumentando lo scambio termico.

I parametri adimensionali che caratterizzano lo scambio termico relativo all'applicazione di uno scambiatore di calore con struttura Gyroid, come espresso dall'analisi di *Lai et al.*, e applicabili ai diversi casi studio, sono [42]:

- Numero di Reynolds (Re): definito come il parametro adimensionale che fisicamente rappresenta il rapporto tra le forze inerziali e quelle viscosse agenti su un fluido, può essere espresso dall'equazione:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

ρ è la densità kg/m^3 , v è la velocità del fluido in $[\text{m/s}]$, d è la dimensione di lunghezza caratteristica (nel caso in esame il diametro interno del canale del reticolo) in $[\text{m}]$ e μ è la viscosità dinamica del fluido in $[\text{Ns/m}^2]$.

Tale parametro consente di categorizzare le condizioni di moto del fluido. In particolare, per bassi Re , le forze viscosse predominano quelle di inerzia, riuscendo a smorzare le fluttuazioni caotiche inevitabilmente presenti nel moto della corrente fluida. Si parla, in questo caso, di moto laminare. Viceversa, per Re crescenti le forze di inerzia tendono a dominare quelle viscosse, amplificando le instabilità; si parla allora di moto turbolento. Dunque, il Re impatta considerevolmente sulle prestazioni di uno scambiatore di calore: quando il Re aumenta, la resistenza termica associata allo scambiatore diminuisce, favorendo la trasmissione del calore.

- Numero di Prandtl: è il numero adimensionale che definisce il rapporto fra il trasporto molecolare per diffusione della quantità di moto e l'analogo trasporto diffusivo di calore, che dipende dalle caratteristiche del fluido:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k}$$

C_p è la capacità termica specifica del fluido, in $[J/kg \cdot K]$ e k è la conducibilità termica del fluido $[W/m \cdot K]$.

- Numero di Nusselt: è definito come il rapporto tra il flusso di scambio termico convettivo e quello per conduzione nel fluido. Generalmente definito come:

$$Nu = \frac{hL}{k}$$

h è il coefficiente di scambio termico convettivo, in $[W/m^2 K]$, L è la lunghezza caratteristica in $[m]$. Oppure utilizzando la correlazione empirica di Dittus-Boelter per convezione forzata turbolenta in condotti:

$$Nu = 0.023(Re)^{0.8}(Pr)^n$$

Dove n dipende se il fluido si sta riscaldando ($n=0.4$) o se si sta raffreddando ($n=3$).

- Number of transfer units (NTU): è un parametro adimensionale che definisce l'efficacia di uno scambiatore di calore ed è definito come:

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}}$$

U è il coefficiente globale di scambio termico in $[W/m^2 K]$, A è la superficie di scambio termico in $[m^2]$ e C_{min} rappresenta la capacità termica tra i fluidi $[W/K]$.

Inoltre, per poter valutare le perdite di pressione nei canali di raffreddamento, si fa riferimento al coefficiente di attrito, in funzione del diametro idraulico d_h , della lunghezza del canale L , della velocità del flusso v e della differenza di pressione nel sistema Δp [43]:

$$f = \frac{\Delta p d_h}{\rho v^2 L}$$

Infine, la potenza richiesta alla pompa per far circolare il fluido di lavoro correttamente è data dal prodotto della caduta di pressione e della portata volumetrica del fluido [43]:

$$P_e = \Delta p \cdot \dot{V}$$

Dai diversi casi studio, risulta che le strutture *Gyroid* sfruttano la geometria dei canali per ottenere una riduzione della caduta di pressione rispetto alle strutture convenzionali e migliorare lo scambio termico. Si ottiene, pertanto, un flusso turbolento più efficiente e uniformità nello scambio termico grazie all'assenza di zone di ristagno termico, migliorando l'efficienza degli scambiatori.

In tal senso, l'analisi termofluidodinamica (CFD) è uno strumento essenziale per comprendere e ottimizzare le prestazioni termiche e fluidodinamiche degli scambiatori di calore in TPMS. Attraverso la simulazione numerica del flusso e del trasferimento di calore all'interno della geometria complessa delle strutture, è possibile ottenere informazioni dettagliate su parametri chiave, quali: distribuzione della velocità e della temperatura del fluido, caduta di pressione, coefficiente di scambio termico e valori del numero di Nusselt.

Se da un lato le tecniche di simulazione forniscono informazioni preziose sulle strutture TPMS, la complessità di questi modelli può portare a sfide in termini di efficienza e precisione computazionali. L'ottimizzazione della modellazione dettagliata con l'applicazione pratica resta un'area critica per la ricerca futura. Le analisi CFD negli scambiatori di calore TPMS vengono tipicamente impiegate per:

- Determinare la caduta di pressione nel fluido che scorre attraverso la struttura TPMS in funzione della geometria (topologia, porosità, spessore delle pareti, dimensioni della cella unitaria) e delle condizioni operative (velocità del fluido, viscosità) [13].
- Valutare il coefficiente di scambio termico convettivo tra la superficie della struttura TPMS e il fluido. Un elevato coefficiente di scambio termico indica una maggiore efficienza nel trasferimento di calore.
- Calcolare il numero di Nusselt, una grandezza adimensionale che rappresenta il rapporto tra lo scambio termico convettivo e conduttivo. Un elevato numero di Nusselt indica un'efficace convezione termica [44].
- Confrontare le prestazioni di diverse tipologie di struttura al fine di identificare la configurazione più adatta per una specifica applicazione.
- Sviluppare correlazioni empiriche per il coefficiente di scambio termico e il fattore di attrito in funzione dei parametri di design e delle condizioni operative, al fine di semplificare la fase di progettazione [45].

Le simulazioni CFD vengono tipicamente condotte utilizzando software come *Ansys Fluent* [46], *StarCCM+*, *OpenFOAM*. La fase di pre-processing include la generazione della geometria

3D della struttura e la creazione di una mesh computazionale. Successivamente, vengono definiti il modello di flusso, le proprietà del fluido, le condizioni al contorno (es. velocità, portata in ingresso, pressione in uscita, temperatura delle superfici) e il modello di trasferimento di calore. Per quanto riguarda, invece, la fase di post-processing, è prevista un'analisi con la visualizzazione dei risultati al fine di poter ottenere una valutazione circa le prestazioni dello scambiatore di calore[22].

In definitiva, la simulazione è una parte fondamentale per la realizzazione di componenti come gli scambiatori di calore realizzati tramite fabbricazione additiva. I software, infatti, non servono solo a progettare ma anche a verificarne il corretto funzionamento e la corretta realizzazione, prima ancora di stampare definitivamente il dispositivo. Attraverso analisi CFD è possibile individuare eventuali regioni di ricircolo o punti in cui fluido resta bloccato in un circuito, all'interno dello scambiatore. Inoltre, grazie alla potenza delle simulazioni, è addirittura possibile predire in anticipo le proprietà del flusso del fluido che attraversa le varie regioni del dispositivo, permettendo di modificare già in fase di progettazione il concept, prima ancora che questo fosse realizzato fisicamente.

6.2 Test per la determinazione delle proprietà termiche

Analogamente a quanto fatto per la determinazione delle proprietà meccaniche, si analizzano alcune delle diverse prove condotte per la determinazione delle proprietà fluidodinamiche e legate allo scambio termico dei reticoli a superficie minima tripla periodica.

I risultati ottenuti evidenziano come la conduttività termica delle TPMS risulti fortemente dipendente dalla porosità del campione considerato. I reticoli Schwarz-Primitive, Schwarz-Diamond, Gyroid e I-WP hanno riportato valori simili di conduttività termica effettiva a una data porosità o densità relativa. Anche la rugosità superficiale, l'orientamento rispetto direzione di costruzione (anisotropia) e i metodi di trattamento termico adottati post-produzione, che possono alterare la microstruttura del materiale, hanno un impatto significativo sulla conduttività termica effettiva del prodotto.

Lo studio condotto da *Tang et al.* mostra la metodologia di conduzione di una prova per determinare le proprietà termo-fluido-dinamiche delle strutture lattice TPMS destinate all'utilizzo di dispositivi come scambiatori di calore e dissipatori [47]. La prova analizza diverse strutture TPMS del tipo “*sheet*” (Gyroid, Diamond e I-WP) e una struttura ad alette tradizionale, modellati attraverso il software Solidworks. Il modello è composto da quattro unità di cella

singola di dimensioni $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$, per ottenere un modello totale di dimensioni $20 \times 20 \times 80 \text{ mm}^3$. Inoltre, per garantire uno sviluppo completo del fluido, sono state aggiunte due sezioni di 80 mm ciascuna all'ingresso e all'uscita.

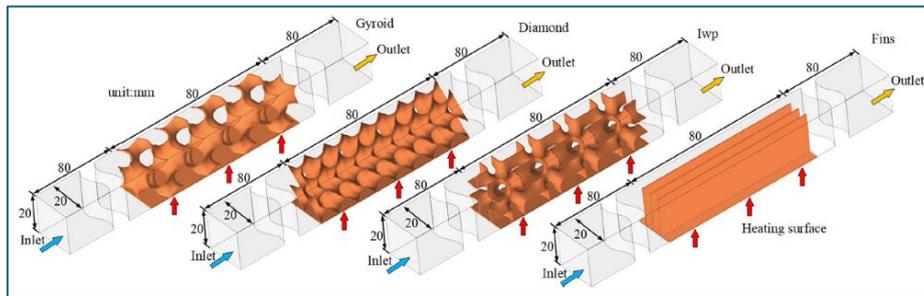


Figura 25: Modello geometrico delle strutture TPMS e della struttura ad alette

L'analisi CFD è stata condotta mediante il software Ansys CFX analizzando modelli di flusso laminare e turbolento, con ingresso del fluido (aria) a temperatura 293.15 K e deflusso libero. Le superfici sono considerate adiabatiche fatta eccezione per la superficie sottostante, riscaldata a temperatura costante di 373.15K. Per la verifica sperimentale, il modello è stato realizzato in lega di alluminio, registrando un ottimo accordo con i dati sperimentali, presentando un errore inferiore al 6% per la differenza di temperatura tra ingresso e uscita. I risultati ottenuti per le strutture TPMS analizzate evidenziano un miglioramento nelle prestazioni di trasferimento termico per convezione rispetto alla struttura ad alette, sebbene presentino una maggiore resistenza al flusso. In particolare, i coefficienti medi di scambio termico per convezione per Diamond, Gyroid e I-WP sono rispettivamente dell'85-207%, 55-137% e 16-55% superiori rispetto al modello ad alette.

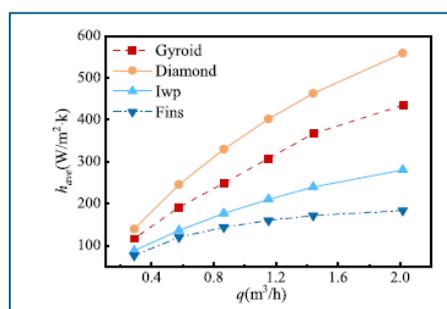


Figura 26: Curve del coefficiente di scambio termico in funzione della portata volumetrica

Analogamente per il Nu medio: Diamond, Gyroid e I-WP rispettivamente mostrano un miglioramento del 9-196%, 5.8-149% e 6.8-43.5% rispetto al modello ad alette. Tra le strutture TPMS analizzate, la tipologia Diamond mostra le migliori prestazioni.

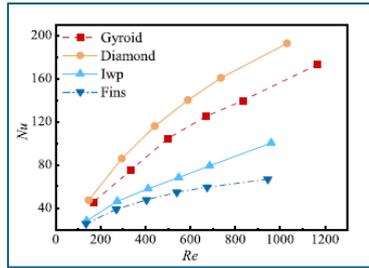


Figura 27: Curve del numero di Nusselt in funzione del numero di Reynolds

Una possibile motivazione del comportamento è indicata in riferimento alla presenza di “through-holes”, fori passanti, presenti nelle geometrie Gyroid e I-WP, visibili nella vista in pianta, attraverso i quali il fluido tende a scorrere con bassa resistenza, riducendo il trasferimento di calore tra la superficie solida e il fluido. Dal momento che nella struttura Diamond tali fori non sono presenti, il fluido viene costretto ad attraversare canali non rettilinei e complessi, intensificando la rottura dello strato limite termico e generando un maggior disturbo del fluido e vortici.

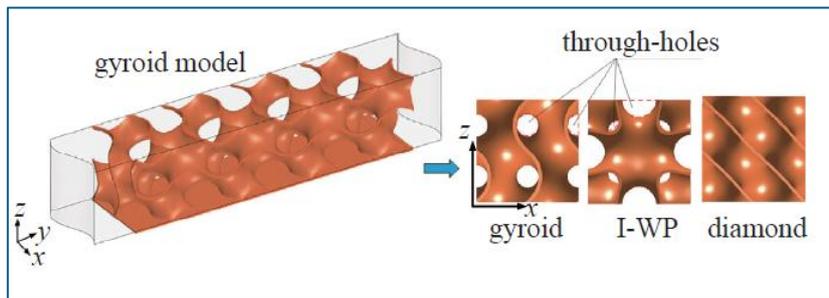


Figura 28: Visualizzazione presenza “through-holes” nelle strutture TPMS

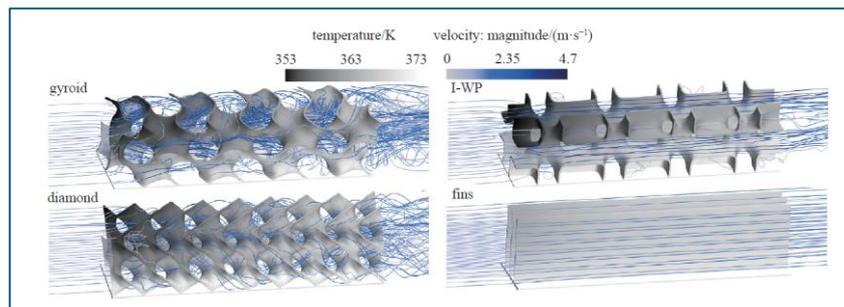


Figura 29: Profilo di temperatura e velocità del flusso attraverso le strutture analizzate

Lo studio condotto da *Jian Liu et al.* per confrontare le prestazioni di differenti tipi di reticoli TPMS (Gyroid, Diamond, Spilt-P) attraverso la costruzione di un modello di trasferimento di calore coniugato CHT, ha permesso di valutare il campo di flusso 3D stazionario, l'andamento della velocità, della pressione e della temperatura del fluido [48]. Nello specifico, questo modello è indicato qualora sia richiesto un valore di precisione elevato, simulando il trasferimento di calore che avviene in regioni solide e fluide a contatto tra loro, considerando i meccanismi di trasferimento per conduzione, convezione e irraggiamento.

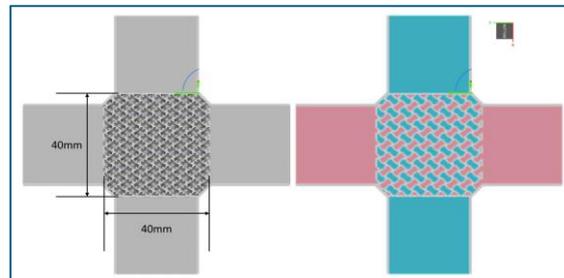


Figura 30: Dettaglio geometria dello scambiatore e andamento dei fluidi di lavoro

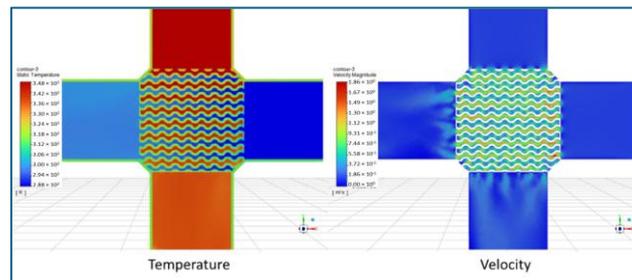


Figura 31: Profilo di temperatura e velocità

I risultati ottenuti, riportati in *figura 36*, in scala doppio logaritmica, descrivono che indipendentemente dalla geometria adottata, le performance dello scambiatore in termini di capacità di trasferimento termico e di caduta di pressione sono quasi identiche [48].

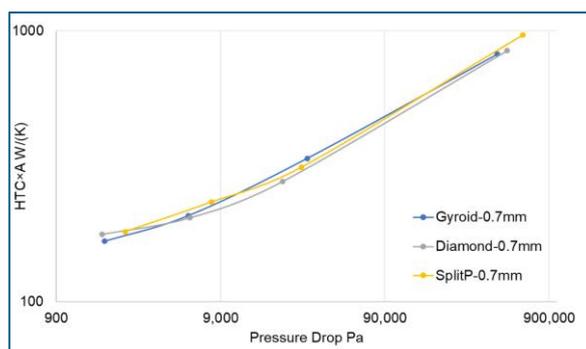


Figura 32: Curva performance scambiatore in relazione alla caduta di pressione per le diverse geometrie TPMS

La metodologia di studio affrontata per la determinazione delle proprietà termo-fluido-dinamiche prevede:

- La modellazione e l'assemblaggio delle strutture attraverso i software nTop e Solidworks.
- Le simulazioni sono state condotte attraverso il software ANSYS Fluent con modelli di trasferimento di calore coniugato (CHT) HX-40 e HX-70.
- Le condizioni di simulazione prevedono un campo di flusso 3D stazionario e modello viscoso SST $k-\omega$, con acqua come fluido di lavoro caldo e freddo a temperatura di ingresso, rispettivamente di 348K e 288K. La portata variabile da 0.05 a 2 kg/s.

Nello specifico, sono stati progettati due scambiatori di calore cubici ad alta efficienza: HX70-555 (unità Gyroid 5x5x5 mm) e HX70-101010 (unità Gyroid 10x10x10 mm) con dimensioni esterne di 70x70x72.5 mm, realizzati in alluminio.

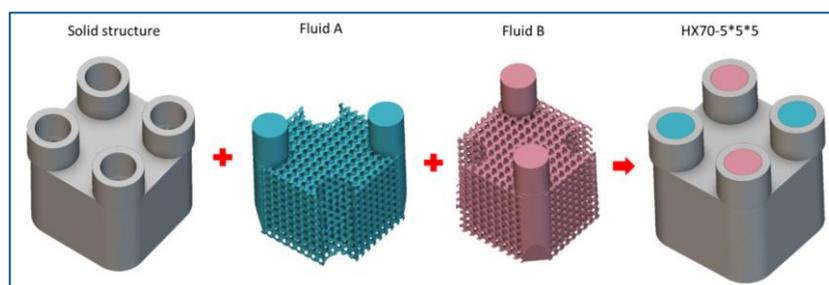


Figura 33: Modello scambiatore HX70-5*5*5

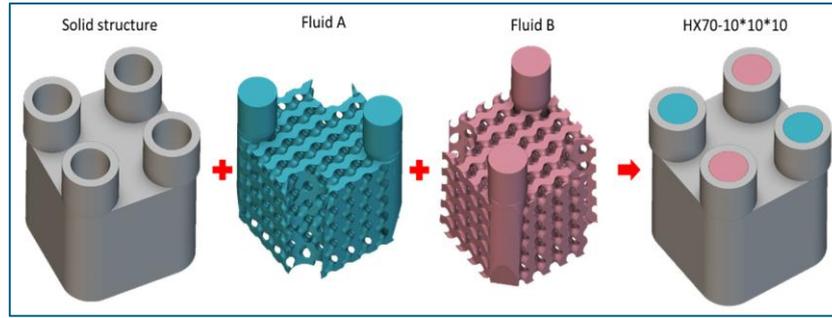


Figura 34: Modello scambiatore HX70-10*10*10

Il parametro di confronto utilizzato per valutare i diversi reticoli è il coefficiente di scambio termico complessivo U_c , valutato a partire dalla potenza di trasferimento del calore $Q_{t,avg}$, valutata come media tra la velocità dei flussi, e la differenza di temperatura media logaritmica $LMTD$.

$$U_c = \frac{Q_{t,avg}}{LMTD \cdot A}$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

Dal confronto sulle caratteristiche geometriche tra il modello HX-70 con uno scambiatore di calore commerciale (BT3x8-20) è emerso che il modello HX-70 presenta un volume tre volte più piccolo ed è almeno cinque volte più leggero. Oltre alle caratteristiche vantaggiose, la lega di alluminio è anche molto più economica rispetto alle leghe di rame o acciai, ottimizzandone la scelta anche dal punto di vista economico.

	Dimension	Effective Surface Area	HX Core Volume	Material	Mass
	mm	m ²	mm ³	-	g
BT3x8-20	206 × 76 × 47.75	0.235	519,256	Cooper and Steel	1592
HX-70	70 × 70 × 72.5	0.0508~0.1076	166,000	Aluminum	230~330

Tabella 4: Parametri HX BT3x8-20 e HX-70

Confrontando poi le caratteristiche di scambio termico, uno scambiatore HX70-555 con spessore della parete di 0.3 mm presenta un aumento del coefficiente di trasferimento del calore da due a tre volte superiore rispetto ad uno scambiatore commerciale BT3x8-20, a parità di portata.

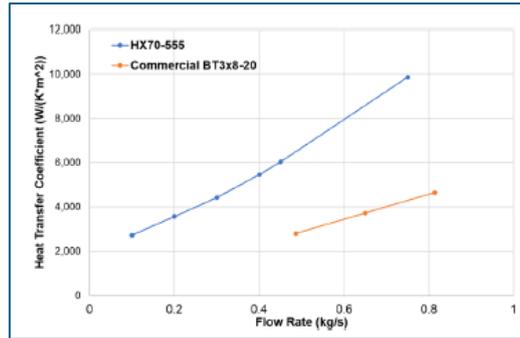


Figura 35: Confronto curve HTC-portata massica

Tuttavia, l'HTC e la capacità termica risultano meno sensibili alle variazioni dello spessore della parete. Una riduzione della capacità termica inferiore al 5% per spessori che aumentano da 0.32mm a 1.31mm. Per conduttività termiche superiori ai 100 W/m·K, variazioni di HTC o nella capacità termica risultano inferiori al 10% per variazioni da 100 a 1000 W/m·K. Ciò supporta l'utilizzo di leghe di alluminio, economicamente più vantaggiose.

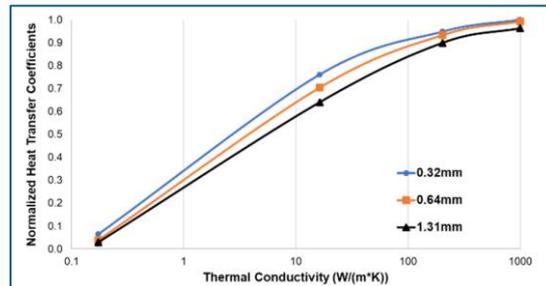


Figura 36: Confronto curve HTC-conduttività termica per diversi spessori di parete

Dal punto di vista dello stress termico e meccanico, le prove dimostrano che per una pressione di 2MPa dell'acqua, il relativo stress meccanico associato è di 30MPa a cui va sommato uno stress termico di circa 47.5 MPa dovuto ad una differenza di temperatura di 40K. Ne consegue, dunque, che lo stress massimo combinato sotto carico termico e di pressione del fluido è di circa 72MPa, ben al di sotto della resistenza dell'alluminio (240 MPa).

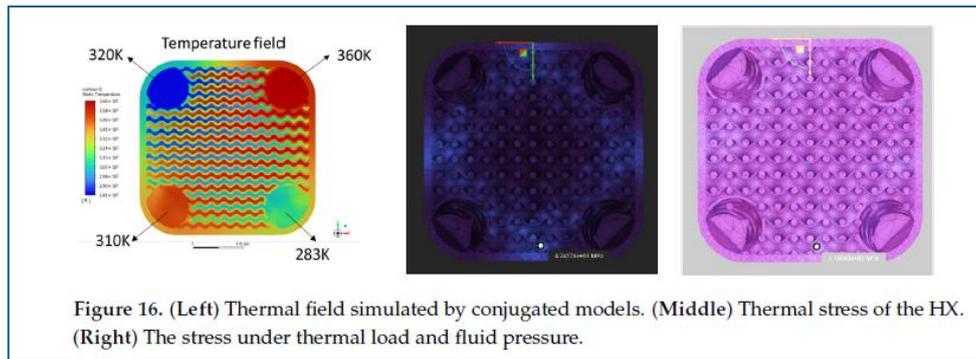


Figura 37: (sinistra) Andamento temperature da simulazione; (centro) Stress termico dello scambiatore di calore; (destra) Stress sotto carico termico e di pressione

In conclusione, gli scambiatori di calore realizzati tramite Additive Manufacturing risultano promettenti per dispositivi di gestione termica di prossima generazione. I risultati sperimentali ottenuti hanno dimostrato che scambiatori di questo tipo possono aumentare di molto il coefficiente di scambio termico rispetto agli equivalenti commerciali compatti. Quando la conduttività termica è superiore a $100 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, gli scambiatori con struttura *Gyroid* risultano meno sensibili alle variazioni di spessore e conduttività termica [48].

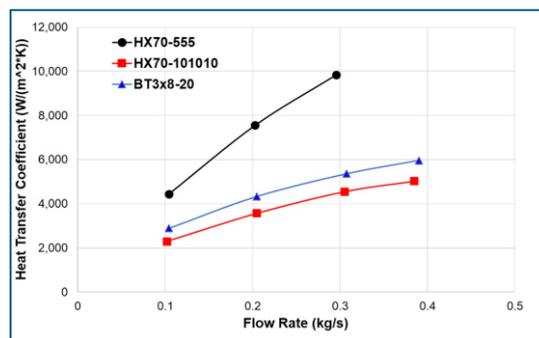


Figura 38: Confronto performance scambiatori di calore

Secondo lo studio condotto da *Alteneji et al.* cercando di sfruttare il potenziale delle strutture TPMS e della manifattura additiva, si indaga sulle caratteristiche di efficacia di scambio termico per applicazioni compatte a flusso incrociato (CCHE). L'obiettivo è ottenere nuove mappe caratteristiche di ϵ -NTU. Tramite modellazione computazionale fluidodinamica 3D, sono state studiate le configurazioni *Gyroid* e *Primitive* in lega di alluminio AlSi10Mg per sfruttare l'elevata conduttività termica e leggerezza. I risultati ottenuti e riportati sulle mappe ϵ -NTU mostrano un miglioramento significativo delle performance di scambiatori di calore compatti che integrino la struttura TPMS, rispetto all'efficacia del modello analitico per scambiatori a flusso incrociato, nell'intervallo di NTU da 0 a 1. Sebbene la complessità delle strutture TPMS introduca resistenza al flusso dovuta alla porosità e alla tortuosità delle geometrie, la caduta di pressione calcolata è risultata molto piccola rispetto ai tradizionali scambiatori di calore; e nelle

condizioni di prova (modello turbolento k- ϵ con condizione di no-slip alle pareti), la struttura *Gyroid* ha evidenziato valori inferiori rispetto alla struttura Primitive. Dall'analisi grafica, invece, viene mostrato come il fluido accelera e diventa più turbolento all'interno della rete tortuosa, aumentandone la turbolenza e, grazie all'elevata area superficiale, migliora il processo di trasferimento del calore. Si evidenzia anche una distribuzione di temperatura leggermente più uniforme sull'interfaccia della *Gyroid* [49].

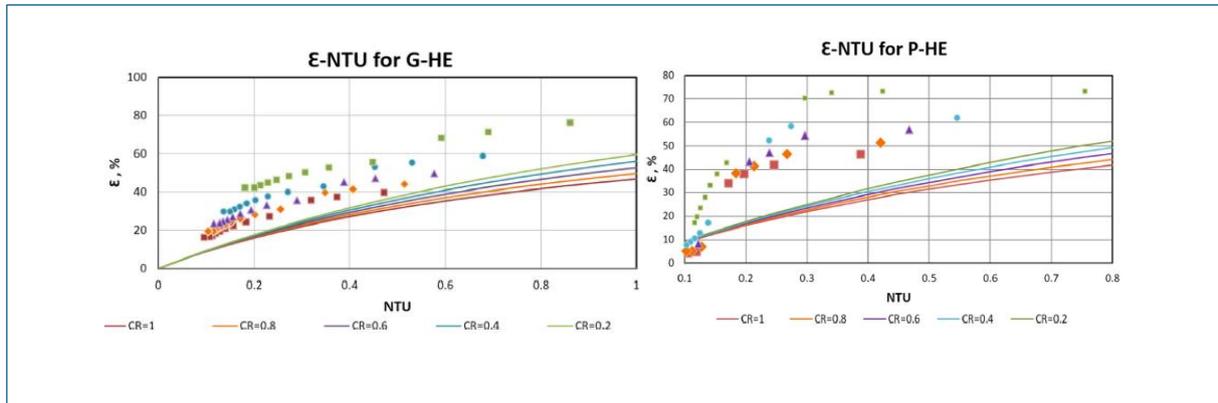


Figura 39: Mappe ϵ -NTU per struttura TPMS Gyroid (sinistra) e Primitive (destra)

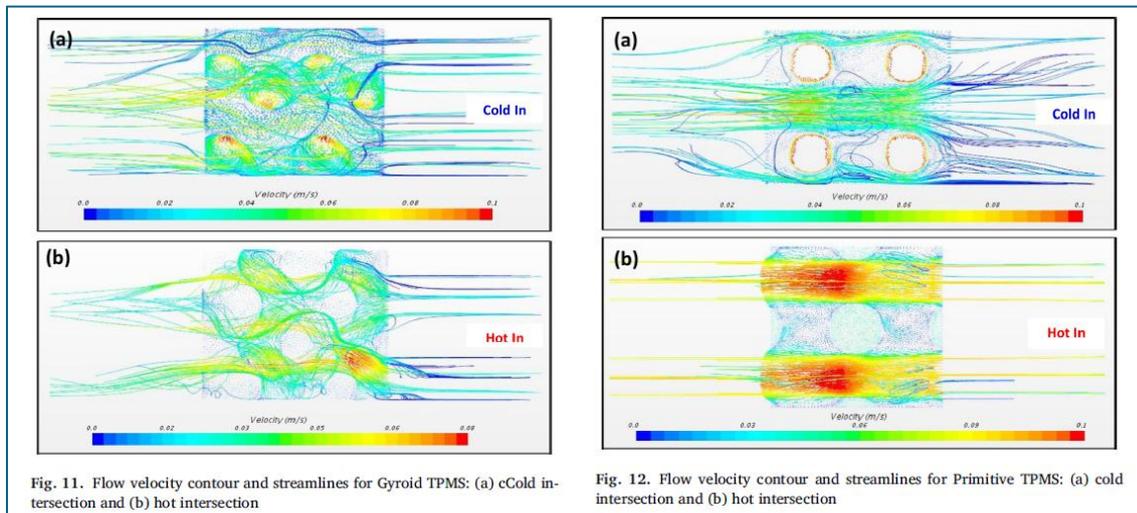


Figura 40: Andamento flusso di velocità in Gyroid (sinistra): a) lato freddo b) lato caldo; Primitive: a) lato freddo b) lato caldo

6.3 Influenza dei parametri geometrici e del fluido sulle prestazioni

Molti studi si sono concentrati sulla caratterizzazione termo-idraulica di diverse strutture TPMS, in particolare le strutture *Gyroid* e *Diamond*, le quali risultano essere tra le migliori ad esibire elevate efficienze in termini di scambio termico. Secondo lo studio di *Renon et al.* entrambe le strutture presentano prestazioni termiche comparabili, tuttavia, le *Gyroid* presentano perdite di carico maggiori rispetto alle *Diamond*. Il motivo è da attribuire ad una maggiore tortuosità del percorso che il fluido deve compiere. Per cui la struttura *Diamond* rappresenta la scelta ottimale per applicazioni legate a scambiatori di calore, per ridurre la caduta di pressione [50].

Rispetto alle configurazioni tradizionali, è stata dimostrata la superiorità degli scambiatori TPMS sia sperimentalmente che numericamente. Secondo lo studio di *Yan et al.* [51] Infatti, rispetto agli scambiatori a piastre (PHE), uno scambiatore realizzato in additive del tipo *Diamond* è in grado di esibire un aumento della compattezza del 108% e una riduzione del peso del 54%, abbinati ad una caduta di pressione del 50-59% e un aumento del trasferimento del calore del 3-5%. Di conseguenza, gli scambiatori TPMS sono in grado di raggiungere un rapporto potenza/peso quasi quattro volte superiore rispetto ai PCHE, occupando solo metà del volume [52].

Le prestazioni termo-idrauliche degli scambiatori TPMS sono influenzate da vari parametri geometrici e proprietà del fluido. Tra questi troviamo: diametro idraulico e dimensioni della cella, spessore della parete, porosità, fluido di lavoro.

La variazione delle variabili di progettazione delle strutture delle TPMS, ovvero, porosità, spessore della parete e dimensione della cella unitaria, influisce in modo significativo sulle caratteristiche del flusso e del trasferimento di calore [13].

- *Porosità* (ϵ): Definita come il volume del fluido rispetto al volume totale. Strutture solid-Gyroid con porosità più elevate hanno dimostrato un miglioramento per quanto riguarda il trasferimento di massa e ridotto la perdita di pressione. Per la maggior parte delle strutture sheet-TPMS, il coefficiente di trasferimento di calore convettivo e il coefficiente di attrito variano inversamente con la porosità.
- *Spessore della parete* (t): Influenza il campo di flusso e il trasferimento di calore. Uno spessore maggiore sta ad indicare un coefficiente di calore convettivo più elevato con una maggiore perdita di pressione. Tuttavia, i risultati possono variare a seconda della

topologia e della dimensione della cella unitaria. Per tale motivo rappresenta una variabile particolarmente sensibile per l'ottimizzazione dello scambio termico.

- *Dimensione della cella unitaria (L)*: Sebbene dimensioni minori della cella unitaria causano una maggiore perdita di pressione, a causa di geometrie più complesse e valori di porosità inferiori, queste possono offrire un maggior trasferimento di calore per via delle aree superficiali specifiche maggiori.

6.3.1 Diametro idraulico e dimensioni della cella

Ridurre il diametro idraulico gioca un ruolo fondamentale per potere aumentare il trasferimento di calore. In questo senso, la densità di superficie aumenta e consente di realizzare uno scambiatore più compatto ed efficiente [53].

Secondo le prove sperimentali e di simulazioni sulla struttura *S-D* condotto da *Zou et al.* [54], la riduzione della cella unitaria da 16 mm a 8 mm si traduce in un aumento del 10% nell'efficienza di trasferimento di calore, ma anche in un aumento del 42% della caduta di pressione.

Far variare la dimensione della cella rivela dunque che dimensioni più piccole sono in grado di offrire caratteristiche di trasferimento di calore superiori grazie al conseguente aumento dell'area superficiale[55]. Tale influenza è maggiormente risentita nelle prestazioni delle strutture *Gyroid* [52]. Le celle più piccole comportano un aumento significativo del numero di Reynolds, in funzione di una data portata, aumentando successivamente il trasferimento di calore [53].

6.3.2 Spessore della parete

Diversi studi sono stati condotti per dimostrare la presenza di una relazione tra lo spessore della parete del reticolo dello scambiatore di calore e l'efficacia di scambio termico. Dalle diverse prove condotte sui vari reticoli TPMS è possibile stabilire che:

- *Reticolo Gyroid*: La riduzione dello spessore della parete degli scambiatori con struttura *Gyroid* aumenta in maniera significativa le capacità di trasferimento di calore [55]. Inoltre, secondo lo studio di *Liu et al.* condotto su diversi reticoli di dimensioni differenti (5x5x5, 7x7x7, 10x10x10 mm) bisognerebbe mantenere un minimo spessore di parete per ottenere una riduzione della caduta di pressione, mantenendo al tempo stesso un coefficiente di scambio termico globale pressoché identico. I risultati sono evidenziati in *figura 45* [43].

- Reticolo Diamond: Secondo lo studio condotto da *Zou et al.* [54] l'aumento dello spessore della parete nella struttura *Schwarz-D* è capace di migliorare il coefficiente di scambio termico convettivo. Tuttavia, uno spessore eccessivo è in grado di influire negativamente sul flusso, riducendone le prestazioni termiche. Una prova simile condotta da *Wang et al.* ha evidenziato una riduzione del coefficiente di scambio termico medio del 61%, in funzione dell'aumento dello spessore della parete da 0.3 a 0.7 mm.

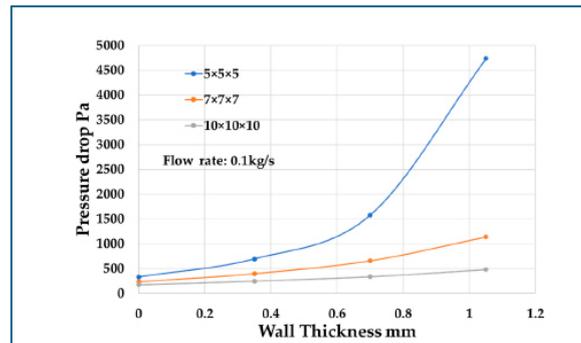


Figura 41: Andamento curve cadute di pressione-spessore della parete

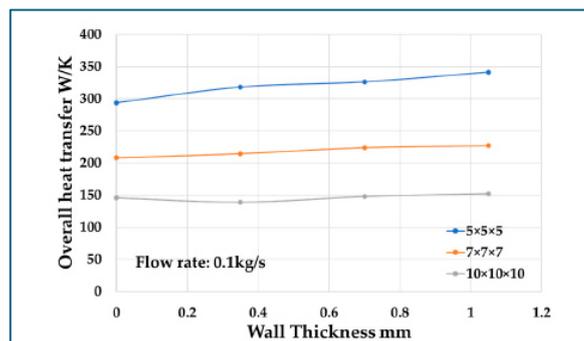


Figura 42: Andamento curve di scambio termico globale-spessore della parte

6.3.3 Porosità

Nella fabbricazione additiva il fenomeno della porosità ricopre la maggior parte dei processi di stampa 3D. Ad esempio, nei pezzi stampati attraverso SLM, possono realizzarsi pezzi o parte di essi in cui gas possono essere intrappolati durante la solidificazione, oppure potrebbe verificarsi l'adesione di molteplici particelle sulla superficie tra i layer. Nell'ambito degli scambiatori di calore realizzati in additive manufacturing, la porosità intacca le performance principalmente secondo due aspetti: la conduttività termica e la resistenza a fatica [3]. Studi condotti sulle TPMS [56], [57] hanno evidenziato che la conducibilità termica

diminuisce all'aumentare della porosità. Tra i reticoli osservati, quello che ha mostrato un valore maggiore di conducibilità termica è la struttura *Gyroid*. Inoltre, lo studio condotto da [57] ha reso valido un valore di porosità di 0.72 in modo da bilanciare le prestazioni di trasferimento di calore e integrità strutturale. Come riportato nello studio di *Dukowski et al.*, un aumento della porosità della struttura reticolare influenza positivamente il Nu. Tuttavia, è stato dimostrato che una minore porosità, e quindi una maggiore densità relativa, può incrementare notevolmente lo scambio termico (per esempio una struttura con porosità del 59% presenta un miglioramento del 250% nelle performance di scambio termico rispetto ad un'analogia con porosità dell'88%) [25].

6.3.4 Fluido di lavoro

Diversi studi si sono concentrati sull'utilizzo di fluidi comuni come aria e acqua. Tuttavia, per le ultime applicazioni in ambito degli scambiatori avanzati in lattice TPMS la ricerca presenta una lacuna riguardo l'utilizzo di altri fluidi di uso industriale, tra cui oli o metalli liquidi [58]. In tal senso, [56] hanno condotto prove sperimentali attraverso l'utilizzo di nanofluidi, come acqua distillata con nanoparticelle di Al (0,6% in volume) rispetto alla semplice acqua distillata. Sebbene vi sia un leggero aumento della caduta di pressione dovuto all'elevata viscosità, è stato dimostrato un miglioramento nella distribuzione di temperatura dell'8-12%. L'integrazione di nanofluidi come fluidi di lavoro per scambiatori di calore TPMS non solo è in grado di aumentare lo scambio termico, ma si allinea anche a pratiche energetiche sostenibili [56].

6.4 Validazione sperimentale

Per confermare i risultati numerici e comprendere gli effetti del processo di fabbricazione additiva è necessario validare sperimentalmente i risultati ottenuti. Spesso accade che vi siano discrepanze tra i risultati sperimentali e teorici, in parte dovuti alla rugosità superficiale introdotta dall'*additive manufacturing* [41],[59]. Nella realizzazione degli scambiatori TPMS metallici ci sono alcuni fattori che ricoprono particolare attenzione nella ricerca per il miglioramento delle prestazioni di scambio termico, tra cui: supporto nei canali, difetti superficiali e intasamento della polvere [59]. I supporti possono influire sulle prestazioni di flusso e scambio termico, i difetti possono indurre perdite indesiderate e i blocchi di polvere o crepe possono influenzare in maniera negativa il corretto funzionamento. Inoltre, la maggior

parte dei dati presenti in letteratura proviene da simulazioni CFD e, nella maggior parte dei casi, non c'è ancora riscontro dal punto di vista sperimentale utile per convalidare i risultati [25].

Ad esempio, lo studio condotto da *Yan et al.* [60] ha riportato che il coefficiente di scambio termico complessivo misurato sperimentalmente e la caduta di pressione sul lato freddo hanno superato i risultati delle simulazioni numeriche, rispettivamente del 9.70% e del 69.82%. Un altro studio [51] ha invece evidenziato una differenza massima tra la simulazione e l'esperimento della caduta di pressione dell'acqua di raffreddamento del 39.36%, mentre rispetto alla differenza di temperatura ingresso/uscita è dell'8.34%. Nonostante le differenze, i risultati sperimentali generalmente verificano l'affidabilità complessiva dei risultati di simulazione.

In tal senso è fondamentale anche la qualità della stampa per poter ottenere scambiatori di calore efficienti. L'analisi μ -CT (micro-tomografia computerizzata) viene utilizzata per caratterizzare le strutture stampate e misurare i parametri topologici, quali porosità e diametro idraulico [61]. È stato dimostrato che assumere valori dei parametri derivati dai file STL, utilizzato per la stampa 3D, non è sufficiente, in quanto possono verificarsi deviazioni significative nella struttura stampata: fino al 7% per la porosità e 12% per il diametro idraulico. Al fine di ottenere coefficienti di scambio termico accurati, specialmente per materiali a bassa conducibilità, l'analisi μ -CT risulta essenziale.

6.5 Design avanzati e ottimizzazione

La ricerca attuale si concentra sui metodi per ottimizzare ulteriormente le prestazioni degli scambiatori avanzati in lattice TPMS. Una possibile strategia di manipolazione geometrica riguarda lo stretching, ossia l'allungamento nella direzione del flusso in modo da ridurre la resistenza al flusso [52]. Questo approccio mira a realizzare una geometria più simile ad un tubo dritto [62]. Lo studio condotto da *Yan et al.* [60] ha dimostrato che le strutture *Gyroid* manipolate (allungate) riescono ad ottenere una sostanziale riduzione della resistenza al flusso, ammettendo un compromesso marginale nelle prestazioni termiche: si riduce fino all'80% la caduta di pressione con una diminuzione del 28% nel tasso di scambio termico.

Un'altra possibile innovazione consiste nel proporre schemi di progettazione in grado di integrare più strutture TPMS in maniera graduale per sfruttarne i principali vantaggi in termini di flusso e trasferimento di calore [57]. Tale approccio è denominato FGH-TPMS.

Ancora, si può pensare di ottimizzare algoritmi basati sul principio *Field Synergy Principle* per determinare le relazioni tra le variabili di progettazione delle strutture reticolari TPMS e le prestazioni [54]. Uno studio condotto sulla struttura ottimizzata a gradiente, la *Gradient-Gyroid*, basata su questo principio, denota un aumento di capacità di disturbo volta a migliorare il trasferimento di calore pur mantenendo un buon flusso [63]. In relazione ai parametri di flusso, una struttura del genere ha raggiunto un valore massimo del numero di Nusselt pari a 260, superiore del 6.6% rispetto alla struttura *Gyroid* non ottimizzata.

Altri studi esplorano la possibilità di utilizzare scambiatori di calore con struttura TPMS in condizioni operative estreme, come elevate temperature e pressioni. Nello studio di *Dharmalingam et al.* [53] è stato presentato un design, poi simulato e ottimizzato, di uno scambiatore TPMS destinato ad operare a temperature superiori a 900 °C e pressioni fino a 25 MPa, utilizzando aria e sCO₂ come fluidi di lavoro. Tuttavia, non ci sono lavori che sfruttano scambiatori per tali condizioni di lavoro.

❖ OTTIMIZZAZIONE DELLE PERFORMANCE DI UNO SCAMBIATORE DI CALORE CON STRUTTURA GYROID MODIFICATA TPMS

Nonostante i progressi, persistono questioni di ricerca critiche, tra cui l'analisi approfondita riguardo l'influenza dei parametri topologici delle TPMS sul trasferimento di calore e la modellazione quantitativa dei flussi termici. Un modo per ampliare il range di applicazioni delle strutture TPMS è la modifica della struttura porosa mediante funzioni ricorsive, operazioni Booleane o la combinazione di diverse configurazioni. In questo senso, l'ottenimento di una geometria combinata permette di mitigare gli effetti negativi delle strutture TPMS porose sul fluido di lavoro, ottenendo una riduzione del fattore di attrito e della caduta di pressione, lasciando invariate le proprietà meccaniche. L'analisi numerica condotta attraverso il software *Solidworks Flow Simulation* è stata eseguita in condizioni di regime stazionario (steady-state) impiegando il modello di viscosità k- ϵ . Sebbene il modello potrebbe sovrastimare il trasferimento di calore per bassi valori del numero di Reynolds, la scelta è giustificata per via della sua robustezza e universalità rispetto ad un'ampia gamma di numeri di Reynolds in condizioni turbolente [64].

La geometria di riferimento è stata ottenuta sottraendo il volume della struttura *Gyroid* "skeletal" da quella del *Gyroid* "sheet", ottenendo così una struttura ibrida caratterizzata da

canali interconnessi di diverse dimensioni. In particolare, la cella unitaria della struttura *Gyroid* “*sheet*” presenta dimensioni $(2\pi \times 2\pi \times 2\pi)$ con spessore di parete di 0.5mm, mentre le dimensioni della cella unitaria della struttura “*skeletal*” pari a $(\pi \times \pi \times \pi)$. La realizzazione di tali strutture è resa possibile mediante tecniche di fabbricazione additiva, quali FFF/FDM, SLA, SLS o SLM. La geometria combinata ottenuta, si identifica come una struttura moderatamente complessa per la realizzazione mediante stampa 3D. Tuttavia, la fattibilità complessiva dipende dal materiale e dalla specifica tecnologia utilizzata.

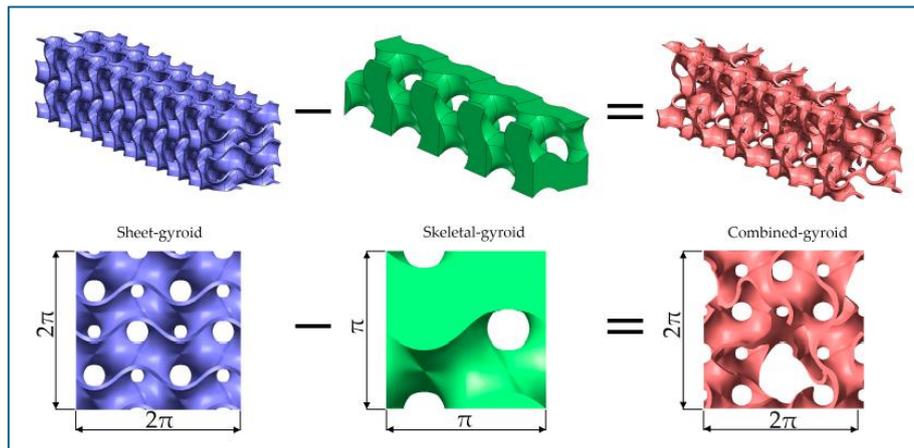


Figura 43: Ottenimento della struttura Combined-Gyroid

Le analisi sono state condotte utilizzando aria come fluido di lavoro, in funzione di cinque diverse portate volumetriche: 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0 m^3/h . Il materiale utilizzato per modellare le geometrie è un alluminio 6061, caratterizzato da una densità di $2700kg/m^3$, conducibilità termica di 152 W/mK e capacità termica di 897J/KgK. Per quanto riguarda le boundary condition, si è assunto che le pareti esterne dei canali siano adiabatiche con condizione no-slip. Al fine di stabilizzare il flusso, sono stati aggiunti prima e dopo la struttura TPMS canali di 80mm.

I risultati ottenuti dall’analisi numerica hanno fornito informazioni dettagliate sul comportamento idraulico e termico delle geometrie confrontate:

- *Andamento di velocità del flusso*: la geometria “*sheet*” mostra una distribuzione uniforme della velocità del flusso. Al contrario, la struttura “*skeletal*” presenta una distribuzione eterogenea con velocità elevate in un singolo canale massiccio, in corrispondenza delle regioni di restringimento. La geometria combinata evidenzia un mix di entrambe le strutture, con intervalli di regioni in cui il flusso raggiunge elevate velocità e altre in cui risulta più uniforme con velocità inferiori, favorendo così un miglior mescolamento.

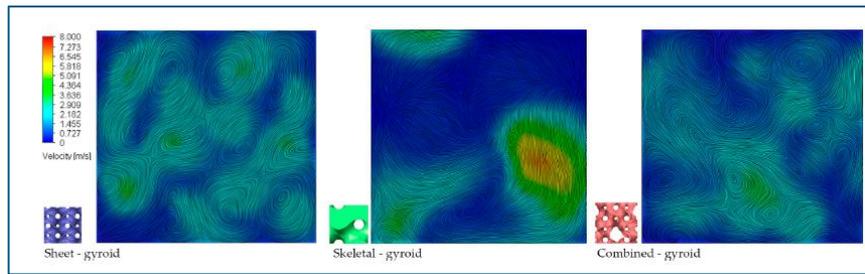


Figura 44: Mappa velocità delle strutture TPMS

- *Caduta di pressione*: il parametro che definisce la caduta di pressione è cruciale per stabilire l'efficienza del trasporto del fluido e la permeabilità della struttura. In quest'ottica, la struttura “*skeletal*” evidenzia cadute di pressione più alte tra quelle analizzate, mentre la geometria combinata esibisce cadute di pressione più basse in riferimento a tutte le portate volumetriche analizzate.

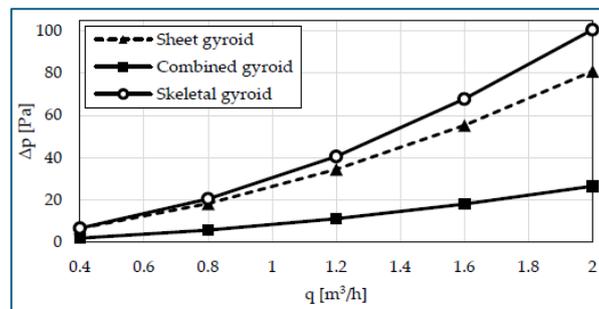


Figura 45: Andamento della caduta di pressione in funzione della portata volumetrica

- *Fattore di attrito*: rappresenta un parametro adimensionale in grado di valutare la perdita di pressione dovuta all'attrito tra il fluido e la superficie della struttura. In quest'ottica, la struttura combinata presenta valori intermedi, bilanciando le proprietà delle altre due strutture. Nello specifico, la struttura “*sheet*” presenta valori maggiori del fattore di attrito, indice di maggior perdita di pressione. Al contrario, la struttura “*skeletal*” mostra valori più bassi, avvicinandosi ad 1 per alti numeri di Reynolds, come evidenziato in figura 50.

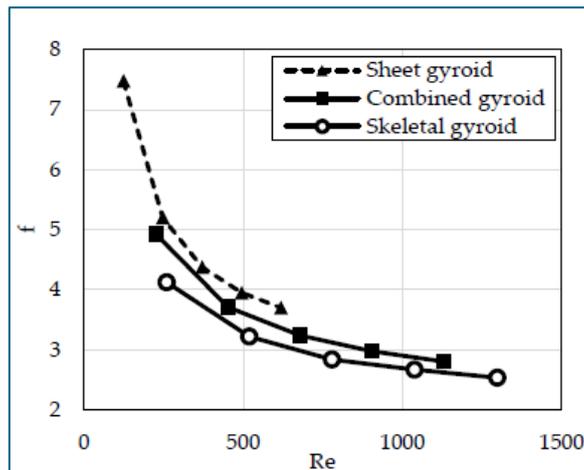


Figura 46: Andamento curva fattore di attrito in funzione del numero di Reynolds

- *Coefficiente di scambio termico*: tale parametro indica direttamente l'efficienza dello scambio termico. La struttura con geometria combinata raggiunge valori più elevati per ciascuna portata esaminata. Per una portata di $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$ si ottiene un valore del coefficiente di scambio termico pari a $362.17 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

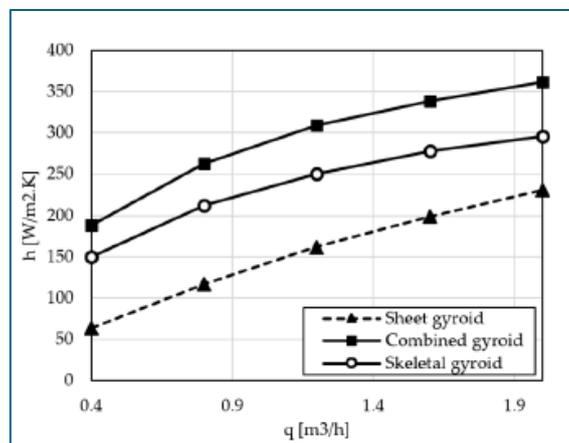


Figura 47: Andamento delle curve del coefficiente di scambio termico-portata volumetrica

- *Numero di Nusselt*: si tratta di un indicatore dell'efficienza dello scambio termico (rapporto convezione/conduzione). Tramite i valori ottenuti, la geometria combinata permette di ottenere valori del numero di Nusselt più elevati in riferimento ai valori del numero di Reynolds, corrispondenti a prestazioni termiche superiori, come evidenziato in figura 52.

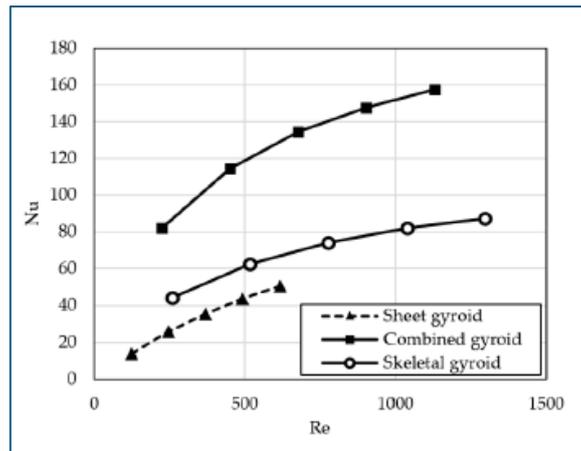


Figura 48: Andamento curve Nu-Re per le diverse strutture analizzate

- Fattore di Chilton-Colburn:** si tratta di un fattore adimensionale che integra le proprietà di flusso, geometria e scambio termico, offrendo un'indicazione dell'efficienza dello scambio termico rispetto alla caduta di pressione e alla turbolenza. Il grafico di *figura 53* asserisce che i valori del fattore j diminuiscono all'aumentare del numero di Reynolds. La geometria combinata esibisce valori più elevati su tutto l'intervallo di Reynolds, indicando una maggiore efficienza in termini di scambio termico.

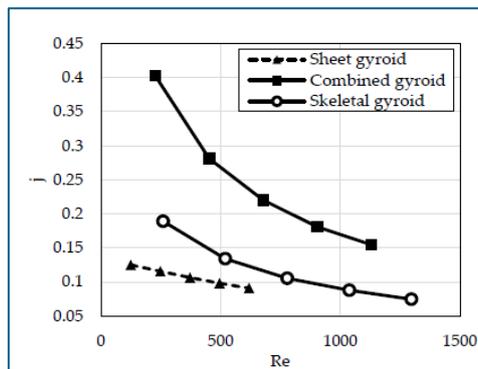


Figura 49: Andamento curve fattore di Chilton-Colburn -numero di Reynolds

- Distribuzione della temperatura e zone stagnanti:** dall'analisi delle mappe di temperatura, in *figura 54*, si denotano differenze significative per le strutture in esame. La Gyroid "sheet" esibisce una distribuzione uniforme della temperatura, raggiungendo un equilibrio termico gradualmente. La struttura "skeletal", invece, presenta gradienti termici intensi nelle sezioni iniziali, dove avviene un rapido riscaldamento, ma anche variazioni locali significative e possibili zone stagnanti nelle sezioni intermedie. La geometria combinata bilancia riscaldamento rapido e uniformità, ottenendo così gradienti moderati iniziali ed efficace miscelazione nelle sezioni centrali e finali, volte a ridurre le zone stagnanti e a migliorare l'omogeneizzazione.

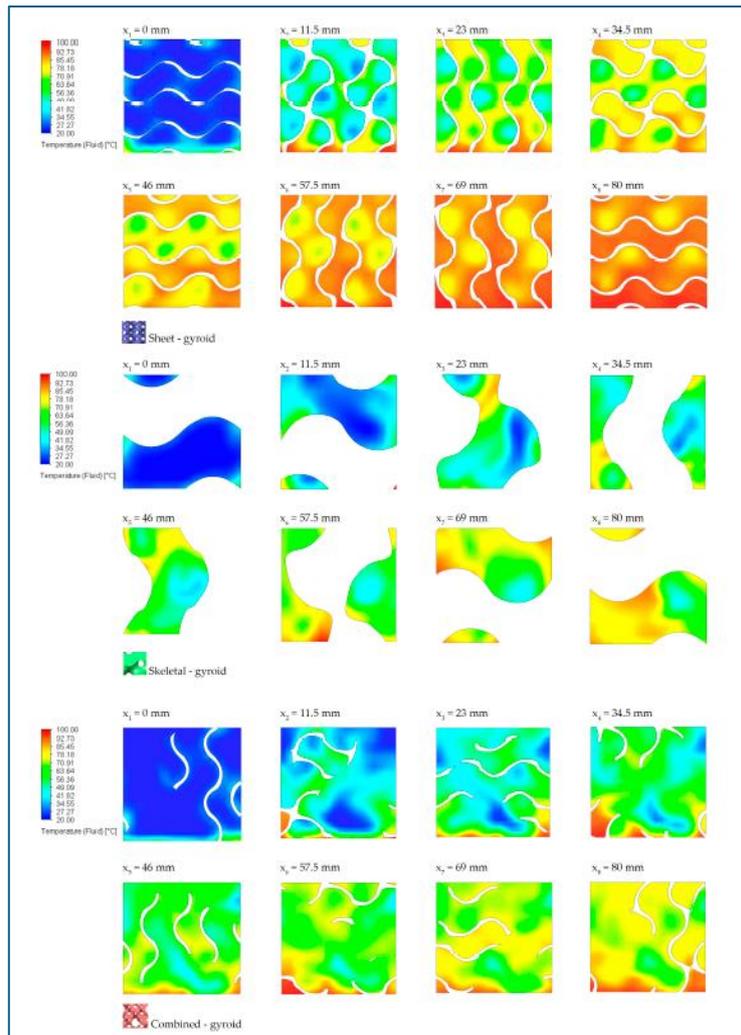


Figura 50: Profili di temperatura delle strutture analizzate

In conclusione, l'adozione di geometrie combinate basata sulla struttura *Gyroid* per applicazioni relative agli scambiatori di calore risulta particolarmente vincente. Tale geometria ha dimostrato la massima efficienza di scambio termico, associata a valori superiori in termini di numero di Nusselt e fattore di Chilton-Colburn. Parallelamente si riescono a mantenere livelli più bassi del fattore di attrito e perdite di pressione. Tale equilibrio tra perdite idrauliche e prestazioni termiche, rende la struttura *Gyroid* combinata altamente adatta per la realizzazione di scambiatori di calore compatti ed efficienti dal punto di vista energetico.

❖ DESIGN OTTIMIZZATO DI UNO SCAMBIATORE PER ELICOTTERI

Nel 2021 in occasione dell'Additive Manufacturing Conference and Expo tenutosi a Cincinnati, Ohio, è stato possibile visionare una serie di applicazioni industriali realizzati mediante fabbricazione additiva. Per la categoria "miglior concept" il primo premio è andato allo scambiatore di calore per elicotteri progettato e realizzato da Advanced Engineering Solutions. Il modello si pone come una soluzione innovativa per sostituire i vecchi scambiatori di calore

in uso sui mezzi militari. Questo particolare scambiatore di calore permette di raffreddare l'olio del cambio e utilizza come fluido di raffreddamento il carburante. A differenza dei normali scambiatori di calore che utilizzano un design a fascio tubiero, in cui i tubi sono "piegati", ciò che rende speciale il nuovo concept è la complessa geometria interna che è in grado di garantire uno scambio termico molto più efficace rispetto ai design convenzionali. La struttura interna presenta un reticolo *Gyroid*, che ne aiuta anche la realizzazione in quanto è autoportante: la geometria non presenta un asse debole, risultando particolarmente resistente alla compressione. Inoltre, si sfrutta un'ulteriore proprietà delle strutture reticolari *Gyroid*: il volume viene diviso in due domini differenti, che non si toccano e sono continui, ideali per applicazioni che prevedono uno scambio termico.

Un design convenzionale richiede processi molto laboriosi, che richiedono l'assemblaggio di molti pezzi, anche differenti tra loro, che potrebbe significare anche un trasporto di carico maggiore rispetto a quanto si richiede per la specifica applicazione. In tal senso, la possibilità di stampare in 3D direttamente l'oggetto finale riduce drasticamente la fase dell'assemblaggio, semplifica la produzione e può anche aiutare a rimuovere peso e materiale dal dispositivo. Il modello è stato realizzato mediante PBF in lega di alluminio (AlSi10Mg), caratterizzato da una nervatura esterna che funge da supporto e che consente di realizzare una parete più sottile, senza rinunciare alla resistenza del componente. Si ottiene quindi un risparmio di: manodopera, peso e spazio, dato che il nuovo concept risulta avere un volume circa pari alla metà di un tradizionale scambiatore di calore.

Al fine di valutare il corretto funzionamento del dispositivo, è stata eseguita una simulazione con analisi CFD attraverso il software *Ansys*. Tramite il software di Additive Works è stato possibile simulare anche la costruzione della fusione del letto di polvere prima dell'effettiva stampa 3D. Lo scambio termico valutato risulta migliorato nettamente, consentendo un raffreddamento quattro volte più veloce.

Dunque, l'oggetto finale realizzato è in realtà il risultato di una grande quantità di lavoro digitale virtuale che culmina con la stampa. L'oggetto finale è, in definitiva: più piccolo, più compatto, più leggero e più efficiente rispetto ai design convenzionali [65].

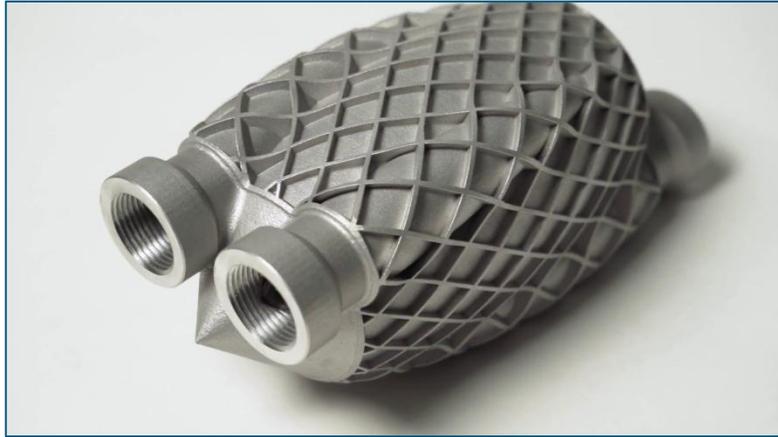


Figura 51: Prototipo scambiatore di calore in struttura lattice TPMS per elicotteri

7 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

7.1 Mercato degli scambiatori di calore in struttura Lattice TPMS

Il panorama attuale riguardo la tecnologia di scambio termico è profondamente influenzato dall'esigenza di migliorare l'efficienza energetica rispettando la sostenibilità ambientale. In questo contesto rientrano gli scambiatori di calore, il cui mercato continua a registrare una forte crescita, trainata dalla domanda in settori industriali e HVAC.

Focalizzandosi su un settore più specifico di questi dispositivi, per quanto riguarda il mercato degli scambiatori di calore con strutture reticolari lattice TPMS non può essere ancora effettuata un'analisi precisa circa la dimensione e le prospettive future. Tuttavia, il settore risulta molto promettente poiché trae vantaggio dall'applicazione di dispositivi caratterizzati dai vantaggi che la stampa 3D è in grado di offrire, aprendo la strada a nuove opportunità ingegneristiche, soprattutto legato ai settori automotive e aerospace.

In tal senso, la fabbricazione additiva si è affermata come tecnologia cardine per la realizzazione di strutture reticolari caratterizzate da geometrie complesse a superficie minima tripla periodica (TPMS), difficilmente riproducibili con metodi di produzione convenzionali. Ne è un esempio la ricerca per la realizzazione di scambiatori di calore avanzati realizzati mediante struttura reticolare TPMS, caratterizzati da elevate efficienze in termini di integrità strutturale e scambio termico. Tuttavia, se da un lato si riescono ad ottenere elementi complessi e innovativi, la qualità dei pezzi prodotti è fortemente influenzata dalla tecnologia scelta, dai parametri di stampa e dai trattamenti post-processo. Pertanto, la completa adozione della manifattura additiva come principale processo di produzione nelle industrie è fortemente legata all'incertezza delle proprietà strutturali delle parti fabbricate [3]. In tal senso la ricerca procede verso lo sviluppo e l'impiego di nuovi materiali, nella realizzazione di design bio-ispirato a strutture presenti in natura (per garantire migliori proprietà dei componenti realizzati), offrire ripetibilità e supporto al Machine Learning che permetta un'integrazione completa della fabbricazione additiva con l'industria 4.0.

7.2 Sfide e sviluppi delle strutture reticolari TPMS

Le strutture reticolari TPMS rappresentano dunque una classe speciale di strutture porose che presentano superfici lisce continue ad elevata area superficiale e caratterizzate da canali interni continui e un'architettura auto-supportante, descrivibili mediante equazioni algebriche e si

distinguono per la loro ripetibilità periodica in tre direzioni indipendenti. Sono caratterizzate dall'assenza di spigoli vivi, che consente di ridurre punti di concentrazione di stress, e la capacità di modulare la densità relativa attraverso la modifica dello spessore di parete e della dimensione della cella elementare. Negli ultimi anni i progressi della stampa 3D hanno permesso di condurre numerose ricerche sulle proprietà meccaniche esibite da tali strutture. La complessa geometria delle strutture TPMS ha spinto la ricerca nell'ambito dello scambio termico e, al tal proposito, sono stati stampati prototipi di scambiatori di calore di cui si cerca di ottimizzarne i parametri.

Nello specifico, le prove condotte sulle diverse tipologie di strutture reticolari TPMS indicano le Gyroid e Diamond particolarmente efficienti per applicazioni di scambio termico, come gli scambiatori di calore, grazie all'elevata densità superficiale e alle proprietà di miscelazione del fluido.

Nonostante le caratteristiche e i vantaggi offerti, la produzione su larga scala degli scambiatori di calore in struttura lattice TPMS in ambito industriale è ancora in fase di studio e sviluppo, poiché deve affrontare diverse sfide:

- *Costi di produzione elevati:* attualmente il costo di produzione dei prototipi è sensibilmente superiore a quello dei dispositivi tradizionali (per un prototipo 20x20x10 cm, il costo stimato si aggira attorno alle migliaia di euro).
- *Limitazioni materiali e certificazioni:* Sebbene l'AM sia in grado di processare un'ampia gamma di materiali (metalli, polimeri, ecc.), la ricerca mira all'impiego di materiali attualmente difficili da stampare come rame e argento. In aggiunta, per settori critici come quello medico e aerospaziale, l'adozione di tali dispositivi richiede l'ottenimento di apposite certificazioni. Attualmente i principali player di tali dispositivi sono ancora limitati ad aziende specializzate nel settore dell'Additive Manufacturing (3D Systems, EOS e SLM Solutions), centri di ricerca (NASA, ETH Zurich, MIT) e start-up focalizzate su design generativo (nTopology, Additive Flow).
- *Controllo qualitativo e Affidabilità:* la qualità dei componenti prodotti mediante manifattura additiva dipende significativamente dal processo scelto, dai parametri di stampa e dai trattamenti post-processo. Ad esempio, la rugosità superficiale indotta può influenzare negativamente il trasferimento di calore e aumentare la turbolenza del fluido, accelerando l'usura del materiale nel tempo. Inoltre, le incertezze sulle proprietà

strutturali delle parti fabbricate ostacolano la completa adozione dell'Additive Manufacturing come processo di produzione industriale primario.

- *Analisi quantitativa dell'impatto dei difetti interni sulle proprietà meccaniche:* in particolare, su come collegare la risposta meccanica delle strutture e come analizzare l'impatto specifico dei diversi tipi di difetti interni sulla struttura.
- *Ricerca in merito alle proprietà delle strutture TPMS in condizioni di servizio estreme:* nello specifico, in condizioni in cui le strutture TPMS risultano portanti. Mancano studi riguardo la risposta meccanica e meccanismi di cedimento sotto condizioni di gradienti di temperatura estremi, alti tassi di deformazione.
- *Simulazione completa delle proprietà al variare dei parametri di stampa* [23].

7.3 Sfide e sviluppi futuri per gli scambiatori di calore in struttura Lattice TPMS

In conclusione, gli scambiatori di calore avanzati con struttura lattice TPMS e realizzati in Additive Manufacturing rappresentano soluzioni di nicchia dove il costo di tali dispositivi è giustificato in relazione ai vantaggi garantiti: leggerezza, resistenza, efficienza e alto grado di personalizzazione. Ad oggi i costi sono ancora elevati e trattandosi di una tecnologia relativamente nuova, le applicazioni che garantiscano una posizione stabile all'interno del mercato degli scambiatori di calore è ancora in fase di studio e di sviluppo. In particolare, la continua ricerca e l'ottimizzazione dei processi sia di stampa che di analisi, si concentrano per garantire dispositivi caratterizzati da enormi potenzialità per diversi settori industriali.

Le opportunità di crescita e sviluppo riscontrate in letteratura per la tecnologia degli scambiatori di calore sono promettenti e riguardano essenzialmente:

- *Hybrid Manufacturing:* con la possibilità di includere i vantaggi della fabbricazione additiva alle lavorazioni tradizionali per la produzione di componenti più efficienti e competitivi sul mercato
- *Nuovi materiali:* relativi all'utilizzo di materiali non convenzionali quali grafene e ceramiche avanzate, per particolari applicazioni
- *Digital Twin:* volto ad ottimizzare le prestazioni in tempo reale

L'incremento dell'utilizzo di tali dispositivi nei diversi ambiti industriali deve necessariamente essere accompagnato dalla comprensione approfondita di diversi parametri di influenza sulle prestazioni termiche, quali porosità della struttura e rugosità superficiale. Per questo motivo è necessario sviluppare modelli computazionali avanzati, come analisi FEM e CFD, in modo da

prevedere e simulare con precisione il comportamento strutturale e termo-fluidodinamico. La ricerca volge lo sguardo anche all'impiego di materiali non convenzionali, quali grafene e ceramiche avanzate, per specifiche applicazioni in condizioni severe. Il grafene presenta elevata conducibilità termica (circa 5000 W/mK), superiore anche al rame, e può essere utilizzato per ridurre le resistenze termiche locali e rinforzare i materiali base. I limiti legati all'utilizzo di grafene riguardano soprattutto gli elevati costi e la complessità nella realizzazione di strutture ibride, oltre alla dispersione omogenea nei materiali o nei fluidi.

7.4 Metodologia

A conclusione del capitolo e del lavoro svolto, viene riportato un dettaglio della metodologia adottata per la redazione del lavoro di tesi. Lo sviluppo dell'elaborato è stato condotto attraverso i seguenti punti:

1. Definizione degli obiettivi e delle parole chiave: analisi critica delle proprietà legate alle strutture reticolari Lattice TPMS e, nello specifico, per applicazioni legate allo scambio termico come scambiatori di calore realizzati mediante Additive Manufacturing.
2. Selezione delle banche dati e fonti: Ricerca documenti e articoli scientifici sulle piattaforme online: Scopus, SciSpace, Reserchgate, IEEE Xplore, Arxiv, Emerald insight, ASME digital collection
3. Strategia di ricerca: Combinazione di parole chiave con operatori booleani (AND, OR, NOT). Utilizzo di filtri temporali per limitare la ricerca agli ultimi 5 anni. Utilizzo filtri per rilevanza per valutare articoli con alto numero di citazioni o pubblicati su riviste scientifiche.
4. Organizzazione della letteratura: attraverso strumenti per la gestione bibliografica (Zotero, Excel) è stata suddivisa la documentazione per ambiti di pertinenza (Additive Manufacturing, Strutture Lattice TPMS, Test per la determinazione delle proprietà meccaniche, Test per la determinazione delle proprietà termiche)
5. Analisi critica e sintesi: i documenti selezionati sono stati analizzati e sintetizzati mediante un approccio descrittivo (per riassumere metodi e risultati conseguiti), comparativo (per identificare punti in comune tra i diversi risultati ottenuti), e critico (per identificare i gap presenti in letteratura e i diversi limiti presenti nelle prove condotte).

Di seguito è riportato il database analizzato degli articoli ricercati e analizzati, suddivisi a seconda del focus dell'articolo: nella *tabella 5* sono presenti gli articoli che riportano gli studi

condotti per la determinazione delle proprietà di scambio termico; invece, nella *tabella 6* sono presenti i relativi studi per la determinazione delle proprietà meccaniche. Infine, nella *tabella 7* e *tabella 8* sono riportati in dettaglio tutti i documenti analizzati e citati nell'elaborato con il relativo focus e i principali risultati ottenuti.

#	TITOLO	ANNO
1	A Review of Recent Investigations on Flow and Heat Transfer Enhancement in Cooling Channels Embedded with Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS)	2022
2	Review of the State-of-the-Art Uses of Minimal Surfaces in Heat Transfer	2022
3	Review of the State-of-the-Art Uses of Minimal Surfaces in Heat Transfer	2022
4	Analysis on the convective heat transfer process and performance evaluation of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) based on Diamond, Gyroid and Iwp	2023
5	Multi-objective topology optimization of passive heat sinks including self-weight based on triply periodic minimal surface lattices	2023
6	Convective heat transfer correlations for Triply Periodic Minimal Surfaces based heat exchangers	2024
7	Optimization of Triply Periodic Minimal Surface Heat Exchanger to Achieve Compactness, High Efficiency, and Low-Pressure Drop	2024
8	Thermo-hydraulic performance characteristics of novel G-Prime and FRD Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) geometries	2024
9	Design and Additive Manufacturing of TPMS Heat Exchangers	2024
10	Optimisation of Heat Exchanger Performance Using Modified Gyroid-Based TPMS Structures	2024
11	Convection Heat Transfer and Performance Analysis of a Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) for a Novel Heat Exchanger	2024
12	Design and Numerical Investigation of High-Performance Heat Exchangers Containing Triply Periodic Minimal Surface Lattice Structures	2024
13	Effectiveness in Cooling a Heat Sink in the Presence of a TPMS Porous Structure Comparing Two Different Flow Directions	2024
14	Triply Periodic Minimal Surface Structures: Design, Fabrication, 3D Printing Techniques, State-of-the-Art Studies, and Prospective Thermal Applications for Efficient Energy Utilization	2024
15	Heat Enhancement of Ethylene Glycol/Water Mixture in the Presence of Gyroid TPMS Structure: Experimental and Numerical Comparison	2025
16	A numerical investigation of heat transfer and pressure drop correlations in Gyroid and Diamond TPMS-based heat exchanger channels	2025
17	Computational analysis and engineering modeling for the heat transfer and fluid flow through the gyroid TPMS structure	2025
18	Conformal geometric design and additive manufacturing for special-shaped TPMS heat exchangers	2025
19	Design, optimization, and validation of a triply periodic minimal surface based heat exchanger for extreme temperature applications	2025
20	Development and flow optimization of "Gyroid" based additive manufacturing heat exchanger: Both computational and experimental analyses	2025
21	Effects of lattice geometric manipulation on thermo-hydraulic performance of Gyroid-structured heat exchanger: A numerical study	2025
22	Experimental and numerical analysis of functionally graded hybrid TPMS heat exchangers for enhanced flow and thermal performance	2025
23	Heat transfer and topological characterisation of TPMS structures using 3D printed materials	2025
24	Investigative research on the heat exchangers with triply periodic minimal surface structures under two hybrid methods	2025
25	Numerical investigation of heat transfer enhancement by the stretching of triply periodic minimal surfaces	2025
26	Performance Evaluation of Triply Periodic Minimal Surface Heat Exchangers Using Nanofluids at High Flow Rates for Enhanced Energy Efficiency	2025
27	Gyroid-structured heat exchanger optimization via lattice geometric manipulation for enhanced thermo-hydraulic performance: an experimental and numerical research	2025
28	Experimental and simulation analysis of heat transfer in Gyroid heat exchangers with variable flow channels	2025

Tabella 5: Riepilogo riferimenti esaminati per le proprietà di scambio termico

#	TITOLO	ANNO
1	Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices	2017
2	Investigation of functionally graded TPMS structures fabricated by additive manufacturing	2019
3	MSLattice: A free software for generating uniform and graded lattices based on triply periodic minimal surfaces	2020
4	Mechanical Behavior of Al-Si10-Mg P-TPMS Structure Fabricated by Selective Laser Melting and a Unified Mathematical Model with Geometrical Parameter	2022
5	Experimental investigations into nonlinear dynamic behaviours of triply periodical minimal surface structures	2023
6	High strain rate mechanical behaviour of uniform and hybrid metallic TPMS cellular structures	2023
7	Mechanical Properties and Energy Absorption Abilities of Diamond TPMS Cylindrical Structures Fabricated by Selective Laser Melting with 316L Stainless Steel	2023
8	Study on the Anisotropy of Triply Periodic Minimal Surface Porous Structures	2023
9	3D Printing of Flexible Mechanical Metamaterials: Synergistic Design of Process and Geometric Parameters	2023
10	Structural Targets for AM-printed HXs	2023
11	Mechanical and damping performances of TPMS lattice metamaterials fabricated by laser powder bed fusion	2024
12	Experimental and numerical studies on mechanical properties of TPMS structures	2024
13	Enhanced Energy Absorption in Bioinspired Combined TPMS-Gyroid and Walled TPMS-Gyroid Lattice Structure Manufactured via Fused Filament Fabrication (FFF)	2024
14	Recent progress on some fundamental mechanical properties of TPMS structures based on additive manufacturing	2024
15	Design and Compression Behavior Exploration of Skeletal and Sheet Triply Periodic Minimal Surface Structures	2024
16	Effects of modeling strategies of triply periodic minimal surface on the mechanical properties and permeability of biomedical TC4 porous scaffolds	2024
17	A Hollow Optimized Simple Cubic Lattice Structure Based on the TPMS Geometry	2025
18	Stress strain curve analysis of sheet based TPMS structures in quasi static compression test: A review	2025
19	Optimizing Computational Efficiency in TPMS Structural Design through Surrogate Modeling	2025

Tabella 6: Riepilogo riferimenti esaminati per le proprietà meccaniche

Autore	Anno	Focus	Goals
Yerane; Rao	2022	Ricerca su studi condotti sul flusso e trasferimento di calore in topologie TPMS. Sono altresì definiti dettagli sulla letteratura per la progettazione di condotti di raffreddamento interni di prossima generazione.	Definizione di TPMS; - Strumenti per la generazione dei reticoli; - Spessore di parete: l'aumento dello spessore di parete migliora le prestazioni termiche del canale di raffreddamento per la struttura sheet-Gyroid. Lo spessore di parete e le dimensioni dei pori sono i parametri più sensibili all'ottimizzazione. ; - Numero di Nusselt (Nu): Nu_TPMS > scambiatore a piastre > scambiatore a tubo cavo. Nu_TPMS: Diamond>IWP>Gyroid>Primitive; -Perdita di pressione (DP): IWP>Diamond>Gyroid>Primitive.
Alteneiji;Ali; Khan; Al-Rub	2022	L'obiettivo dello studio è proporre un modello 3D di CCHE con strutture geometricamente complesse TPMS, per ottenere nuove mappe delle caratteristiche che mettono in evidenza la relazione tra l'efficacia e il numero di unità di trasferimento NTU.	Sono state indagate le strutture Gyroid e Primitive TPMS in lega di alluminio AlSi10Mg (elevata conducibilità termica e leggerezza). La modellazione CFD è stata valutata mediante STAR-CCM+. I fluidi caldo e freddo entrambi in acqua. Tc in 300K, Th in 355K. Sono stati misurati: Tc out, Th out, coefficiente di scambio termico per entrambi i fluidi e caduta di pressione. Portata massica del fluido caldo variabile da 0,00092 a 0,023 kg/s e Re >4000. La struttura G mostra un aumento dell'efficacia del 35% rispetto al modello analitico a flusso incrociato. Le cadute di pressione sono relativamente piccole (4 Pa sul lato caldo e 1,4 Pa sul lato freddo), mentre il coefficiente di scambio termico max pari a 1,400W/mK. Sono state fornite nuove mappe delle caratteristiche ε-NTU.
Dutkowski; Kruzel; Rokosz	2022	Lo studio si pone come una revisione sull'utilizzo delle superfici minime triple periodiche (TPMS) per applicazioni legate al trasferimento di calore	La manifattura additiva si basa sull'aggiunta di materiale strato su strato per offrire maggiore libertà nel design rispetto ai processi convenzionali. Il ciclo di preparazione prevede la creazione di un modello 3D digitale (CAD); conversione del modello in formato STL, OBJ o AMF; preparazione finale per la stampa. I principali tipi di reticolo TPMS analizzati sono: Primitive, Gyroid, Diamond e I-WP. L'uso delle TPMS consente di aumentare il Nu e la resistenza al flusso. La P, presenta minori resistenze al flusso e minore incremento di Nu. La G mostra valori di Nu superiori alla P e maggiore resistenza al flusso. In particolare, le strutture "sheet-network" mostrano minore resistenza termica e valore più elevato di scambio termico a causa dell'elevata densità superficiale. D mostra valori di Nu più alti e massima resistenza al flusso. È indicata come la più promettente in termini di facilità di design e miglioramento dell'efficienza termica in relazione alla resistenza al flusso. Uno scambiatore di calore D può essere 3-10 volte più piccolo rispetto ad uno convenzionale. I-WP può risultare ottimale per l'efficienza termica rispetto alla resistenza al flusso (1.9 volte superiore a D in uno studio). La porosità influenza positivamente Nu. Tuttavia, minore porosità (=maggiore densità relativa) può portare a prestazioni di scambio termico superiori (es 250% di porosità rispetto a 88%). Ridurre lo spessore equivalente e ottimizzare l'orientamento del TPMS può ridurre anche la perdita di pressione. Le simulazioni CFD tendono a sottostimare la perdita di pressione e il coefficiente di scambio termico globale (circa 40% in meno rispetto ai risultati sperimentali). Ciò è dovuto all'elevata rugosità superficiale indotta dalla produzione additiva. Barriere legate all'utilizzo di materiali potenzialmente promettenti (es. rame).

Tang;Zhou; Zeng;Yan; Jiang;Yang; Li;Li;Fu; Huang; Zhao	2023	L'obiettivo dello studio è affrontare la limitazione della capacità di dissipazione del calore nei dispositivi ad alto rilascio di calore, come chip elettronici e generatori laser. In particolare, si valutano le prestazioni di trasferimento di calore per convezione di diverse strutture TPMS (Gyroid, Diamond e I-WP) e verificare l'accuratezza delle simulazioni numeriche.	Le strutture analizzate Gyroid, Diamond e I-WP sono tutte TPMS-sheet e una struttura tradizionale ad alette. Il fluido di lavoro utilizzato è aria. La superficie riscaldante è a temperatura costante di 373,15K. Re:166-940 per simulazioni primarie e 135-1500 in alcune verifiche numeriche. La dimensione delle unità TPMS è 20x20x20 mm e il modello è costituito da quattro unità (20x20x80mm). La simulazione è stata eseguita mediante software ANSYS CFX. Il solido è in Alluminio. La verifica sperimentale è stata condotta sul modello Gyroid, registrando risultati in accordo con i dati sperimentali (errore max <6%). Tra le strutture TPMS, il modello D risulta il migliore in termini di trasferimento di calore per convezione, grazie al pattern di flusso senza "through-holes" che favorisce una maggiore interazione fluido-parete e la generazione di vortici.
Viswanath; Khan Modrek; Ali; Al-Rub	2023	L'obiettivo dello studio è di presentare un'ottimizzazione topologica multiobiettivo basata sull'approccio SIMP (Solid Isotropic Method of Penalization) per ottimizzare simultaneamente le funzioni obiettivo termiche e strutturali per ottenere concept con migliori caratteristiche di dissipazione del calore e integrità strutturale. Si valutano i comportamenti termici e strutturali delle strutture mappate TPMS confrontandole con le strutture ottimali originali.	Si valuta un approccio di ottimizzazione topologica con l'obiettivo di minimizzare la temperatura media e massimizzare la rigidità rispetto al peso. Si valuta un metodo della somma pesata per combinare linearmente le due funzioni obiettivo. L'ottimizzazione è efficace per la progettazione di dissipatori di calore passivi avanzati, ottimizzando le strutture reticolari basate su TPMS. Le strutture Primitive mostrano prestazioni superiori nella conduzione di calore. La riduzione della dimensione della cella unitaria perpendicolarmente alla riduzione di riscaldamento migliora la conducibilità effettiva. Al contrario, una riduzione della dimensione della cella lungo la direzione di riscaldamento la riduce. La Primitive eccelle sotto carico interno (peso proprio) mentre G e D si comportano meglio sotto carico esterno. I risultati ottenuti devono essere verificati sperimentalmente.
Brambati; Guilizzoni; Foletti	2024	Studio che si propone di definire una singola correlazione per il calcolo del coefficiente di scambio termico convettivo, valida per diversi fluidi e diverse topologie TPMS. Analisi CFD con condizioni di flusso completamente turbolento ($Re > 5000$). Tipologie indagate: G, P, D con diversi livelli di porosità (70%, 80%, 90%) e lunghezze cella unitaria (8mm e 16mm). Materiale considerato: alluminio (conducibilità termica 181 W/mK)	Per la calibrazione sono stati utilizzati fluidi (aria e acqua con Pr compreso tra 0,7 e 7); per la validazione del modello sono stati utilizzati: aria, acqua e acetone. Proprietà termo-fisiche dei fluidi considerate costanti per ciascuna simulazione. Tin (fluido caldo) 333K e Tinf (fluido freddo) 293K, Pout 1 atm, Portate massiche variabili per analizzare Re (5000-50000). Modello Shear Stress Transport per valutare ricircoli e zone di separazione. Risultati convalidati rispetto a dati sperimentali precedenti (80% rientra in una deviazione del +/-10%). Dispersione dei risultati di Primitive attribuiti all'influenza del riscaldamento viscoso. La correlazione con D tende a sovrastimare il coefficiente (entro +/-20%), poiché genera un forte flusso turbolento con elevate prestazioni termiche, ma con diametro idraulico inferiore, con conseguenti Nu più bassi. Coefficiente di scambio termico predetto con +/-20% anche per livelli di porosità del 70-90% e lunghezza cella 8mm. Per Re elevati, il riscaldamento viscoso diventa significativo per l'aria e la topologia Primitive, influenzando la temperatura di parete e il coefficiente di scambio convettivo. In definitiva: la correlazione proposta offre una precisione nettamente migliore rispetto alle correlazioni tradizionali e già presenti in letteratura per TPMS.

<p>Liu; Chen; Oo; Pan; McCrimmon; Bai</p>	<p>2024</p>	<p>Lo studio valuta il Design della topologia degli scambiatori di calore su reticolo TPMS. Studio dell'impatto di: dimensioni delle celle e spessori delle pareti della struttura reticolare sulle prestazioni. L'obiettivo è identificare i parametri di progettazione di uno scambiatore di calore ad alte prestazioni con una perdita di pressione minima del fluido ma un massimo trasferimento di calore. Utilizzo tecniche di simulazione per determinare le proprietà termofluidodinamiche. Ricerca configurazioni ottimali che massimizzano lo scambio termico e che garantiscano integrità strutturale. L'analisi comprende esami dettagliati dei modelli di flusso del fluido, dei cambiamenti di temperatura e delle perdite di pressione attraverso i diversi tipi di reticolo.</p>	<p>I reticoli Gyroid, Diamond e SplitP mostrano prestazioni quasi identiche quando il rapporto superficie/volume è mantenuto costante. - Il punto di lavoro più efficiente scambiatori con reticolo Gyroid si trova in corrispondenza di numeri di Reynolds (Re) tra 300 e 800 e una velocità media del fluido di circa 0,3 m/s. - Lo spessore sottile della parete del reticolo può ridurre la caduta di pressione dello scambiatore di calore di circa il 40% rispetto ai risultati di test. - L'angolo tra la direzione del flusso e l'orientamento TPMS può aumentare la caduta di pressione. - Un reticolo piatto da 8x8x4 mm ha mostrato un Nu più elevato e un fattore di attrito (f) inferiore rispetto ad altri reticoli con lo stesso rapporto superficie/volume. - Sono stati stampati Tre scambiatori di calore in alluminio e i risultati dei test sono paragonabili alle previsioni teoriche. - La simulazione ha previsto una caduta di pressione e un coefficiente di trasferimento di calore complessivo inferiori del 40% circa rispetto ai risultati di test, imputando questa differenza all'elevata rugosità superficiale della struttura reticolare.</p>
<p>Kwasi-Effah;Ibhadode ;Qureshi</p>	<p>2024</p>	<p>Ricerca su progetto, la simulazione e l'ottimizzazione di uno scambiatore di calore TPMS (TPMS-HX) ad alta temperatura (>900 °C) e pressione (fino a 25 MPa) aria-sCO₂, reso possibile dalla produzione additiva.</p>	<p>La struttura G-Prime 2 e FRD Prime TPMS hanno mostrato i numeri di Nusselt (Nu) più alti, indicando capacità superiori di trasferimento di calore, ma anche cadute di pressione più elevate. - Le TPMS Gyroid e Diamond hanno dimostrato una prestazione bilanciata con Nu e cadute di pressione moderate, adatte per applicazioni in cui sia i fattori termici che idraulici sono cruciali. - I risultati delle simulazioni numeriche per i campioni di alluminio rimangono i risultati primari dello studio, nonostante le discrepanze tra i dati sperimentali e numerici (differenza dallo 0% al 7,9% per il coefficiente di caduta di pressione), poiché seguono una tendenza simile. - Test sperimentali per la caduta di pressione sono stati condotti su campioni di PLA (acido polilattico) a causa delle limitazioni nell'ottenere campioni di alluminio. - È stato condotto uno studio di convergenza della griglia per l'indipendenza della griglia, mostrando un basso indice di convergenza della griglia (GCI) per G-Prime</p>

<p>Liu; Cheng; Oo; McCrimmon; Bai</p>	<p>2024</p>	<p>Raccolta di studi di ricerca sul miglioramento del flusso e del trasferimento di calore in canali di raffreddamento integrati con varie topologie TPMS e discussione degli effetti delle variabili di progettazione TPMS sulle prestazioni termiche. Vengono forniti confronti tra i TPMS e le strutture di raffreddamento convenzionali in diverse applicazioni di trasferimento di calore per mostrare i vantaggi delle prestazioni termiche. Vengono inoltre illustrati i metodi di fabbricazione per i canali di raffreddamento basati su TPMS. Inoltre, vengono delineate le raccomandazioni per la ricerca futura. Questa revisione fornisce quindi dettagli estesi sulla letteratura per la progettazione di canali di raffreddamento interni di prossima generazione e ad alta efficienza.</p>	<p>Il reticolo SplitP presenta il rapporto superficie/volume più elevato, mentre Schwarz il più basso; questo rapporto aumenta linearmente al diminuire della lunghezza dell'unità reticolare. - Nel modello HX-40, sono stati inseriti tre diversi tipi di reticoli (Gyroid, Diamond, SplitP), e le lunghezze delle unità sono state modificate per mantenere le stesse aree superficiali. - La più alta conducibilità termica e il minore spessore della parete determinano il massimo coefficiente di trasferimento di calore (HTC) o la massima capacità termica, ma l'HTC è meno sensibile alle variazioni di spessore. - Quando la conducibilità termica è superiore a $100 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, si osserva una variazione inferiore al 10% nell'HTC al variare della conducibilità termica da 100 a $1000 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, suggerendo che le leghe di alluminio possono essere utilizzate con risultati paragonabili al rame per ridurre costi e peso. - Uno scambiatore di calore gyroidale da $3\times 3\times 3$ pollici cubi (HX70-555, spessore della parete di 0,3 mm e lunghezza dell'unità gyroidale di 5 mm) ha permesso una riduzione di due volte delle dimensioni, una riduzione da due a tre volte della caduta di pressione e un aumento da due a tre volte del coefficiente di trasferimento di calore rispetto a uno scambiatore di calore a piastre commerciale da 20 kW (modello BT3x8-20) alla stessa portata. - Il materiale dell'HX-70 era l'alluminio. - I risultati sperimentali per l'HX70-555 hanno mostrato tassi medi di trasferimento di calore di 12,9 kW e 23,3 kW a diverse portate, con cadute di pressione corrispondenti di 9446 Pa e 35.784 Pa rispettivamente.</p>
<p>Beer; Rybàr</p>	<p>2024</p>	<p>Lo studio presenta l'analisi comparativa di tre configurazioni geometriche TPMS: Sheet-Gyroid, Skeletal-Gyroid e la nuova geometria combinata proposta dagli autori. Si valutano parametri quali coefficiente di trasferimento termico, Nu, fattore di attrito, fattore j di Chilton-Colburn e la caduta di pressione tramite analisi numerica basata su simulazioni.</p>	<p>Lo sheet-Gyroid è caratterizzato da flusso uniforme, prevalentemente laminare e dalla separazione del flusso in due gruppi di canali non intersecanti. Presenta la superficie di scambio termico più elevata ($19045,54 \text{ mm}^2$) e maggiore compattezza ($0,595 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$). La skeletal-Gyroid presenta volume di materiale maggiore e maggiore turbolenza (canali con sezione trasversale più ampia). Presenta la superficie di scambio termico più piccola ($9068,49 \text{ mm}^2$) e la minore compattezza ($0,283 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$). La geometria combinata Combined-Gyroid, ottenuta mediante operazioni booleane sottraendo il volume della skeletal a quella sheet, combina densità elevata di pori piccoli con una densità inferiore di pori più grandi, formando canali interconnessi. Presenta una superficie di scambio termico intermedia ($10412,72 \text{ mm}^2$) e una compattezza intermedia ($0,325 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$). Il materiale simulato tramite SOLIDWORKS FLOW SIMULATION è in lega di alluminio 6061. Sono stati valutati 50 scenari di flusso con portata volumetrica da 0,4 a $2 \text{ m}^3/\text{h}$. La struttura TPMS con geometria combinata mostra vantaggi significativi per applicazioni di scambio termico, mostrando la massima efficienza di trasferimento termico ($\text{Nu}, j >$) e livelli accettabili di perdite di pressione. Tale equilibrio la rende adatta agli scambiatori di calore compatti ed efficienti dal punto di vista energetico, mitigandone gli svantaggi. assicura una miscelazione intensiva del fluido, una distribuzione più uniforme del calore e l'eliminazione delle zone di stagnazione. La sheet-G pur offrendo una distribuzione uniforme del flusso e un'ampia superficie, mostra alte perdite di pressione e minore efficienza di trasferimento termico, limitandone le applicazioni per scenari che richiedono un basso consumo energetico. La skeletal-G mostra basse perdite di pressione, a scapito delle prestazioni termiche, rendendola valida per sistemi a bassa pressione o che privilegiano il minimo consumo energetico per il pompaggio dei fluidi.</p>

Saghir; Yahya	2024	<p>Studio per la progettazione e sviluppo scambiatori di calore efficienti e leggeri per applicazioni spaziali. Modello investigato: tubo orizzontale in cui circola fluido caldo, racchiuso da una struttura porosa TPMS, il tutto contenuto all'interno di una scatola rettangolare dove circola acqua a bassa temperatura</p>	<p>Studio condotto su tre strutture TPMS (Gyroid, Diamond,FKS),con differenti porosità (40%,50%,60%,70%). Area sup G (15,5-21,25 cm²), Area sup D(20,08-24cm²), Area sup FKS (23,13-27,89cm²). Maggiore è la superficie, minore è la porosità. Modello analizzato mediante analisi FEM, con flusso laminare, fluidi newtoniani e incomprimibili (olio motore, acqua). Risultati in accordo con dati sperimentali precedenti (differenza <7%). Confronto generale: Gyroid presenta Nu più elevato (2250), con porosità 50% rappresenta la miglior struttura per scambiatori di calore, mostra valore più basso di coefficiente di attrito (0,5), indicando una minore perdita di pressione. La superiorità della Gyroid è data da canali ondulati che permettono al fluido di circolare più a lungo, migliorando lo scambio termico.</p>
Dam; Khondoker	2024	<p>Lo studio si occupa di identificare i parametri di design per uno scambiatore di calore ad alte prestazioni con minime cadute di pressioni. L'approccio consiste nel comprendere l'interazione tra i diversi parametri geometrici, fluidodinamici e della distribuzione di temperatura all'interno delle strutture TPMS.</p>	<p>Sviluppo di un design parametrico utilizzando nTop per creare varie combinazioni (12) di HEX efficienti in alluminio, analizzando Gyroid, SpiltP e Diamond, con spessore di parete 2mm e 3mm e dimensioni cella (L 10mm, W 12mm, H 15mm). Fluido di lavoro: acqua. T_c,in 12°C, T_h,in 90°C. Condizioni di T, P, velocità tenuti costanti per le diverse simulazioni. l'indagine numerica ha evidenziato un campione (SpiltP, spessore 3 mm cella 12x12x12mm) con migliori prestazioni in termini di scambio termico e caduta di pressione. Lo studio sottolinea l'importanza fondamentale di considerare i fattori di temperatura e caduta di pressione e un design ottimale per aumentare lo scambio termico.</p>
Saghir; Rahman	2024	<p>L'obiettivo dello studio è indagare sull'importanza dell'impingement a getto su una struttura porosa Gyroid, esaminando due direzioni di flusso: parallelo alla superficie riscaldata e perpendicolarmente ad essa. Si vuole calibrare accuratamente il modello numerico confrontando le misurazioni sperimentali con una schiuma metallica e una struttura TPMS, utilizzando come fluido di raffreddamento l'acqua distillata.</p>	<p>La schiuma metallica utilizzata è alluminio 6061-T6 (porosità 0.91). La struttura Gyroid è in AlSi10Mg con porosità 0.7-0.7-0.9. Per la configurazione sperimentale, è stato riscaldato un blocco di alluminio mediante un flusso di calore applicato al fondo, ponendo la schiuma metallica o la TPMS sulla superficie superiore del blocco. Simulazione attraverso COMSOL. flusso in ingresso con diverse portate (3,74-19,85 cm³/s). T_{in} 20°C e flusso di calore applicato 38,400 W/cm². Flusso parallelo: entra ed esce da cilindri di 1mm di diametro. Flusso perpendicolare (impingement): flusso entra dall'alto, cilindro di 1mm di diametro, e ha due uscite laterali da 0,5cm. I risultati ottenuti sono in accordo con i dati sperimentali. Le strutture TPMS hanno mostrato una distribuzione uniforme della temperatura (la schiuma metallica presenta accumulo dello strato limite termico e aumento lineare della temperatura) e ha dimostrato superiorità nel raffreddamento, evidenziando temperature più basse e Nu più elevati. Il flusso parallelo alla superficie è risultato più efficiente nel raffreddamento rispetto a quello perpendicolare. inoltre, presenta minori cadute di pressione. L'impingement si è rivelato inefficace in presenza della TPMS, in quanto il flusso deve penetrare la struttura, ritardando il raffreddamento diretto sulla superficie calda. Porosità inferiori (0,7) comportano Nu più elevati (circa 80) a causa di una maggiore circolazione del flusso all'interno di ogni vuoto. Tuttavia, porosità inferiori comportano cadute di pressione più elevate. La TPMS G con porosità 0,8 mostra un PEC superiore: ottimo equilibrio tra elevato trasferimento di calore e ridotta caduta di pressione.</p>

<p>Gado, Al-Ketan, Aziz, Al-Rub, Ookawara</p>	<p>2024</p>	<p>Questa è una revisione esaustiva sugli sviluppi delle strutture a superficie minima triperiodica (TPMS) e il loro impiego per l'efficiente utilizzo dell'energia in applicazioni termiche. Il documento esamina gli approcci di progettazione delle TPMS (es. Gyroid, Diamond, Primitive), gli strumenti software di design e le tecniche di fabbricazione, in particolare la manifattura additiva (stampa 3D). Viene fornita una panoramica delle applicazioni emergenti delle TPMS, tra cui scambiatori di calore, sistemi di accumulo termico a calore latente, gestione termica delle batterie e distillazione a membrana. Infine, vengono identificate e proposte future direzioni di ricerca per le TPMS in settori come la gestione termica fotovoltaica e delle celle a combustibile, la raccolta di acqua atmosferica e la cattura di carbonio.</p>	<p>Efficacia Generale: le TPMS si dimostrano altamente efficaci in diverse applicazioni termiche grazie alla loro elevata superficie specifica al volume e a proprietà meccaniche superiori, L'interesse nella ricerca è cresciuto di sette volte tra il 2015 e il 2022. Fabbricazione: la manifattura additiva (AM) è il metodo più adatto per produrre queste geometrie complesse, ma può introdurre difetti (es. microfessure, vuoti, rugosità superficiale) che possono influenzare le prestazioni. Sono in fase di esplorazione nuove tecniche ibride (stampi, rivestimento) per ridurre costi e limitazioni. Applicazioni Efficaci Scambiatori di Calore: le strutture Diamond, Gyroid e IWP superano le prestazioni dei modelli convenzionali nel trasferimento di calore, grazie a percorsi di flusso tortuosi che migliorano la miscelazione. La Diamond è migliore per la compattezza, la Gyroid per la leggerezza. Accumulo di Calore Latente (TES): l'integrazione delle TPMS con i materiali a cambiamento di fase (PCM) accelera significativamente la velocità di fusione e riduce i tempi di fusione dei PCM. Un aumento della densità relativa (minore porosità) incrementa il tasso di accumulo termico ma riduce la capacità totale di calore latente. Gestione Termica delle Batterie: le TPMS nei canali di raffreddamento migliorano notevolmente l'uniformità e la riduzione della temperatura della batteria (riduzione fino al 9% della temperatura massima e 59.8% del differenziale). La combinazione di PCM, raffreddamento a liquido e TPMS è la più efficace. Distillazione a Membrana (MD): gli spacer basati su TPMS riducono la polarizzazione della temperatura (fino al 15% di miglioramento) e aumentano il flusso di acqua pura (fino al 50% in più rispetto agli spacer commerciali) grazie all'alta superficie specifica e all'induzione di turbolenza. Lo spacer tCLP ha mostrato le migliori prestazioni. Sistemi di Raffreddamento ad Adsorbimento (ACS): L'incorporazione di TPMS aumenta la potenza di raffreddamento specifica (SCP), con la struttura Lidinoid che ha mostrato un miglioramento del 12.4% rispetto alle alette convenzionali. Sviluppi Futuri e Sfide: Le TPMS hanno un grande potenziale per la gestione termica in fotovoltaico, celle a combustibile, raccolta di acqua atmosferica, cattura di carbonio e sistemi di energia termochimica. Tuttavia, manca una ricerca unificata basata su requisiti industriali e una caratterizzazione più approfondita dei difetti di fabbricazione.</p>
<p>Saghir; Yahya; Ortiz; Impellizzeri; Al-Ketan</p>	<p>2025</p>	<p>Le soluzioni di glicole etilenico (EG) e acqua rappresentano un'opzione per il raffreddamento in ambienti rigidi dove va assolutamente evitato il congelamento. L'obiettivo dello studio è analizzare il miglioramento nel trasferimento di calore in una struttura Gyroid TPMS utilizzando miscele di glicole etilenico e acqua, confrontando i dati sperimentali con un modello numerico per valutarne l'efficienza e la precisione. Inoltre, si valuta l'impatto della concentrazione di EG e del materiale della struttura (alluminio e argento) sulle prestazioni termoidrauliche (Nu e DP)</p>	<p>La struttura Gyroid in lega di alluminio AlSi10Mg (conduttività termica 237 W/mK) e argento (conduttività termica 429 W/mK). Il fluido di raffreddamento è una miscela di glicole etilenico e acqua con concentrazione variabile (5,10,20,30%vol di EG). Le proprietà fisiche (densità, viscosità dinamica, calore specifico, conduttività termica e Pr) considerate in base alla concentrazione. Le condizioni di test: Flusso di calore applicato alla superficie inferiore del blocco: 38000W/m²; portate massiche diverse: 11,8, 15,7,19,6 cm³/s (corrispondenti a velocità in ingresso 0,15-0,2-0,25 cm/s); Tin 11°C; regime flusso laminare (Re<2000). La modellazione numerica è stata effettuata mediante COMSOL con condizioni di velocità in ingresso e temperatura in ingresso impostate, uscita a pressione nulla. I risultati evidenziano che la struttura G garantisce un meccanismo di raffreddamento uniforme, indipendentemente dalla miscela utilizzata. Indipendentemente dalla concentrazione della miscela, il Nu è risultato quasi identico, a causa della piccola variazione del Pr tra le miscele. L'aumento della portata porta ad una maggiore rimozione del calore a Nu più elevati. La struttura in argento porta ad un trasferimento di calore maggiore. Mentre l'aumento della concentrazione di glicole non migliora in modo significativo il trasferimento di calore. Al contrario, un aumento della concentrazione di glicole consente un aumento della viscosità della miscela, che a sua volta causa un aumento significativo della caduta di pressione e coefficiente di attrito più elevato. Re diminuisce all'aumentare della concentrazione di EG. Il modello numerico è in accordo con i dati sperimentali (differenza max 8%) per quanto riguarda le temperature per l'alluminio. Per l'argento le differenze sono più elevate (10-13%). il PEC aumenta per: aumento portata, diminuzione della concentrazione di EG, per TPMS in argento.</p>

<p>Renon; Jeanningros</p>	<p>2025</p>	<p>L'obiettivo dello studio è ottimizzare le prestazioni termoidrauliche dei canali di scambio termico basati su strutture TPMS Schwarz-D, Schoen-G., investigando i range operativi applicabili agli scambiatori intermedi di reattori a sale fuso (MSR). Si vogliono stabilire correlazioni per il coefficiente di scambio termico (Nu) e il fattore di attrito e identificare i parametri chiave che governano il trasferimento di calore e la caduta di pressione, rendendo le correlazioni indipendenti da parametri geometrici specifici (lunghezza cella unitaria o spessore della parete).</p>	<p>Lo studio è stato effettuato mediante il software ANSYS Fluent con il modello di turbolenza SST. E' stato utilizzato come fluido il sale fuso ternario (NaCl-MgCl₂-PuCl₃) con proprietà simili all'acqua (Pr tra 3 e 5). Lo studio ha caratterizzato le geometrie utilizzando il diametro idraulico (dh) e la densità (Φ) (o porosità ϵ) della struttura, che si sono dimostrati più adatti per correlazioni generiche rispetto allo spessore della parete (ts) e alla lunghezza della cella unitaria (L). 7 celle elementari in serie per garantire un flusso completamente sviluppato (solo le celle centrali 3-6 sono state usate per l'analisi), condizioni periodiche sui piani laterali, flusso di massa e temperatura in ingresso, pressione in uscita, e temperatura di parete uniforme. Il Numero di Nusselt medio aumenta con il Numero di Reynolds (Re) e con il Numero di Prandtl (Pr). È stata identificata una dipendenza del tipo $Pr^{(1/3)}$, coerente con molti studi in letteratura. È stato introdotto un parametro aggiuntivo (μ/μ_w), il rapporto tra la viscosità media del fluido e la viscosità alla temperatura della parete, per caratterizzare lo scambio termico e tenere conto degli effetti delle condizioni al contorno della parete (fluido riscaldato o raffreddato). Questo parametro è particolarmente importante per applicazioni con elevate densità di flusso di calore, come nei reattori a sale fuso. Le correlazioni ottenute per il Numero di Nusselt si sono rivelate indipendenti dal diametro idraulico (dh) e dalla densità (Φ) delle strutture TPMS. Le prestazioni termiche di G e D sono risultate comparabili. $Nu = 0.2644 Re^{(0.69)} Pr^{(1/3)} (\mu/\mu_w)^{(0.20)}$. L'errore relativo medio mostrato con tale equazione è del 1.60% con valore massimo di 5,48%. Per l'applicazione la D risulta la scelta ottimale perché implica minori cadute di pressione pur mantenendo prestazioni termiche simili alle G.</p>
<p>Ornelas; Gomez; Perez; Piedra</p>	<p>2025</p>	<p>L'obiettivo principale dello studio è condurre un'indagine numerica completa del flusso di fluido e del trasferimento di calore all'interno della struttura TPMS Gyroid in condizioni di flusso laminare, sviluppare un metodo diretto per calcolare la caduta di pressione utilizzando il modello di mezzo poroso di Darcy-Forchheimer, introducendo equazioni per determinare la permeabilità e il coefficiente di Forchheimer in funzione della porosità e caratterizzare le prestazioni di trasferimento di calore sviluppando una correlazione per Nu in funzione dei numeri di Re e Pr.</p>	<p>E' stata condotta un'analisi numerica CFD tramite ANSYS Fluent in condizioni di flusso laminare, stazionario con fluido newtoniano e incompressibile. La geometria è caratterizzata da celle unitarie di dimensioni 10x10x10 mm posizionata all'interno di un canale parallelepipedo dritto (180x30x30mm) in alluminio e porosità tra 0.526 e 0.893. Re tra 10 e 300 (regime laminare). velocità costante all'ingresso del canale, condizione di no-slip sulle pareti laterali, piattaforma riscaldante mantenuta a T costante di 313K, Tin fluido a 273K. Per bassi Re (10) la velocità del fluido aumenta nelle creste e valli della struttura. Il flusso è uniforme a monte e a valle della struttura. Per Re alti (300) il flusso è più disturbato, con vortici all'interno della struttura, avvicinando il comportamento del flusso dipendente dal tempo. Le linee di flusso 3D mostrano che il fluido si sparge in un'area più ampia man mano che attraversa la struttura, con aumento di velocità nelle regioni con sezioni trasversale ridotta. Il modello di Darcy-Forchheimer proposto per la caduta di pressione, con coefficienti piecewise è un risultato significativo e offre uno strumento semplice ma efficace. • La correlazione di potenza per il Numero di Nusselt (in funzione di Re e Pr) colma una lacuna di ricerca e sarà utile per la progettazione e il dimensionamento di scambiatori di calore basati su strutture Gyroid, in particolare per le loro applicazioni non convenzionali.</p>

<p>Zhang;Peng; Jia;Zhao; Wang;Duan; Lei</p>	<p>2025</p>	<p>L'obiettivo principale dello studio è proporre un nuovo metodo di riempimento conforme per la progettazione di scambiatori di calore basati sulle TPMS. Si vogliono affrontare le diverse sfide di progettazione e fabbricazione (es. supporti ridotti, prevenzione delle perdite, frammentazione) tipiche degli scambiatori di calore realizzati in Additive Manufacturing. Si vuole altresì valutare l'effetto dei diversi orientamenti di riempimento e i tipi di celle unitarie sulla capacità di trasferimento tramite simulazioni numeriche e test sperimentali.</p>	<p>Tramite simulazioni numeriche (CFD) e test sperimentali su Gyroid, Diamond, I-WP e Primitive realizzati attraverso Laser Powder bed fusion utilizzando polvere di lega di alluminio (AlSi10Mg), è stato progettato un campione stampabile e privo di perdite (Altezza 235mm, diametro 75mm, porosità 70%, orientamento di stampa lungo la dimensione più lunga per ridurre il consumo di materiale e accelerare il processo). La modellazione numerica effettuata tramite software ANSYS Fluent su acqua con T costanti ($T_{c_in}=23^{\circ}C$ e $T_{h_in}=90^{\circ}C$). La verifica del design strutturale, tramite le ricostruzioni μ-CT (micro-tomografia computerizzata ai raggi X per scansione e ricostruire i componenti fabbricati, verificando la completezza dei canali interni), ha dimostrato che il metodo di design proposto risolve le sfide di fabbricazione per gli scambiatori. Il design con regioni di transizione affusolate ha permesso la fabbricazione auto-supportante, con solo pochi supporti nelle zone morte che impattano minimamente il flusso. Il metodo di riempimento conforme ha garantito una transizione naturale e una minore probabilità di perdite nella regione di connessione tra il core TPMS e il guscio esterno. Le immagini μ-CT hanno mostrato una distribuzione uniforme dello spessore e nessun blocco significativo di polvere o crepe, migliorando la qualità di stampa dell'AlSi10Mg. Le strutture conformi hanno mostrato un tasso di trasferimento di calore più rapido e temperature di uscita più basse rispetto alle strutture convenzionali (G-III), indicando una maggiore efficienza di trasferimento di calore. Il core TPMS ha promosso un trasferimento di calore uniforme e una miscelazione dei fluidi. I miglioramenti nell'efficienza di trasferimento di calore sono stati ottenuti tramite i metodi di design: l'I-WP conforme ha raddoppiato l'efficienza aumentando Nu, mentre il Primitive conforme l'ha triplicata riducendo f. Gli esperimenti hanno confermato tassi di trasferimento di calore più rapidi per le strutture conformi.</p>
<p>Dharmalingam; O'Malley; Tancabel; Aute</p>	<p>2025</p>	<p>Studio numerico per identificare i parametri chiave che governano il trasferimento di calore e la caduta di pressione nei reticoli Gyroid e Diamond TPMS, al fine di fornire tutti gli elementi necessari per la progettazione di scambiatori di calore, indipendentemente dai parametri geometrici considerati (dimensione della cella elementare, spessore della parete, ecc.). A tal fine, sono state sviluppate correlazioni per la stima dello scambio di calore e della caduta di pressione. In particolare, questo studio si concentrerà sull'esplorazione dei campi operativi applicabili agli scambiatori intermedi di reattori a sali fusi, poco studiati in letteratura ($2961 < Re < 18.254$; $3 < Pr < 5$; $4 \text{ mm} < d_h < 12 \text{ mm}$; alta densità di flusso termico $\sim 1 \text{ MW/m}^2$)</p>	<p>Una riduzione del diametro idraulico (D_h) è il metodo più efficace per aumentare il trasferimento di calore mantenendo un'elevata compattezza, in quanto aumenta il numero di Reynolds e riduce la resistenza termica conduttiva. - La convalida sperimentale preliminare con acqua ha evidenziato le sfide nel tenere conto delle caratteristiche di fabbricazione come la rugosità superficiale, ma deviazioni consistenti hanno permesso l'uso di fattori di correzione costanti (entro $\pm 10\%$ per la caduta di pressione e $\pm 5\%$ per la velocità di trasferimento del calore/UA). - La ricerca futura dovrebbe documentare il compromesso tra l'elevata densità energetica e la producibilità per i progetti a parete sottile</p>

Lai; Samad	2025	<p>Lo studio si propone di sviluppare e ottimizzare il flusso di scambiatori di calore basati su struttura Gyroid prodotti mediante fabbricazione additiva, in quanto presenta: alta densità di superficie, superficie liscia (riduce resistenza idrodinamica e caduta di pressione), autoportante, compatta e leggera, promuove la miscelazione e la turbolenza (migliora lo scambio termico).</p>	<p>Il design preciso della cella unitaria Gyroid è stato ottenuto mediante il software nTopology (10mm con spessore della parete di 1mm). Il modello finale HEX ha dimensioni 74x74x30 mm, prima in PLA e poi in acciaio inox 316L (SS316L). La rugosità superficiale è stata considerata trascurabile. $T_{c_in}=25^{\circ}C$ e $T_{h_in}=70^{\circ}C$. Le prestazioni sono state confrontate con uno scambiatore convenzionale a piastre dello stesso materiale. I risultati sperimentali hanno mostrato un buon accordo con le previsioni computazionali, con una deviazione media per il tasso di trasferimento di calore entro il 5%. L'analisi sperimentale è stata condotta in condizioni di laboratorio, pertanto le applicazioni reali in ambito aerospaziale presentano sfida più complesse (vibrazioni, corrosione) che richiedono ulteriori indagini.</p>
Yan;Deng;Wu; Wang;Huang	2025	<p>Lo studio presenta una ricerca sull'implementazione geometrica dei reticoli TPMS, in particolare del Gyroid per ridurre significativamente le perdite per resistenza al flusso e il consumo di energia di pompaggio. Si utilizzano simulazione numeriche sfruttando la periodicità della Gyroid per investigare l'influenza delle dimensioni anisotrope delle celle unitarie sulle prestazioni termoidrauliche. Sono state condotte prove su otto configurazioni distinte (una originale e sette manipulate) per valutare l'influenza dello stiramento nella direzione del flusso (β), della compressione/estensione trasversale (α e γ) e delle dimensioni complessive delle celle unitarie. Verrà introdotto anche il rapporto d'aspetto (δ) come parametro di design critico.</p>	<p>La struttura Gyroid è manipolata alterando i parametri geometrici chiave: l_x, l_y, l_z (lunghezze periodiche lungo gli assi x, y, z). Vengono definite le proporzioni di trasformazione: $\alpha = l_x/l_{x,0}$, $\beta = l_y/l_{y,0}$, $\gamma = l_z/l_{z,0}$. L'asse y è la direzione del flusso, quindi β è il rapporto di stiramento nella direzione del flusso, mentre α e γ sono i rapporti di compressione/estensione trasversali. La porosità (ϵ) di tutte le strutture Gyroid è mantenuta costante al 70%. Il rapporto d'aspetto (δ) è definito come $\delta = l_x/l_y$.</p> <p>Sono state costruite otto celle unitarie Gyroid distinte (Caso 0 originale, Casi 1-7 manipulate). La dimensione della cella unitaria di riferimento ($l_{x,0}$, $l_{y,0}$, $l_{z,0}$) è 4 mm. L'analisi è stata eseguita mediante ANSYS Fluent per valutare il trasferimento di calore. Il modello core ha lunghezza 60mm (asse y direzione del flusso) e dimensioni trasversali uniformi 12 mm (assi x,z). Flusso in controcorrente (acqua fredda/calda). Portata massica in ingresso (da 0.005 a 0.030 kg/s) e temperature fisse (293.15 K per freddo, 353.15 K per caldo). Pressione manometrica 0 Pa all'uscita. Il dominio solido è in AlSi10Mg. Modello di turbolenza k-ω SST. I risultati numerici hanno sottostimato i dati sperimentali per U (max -6.62% a $Re=1400$) e f (max -4.70% a $Re \approx 600$). Le discrepanze sono attribuite a microstrutture superficiali residue nel prototipo sperimentale. La metodologia di simulazione considerata sufficientemente affidabile. Aumentando β (es. da 1.0 a 3.0), il tasso medio di trasferimento di calore (\dot{Q}_{ave}) diminuisce progressivamente (fino a circa il 50% a $\beta=3.0$ rispetto a $\beta=1.0$). La caduta di pressione (ΔP_c) mostra una riduzione significativamente più marcata rispetto all'attenuazione del trasferimento di calore (fino al 92% in meno a $\beta=3.0$ rispetto a $\beta=1.0$). Lo stiramento lungo il flusso riduce la tortuosità del percorso del flusso e diminuisce le perturbazioni del flusso indotte dalle pareti. Ciò porta a una velocità media complessiva inferiore, a una distribuzione della velocità nella direzione del flusso più uniforme e a un indebolimento del flusso secondario circolante (elicoide). Questi effetti combinati contribuiscono alla riduzione della resistenza al flusso e della caduta di pressione. La riduzione dei punti di impingement del flusso per unità di lunghezza e il ridotto trasporto termico basato sulla velocità contribuiscono al degrado delle prestazioni di trasferimento di calore. I. Compressione Trasversale ($\alpha = \gamma = 0.75$): Aumenta il trasferimento di calore (\dot{Q}_{ave} superiore del 30.59% rispetto a $\alpha = \gamma = 1.0$). Mantendendo la dimensione dell'unità nella direzione del flusso (l_y) costante, la caduta di pressione (ΔP_c) rimane quasi identica nonostante l'aumento o la diminuzione delle dimensioni trasversali (l_x e l_z). Ciò è spiegato dal fatto che le variazioni in l_y influenzano la caduta di pressione molto più di quelle in l_x. L'accoppiamento della compressione trasversale con lo stiramento nella direzione del flusso (o equivalentemente, la riduzione del rapporto d'aspetto δ) migliora simultaneamente le prestazioni termiche e riduce la resistenza al flusso a parità di numero di Reynolds</p>

<p>Wang;Qian; Zhang;Qiu;Yu; Shi;Chen</p>	<p>2025</p>	<p>L'obiettivo dello studio è introdurre e analizzare una progettazione innovativa di scambiatori di calore FGH-TPMS (Functionally Graded Hybrid). Si vuole integrare sinergicamente le strutture Gyroid e Diamond per migliorare significativamente l'efficienza di trasferimento di calore e fluidodinamica.</p>	<p>Si valuta l'integrazione delle strutture elementari Gyroid e Diamond tramite una transizione proporzionale delle funzioni di campo, con una zona di transizione di 15 mm (larghezza di una cella unitaria). Si esaminano sei distinte configurazioni ibride (xy1, xy2, yz1, yz2, xz1, xz2) oltre alle strutture pure Gyroid e Diamond. La cella unitaria è cubica con lato di 15 mm, disposte in una matrice 6x4x3, con porosità mirata di 0.72. Le dimensioni complessive dello scambiatore di calore: 94 × 64 × 49 mm. Il materiale scelto è AlSi10Mg realizzato tramite SLM. Le simulazioni sono state condotte tramite ANSYS Fluent con Re (400-6000) utilizzando acqua (Tc_in=27°C e Th_in=80°C). Incertezza massima del 6% sui risultati calcolati. FGH-TPMS hanno mostrato capacità eccezionali, specialmente a Re moderati. A Re elevati, la struttura Diamond ha un chiaro vantaggio (5.26%-7.43% di miglioramento rispetto al Gyroid per il trasferimento di calore per unità di volume). G rappresenta la struttura ottimale per Nu (>13,71% rispetto a D). Le strutture FGH-TPMS mostrano eccezionali capacità di trasferimento di calore, con xy2 che offre un aumento del 9.44% nel trasferimento di calore per unità di differenza di temperatura rispetto al G. Il Gyroid è ottimale per il Nu, seguito da xy2 e xy1, che superano significativamente il D. Si sono osservati miglioramenti marcati nella resistenza al flusso nelle configurazioni FGH-TPMS. Le strutture yz1 e xy1 hanno mostrato la migliore fluidità, con riduzioni della resistenza del 14.40% e 13.13% rispettivamente rispetto al G, principalmente attribuite a una migliore guida del fluido all'ingresso e all'uscita. La zona di miscelazione nelle strutture FGH-TPMS migliora le prestazioni, garantendo una transizione fluida del fluido e riducendo la resistenza al flusso all'ingresso. Le regioni di miscelazione (eccetto xz2) sono lisce, con migliore fluidità sul lato più vicino al G e maggiore resistenza sul lato D. Il Criterio di Valutazione delle Prestazioni (PEC) ha sottolineato la superiorità delle strutture FGH-TPMS. La struttura yz1 è la migliore con un PEC del 15.7% più alto rispetto al G di base, rappresentando una valida soluzione per scambiatori di calore grazie al suo eccellente equilibrio tra efficienza di trasferimento di calore e resistenza al flusso.</p>
<p>Reynolds; Lecarpentier; Holland</p>	<p>2025</p>	<p>L'obiettivo dello studio è valutare quantitativamente la qualità di stampa e le prestazioni di trasferimento di calore per scambiatori basati su TPMS prodotti mediante AM con diversi materiali. Si quantificano i parametri topologici (porosità e diametro idraulico) delle strutture e si determina se differiscono significativamente dai parametri di progetto. Si esamina se il materiale utilizzato per la stampa influisce in modo significativo sul trasferimento di calore e, infine, si dimostra che, caratterizzando accuratamente i parametri topologici, è possibile ottenere coefficienti di scambio termico simili per materiali con conduttività termica differente.</p>	<p>Sono state analizzate strutture Sheet-Gyroid con dimensioni della cella unitaria di 9,141 mm per ciascuna dimensione e porosità di 0.375 per canale (0,75 totale), diametro idraulico di 4.5mm e spessore della parete 0.75mm. Due canali per i fluidi non intersecanti e simmetrici. I materiali investigati sono: resina (polimero fotosensibile UV), allumina "green", allumina sinterizzata (post-processata per densificazione), alluminio (lega AlSi10Mg), e nylon (PA2200), tramite MSLA (resina), DLP (allumina green) e SLM (alluminio e nylon). Due configurazioni di test: 1) Acqua calda (50 °C) in un canale e aria fredda (20 °C) nell'altro, assumendo una resistenza di trasferimento di calore trascurabile dal lato dell'acqua.; 2) Acqua calda e acqua fredda (mantenute da un chiller) in entrambi i canali, con numeri di Reynolds nominalmente uguali. Le scansioni μCT hanno rivelato deviazioni tra le geometrie progettate e quelle effettivamente stampate: l'allumina sinterizzata, l'alluminio e il nylon, la porosità e il diametro idraulico differivano rispettivamente fino al 7% e 12% rispetto al file STL originale. L'allumina sinterizzata ha mostrato le maggiori deviazioni complessive, inclusa una differenza del 22% nello spessore della parete. Il nylon è risultato non adatto per i test di trasferimento di calore a causa di ostruzioni significative e microporosità aperte nella fase solida. Sono stati testati solo allumina sinterizzata, alluminio e resina. Il tasso di trasferimento di calore era molto più elevato per il Caso 2. Per (Re < 400), i coefficienti di trasferimento di calore complessivi erano comparabili per tutti i materiali solidi. Per Re > 400, il coefficiente di trasferimento di calore complessivo per la resina è diminuito significativamente rispetto all'alluminio e all'allumina sinterizzata a causa della bassa conduttività termica della resina, rendendo la resistenza della parete significativa. La ricerca convalida l'uso di materiali polimerici a basso costo (come la resina) per la sperimentazione sul trasferimento di calore nelle TPMS, anche in applicazioni in cui normalmente non sarebbero adatti, purché la geometria stampata sia precisamente caratterizzata.</p>

<p>Yan;Zhang;Li; Zhang;Zhang; Duan;Sun;Liu; Song</p>	<p>2025</p>	<p>L'obiettivo dello studio è introdurre e investigare due metodi di ibridazione per le strutture TPMS: Proportional Hybridization Method (PHM) e Sigmoid Function (SF), basati sui tipi Gyroid (G) e Schwartz Diamond (SD), per migliorare la libertà di progettazione degli scambiatori di calore. Studiare le prestazioni di flusso e di trasferimento di calore attraverso esperimenti e simulazioni per analizzare gli effetti dell'ibridazione.</p>	<p>Questo studio estende la ricerca introducendo fluidi di lavoro olio-acqua, una novità rispetto ai precedenti studi basati principalmente su acqua-acqua, e applicandola al settore della gestione termica aerospaziale (scambiatori di calore combustibile-liquido). I metodi di ibridazione applicati alle strutture G e D: Proportional Hybridization Method (PHM): dove il coefficiente di ibridazione (μ) è una costante che varia la proporzione delle cellule (es. 100% SD, 90% SD-10% G, 50% SD-50% G, 10% SD-90% G, 100% G); Sigmoid Function (SF) Flexible Transition Hybridization Method: che consente una transizione graduale tra le strutture TPMS. I moduli di scambio di calore (HEM) sono stati progettati con dimensioni del corpo centrale di 60x50x40 mm e uno spessore minimo di parete/deflettore di 1 mm. I prototipi sono stati fabbricati utilizzando la tecnologia Selective Laser Melting (SLM) con materiale AlSi10Mg. Le scansioni CT hanno rivelato che lo spessore della parete era sempre maggiore del valore di progetto, attribuito a fattori come stress residui interni, aumento dello spessore della polvere e effetto a gradini. È stata osservata una notevole rugosità superficiale, che influisce sul coefficiente di trasferimento di calore e sulla caduta di pressione. I fluidi di lavoro erano olio termico caldo e acqua fredda con flusso incrociato. Il metodo di simulazione CFD sviluppato impiegando il modello di turbolenza SST ha mostrato buona affidabilità complessiva, con deviazioni massime del 8.34% per la differenza di temperatura e del 39.36% per la caduta di pressione, spiegate dalle differenze tra i modelli sperimentali e di simulazione (es. dimensioni e geometrie semplificate). Le strutture G hanno dimostrato le migliori prestazioni generali in termini di bassa caduta di pressione e alto Nu.</p> <p>I metodi di ibridazione PHM e SF hanno effetti benefici sulle prestazioni dello scambiatore di calore. Il PHM_0.5SD_0.5G_HE ha migliorato l'efficienza (ϵ). I moduli SF ibridi (SF_SDinlet_G_HEM e SF_SD_Ginlet_HEM) hanno aumentato significativamente il tasso di trasferimento di calore (Q), grazie a una dinamica di trasferimento di calore abbondante nella sezione di transizione.</p>
<p>Coe;Rahnama; Reynolds; Holland</p>	<p>2025</p>	<p>L'obiettivo dello studio è simulare l'impatto dello stretching (stiramento) della cella unitaria sulla performance termica e idraulica di uno scambiatore di calore basato su una Superficie Minima Tripla Periodica (TPMS) di tipo Gyroid e comprendere se lo stretching possa mantenere il miglioramento del trasferimento di calore mitigando al contempo gli svantaggi di perdita di pressione tipici delle TPMS.</p>	<p>È stata utilizzata la geometria della cella unitaria Gyroid. Lo stretching è stato applicato nella direzione del flusso (direzione x) con rapporti di stretching (stretch ratio) fino a 5.0 rispetto alla geometria originale. La porosità è stata mantenuta costante durante lo stretching. Topology è stato usato per costruire la geometria, definendo dimensioni della cella unitaria e il parametro di offset della parete (τ) che controlla lo spessore della parete. Per le simulazioni CFD è stato utilizzato OpenFOAM adottando un approccio a cella unitaria per ridurre le risorse computazionali, con condizioni al contorno periodiche nella direzione del flusso e condizioni al contorno di simmetria nelle direzioni non di flusso. È stato impiegato un risolutore di trasferimento di calore periodico con temperatura della parete costante. I fluidi di lavoro simulati sono stati aria e acqua, con numeri di Reynolds (Re) compresi tra 75 e 5000. I risultati simulati sono stati validati con misurazioni sperimentali su scambiatori di calore in resina polimerica e alluminio TPMS. I test sulla caduta di pressione sono stati eseguiti con aria come fluido di lavoro. Gli esperimenti di trasferimento di calore sono stati eseguiti con acqua come fluido sia caldo che freddo in configurazione a flusso in controcorrente. I risultati simulati per il fattore di attrito e il numero di Nusselt hanno mostrato un buon accordo con i dati sperimentali e con lavori pubblicati, sebbene alcune deviazioni si siano verificate a Re più elevati, attribuite a difetti di stampa o incongruenze topologiche nelle strutture fisiche. Per l'aria, l'aumento del rapporto di stretching riduce simultaneamente sia la potenza di pompaggio (fino al 93%) che il volume (fino al 49%). Questo effetto è consistente anche con l'acqua come fluido di lavoro. Tutti i termini di performance indicano il vantaggio di uno scambiatore di calore G-stretching. In alcuni regimi di Reynolds, le TPMS stirate possono anche superare le correlazioni dei tubi dritti, portando a design di scambiatori di calore compatti. Questi risultati suggeriscono che gli scambiatori di calore basati su TPMS offrono vantaggi significativi rispetto ai design esistenti.</p>

Kilic	2025	<p>L'obiettivo dello studio è valutare le prestazioni degli scambiatori di calore basati su TPMS in condizioni flusso turbolento, confrontando l'impatto di diversi materiali (alluminio e argento) e fluidi di lavoro (acqua e nanofluidi) sulle performance termiche.</p>	<p>Sono state utilizzate strutture TPMS di tipo Gyroid, prodotte tramite stampa 3D con porosità fissa a 0.7. I materiali testati AlSi10Mg e argento. I fluidi di lavoro: acqua distillata pura e nanofluido contenente 0,6% in volume di nanoparticelle di Al₂O₃ (di dimensioni 50nm) in acqua distillata. Il nanofluido ha maggiore conducibilità termica, densità e capacità termica, ma anche maggiore viscosità e perdita di pressione. Le portate investigate sono: 23.56 cm³/s, 27.49 cm³/s, 35.34 cm³/s in condizioni di flusso turbolento. Le simulazioni numeriche sono state realizzate mediante software ANSYS Fluent con metodo FEM. Il nanofluido è stato trattato come newtoniano a causa della bassa concentrazione di nanoparticelle metalliche, e il flusso come incompressibile e turbolento. I risultati delle simulazioni CFD sono stati validati con i dati sperimentali, mostrando deviazioni inferiori al 7%.: I risultati numerici hanno mostrato un buon accordo con i dati sperimentali, con deviazioni medie tra il 4.65% e il 7.02%, rientrando nei limiti accettabili per i sistemi di gestione termica. Piccole deviazioni sono attribuite a fluttuazioni di calore, perdite di calore e variazioni del flusso in ingresso nel sistema reale. Le strutture in Ag hanno evidenziato prestazioni termiche superiori: raggiunge temperature inferiori e una distribuzione della temperatura più uniforme rispetto alle strutture Al; presenta conducibilità termica circa 1.8 volte superiore rispetto all'Al, il che facilita una più efficiente dissipazione del calore; mostra valori PEC dal 25% al 30% più alti rispetto alle strutture Al TPMS a tutte le portate e valori di gradiente di temperatura inferiori di circa il 20% rispetto alle Al TPMS con acqua distillata. Il nanofluido migliora la distribuzione della temperatura (8-12%) rispetto all'acqua distillata, sebbene con un leggero aumento della caduta di pressione. La combinazione Ag e nanofluidi offre una performance di raffreddamento ottimale a portate elevate, grazie all'effetto sinergico dell'alta conducibilità termica dell'Ag e delle proprietà migliorate di trasferimento di calore del nanofluido.</p>
-------	------	---	--

<p>Yan;Deng;Wu; Yu;Xiao;Wang</p>	<p>2025</p>	<p>Lo studio riguarda l'ottimizzazione degli scambiatori di calore con strutture a superficie minima triplicamente periodica (TPMS), in particolare la configurazione Giroide, per applicazioni in contesti ad alta richiesta termica come i motori aeronautici. , lo studio introduce una strategia di manipolazione geometrica del reticolo basata sull'equazione implicita che governa la struttura Giroide. Questa strategia induce una morfologia allungata nella direzione del flusso (streamwise-stretched morphology) nella struttura Giroide, con l'obiettivo di ridurre significativamente la resistenza al flusso pur mantenendo elevate prestazioni termiche. L'indagine valuta sistematicamente l'influenza di questa manipolazione sulla prestazione termo-idraulica-meccanica, sulle caratteristiche del flusso e sulla prestazione complessiva, utilizzando un approccio combinato sperimentale e numerico.</p>	<p>La strategia di manipolazione geometrica proposta permette una significativa riduzione della resistenza al flusso con un compromesso solo marginale nelle prestazioni termiche. La struttura manipolata ($\beta = 2.0$) mostra una riduzione dell'80% della caduta di pressione a fronte di una diminuzione del 28% del tasso di trasferimento di calore rispetto alla struttura originale ($\beta = 1.0$). riduzione è attribuita all'attenuazione del disturbo del fluido indotto dalla parete e alla riduzione della tortuosità del canale di flusso a seguito dell'allungamento del reticolo. La configurazione Giroide manipolata presenta una densità volumetrica di trasferimento di calore superiore sia alla struttura originale che alle configurazioni tradizionali, rendendola un candidato promettente per sistemi di gestione termica compatti. I campi di flusso manipolati sono caratterizzati da una diminuzione della velocità complessiva, un indebolimento dell'intensità del movimento elicoidale e una maggiore uniformità del flusso. L'analisi qualitativa e quantitativa ha dimostrato che l'uniformità del flusso migliora progressivamente all'aumentare del rapporto di allungamento (β), passando da uno stato disordinato a uno più organizzato. Nonostante la manipolazione geometrica riduca la resistenza meccanica della struttura, l'entità dell'indebolimento resta entro limiti accettabili. Sono state definite correlazioni empiriche ben adattate a tre incognite ($Nu \sim Re$ e $f \sim Re$), che incorporano un parametro geometrico adimensionale (β).</p> $Nu = 0.3666 \cdot Re^{0.6580} \cdot \beta^{-0.5165} \cdot Pr^{1/3} \text{ (per } 500 < Re < 3000, 3.8 < Pr < 8.6, 1.0 \leq \beta \leq 2.0).$ $f = 3.7147 \cdot Re^{-0.2789} \cdot \beta^{-1.8927} \text{ (per } 300 < Re < 3000, 1.0 \leq \beta \leq 2.0).$ <p>La prestazione complessiva (PEC) delle strutture Giroide ha superato quella delle tre configurazioni tradizionali. Le strutture manipolate ($\beta = 1.5$ e 2.0) hanno dimostrato un miglioramento di circa il 10% nella prestazione complessiva rispetto alla struttura originale.</p>
--------------------------------------	-------------	---	---

Samad;Lai	2025	<p>Lo studio è volto a sviluppare e analizzare scambiatori di calore Gyroid TPMS con geometrie variabili dei canali, confrontando le configurazioni di flusso uniforme (even) e non uniforme (uneven) per: massimizzare i tassi di scambio termico; identificare i parametri chiave che influenzano il trasferimento di calore; stabilire una correlazione tra i parametri e minimizzare le cadute di pressione.</p>	<p>Per la progettazione e la generazione della mesh sono stati utilizzati i software nTopology e ANSYS Fluent, in condizioni di flusso incomprimibile, laminare e stazionario; materiali (SS316L e alluminio) omogenei e isotropi; contatto termico perfetto tra HX e fluido; proprietà del fluido (acqua) costanti; perdite di calore trascurabili nell'ambiente con temperature di ingresso fisse (25°C lato freddo, 70°C lato caldo) e sei diverse variabili di velocità di ingresso. Per i canali even-flow: Velocità di ingresso costante per i lati caldo e freddo. Per i canali Uneven-flow: Velocità di ingresso adattata in base ai diametri dei pori (es. velocità del lato caldo doppia rispetto al lato freddo, in quanto il canale caldo è più grande). Modelli realizzati in acciaio inox SS316L tramite L-PBF. L'analisi è stata condotta attraverso la ripetizione di dieci esperimenti per garantire riproducibilità e calcolo della deviazione standard relativa. Le dimensioni delle celle: variabili da 10 a 20mm; spessore della parete: variabile da 0.25 a 1mm. Lo scambiatore con canale di flusso uneven ha mostrato un coefficiente di trasferimento di calore globale più elevato (1112.85 W/m²K) rispetto all'HX con canale di flusso uniforme (1095.81 W/m²K) a parità di condizioni al contorno. Il vantaggio è prestazionale è attribuito a una distribuzione ottimizzata del flusso, che porta a una migliore miscelazione del fluido e un trasferimento di calore potenziato, probabilmente a causa dell'aumento della turbolenza. La riduzione dello spessore della parete dei Gyroid HX migliora significativamente le capacità di trasferimento di calore. Spessori inferiori (es. 0.25 mm) aumentano la superficie e il valore di NTU, indicando una maggiore efficacia dell'HX. Dimensioni delle celle più piccole offrono caratteristiche di trasferimento di calore superiori grazie all'aumento della superficie. Anche la modifica della dimensione di una singola direzione della cella può influenzare significativamente le prestazioni. Caduta di pressione è maggiore con spessori di parete più sottili (es. 0.25 mm) e significativamente più alta con dimensioni delle celle maggiori (es. 20 mm).</p>
-----------	------	--	--

Tabella 7: Analisi focus & goals delle fonti citate: proprietà di scambio termico

Autore	Anno	Focus	Goals
Maskery, Aboulkhair, Aremu, Tuck, Ashcroft	2017	Investigano le modalità di cedimento a compressione, l'impatto della dimensione delle celle e l'effetto di un trattamento termico post-produzione sull'eliminazione della frattura fragile e sul miglioramento dell'assorbimento di energia.	<p>Modalità di Cedimento: Le strutture "as-built" hanno mostrato diverse modalità di cedimento a compressione, dipendenti dalla dimensione delle celle. Collasso successivo di strati per celle di 4.5 mm e 6 mm. Frattura fragile con propagazione di cricche per celle più grandi (6 mm e 9 mm). Taglio diagonale quasi esclusivamente per le celle più piccole (3 mm). È stato evidenziato che una dimensione di cella piccola è consigliabile per evitare cedimenti fragili a bassa deformazione. Effetto del Trattamento Termico: Il trattamento termico post-produzione ha migliorato significativamente il comportamento di deformazione delle strutture DG con celle da 3 mm: Ha eliminato i cedimenti fragili a bassa deformazione. Ha prodotto curve stress-deformazione con lunghi plateau, simili alla deformazione ideale di un solido cellulare. Ha ridotto la resistenza allo schiacciamento di circa il 25% ma ha aumentato significativamente la duttilità del materiale. Ha permesso un superiore assorbimento di energia con un picco di stress significativamente inferiore prima della densificazione.</p> <p>Assorbimento di Energia: Le strutture reticolari DG sono state confermate come eccellenti candidati per l'assorbimento di energia: Assorbono energia quasi linearmente con la deformazione. L'energia totale assorbita dai reticoli DG trattati termicamente fino al 50% di deformazione è stata di $16 \times 10^6 \text{ J m}^{-3}$.</p> <p>Questo valore è quasi tre volte superiore all'energia assorbita da reticoli BCC comparabili con la stessa frazione di volume. Questo rende le strutture DG molto promettenti per applicazioni leggere ad alto assorbimento di energia.</p>
Yu, Sun, Bai	2019	La ricerca ha investigato la progettazione e fabbricazione di strutture a superficie minima triplicemente periodica (TPMS) con gradazione funzionale, utilizzando due tipi specifici: Schwarz P e Gyroid. Queste strutture sono state realizzate tramite manifattura additiva (Stereolitografia - SLA). Sono state studiate le loro proprietà meccaniche e capacità di assorbimento dell'energia.	Le strutture Schwarz P graduate hanno mostrato un miglioramento nella capacità di assorbimento dell'energia, assorbendo circa 1,5 volte più energia rispetto alle strutture uniformi (2.47 MJ/m^3 contro 1.64 MJ/m^3). Durante i test di compressione, si sono fessurate strato per strato, mostrando evidenti caratteristiche di stress a picco-valle. Le strutture Gyroid uniformi e graduate hanno mostrato poca differenza nell'assorbimento di energia (circa 2.49 MJ/m^3 per l'uniforme e 2.51 MJ/m^3 per il graduato). Presentavano una singola fessura strutturale e comportamenti meccanici "anomali" con fluttuazioni di stress meno evidenti, attribuibili a un effetto "ammortizzante" dovuto alla loro geometria interna. La tecnologia SLA ha permesso di fabbricare con successo campioni TPMS complessi con buona qualità superficiale e alta precisione. I risultati suggeriscono una significativa capacità di assorbimento dell'energia per le strutture Schwarz P graduate e le strutture Gyroid, rendendole utili per applicazioni leggere e di protezione dagli impatti.

Al-Ketan, Al-Rub	2020	<p>Lo studio analizza MSLattice: software gratuito sviluppato per la generazione di reticoli (lattices) uniformi e gradati basati su Superfici Minime Triple Periodiche (TPMS).</p> <p>Il software offre due approcci per la creazione di reticoli: reti a foglio (sheet networks) e reti solide (solid networks).</p> <p>Permette agli utenti un controllo preciso su vari parametri, inclusi il tipo di topologia TPMS, la densità relativa, la dimensione della cella, la gradazione della densità relativa e della dimensione della cella, e l'ibridizzazione tra diversi reticoli.</p> <p>È stato concepito come una piattaforma di progettazione completa, particolarmente utile per applicazioni che impiegano la manifattura additiva (stampa 3D) e la modellazione computazionale.</p> <p>Il suo funzionamento si basa sull'implementazione di equazioni di livello-set (level-set approximation equations) per rappresentare matematicamente le TPMS.</p>	<p>Semplificazione della progettazione: MSLattice facilita notevolmente il processo di progettazione di materiali basati su TPMS, che in precedenza era complesso e limitava la loro adozione. Generazione di modelli stampabili in 3D: Il software consente l'esportazione di file STL, pronti per la stampa 3D e le simulazioni numeriche. Esempi di campioni metallici stampati in 3D sono stati prodotti e presentati. Supporto per l'analisi computazionale: I file STL generati possono essere convertiti per essere utilizzati in pacchetti di modellazione computazionale, come l'analisi agli elementi finiti o la fluidodinamica computazionale. Ampie funzionalità e accessibilità: A differenza di altri software limitati o costosi, MSLattice è gratuito e offre funzionalità avanzate, inclusa la capacità di generare strutture a rete solida, la gradazione funzionale completa e la possibilità per gli utenti di definire le proprie funzioni di livello-set.</p> <p>Creazione di reticoli multimorfologici: Tramite la sua interfaccia "Implicit functions", è possibile ottenere reticoli ibridi e multimorfologici combinando diverse topologie TPMS. Impatto atteso: Rendendo MSLattice liberamente disponibile, si prevede una più ampia adozione dei materiali basati su TPMS in diverse discipline ingegneristiche.</p>
------------------	------	---	---

<p>Zhang,Xie,Li,Li, Yan,Wen</p>	<p>2022</p>	<p>Lo studio indaga il comportamento meccanico quasi-statico (test di compressione) di strutture cellulari Primitive a Superficie Minima Triperiodica (P-TPMS) realizzate in lega Al-Si10-Mg tramite stampa 3D con Selective Laser Melting (SLM).L'obiettivo principale è colmare la lacuna nella comprensione del rapporto tra i parametri di progettazione strutturale (valore di livello C e spessore T) e le proprietà meccaniche (modulo di Young, stress di plateau, assorbimento di energia).La ricerca ha sviluppato un modello matematico unificato per prevedere le proprietà meccaniche direttamente dai parametri C e T.Sono stati esaminati gli effetti dei difetti di fabbricazione SLM e l'influenza della direzione di costruzione sul comportamento meccanico. La metodologia ha combinato test di compressione sperimentali e simulazioni agli elementi finiti (FE).</p>	<p>Difetti e Inomogeneità: La qualità di stampa è inferiore sulla superficie inferiore rispetto a quella superiore, causando rugosità e proprietà meccaniche inhomogenee lungo la direzione di costruzione. Sono stati rilevati anche particelle non fuse e pori interni.</p> <p>Influenza della Direzione di Costruzione: La deformazione è asimmetrica e a strati se la direzione di carico è parallela alla direzione di costruzione. La deformazione è più simmetrica e lo stress di plateau è più stabile quando la direzione di carico è perpendicolare alla direzione di costruzione. Comportamento in Compressione: Si osservano tre stadi: elastico lineare, plateau e densificazione. Maggiore è lo spessore (T), più lungo è lo stadio elastico e più corto il plateau. Maggiore è il valore di C, maggiore è la fluttuazione del plateau. La plasticità e tenacità complessive aumentano con la densità relativa. Modello Matematico Unificato: È stata sviluppata un'equazione lineare per la densità relativa in funzione di C e T ($\rho_{exp} = 4.7881C + 39.0988T$). È stato stabilito un modello che predice direttamente il modulo di Young e lo stress di plateau in base a C e T.Assorbimento di Energia: L'assorbimento specifico di energia (SEA) varia da 14.37 a 25.65 J/g.Aumentare il valore C (a parità di spessore) migliora le prestazioni di assorbimento. La struttura C6T10 ha mostrato il miglior SEA (25.654 J/g).Un modello matematico specifico per il SEA in funzione di C e T è stato anch'esso stabilito.</p>
-------------------------------------	-------------	--	--

<p>Fu,Huang, Kaewunruen</p>	<p>2023</p>	<p>Lo studio si propone di comprendere le proprietà dinamiche non lineari di strutture composite a superficie minima triperiodica (TPMS), in particolare la loro frequenza naturale, il rapporto di smorzamento e la rigidezza dinamica, sotto diverse ampiezze di eccitazione della forza. La ricerca ha utilizzato tre tipi comuni di TPMS: IWP, Primitive e Gyroid. Le TPMS sono state fabbricate utilizzando la stampa 3D a stereolitografia (SLA) con una resina fotosensibile ("photosensitive 8200"). Le prove sono state condotte tramite un test di impatto con martello (impact hammer test), simulando le strutture come un sistema a singolo grado di libertà (SDOF). Questo approccio mira a replicare le condizioni di carico verticale tipiche delle applicazioni di ingegneria civile, come gli strati di supporto ferroviari. L'obiettivo finale è facilitare l'integrazione di queste strutture TPMS stampate in 3D nell'ingegneria civile per la riduzione delle vibrazioni e un uso più efficiente dei materiali.</p>	<p>Comportamento Non Lineare Generale: le strutture TPMS realizzate in resina fotosensibile presentano rigidezza e rapporti di smorzamento non lineari. All'aumentare dell'ampiezza di eccitazione della forza, le strutture TPMS mostrano un "comportamento di ammorbidimento" (softening), con una diminuzione della frequenza naturale e della rigidezza dinamica. Contemporaneamente, all'aumentare del carico, le TPMS dimostrano una maggiore capacità di smorzamento delle vibrazioni, con un aumento del rapporto di smorzamento che può raddoppiare o triplicare. Influenza della Geometria TPMS: La forma dell'unità cellulare delle strutture TPMS influenza significativamente il valore del rapporto di smorzamento e il suo tasso di cambiamento, oltre alle frequenze naturali e rigidezze. Prestazioni Specifiche delle TPMS:La struttura SS-Gyroid (Secondary Solid Gyroid) ha dimostrato la rigidezza più elevata nell'intero intervallo di carico (0 N a 1200 N) e il rapporto di smorzamento più alto ad elevate ampiezze di carico (da 500 N a 1000 N). Nonostante questo, la sua rigidezza può diminuire del 33% all'aumentare del carico da 100 N a 1000 N; per la MS-Gyroid la riduzione supera il 50%.Le strutture SH-Gyroid, MS-Primitive, SS-Primitive e SH-IWP hanno una rigidezza relativamente inferiore ma mantengono una rigidezza più stabile al variare dell'ampiezza di eccitazione, rendendole più adatte per carichi variabili.</p> <p>La maggior parte delle strutture TPMS, ad eccezione del tipo SH-Primitive, presentano rapporti di smorzamento superiori allo 0.03 (3%) quando l'ampiezza del carico supera i 400 N, indicando una capacità efficace di riduzione delle vibrazioni.</p> <p>Le MS-Gyroid e SS-Gyroid sono considerate i tipi più promettenti per lo smorzamento e possono fornire un coefficiente di smorzamento più elevato. Implicazioni per l'Ingegneria Civile: Questi risultati forniscono nuove intuizioni per la progettazione di strutture TPMS in applicazioni di ingegneria civile, in particolare per la riduzione delle vibrazioni e la gestione di carichi dinamici. Le forme geometriche MS-Gyroid e SS-Gyroid potrebbero essere utilizzate per migliorare le proprietà di smorzamento di materiali da costruzione come il calcestruzzo, che è noto per avere prestazioni di smorzamento relativamente basse. Le TPMS con i loro pori connessi tridimensionalmente possono anche favorire il drenaggio.</p>
---------------------------------	-------------	---	---

<p>Novak, Tanaka, Hokamoto, Mauko, Yilmaz, Al-Ketan, Vesenjak, Ren</p>	<p>2023</p>	<p>Questo studio sperimentale e computazionale indaga il comportamento meccanico ad alte velocità di deformazione (da quasi-statiche a 11.000 s^{-1} sperimentalmente e 35.000 s^{-1} computazionalmente) di strutture cellulari metalliche a superficie minima triperiodica (TPMS). L'obiettivo è fondamentale per applicazioni di sicurezza contro impatti, esplosioni e protezione balistica. Sono state analizzate quattro geometrie TPMS uniformi (Diamond, Gyroid, IWP, Primitive) e una struttura ibrida Gyroid-Diamond. Tutti i campioni sono stati fabbricati in acciaio inossidabile 316L mediante stampa 3D (fusione a letto di polvere). La metodologia ha combinato tre diverse apparecchiature di test (macchina servo-idraulica, barra di Hopkinson a impatto diretto, cannone a polvere) con simulazioni computazionali validate per prevedere il comportamento anche a velocità non raggiungibili sperimentalmente. Le misurazioni chiave includevano lo stress di plateau e l'assorbimento specifico di energia (SEA).</p>	<p>Indurimento da Velocità di Deformazione (Strain Rate Hardening): Tutte le strutture hanno mostrato un significativo indurimento all'aumentare della velocità di deformazione, particolarmente evidente nella modalità di deformazione a shock (velocità molto elevate), attribuibile agli effetti inerziali. Assorbimento Specifico di Energia (SEA): Il SEA e lo stress di plateau aumentano marcatamente con l'incremento della velocità di carico. Le strutture Diamond e IWP hanno evidenziato un SEA fino a cinque volte superiore (ad esempio, per Diamond, da 6.9 a 40.8 J/g) nelle condizioni di altissima velocità di deformazione rispetto ai test quasi-statici. Tra le TPMS uniformi, la Diamond ha mostrato il miglior SEA e la maggiore sensibilità all'indurimento da velocità di deformazione. Meccanismi e Localizzazione della Deformazione: La deformazione plastica è dominata dalla flessione e dallo stiramento delle lamiere, con un comportamento duttile favorevole all'assorbimento di energia, senza fratture macroscopiche. Ad alte velocità di deformazione, la deformazione si localizza principalmente all'estremità d'impatto del campione. Strutture Ibride: L'orientamento del campione ibrido influenza notevolmente la risposta meccanica ad alta velocità (progressiva o regressiva), ma i valori di SEA rimangono comparabili. Validazione Computazionale: I modelli computazionali sono stati ampiamente validati con i dati sperimentali e hanno permesso di prevedere il comportamento a velocità di deformazione estreme (fino a 35.000 s^{-1}), indicando un chiaro comportamento di indurimento esponenziale del SEA.</p>
--	-------------	--	--

<p>Laskowska, Szatkiewicz, Balasz, Mitura</p>	<p>2023</p>	<p>Lo studio si concentra sull'indagine del comportamento meccanico in compressione quasi-statica e delle capacità di assorbimento di energia di strutture Diamond a Superficie Minima Triperiodica (TPMS). Le strutture sono state prodotte in acciaio inossidabile 316L utilizzando la tecnologia di produzione additiva Selective Laser Melting (SLM). L'obiettivo principale è stato valutare come i parametri strutturali (numero di celle in direzione circonferenziale, n_{circum}, e radiale, n_{radial}) influenzino le proprietà meccaniche (modulo elastico, resistenza allo snervamento, stress di plateau) e le modalità di deformazione. La ricerca include un confronto con precedenti lavori sulle strutture Gyroid TPMS.</p>	<p>Meccanismi e Modi di Deformazione: Le strutture Diamond TPMS cilindriche hanno esibito due diversi meccanismi di deformazione e modi di deformazione complessivi a seconda dei parametri strutturali. Le strutture con $n_{radial} = 1$ sono state classificate come dominate dalla flessione (bending-dominated) e hanno mostrato una deformazione uniforme a forma di barile. Le strutture con $n_{radial} = 1.5$ e $n_{radial} = 2$ sono state classificate come dominate dallo stiramento (stretch-dominated) e hanno esibito una modalità di deformazione "strato per strato" (layer-by-layer). Proprietà Meccaniche: L'aumento del numero di celle nelle direzioni radiale (n_{radial}) e circonferenziale (n_{circum}) ha aumentato il Modulo Elastico (EL) per tutte le strutture Diamond. Per le strutture dominate dallo stiramento, l'aumento di n_{circum} ha aumentato la resistenza allo snervamento (σ_y), mentre la diminuzione di n_{radial} ha ridotto σ_y. Le strutture dominate dalla flessione hanno mostrato valori di σ_y simili. Lo stress di plateau (σ_{pl}) è diminuito all'aumentare di n_{radial} per tutte le strutture. Per le strutture dominate dallo stiramento, l'aumento di n_{circum} ha aumentato σ_{pl}, mentre per quelle dominate dalla flessione, l'aumento di n_{circum} ha diminuito σ_{pl}. Capacità di Assorbimento di Energia: Le strutture dominate dalla flessione ($n_{radial} = 1$) hanno mostrato un vantaggio nell'assorbimento di energia rispetto a quelle dominate dallo stiramento, grazie a una sezione di plateau più lunga e piatta. Il valore più alto di energia assorbita fino al punto di densificazione (19.53 MJ/m^3) è stato osservato per la struttura Diamond_9_1_0.64 (bending-dominated). L'energia assorbita fino al punto di densificazione è generalmente diminuita all'aumentare di n_{radial}. Confronto con Strutture Gyroid: A differenza delle strutture Diamond, tutte le strutture cilindriche Gyroid TPMS precedentemente studiate erano dominate dalla flessione. Le strutture Diamond dominate dalla flessione hanno mostrato un leggero vantaggio nell'assorbimento di energia rispetto alle strutture Gyroid, assorbendo più energia e presentando una maggiore stabilità nel processo di assorbimento durante la compressione. Tuttavia, la loro efficienza massima era leggermente inferiore (2-3%). Le strutture Diamond dominate dallo stiramento hanno assorbito molta meno energia rispetto alle strutture Gyroid con lo stesso n_{radial}. I risultati ottenuti possono essere utilizzati per la progettazione e la produzione di componenti leggeri ed efficienti per applicazioni di assorbimento di energia in vari settori, come la sanità, i trasporti e l'aerospazio.</p>
<p>Zhang, Li, Liu, Deng, Liao, Wang</p>	<p>2023</p>	<p>Lo studio si propone di valutare l'anisotropia meccanica (comportamento meccanico diverso a seconda della direzione) di strutture porose basate su superfici minime triplicemente periodiche (TPMS), come Gyroid, Diamond, Primitive e IWP. Le TPMS sono state ruotate attorno a tre direzioni cristallografiche tramite</p>	<p>Le TPMS mostrano una significativa anisotropia meccanica. Le prestazioni di compressione uniassiale possono essere significativamente migliorate ruotando le strutture TPMS in direzioni specifiche. Ad esempio, l'IWP ruotato di 60° nella direzione ha mostrato un aumento del modulo elastico relativo del 275.33%. A causa di questa anisotropia, le prestazioni delle strutture diminuiscono significativamente in direzioni specifiche (es. Primitive ruotato di 60° in θ vede il modulo ridursi rispettivamente del 72.66% e 77.6%). Il design con gradiente di rotazione ha dimostrato di migliorare la piattaforma di snervamento (yield platform) per le strutture IWP e di mostrare picchi multipli di stress nelle strutture Primitive, aumentando l'assorbimento di energia.</p>

		<p>rotazione quaternione. Le loro proprietà meccaniche sono state analizzate con l'analisi agli elementi finiti (FEA). È stata anche proposta la progettazione e fabbricazione di strutture TPMS a gradiente di rotazione tramite Selective Laser Melting (SLM).</p>	
<p>Li, Xue, Chen, Aiyiti, Khan, Liang, Zhou, Lu</p>	<p>2023</p>	<p>Il documento affronta la stampa 3D di metamateriali meccanici flessibili, in particolare le strutture TPMS (Gyroid), tramite sinterizzazione laser selettiva (SLS) con TPU. L'obiettivo principale è superare l'anisotropia elastica indotta dal processo di stampa 3D (dovuta al legame interstrato) attraverso un design ottimizzato con gradiente della frazione di volume. Vengono anche esplorati i vantaggi funzionali delle strutture a gradiente, come l'assorbimento di energia e la dissipazione del calore.</p>	<p>Riduzione dell'anisotropia: il design a gradiente ha reso il modulo elastico della struttura Gyroid approssimativamente isotropo nelle direzioni X, Y e Z nella fase elastica, mitigando l'anisotropia evidente nelle strutture uniformi stampate in 3D (SLS in TPU). Comportamento di deformazione controllato: la deformazione si propaga lungo il gradiente e la curva forza-spostamento mostra maggiore stabilità. Migliorato Assorbimento di Energia: aumento significativo dell'assorbimento di energia (es. +23.1% in X, +29.7% in Y) senza aumentare la massa. Migliorata Dissipazione del calore: riduzione della temperatura superficiale massima del 9.1% rispetto alle strutture uniformi, grazie a un flusso d'aria più efficienti.</p>

<p>Gastaldi;Cibrario; Delprete;Cozza</p>	<p>2023</p>	<p>Il documento si concentra sull'applicazione della Fabbricazione Additiva (AM), in particolare la tecnologia Selective Laser Melting (SLM), per la produzione di scambiatori di calore (HX). Esplora in dettaglio le caratteristiche strutturali, i materiali impiegati, i difetti comuni e la valutazione della durabilità per gli HX prodotti tramite AM, con un'attenzione significativa alle strutture reticolari (lattice structures) e alle Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS)</p>	<p>L'AM offre una libertà di progettazione senza precedenti per elementi complessi, permettendo di realizzare geometrie complesse e di aumentare l'area superficiale per un maggiore scambio termico in volumi ridotti. Consente la creazione di strutture porose reticolari e microcanali per migliorare il trasferimento di calore e ridurre la caduta di pressione, superando i limiti delle tecnologie convenzionali. Elimina la necessità di processi di giunzione come saldatura o brasatura, poiché le geometrie possono essere stampate direttamente sul substrato. Le sfide principali includono l'ottimizzazione dei parametri di processo, il controllo della rugosità superficiale, la rimozione delle strutture di supporto, i requisiti di post-elaborazione e la competitività dei costi. I componenti AM presentano eterogeneità microstrutturali e difetti distribuiti in modo casuale, come porosità (causata da restringimento, gas intrappolato, particelle parzialmente fuse), mancanza di fusione, cricche (solidificazione, liquefazione, delaminazione), e sollecitazioni residue. La rugosità superficiale è un effetto comune dell'AM (tipicamente 5-50 μm), che può influenzare negativamente il trasferimento di calore convettivo e aumentare le perdite di carico, sebbene in alcuni casi possa anche favorire il trasferimento di calore. È influenzata da parametri di processo, orientamento di costruzione e dimensione della polvere. L'anisotropia delle proprietà meccaniche è una conseguenza della storia termica non uniforme e del trasferimento di calore direzionale durante la fabbricazione. Acciaio Inox 316L: Ampiamente utilizzato, presenta una maggiore resistenza a trazione, snervamento e durezza, ma minore duttilità rispetto ai materiali tradizionali, a causa della struttura a grana fine e delle elevate densità di dislocazioni. Mostra proprietà leggermente anisotrope e la sua elevata conducibilità termica lo rende suscettibile a difetti di mancanza di fusione. Leghe di Alluminio (es. AlSi10Mg): Vantaggi come elevato rapporto resistenza/peso, buona diffusività termica e resistenza alla corrosione. La qualità finale dipende fortemente dalla densità di energia, e sono inclini a porosità e cricche a caldo. Rame: Eccellente conducibilità termica, ma difficile da processare con l'AM a causa della bassa assorbimento della radiazione laser e dell'alta conducibilità termica, richiedendo elevati input energetici o laser con lunghezze d'onda specifiche (es. laser verde o blu). Le proprietà a fatica dei componenti AM sono una sfida significativa, principalmente a causa di vuoti e difetti microstrutturali che agiscono come siti di iniziazione delle cricche. La posizione dei vuoti è più critica della loro forma o dimensione. Il trattamento di Hot Isostatic Pressing (HIP) è considerato il metodo più efficace per ridurre la porosità, omogeneizzare la microstruttura e alleviare le sollecitazioni residue, migliorando le prestazioni a fatica ad alto ciclo (HCF) in alcuni materiali (es. TiAl6V4), ma può avere effetti variabili o negativi su altri (es. SS316L). La preparazione della superficie (es. lucidatura) può migliorare significativamente la resistenza a fatica riducendo i siti di concentrazione dello stress superficiale. Il preriscaldamento del piatto base riduce i gradienti termici e porta a parti più dense con minori difetti e sollecitazioni residue.</p>
--	-------------	---	---

Wei	2024	<p>Questo studio indaga le prestazioni meccaniche e di smorzamento dei metamateriali reticolari basati su superfici minime triple periodiche (TPMS). L'obiettivo è colmare la lacuna di ricerca sulle proprietà di riduzione delle vibrazioni e del rumore delle TPMS, dato che la loro resistenza e leggerezza sono già note. Le strutture TPMS, con geometrie complesse e pori interni, sono state progettate utilizzando il metodo della migrazione superficiale e fabbricate con fusione a letto di polvere laser (LPBF) in acciaio inossidabile 316L, per garantire un'alta qualità di formatura. Vengono studiate e confrontate le proprietà meccaniche, le caratteristiche di assorbimento dell'energia e le prestazioni di smorzamento delle strutture TPMS (nello specifico, Split-P) rispetto alle strutture reticolari a trave (BCC), entrambe con una porosità del 70%.</p>	<p>Le strutture TPMS (Split-P) mostrano proprietà meccaniche e assorbimento di energia più eccellenti rispetto alle strutture reticolari a trave (BCC) a parità di porosità. Per una porosità del 70% dopo trattamento termico, la resistenza allo snervamento delle TPMS è di 50.74 MPa contro 40.76 MPa delle BCC. Il modulo elastico delle TPMS è di 25.37 GPa contro 20.38 GPa delle BCC. Il valore di assorbimento di energia delle TPMS è di 47.34 MJ·m⁻³ contro 32.23 MJ·m⁻³ delle BCC. Le strutture TPMS (Split-P) esibiscono una migliore prestazione di smorzamento. Il rapporto di smorzamento delle TPMS è dello 0.99% contro lo 0.52% delle BCC. La frequenza naturale del primo ordine per TPMS è di 12,650 Hz (misurata) rispetto a 8,021 Hz per BCC. Questo miglioramento è attribuito alla capacità della superficie curva delle TPMS di disperdere la forza in modo più efficace e alla loro ampia area superficiale specifica. Le TPMS evitano la concentrazione dello stress grazie alla loro connessione fluida tra i bordi. Il meccanismo di smorzamento principale nelle strutture reticolari metalliche è l'attrito interno generato dalla differenza di fase di deformazione tra lo scheletro metallico e l'aria (considerata seconda fase) all'interno della struttura porosa. Una maggiore area superficiale porta a un maggiore smorzamento. Il processo di compressione di entrambe le strutture segue le tre fasi tipiche: regione elastica, regione di plateau e regione di densificazione. Le TPMS mostrano fluttuazioni nell'area di plateau dovute a instabilità di instabilità, ma lo stress si rialza stabilizzando il plateau. Lo studio evidenzia che la manifattura additiva (LPBF) è una soluzione efficace per produrre strutture porose complesse come le TPMS, superando le limitazioni dei metodi tradizionali.</p>
Qiu,Wan,Shen, Fang	2024	<p>Studio delle proprietà meccaniche e della capacità di assorbimento dell'energia di otto diverse strutture TPMS (Triply Periodic Minimal Surface). Le strutture sono state prodotte in acciaio inossidabile 316L tramite Selective Laser Melting (SLM). Valutazione di cinque diverse strategie di mesh per i modelli a elementi finiti (FE) di queste strutture complesse.</p>	<p>Le strutture F-RD e D hanno mostrato la migliore capacità di assorbimento dell'energia, con F-RD più efficace a basse densità relative (<30%) e D a densità relative più elevate (>30%). La SLM ha permesso una fabbricazione precisa delle complesse geometrie TPMS. Per le simulazioni numeriche, i modelli a guscio (shell) con elementi quadrilateri sono risultati efficaci per strutture sottili o a bassa densità. I modelli voxel sono stati i migliori per strutture più spesse o ad alta densità. Le simulazioni hanno rivelato che F-RD ha una distribuzione dello stress più uniforme, mentre D ha un contatto interno tardivo, spiegando i loro meccanismi di assorbimento energetico.</p>

<p>Ansari,Duwig</p>	<p>2024</p>	<p>La ricerca ha studiato una struttura Gyroid TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) per il raffreddamento di microprocessori, confrontandola con un dissipatore a pinfin (PHS). Sono state analizzate le caratteristiche di flusso e trasferimento di calore all'interno del Gyroid TPMS e le sue prestazioni termoidrauliche in diverse condizioni (porosità, portate e riscaldamento non uniforme con hotspot). Lo studio è stato condotto tramite analisi numerica (simulazioni CFD) su un modello di dissipatore di calore in scala reale.</p>	<p>Il dissipatore Gyroid (GHS) ha mostrato prestazioni termiche superiori rispetto al PHS in tutte le condizioni. Ciò è dovuto alla sua struttura di flusso complessa e convoluta e a una superficie di trasferimento di calore significativamente ampia. Il GHS ha mantenuto temperature sostanzialmente inferiori negli hotspot e una ridotta variazione di temperatura tra essi (circa il 30% in meno di aumento di temperatura negli hotspot rispetto al PHS). Tuttavia, le migliori prestazioni termiche del GHS sono state accompagnate da una caduta di pressione notevolmente più elevata e da maggiori potenze di pompaggio. La diminuzione della porosità e l'aumento della portata hanno generalmente migliorato le prestazioni termiche di entrambi i dissipatori, ma hanno anche aumentato la potenza di pompaggio.</p>
<p>Todoh</p>	<p>2024</p>	<p>La ricerca ha studiato la progettazione e fabbricazione di strutture reticolari composite Gyroid TPMS bio-ispirate, create combinando geometrie "walled" e normali Gyroid TPMS tramite sottrazione booleana. Le strutture sono state prodotte tramite Manifattura Additiva (FFF/FDM) utilizzando bioplastiche PLA. L'obiettivo era valutare le loro proprietà meccaniche (sotto compressione) e la capacità di assorbimento dell'energia, validate anche con analisi agli elementi finiti (FEA). Un caso di studio ha esaminato l'applicazione di queste strutture in "crash box" veicolari.</p>	<p>Le strutture composite Gyroid TPMS hanno dimostrato grande potenziale come assorbitori di urti per veicoli, specialmente con densità relative del 33%, 38% e 54%. La loro deformazione è principalmente dominata dalla flessione (bending). La densità relativa influisce significativamente sulla capacità di assorbimento dell'energia. Densità relative intermedie (come 25%, 33% e 38%) offrono un ottimo equilibrio tra deformabilità, rigidità e assorbimento energetico ideale per la sicurezza automobilistica. Si è riscontrato un deterioramento delle proprietà meccaniche a densità relative inferiori al 15% (dovuto a un "size effect").</p>

<p>Xinyu, Huayuan,Lei</p>	<p>2024</p>	<p>Revisione completa dei progressi sulle proprietà meccaniche fondamentali delle strutture a superficie minima tripla periodica (TPMS), prodotte tramite manifattura additiva (AM). Analisi dell'impatto dei difetti indotti dal processo AM (stress residui, rugosità superficiale, micropori interni) sulle prestazioni delle TPMS. Discussione delle proprietà chiave (compressione statica, resistenza all'impatto dinamico, frattura a fatica, isolamento acustico, scambio termico) e delle tecniche AM (Selective Laser Melting - SLM e Selective Laser Sintering - SLS).</p>	<p>Le TPMS possiedono eccellenti proprietà meccaniche (alta capacità portante, elevato assorbimento di energia, buona resistenza alla fatica) e sono adatte per diverse applicazioni ingegneristiche. L'AM è uno strumento potente per la loro fabbricazione, permettendo geometrie complesse e auto-supportanti. Le TPMS mostrano un'ottima capacità di assorbimento di energia sotto compressione statica e impatto dinamico. Hanno una resistenza alla fatica notevolmente migliorata rispetto ad altre strutture porose.</p> <p>Presentano migliori prestazioni per isolamento acustico e scambio termico, aumentando l'efficienza degli scambiatori di calore. I difetti indotti dalla manifattura additiva (stress residui, rugosità superficiale, micropori) influenzano significativamente le proprietà meccaniche, riducendone modulo elastico e resistenza, ma trattamenti post-processo possono mitigarne gli effetti.</p>
<p>Li,Liu,Li,Kuai, Du,Zhang,Suo,Bi, Zhang</p>	<p>2024</p>	<p>Lo studio si concentra sulla progettazione e l'analisi del comportamento a compressione statica di sei diverse strutture a superficie minima tripla periodica (TPMS): Skeletal Diamond, Skeletal Gyroid, Skeletal IWP, Sheet Diamond, Sheet Gyroid e Sheet IWP. Queste strutture porose sono progettate parametricamente controllando il valore C per ottenere diverse densità relative (10%, 20%, 30%, 40%). Le TPMS sono state fabbricate utilizzando la stampa 3D tramite Selective Laser Melting (SLM) con polvere di Ti6Al4V. L'obiettivo è valutare e confrontare le loro proprietà meccaniche (stress di picco, modulo di Young, assorbimento di energia) e i meccanismi di deformazione.</p>	<p>Fabbricabilità: le TPMS sono state realizzate con successo tramite SLM, sebbene si siano osservate alcune imperfezioni come connessioni incomplete a bassa densità e polvere non fusa superficiale. Le strutture scheletriche avevano un peso più vicino a quello teorico rispetto a quelle a foglio. Meccanismi di Frattura Distinti: le strutture skeletal (scheletriche) hanno esibito un comportamento di frattura quasi strato per strato, con picchi multipli nelle curve sforzo-deformazione. Al contrario, le strutture sheet (a foglio) hanno mostrato una frattura complessiva (o globale) e una brusca diminuzione dello stress dopo il picco.</p> <p>Proprietà Meccaniche Superiori delle Strutture a Foglio: a parità di densità relativa, le strutture a foglio (sheet) hanno dimostrato migliori proprietà meccaniche (maggiore stress di picco, modulo di Young e capacità di assorbimento di energia) rispetto alle strutture scheletriche (skeletal).Dipendenza dalla Densità Relativa: Tutte le proprietà meccaniche analizzate (stress di picco, modulo di Young, assorbimento di energia) sono risultate correlate positivamente con l'aumento della densità relativa.</p> <p>Migliori Prestazioni Specifiche: Tra le sei strutture studiate, la Sheet Diamond ha mostrato le migliori proprietà meccaniche complessive (forza, rigidità e assorbimento di energia).Tra le tre strutture scheletriche, la Skeletal Gyroid ha esibito le migliori proprietà meccaniche.</p>

Wang, Yang, Zheng, Luo, Shi, Lv, Peng, Wang	2024	<p>Lo studio si concentra sulla progettazione e fabbricazione di scaffold porosi biomedici in lega di TC4 (Ti6Al4V). Vengono utilizzate quattro strutture di superficie minima tripla periodica (TPMS) base (Primitive [P], Gyroid [G], Diamond [D], I-WP). La ricerca esplora l'impatto di due diverse strategie di modellazione: "surface thickening" (ispessimento superficiale) e "surface filling" (riempimento superficiale) sulle proprietà meccaniche e di permeabilità degli scaffold. La fabbricazione è avvenuta tramite Selective Laser Melting (SLM). L'obiettivo è progettare scaffold con proprietà meccaniche simili a quelle del tessuto umano per mitigare l'effetto "stress shielding".</p>	<p>Proprietà Meccaniche Paragonabili all'Osso Umano: Gli scaffold hanno mostrato un modulo elastico tra 3.03 e 4.57 GPa e una resistenza a trazione tra 135.78 e 250.90 MPa, valori che rientrano nel range dell'osso umano. Vantaggi della Strategia di Ispessimento ("Thickening"): La strategia di ispessimento ha aumentato la resistenza degli scaffold con unità G, D e I-WP. Ha ridotto le fluttuazioni di stress durante la compressione e posticipato la deformazione a frattura. Ha migliorato la distribuzione uniforme del materiale, aumentando l'uniformità del carico e la deformabilità complessiva. Eccellente Permeabilità con la Strategia di Riempimento ("Filling"): La strategia di riempimento ha portato a tassi di permeabilità tra 0.88 e $1.91 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, allineati con la permeabilità dell'osso trabecolare umano. Gli scaffold a riempimento presentano generalmente una permeabilità più elevata rispetto a quelli a ispessimento, grazie a una minore superficie specifica e maggiore dimensione dei pori. Fabbricabilità: Gli scaffold hanno replicato efficacemente i modelli, nonostante alcune imperfezioni come polvere non fusa e porosità leggermente superiori al design (~2%) dovute al processo SLM. Applicazioni: Lo studio fornisce nuove intuizioni per la progettazione di scaffold porosi personalizzati, adatti a diverse applicazioni ortopediche di carico.</p>
She, Yang, Wu, Li, Li, Wang, Wang	2025	<p>La ricerca propone una nuova struttura reticolare cubica semplice (SC) ottimizzata e cava, basata sulla geometria TPMS (Triply Periodic Minimal Surface). Questa struttura è ispirata alla geometria del bambù. L'obiettivo è migliorare contemporaneamente la capacità di carico e le proprietà di assorbimento dell'energia, superando i problemi di concentrazione dello stress e instabilità di deformazione nelle strutture SC convenzionali. La metodologia prevede l'integrazione di caratteristiche cave e affusolate della geometria TPMS (specificamente combinando le formule Schwarz P e FR-D) nella rete SC. La struttura risultante è denominata</p>	<p>La struttura TSC proposta ha mostrato significativi miglioramenti nella capacità di assorbimento dell'energia e nella resistenza. Il parametro di forma C influisce in modo significativo sull'assorbimento di energia e lo stress di plateau. Un valore ottimale di $C = 0.6$ porta alla massima efficienza di assorbimento dell'energia e al più alto stress di plateau. Con $C=0.6$, si osserva un distinto plateau di stress secondario e una modalità di deformazione più omogenea. Anche il parametro A influisce sulle prestazioni con i migliori risultati quando A è tra 0.45 e 0.5, alleviando la concentrazione dello stress e prevenendo il buckling prematuro. La struttura TSC supera la tradizionale struttura SC cava, riducendo la concentrazione dello stress, aumentando la stabilità della deformazione e prevenendo il buckling prematuro, portando a un assorbimento di energia migliorato e a un CFE (Crush Force Efficiency) significativamente più elevato. La capacità di assorbimento dell'energia della struttura TSC supera significativamente quella del TPMS di tipo P, con un aumento dell'87.4% a parità di densità relativa e dell'80.5% a spessore costante. La TSC ha dimostrato prestazioni eccezionali di SEA (Specific Energy Absorption) a densità relative estremamente basse, superando la maggior parte delle strutture reticolari metalliche esistenti presenti in letteratura.</p>

		<p>TSC.</p> <p>La validazione è stata condotta tramite simulazioni agli elementi finiti (FE) e test sperimentali, con fabbricazione tramite manifattura additiva (SLM) utilizzando acciaio inossidabile 316L.</p>	
<p>Samudin,Radzuan, Sulong,Ma,Azman ,Zamri</p>	<p>2025</p>	<p>Questo documento è una revisione completa che analizza le curve stress-deformazione per comprendere il comportamento meccanico delle strutture reticolari a superficie minima tripla periodica (TPMS), in particolare sotto compressione.</p> <p>Si concentra sui fattori che influenzano le prestazioni meccaniche delle TPMS, come il tipo di struttura, lo spessore delle pareti, la densità relativa, l'effetto dimensione, le condizioni di carico, il materiale e la porosità.</p> <p>L'obiettivo è identificare le lacune di ricerca e suggerire direzioni future nel campo delle TPMS, con un focus specifico sulle strutture TPMS a foglio (sheet-based) per i loro vantaggi prestazionali.</p>	<p>Le curve stress-deformazione sono fondamentali per capire il comportamento elastico, plastico e di rottura delle TPMS.</p> <p>Le TPMS offrono proprietà meccaniche superiori (migliore distribuzione del carico, maggiore stabilità) rispetto alle strutture reticolari tradizionali. L'aumento dello spessore delle pareti (es. da 0.1mm a 0.5mm) migliora significativamente (circa 183%) la resistenza a compressione e il modulo elastico. L'aumento della densità relativa migliora notevolmente la resistenza e la rigidità complessiva. L'aumento della porosità riduce costantemente il modulo elastico e la resistenza allo snervamento. Diverse tipologie di TPMS (Gyroid, Schwarz P, Diamond, Fischer, IWP) mostrano risposte distinte; le strutture a foglio (sheet-based) hanno generalmente un migliore assorbimento di energia e rigidità.</p> <p>L'effetto dimensione delle celle unitarie è minimo fino alla densificazione, ma oltre una certa soglia i benefici diminuiscono.</p> <p>Le strutture ibride (combinando diverse geometrie TPMS) migliorano la capacità di assorbimento di energia e di carico. La direzione di stampa/carico influenza significativamente le proprietà meccaniche; il carico allineato con la direzione di costruzione aumenta resistenza e rigidità. La scelta del materiale (es. PLA, ABS, PLA+CF) influisce su rigidità, duttilità e resistenza, con i materiali rinforzati che mostrano migliore deformazione plastica e assorbimento di energia. Le imperfezioni da manifattura additiva (stress residui, rugosità, micropori) influenzano negativamente le proprietà meccaniche, rendendo cruciali i trattamenti post-processo. Le TPMS sono applicabili in settori come automotive, aerospaziale, biomedico e sportivo.</p>

Janpheng,Lienhard	2025	<p>Sono stati condotti test meccanici (compressione quasi-statica e dinamica, flessione) sui campioni per raccogliere dati sperimentali.</p> <p>La simulazione è stata eseguita con due approcci: un "micro modello" dettagliato (con milioni di elementi) e il "modello surrogato" semplificato (con molti meno elementi, circa 200 per una simulazione di compressione).</p>	<p>Il modulo di Young è principalmente influenzato dalla densità della struttura TPMS, mentre il numero di celle ha un ruolo secondario. Simulazioni:Il modello surrogato ha mostrato una corrispondenza quasi perfetta con i risultati sperimentali dei test di compressione e ha accuratamente previsto il comportamento alla flessione nel test a quattro punti. Il vantaggio cruciale del modello surrogato è la sua netta efficienza computazionale: una simulazione di compressione che con il micro-modello richiederebbe oltre 24 ore può essere completata in pochi minuti su un computer standard. Il micro-modello, sebbene utile in assenza di dati sperimentali, ha mostrato una maggiore divergenza nelle fasi avanzate della deformazione.</p>
-------------------	------	--	---

Tabella 8: Analisi focus & goals delle fonti citate: proprietà meccaniche

Riferimenti

- [1] L. Iuliano, «Introduzione all'AM», 2024.
- [2] P. F. Egan, «Design for Additive Manufacturing: Recent Innovations and Future Directions», *Designs*, vol. 7, fasc. 4, p. 83, giu. 2023, doi: 10.3390/designs7040083.
- [3] Luca Cibrario, Chiara Gastaldi, Cristiana Delprete, Ivan Flaminio Cozza, «Structural Targets for AM-printed HXs». [Online]. Disponibile su: https://www.researchgate.net/publication/388324780_Mechanical_Design_of_Lattice_Meta_materials_a_Multiscale_Homogenization-Based_Operational_Procedure
- [4] Y. Kirttayoth e R. Yu, «A Review of Recent Investigations on Flow and Heat Transfer Enhancement in Cooling Channels Embedded with Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS)», 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/en15238994>.
- [5] T. Janpheng, J. Lienhard, e T. Schweiger, «Optimizing Computational Efficiency in TPMS Structural Design through Surrogate Modeling», 28 marzo 2025, *In Review*. doi: 10.21203/rs.3.rs-6210868/v1.
- [6] F. Pehlivan, «Enhancing tensile properties of polymer-based triply periodic minimal surface metamaterial structures: Investigating the impact of post-curing time and layer thickness via response surface methodology», *Polym. Eng. Sci.*, vol. 64, fasc. 12, pp. 5915–5928, dic. 2024, doi: 10.1002/pen.26958.
- [7] M. Saleh, S. Anwar, A. M. Al-Ahmari, e A. Y. AlFaify, «Prediction of Mechanical Properties for Carbon fiber/PLA Composite Lattice Structures Using Mathematical and ANFIS Models», *Polymers*, vol. 15, fasc. 7, p. 1720, mar. 2023, doi: 10.3390/polym15071720.
- [8] Y. Li *et al.*, «Design and Compression Behavior Exploration of Skeletal and Sheet Triply Periodic Minimal Surface Structures», *Adv. Eng. Mater.*, vol. 26, fasc. 3, p. 2301589, feb. 2024, doi: 10.1002/adem.202301589.
- [9] T. Maconachie *et al.*, «SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges», *Mater. Des.*, vol. 183, p. 108137, dic. 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.108137.
- [10] N. Li *et al.*, «3D Printing of Flexible Mechanical Metamaterials: Synergistic Design of Process and Geometric Parameters», *Polymers*, vol. 15, fasc. 23, p. 4523, nov. 2023, doi: 10.3390/polym15234523.
- [11] W. Binghao *et al.*, «Effects of modeling strategies of triply periodic minimal surface on the mechanical properties and permeability of biomedical TC4 porous scaffolds», 2024, doi: 10.36922/ijb.2565.
- [12] H. H. Alsalla, C. Smith, e L. Hao, «Effect of Build Orientation on the Surface Quality, Microstructure and Mechanical Properties of Selective Laser Melting 316L Stainless Steel», *Rapid Prototyp. J.*, vol. 24, fasc. 1, pp. 9–17, gen. 2018, doi: 10.1108/RPJ-04-2016-0068.
- [13] K. Yeranee e Y. Rao, «A Review of Recent Investigations on Flow and Heat Transfer Enhancement in Cooling Channels Embedded with Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS)», *Energies*, vol. 15, fasc. 23, p. 8994, nov. 2022, doi: 10.3390/en15238994.
- [14] Gandy, P.J.F.; Bardhan, S.; Mackay, A.L.; Klinowski, J., «Nodal Surface Approximations to the P,G,D and I-WP Triply Periodic Minimal Surfaces.» 2001. [Online]. Disponibile su: doi:10.1016/S0009-2614(00)01418-4

- [15] Na Qiu, Yuheng Wan, Yijun Shen, Jianguang Fang, «Experimental and numerical studies on mechanical properties of TPMS structures», [Online]. Disponibile su: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740323005593>
- [16] O. Al-Ketan e R. K. Abu Al-Rub, «MSLattice: A free software for generating uniform and graded lattices based on triply periodic minimal surfaces», *Mater. Des. Process. Commun.*, vol. 3, fasc. 6, dic. 2021, doi: 10.1002/mdp2.205.
- [17] M. G. Gado, O. Al-Ketan, M. Aziz, R. A. Al-Rub, e S. Ookawara, «Triply Periodic Minimal Surface Structures: Design, Fabrication, 3D Printing Techniques, State-of-the-Art Studies, and Prospective Thermal Applications for Efficient Energy Utilization», *Energy Technol.*, vol. 12, fasc. 5, p. 2301287, mag. 2024, doi: 10.1002/ente.202301287.
- [18] Z. Mingkang, L. Jinwei, L. Chang, D. Mingjian, L. Xing, e W. Di, «Study on the Anisotropy of Triply Periodic Minimal Surface Porous Structures», 2023, [Online]. Disponibile su: doi.org/10.3390/coatings13071206
- [19] Ansys Model, «Commonly used lattice and TPMS structures in 3D additive manufacturing», 2024. [Online]. Disponibile su: Commonly used lattice and TPMS structures in 3D additive manufacturing
- [20] X. Zhang, X. Xie, Y. Li, B. Li, S. Yan, e P. Wen, «Mechanical Behavior of Al-Si10-Mg P-TPMS Structure Fabricated by Selective Laser Melting and a Unified Mathematical Model with Geometrical Parameter», *Materials*, vol. 16, fasc. 2, p. 468, gen. 2023, doi: 10.3390/ma16020468.
- [21] D. Laskowska, T. Szatkiewicz, B. Bałasz, e K. Mitura, «Mechanical Properties and Energy Absorption Abilities of Diamond TPMS Cylindrical Structures Fabricated by Selective Laser Melting with 316L Stainless Steel», *Materials*, vol. 16, fasc. 8, p. 3196, apr. 2023, doi: 10.3390/ma16083196.
- [22] M. Z. Saghir e M. M. Rahman, «Effectiveness in Cooling a Heat Sink in the Presence of a TPMS Porous Structure Comparing Two Different Flow Directions», *Fluids*, vol. 9, fasc. 12, p. 297, dic. 2024, doi: 10.3390/fluids9120297.
- [23] X. Huang, H. Tang, e L. Wang, «Recent progress on some fundamental mechanical properties of TPMS structure based on additive manufacturing», *Recent progress on some fundamental mechanical properties of TPMS structure based on additive manufacturing*, 2024. doi: 10.6052/0459-1879-24-205.
- [24] P. Mercelis e J. Kruth, «Residual Stresses in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting», *Rapid Prototyp. J.*, vol. 12, fasc. 5, pp. 254–265, ott. 2006, doi: 10.1108/13552540610707013.
- [25] K. Dutkowski, M. Kruzel, e K. Rokosz, «Review of the State-of-the-Art Uses of Minimal Surfaces in Heat Transfer», *Energies*, vol. 15, fasc. 21, p. 7994, ott. 2022, doi: 10.3390/en15217994.
- [26] M. Z. Saghir, M. Yahya, P. D. Ortiz, S. Impellizzeri, e O. Al-Ketan, «Heat Enhancement of Ethylene Glycol/Water Mixture in the Presence of Gyroid TPMS Structure: Experimental and Numerical Comparison», *Processes*, vol. 13, fasc. 1, p. 228, gen. 2025, doi: 10.3390/pr13010228.
- [27] Şimşek, U., Akbulut, A., Gayir, C., Basaran, C., e Sendur, P., «Modal characterization of additively manufactured TPMS structures: comparison between different modeling methods», *Modal characterization of additively manufactured TPMS structures: comparison between*

different modeling methods, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021. [Online]. Disponibile su: <https://doi.org/10.1007/S00170-020-06174-0>

- [28] I. Mat Samudin, N. A. Mohd Radzuan, A. B. Sulong, Q. Ma, A. H. Azman, e W. F. H. Wan Zamri, «Stress strain curve analysis of sheet based TPMS structures in quasi static compression test: A review», *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 36, pp. 5757–5796, mag. 2025, doi: 10.1016/j.jmrt.2025.04.168.
- [29] H. Fu, «Experimental investigations into nonlinear dynamic behaviours of triply periodical minimal surface structures», *Compos. Struct.*, 2023.
- [30] AM Media, *Crushing 3D Printed Lattices: How Vixiv's AI Learns from Failure*, (2025).
- [31] J. Zhu, H. Zhou, C. Wang, L. Zhou, S. Yuan, e W. Zhang, «A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges», *Chin. J. Aeronaut.*, vol. 34, fasc. 1, pp. 91–110, gen. 2021, doi: 10.1016/j.cja.2020.09.020.
- [32] N. Novak *et al.*, «High strain rate mechanical behaviour of uniform and hybrid metallic TPMS cellular structures», 2023.
- [33] I. Maskery, N. T. Aboulkhair, A. O. Aremu, C. J. Tuck, e I. A. Ashcroft, «Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices», *Addit. Manuf.*, vol. 16, pp. 24–29, ago. 2017, doi: 10.1016/j.addma.2017.04.003.
- [34] Z. She *et al.*, «A Hollow Optimized Simple Cubic Lattice Structure Based on the TPMS Geometry», *Acta Mech. Solida Sin.*, mar. 2025, doi: 10.1007/s10338-025-00595-8.
- [35] S. Yu, J. Sun, e J. Bai, «Investigation of functionally graded TPMS structures fabricated by additive manufacturing», *Mater. Des.*, vol. 182, p. 108021, nov. 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.108021.
- [36] D. B. Alemayehu e M. Todoh, «Enhanced Energy Absorption in Bioinspired Combined TPMS-Gyroid and Walled TPMS-Gyroid Lattice Structure Manufactured via Fused Filament Fabrication (FFF)», 18 marzo 2024, *Engineering*. doi: 10.20944/preprints202403.1003.v1.
- [37] M. Modrek, A. Viswanath, K. A. Khan, M. I. Hassan Ali, e R. K. Abu Al-Rub, «Multi-objective topology optimization of passive heat sinks including self-weight based on triply periodic minimal surface lattices», *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 42, p. 102684, feb. 2023, doi: 10.1016/j.csite.2022.102684.
- [38] R. Santiago *et al.*, «Mechanical characterization and numerical modeling of TPMS lattice structures subjected to impact loading», *EPJ Web Conf.*, vol. 250, p. 02005, 2021, doi: 10.1051/epjconf/202125002005.
- [39] T. Janpheng, J. Lienhard, e T. Schweiger, «Optimizing Computational Efficiency in TPMS Structural Design through Surrogate Modeling», 28 marzo 2025, *In Review*. doi: 10.21203/rs.3.rs-6210868/v1.
- [40] S. Dam e M. A. H. Khondoker, «Design and Numerical Investigation of High-Performance Heat Exchangers Containing Triply Periodic Minimal Surface Lattice Structures», in *1st International Conference on Industrial, Manufacturing, and Process Engineering (ICIMP-2024)*, MDPI, nov. 2024, p. 76. doi: 10.3390/engproc2024076076.
- [41] Y. Wei *et al.*, «Mechanical and damping performances of TPMS lattice metamaterials fabricated by laser powder bed fusion», *China Foundry*, vol. 21, fasc. 4, pp. 327–333, lug. 2024, doi: 10.1007/s41230-024-4026-5.

- [42] W.-H. Lai e A. Samad, «Development and flow optimization of “Gyroid” based additive manufacturing heat exchanger: Both computational and experimental analyses», *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 213, p. 109835, lug. 2025, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2025.109835.
- [43] J. Liu, D. Cheng, K. Oo, W. Pan, T.-L. McCrimmon, e S. Bai, «Optimization of Triply Periodic Minimal Surface Heat Exchanger to Achieve Compactness, High Efficiency, and Low-Pressure Drop», *Energies*, vol. 17, fasc. 20, p. 5141, ott. 2024, doi: 10.3390/en17205141.
- [44] M. Z. Saghir e M. Yahya, «Convection Heat Transfer and Performance Analysis of a Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) for a Novel Heat Exchanger», *Energies*, vol. 17, fasc. 17, p. 4275, ago. 2024, doi: 10.3390/en17174275.
- [45] G. Brambati, M. Guilizzoni, e S. Foletti, «Convective heat transfer correlations for Triply Periodic Minimal Surfaces based heat exchangers», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 242, p. 122492, apr. 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.122492.
- [46] C. C. Kwasi-Effah, O. Ibadode, e A. Qureshi, «Thermo-hydraulic performance characteristics of novel G-Prime and FRD Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) geometries», *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 159, p. 108226, dic. 2024, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108226.
- [47] W. Tang *et al.*, «Analysis on the convective heat transfer process and performance evaluation of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) based on Diamond, Gyroid and Iwp», *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 201, p. 123642, feb. 2023, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123642.
- [48] J. Liu, D. Cheng, K. Oo, T.-L. McCrimmon, e S. Bai, «Design and Additive Manufacturing of TPMS Heat Exchangers», *Appl. Sci.*, vol. 14, fasc. 10, p. 3970, mag. 2024, doi: 10.3390/app14103970.
- [49] M. Alteneiji, M. I. H. Ali, K. A. Khan, e R. K. A. Al-Rub, «Heat transfer effectiveness characteristics maps for additively manufactured TPMS compact heat exchangers», *Energy Storage Sav.*, vol. 1, fasc. 3, pp. 153–161, set. 2022, doi: 10.1016/j.enss.2022.04.005.
- [50] C. Renon e X. Jeanningros, «A numerical investigation of heat transfer and pressure drop correlations in Gyroid and Diamond TPMS-based heat exchanger channels», *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 239, p. 126599, apr. 2025, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126599.
- [51] G. Yan *et al.*, «Investigative research on the heat exchangers with triply periodic minimal surface structures under two hybrid methods», *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 242, p. 126875, giu. 2025, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.126875.
- [52] K. Yan, H. Deng, Y. Wu, J. Wang, e Y. Huang, «Effects of lattice geometric manipulation on thermo-hydraulic performance of Gyroid-structured heat exchanger: A numerical study», *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 248, p. 127217, set. 2025, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127217.
- [53] L. Dharmalingam, B. O'Malley, J. Tancabel, e V. Aute, «Design, optimization, and validation of a triply periodic minimal surface based heat exchanger for extreme temperature applications», *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 242, p. 126797, giu. 2025, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.126797.
- [54] Z. Zou *et al.*, «Experimental investigation of the performance of an Industrial-Grade Schwartz-D heat exchanger», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 270, p. 126243, lug. 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.126243.

- [55] A. Samad e W.-H. Lai, «Experimental and simulation analysis of heat transfer in Gyroid heat exchangers with variable flow channels», *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 239, p. 126530, apr. 2025, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126530.
- [56] G. A. Kilic, «Performance Evaluation of Triply Periodic Minimal Surface Heat Exchangers Using Nanofluids at High Flow Rates for Enhanced Energy Efficiency», *Appl. Sci.*, vol. 15, fasc. 8, p. 4140, apr. 2025, doi: 10.3390/app15084140.
- [57] J. Wang *et al.*, «Experimental and numerical analysis of functionally graded hybrid TPMS heat exchangers for enhanced flow and thermal performance», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 264, p. 125528, apr. 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.125528.
- [58] O.-R. Luis Guillermo, G.-O. Arturo, P.-B. James, e P. Saul, «Computational analysis and engineering modeling for the heat transfer and fluid flow through the gyroid TPMS structure», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 268, p. 125865, giu. 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.125865.
- [59] Y. Zhang *et al.*, «Conformal geometric design and additive manufacturing for special-shaped TPMS heat exchangers», *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 247, p. 127146, set. 2025, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127146.
- [60] K. Yan, H. Deng, Y. Wu, T. Yu, Y. Xiao, e J. Wang, «Gyroid-structured heat exchanger optimization via lattice geometric manipulation for enhanced thermo-hydraulic performance: an experimental and numerical research», *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 215, p. 109966, set. 2025, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2025.109966.
- [61] B. Reynolds, F. Lecarpentier, e D. Holland, «Heat transfer and topological characterisation of TPMS structures using 3D printed materials», *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 245, p. 126992, ago. 2025, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.126992.
- [62] M. Coe, Z. Rahnama, B. W. Reynolds, e D. J. Holland, «Numerical Investigation of Heat Transfer Enhancement by the Stretching of Triply Periodic Minimal Surfaces», 2025, *SSRN*. doi: 10.2139/ssrn.5104523.
- [63] F. Zhang, J. Wang, C. Qian, J. Shi, B. Yu, e J. Chen, «Performance comparison and analysis of gradient-optimized triply periodic minimal surface heat exchangers based on field synergy principle», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 275, p. 126887, set. 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.126887.
- [64] M. Beer e R. Rybár, «Optimisation of Heat Exchanger Performance Using Modified Gyroid-Based TPMS Structures», *Processes*, vol. 12, fasc. 12, p. 2943, dic. 2024, doi: 10.3390/pr12122943.
- [65] AM Media, *3D Printed Heat Exchanger Uses Gyroids for Better Cooling*, (2022). [Online Video]. Disponibile su: <https://www.youtube.com/watch?v=1qifd3yn9S0&list=PLb0SEylCnyp1eD2iPrseMCAJ4YWnV9EyR&index=2>