



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Innovazione del Prodotto

Tesi di Laurea Magistrale

Sviluppo di un sistema di stampa 3D di componenti metallici a geometria
complessa

Relatore: prof.ssa Lisa Biasetto

Laureando: Christian Dall'Olio 1179785

ANNO ACCADEMICO 2019-2020

Indice

Elenco delle figure	6
ELENCO DELLE TABELLE	9
Abbreviazioni	10
Introduzione	13
CAPITOLO 1	15
Additive manufacturing su superfici curve	15
1.1 Additive Manufacturing: definizione	15
1.2 Categorie di processo	18
1.2.1 <i>Getto di legante (Binder Jetting)</i>	18
1.2.2 <i>Deposizione diretta di energia (Directed Energy Deposition-DED)</i>	19
1.2.3 <i>Estrusione di materiale (Material Extrusion)</i>	21
1.2.4 <i>Getto di materiale (Material Jetting)</i>	22
1.2.5 <i>Fusione su letto di polveri (Powder Bed Fusion)</i>	23
1.2.6 <i>Laminazione di fogli (Sheet Lamination)</i>	25
1.2.7 <i>Fotopolimerizzazione in vasca (vat photopolymerization)</i>	26
1.3 Limiti della stampa su superfici piane	27
1.4 Stampa 3D su superfici non piane	31
1.4.1 <i>Vantaggi dei processi di stampa su superfici curve</i>	32
1.4.2 <i>Vantaggi del CLAM: comportamento meccanico dei prodotti</i>	33
1.4.3 <i>Tecnologie CLAM sviluppate</i>	34
1.4.4 <i>Multi-Axis AM (MAAM) per la stampa ad estrusione di materiale</i>	36
1.4.5 <i>Materiali per CLAM</i>	37
1.4.6 <i>Geometrie curve realizzate con tecnologia AM</i>	40
1.4.7 <i>Applicazioni del CLAM</i>	44
CAPITOLO 2	47
Materiali auxetici	47
2.1 Materiali auxetici: definizione	47
2.2 Proprietà dei materiali auxetici	49
2.3 Tipologie di strutture auxetiche	52
2.3.1 <i>Strutture rientranti</i>	52
2.3.2 <i>Strutture chirali</i>	54

2.3.3	<i>Strutture rotazionali semirigide</i>	56
2.3.4	<i>Strutture a fogli piegati e perforati</i>	56
2.4	Fabbricazione dei materiali auxetici.....	57
2.5	Applicazioni dei materiali auxetici.....	58
2.5.1	<i>Attrezzature sportive</i>	58
2.5.2	<i>Biomedicale</i>	59
2.5.3	<i>Sensori e attuatori</i>	59
2.5.4	<i>Tessile</i>	60
2.5.5	<i>Militare</i>	60
CAPITOLO 3	.....	61
Direct Ink Writing di strutture metalliche	.....	61
3.1	DIW.....	61
3.2	Stato dell'Arte.....	64
3.3	Estrusione di inchiostri metallici.....	64
3.4	Vantaggi e prospettive future.....	65
CAPITOLO 4	.....	67
Stampa tramite DIW di strutture auxetiche	.....	67
4.1	Obiettivi.....	67
4.2	Strumentazione di laboratorio.....	67
4.2.1	<i>Delta WASP 4020 Clay</i>	68
4.2.2	<i>Sistema di alimentazione</i>	69
4.2.3	<i>KUKA LBR iiwa 14 R820</i>	70
4.3	Stampa su superficie piana.....	72
4.3.2	<i>Preparazione dell'inchiostro</i>	73
4.3.3	<i>Programmazione</i>	73
4.3.4	<i>Stampa su superficie piana</i>	82
4.4	Stampa su superficie curva.....	84
4.4.1	<i>Set-up</i>	84
CAPITOLO 5	.....	87
Progetto di un estrusore a vite per DIW	.....	87
5.1	Estrusori per MIM.....	87
5.2	Dimensionamento di un estrusore a vite continua per DIW di impasti metallici.....	88
5.3	Modellazione CAD dell'estrusore a vite continua.....	94
Conclusioni	.....	101
Appendice	.....	103

Bibliografia	159
---------------------------	-----

ELENCO DELLE FIGURE

FIGURA 1 CATENA DI PROCESSO PER L'ADDITIVE MANUFACTURING [2]	17
FIGURA 2 LA FIGURA MOSTRA SCHEMATICAMENTE IL PROCESSO DI GETTO DI LEGANTE [4].....	19
FIGURA 3 LA FIGURA MOSTRA SCHEMATICAMENTE IL PROCESSO DI WAAM [4]	20
FIGURA 4 PARTICOLARI DELL'UGELLO DI UN SISTEMA DMD A FASCIO LASER. A) UGELLO COASSIALE CAPACE DI EROGARE GAS INERTI PER UN'ATMOSFERA PROTETTIVA, B) FASCIO LASER CON UGELLO LATERALE SENZA ATMOSFERA PROTETTIVA. [9].....	21
FIGURA 5 LA FIGURA MOSTRA SCHEMATICAMENTE IL PROCESSO DI ESTRUSIONE DI FILAMENTO [4].....	22
FIGURA 6 LA FIGURA MOSTRA SCHEMATICAMENTE IL PROCESSO DI GETTO DI MATERIALE [4].....	23
FIGURA 7 LA FIGURA MOSTRA SCHEMATICAMENTE IL PROCESSO DI FUSIONE A LETTO DI POLVERE [4].....	24
FIGURA 8 LA FIGURA MOSTRA SCHEMATICAMENTE IL PROCESSO DI LAMINAZIONE DI FOGLI [11]	25
FIGURA 9 LA FIGURA MOSTRA SCHEMATICAMENTE IL PROCESSO DELLA STEREOLITOGRAFIA [4]	26
FIGURA 10 A) GLI STRATI ORIZZONTALI SONO VISIBILI SU QUESTO PEZZO CILINDRICO, LA SCELTA DI QUESTO ORIENTAMENTO FAVORISCE L'ACCURATEZZA GEOMETRICA E LA RESISTENZA AI CARICHI RADIALI, MA SFAVORISCE LA RESISTENZA AI CARICHI ASSIALI E DI TAGLIO; B) L'ORIENTAMENTO DEGLI STRATI INFLUENZA IN MODO DIVERSO LA FINITURA SUPERFICIALE A SECONDA DELL'ORIENTAMENTO DELLE SINGOLE SUPERFICI ESTERNE; C) DIFFERENZE DI FINITURA SUPERFICIALE RISPETTO AL MODELLO GEOMETRICO ORIGINALE E RISPETTO ALLA RISOLUZIONE DELLA STAMPA [12].....	28
FIGURA 11 EFFETTO STAIR-STEP SU UNA SUPERFICIE CURVA STMPATA DEPOSITANDO STRATI ORIZZONTALI [13].28	
FIGURA 12 SUPPORTI NECESSARI A SOSTENERE DIVERSI TIPI DI STRUTTURE STAMPATE CON AM [14]	29
FIGURA 13 SUPPORTI PER SOSTENERE GLI ELEMENTI DI UN MANICO STAMPATO CON FDM [13]	29
FIGURA 14 LA RESISTENZA DEI PEZZI VARIA A SECONDA DELL'ORIENTAMENTO DEI CARICHI RISPETTO AGLI STRATI DEPOSITATI, SPECIALMENTE NEI PROCESSI AD ESTRUSIONE DI MATERIALE [15].....	30
FIGURA 15 ORIENTANDO DIVERSAMENTE IL PEZZO, SI PUÒ RIDURRE IL VOLUME DEI SUPPORTI DA REALIZZARE [14]	31
FIGURA 16 DEPOSIZIONE DI STRATI SU SUPERFICIE CURVA [16].....	31
FIGURA 17 PANNELLO PREFABBRICATO IN CEMENTO REALIZZATO CON 3DCP [16].....	32
FIGURA 18 DIFFERENZA DI FINITURA SUPERFICIALE FRA ELEMENTI STAMPATI CON STRATI PIANI E CON CLAM [13]	33
FIGURA 19 SI PUÒ NOTARE LA STRATIFICAZIONE DEL COMPONENTE NERO, GLI STRATI SI MOSTRANO PARALLELI AL PIANO DI QUESTA PAGINA [13]	33
FIGURA 20 QUESTO LATTICE AUXETICO PRESENTA UNA GEOMETRIA A GUSCIO APERTO (SHELL) [17].....	40
FIGURA 21 A) GEOMETRIA LINEARE, B) REALIZZAZIONE DELL'ELEMENTO LINEARE SU SUPERFICIE CURVA [29] ...	41
FIGURA 22 ELEMENTO 3D REALIZZATO CON CLFDM [24]	42
FIGURA 23 SOLIDO REALIZZATO CON STAMPA SU SUPERFICI CURVE [27].....	42

FIGURA 24 ELICA STAMPATA CON DMD, LE PALE SONO STATE STAMPATE PER STRATI CURVI A PARTIRE DALLA SUPERFICIE CILINDRICA DEL CORPO CENTRALE [6]	43
FIGURA 25 ILLUSTRAZIONE DEL COMPORTAMENTO AUXETICO CONFRONTATO CON QUELLO DEI MATERIALI COMUNI [31].....	48
FIGURA 26 A) DEFORMAZIONE CONVENZIONALE DI UNA STRUTTURA A NIDO D'APE CON PARETI DELLA CELLA INCERNIERATE IN RISPOSTA AD UN CARICO DI TRAZIONE APPLICATO NELLA DIREZIONE Y, CHE PORTA AD UN RAPPORTO DI POISSON POSITIVO (NON AUXETICO), SI HA UN RESTRINGIMENTO LUNGO X. B) DEFORMAZIONE DI UNA STRUTTURA A NIDO D'APE RIENTRANTE CON UN RAPPORTO DI POISSON NEGATIVO (AUXETICO), SOTTO TRAZIONE LUNGO Y TENDE AD ESPANDERSI IN DIREZIONE X [32].	49
FIGURA 27 MECCANISMO CHE PORTA ALL' AUMENTO DI DUREZZA NEI MATERIALI AUXETICI, SI HA UN FLUSSO DI MATERIALE VERSO LA ZONA DI COMPRESSIONE CHE NE AUMENTA LA DENSITÀ [32]	51
FIGURA 28 ILLUSTRAZIONE SCHEMATICA DEL COMPORTAMENTO ANTICLASTICO (A) E SINCLASTICO (B) DEI MATERIALI [32]	52
FIGURA 29 (A) CELLA POLIEDRICA CONVESSA, NON AUXETICA; (B) CELLA POLIEDRICA RIENTRANTE, AUXETICA; (C) CELLA 2D CON ANGOLO RIENTRANTE, AUXETICA NEL PIANO [36].....	53
FIGURA 30 STRUTTURE RIENTRANTI STAMPATE CON SLS DA [34]. (A) NIDO D'API RIENTRANTE 2D; (B) NIDO D'API RIENTRANTE 3D; (C) MISSING-RIB.....	53
FIGURA 31 ALTRI TIPI DI STRUTTURA RIENTRANTE [36].....	54
FIGURA 32 ILLUSTRAZIONE DI DIVERSE STRUTTURE CHIRALI E ANTICHIRALI PERIODICHE [36].....	55
FIGURA 33 ESEMPIO DI STRUTTURE METACHIRALI, (A) A SEI LEGAMENTI, (B) A QUATTRO LEGAMENTI, (C) A TRE LEGAMENTI [36]	55
FIGURA 34 ESEMPIO DI CELLA CHIRALE 3D [36].....	55
FIGURA 35 ILLUSTRAZIONE DI ALCUNE STRUTTURE ROTAZIONALI RIGIDE [36].....	56
FIGURA 36 STRUTTURA DI TIPO ORIGAMI CHIAMATA MIURA ORI CHE PRESENTA UN CHIARO COMPORTAMENTO AUXETICO [37].....	57
FIGURA 37 IMPIEGO DI UNA STRUTTURA AUXETICA DI TIPO ORIGAMI PER RIDURRE L'INGOMBRO DEI PANNELLI SOLARI DI UN SATELLITE DURANTE IL LANCIO IN ORBITA. SEQUENZA DI IMMAGINI CATTURATE DA [38]	57
FIGURA 38 SCHEMA DEL PROCESSO DI STAMPA DEL ROBOCASTING O DIW. UN DISPENSER (ESTRUSORE) FISSATO AD UN ROBOT SI MUOVE LUNGO UN PIANO ESTRUDENDO IL MATERIALE STRATO DOPO STRATO [40]	62
FIGURA 39 TRAMITE DIW È POSSIBILE STAMPARE STRUTTURE CON FEATURES GEOMETRICHE IN SCALE DIVERSE A SECONDA DEL TIPO DI INCHIOSTRO UTILIZZATO [41]	62
FIGURA 40 STAMPANTE DELTA WASP 4020 CLAY A DISPOSIZIONE DEL LABORATORIO CON SISTEMA SIRINGA-SERBATOIO	69
FIGURA 41 SISTEMA KUKA LBR IIWA 14 R820. 1) CAVO DI CONNESSIONE ALLA SMARTPAD; 2) PANNELLO DI CONTROLLO KUKA SMARTPAD; 3) MANIPOLATORE; 4) CAVO DI CONNESSIONE ALLA KUKA SUNRISE CABINET; 5) CONTROLLORE DEL ROBOT KUKA SUNRISE CABINET	70
FIGURA 42 SPAZIO DI LAVORO DEL MANIPOLATORE KUKA LBR IIWA 14 R820, LE QUOTE SONO ILLUSTRATE IN TABELLA 3.....	71
FIGURA 43 ILLUSTRAZIONE SCHEMATICA DEL NULL SPACE MOTION. LA POSIZIONE FINALE DEL BRACCIO ROBOTICO RIMANE FISSA NONOSTANTE IL MOVIMENTO DEI GIUNTI.	72

FIGURA 44 SCHEMATIZZAZIONE DELLA STRUTTURA GENERALE DEGLI SCRIPT MATLAB PER LA GENERAZIONE DEI CODICI DI STAMPA DELLE STRUTTURE CHIRALI. I RIQUADRI VERDI, GIALLI E ROSSI INDICANO DEI CICLI FOR 75	
FIGURA 45 VISUALIZZAZIONE DI UN NODO DELLA STRUTTURA ESACHIRALE CON NC VIEWER. SI NOTA IL PERCORSO SEGMENTATO DEGLI ARCHI DI CERCHIO E L'ORGANIZZAZIONE DELLE PASSATE TALE PER CUI NON SI HANNO INCROCI, MA DEI NODI CON SPESSORE PARI A 2-3 VOLTE QUELLO DEI LEGAMENTI.....	77
FIGURA 46 VISUALIZZAZIONE DI UN NODO DELLA STRUTTURA TETRACHIRALE CON NC VIEWER. SI NOTA ANCHE IN QUESTO CASO IL PERCORSO SEGMENTATO DEGLI ARCHI DI CERCHIO E LO SPESSORE DEI NODI PARI A 2-3 VOLTE QUELLO DEI LEGAMENTI	77
FIGURA 47 PROVINO ESACHIRALE CON DIAMETRO DEL FILAMENTO PARI A 400 MM E DIMENSIONE DELLA CELLA ELEMENTARE PARI A 5300 MM	78
FIGURA 48 VISTA FRONTALE DEL PROVINO ESACHIRALE 400X5300.....	79
FIGURA 49 PROVINO TETRACHIRALE CON DIAMETRO DEL FILAMENTO PARI A 500 MM E DIMENSIONE DELLA CELLA ELEMENTARE PARI A 10000 MM	80
FIGURA 50 VISTA FRONTALE DEL PROVINO TETRACHIRALE 500X10000	80
FIGURA 51 SCAFFOLD CON DIAMETRO DEL FILAMENTO DI 840 MM, DISTANZIAMENTO DEI FILAMENTI DI 1600 MM, DI DIMENSIONI ASSOLUTE 36X36X13 MM.....	81
FIGURA 52 VISTA FRONTALE DELLO SCAFFOLD IN FIGURA 51	81
FIGURA 53 STAMPA DI UNO SCAFFOLD CON DIAMETRO DEL FILAMENTO DI 840 MM, DISTANZIAMENTO FRA I FILAMENTI DI 800 MM E DIMENSIONI ASSOLUTE PARI A 36X36X13 MM IN ACCIAIO AISI 316L	83
FIGURA 54 PROVA DI STAMPA DI UN PROVINO ESACHIRALE D400X5300 IN ACCIAIO AISI 316L	84
FIGURA 55 STAMPA DEL PRIMO LAYER DELLA STRUTTURA MISSING-RIB SU SUPERFICIE CILINDRICA REALIZZATA CON UN INCHIOSTRO A BASE DI ARGILLA. (A) GIRO DI ANDATA; (B) GIRO DI RITORNO.	86
FIGURA 56 STRUTTUA MISSING-RIB COSTITUITA DA TRE STRATI	86
FIGURA 57 DISTINZIONE DELLE TRE ZONE DELLA VITE, ALL'INTERNO DELLE QUALI SI HANNO FENOMENI TERMODINAMICI DIVERSI NECESSARI ALLA FUSIONE DEI PELLET DI PEEK E AL RAGGIUNGIMENTO DELLE PROPRIETÀ REOLOGICHE OTTIMALI PER L'ESTRUSIONE	89
FIGURA 58 ILLUSTRAZIONE SCHEMATICA DELLE TRE ZONE, CON LE RELATIVE LUNGHEZZE RAPPORTATE AL DIAMETRO ESTERNO DELLA VITE.	89
FIGURA 59 CURVA SPERIMENTALE DELLA VISCOSITÀ DI INCHIOSTRI METALLICI DI Ti6Al4V [44]	93
FIGURA 60 SCHEMA DELLE QUOTE UTILIZZATE PER LA VITE [49].....	93
FIGURA 61 VISTA 3D DELLA VITE MODELLATA	95
FIGURA 62 TAVOLA QUOTATA DELLA VITE	96
FIGURA 63 CILINDRO (BARRELO) IN CUI VA INSERITA LA VITE	96
FIGURA 64 TAVOLA QUOTATA DEL BARREL	97
FIGURA 65 VISTA ANTERIORE DELLA PUNTA DI ESTRUSIONE BI-MATERIALE	97
FIGURA 66 VISTA POSTERIORE DELLA PUNTA DI ESTRUSIONE, CON FILETTATURA INTERNA M12X1,25 ADATTA AL COLLEGAMENTO CON IL BARREL.....	98
FIGURA 67 TAVOLA QUOTATA DELLA PUNTA DI ESTRUSIONE.....	98
FIGURA 68 VISTA IN SEZIONE DELLA PUNTA DI ESTRUSIONE BI-MATERIALE.....	99

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1 Riassunto delle tecnologie CLAM sviluppate sulla base di processi additivi tradizionali.....	37
Tabella 2 Schema sintetico dei materiali stampabili con tecnologie CLAM e non.....	39
Tabella 3 Quote dello spazio di lavoro del manipolatore KUKA LBR iiwa 14 R820.....	71
Tabella 4 Composizione chimica nominale dichiarata dal produttore, %	73
Tabella 5 Quote finali calcolate per la vite continua	94

Abbreviazioni

3DCP	3D Concrete Printing
ABS	Acrilnitrile-Butadiene-Stirene
AM	Additive Manufacturing
CAD	Computer-Aided Design
CLAM	Curved-Layer Additive Manufacturing
CLFDM	Curved-Layer Fused Deposition Modeling
DED	Directed Energy Deposition
DIW	Direct Ink Writing
DMD	Direct Metal Deposition
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabricatio
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LOM	Laminated Object Manufacturing
MAAM	Multi-Axis Additive Manufacturing
MIM	Metal Injection Molding
PA	Poliammide
PEEK	Polietero-etero-ketone
PEG	Polietilenglicole
PLA	Acido polilattico (Polylactide acid)
PMMA	Polimetil-metacrilato
PTFE	Politetrafluoroetilene
PS	Polistirene
PVA	Polivinilalcol
PVC	Polivinilcloruro
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
TPE	Elastomero termoplastico (Thermoplastic elastomer)
UHMWPE	Ultra-high molecular weight Polietilene

UV Ultravioletto
WAAM Wire and Arc Additive Manufacturing

Introduzione

L'Additive Manufacturing, comunemente noto anche come stampa 3D, è una famiglia di tecnologie che sta rivoluzionando l'industria e le vite delle persone. Grazie ad essa, è possibile produrre oggetti dalla geometria più disparata in breve tempo, passando direttamente da un modello virtuale al pezzo finito. Questo implica un time-to-market ridotto per i nuovi prodotti in via di sviluppo, sia che queste tecnologie vengano utilizzate direttamente per la produzione dei prodotti da vendere, che per la produzione di prototipi grazie ai quali si possono accorciare i tempi di sviluppo. Inoltre, si dà la possibilità di realizzare oggetti in casa grazie alla disponibilità di stampanti *desktop* dal costo contenuto. Ultimo aspetto, è l'inserimento di questo tipo di tecnologie nella cornice dell'Industria 4.0, che comprende sistemi di produzione avanzati interconnessi fra loro capaci di aumentare notevolmente le performances industriali e che sta prendendo sempre più piede nel panorama produttivo anche grazie all'Additive Manufacturing.

In questa tesi vengono discusse le possibilità di sviluppo ulteriore dell'Additive Manufacturing, in particolare per la stampa su superfici curve, per la stampa di strutture complesse come quelle che caratterizzate da un comportamento auxetico e viene infine proposto lo sviluppo di un processo per la stampa di strutture metalliche tecnologicamente più semplice, meno energivoro e più economico dei processi additivi più utilizzati per la stampa di materiali metallici. Il processo proposto è il Direct Ink Writing, ovvero un processo che estrude un inchiostro costituito da una soluzione molto caricata di polveri, che permette facilmente la stampa di strutture metalliche su superfici curve.

Nella contestualizzazione del lavoro vengono quindi presentati i materiali auxetici, materiali caratterizzati da una proprietà anti-intuitiva di espandersi lateralmente quando vengono stirati e contrarsi lateralmente quando vengono compressi, proprietà riassumibile in un rapporto di Poisson negativo. Questi materiali possiedono una serie di proprietà oltre a quella appena accennata che li rendono molto interessanti per utilizzi in ambiti diversi come le attrezzature sportive, la difesa, il biometrico, i sensori e il tessile. L'Additive Manufacturing costituisce un processo quasi obbligato per la

realizzazione di questo tipo di materiali, sebbene esista un numero molto limitato di alternative. Vengono anche descritte le diverse tipologie di strutture che portano al comportamento particolare di questi materiali, alcune delle quali verranno stampate tramite il Direct Ink Writing e costituiscono parte del lavoro svolto in questa tesi.

Il Direct Ink Writing impone l'utilizzo di inchiostri a base di polveri che devono avere proprietà reologiche particolari. Viene quindi preparato un inchiostro a base di polveri di acciaio AISI 316L legate con una miscela polimerica che conferisce un comportamento pseudoplastico al materiale. L'inchiostro preparato viene utilizzato per la stampa di solidi cellulari chiamati *scaffold* caratterizzati da una densità ridotta e successivamente si prova la stampa di strutture auxetiche. Per arrivare a questo è necessario prima creare dei percorsi adatti alla realizzazione della geometria desiderata rispettando però alcuni limiti imposti dal Direct Ink Writing. Questi percorsi sono descritti da un codice macchina in formato .GCODE appositamente adattato al firmware della stampante per Direct Ink Writing utilizzata, il codice è stato scritto in modo automatico utilizzando uno script MatLab appositamente programmato. Viene infine illustrata la prova di stampa di un inchiostro a base di argilla su una superficie cilindrica movimentata da un braccio robotico a 7 assi, con un estrusore a vite continua collegato alla stampante per Direct Ink Writing che rimane in posizione fissa e verticale.

L'ultimo capitolo della tesi illustra un progetto per un estrusore a vite continua, simile a quello utilizzato per il Direct Ink Writing dell'inchiostro a base di argilla, appositamente progettato per l'estrusione dell'inchiostro metallico a base di polveri di AISI 316L da montare su una comune stampante per Direct Ink Writing. Vengono presentati estrusori simili utilizzati per processi diversi come l'Additive Manufacturing di pellet termoplastici o il Metal Injection Molding, dai quali si prende ispirazione per la progettazione. Successivamente si illustra il processo di dimensionamento e la modellazione in ambiente CAD dell'estrusore, composto da una vite rotante, un cilindro esterno ed una punta capace di erogare in modo coassiale il filamento di inchiostro metallico ricoperto da uno strato di fotopolimero. L'utilizzo del fotopolimero può rappresentare un altro sviluppo per il Direct Ink Writing, modificando il meccanismo di consolidamento del materiale depositato.

CAPITOLO 1

Additive manufacturing su superfici curve

1.1 Additive Manufacturing: definizione

Additive Manufacturing (AM) è il nome della famiglia di tecnologie che, in un processo automatizzato, produce oggetti tridimensionali direttamente da un modello digitale tramite l'aggiunta successiva di materiale (o più materiali) strato per strato, senza l'uso di utensili specializzati, così come definito dalla norma ASTM F2792-12a (Standard terminology for Additive Manufacturing Technologies) [1]. È il termine formalizzato di quello che in passato veniva chiamato Prototipazione Rapida o *Rapid Prototyping* (RP), o ancora *Rapid Manufacturing*, e quello che oggi viene comunemente chiamato Stampa 3D. Altri termini utilizzati sono manifattura additiva, fabbricazione additiva, *automated fabrication* (Autofab), *rapid tooling*, *solid freeform fabrication* (SFF), *direct writing*, *additive layer-based manufacturing*.

I processi di Additive Manufacturing sono accomunati tutti dalla catena di processo che prevede alcuni passaggi che portano da un modello CAD al prodotto finito. Questi passaggi sono [2]:

1. Creazione del modello CAD

La prima fase consiste nell'ottenere un modello virtuale dell'oggetto da stampare tramite un software di modellazione CAD (Solidworks, Solid Edge, Rhinoceros, ecc...) oppure l'acquisizione della geometria 3D di un oggetto esistente tramite *reverse engineering*.

2. Conversione in formato .STL

Il modello CAD contiene numerose informazioni che variano un formato all'altro, per cui è necessario convertire il file in un formato comune per poter

essere letto dalla macchina. Il formato storicamente utilizzato nell'AM è il STL, che deriva da STereoLitography (*Stereo Litography Interface Format*), in quanto è nato per il primo processo AM sviluppato, la stereolitografia. Questo formato descrive il modello CAD discretizzando la sua superficie esterna per elementi triangolari, ma non contiene informazioni utili come le dimensioni, il colore o il materiale. Le limitazioni del .STL hanno portato all'adozione del nuovo formato .AMF che rappresenta lo standard attuale ASTM/ISO e rappresenta un'estensione del .STL e contiene dimensioni, colore, materiale, e altre informazioni utili [2]. La conversione dal formato originale al .STL o al .AMF può implicare una serie di errori nel file che vanno corretti. Esistono software capaci di eseguire la correzione automatica degli errori più comuni.

3. Importazione del file .STL/.AMF nella macchina

Ottenuto un file .STL/.AMF senza errori che comprometterebbero la sua lettura, lo si trasferisce alla macchina. In questa fase si verifica la correttezza del modello ed è possibile decidere con quale orientazione verrà stampato il pezzo, quanti e quali tipi di supporti dovranno essere stampati e a che scala stamparlo. È possibile stampare sia un pezzo unico, che un suo multiplo, che più modelli diversi contemporaneamente, secondo il vincolo del volume di stampa della macchina.

4. Set-up della macchina

Il set-up comprende l'impostazione di alcuni parametri specifici del processo come la temperatura della camera di stampa o altri parametri più generali come lo spessore dei *layers* che vanno ottimizzati a seconda del materiale utilizzato. In ogni caso è fondamentale che i parametri impostati siano corretti al fine di ottenere un prodotto di qualità. Molte macchine hanno ovviamente anche la possibilità di impostare dei parametri di default.

5. Stampa

Questa è la fase di stampa vera e propria, in cui si procede con l'aggiunta di materiale strato per strato fino al completamento del pezzo.

6. Rimozione del pezzo

Alla fine della stampa è necessario estrarre il pezzo dalla macchina e rimuovere eventuali supporti. Per questa fase è necessaria particolare cura e solitamente è svolta a mano da operatori specializzati, specialmente se si devono maneggiare letti di polveri o se la parte stampata con i suoi supporti è saldata al piatto della stampante.

7. *Post-process*

A seconda della tecnologia utilizzata, possono essere necessarie lavorazioni di finitura e trattamenti termici o chimici per ottenere le proprietà ottimali richieste dall'applicazione del componente. Per alcuni processi ed applicazioni, invece, questa fase non è necessaria.

8. **Applicazione del prodotto finito.**

Ottenuto il pezzo finito è possibile utilizzarlo.

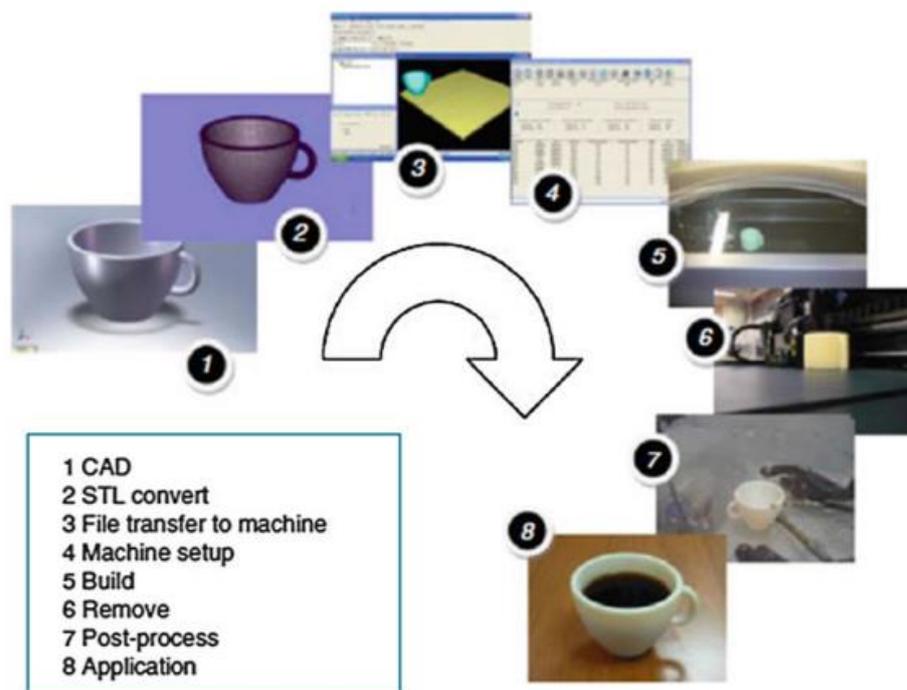


Figura 1 Catena di Processo per l'Additive Manufacturing [2]

1.2 Categorie di processo

Dalla definizione generale fornita dalla normativa si può facilmente intuire la vastità della famiglia dei processi di AM. Al giorno d'oggi sono disponibili molti processi in ambito industriale, per alcuni più affermati ed elementari come il *Fused Deposition Modeling* (FDM) si trovano in commercio anche macchinari per uso domestico, mentre altri processi sono ancora in via di sviluppo. I singoli processi differiscono per moltissimi aspetti come il metodo di deposizione degli strati, il principio di unione di questi con gli strati già consolidati e i materiali lavorati. Da questi aspetti dipendono il tipo di macchinario utilizzato, il costo della materia prima, il costo di lavorazione e quindi il costo unitario del prodotto finito oltre che le proprietà meccaniche, geometriche e alla qualità delle parti prodotte.

Si possono raggruppare i processi in 7 categorie che la ASTM 2972-12a descrive come segue

1.2.1 Getto di legante (*Binder Jetting*)

Processo di additive manufacturing nel quale un agente legante liquido è selettivamente depositato per unire materiali sotto forma di polveri [1]. Si tratta di un processo indiretto, per cui il prodotto risultante necessita di lavorazioni successive per ottenere le caratteristiche meccaniche e geometriche finali.

Il processo inizia col deposito di uno strato di polveri sul piatto di lavorazione, successivamente una testina inkjet scorre sopra allo strato di polveri depositando il legante nei punti desiderati, infine il piatto di lavorazione si abbassa e viene depositato un nuovo strato. Il processo si ripete fino a realizzare tutti gli strati, la parte realizzata viene poi estratta dalle polveri e mandata alle lavorazioni di finitura.

Inizialmente per questo processo si utilizzavano polveri di amido e colle a base acqua. Attualmente si usano polveri di gesso con leganti a base acqua, tuttavia i pezzi realizzati sono poco resistenti, per cui vengono infiltrati con altri materiali, tipicamente basati su acrilati. La Voxeljet fornisce polveri di PMMA e leganti liquidi o a base cera. La ExOne usa polveri metalliche per realizzare parti metalliche e sabbia per realizzare stampi per colata, con leganti polimerici [3].

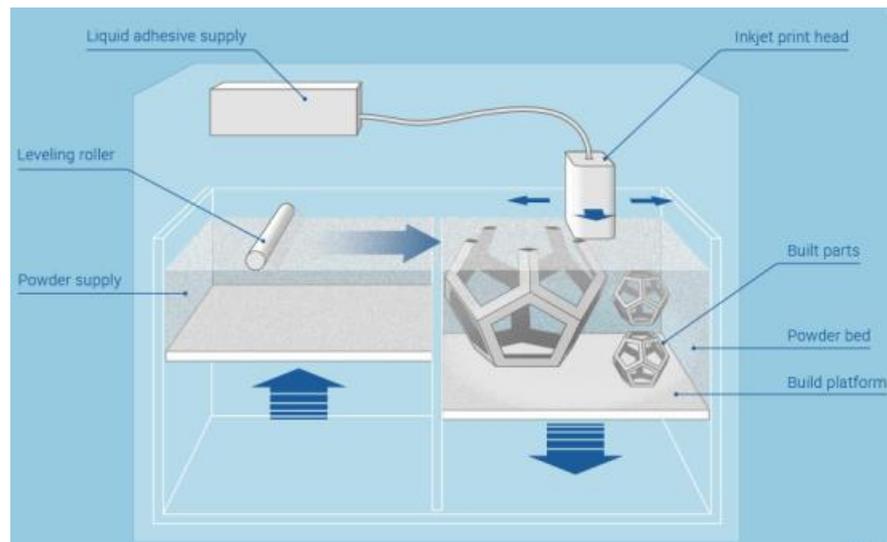


Figura 2 La figura mostra schematicamente il processo di getto di legante [4]

1.2.2 Deposizione diretta di energia (*Directed Energy Deposition-DED*)

Processo di additive manufacturing nel quale energia termica focalizzata è usata per fondere materiali insieme mentre vengono depositati; questa fonte di energia può essere un laser, un fascio di elettroni o un arco al plasma [1].

Il principio di funzionamento consiste nel deposito del materiale su una superficie accompagnato da un simultaneo deposito di energia focalizzata sull'area di deposito, che consolida il nuovo materiale e lo salda alla superficie sottostante. La superficie su cui avviene la lavorazione può essere lo strato precedente, una superficie libera di partenza oppure la superficie di un pezzo esistente. Questo processo può essere quindi utilizzato sia per produrre pezzi nuovi che per lavorazioni su pezzi esistenti come riparazioni o modifiche geometriche. Spesso i sistemi DED forniscono anche un'atmosfera protettiva nella zona di lavorazione per evitare ad esempio l'ossidazione di polveri metalliche e garantire una sicurezza adeguata.

Il primo processo ad essere commercializzato è stato il *Laser Engineered Net Shaping* (LENS) della OPTOMECH (USA) [5]. Essendo il LENS un nome commerciale, questo processo si può anche chiamare *Direct Metal Deposition* (DMD) [6]. Nel LENS la materia prima viene fornita sotto forma di polveri che vengono sparate da un orifizio che può essere affiancato al fascio laser o coassiale ad esso, il fascio laser è focalizzato sul punto di deposito delle polveri per fonderle mentre si depositano sulla superficie. Le polveri poi solidificano formando un sottile strato consolidato alla superficie sottostante.

Un processo alternativo è il *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM) [7] [8], che consiste semplicemente nell'applicazione della saldatura a filo in un sistema di fabbricazione additiva. Più precisamente, un filo metallico viene fuso con un arco elettrico e depositato in modo continuo formando strati sovrapposti di materiale, ottenendo alla fine una geometria tridimensionale.

Con il DED si possono utilizzare materiali che rimangono stabili in un bagno fuso, almeno sotto atmosfera protettiva. I materiali possono essere sotto forma di polveri, con un diametro generalmente compreso fra 20 e 150 μm , o sotto forma di fili nel caso del WAAM (*Wire and Arc Additive Manufacturing*), come quelli utilizzati normalmente per la saldatura a filo. Non sono adatte polveri di materiali altamente conduttivi e riflettenti come alcune leghe di alluminio, oro e rame, nonché polveri ceramiche per via dell'alto punto di fusione e della bassa conduttività che causerebbe rotture dovute a shock termico durante il raffreddamento. Con più ugelli si possono dosare e depositare contemporaneamente polveri di materiali diversi e realizzare in-situ leghe metalliche e materiali compositi, oppure pezzi multimateriale o con gradienti di materiale all'interno del loro volume.

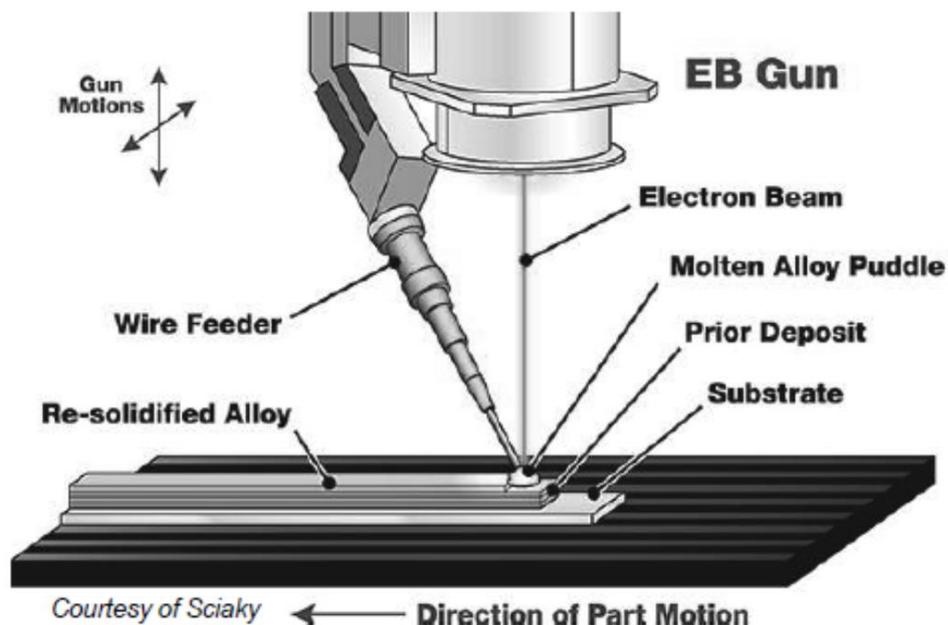


Figura 3 La figura mostra schematicamente il processo di WAAM [4]

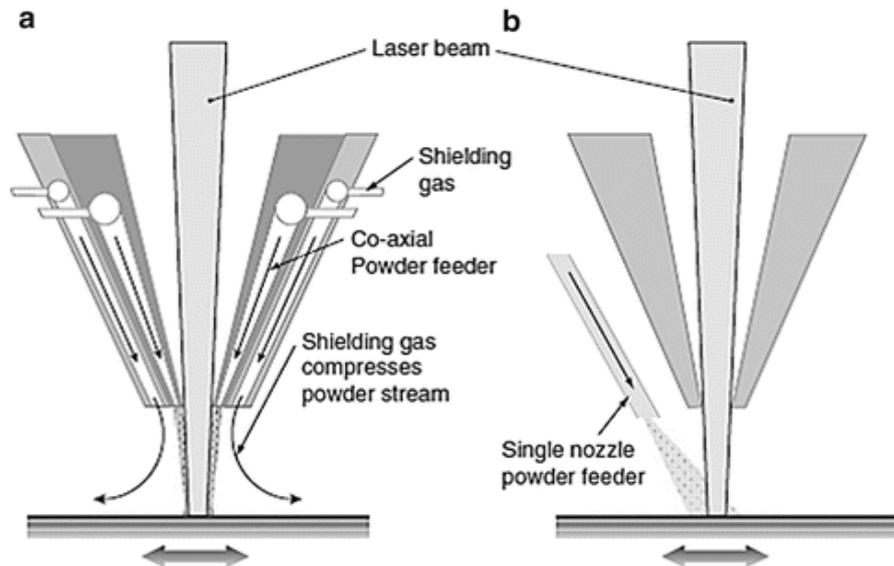


Figura 4 Particolari dell'ugello di un sistema DMD a fascio laser. a) Ugello coassiale capace di erogare gas inerti per un'atmosfera protettiva, b) fascio laser con ugello laterale senza atmosfera protettiva. [9]

1.2.3 Estrusione di materiale (Material Extrusion)

Processo di additive manufacturing nel quale il materiale è selettivamente depositato attraverso un ugello o un orifizio [1]. A seconda dei materiali utilizzati si hanno meccanismi di consolidamento diversi.

I processi più diffusi, *Fused Deposition Modeling* (FDM), *Fused Filament Fabrication* (FFF) e *Fused Layer Modeling* (FLM), prevedono la fusione di un filamento termoplastico e la sua estrusione attraverso un ugello, il filamento estruso si deposita e raffreddandosi si solidifica. Questi processi prediligono l'uso di polimeri termoplastici amorfi, come ABS e PC, in quanto mantengono una viscosità sufficiente a mantenere la forma dopo l'estrusione e permettono una buona unione con gli strati precedenti ed i filamenti affiancati; tuttavia, il materiale più diffuso risulta il PLA, un polimero termoplastico semicristallino e biodegradabile, che fornisce un livello di dettaglio maggiore rispetto all'ABS [10].

Il Direct Ink Writing (DIW), o Robocasting, è un altro processo nel quale viene estruso un inchiostro attraverso un orifizio (*nozzle*) formando un filamento che si deposita nella posizione desiderata. Alla fine della stampa, il pezzo ottenuto è un verde, che va successivamente sinterizzato per consolidarne la struttura. Essendo gli impasti formati da un legante a base polimerica, è spesso necessaria una fase di lavaggio o *debinding* prima della sinterizzazione, per eliminare le tracce di legante presenti ed ottenere un materiale più puro. L'inchiostro utilizzato per il DIW consiste in un impasto a base di polveri con proprietà reologiche tali da mantenere la forma del *nozzle* quando viene depositato sul substrato, in questo modo la stampa avviene come la scrittura (*writing*) di una linea continua, strato per strato, utilizzando un inchiostro (*ink*) con una viscosità tale da conferire alla linea uno spessore costante.

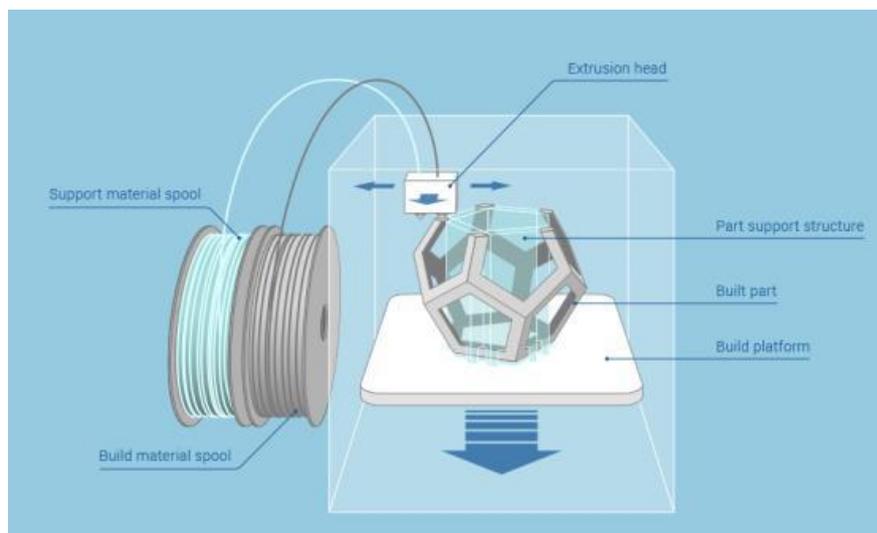


Figura 5 La figura mostra schematicamente il processo di estrusione di filamento [4]

1.2.4 Getto di materiale (*Material Jetting*)

Processo di additive manufacturing nel quale gocce di materiale da costruzione sono selettivamente depositate. I materiali possono essere foto-polimeri o cere [1].

I processi *multijet modeling*, *inkjet printing* e *drop on demand* (DOD) lavorano le cere. In questi casi, delle testine di stampa inkjet gettano gocce di materiale fuso che, depositandosi, solidifica. Per la lavorazione di fotopolimeri, processi come il *polyjet modeling* e il *polyjetting*, si utilizzano le testine di stampa inkjet per gettare il materiale

liquido sulla superficie di stampa, simultaneamente le gocce depositate vengono reticolate da un raggio UV e solidificate. In questi modi si ottengono degli strati di materiale solido che vanno via via a formare la geometria desiderata.

Oltre ai fotopolimeri e alle cere, si stanno sviluppando soluzioni capaci di realizzare tramite getto di materiale componenti ceramici, in particolare allumina e zirconia, e metallici.

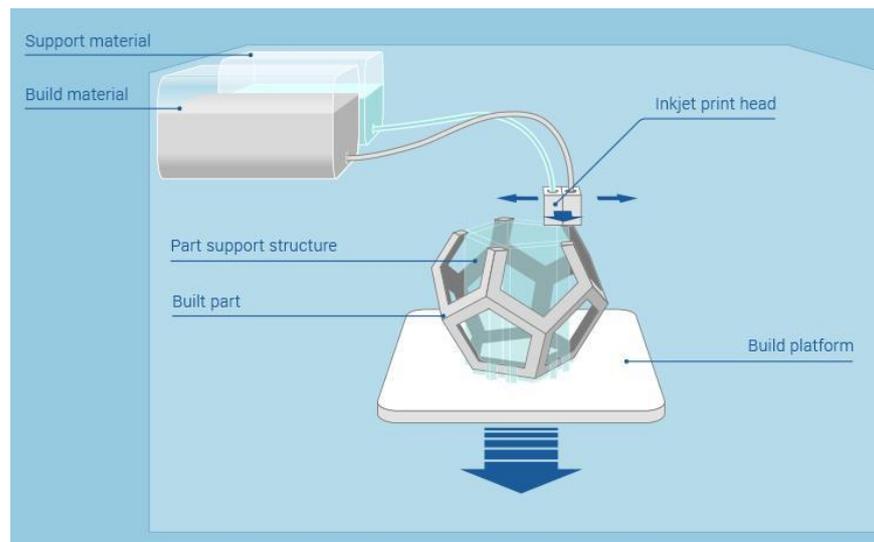


Figura 6 La figura mostra schematicamente il processo di getto di materiale [4]

1.2.5 Fusione su letto di polveri (Powder Bed Fusion)

Processo di additive manufacturing nel quale energia termica fonde selettivamente regioni di un letto di polveri [1]. Questa famiglia di processi comprende il *Selective Laser Sintering* (SLS), l'*Electron Beam Melting* (EBM) e il *Selective Laser Melting* (SLM), che rappresenta il processo più diffuso per la manifattura additiva di materiali metallici.

Il principio di deposizione è simile al binder jetting, nel quale viene depositato un sottile strato di polveri tramite un recoater. Il consolidamento avviene invece con un fascio laser o di elettroni, il quale può fondere o sinterizzare le polveri. Il letto di polveri viene poi abbassato per fare spazio al successivo strato che verrà depositato sopra di esso. La camera in cui si trova il letto di polveri è spesso mantenuta in atmosfera controllata per minimizzare l'ossidazione e il degrado del materiale, inoltre il letto di polveri è

mantenuto ad una temperatura leggermente inferiore alla temperatura di fusione o sinterizzazione e raffreddata in modo controllato per evitare distorsioni dovute al gradiente termico e minimizzare la potenza del fascio energetico. Dopo aver raffreddato il letto di polveri a temperatura ambiente il pezzo può essere estratto dalla macchina e le polveri vengono rimosse.

I materiali più utilizzati nel SLS sono polimeri termoplastici semicristallini come le poliammidi, fra cui il PA12 è il più diffuso. L'utilizzo di polimeri semicristallini permette di regolare meglio i parametri di processo sulla base di una temperatura di fusione ben definita. Altri materiali comunemente utilizzati sono PS, elastomeri termoplastici, PEEK e polimeri caricati con fibre.

Con il SLM si possono lavorare praticamente tutti i metalli saldabili forniti sotto forma di polveri. Viene comunemente sfruttato per la produzione di componenti in acciaio, leghe di titanio, di nickel, cromo-cobalto e alcune leghe di alluminio. Si stanno diffondendo anche produzioni in oro e argento, generalmente per il settore della gioielleria. L'EBM permette di lavorare solo materiali conduttivi, in quanto con il fascio di elettroni si ha un trasferimento di carica negativa che causa forze repulsive nel letto di polveri.

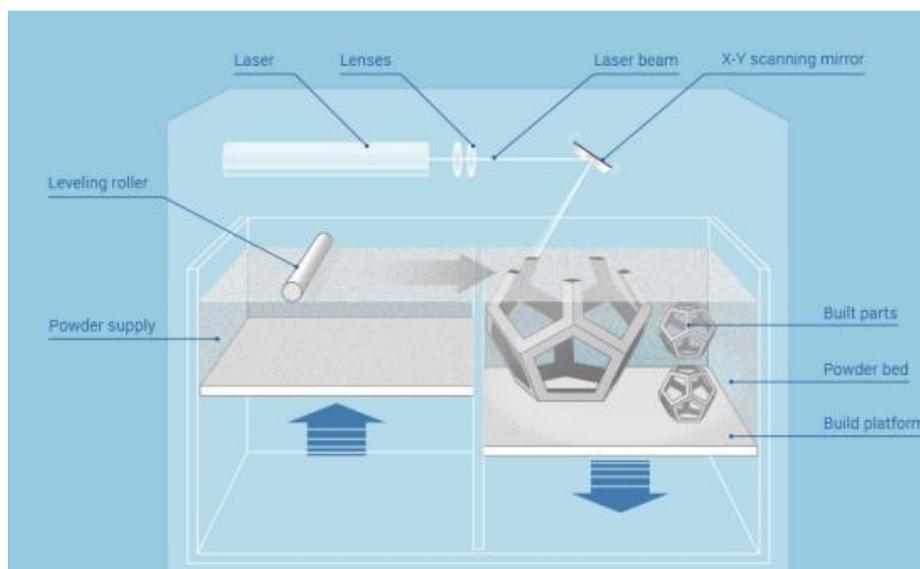


Figura 7 La figura mostra schematicamente il processo di fusione a letto di polvere [4]

1.2.6 Laminazione di fogli (Sheet Lamination)

Processo di additive manufacturing nel quale fogli di materiale vengono uniti per formare una parte [1].

Il materiale viene posizionato sul piano di stampa e laminato con un rullo, unendosi allo strato precedente, successivamente viene tagliato con un laser secondo la geometria richiesta. Il materiale in eccesso viene anch'esso tagliato a quadretti per favorirne la rimozione alla fine della stampa. Questo processo si ripete strato dopo strato fino ad ottenere il pezzo finito. L'unione fra due strati dipende dal processo adottato, così come dai materiali.

Nel *Laminated Object Manufacturing* (LOM) i fogli vengono uniti usando un adesivo applicato sul lato inferiore ed un rullo riscaldato. Questo processo viene utilizzato inizialmente per fogli di carta adesiva, ricoperti da un sottile strato di polimero termoplastico che fondendosi aderisce anche al foglio sottostante. Il LOM è stato esteso anche alla lavorazione di fogli di PVC, metalli, nastri composti da impasti ceramici o compositi a matrice ceramica.

Con l'*Ultrasonic Additive Manufacturing* (UAM), invece, il rullo di laminazione contiene un sonotrodo che unisce fogli metallici tramite saldatura ad ultrasuoni.

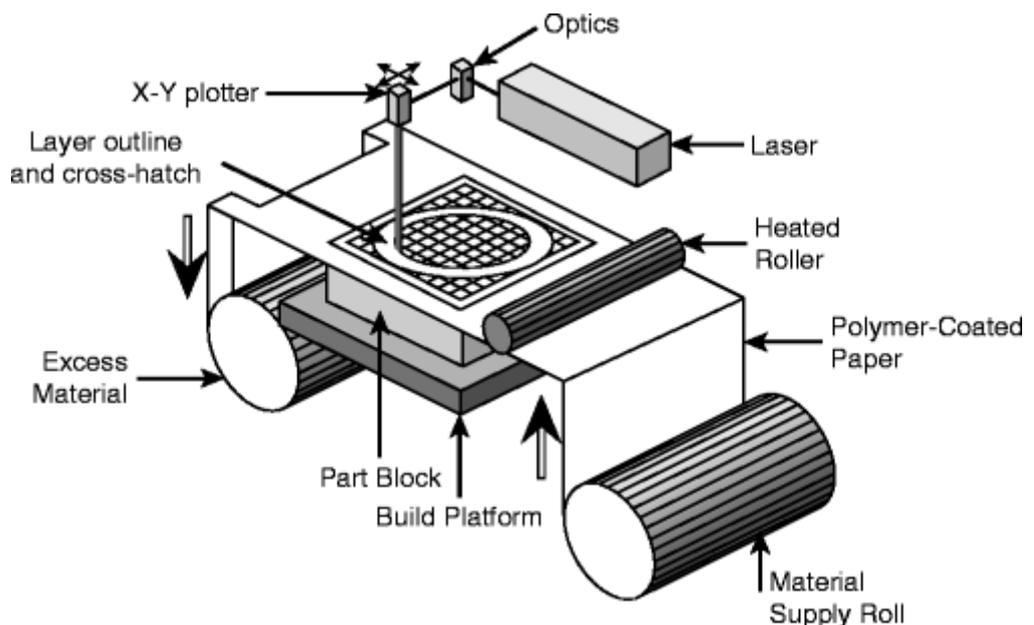


Figura 8 La figura mostra schematicamente il processo di laminazione di fogli [11]

1.2.7 Fotopolimerizzazione in vasca (vat photopolymerization)

Processo di additive manufacturing nel quale un fotopolimero liquido in una vasca viene selettivamente reticolato con una polimerizzazione attivata dalla luce [1]. Questa famiglia di processi comprende la stereolitografia, che è il primo processo AM ad essere stato sviluppato.

I fotopolimeri sono monomeri od oligomeri che polimerizzano quando vengono attivati da un fotoiniziatore formando una struttura reticolare. I primi ad essere utilizzati in questi processi sono resine a base di poliacrilati, a cui si sono aggiunte successivamente anche le resine epossidiche. Queste ultime, rispetto alle precedenti, hanno il vantaggio di presentare minori ritiri e deformazioni e maggiore adesione fra gli strati, quindi pezzi più duri, resistenti e con un'accuratezza dimensionale maggiore.

Nella fotopolimerizzazione in vasca viene usato come fotoiniziatore un fascio laser UV che colpisce una regione limitata della superficie liquida, ottenendo quindi un sottile strato di polimero solido reticolato. Lo strato polimerizzato viene quindi immerso nel bagno liquido per essere ricoperto da un nuovo strato liquido che verrà anch'esso reticolato. L'operazione si ripete finché non si ottiene la geometria tridimensionale di input.

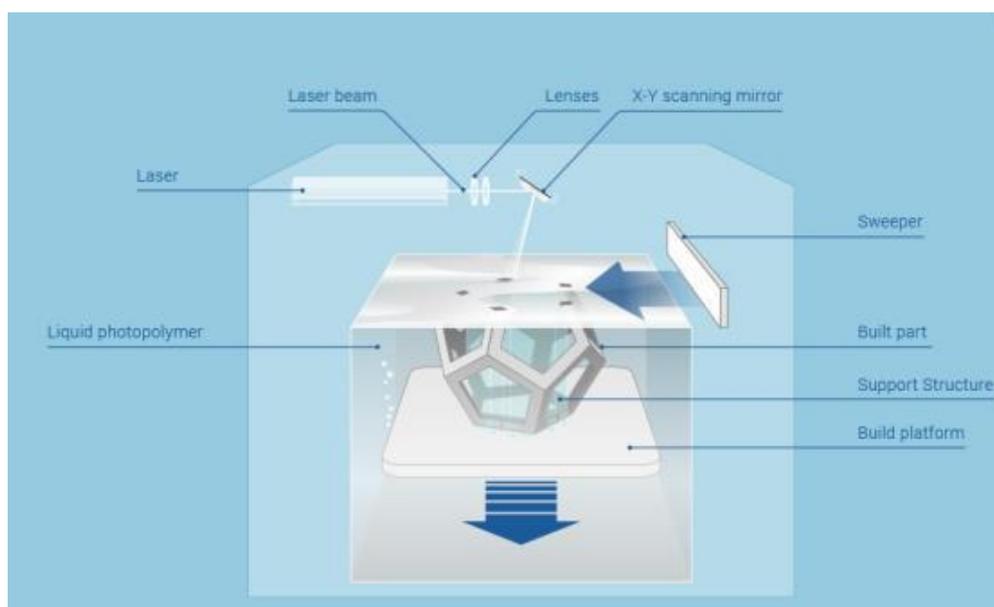
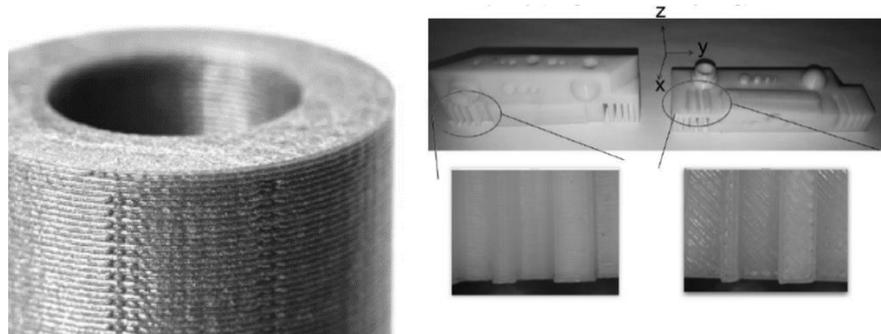


Figura 9 La figura mostra schematicamente il processo della stereolitografia [4]

1.3 Limiti della stampa su superfici piane

Al giorno d'oggi esiste una grande varietà di tecnologie di AM, la maggior parte delle quali si traducono in processi basati sul deposito di materiale per strati piani sovrapposti. In questi processi, i modelli da realizzare sono prima suddivisi in strati piani orizzontali di spessore uniforme, successivamente per ogni strato si generano dei percorsi di stampa e infine si ottiene la realizzazione dei pezzi con i relativi supporti procedendo strato dopo strato in direzione verticale. Tuttavia, questi processi hanno dei limiti per quanto riguarda la finitura superficiale, le proprietà meccaniche e le strutture di supporto necessarie.

Dallo spessore degli strati dipende la risoluzione dei pezzi. In particolare, le superfici curve vengono approssimate per gradini di altezza pari allo spessore degli strati, causando il tipico effetto *stair-step*. Per migliorare la finitura superficiale si può quindi ridurre lo spessore degli strati, entro i limiti concessi dalla tecnologia a disposizione e dai tempi di fabbricazione, oppure eseguire lavorazioni di finitura che aumentano il tempo di realizzazione, il consumo di materiale e quindi il costo finale del pezzo.



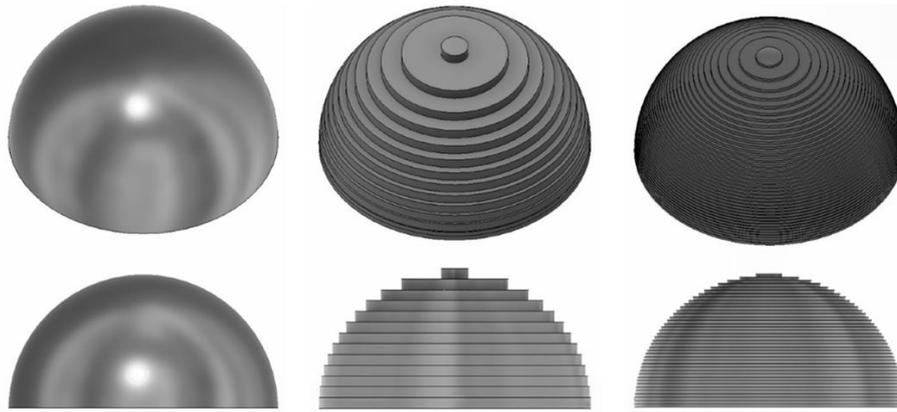


Figura 10 a) Gli strati orizzontali sono visibili su questo pezzo cilindrico, la scelta di questo orientamento favorisce l'accuratezza geometrica e la resistenza ai carichi radiali, ma sfavorisce la resistenza ai carichi assiali e di taglio; b) l'orientamento degli strati influenza in modo diverso la finitura superficiale a seconda dell'orientamento delle singole superfici esterne; c) differenze di finitura superficiale rispetto al modello geometrico originale e rispetto alla risoluzione della stampa [12]



Figura 11 Effetto stair-step su una superficie curva stampata depositando strati orizzontali [13]

Per evitare il collasso degli strati orizzontali, sono spesso necessarie delle strutture di supporto. Queste vengono realizzate con lo stesso materiale del componente da stampare, o con un secondo materiale meccanicamente meno performante, e devono essere rimosse alla fine della lavorazione. Lo svantaggio della realizzazione dei supporti consiste nell'aumento del tempo di stampa, nell'aumento del consumo di materiale e nella necessità di *post-processing* che comportano un costo di realizzazione del pezzo maggiore.

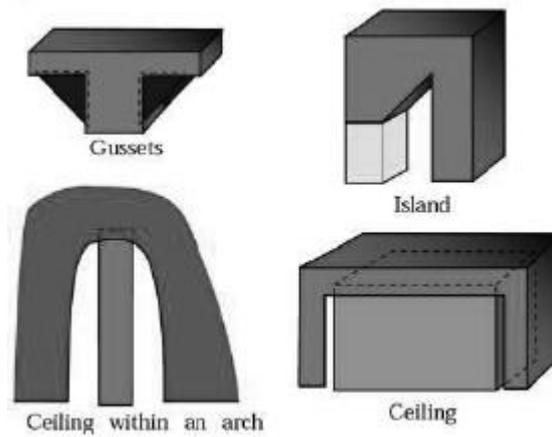


Figura 12 Supporti necessari a sostenere diversi tipi di strutture stampate con AM [14]



Figura 13 Supporti per sostenere gli elementi di un manico stampato con FDM [13]

La stampa per strati paralleli comporta logicamente delle proprietà meccaniche ortotrope. Infatti, in direzione parallela agli strati si hanno tensione di snervamento, tensione di rottura e modulo elastico maggiori che in direzione normale ad essi; queste proprietà variano anche lungo il piano a seconda dell'orientamento dei filamenti. Un altro grande svantaggio è costituito dalla scarsa adesione fra gli strati orizzontali che crea dei piani preferenziali di rottura.

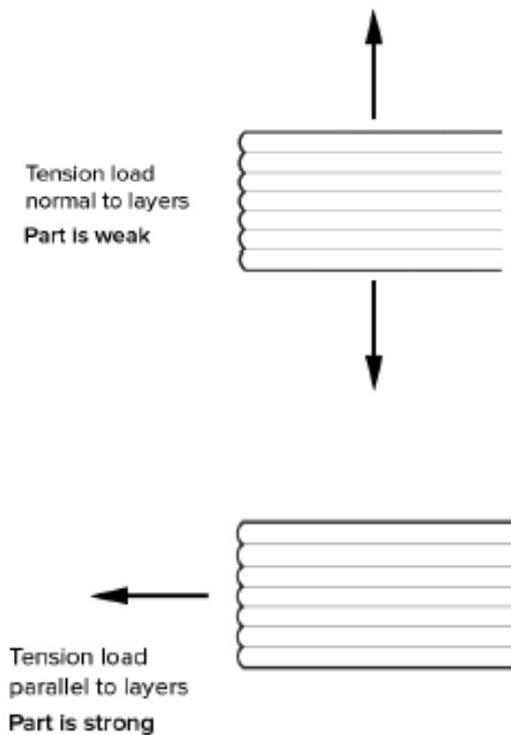


Figura 14 La resistenza dei pezzi varia a seconda dell'orientamento dei carichi rispetto agli strati depositati, specialmente nei processi ad estrusione di materiale [15]

Considerate le proprietà ortotrope e la direzione di stampa, si può realizzare il pezzo orientandolo in modo da conferirgli le caratteristiche meccaniche migliori in funzione delle sollecitazioni a cui sarà sottoposto durante l'utilizzo. Tuttavia, bisogna anche considerare che la necessità di minimizzare le strutture di supporto fa sì che l'orientamento degli strati nel pezzo stampato possa non essere tale da ottimizzare il comportamento meccanico. Infine, va considerato il vantaggio di poter adottare dei percorsi di stampa capaci di ottenere strati con proprietà nel piano adatte alle sollecitazioni previste.

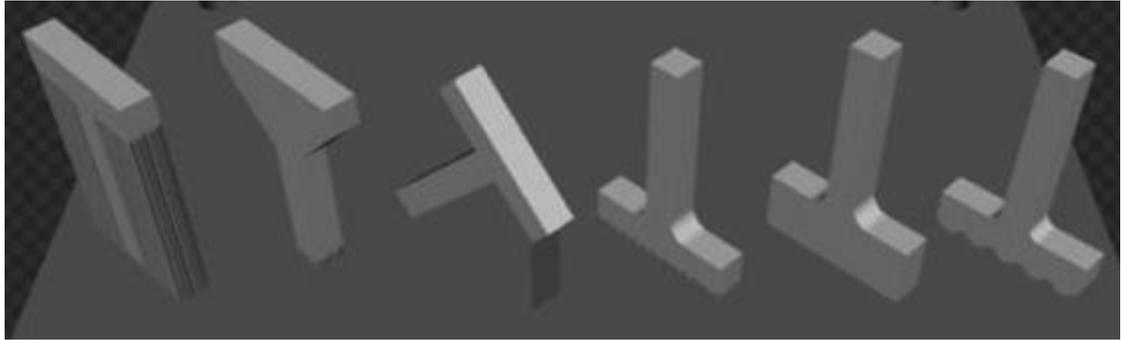


Figura 15 Orientando diversamente il pezzo, si può ridurre il volume dei supporti da realizzare [14]

1.4 Stampa 3D su superfici non piane

Per stampa su superfici curve o *Curved-Layer AM (CLAM)* si intendono dei processi di AM nei quali il materiale viene depositato lungo la curvatura locale della parte da realizzare, di conseguenza gli strati possono avere una certa curvatura così come la superficie su cui si appoggia il primo strato. Alcuni processi CLAM sono anche capaci di realizzare strati di spessore variabile.



Figura 16 deposizione di strati su superficie curva [16]



Figura 17 pannello prefabbricato in cemento realizzato con 3DCP [16]

1.4.1 Vantaggi dei processi di stampa su superfici curve

Senza il vincolo di depositare il materiale su strati piani orizzontali, le superfici curve possono essere realizzate direttamente tramite un unico strato eliminando l'effetto *stair-step*, di conseguenza si migliora la finitura superficiale riducendo allo stesso tempo la necessità di *post-processing*. Contemporaneamente, si minimizzano le strutture di supporto realizzando componenti riutilizzabili come base di stampa a superficie curva e potendo orientare i pezzi in modo ottimale rispetto alla direzione verticale, lungo la quale agisce la gravità che farebbe collassare gli strati orizzontali o quasi orizzontali, e quindi si ottengono tempi minori per la realizzazione dei supporti. Con il CLAM si possono fabbricare parti dalle forme molto complesse a basso costo unitario per piccoli lotti, come nel caso dell'edilizia, in cui il *Curved-Layer 3D Concrete Printing* permette di evitare l'utilizzo di stampi per pannelli prefabbricati [16].



Figura 18 Differenza di finitura superficiale fra elementi stampati con strati piani e con CLAM [13]

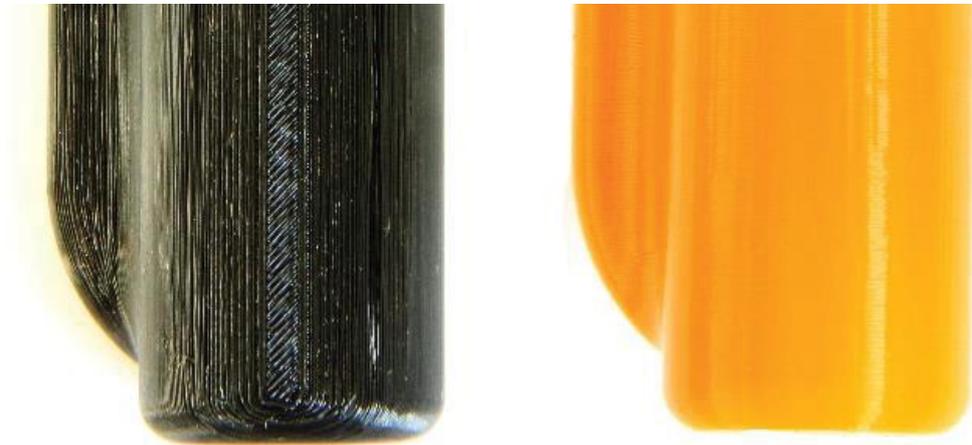


Figura 19 Si può notare la stratificazione del componente nero, gli strati si mostrano paralleli al piano di questa pagina [13]

Il CLAM permette di ottenere un risparmio in termini di lavorazioni di finitura e operazioni di rimozione dei supporti, di tempi di fabbricazione, del consumo di materiale e quindi di costo unitario del processo, migliorando allo stesso tempo l'accuratezza dimensionale e la qualità dei prodotti.

1.4.2 Vantaggi del CLAM: comportamento meccanico dei prodotti

Oltre al miglioramento dei processi rispetto alle tecnologie tradizionali di AM, il CLAM permette di ottenere prodotti più performanti. Infatti, non avendo più il limite di stampare solo su due dimensioni, si ha la possibilità di realizzare dei percorsi di stampa

su tre dimensioni orientando i filamenti lungo la direzione su cui agiranno gli sforzi, migliorando la resistenza meccanica dei pezzi.

Il pezzo può essere prodotto direttamente nella sua forma finale, evitando successive deformazioni che generano tensioni residue; questo aspetto è particolarmente utile nel caso della stampa di strutture auxetiche che vedrebbero le loro proprietà ridotte a seguito di una deformazione plastica [17]. Con il CLAM si ottiene anche una migliore adesione fra gli strati depositati che conferisce maggiore resistenza al pezzo, in quanto si hanno meno vuoti e un'area di contatto maggiore rispetto alle parti prodotte tramite stampa su superfici piane.

1.4.3 Tecnologie CLAM sviluppate

Non tutti i processi additivi possono essere sviluppati in ambito CLAM per via delle limitazioni tecnologiche che si hanno attualmente. Nei processi di fusione su letto di polveri (*powder bed fusion*) e a getto di legante (*binder jetting*) il materiale può essere aggiunto solo per strati orizzontali a causa della gravità che farebbe scorrere le polveri verso il basso, impedendo una deposizione stabile su superfici non orizzontali. Lo stesso discorso vale per il getto di materiale (*material jetting*), nel quale le gocce devono essere depositate su una superficie orizzontale affinché rimangano nella stessa posizione. Per i processi di fotopolimerizzazione in vasca l'applicazione del CLAM sarebbe teoricamente possibile ma risulta attualmente complicato da sviluppare e non sono stati trovati sviluppi in questo senso.

I primi studi sulla stampa su superfici curve sono stati fatti negli anni '90 con il *Laminated Object Manufacturing* (LOM). Kalmanovich et Al. ha implementato l'hardware e il software del LOM tradizionale in modo da poter depositare, laminare e tagliare i fogli di materiale aggiunto su superfici curve. Per fare questo è stato necessario modificare la parte meccanica, elettrica e il software dei sistemi LOM esistenti [18]. Klosterman et Al. ha successivamente realizzato un sistema *Curved-Layer* LOM per stampare dei compositi a matrice ceramica rinforzati con fibre di vetro, dimostrando la bontà della soluzione scelta in termini di stair-step effect, velocità di stampa aumentata, riduzione degli scarti, estrazione facilitata e possibilità di mantenere le fibre lungo la curvatura di stampa [19]. Per questa tecnologia è necessario un supporto con la curvatura desiderata che faccia da base per depositare il primo strato di materiale. La *Curved-*

Layer LOM è nata dalla necessità di fabbricare componenti fibro-rinforzati, come gusci di spessore ridotto e membrane, in cui la continuità delle fibre lungo gli strati curvi ed il conseguente comportamento meccanico ideale sono aspetti critici [19].

I processi ad estrusione di materiale si stanno dimostrando particolarmente versatili nella stampa su superfici curve e permettono di lavorare materiali diversi come i polimeri termoplastici, ceramici, compositi e impasti a base di polveri metalliche. Lo sviluppo di questi processi nella direzione del CLAM parte alla fine degli anni '00 con studi che riguardavano la generazione dei percorsi di stampa per il *Curved-Layer* FDM (CLFDM) [20]. Successivamente questi studi si sono replicati anche per il *Fused Filament Formation* (FFF) [21], il *Fused Layer Manufacturing* (FLM) ed il 3D Concrete Printing (3DCP) [16] su superfici curve. Chen et Al. hanno sviluppato ulteriormente il CLFDM in un processo a strati di spessore variabile, che eliminerebbe del tutto l'effetto *stair-step* nella stampa di gusci di spessore ridotto [22]. Attualmente (2020) esistono già in commercio macchine per *Curved-Layer* FDM (CLFDM) e *Curved-Layer* FFF (CLFFF) adatte alla lavorazione di polimeri termoplastici.

La deposizione diretta di energia, o *Direct Energy Deposition* (DED), è attualmente l'unica famiglia di processi AM a più gradi di libertà in grado di processare materiali metallici sia sotto forma di polveri che di filo [23]. La DED si rivela versatile nella stampa su superfici non piane, in particolare per la riparazione di componenti ad alta tecnologia o di grandi dimensioni, per la modifica della geometria di parti esistenti e per la stampa di rivestimenti protettivi; è inoltre in grado di produrre componenti con materiali *functionally-graded*.

Il primo processo ad essere commercializzato è stato il *Direct Metal Deposition* (DMD) con il nome commerciale di *Laser Engineered Net Shaping* (LENS) ed è disponibile anche con macchine a più di 3 assi. Un altro processo è il *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM) [7] [8], anche questo è facilmente applicabile con macchina a più gradi di libertà. Insieme ai processi ad estrusione, questi sono quelli che garantiscono il miglior rendimento in termini di consumo di materiale in quanto vanno a depositare solo il volume necessario per fabbricare la geometria di input.

Esistono anche dei processi ibridi che combinano il CLAM con le lavorazioni per asportazione di materiale [24] [25] [26], che in questo caso è utile chiamare con *Manifattura Sottrattiva* o *Subtractive Manufacturing* (SM) in opposizione all'Additive

Manufacturing. Si basano sui processi ibridi che integrano due tecnologie opposte, manifattura additiva e manifattura sottrattiva, in un'unica piattaforma capace di sostituire la testina di stampa con degli utensili per l'asportazione di truciolo. Questa soluzione permette di coniugare i vantaggi dell'AM, come il ridotto spreco di materiale e la capacità di realizzare geometrie molto complesse, con la finitura superficiale tipica delle lavorazioni per asportazione di truciolo ed un ridotto consumo degli utensili. Attualmente questa tecnologia è ancora poco sviluppata, soprattutto in ambito CLAM.

1.4.4 *Multi-Axis AM (MAAM) per la stampa ad estrusione di materiale*

Nei processi di Additive Manufacturing a strati orizzontali sono sufficienti 3 gradi di libertà per il controllo della lavorazione, ovvero due per la stampa sul piano (posizione x-y dell'estrusore o del raggio incidente, nel caso di processi a deposizione di energia) ed uno per lo spostamento lungo la direzione normale al piano (altezza z). Nel caso di processi ad estrusione di materiale questo si traduce nella necessità di una macchina a 2,5 assi o 3 assi.

Per stampare su superfici non piane invece è preferibile poter ruotare l'estrusore in modo che sia sempre in direzione normale rispetto alla superficie, in modo da non interferire con gli strati depositati in precedenza e poter stampare superfici ad elevata curvatura. Infatti, utilizzando una stampante a 3 assi, si ha il rischio di raschiatura ed esfoliazione dovuti al contatto tra testina di stampa e strato precedentemente depositato [27]. Questo richiede un controllo su almeno 4 assi, che nella pratica diventano 5 assi per poter lavorare su superfici con curvatura lungo x e y. Inoltre, maggiore è il numero di assi della macchina, minore sarà la necessità di riposizionare il pezzo, eliminando eventuali errori ed aumentando l'accuratezza dimensionale [24].

I gradi di libertà della macchina si possono suddividere fra testina e base di stampa, ottenendo soluzioni del tipo $n + m$, in cui n è il numero di gradi di libertà della testina di stampa e m è il numero dei gradi di libertà della base di stampa. Tutte le soluzioni sviluppate prevedono almeno 3 gradi di libertà per l'estrusore, mentre la mobilità della base è facoltativa e non supera mai i 2 gradi di libertà. Le soluzioni implementate sono riassunte in Tabella 1.

Tabella 1 Riassunto delle tecnologie CLAM sviluppate sulla base di processi additivi tradizionali

Anno	Tecnologia		Prodotto	
	Sigla	Assi	Materiale	Geometria
1999	LOM	3+1	SiC e SiC/SiC	Shell
2015	FDM	6	ABS	linea
2016	3DCP	3	cemento	Shell
2017	FDM	7	PLA	3D
2017	DMD	8	AISI 431 L HC	cilindrico
2017	FDM	6	PLA	3D e shell
2018	FDM	3	Z-ultrat	Shell
2018	FDM+CNC	6	PLA (ABS)	3D
2019	FDM	6	PLA	Shell
2019	FDM	3+2	termoplastico	3D

I bracci robotici hanno mostrato problemi di oscillazione a causa della bassa rigidità rispetto alla necessaria precisione nell'estrusione, per cui serve una bassa velocità di estrusione.

1.4.5 Materiali per CLAM

Nell'AM in generale, processi e materiali sono strettamente legati, tanto che sono solitamente sviluppati in modo specifico per il processo a cui sono destinati. Il CLAM pone ulteriori limiti all'utilizzo dei materiali, primo fra tutti la gravità che impedisce un adeguato deposito dei materiali meno viscosi. Qui di seguito vengono elencati per famiglia, focalizzando l'attenzione sui metalli che saranno oggetto di questo studio, mentre i processi si intendono tutti nelle rispettive varianti a superfici curve.

- **Polimeri.** Vengono utilizzati per i processi ad estrusione sia i polimeri termoplastici che i termoindurenti. I più comuni sono l'ABS e il PLA, che trovano applicazione per l'FDM, di cui rappresentano la materia prima più diffusa, ma anche per il FFF, FLM e i processi ibridi ad estrusione combinati con lavorazioni per asportazione di materiale. Per la sperimentazione del CLFDM sono stati utilizzati anche un TPE (elastomero termoplastico), termoplastici commercializzati dai produttori di

stampanti FDM come lo Z-Ultrat e compositi a matrice polimerica. Per quanto riguarda i polimeri termoindurenti, non si sono ancora trovati casi di applicazione nel CLAM propriamente detto; è però da notare anche l'esperienza di Laarman et Al. in cui è stato utilizzato un robot ABB 2400 per realizzare una struttura con una resina bicomponente appositamente sviluppata capace di indurirsi immediatamente dopo l'estrusione [28], superando la necessità di supporti e di fabbricazione per strati per cui non si può parlare propriamente di CLAM ma di *Anti-Gravity AM*.

- **Ceramici.** Sono materiali che sotto forma di verde hanno ottime proprietà reologiche e ottima lavorabilità, per cui si prestano bene all'AM, compresa la stampa su superfici curve. Sono stati i primi materiali ad essere applicati nel CLAM, quando sono stati utilizzati dei fogli compositi a matrice ceramica per lo sviluppo del LOM su superfici curve. Un'altra applicazione dei ceramici sono i processi ad estrusione per i quali sono fatti studi sulla fabbricazione di parti in cemento di grandi dimensioni.
- **Metalli.** L'applicazione dei metalli nel CLAM attualmente è limitata ai soli processi DED. Questa tecnologia permette di ottenere parti molto dense con una buona aderenza fra gli strati e con microstruttura a gradiente funzionale o multimateriale. Si hanno comunque poche porosità dovute ai gas intrappolati ma la fusione parziale di alcune particelle di polvere, la scarsa finitura superficiale e la scarsa accuratezza dimensionale costituiscono un limite di questi processi. Nel caso del WAAM va anche considerato il fenomeno del *humping*, che consiste nella formazione di protuberanze periodiche a forma di goccia lungo i depositi di saldatura e quindi penalizza maggiormente la qualità dei prodotti [8].

Il DMD si presta bene per la fabbricazione di componenti geometricamente complessi per cui è necessario l'utilizzo di superleghe come Inconel 625 e Nitinol, per cui lo svantaggio economico di fornire la materia prima sotto forma di polvere è minore rispetto alle leghe metalliche meno costose. Oltre alle superleghe appena nominate, per il DMD sono stati utilizzati anche acciai inossidabili quali AISI 431L e AISI 316L, acciai per utensili, leghe di alluminio e Ti6Al4V.

Per il WAAM si possono invece utilizzare materiali più economici e già presenti da molto tempo sul mercato come i materiali di apporto per la saldatura a filo, infatti è utilizzato un filo di acciaio al carbonio ER70S-6.

Tabella 2 Schema sintetico dei materiali stampabili con tecnologie CLAM e non

Materiali	Tecnologia	Osservazioni
Polimeri termoplastici	Processi ad estrusione di materiale <ul style="list-style-type: none"> • Fused deposition Modeling (FDM), • Fused Filament Fabrication (FFF), • Robocasting, Laminated Object Manufacturing (LOM)	Anche CLAM
	Getto di materiale, Selective Laser Melting (SLM)	Non permettono il CLAM
Polimeri termoindurenti	Anti-Gravity Additive Manufacturing (AGAM) [28]	Processo sperimentale che permette il CLAM
	Getto di materiale, Fotopolimerizzazione in vasca	Non permettono il CLAM
Elastomeri	Fused deposition Modeling (FDM), Laminated Object Manufacturing (LOM)	Anche CLAM, nel caso del FDM vengono estrusi elastomeri termoplastici
Ceramici	Robocasting, Laminated Object Manufacturing (LOM)	Anche CLAM
Vetro	Getto di legante	Non permette il CLAM
Metalli e leghe	Processi a deposizione diretta di energia (DED) <ul style="list-style-type: none"> • LENS (DMD), • WAAM Robocasting, Laminated Object Manufacturing (LOM),	Anche CLAM
	Fusione su letto di polveri <ul style="list-style-type: none"> • Selective Laser Sintering (SLS), • Electron Beam Melting (EBM) 	Non permettono il CLAM

1.4.6 Geometrie curve realizzate con tecnologia AM

Il CLAM permette di ottenere la varietà più ampia di geometrie che le tecnologie esistenti possano garantire essendo un'estensione delle capacità già vaste dell'AM tradizionale. È quindi utile prima classificare le geometrie in base alle caratteristiche macroscopiche e topologiche per poi descrivere i risultati ottenuti.

Come geometrie macroscopiche si possono distinguere:

- i solidi (3D),
- i gusci aperti (*shell*),
- i gusci chiusi come cilindri, *stents* ed elementi tubolari a sezione poligonale.

In base alle caratteristiche topologiche possiamo avere geometrie piene, quindi solidi con distribuzione uniforme di materiale, e lattici.

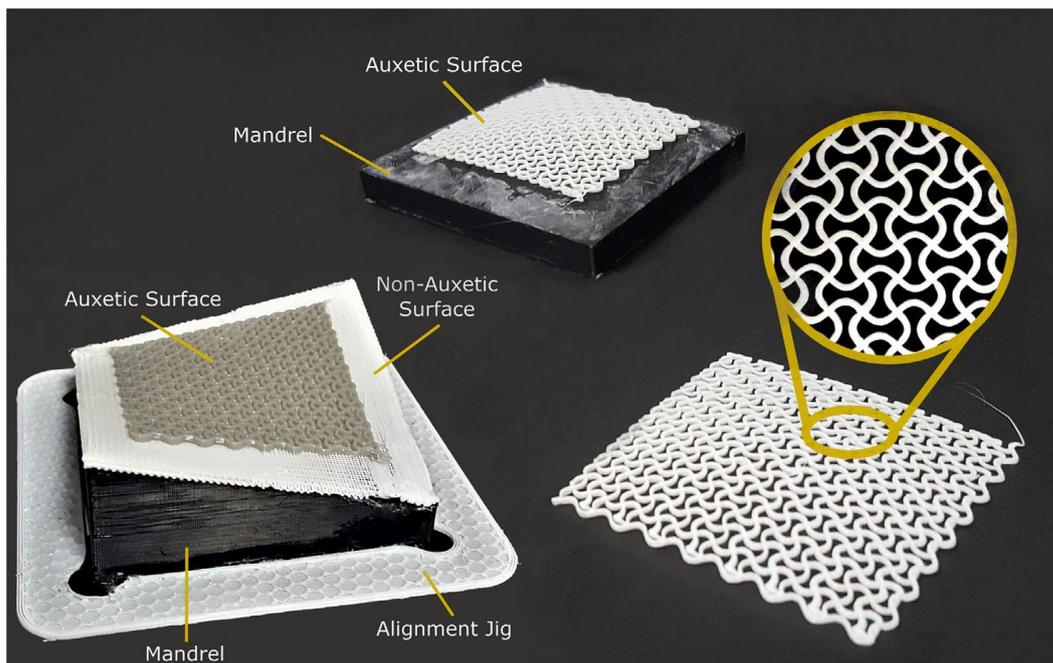
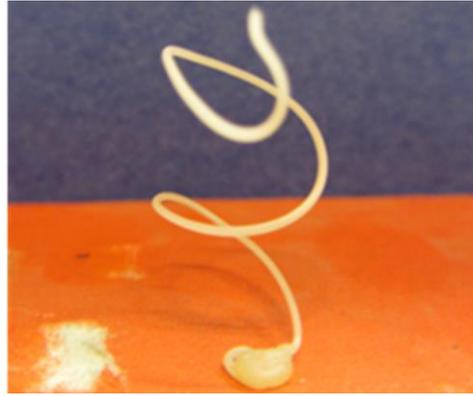


Figura 20 Questo lattice auxetico presenta una geometria a guscio aperto (*shell*) [17]



a)

b)

Figura 21 a) Geometria lineare, b) Realizzazione dell'elemento lineare su superficie curva [29]

Lo sviluppo è partito dalla realizzazione con CLFDM di geometrie di tipo linea, su supporti curvi come flaconi e bottigliette, per valutare la fattibilità dei percorsi dell'estrusore su superfici curve, utilizzando l'ABS come materiale estruso [29]. La linea è l'elemento monodimensionale base della maggior parte delle tecnologie additive, grazie alla quale si possono realizzare prima gli strati in 2D e successivamente i pezzi in 3D.

Per quanto riguarda i componenti pieni, queste si sono rivelate indispensabili per valutare la fattibilità di processi ibridi su superfici curve dato che hanno la necessità di asportare materiale da un volume per essere considerati tali. Sono stati realizzati anche dei pezzi a geometria 3D con FDM, a strati piani per il nucleo interno e CLFDM per la superficie esterna, per valutarne il miglioramento della finitura superficiale, e pezzi realizzati con CLFDM tramite strati di spessore variabile tali da fornire una transizione graduale fra le superfici opposte. Non si sono trovati studi su lattici realizzati con CLAM che possano essere considerati come elementi solidi anziché gusci.

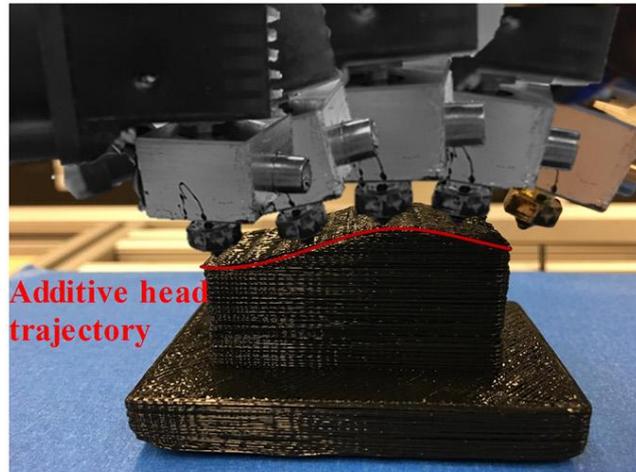


Figura 22 Elemento 3D realizzato con CLFDM [24]

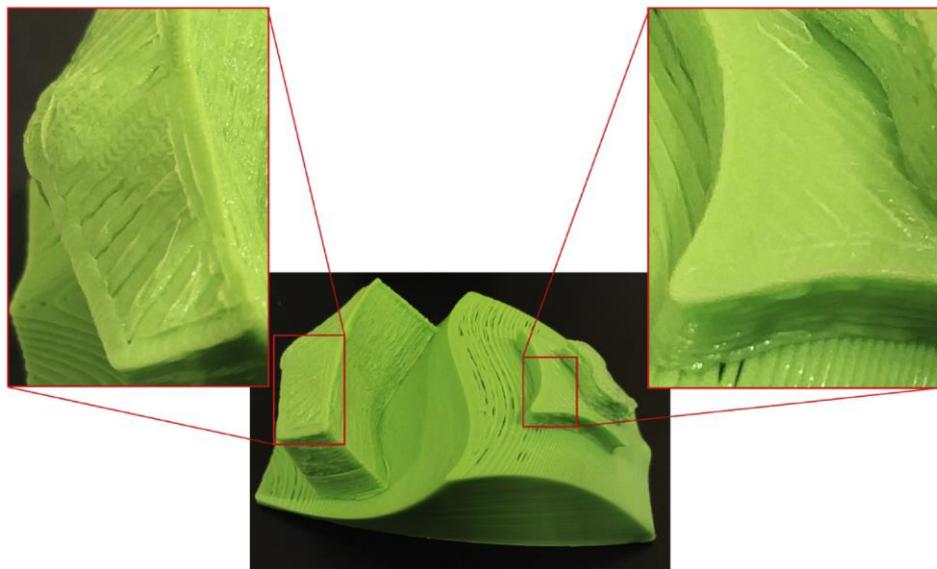


Figura 23 Solido realizzato con stampa su superfici curve [27]

Una parte degli studi successivi sul CLAM sono finalizzati ad ottenere geometrie a guscio aperto, data la necessità di realizzare elementi di questo tipo che se prodotti con l'AM tradizionale darebbero risultati poco soddisfacenti. Sono stati realizzati gusci e membrane partendo da curvature ridotte e distribuzione uniforme di materiale per arrivare alla realizzazione di gusci in lattice con le fibre orientate lungo le linee di sforzo [30], membrane in lattice auxetico [17] e gusci ad elevata curvatura realizzati tramite strati di spessore variabile e *Multi-Axis AM* [22]. A parte lo studio pionieristico sul LOM, tutte le altre geometrie di questo tipo sono state realizzate con processi ad estrusione di materiale, quindi in materiali ceramici o polimerici.

L'unica esperienza di stampa su superfici curve di elementi a geometria cilindrica intrapresa può essere considerata quella di [6] che ha realizzato un'elica con il DMD; in questo studio, il corpo centrale a forma di proiettile è stato stampato per strati piani disposti normalmente all'asse del proiettile, le pale dell'elica sono invece state stampate per superfici curve a partire dal guscio cilindrico del corpo centrale. In questo caso, si è sfruttato un braccio robotico a 6 assi più un piatto mobile a 2 assi come base, con la superficie cilindrica in posizione verticale (Figura 24).



Figura 24 Elica stampata con DMD, le pale sono state stampate per strati curvi a partire dalla superficie cilindrica del corpo centrale [6]

Sarebbe necessaria una caratterizzazione meccanica delle parti stampate con CLAM per poter fare un confronto più completo con la stampa per strati piani e i processi di fabbricazione non additivi, in particolare per quanto riguarda i materiali metallici in quanto oggetto di questo studio. Purtroppo, non sono stati trovati risultati sufficienti in bibliografia, specialmente per quanto riguarda i componenti metallici stampati con il *Curved-Layer DED*.

1.4.7 Applicazioni del CLAM

Il CLAM permette un'espansione della gamma di impieghi tipici dei processi additivi. Considerato il livello di tecnologia più avanzato e le proprietà meccaniche, geometriche e superficiali migliori rispetto ai prodotti della stampa su superfici piane, l'utilizzo di sistemi CLAM per le applicazioni meno avanzate, come la prototipazione rapida, risulterebbe meno efficiente dal punto di vista economico. Tuttavia, nel caso della prototipazione di elementi curvi risulta un processo più rapido e che fornisce prototipi più realistici. Il CLAM si presta invece bene per la stampa di elementi come membrane o gusci curvi, solidi con superfici curve caratterizzate da una buona finitura superficiale e aggiunta di materiale per rivestimenti o riparazioni su oggetti esistenti indipendentemente dalla loro geometria.

- **Architettura e edilizia.** Con lo sviluppo di tecniche CLAM per la stampa di oggetti di grandi dimensioni come il *Curved-Layer* 3DCP si apre la possibilità di costruire edifici dall'architettura innovativa sfruttando componenti edili personalizzati, unici o in piccole serie, e a costo contenuto, come pannelli per rivestimenti a geometria libera e decorazioni. Utilizzando stampanti per CLAM trasportabili su camion o container è addirittura possibile la realizzazione in cantiere di questi componenti, con l'enorme vantaggio della riduzione dei tempi di costruzione e la possibilità di correggere eventuali errori di progettazione realizzando al momento i pezzi adatti.
- **Biomedicale.** Il CLAM permette di realizzare strutture porose con superfici curve, e può essere sfruttato per la realizzazione di protesi ossee. La porosità permette una migliore integrazione fra protesi e tessuti circostanti, mentre la stampa su superfici curve garantisce un comportamento meccanico migliore ed una durata maggiore della protesi.
- **Design e gioielleria.** Nel campo del design, il CLAM sfrutta il vantaggio di avere la maggiore flessibilità geometrica rispetto al resto dei processi esistenti per cui è possibile concretizzare praticamente qualsiasi tipo di forma il designer abbia in mente in modo veloce, economico e ripetuto anche per piccole serie. La migliore finitura superficiale inoltre garantisce una maggiore qualità estetica dei prodotti, molto importante in questo settore. Processi su superfici curve come il DEM e il *Curved-Layer* DIW permettono anche la realizzazione di oggetti con metalli preziosi per cui trovano uno sbocco interessante per la gioielleria.

- **Meccanica dei fluidi.** La realizzazione di componenti con profili fluidodinamici come pale per pompe, turbine ed eliche viene attualmente affidata alle lavorazioni per asportazione, molto lente, costose e con un elevato spreco di materiale. Con il CLAM, la realizzazione di componenti ingegneristici di questo tipo viene notevolmente velocizzata e permetterebbe, previo trattamento termico adatto, di ottenere proprietà simili a quelle realizzate in modo tradizionale per una grande varietà di applicazioni in ambito aerospaziale, automotive, elettrodomestici, energia, militare, nautica e tanti altri.
- **Rivestimenti.** Potendo depositare del materiale lungo una superficie curva, il CLAM può essere sfruttato per realizzare rivestimenti e film protettivi ma anche rivestimenti estetici. Il DED è attualmente utilizzato per depositare superfici protettive su componenti esistenti, mentre con il CLFDM si possono depositare pellicole polimeriche protettive.

CAPITOLO 2

Materiali auxetici

2.1 Materiali auxetici: definizione

L'esperienza comune ci insegna che quando applichiamo un carico di trazione monoassiale su un materiale qualsiasi, questo risponderà alla sollecitazione allungandosi in direzione dello sforzo e restringendosi in direzione trasversale; se invece lo comprimiamo, questo risponderà accorciandosi in direzione dello sforzo ed espandendosi in direzione trasversale. Esistono però dei materiali che hanno un comportamento diverso, come il sughero che tende deformarsi longitudinalmente senza però variare le sue dimensioni in direzione laterale, oppure come i materiali auxetici che presentano un comportamento opposto rispetto a quello della maggior parte dei materiali conosciuti. Il termine auxetico deriva dal greco αὐξητικός (auxetikos), col significato di “che tende ad aumentare”. Gli auxetici sono metamateriali che hanno la particolare proprietà di espandersi in direzione trasversale quando sono sottoposti a trazione, mentre si restringono lateralmente se sottoposti a compressione (Figura 25).

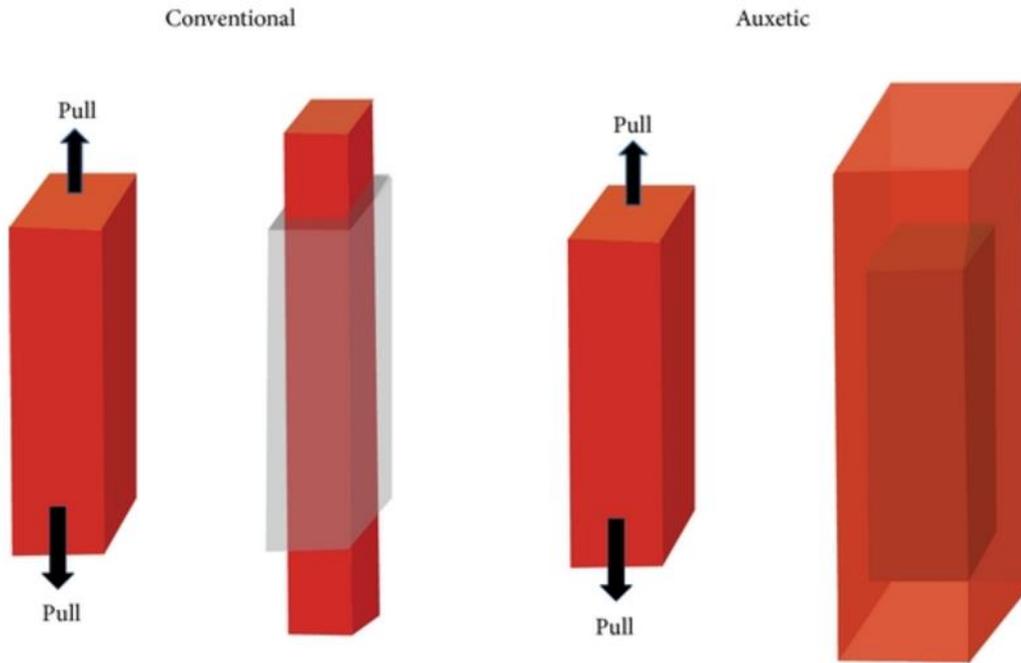


Figura 25 Illustrazione del comportamento auxetico confrontato con quello dei materiali comuni [31]

Con il termine metamateriali si indicano dei materiali creati artificialmente per ottenere proprietà che non si trovano in natura, cioè che vanno “oltre” le caratteristiche dei materiali naturali. In tutti i materiali auxetici è necessaria infatti una microstruttura che conferisca la particolare proprietà precedentemente descritta attraverso appositi meccanismi di deformazione che sfruttano l’incernieramento, la rotazione, la flessione o lo stiramento delle travi, e così via. Questi meccanismi di deformazione possono agire a qualsiasi scala, variando da dimensioni nanometriche a macroscopiche, per cui il rapporto di Poisson ν è una proprietà indipendente dalle dimensioni [31]. Per capire meglio questo meccanismo si può confrontare la risposta di una struttura a nido d’api con un’altra derivata da essa, nella quale le celle non sono più esagonali ma hanno i lati rientranti, sottoposte entrambi ad un carico di trazione, come in Figura 26.

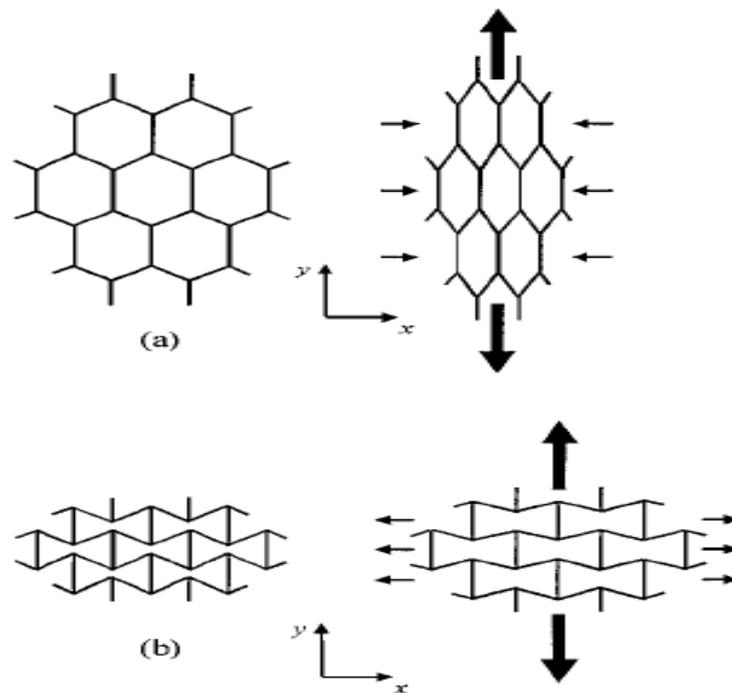


Figura 26 a) Deformazione convenzionale di una struttura a nido d'ape con pareti della cella incernierate in risposta ad un carico di trazione applicato nella direzione y , che porta ad un rapporto di Poisson positivo (non auxetico), si ha un restringimento lungo x . b) Deformazione di una struttura a nido d'ape rientrante con un rapporto di Poisson negativo (auxetico), sotto trazione lungo y tende ad espandersi in direzione x [32].

2.2 Proprietà dei materiali auxetici

La proprietà di deformarsi in modo concorde lungo tutte le direzioni è descritta da un rapporto di Poisson negativo. Secondo Greaves et Al. [33] il rapporto di Poisson è un parametro fondamentale per “comparare la resistenza di un materiale a deformarsi sotto un certo carico piuttosto che alterare il suo volume”. Il rapporto di Poisson è una delle costanti fondamentali che descrivono la deformazione meccanica di un materiale, insieme al modulo di Young E , al modulo elastico tangenziale G e al modulo di compressione K . Si calcola come segue:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \quad (1).$$

Con ε_t deformazione trasversale e ε_l deformazione longitudinale, rispetto alla direzione dello sforzo monoassiale applicato. Considerando la deformazione positiva in caso di allungamento, si ha che la maggior parte dei materiali ha un rapporto ν positivo, mentre

per gli auxetici ν è negativo. Conoscendo il modulo di Young e il rapporto di Poisson si possono scrivere le seguenti relazioni per i materiali isotropi:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (3).$$

Dalle equazioni (2) e (3) si ricava che i valori del rapporto di Poisson devono essere compresi nell'intervallo $-1 < \nu < 0,5$. In particolare, ν può arrivare fino a 0,5 per i materiali più deformabili come gli elastomeri, mentre per i polimeri, i metalli e i ceramici varia fra 0,25 e 0,35; valori tendenti a 0 sono invece tipici dei vetri; nel caso degli auxetici isotropi può arrivare a -1. Questo rapporto può andare oltre all'intervallo di $-1 < \nu < 0,5$ nel caso di auxetici anisotropi, per cui si è arrivati a $\nu = -14$ per un PTFE anisotropo espanso [33].

Tuttavia, per uno stesso materiale si ha che il valore di ν varia con il livello e la velocità di deformazione, e questa variabilità dipende anche dal tipo di struttura interna del materiale, per cui alcuni auxetici possono raggiungere livelli positivi di ν per grandi deformazioni a causa del sopraggiungere di fenomeni di instabilità meccanica, perdendo quindi la loro caratteristica peculiare. Un esempio è dato da una struttura di tipo *missing-rib*, una struttura che conferisce auxeticità al materiale per livelli di deformazione fino al 20% e *strain-rate* elevati, mentre ad alti livelli di deformazione quasi-statica dovuta a compressione si ha un'eccessiva rotazione in corrispondenza dei punti di incernieramento che porta ad un generale fenomeno di instabilità, portando il rapporto di Poisson a 0,2 [34].

Dall'espressione (2) si può immediatamente ricavare l'aumento del modulo elastico tangenziale e quindi una maggiore resistenza a carichi tangenziali rispetto ai materiali con ν positivo. Un'altra caratteristica meccanica degli auxetici è la maggiore resistenza alla propagazione delle cricche. Gli auxetici presentano anche maggiore durezza, dal momento che una contrazione assiale dovuta alla penetrazione di un oggetto duro provoca anche la contrazione laterale [35], con aumento locale della densità e quindi della resistenza alla penetrazione secondo il meccanismo illustrato in Figura 27

Meccanismo che porta all'aumento di durezza nei materiali auxetici, si ha un flusso di materiale verso la zona di compressione che ne aumenta la densità

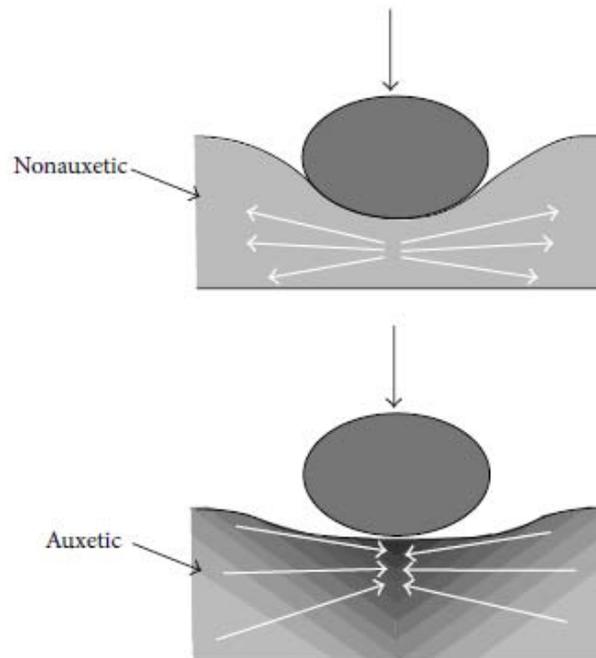


Figura 27 Meccanismo che porta all'aumento di durezza nei materiali auxetici, si ha un flusso di materiale verso la zona di compressione che ne aumenta la densità [32]

Una caratteristica particolare dei materiali con ν negativo è quello di avere un comportamento *sinclastico*, ovvero che tende naturalmente a formare superfici a cupola, a differenza degli altri materiali che hanno un comportamento *anticlastico*, ovvero tendono a formare naturalmente delle superfici a forma di sella [31] (Figura 28). Questo aspetto permette di creare membrane e gusci che hanno una migliore aderenza ad alcune superfici curve.

Nel caso di membrane e gusci perfettamente auxetici le tensioni dovute alla flessione sono minime e vengono distribuite in modo più uniforme lungo la superficie. I materiali auxetici hanno anche un'ottima capacità di smorzare le vibrazioni, soprattutto a medie ed alte frequenze, e ad assorbire gli urti grazie al maggiore assorbimento di energia durante la deformazione [17], proprietà dalle interessanti possibilità di applicazione in ambito militare e civile.

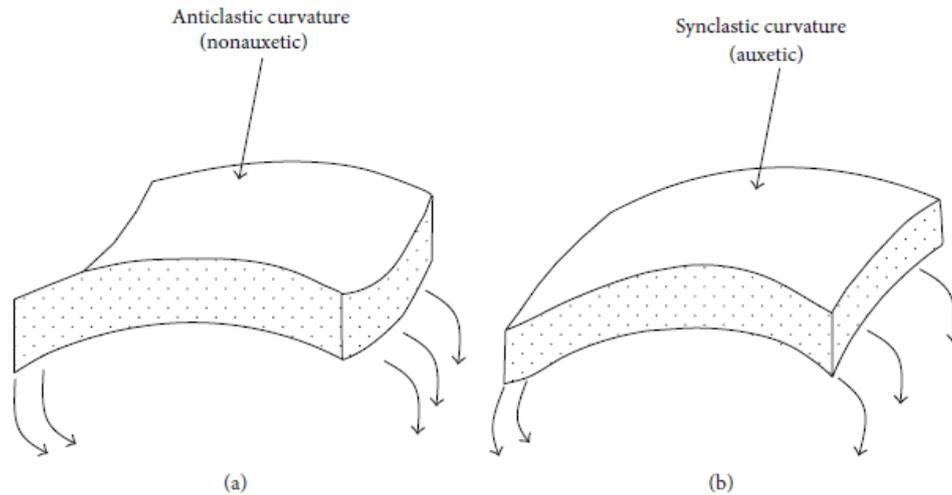


Figura 28 Illustrazione schematica del comportamento anticlastico (a) e sinclastico (b) dei materiali [32]

2.3 Tipologie di strutture auxetiche

L'auxeticità di alcuni materiali presenti in natura come alcuni tessuti organici di animali, minerali come l' α -Cristobalite (SiO_2), pirite (FeS_2) e alcuni tipi di zeoliti è tuttora controversa [35], per cui è necessario restringere la trattazione ai materiali artificiali. Questi materiali possono essere schiume polimeriche o metalliche, solidi cellulari o compositi fibro-rinforzati anisotropi. Le strutture cellulari di questi metamateriali si possono classificare come strutture rientranti, strutture chirali, strutture rotazionali semirigide, strutture a fogli piegati e perforati e altre strutture miste.

2.3.1 Strutture rientranti

Le strutture rientranti hanno la caratteristica di essere composte da celle che presentano angoli interni maggiori di 180° , chiamati angoli rientranti. Strutture di questo tipo sono la struttura a nido d'api rientrante e la *missing-rib* a cui si è accennato precedentemente; a queste si possono aggiungere un'infinità di geometrie come dimostra la Figura 31. In queste strutture il comportamento auxetico è dato dalla rotazione dei lati diagonali delle celle e dalla traslazione dei lati orizzontali o verticali. Qui il rapporto di Poisson dipende dall'ampiezza degli angoli rientranti [36], che varia con il livello di deformazione, per questo motivo ad alti livelli di estensione o contrazione delle celle il comportamento auxetico può venire meno a causa di un ν positivo.

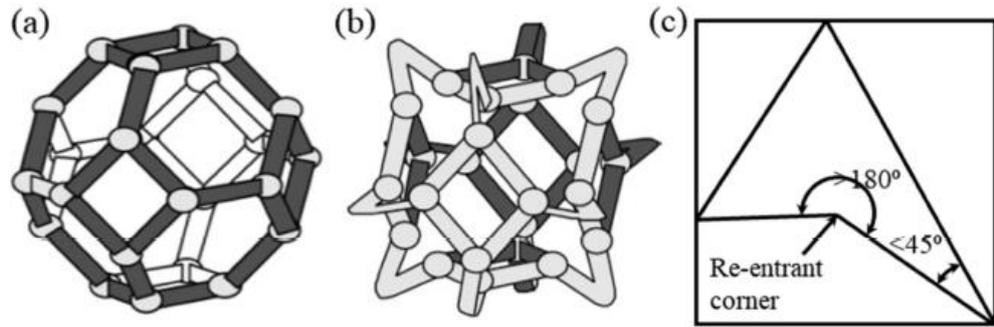


Figura 29 (a) Cella poliedrica convessa, non auxetica; (b) Cella poliedrica rientrante, auxetica; (c) Cella 2D con angolo rientrante, auxetica nel piano [36]

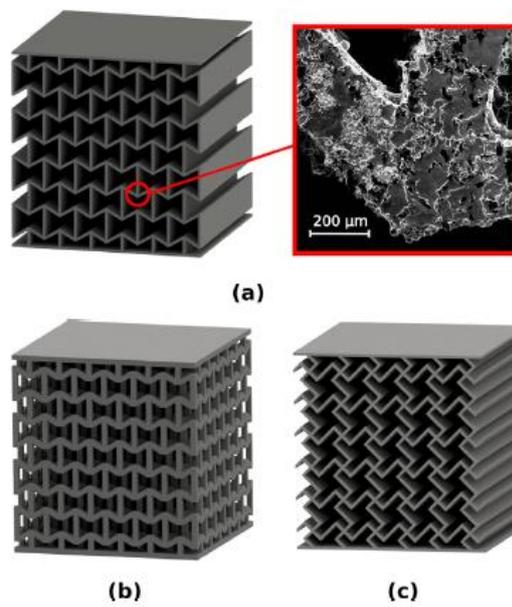


Figura 30 Strutture rientranti stampate con SLS da [34]. (a) Nido d'api rientrante 2D; (b) nido d'api rientrante 3D; (c) missing-rib

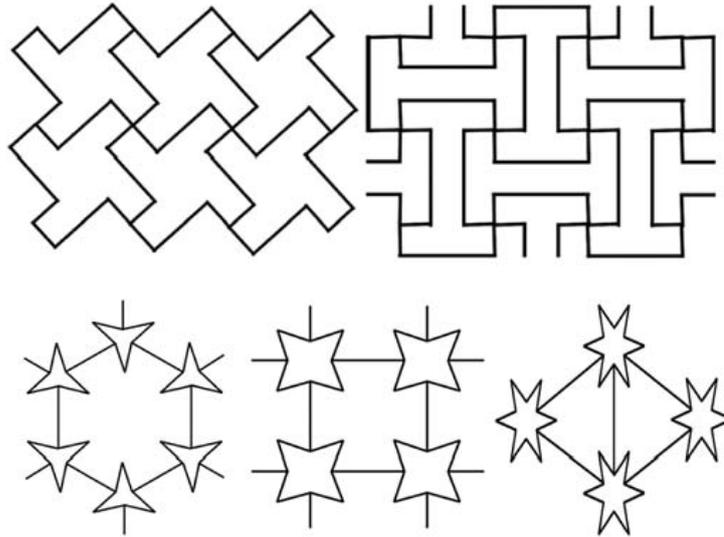


Figura 31 Altri tipi di struttura rientrante [36]

2.3.2 Strutture chirali

Le strutture chirali hanno la particolarità di non essere simmetriche, sono formate da celle cilindriche collegate fra loro da piani tangenti. Simili alle chirali, le antichirali si distinguono per avere celle simmetriche almeno rispetto ad un piano. Chirali bidimensionali possono essere le tri-, tetra- ed esachirali, caratterizzate da una struttura cellulare periodica, mentre le metachirali sono una via di mezzo fra le chirali e le antichirali (Figura 33). È possibile avere anche strutture chirali tridimensionali (Figura 34). Il meccanismo di deformazione si basa sulla rotazione delle celle cilindriche intorno al loro asse, che comporta l'avvolgimento o lo svolgimento dei legamenti che divergono da essi con un rapporto di Poisson che può arrivare a $\nu = -1$. Le strutture chirali periodiche devono rispondere ai vincoli di simmetria rotazionale, per cui con un grado n di simmetria rotazionale si possono avere solo n legamenti collegati alla cella cilindrica, che funge da nodo. In questo modo si possono creare solo 5 tipologie di strutture chirali e antichirali (Figura 32). Nel caso delle strutture antichirali ν dipende dal rapporto fra lunghezza e spessore dei legamenti. Le strutture metachirali sono un compromesso fra le chirali e le antichirali [36].

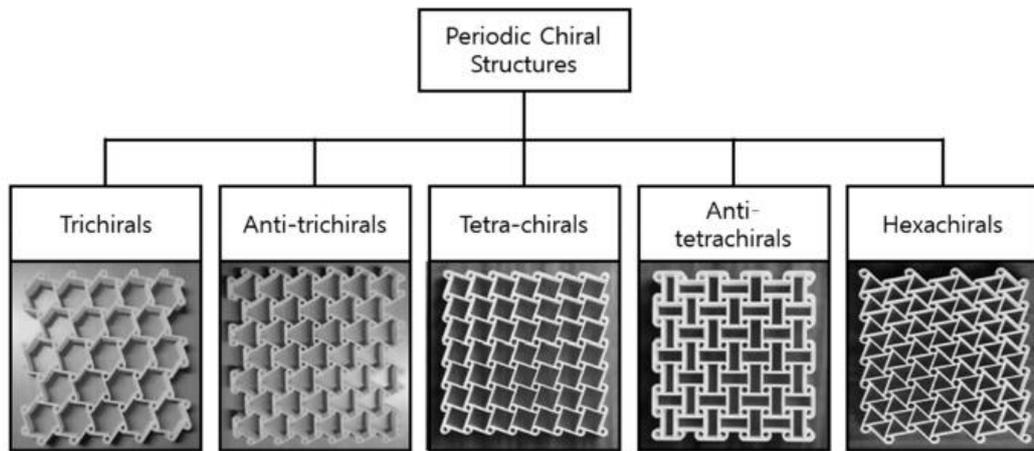


Figura 32 Illustrazione di diverse strutture chirali e antichirali periodiche [36]

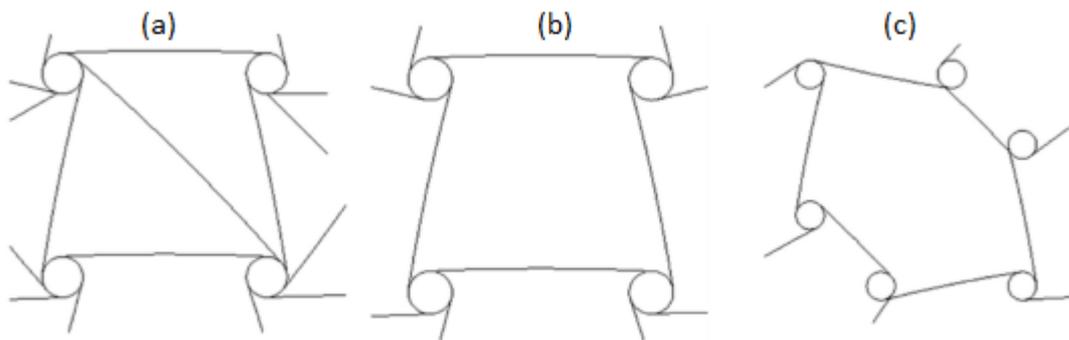


Figura 33 Esempio di strutture metachirali, (a) a sei legamenti, (b) a quattro legamenti, (c) a tre legamenti [36]

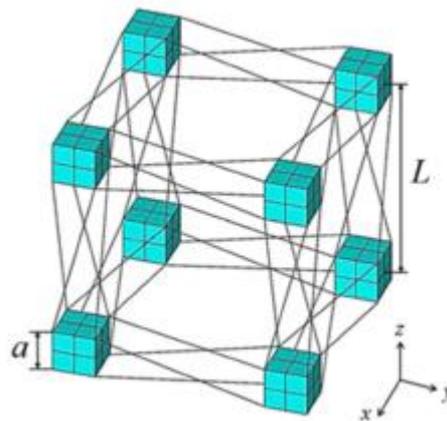


Figura 34 Esempio di cella chirale 3D [36]

2.3.3 Strutture rotazionali semirigide

Le strutture rotazionali sono costituite da poligoni rigidi collegati fra loro attraverso i vertici. Quando agisce un carico, questi poligoni tendono a ruotare intorno ai loro vertici generando un comportamento auxetico. Queste strutture si possono classificare in quadrati, rettangoli, parallelogrammi, rombi e triangoli a seconda della forma dei poligoni di cui sono costituite. Il rapporto di Poisson in queste strutture può variare da $\nu = -1$ a valori positivi a seconda della forma dei poligoni di cui sono costituite, del modo in cui sono collegati fra di loro e dell'angolo fra questi poligoni. Nel caso dei quadrati si ha teoricamente un rapporto costante pari a $\nu = -1$ [36].

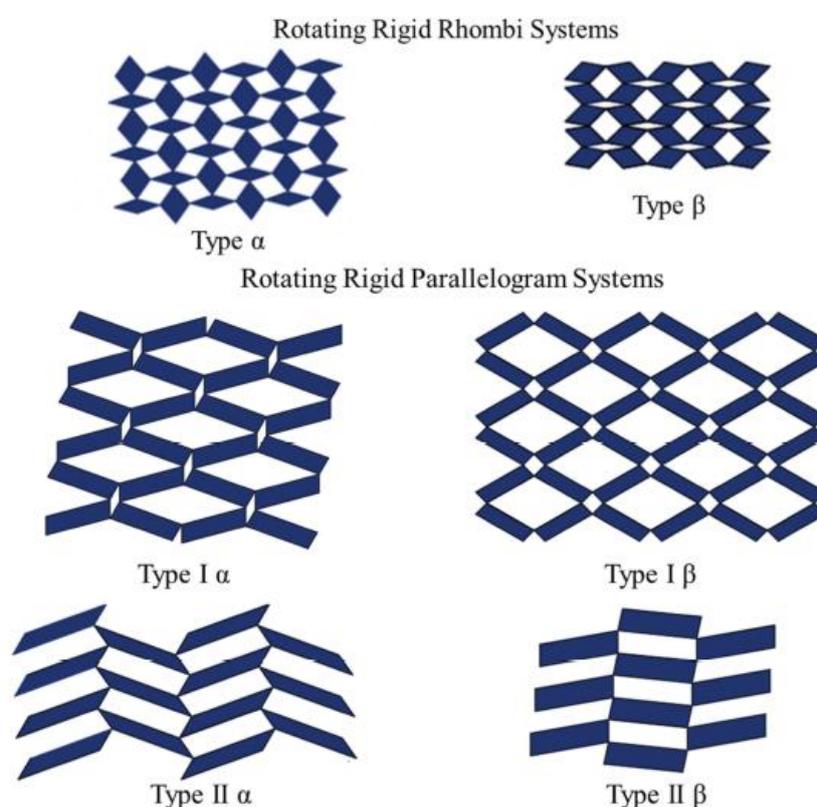


Figura 35 Illustrazione di alcune strutture rotazionali rigide [36]

2.3.4 Strutture a fogli piegati e perforati

Questo tipo di strutture si ispira alle geometrie dell'arte giapponese dell'origami e del kitagami, quest'ultima si differenzia dall'origami per il fatto che i fogli, oltre ad essere piegati, vengono anche ritagliati. Il loro comportamento auxetico è dovuto alle piegature lungo lo spessore e può essere aumentato riducendo l'effetto di ripiegamento dei fogli,

tuttavia un ripiegamento troppo blando può portare ad instabilità durante la fase iniziale delle deformazioni. Altre proprietà interessanti di questo tipo di strutture sono il comportamento meccanico non lineare e un elevato rapporto fra rigidità e densità, per cui possono trovare interessanti applicazioni in ambito aerospaziale (Figura 37) [36].

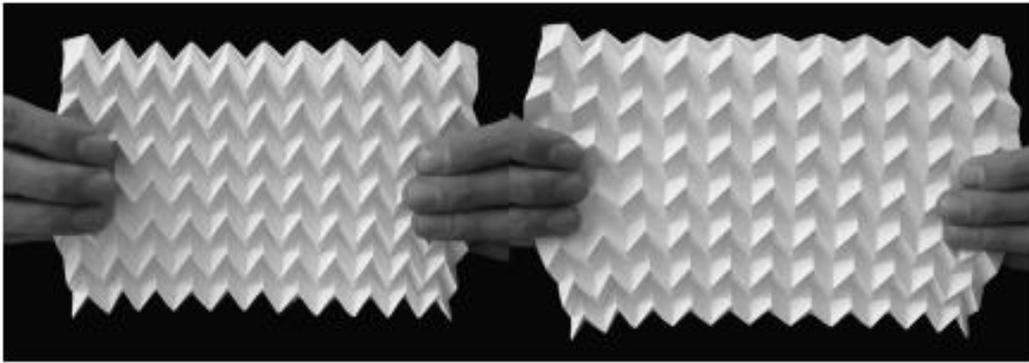


Figura 36 Struttura di tipo origami chiamata Miura Ori che presenta un chiaro comportamento auxetico [37]

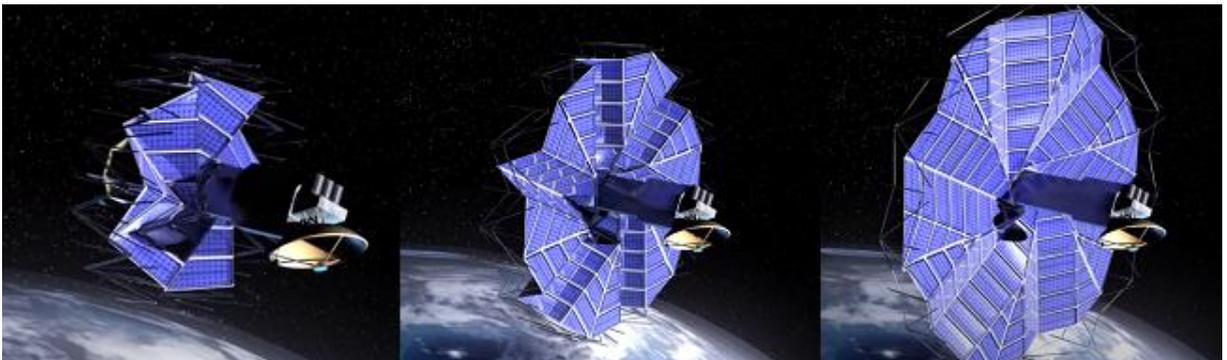


Figura 37 Impiego di una struttura auxetica di tipo origami per ridurre l'ingombro dei pannelli solari di un satellite durante il lancio in orbita. Sequenza di immagini catturate da [38]

2.4 Fabbricazione dei materiali auxetici

I materiali auxetici presentano una struttura interna caratterizzata da un elevato livello di complessità geometrica. La ricerca di processi adatti a realizzare componenti con questi materiali è particolarmente impegnativa in quanto sono necessarie precisione e alta definizione. Con i processi per asportazione come l'elettroerosione è possibile ottenere strutture bidimensionali di ogni tipo, rientranti, chirali, kirigami e solidi rotanti, che però presentano un comportamento auxetico solo su un piano. I processi di deformazione invece sono utili per ottenere lamine corrugate con cui realizzare le

strutture di tipo origami e kirigami, unendo i fogli fra di loro tramite incollaggio o saldobrasatura. È possibile realizzare strutture auxetiche unendo con altri materiali dei fogli di grafene o dei nanotubi di carbonio ottenuti con le tecniche specifiche per questo tipo di materiali. Per realizzare fibre polimeriche auxetiche o tessuti auxetici con una struttura cellulare a scala ridotta esistono tecniche innovative come il *melt electrospinning*, il *melt extrusion* e il 4D printing, quest'ultima consiste nella stampa 3D di strutture capaci di deformarsi successivamente sotto certe condizioni grazie alla particolare microstruttura dei materiali stampati. L'Additive Manufacturing è invece la tecnologia più indicata per la produzione di strutture auxetiche cellulari, come le rientranti e le chirali, per via della flessibilità geometrica che può concedere e per l'ampia gamma di processi di questo tipo capaci di realizzare strutture auxetiche. I processi più utilizzati sono quelli di fusione su letto di polvere, come il SLS e il SLM, mentre per i processi di estrusione, come il FDM e il DIW, si trovano ancora poche applicazioni anche se si stanno sviluppando per questo tipo di applicazioni. Il DIW, in particolare, permetterebbe di ottenere strutture metalliche con una microstruttura più uniforme rispetto alla fusione su letto di polveri, senza difetti dovuti a stress termici e polveri parzialmente fuse.

2.5 Applicazioni dei materiali auxetici

Le particolari proprietà dei materiali auxetici li rendono interessanti per molte applicazioni, in particolare quelle che prediligono, oltre ad un rapporto di Poisson negativo, anche elevata resistenza a taglio, durezza, resistenza alla propagazione di cricche a fatica, elevata resistenza all'impatto, smorzamento delle vibrazioni. Fra i settori in cui gli auxetici vengono sfruttati maggiormente troviamo le attrezzature sportive, biomedicali, sensori e attuatori, tessile e militare. Settori secondari possono essere l'agricoltura, le vernici e, in combinazione con altri materiali, l'impermeabilizzazione [36].

2.5.1 Attrezzature sportive

Il settore delle attrezzature sportive è stato il primo ad impiegare materiali auxetici per via della loro capacità di assorbire gli urti e la loro resistenza a fatica. Nel caso delle calzature sportive queste proprietà si possono tradurre in comfort, sicurezza e durata. Un altro importante impiego è quello dei dispositivi di sicurezza come caschi, guanti e imbottiture, utili per la protezione da impatto ma anche da vibrazioni dannose, per cui

si possono estendere anche all'utilizzo come Dispositivi di Protezione Individuale (DPI).

2.5.2 *Biomedicale*

L'applicazione più diffusa di strutture auxetiche in ambito biomedicale è certamente la produzione di stents utilizzati come dilatatori. Uno stent è un piccolo dispositivo medico comprendente una struttura tubolare a maglie, espandibile, che una volta impiantata funge da impalcatura e mantiene la pervietà luminale di un'arteria stenotica aprendo il tratto ristretto di arteria coronaria [39]. In generale gli stents vengono utilizzati come protesi in tutti gli organi a lume che presentano delle stenosi (restringimenti) o altri tipi di lesioni, per cui si possono differenziare in stents coronarici, esofagei, ureterali, intestinali e così via. Altre applicazioni biomedicali delle strutture auxetiche sono gli anelli per anuloplastica, rivestimenti protesici, placche ossee ortopediche e bende, per le quali il rigonfiamento dovuto alla ferita, premendo sulla benda auxetica, permette il rilascio controllato dei medicinali. L'utilizzo di viti per ossa in materiale auxetico permette un miglior fissaggio alle ossa. Infine, si sta studiando l'uso di strutture auxetiche cave come polmoni meccanici [36].

2.5.3 *Sensori e attuatori*

Nel campo dei sensori, i materiali auxetici vengono utilizzati per realizzare estensimetri e accelerometri e sensori di forza estensimetrici. Gli estensimetri auxetici presentano una sensibilità fino a 24 volte superiore rispetto agli estensimetri convenzionali ed un'estensibilità aumentata del 310%, come per i sensori in ionogel auxetico [40]. I sensori di forza prodotti con materiali auxetici hanno mostrato un aumento della sensibilità del 300% nel caso di un composito a base di nanotubi di carbonio ed un rapporto $\nu = -0,5$. Nella misura delle vibrazioni, gli accelerometri MEMS composti da una membrana auxetica che presenta un'eccellente sensibilità alle pressioni armoniche. In generale, questo tipo di sensori può essere usato per misurare fenomeni meccanici molto blandi per i quali la risoluzione degli strumenti convenzionali non è sufficiente. Un particolare utilizzo degli auxetici nel campo delle misurazioni è come componente per la produzione di sensori igroscopici. Nel campo degli attuatori, gli auxetici vengono utilizzati per la produzione di antenne, idrofoni e attuatori lineari cilindrici a 2 e 4 gradi di libertà. Sono stati proposti anche attuatori cilindrici che producono movimenti circolari e attuatori lineari per strumenti chirurgici, i quali sfruttano entrambi le proprietà auxetiche dei loro componenti.

Sfruttando i vantaggi degli estensimetri e degli accelerometri auxetici, si stanno sviluppando dei sistemi di raccolta di energia che sfruttano le vibrazioni meccaniche e gli urti a cui sono sottoposti per convertire l'energia ricevuta in energia elettrica, questi sistemi vengono chiamati Auxetic cantilever beam energy harvesters (ACBEH) e riescono a produrre oltre 2,5 volte l'energia prodotta da sistemi simili prodotti con materiali non auxetici [36].

2.5.4 Tessile

L'utilizzo di tessuti auxetici è dovuto al loro comfort, capacità di assorbimento di energia, capacità di elevati cambiamenti di volume e resistenza all'usura. I tessuti auxetici possono essere formati da fibre auxetiche o da fibre non auxetiche tessute in modo da formare una struttura auxetica, altri tipi di fibre auxetiche sono il Gore-Tex e alcune fibre di PTFE. Le prime fibre auxetiche erano in polipropilene estruso con un processo modificato in modo da ottenere un rapporto di Poisson negativo. Questi tessuti possono essere impiegati per la produzione di giubbotti antiproiettile e delle cosiddette *blast curtains*, o tende antiesplorazione, tessute in fibre auxetiche che proteggono dagli effetti di un'esplosione catturando eventuali schegge. Il comportamento sinclastico degli auxetici permette di realizzare elementi protettivi come ginocchiere e paragoniti imbottiti con questo tipo di tessuti.

2.5.5 Militare

La capacità di assorbire urti, specie in ambito balistico, ha garantito agli auxetici di trovare un'enorme fetta di mercato nel settore della difesa militare. L'utilizzo di materiali auxetici, spesso insieme ad altri materiali avanzati come l'UHMWPE organizzati in strutture sandwich, ha permesso di ottenere miglioramenti importanti nella realizzazione di fortificazioni militari, tende e pannelli antiesplorazione, giubbotti ed elmi antiproiettile. Grazie alla bassa densità data dalle strutture auxetiche è possibile produrre pneumatici RunFlat ultraleggeri con prestazioni paragonabili a quelli esistenti, inoltre questi pneumatici supportano il sistema di controllo della pressione *central tire inflation systems* (CTIS) presente in molti veicoli fuoristrada.

CAPITOLO 3

Direct Ink Writing di strutture metalliche

3.1 DIW

Il Direct Ink Writing (DIW), chiamato anche Robocasting, è un processo additivo ad estrusione di materiale. A differenza dei più comuni processi di questo tipo come l'FDM, il DIW non si limita solo alla stampa di materiali polimerici, ma si estende anche ai materiali ceramici e ai materiali metallici estrudendo degli inchiostri a base di polveri legate anziché estrudere un filamento di materiale puro riscaldato ad una temperatura prossima a quella di fusione. Infatti, l'estrusione di metalli allo stato semi-solido sarebbe energeticamente costosa e difficilmente realizzabile con la tecnologia attualmente esistente, mentre per i ceramici sarebbe praticamente impossibile viste le loro elevatissime temperature di fusione. Le stampanti per DIW sono inoltre più semplici tecnologicamente, con un consumo di energia minimo ed un costo di acquisto ridotto rispetto al resto delle stampanti 3D dal momento che sono sufficienti un piatto di stampa e un meccanismo che muove l'estrusore all'interno del volume di stampa con i relativi attuatori per effettuare la stampa.

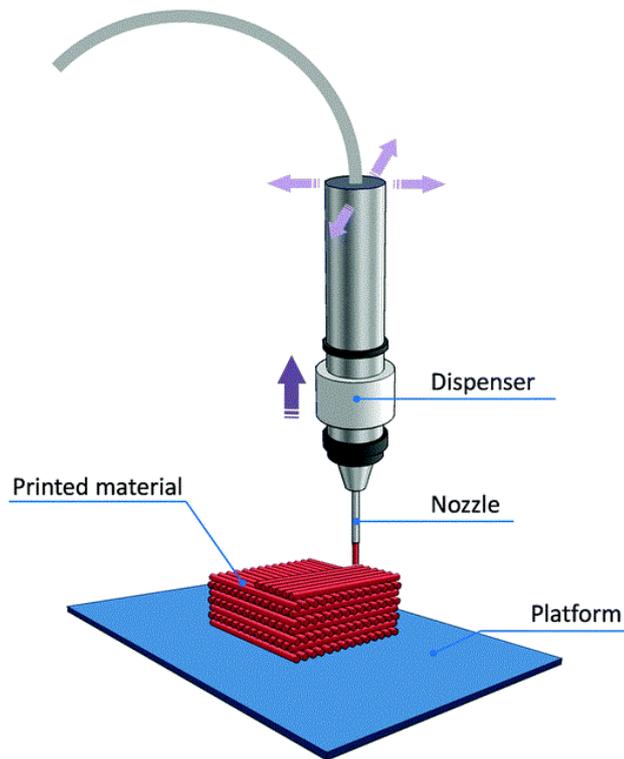


Figura 38 Schema del processo di stampa del Robocasting o DIW. Un dispenser (estrusore) fissato ad un robot si muove lungo un piano estrudendo il materiale strato dopo strato [41]

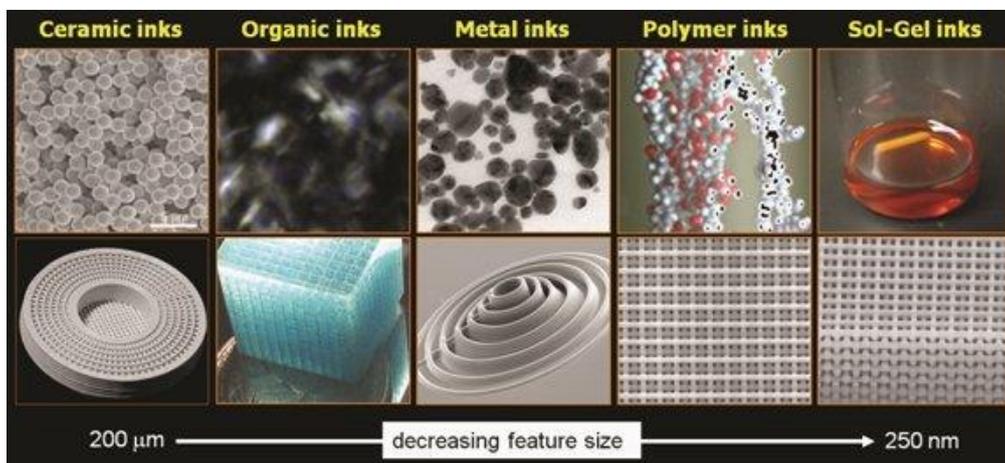


Figura 39 tramite DIW è possibile stampare strutture con features geometriche in scale diverse a seconda del tipo di inchiostro utilizzato [42]

Come tutti i processi additivi, anche il DIW è caratterizzato dalla stessa catena di processo che porta dal modello virtuale al prodotto finito tramite una serie di passaggi

descritta in precedenza. Descrivendo invece la trasformazione del materiale da polvere a prodotto finito, la catena di processo per il DIW si può riassumere nel modo seguente:

1. Preparazione dell'impasto. Questa fase consiste nella miscelazione delle polveri con un legante, composto da un solvente volatile come acqua o alcol con un polimero che fa da collante, e della sua omogeneizzazione fino ad ottenere un inchiostro dalle proprietà reologiche ottimali.
2. Stampa con apparecchiature adatte all'AM che dà luogo ad un verde. Estrudendo l'impasto da un ugello di diametro ridotto si crea un gradiente di pressione che favorisce l'evaporazione del solvente, ottenendo un composito a matrice polimerica e polveri che costituisce un verde dalle proprietà meccaniche estremamente scarse per cui va maneggiato con molta cura.
3. Lavaggio o *debinding*. Il passaggio di *debinding* ha lo scopo di rimuovere il legante portando il verde ad una temperatura tale da bruciare il polimero legante nel caso si voglia ottenere un materiale dalla purezza elevata.
4. Sinterizzazione. Dopo questo passaggio si ottiene un componente con densità e proprietà meccaniche paragonabili a materiali realizzati con processi non additivi. Alla sinterizzazione possono seguire processi di finitura per ottenere la finitura superficiale desiderata.

Questi inchiostri sono accomunati da un comportamento meccanico viscoelastico. Particolare cura deve essere rivolta alla preparazione dell'inchiostro, dal momento che le sue proprietà reologiche sono di fondamentale importanza per la riuscita di questo processo. Il comportamento ideale degli impasti dovrebbe essere pseudoplastico, ovvero dovrebbe avere una viscosità che diminuisce all'aumentare dello *shear rate* per minimizzare la pressione necessaria all'estrusione attraverso ugelli di ridotte dimensioni ed ottenere un filamento che rimanga geometricamente stabile anche dopo il deposito. Più precisamente, la viscosità dell'inchiostro deve essere minima durante l'estrusione e massima immediatamente dopo il deposito. Minimizzando la pressione necessaria all'estrusione del filamento, è possibile procedere riducendo il diametro dell'ugello di estrusione per ottenere un filamento più sottile e di conseguenza migliorare la risoluzione della stampa 3D di questo tipo. Per ottenere le proprietà reologiche ottimali è necessario scegliere, in base al tipo di polveri, il legante da utilizzare e il rapporto di miscelazione ottimale.

Anche la programmazione del percorso macchina è di fondamentale importanza. È necessario un buon coordinamento fra velocità di estrusione, distanza dell'ugello dalla superficie di deposizione e velocità di stampa per ottenere una deposizione precisa, uniforme e stabile. I rischi di un'errata impostazione dei parametri di stampa sono il trascinarsi e l'eventuale rottura del filamento, l'essiccazione precoce o ritardata del materiale estruso, la deposizione fuori dal percorso prestabilito.

3.2 Stato dell'Arte

Al giorno d'oggi il DIW è un processo AM molto diffuso per la stampa dei ceramici, per la quale sono disponibili in commercio diverse stampanti 3D (WASP, Stoneflower3D) con una tecnologia molto semplice e dai costi relativamente contenuti, capaci di realizzare oggetti con ceramici tradizionali come impasti a base di argilla e una risoluzione che arriva al decimo di mm. In questi sistemi si possono avere estrusori a siringa o estrusori a vite continua. Nel caso degli estrusori a siringa, l'inchiostro viene inserito manualmente nella siringa prima della stampa, successivamente viene inserito un pistone e chiuso ermeticamente collegando la siringa ad un impianto ad aria compressa. La pressione pneumatica spinge il pistone che a sua volta comprime l'inchiostro facendolo estrudere attraverso l'ugello. Nel caso degli estrusori a vite continua l'inchiostro è contenuto in un serbatoio e inviato all'estrusore tramite azione pneumatica, dove una vite mossa da un motore stepper comprime e spinge l'inchiostro attraverso l'orifizio. L'utilizzo della vite permette di ottenere un controllo maggiore nella stampa ed avere un maggiore volume di inchiostro da stampare. Nonostante la possibilità di utilizzare macchine molto semplici, sono state sperimentate soluzioni con estrusori collegati a bracci robotici per avere una maggiore mobilità della macchina [43], tuttavia l'utilizzo di bracci robotici non era finalizzato alla stampa su superfici curve. Sistemi di stampa più avanzati, capaci di arrivare a risoluzioni maggiori, vengono utilizzati principalmente per la stampa di inchiostri metallici, come nel caso dei sistemi *Metal X della Markforged* e *Studio System della Desktop Metal*.

3.3 Estrusione di inchiostri metallici

I metodi di AM più utilizzati per la stampa dei metalli come il SLM, l'EBM e il DED prevedono la deposizione di energia. Questa soluzione comporta una serie di problematiche legate ai gradienti termici che si verificano all'interno dei pezzi in fase di stampa che possono portare a cambiamenti microstrutturali indesiderati,

deformazioni dovute a ritiri differenziali, formazione di cricche, per cui è spesso necessario un trattamento termico successivo [44]. La combinazione di deposizione di energia in fase di stampa e del trattamento termico rende questo tipo di processi molto energivori. L'utilizzo del DIW per la stampa dei metalli permette di ridurre il consumo di energia e di materia prima, diminuendo quindi i costi e l'impatto ambientale dei prodotti, per cui l'interesse verso questo processo è in aumento sia in ambito di ricerca che in ambito industriale. La Markforged sostiene che il suo sistema Metal X basato sull'estrusione a pistone di inchiostri metallici permettono di ridurre i costi fino ad oltre il 90% e una riduzione del lead time dal 71% al 95% rispetto ai tradizionali processi per asportazione.

L'estrusione di inchiostri metallici nel DIW può avvenire in due modi, a seconda del tipo di estrusore utilizzato. Il primo metodo prevede la fornitura dell'inchiostro in forma di barre, che vengono inserite in un apposito cilindro, dove vengono riscaldate per essere abbastanza tenere da poter essere estruse, e spinte da un pistone attraverso l'ugello [45]. Quando la siringa si svuota, le barre vengono sostituite automaticamente se contenute all'interno di cartucce intercambiabili oppure sostituite a mano. Il secondo metodo prevede di utilizzare estrusori a vite continua adattando il *Metal Injection Molding* (MIM) alla stampa 3D. Il MIM consiste nello stampaggio ad iniezione di pellet costituiti da polveri metalliche legate con polimeri termoplastici che, analogamente allo stampaggio ad iniezione dei polimeri termoplastici, viene riscaldato e compresso fondendo il legante termoplastico per poter essere infine iniettato in un apposito stampo. Mantenendo la vite in rotazione, senza la corsa assiale finale, questa può estrudere in modo continuo un inchiostro a base di polveri metalliche ricavato dal pellet per MIM, già disponibile in commercio e per questo facile da reperire e più economico delle altre soluzioni, specialmente nel caso di inchiostri metallici. Soluzioni di questo tipo sono la *Pam series M della Pollen AM*, specializzata nella stampa di pellet metallici, la *ExAM225 della AIM3D*, capace di stampare anche alcuni ceramici di interesse ingegneristico come allumina, zirconia e nitrato di silicio e la *BAAM della Cincinnati Inc.* che stampa anche pellet a base di polveri di polimeri termoplastici.

3.4 Vantaggi e prospettive future

Con il DIW è possibile stampare oggetti metallici con un consumo di energia ridotto, essendo le alternative a questo processo di Additive Manufacturing la fusione su letto di polveri e il DED, processi a deposizione di energia. L'aspetto controbilanciante dal

punto di vista del costo di produzione è l'utilizzo di una materia prima più costosa, dal momento che le polveri vanno prima miscelate con un legante per creare un inchiostro adatto all'estrusione. Trattandosi di un processo ad estrusione di materiale, il DIW garantisce un utilizzo piuttosto efficiente e con scarti minimi della materia prima specie se confrontato con la fusione su letto di polveri, inoltre permette di realizzare geometrie con cavità interne impossibili per i processi a fusione su letto di polveri. Questo aspetto si può tradurre in un minor costo unitario del prodotto finito e una maggiore sostenibilità ambientale. La catena di processo del DIW è divisa in una serie di passaggi che permettono l'outsourcing di alcune fasi come la preparazione dell'impasto e la sinterizzazione, potendo tenere "in casa" solo la fase di stampa vera e propria. Ciò rappresenta un enorme vantaggio dal punto di vista della logistica industriale, permette di ridurre i costi iniziali di investimento limitandosi alle sole attrezzature necessarie alla stampa e alla possibilità di aumentare l'economia produttiva anche su piccoli lotti.

CAPITOLO 4

Stampa tramite DIW di strutture auxetiche

4.1 Obiettivi

Con il DIW di inchiostri metallici è possibile realizzare geometrie complesse anche su superfici curve, come le strutture auxetiche. L'obiettivo di questo lavoro è la realizzazione di strutture cilindriche auxetiche in acciaio AISI 316L. Per sviluppare un sistema capace di realizzare questo processo si sono valutati preventivamente alcuni aspetti per scegliere la configurazione ottimale. Il filamento depositato deve avere una migliore aderenza nella fase iniziale di deposizione, quella più critica in cui l'inchiostro non è ancora completamente essiccato, deve avere caratteristiche geometriche e fisiche costanti lungo tutta la sua lunghezza e deve mantenere una buona aderenza al substrato anche quando l'orientazione di questo varia e l'azione della gravità tenderebbe a far distaccare il filamento appena depositato. La conclusione è che le proprietà reologiche dell'inchiostro devono essere ottimali e la direzione ottimale di deposizione è quella verticale, concorde alla gravità. Per arrivare a questo risultato è quindi necessario prima validare il materiale attraverso la stampa di semplici scaffolds, successivamente stampare provini auxetici con diverse tipologie di strutture. Viene infine illustrata la prova di stampa di una struttura auxetica in argilla su una superficie cilindrica con l'aiuto di un braccio robotico.

4.2 Strumentazione di laboratorio

Di seguito viene esposta la strumentazione presente in laboratorio utilizzata per il robocasting di strutture auxetiche. Questa strumentazione comprende una stampante per robocasting, un sistema di alimentazione collegato alla stampante ed un braccio robotico a 7 assi utile per ottenere la libertà di movimento necessaria alla stampa su superfici curve.

4.2.1 *Delta WASP 4020 Clay*

Viene utilizzata una stampante 3D *desktop* per il robocasting di ceramiche tradizionali come argilla, gres e porcellane, prodotta dall'italiana CPS s.r.l. di Massa Lombarda (RA) nell'ambito del progetto WASP (World Advanced Saving Project) [46]. Il modello si chiama Delta WASP 4020 Clay, ovvero un robot con configurazione Delta, costituito da tre bracci mossi tramite delle cinghie dentate in PA su guide verticali in alluminio ricavate all'interno della struttura portante, anch'essa in alluminio, mentre il piatto di stampa è in acciaio. Il numero 4020 indica le dimensioni del volume di stampa, ovvero un'area circolare di raggio pari a 200 mm e altezza 400 mm (20 x 40 cm), mentre Clay indica il materiale principale per cui è stata progettata, ovvero l'argilla. Il controllo è affidato ad una scheda Arduino MEGA 2560, con firmware *open source* Marlin tipico delle stampanti 3D *desktop*, mentre come interfaccia presenta una presa USB e una scheda SD per il caricamento dei file, uno schermo LCD di piccole dimensioni ed una manopola per il set up dei parametri della macchina.

La programmazione della stampa può avvenire collegando un computer via USB utilizzando il software *open source* PronterFace che permette di importare il modello, fare lo *slicing*, tradurlo in formato Gcode e controllare i parametri di stampa. Un metodo alternativo consiste nel trasferire un file Gcode con i comandi di stampa tramite USB o scheda SD. Viene scelto il secondo metodo, più macchinoso ma che permette maggiore flessibilità, specie in contesti di ricerca e sviluppo come quello della stampa di strutture auxetiche.



Figura 40 Stampante Delta WASP 4020 Clay a disposizione del laboratorio con sistema siringa-serbatoioio

4.2.2 Sistema di alimentazione

La stampante Delta WASP 4020 Clay è stata fornita insieme ad un estrusore LDM WASP, che consiste in un estrusore a vite continua specifico per i materiali ceramici utilizzati dalla stampante, con un diametro di estrusione di 1,2 mm, mosso da un motore *stepper* che estrude 1 mm di materiale per step. L'estrusore è collegato ad un serbatoio in pressione che contiene l'inchiostro tramite una condotta.

In alternativa è possibile utilizzare una siringa-serbatoioio da 30 cc in polipropilene prodotta dalla Nordson EFD, Sistema Optimum di Westlake, Ohio, USA. In questa siringa viene inserita una piccola quantità di inchiostro e compressa da un pistone in polietilene, la siringa va poi chiusa con un tappo ermetico collegato tramite un tubo in PVC all'impianto pneumatico tramite un adattatore O-Ring Buna ed un successivo tubo in poliuretano. Regolando la pressione tramite una valvola, è poi possibile controllare il flusso di estrusione dell'inchiostro. Nella parte inferiore della siringa è presente una filettatura che permette di avvitare delle punte usa e getta di diametro variabile da 0,2 mm a 0,84 mm. La siringa funge anche da serbatoio, potendola chiudere con un tappo ermetico dalla parte superiore ed un cappuccio a vite dalla parte dell'ugello.

4.2.3 KUKA LBR iiwa 14 R820

Per permettere maggiore mobilità e quindi il MAAM, si è deciso di utilizzare il braccio robotico KUKA LBR iiwa 14 R820 a disposizione del laboratorio per movimentare la base di stampa, costituita da un cilindro appositamente realizzato tramite FDM. Il KUKA LBR iiwa 14 R820 è un robot collaborativo prodotto dall'azienda tedesca KUKA e anche in questo caso il nome fa riferimento alle sue caratteristiche più importanti, come appunto l'essere un robot collaborativo, “*intelligent industrial work assistant*” da cui l'abbreviazione iiwa, la leggerezza, “*Leichtbauroboter*” abbreviato in LBR, la capacità di carico di 14 kg, ed un raggio d'azione di 820 mm. Con una massa totale di 29,9 kg ed un'altezza alla base della flangia che può raggiungere i 1306 mm, questo braccio robotico a 7 assi è in grado di spostare carichi fino a quasi metà della sua massa in uno spazio di lavoro da 1,8 m³.



Figura 41 Sistema KUKA LBR iiwa 14 R820. 1) Cavo di connessione alla smartPAD; 2) pannello di controllo KUKA smartPAD; 3) manipolatore; 4) cavo di connessione alla KUKA Sunrise Cabinet; 5) controllore del robot KUKA Sunrise Cabinet

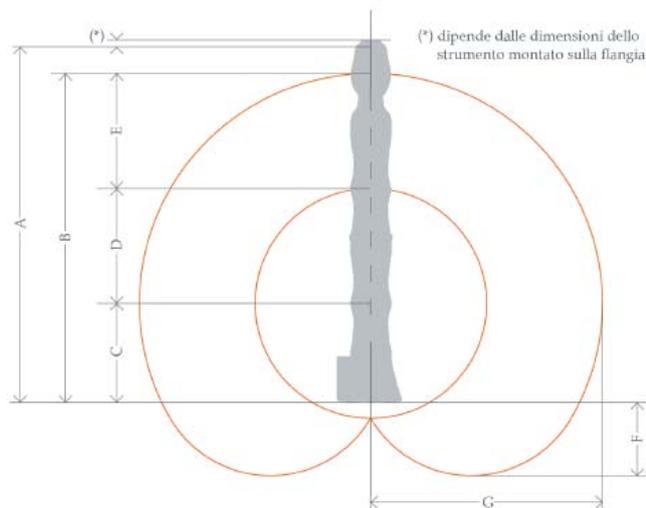


Figura 42 Spazio di lavoro del manipolatore KUKA LBR iiwa 14 R820, le quote sono illustrate in Tabella 3

Tabella 3 Quote dello spazio di lavoro del manipolatore KUKA LBR iiwa 14 R820

A	B	C	D	E	F	G
1306 mm	1180 mm	360 mm	420 mm	400 mm	255 mm	820 mm

Questo robot è inoltre caratterizzato da un numero ridondante di giunti, che permettono di raggiungere ogni posizione con un numero infinito di configurazioni, e da sensori di coppia oltre che di posizione per ogni giunto, grazie a cui può percepire gli stimoli esterni funzionando in modalità collaborativa. La possibilità di raggiungere una certa posizione con un numero infinito di configurazioni è molto utile nel caso di lavoro in ambienti angusti per cui il movimento da una posizione iniziale ad una finale può essere ostacolato, sia nel caso nel *null space motion*, ovvero un movimento dei giunti con una configurazione tale da mantenere la posizione finale fissa, che può essere usata nel caso alcuni di questi giunti arrivino a fine corsa e vadano spostati senza dover modificare la posizione finale.

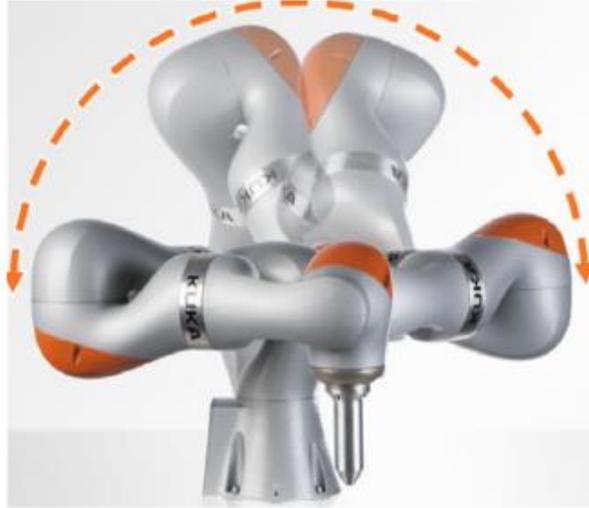


Figura 43 Illustrazione schematica del null space motion. La posizione finale del braccio robotico rimane fissa nonostante il movimento dei giunti.

Robot collaborativi di questo tipo vengono normalmente utilizzati in contesti industriali che prevedono la movimentazione e la manipolazione di carichi pesanti per i quali l'utilizzo delle braccia umane è considerato rischioso per la salute dell'operatore e la sicurezza del luogo di lavoro. In attività come la palletizzazione, l'assemblaggio, la lavorazione o la misurazione con strumenti pesanti o in luoghi difficilmente accessibili, la macchina può seguire i movimenti dell'operatore supportando gran parte del carico o può semplicemente eseguire dei *tasks* attivandosi col tocco dell'operatore o con il pannello di controllo.

4.3 Stampa su superficie piana

Il lavoro sperimentale consiste in diverse fasi consecutive che hanno come fine ultimo la realizzazione di strutture auxetiche chirali su una superficie cilindrica utilizzando un inchiostro a base di polveri di acciaio AISI 316L. Il primo passo consiste nella realizzazione dell'inchiostro e nella prova visiva della sua estrudibilità con un sistema serbatoio-siringa, successivamente si è passati alla stampa di *scaffolds* semplici utilizzando la stampante Delta WASP 4020 Clay con sistema di estrusione serbatoio-siringa, per concludere con la stampa di provini piani dotati di struttura tetra- ed esachirale. L'obiettivo finale sarebbe la stampa dello stesso tipo di strutture su una superficie cilindrica.

4.3.2 Preparazione dell'inchiostro

Gli inchiostri utilizzati per il DIW sono di fatto delle sospensioni altamente caricate caratterizzate da una viscosità elevata e da un comportamento pseudoplastico. Queste sospensioni sono composte da tre componenti principali: un solvente, un legante e delle polveri del materiale che si vuole stampare. In questo caso, per la preparazione dell'inchiostro, vengono utilizzate le polveri prelegate di acciaio AISI 316L Osprey® della Sandvik (Svezia) prodotte per atomizzazione in gas, con un ridotto tenore di carbonio che rende questa lega resistente alla corrosione in applicazioni biomedicali *in vivo* (Tabella 4) [47].

Tabella 4 Composizione chimica nominale dichiarata dal produttore, %

Fe	C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	S	P
Bal.	0.03	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	1.0	2.0	0.03	0.045

Il legante è una miscela di polietilenglicole (PEG) e polivinilalcol (PVA) che conferisce il comportamento pseudoplastico all'inchiostro. Viene utilizzato come solvente acqua distillata, nella quale viene versata la miscela polimerica previo riscaldamento dell'acqua a 80 °C e successiva agitazione con un mulino a sfere magnetiche per 2 ore, fino ad ottenere una soluzione omogenea e stabile con rapporto acqua:PVA:PEG pari a circa 72:17:11. La soluzione acquosa di polimeri leganti è stata fatta raffreddare fino a temperatura ambiente e poi versata man mano in un contenitore insieme alle polveri metalliche mescolando a mano fino ad ottenere un rapporto in peso di 86,75:8,3. Successivamente è stato utilizzato un mulino planetario Thinky Mixer ARE-250 CE (Thinky Corporation, Giappone) per la miscelazione a 400 rpm per 4 minuti più altri 2 minuti a 400 rpm per il defoaming. Si è ottenuto in questo modo un inchiostro omogeneo e con una minima quantità di bolle d'aria intrappolate al suo interno. L'inchiostro così preparato è stato immediatamente inserito nelle siringhe-serbatoio, sigillato per evitare l'essiccazione precoce e conservato in frigorifero a 4° C circa dove può mantenere le sue proprietà fino ad una settimana.

4.3.3 Programmazione

Come descritto nel primo capitolo, tutti i processi additivi prevedono nella loro catena di processo dei passaggi che portano dal modello virtuale all'oggetto reale attraverso i passaggi di traduzione dei file CAD in un formato leggibile, lo *slicing* e la traduzione in

codice macchina Gcode. Il metodo comunemente utilizzato prevede la conversione in .STL o .AMF utilizzando gli strumenti del software CAD utilizzato per la modellazione, o ricostruzione nel caso del *reverse engineering*, del pezzo da stampare e lo *slicing* tramite un software apposito che può essere anche un plug-in del CAD (come nel caso di Fusion 360 della Autodesk) o un software integrato nella stampante specifico per il processo utilizzato. Un altro metodo è quello che sfrutta la modellazione visuale parametrica e che permette di ottenere immediatamente i Gcode, solitamente utilizzando il software di programmazione visuale Grasshopper parallelamente al software CAD Rhinoceros, di cui è un plug-in.

Il primo metodo risulta ideale quando si devono realizzare geometrie uniche e non ripetibili e quando si hanno a disposizione strumenti hardware e software specifici per il processo. La maggior parte dei software di *slicing* (Simplify3D, Slic3r, Netfabb, Cura, ecc...) sono specializzati per i processi più diffusi come l'FDM o il SLS, nei quali sono possibili interruzioni del filamento e l'incrocio delle passate all'interno di un singolo layer che nel caso del DIW compromettono seriamente la qualità del prodotto, per cui il loro utilizzo per il robocasting comporterebbe una manipolazione dettagliata del codice macchina generato automaticamente. Il secondo metodo è ideale per la realizzazione di geometrie con caratteristiche ripetitive come i solidi cellulari e consente l'immediata visualizzazione della geometria ogni volta che vengono modificati i parametri. Tuttavia, questo metodo prevede un processo di modellazione astratto e conoscenze specifiche nella programmazione visuale, che nel caso specifico di strutture chiralì devono essere particolarmente approfondite, e risulta dispendioso dal punto di vista del calcolo e della memoria del computer dovendo generare ogni volta un modello CAD prima di passare alla creazione del relativo Gcode. Un metodo più semplice della programmazione visuale e più flessibile rispetto al metodo più diffuso dei software di *slicing* prevede l'implementazione di un codice con MatLab capace di generare automaticamente file .GCODE avendo come input alcuni parametri specifici della geometria da realizzare. È un metodo parametrico come quello della programmazione visuale, ma non richiede il passaggio che genera un modello CAD prima di arrivare al codice macchina in formato .GCODE, col vantaggio di non appesantire gravemente la memoria del computer con cui si eseguono queste operazioni. Dovendo generare un gran numero di file .GCODE per ottimizzare la stampa di strutture chiralì, si è scelto questo ultimo metodo.

Si sono implementati degli script per generare strutture di tipo

- Scaffold, ovvero una struttura cellulare molto semplice costituita da filamenti distanziati e paralleli, ruotati di 90° ad ogni layer
- Tetrachirale
- Esachirale

La struttura del codice MatLab è composta da una prima parte introduttiva, in cui vengono definiti sia i parametri interni che quelli modificabili appena viene avviato il programma, un super-blocco che costituisce la scrittura del gcode suddiviso a sua volta in una serie di righe che ordinano la scrittura dei comandi preliminari per l'avviamento della stampa, un blocco che comprende un ciclo iterativo per la scrittura dei comandi di stampa di ogni layer, al cui interno sono innestati due o più cicli for per la scrittura di comandi ripetitivi all'interno del singolo layer (Figura 44).

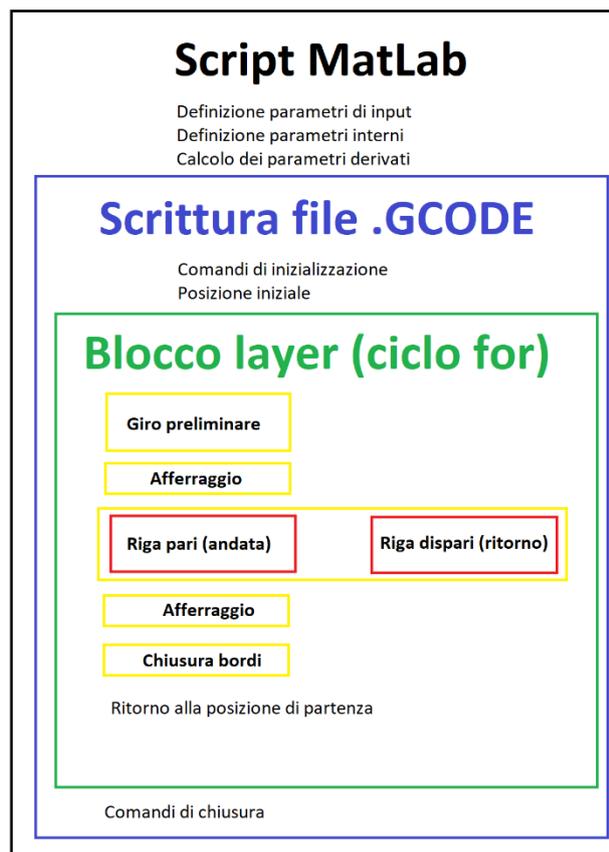


Figura 44 Schematizzazione della struttura generale degli script MatLab per la generazione dei codici di stampa delle strutture chirali. I riquadri verdi, gialli e rossi indicano dei cicli for

La scrittura del codice MatLab ha richiesto una fase preliminare per tracciare uno schizzo su carta per avere uno schema visivo come aiuto alla programmazione. Il secondo passaggio ha riguardato la scrittura del blocco centrale che descrive il percorso base ripetuto tramite un ciclo *for*. Infine, si sono aggiunti i blocchi che descrivono le zone di afferraggio del provino e i passaggi necessari alla chiusura di alcune zone della struttura per i quali non era possibile inserire i comandi nelle iterazioni del blocco centrale. Ogni modifica del codice è stata preventivamente verificata utilizzando il visualizzatore per Gcode NC viewer che visualizza il percorso macchina descritto dal codice.

Alcune caratteristiche particolari del sistema di stampa 3D tramite DIW utilizzato hanno guidato la programmazione verso scelte particolari. Il firmware della Delta WASP 4020 Clay non è in grado di leggere i comandi Gcode “G2 Xxxx Yxxx Ixxx Jxxx” e “G3 Xxxx Yxxx Ixxx Jxxx” che indicano un percorso ad arco di cerchio, fermando immediatamente la stampa e portando l’estrusore ad una quota Z inferiore allo zero e quindi col rischio di auto danneggiamento, per cui si è reso necessario effettuare un arresto di emergenza. Per ovviare a questo problema si sono dovute approssimare tutte le sezioni del percorso descritte da un arco di cerchio con dei segmenti rettilinei, scelta ben visibile nei nodi delle strutture chirali in fase di simulazione del percorso. Un altro limite dato dal robocasting sono i punti di incrocio del filamento all’interno di un singolo *layer*. In questi punti, la parte di filamento sovrapposta non riesce a collassare per via delle proprietà reologiche dell’inchostro e va ad invadere lo spazio che appartiene al *layer* successivo. Strato dopo strato, si crea un innalzamento anomalo della struttura nel punto di incrocio che porta ad instabilità e ad una geometria finale del pezzo errata. Non è però possibile interrompere il filamento in quel punto se si vogliono avere caratteristiche meccaniche soddisfacenti nel pezzo, per cui è necessario trovare una soluzione diversa. Nel caso delle strutture chirali, si è deciso di disegnare i nodi tramite diverse passate affiancate fra loro che si incuneano all’interno del nodo formando una struttura circolare di spessore maggiore rispetto a quello dei legamenti (Figura 45 e Figura 46).

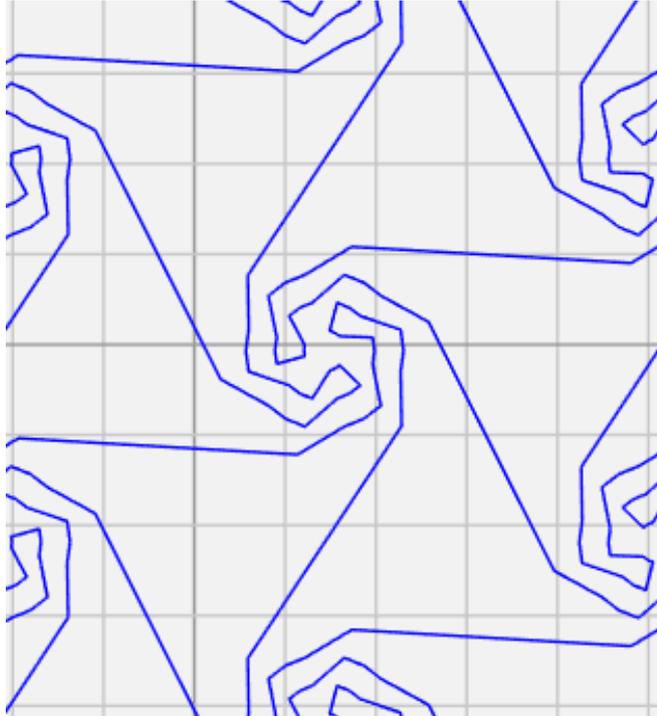


Figura 45 Visualizzazione di un nodo della struttura esachirale con NC Viewer. Si nota il percorso segmentato degli archi di cerchio e l'organizzazione delle passate tale per cui non si hanno incroci, ma dei nodi con spessore pari a 2-3 volte quello dei legamenti

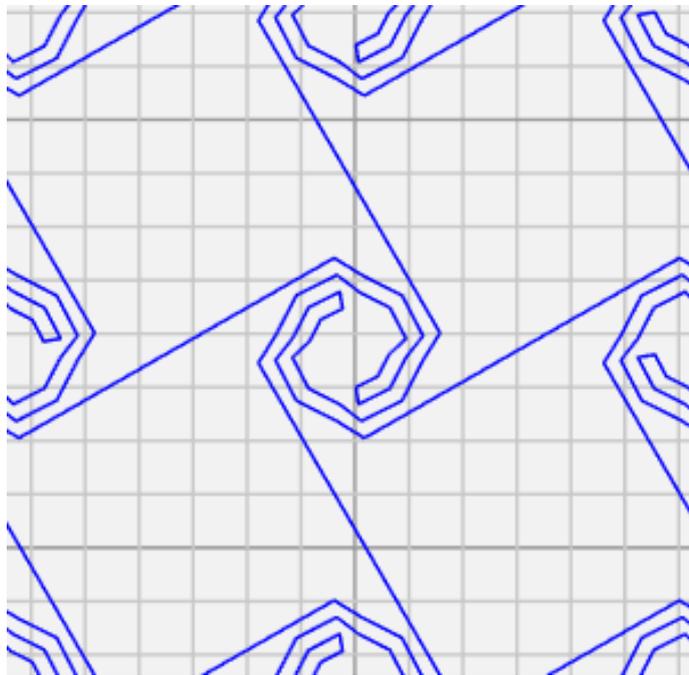


Figura 46 Visualizzazione di un nodo della struttura tetrachirale con NC Viewer. Si nota anche in questo caso il percorso segmentato degli archi di cerchio e lo spessore dei nodi pari a 2-3 volte quello dei legamenti

Nelle figure seguenti vengono illustrati alcuni esempi di Gcode realizzati tramite script MatLab per le tre tipologie di strutture programmate

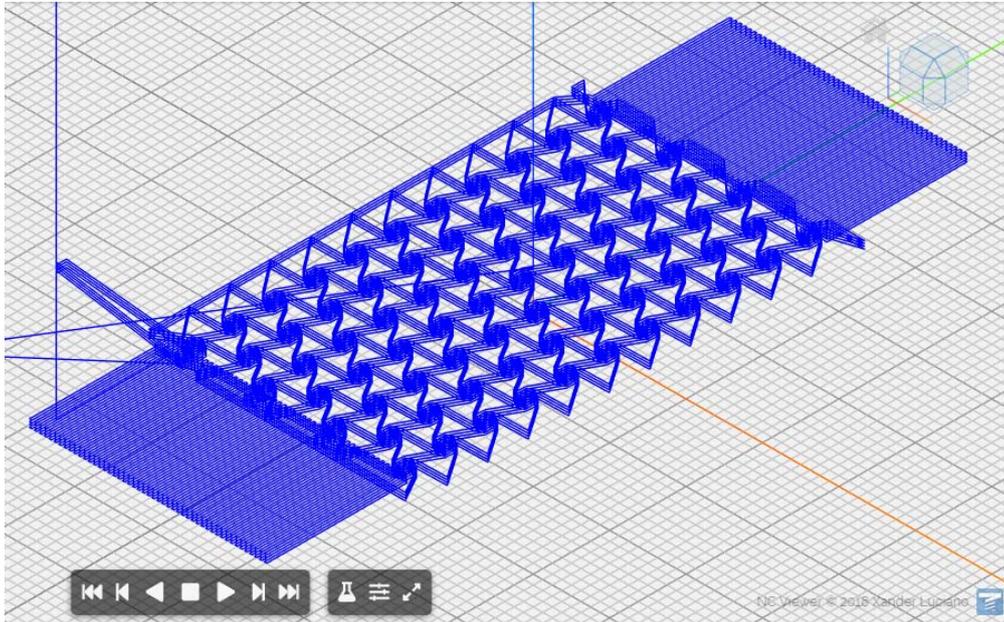


Figura 47 Provino esachirale con diametro del filamento pari a $400\ \mu\text{m}$ e dimensione della cella elementare pari a $5300\ \mu\text{m}$

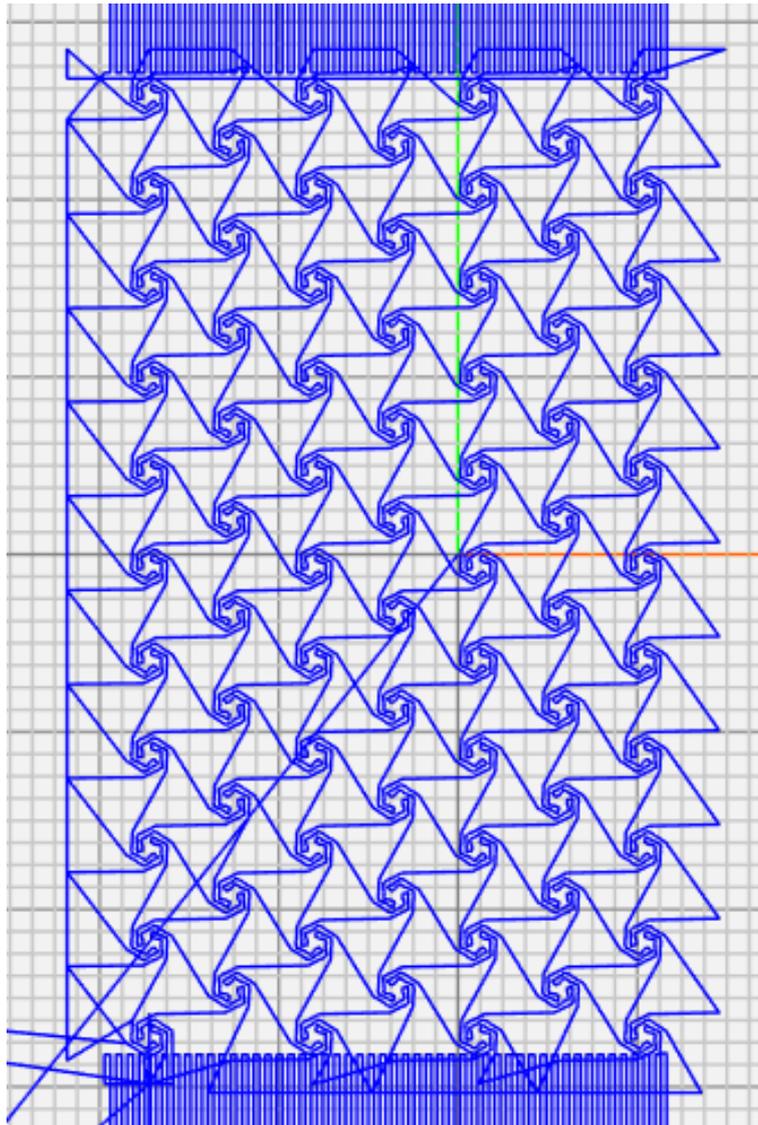


Figura 48 Vista frontale del provino esachirale 400x5300

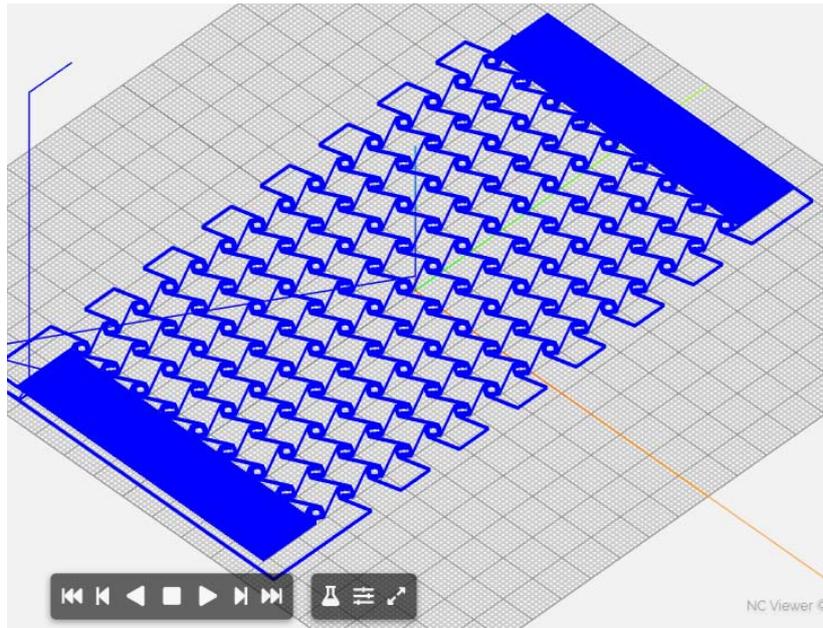


Figura 49 Provino tetrachirale con diametro del filamento pari a $500\ \mu\text{m}$ e dimensione della cella elementare pari a $10000\ \mu\text{m}$

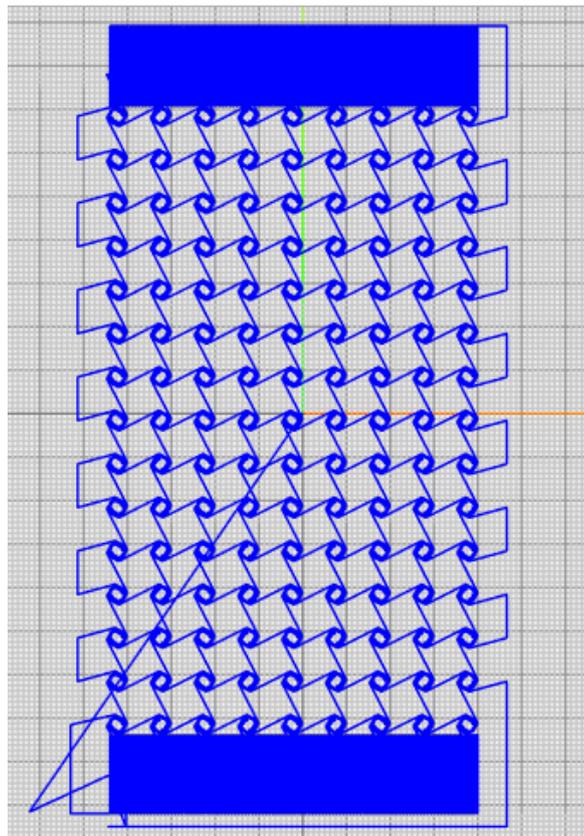


Figura 50 Vista frontale del provino tetrachirale 500×10000

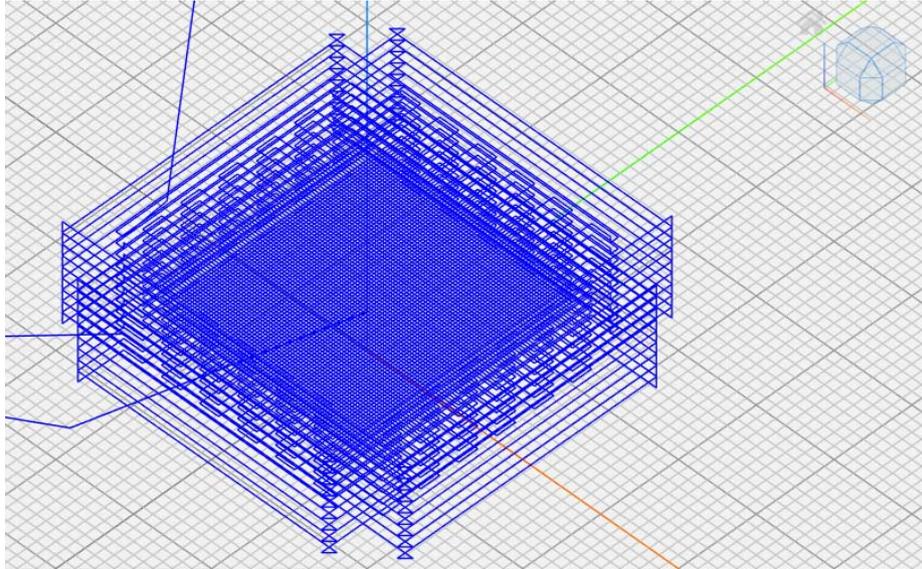


Figura 51 Scaffold con diametro del filamento di $840\ \mu\text{m}$, distanziamento dei filamenti di $1600\ \mu\text{m}$, di dimensioni assolute $36 \times 36 \times 13\ \text{mm}$

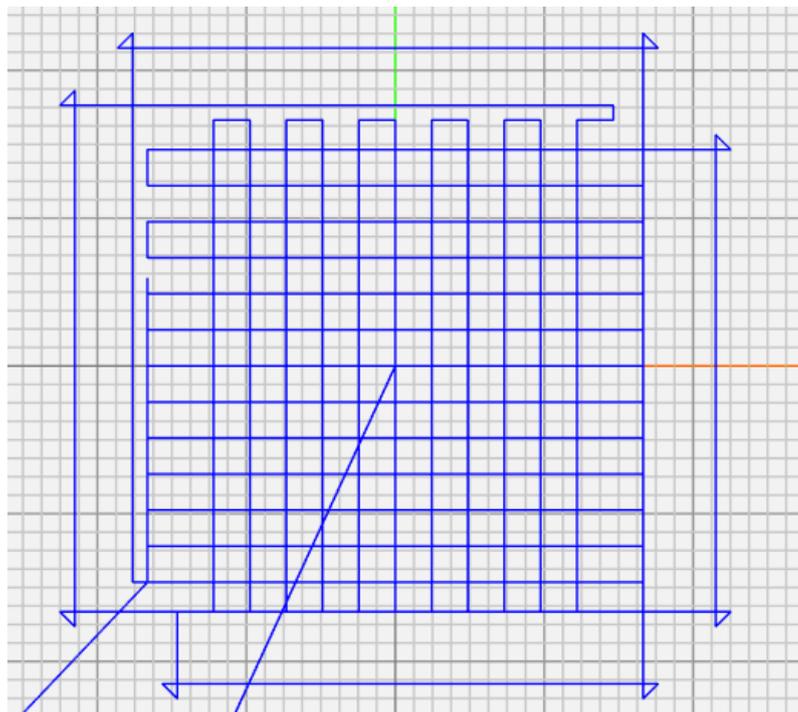


Figura 52 Vista frontale dello scaffold in Figura 51

Gli script vengono fatti eseguire all'interno della *command window* di MatLab inserendo i parametri dimensionali desiderati, ovvero diametro del filamento, distanziamento fra i nodi, numero di righe, colonne e *layers*, dimensione degli attacchi e velocità di stampa. I file .GCODE così generati vengono salvati sulla scheda SD della Delta WASP 4020 Clay.

4.3.4 Stampa su superficie piana

È stata prelevata dal frigorifero la siringa-serbatoio contenente l'inchiostro preparato in precedenza per poi essere trasferito alla stampante Delta WASP 4020 Clay. Il tappo ermetico è stato rimosso, si è inserito il pistone all'interno della siringa che è stata infine chiusa con il tappo dotato di tubo per l'aria compressa collegato all'impianto pneumatico del laboratorio tramite un l'adattatore O-Ring Buna. Si è anche sostituito il cappuccio che chiude la punta con un *nozzle* del diametro desiderato per permettere l'estrusione dell'inchiostro. La siringa è stata infine posizionata sulla testa mobile della stampante e fissata con un nastro biadesivo.

La scheda SD contenente i Gcode viene inserita nell'apposito slot presente sulla stampante che viene poi accesa. Viene effettuato il set-up della macchina che consiste nel portare in *home* la testa mobile, impostare la quota zero del pezzo e ritornare alla *home*. Infine, si seleziona il file .GCODE relativo alla geometria da stampare e si avvia la stampa. Nel tempo che intercorre fra l'avvio della stampa e il raggiungimento della posizione di partenza da cui iniziare l'estrusione si procede con l'apertura della valvola della pressione per permettere l'estrusione dell'inchiostro, in quanto con il sistema siringa-serbatoio si ha una risposta ritardata del sistema. L'apertura anticipata della valvola si è rivelata utile per valutare la qualità di estrusione e regolare la pressione in modo ottimale prima dell'inizio della stampa del pezzo vero e proprio.

Durante la stampa degli scaffold si sono settati i parametri di stampa dell'inchiostro realizzato estruso con il sistema siringa-serbatoio, ovvero una pressione ottimale di $0,8 \pm 0,2$ bar, per la quale si ottiene una velocità di estrusione compatibile con la velocità di stampa di 250 mm/min. Per finire, si è deciso di utilizzare un termosoffiatore Bosch PHG600-3 impostato a potenza e temperatura minima e posizionato a distanza opportuna da creare una leggera corrente d'aria a circa 25-30 °C per favorire l'evaporazione del solvente e quindi il consolidamento temporaneo del filamento depositato, con ottimi risultati.

Per minimizzare l'effetto di ispessimento dei nodi nelle strutture chirali si è deciso di aumentare la velocità di stampa del 10% in modo da depositare un filamento più fine, mentre la velocità di stampa dei legamenti è ridotta del 10% rispetto alla velocità media di 250 mm/min. Questo risultato è stato ottenuto riducendo la velocità dei passaggi rettilinei del 20%, in quanto le righe che li descrivono all'interno dello script MatLab sono in minoranza, aumentando invece la velocità di stampa da 250 a 275 mm/min,

ovvero del 10%, in fase di definizione dei parametri di stampa nella *command window* di MatLab, con cui si va a generare il Gcode. In Figura 54 viene illustrata la stampa di un provino esachirale, per il quale l'effetto di ispessimento è ancora visibile nonostante questa correzione.

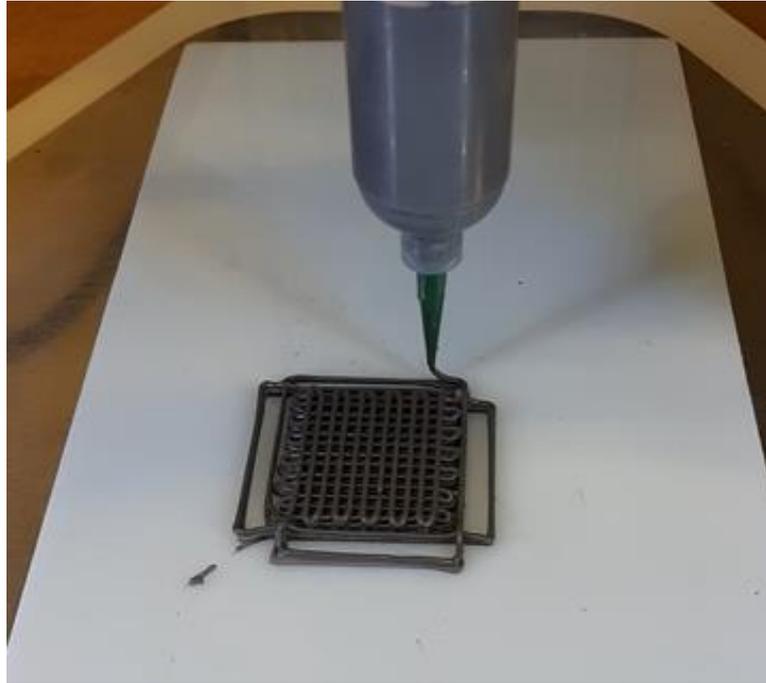


Figura 53 Stampa di uno scaffold con diametro del filamento di 840 μm , distanziamento fra i filamenti di 800 μm e dimensioni assolute pari a 36x36x13 mm in acciaio AISI 316L

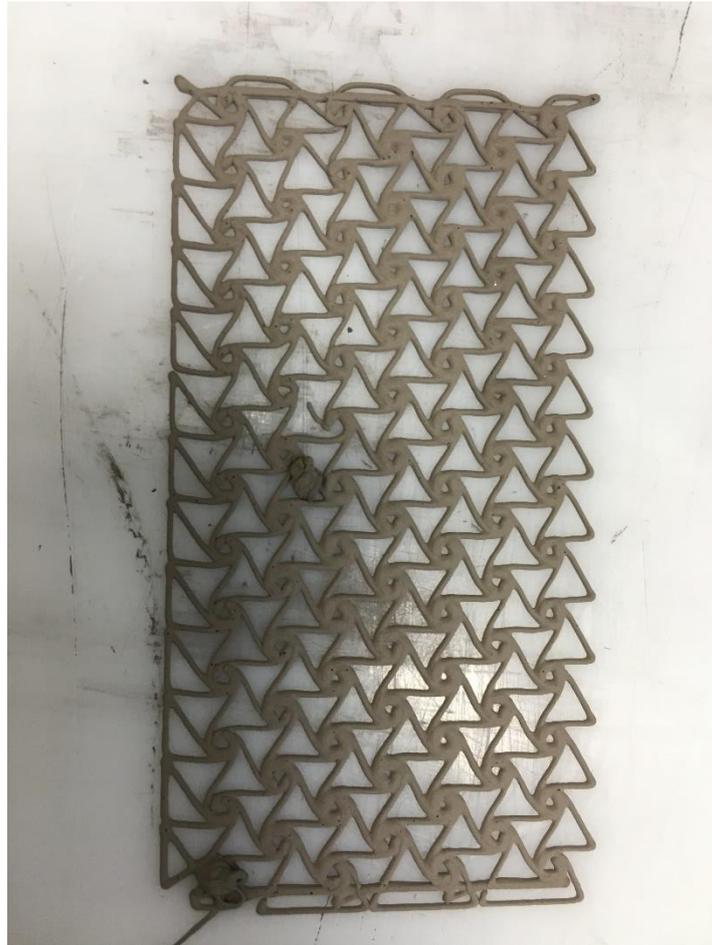


Figura 54 Prova di stampa di un provino esachirale $d400 \times 5300$ in acciaio AISI 316L

4.4 Stampa su superficie curva

In questo paragrafo vengono descritte le prove di stampa su superficie cilindrica di strutture auxetiche *missing-rib* realizzate in argilla. L'inchiostro utilizzato è una miscela di polveri di argilla, legante organico e acqua come solvente, con un rapporto polveri:solvente che varia da 60:35 a circa 50:50 e con una quantità di legante inferiore al 1%. Questo inchiostro appartiene alla categoria dei materiali esplicitamente adatti al robocasting per cui la Delta WASP 4020 Clay è stata progettata. Viene utilizzato anche il braccio robotico KUKA LBR iiwa 14 R820 per la movimentazione del cilindro su cui eseguire la stampa, che è stato opportunamente programmato in precedenza in linguaggio Java [48].

4.4.1 Set-up

La stampante Delta WASP 4020 Clay è stata posizionata su un carrello per gli attrezzi alto circa 1 m, mantenendo l'estrusore in posizione fissa. In questo modo la stampante

viene utilizzata esclusivamente per l'estrusione, utilizzando invece i 7 assi del braccio robotico per muovere la base cilindrica di stampa. In pratica è un sistema MAAM 0-7, con 0 gradi di libertà per l'estrusore e 7 gradi di libertà per il substrato su cui va a depositarsi l'inchiostro. In questo modo è possibile avere un'estrusione dell'inchiostro in direzione parallela all'azione di gravità. La stampante è stata equipaggiata con un estrusore a vite continua LDM WASP adatto all'estrusione dell'argilla collegato ad un serbatoio tramite una condotta in pressione regolata da una valvola manuale. Il supporto cilindrico collegato al braccio robotico su cui andrà a depositarsi l'inchiostro è stato rivestito con un foglio in PVC per favorire il distacco della struttura stampata.

4.4.2 *Stampa*

La stampante è stata programmata per iniziare l'estrusione dell'inchiostro e portare l'estrusore in posizione $(X, Y, Z) = (0, -90, 244)$, dove tocca il cilindro collegato al braccio robotico. Il robot, sentendo l'azione esercitata su di esso dall'estrusore della stampante, avvia quindi il movimento della base di stampa. Per realizzare delle strutture *missing-rib*, il movimento della base cilindrica di stampa è costituito da una serie di rotazione e traslazioni rispetto all'asse z del robot, avvenute ad una velocità cartesiana di rotazione chiamata v_{cart} [mm/s]. La velocità del robot v_{cart} , la velocità di estrusione v_{ext} e la pressione della condotta p_{ext} che porta l'inchiostro dal serbatoio all'estrusore sono state regolate in modo da permettere una buona deposizione dell'inchiostro e costituiscono i parametri fondamentali per il sistema di DIW realizzato. I valori ottimali trovati per questi parametri sono:

- $v_{cart} = 6 \text{ mm/s}$
- $v_{ext} = 100 \text{ mm/min}$
- $p_{ext} = 0,2 \text{ bar}$.

4.4.3 *Risultato*

In Figura 55 e in Figura 56 viene illustrato il risultato della stampa su superficie curva di una struttura auxetica di tipo *missing-rib* su superficie cilindrica. Bisogna premettere che è stato utilizzato un equipaggiamento espressamente commercializzato per la stampa dell'inchiostro a base di argilla, ovvero una stampante Delta WASP 4020 Clay con estrusore a vite continua LDM WASP, per cui il risultato finale di estrusione è stato pressoché ottimale. L'utilizzo del braccio robotico si è dimostrato interessante per le potenzialità che conferisce ad un processo semplice come il robocasting, anche se

risultano problemi di vibrazioni che causano un deposito irregolare quando si vuole una risoluzione di stampa particolarmente elevata. L'inchiostro utilizzato si è dimostrato adatto per il CLAM grazie alle sue proprietà reologiche che hanno permesso una buona aderenza al substrato anche quando si trovava in posizione sfavorevole rispetto all'azione della gravità.



(a)



(b)

Figura 55 Stampa del primo layer della struttura missing-rib su superficie cilindrica realizzata con un inchiostro a base di argilla. (a) Giro di andata; (b) giro di ritorno.

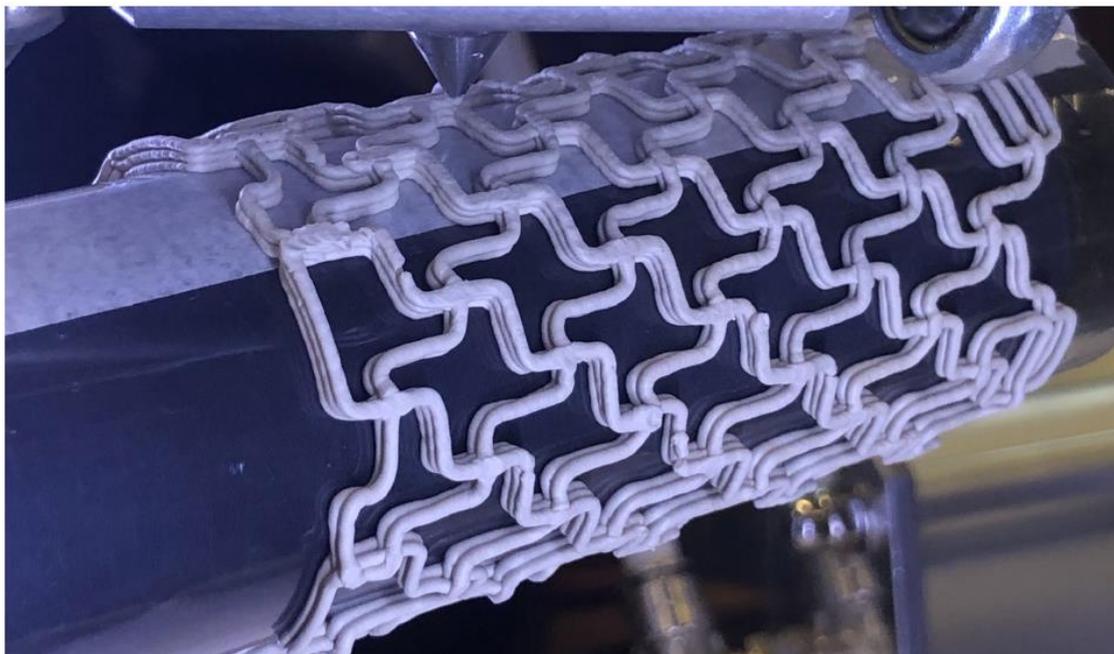


Figura 56 Struttura missing-rib costituita da tre strati

CAPITOLO 5

Progetto di un estrusore a vite per DIW

5.1 Estrusori per MIM

L'estrusione dell'impasto a base di polveri di AISI 316L con il metodo utilizzato in laboratorio ha dimostrato alcune debolezze che pregiudicano la qualità finale del prodotto. Le più importanti sono l'intrappolamento di bolle d'aria all'interno della siringa e il controllo dell'estrusione tramite una valvola pneumatica manuale da cui deriva una risposta del sistema molto ritardata. Il problema delle bolle d'aria nella siringa si verifica a causa del riempimento manuale di questa ed è praticamente inevitabile, per cui è necessario trovare un modo per espellere l'aria intrappolata prima che raggiunga il *nozzle*. Essendo la stampante Delta WASP già dotata di un estrusore a vite per argilla ed avendo riscontrato una buona qualità di estrusione durante la stampa dell'inchiostro ceramico su superficie cilindrica, si è deciso di sviluppare un estrusore simile appositamente progettato per l'estrusione dell'impasto metallico utilizzato. Infatti, l'utilizzo di una vite continua permette di aumentare la pressione di estrusione che inibisce il reflusso, spurgare l'aria intrappolata all'interno dell'impasto ed avere un maggiore controllo della velocità di estrusione [49]

La progettazione di un estrusore a vite continua di questo tipo ha preso in considerazione diversi processi in cui vengono utilizzati estrusori di questo tipo come la stampa 3D ad estrusione di materiale e il *Metal Injection Molding* (MIM). Il *Metal Injection Molding* (MIM) è un processo simile allo stampaggio ad iniezione per i polimeri termoplastici, con la differenza che utilizza pellets composti da una miscela solida di polveri metalliche legate con un polimero termoplastico, questi pellets vengono riscaldati fondendo il legante e dando vita ad un impasto simile agli inchiostri per DIW, compressi ed iniettati all'interno di uno stampo grazie alla vite continua. L'ispirazione al MIM è stata utile per valutare il tipo di materiale da utilizzare per l'estrusore, in quanto va ad

operare con impasti a base di polveri metalliche simili a quelli utilizzati in questa tesi. Un altro aspetto del MIM è che la geometria delle viti utilizzate è la stessa di quelle per lo stampaggio ad iniezione per i termoplastici, per cui si è concluso che è possibile dimensionare l'estrusore per DIW prendendo ispirazione dai processi additivi ad estrusione di materiale termoplastico che utilizzano estrusori a vite, non avendo trovato in letteratura guide per il dimensionamento di estrusori adatto al caso in esame.

5.2 Dimensionamento di un estrusore a vite continua per DIW di impasti metallici

Per il dimensionamento della vite continua, in considerazione degli aspetti descritti nel precedente paragrafo, si è preso ispirazione dallo studio di Tseng et Al. in cui viene dimensionato un estrusore a vite continua per la stampa 3D ad estrusione di pellets di PEEK [49]. La procedura di dimensionamento ed i parametri utilizzati non sono dissimili da quelli utilizzati per le viti da stampaggio ad iniezione [50], salvo il fatto che nel caso dell'AM ad estrusione di materiale le viti non devono eseguire una corsa assiale per l'iniezione del materiale all'interno di uno stampo, ma si limitano solo a ruotare attorno al proprio asse.

La vite può essere divisa in tre zone (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e Figura 58):

- Zona di alimentazione (*feeding zone*), di lunghezza pari a L_F ;
- Zona di compressione (*compression zone*), di lunghezza pari a L_C ;
- Zona di dosaggio (*metering zone*), di lunghezza pari a L_M .

La suddivisione di queste tre zone è caratterizzata sia da una sezione di passaggio diversa, che da fenomeni termodinamici diversi come il riscaldamento del materiale per azione esterna, per attrito o per compressione che portano alle condizioni ottimali di estrusione in prossimità dell'ugello (*nozzle*). In particolare, nel caso dei polimeri la zona di alimentazione è particolarmente lunga per consentire il riscaldamento e quindi il rammollimento del pellet termoplastico, che va poi a fluire verso la zona di compressione.

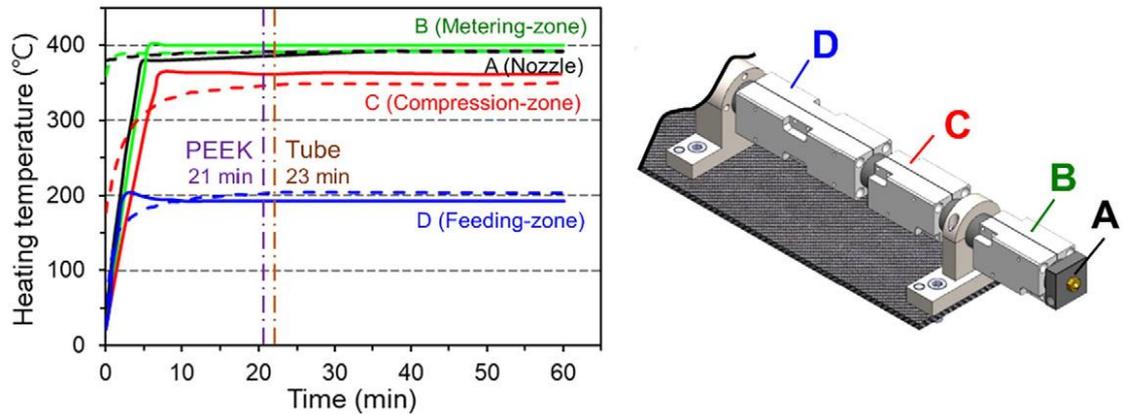


Figura 57 Distinzione delle tre zone della vite, all'interno delle quali si hanno fenomeni termodinamici diversi necessari alla fusione dei pellet di PEEK e al raggiungimento delle proprietà reologiche ottimali per l'estrusione

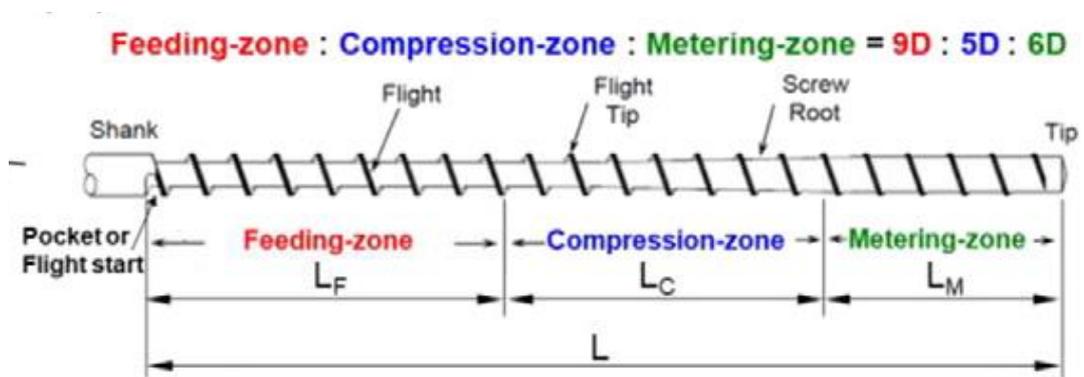


Figura 58 Illustrazione schematica delle tre zone, con le relative lunghezze rapportate al diametro esterno della vite.

Il dimensionamento parte dalla definizione di due parametri fondamentali:

- *Aspect ratio* L/D
- Rapporto di Compressione ε .

L' *Aspect ratio* è il rapporto fra la lunghezza totale della vite $L = L_F + L_C + L_M$ e il diametro esterno D , e può assumere valori compresi fra 18 e 24. Da questo parametro dipendono anche le lunghezze delle diverse zone in cui è suddivisa la vite.

$$\frac{L}{D} = 18:1 \div 24:1$$

(4)

Il rapporto di compressione può avere valori compresi fra 2 e 1 ed è invece funzione di diverse grandezze.

$$\varepsilon = 2:1 \div 3:1 \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{h_F(t-s)(D-h_F)}{h_M(t-s)(D-h_M)} \quad (6)$$

Dove:

- h_F è l'altezza dell'ala nella zona di alimentazione
- h_M è l'altezza dell'ala nella zona di dosaggio
- s è lo spessore dell'ala.

Non potendo esplicitare queste quote dalla (6), è necessario agire in modo iterativo ipotizzando dei valori e verificandoli successivamente, sapendo che t è il passo della vite, normalmente una vite quadra, per cui

$$t = D \quad (7).$$

Inoltre, lo spessore dell'ala s deve resistere alla forza che agisce su di essa:

$$F = \Delta P A_N + \mu A_N \gamma \quad (8).$$

ΔP è la pressione di estrusione in prossimità dell'ugello:

$$\Delta P = \frac{8\mu\Delta L Q_N}{\pi r^4} \quad (9),$$

dove

- A_N è l'area della vite proiettata sul piano parallelo all'asse nella zona di dosaggio
- μ è la viscosità del materiale da estrudere
- γ è lo *shear rate*
- ΔL è la lunghezza del canale
- Q_N è il flusso
- r è il raggio dell'ugello.

Viene scelto il gioco fra vite e superficie interna del cilindro (*barrel*) λ , dopodiché è possibile ricavare i seguenti parametri:

- Diametro interno del cilindro (*barrel*) $D_b = D + 2\lambda$
- Diametro interno della vite nella zona di alimentazione $D_{c,F} = D_b - 2h_F$
- Diametro interno della vite nella zona di dosaggio $D_{c,M} = D_b - 2h_M$

Infine, è possibile ricavare la larghezza del canale come:

$$w = \frac{t}{\cos\varphi} - s \quad (10).$$

In cui φ è l'angolo dell'elicoidale, che per una vite a passo quadro è normalmente pari a $17,65^\circ$, secondo la formula seguente:

$$\tan\varphi = \frac{t}{\pi D} \quad (11).$$

La scelta dei parametri appena descritti è stata subordinata ad alcune considerazioni. La prima riguarda il fatto che, dovendo estrudere un impasto dalle proprietà reologiche ottimali già a temperatura ambiente, non è necessaria una fase di riscaldamento nella zona di alimentazione, per cui si è deciso di fare una *feeding zone* più corta rispetto all'estrusore in PEEK a cui ci si è ispirati. La seconda considerazione riguarda l'importanza di eliminare le bolle d'aria intrappolate, per cui si è voluta dare maggiore importanza alla zona di compressione, allungandola. L'ultima considerazione riguardava l'utilizzo di un *Aspect ratio* di 15:1, con il conseguente accorciamento anche della zona di dosaggio. Questo valore fuori dal range normalmente utilizzato, è giustificato dalla necessità di avere una vite di lunghezza contenuta, per motivi sia di spazio che di minimizzare il surriscaldamento dell'inchiostro metallico a causa dell'attrito, non essendo necessario e potenzialmente dannoso in questo caso. A differenza dell'estrusore in PEEK che aveva un rapporto $L_F:L_C:L_M = 9D:5D:6D$ e *Aspect ratio* di 20:1, è stato utilizzato un rapporto finale $L_F:L_C:L_M = 4D:6D:5D$ e appunto un *Aspect ratio* di 15:1.

Si è scelto un rapporto di compressione medio pari a $\varepsilon = 2,5:1$, mentre il diametro scelto è pari a $D = 8 \text{ mm}$, che porta quindi ad una vite lunga 120 mm. Il gioco fra vite

e cilindro è stato scelto pari a $\lambda = 25 \mu m$, valore tipicamente utilizzato per i giochi fra punzone e matrice nella metallurgia delle polveri e quindi nel MIM [51]. Si è infine ipotizzato un raggio dell'ugello pari a $r = 0,25 mm$.

Un aspetto a sé è quello della verifica a resistenza dello spessore dell'aletta secondo le (8) e (9), per cui è necessario conoscere il flusso di estrusione e lo shear rate dell'inchiostro. Si conosce la velocità di stampa delle strutture metalliche pari a circa $250 mm/min$, e la velocità del motore che muove la vite dell'estrusore LDM WASP presa come riferimento pari a 400 Estep/mm, ovvero che il motore compie 400 step, pari a $0,9^\circ$, per estrarre 1 mm di materiale. Da questi dati si ricava un flusso di estrusione pari a $Q_N = 49 mm^3/min$ ed uno shear rate massimo di $\gamma = 4395 s^{-1}$, quest'ultimo calcolato come il gradiente di velocità fra il bordo esterno dell'ala e la superficie interna del cilindro. Per un valore così alto di γ la viscosità dell'inchiostro pseudoplastico raggiunge il plateau nel diagramma $\mu-\dot{\gamma}$, nel quale la viscosità è costante ed ha un valore minimo (Figura 59). Avendo scelto uno spessore dell'ala pari a $s = 2 mm$, si ha un coefficiente di sicurezza superiore a 7 con una viscosità di $12000 Pa \cdot s$ avendo utilizzato come materiale un acciaio per utensili AISI D2 temprato in aria. In generale, per i componenti di questo estrusore si raccomanda di utilizzare materiali molto duri come acciai D2 o D3, caratterizzati da una durezza HRC di 60-64 HRC (653-722 HB) e quindi una tensione di snervamento superiore ai 2000 MPa. La scelta di questo tipo di materiali è dettata dal fatto che l'inchiostro metallico è molto abrasivo, per cui è necessario avere dei componenti con un'elevata durezza superficiale. Non essendo però un'applicazione particolarmente gravosa, è sconsigliato l'uso di materiali più performanti come il carburo di tungsteno [51].

In Tabella 5 sono riassunte le quote utilizzate per la modellazione della vite continua per l'estrusione dell'inchiostro a base di polveri di AISI 316L.

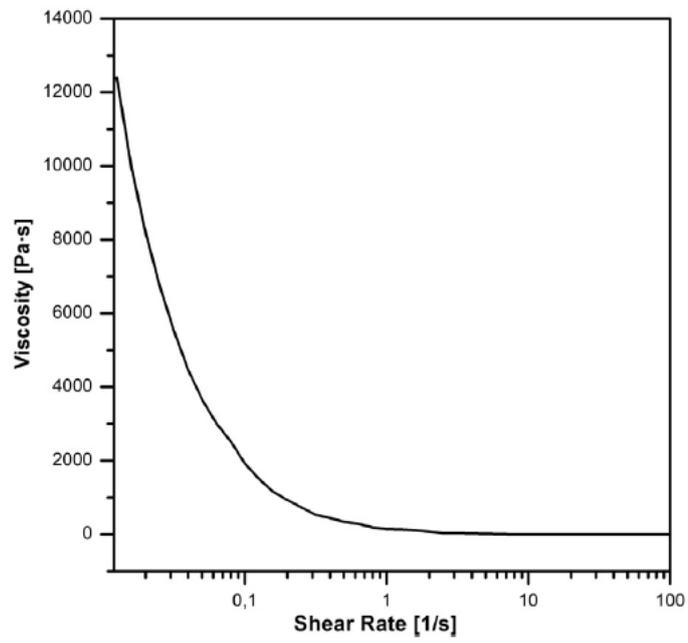


Figura 59 Curva sperimentale della viscosità di inchiostri metallici di Ti6Al4V [44]

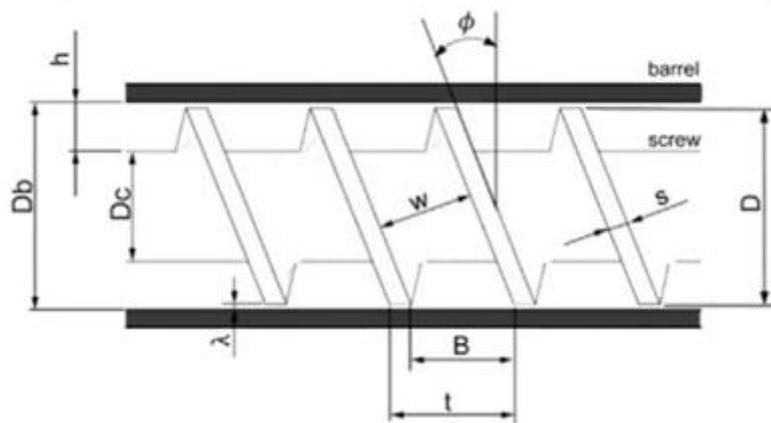


Figura 60 Schema delle quote utilizzate per la vite [49]

Tabella 5 Quote finali calcolate per la vite continua

Quote finali			
Spaziatura fra le ali dell'elicoidale	B	6,00	mm
Diametro esterno della vite	D	8,00	mm
Diametro del cilindro	Db	8,05	mm
Diametro interno zona di alimentazione	Dc,F	4,05	mm
Diametro interno zona di dosaggio	Dc,M	6,75	mm
Lunghezza della vite	L	120,00	mm
Lunghezza zona di alimentazione	Lc	48,00	mm
Lunghezza zona di compressione	Lf	32,00	mm
Lunghezza zona di dosaggio	Lm	40,00	mm
Profondità zona di alimentazione	hf	2,00	mm
Profondità zona di dosaggio	hm	0,65	mm
Spessore dell'ala	s	2,00	mm
Passo dell'elicoidale	t	8,00	mm
Larghezza del canale	w	6,40	mm
Gioco fra vite e cilindro	λ	25,00	μm
Angolo dell'elicoidale	φ	17,66	deg
Aspect ratio	L/D	15,00	
Rapporto di Compressione	ε	2,51	

5.3 Modellazione CAD dell'estrusore a vite continua

Sulla base dei parametri calcolati si è proceduto alla modellazione della vite in ambiente CAD. È stato utilizzato il software di modellazione solida Solidworks, sfruttando la modellazione parametrica per poter scalare le dimensioni nel caso si fosse voluto modificarle. La vite è stata dotata di una punta conica con sformo di 15° , un'estensione cilindrica lunga 24 mm e di diametro pari a quello esterno della vite, D , per consentire un allineamento della vite lungo l'asse cilindrico e di uno spallamento contenente un foro quadrato per l'inserimento di un perno per la trasmissione del moto. Oltre alla vite è stato modellato anche il cilindro (*barrel*) che costituisce il corpo esterno dell'estrusore che va a fissarsi tramite due piastre forate alla testa mobile della stampante. Il cilindro è caratterizzato dal diametro interno D_b per una lunghezza pari alla lunghezza utile della

vite di 120 mm, più un tratto di diametro nominale D lungo il tratto esteso di 24 mm, un foro laterale per l'afflusso dell'inchiostro dalla condotta in pressione ed un tratto con filettatura metrica a passo corto M12x1,25 all'estremità opposta per permettere il fissaggio della punta di estrusione. Infine, è stata modellata una punta adatta alla co-estrusione dell'inchiostro e di un rivestimento esterno in fotopolimero. La punta è dotata di un corpo esagonale di dimensioni esterne compatibili a quelle di un dado M16, ed un foro interno con filettatura M12x1,25 adatto al fissaggio sul *barrel*, un tratto conico con base di diametro pari a D_b compatibile con il diametro interno del *barrel* e sformo di 15° che porta ad una punta di diametro pari a 0,25 mm da cui viene estruso l'inchiostro metallico. Oltre al condotto principale utilizzato per l'estrusione dell'inchiostro, si è creato un canale interno che porta ad un condotto coassiale di diametro esterno di 0,75 mm per l'erogazione di un eventuale fotopolimero che potrebbe ricoprire il filamento di inchiostro modificando quindi il meccanismo di consolidamento e creando di fatto un nuovo processo di robocasting. Sulla parte esagonale della punta è stato creato un attacco filettato M4 per il collegamento con la condotta esterna del fotopolimero e il canale interno di diametro interno 2 mm che porta al condotto coassiale.

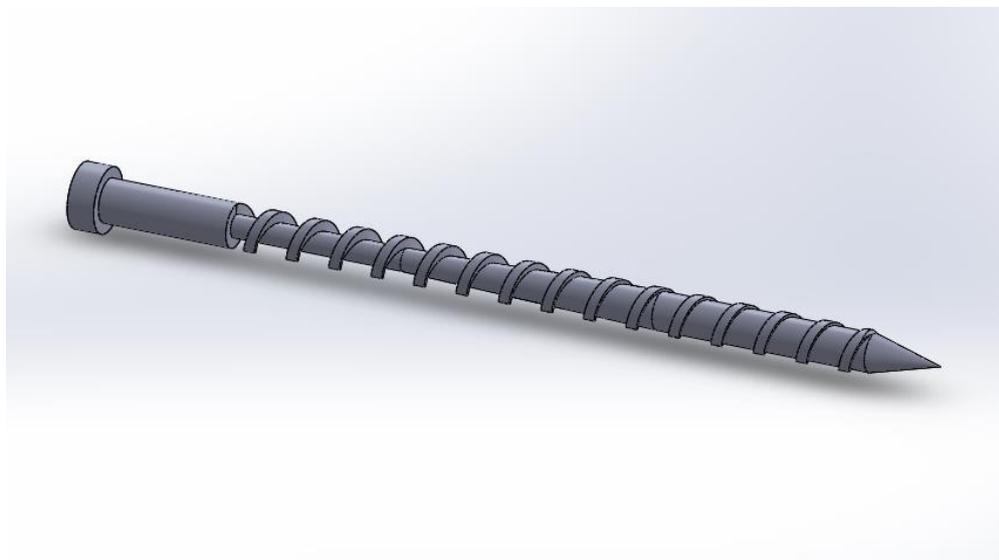


Figura 61 Vista 3D della vite modellata

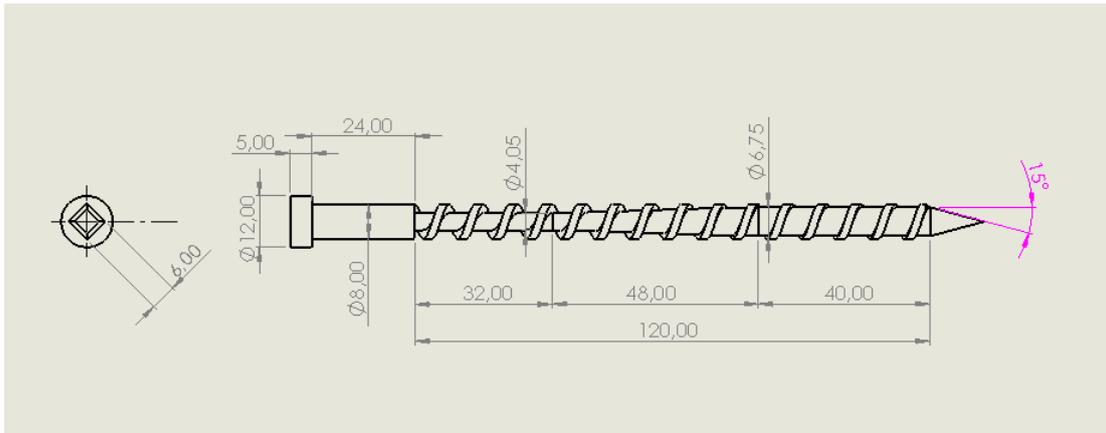


Figura 62 Tavola quotata della vite

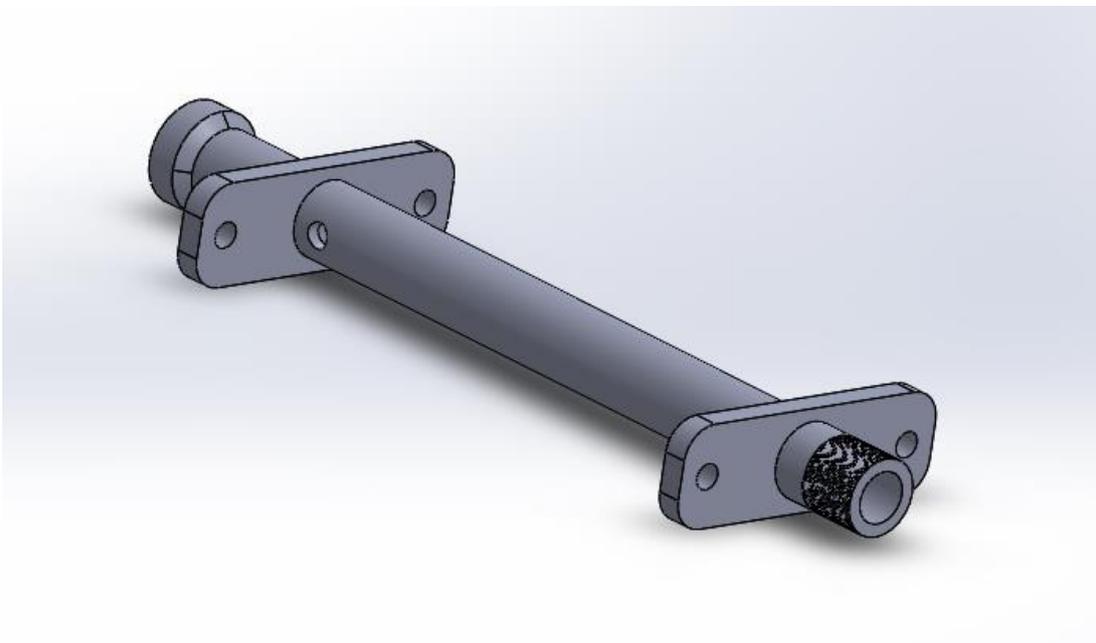


Figura 63 Cilindro (barrel) in cui va inserita la vite

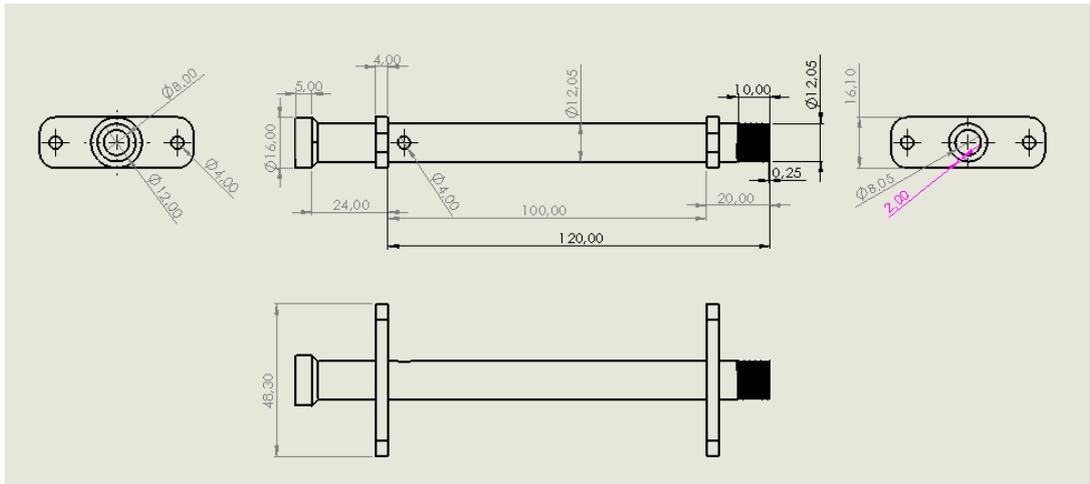


Figura 64 Tavola quotata del barrel

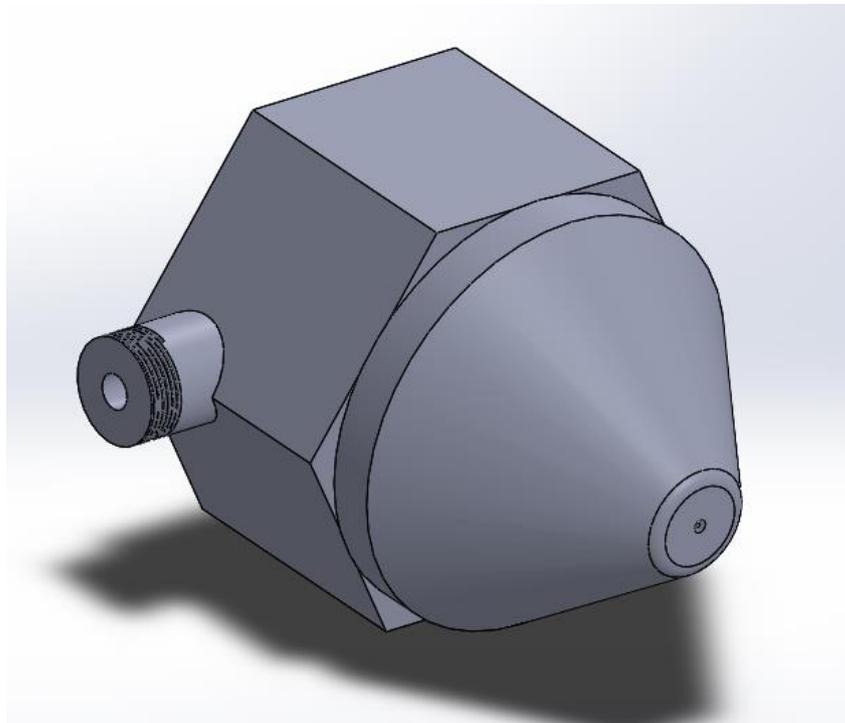


Figura 65 Vista anteriore della punta di estrusione bi-materiale

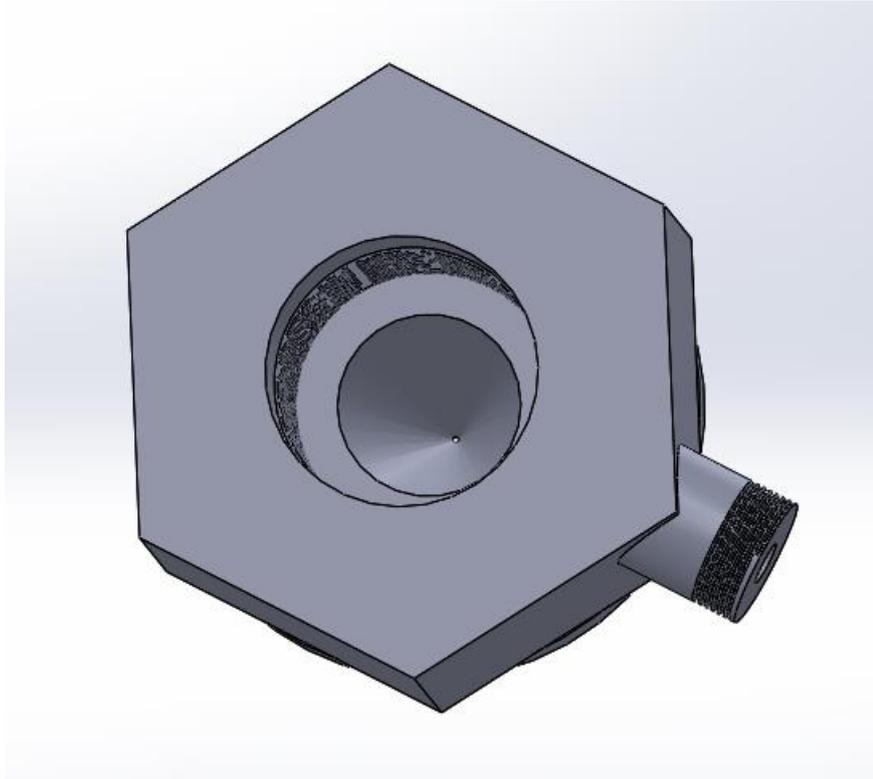


Figura 66 Vista posteriore della punta di estrusione, con filettatura interna M12x1,25 adatta al collegamento con il barrel

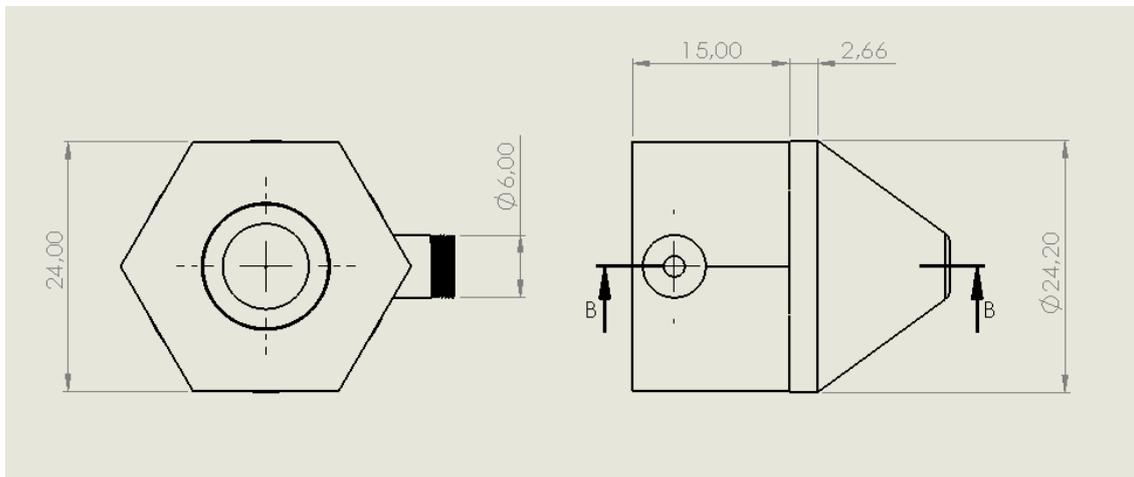


Figura 67 Tavola quotata della punta di estrusione

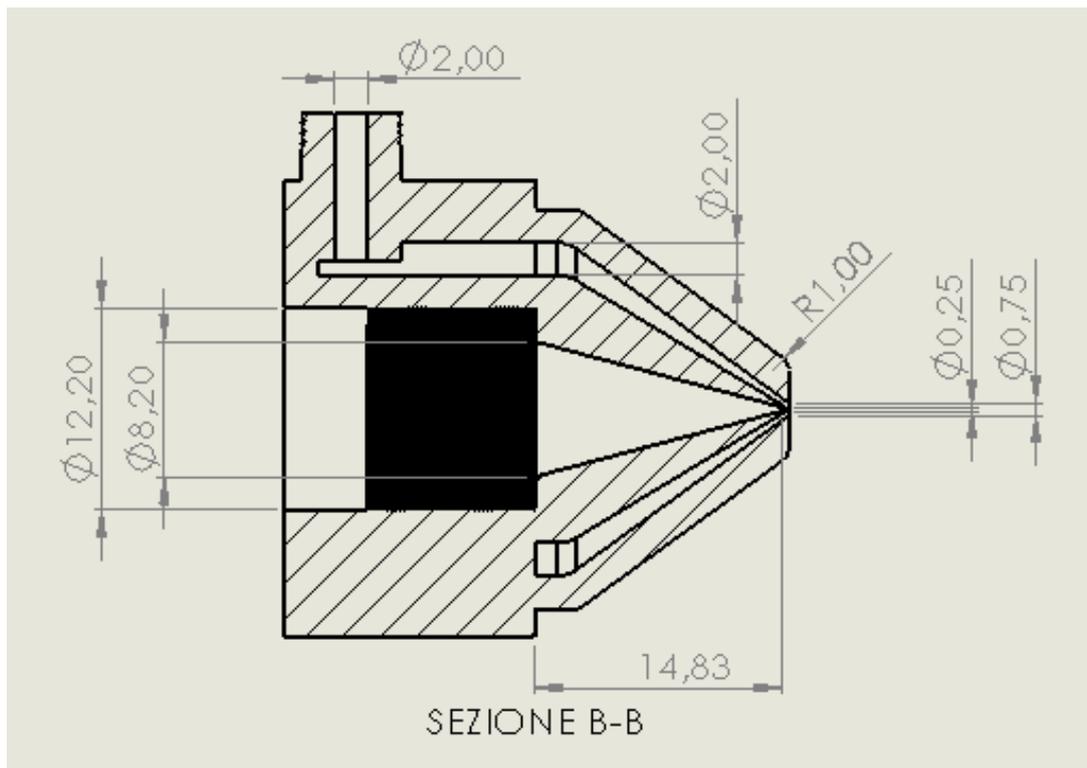


Figura 68 Vista in sezione della punta di estrusione bi-materiale

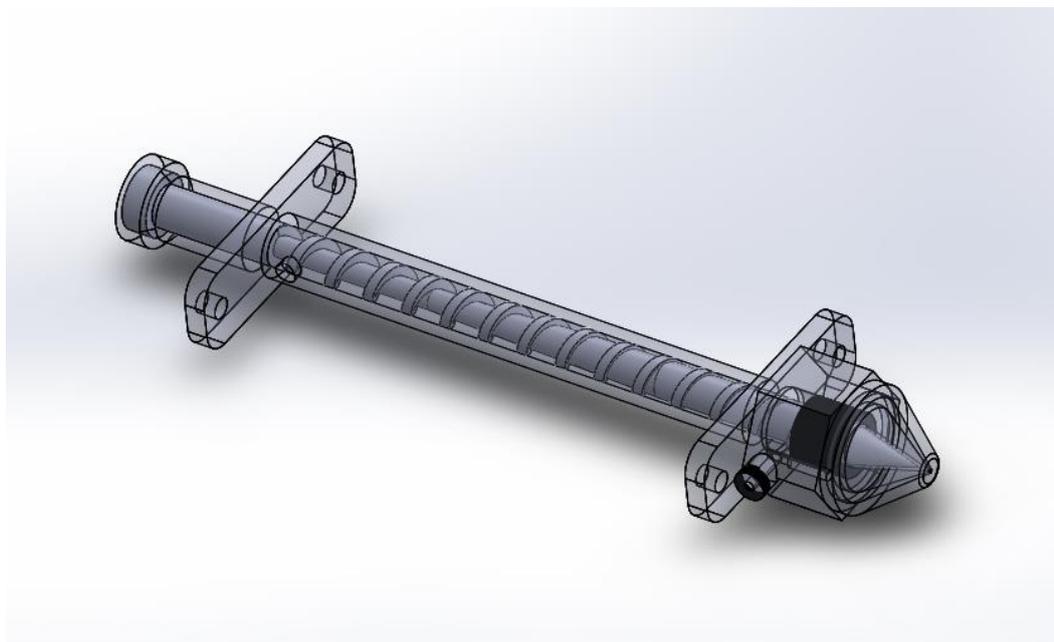


Figura 69 Vista dell'assieme estrusore, il barrel e la punta sono resi trasparenti per rendere visibile la vite

Conclusioni

Il lavoro svolto è servito a valutare le potenzialità del *Direct Ink Writing*, un processo additivo molto semplice ed economico attualmente utilizzato per la stampa dei più disparati materiali. Si è visto come questo processo è in grado di superare l'ormai tradizionale stampa per strati piani con il semplice aiuto di un robot superando il limite di dover depositare il filamento estruso in direzione concorde alla gravità. La stampa di inchiostri metallici tramite *Direct Ink Writing* è ancora poco sviluppata in ambito commerciale, sebbene rappresenti un'alternativa interessante ai processi a deposizione di energia e a fusione su letto di polveri per diversi aspetti quali il miglior controllo della microstruttura del materiale stampato, la minore presenza di difetti superficiali, di stress termici e di deformazione differenziale, il minor consumo di energia e di materia prima. Tuttavia, si sono riscontrati alcuni limiti come l'impossibilità di interrompere il filamento e l'impossibilità di effettuare incroci all'interno di uno stesso strato. Per ovviare a questo limite si suggerisce lo sviluppo di un estrusore capace di variare il diametro del filamento di almeno il 50% in fase di stampa, in modo da poter effettuare passaggi affiancati o sovrapposti senza invadere lo spazio dello strato successivo e senza ispessire notevolmente la struttura. In questo modo si può superare questo grosso limite del DIW che riduce le possibili geometrie realizzabili con questo processo. Durante la stampa con la sirigna-serbatoio si è resa necessaria una leggera ventilazione per accelerare l'evaporazione troppo lenta del solvente, che portava al collasso del filamento dopo la deposizione di 10-12 strati sovrapposti. Un inchiostro di questo tipo sarebbe difficilmente utilizzabile nella stampa su superfici curve senza alcun ausilio all'evaporazione del solvente, tuttavia, utilizzando un estrusore a vite continua come quello descritto nell'ultimo capitolo, è possibile utilizzare un inchiostro con una percentuale ancora minore di solvente in quanto l'azione meccanica della vite consente un enorme abbassamento della viscosità dell'inchiostro in fase di estrusione. L'utilizzo degli script MatLab si è rivelato molto utile per la generazione di codici macchina per la stampa su superfici piane in questa fase di ricerca e definizione dei percorsi ottimali per la realizzazione di strutture auxetiche chirali con il DIW, non essendoci software di *slicing* specifici per questo tipo di processo. Questi script possono essere un punto di partenza sia per lo sviluppo del codice Java utilizzato dal braccio robotico che per la

programmazione di un futuro software di *slicing* adatto al DIW, specie sarà sviluppata la modalità proposta dell'estrusore a diametro variabile per il superamento dei limiti di stampa riscontrati in questa tesi. L'utilizzo di un fotopolimero coestruso con l'inchiostro metallico proposto nel progetto dell'estrusore può rappresentare una diversa direzione di sviluppo del *Direct Ink Writing* per quanto riguarda la modalità di consolidamento del materiale depositato. Si può quindi dire che il *Direct Ink Writing* permette di realizzare componenti con un minor impatto economico ed ambientale, e risulta promettente anche dal punto di vista della stampa su superfici curve se opportunamente sviluppato.

Appendice

Di seguito vengono riportati gli script MatLab implementati per la scrittura automatica dei Gcode necessari alla stampa degli scaffold, dei provini auxetici tetrachirali e dei provini auxetici esachirali.

Scaffold

```
% scaffold.m
%
% Scaffold G-code generator 2.0
% CD
% gennaio 2020
%
clc
clear all
% Definizione parametri geometrici scaffold quadrato
d = input('diametro filamento in [mm] (es. 0.4) '); % diametro
filamento = nozzle
l = input('distanza tra i filamenti in [mm] (es. 0.4) '); % distanza tra
i filamenti
h = d -(d*12/100); % altezza di
alzata per ogni layer (compenetrazione filamenti)
R = input('numero ripetizione blocco, (definisce grandezza dello scaffold
sul piano XY) '); % ripetizione blocco, tratto lungo-curva-tratto lungo
curva
Q = input('vuoi l''altezza scaffold in mm o numero di layers? scrivi 1 per
mm o 2 per layers ');
while (Q~= 1)&&(Q~=2)
    fprintf('hai sbagliato, deve essere 1 o 2 \n');
    Q = input('vuoi l''altezza scaffold in mm o numero di layers? scrivi 1
per mm o 2 per layers ');
end
if Q == 1
    H_mm = input('quanto alto in mm? ');
    n = H_mm/(h*2);
    n = 2*ceil(n);
```

```

    H_mm = n*h;
    fprintf('l'altezza finale del tuo scaffold sara' circa %3.3f mm
\n\n', H_mm);
elseif Q == 2
    n = input('quanti layers? metti un multiplo di 2 ');
    if mod(n,2) ~=0
        fprintf('hai sbagliato, deve essere un multiplo di 2 \n');
        n = input('quanti layers? metti un multiplo di 2 ');
    end
    H_mm = n*h;
    fprintf('l'altezza finale del tuo scaffold sara' circa %3.3f mm
\n\n', H_mm);
end
offc = input('di quanto vuoi che le curve sporgano? (0 = a filo) [mm] ');
%offsetcurva
V = input('velocità di stampa mm/min '); %METTERE INPUT VELOCITÀ DI STAMPA
DA 200 A 1500 OK
alfa_grad = 0;
alfa_rad = alfa_grad*pi/180;
angolo_45 = 45*pi/180; %angolo della curva che forse varierà quando
cambiero inclinazione filamenti scaffold
l_d = l+d;
l_d_2 = l_d/2;
L = ((l_d)*2*(R));% lunghezza scaffold tratti lunghi senza curve, curve
all'esterno
fprintf('Dimensione utile scaffold dello scaffold quadrato: L = %2.3f
\n',L);
width = L+l_d+d+offc*2;
raggio_centro_scaffold = (width/2)*sqrt(2);
%if <alfa_rad< % devo descrivere dove si può trovare l'angolo, cambieranno
i segni
corr_X = -(raggio_centro_scaffold*cos(alfa_rad)-
raggio_centro_scaffold*cos(angolo_45));
corr_Y = (raggio_centro_scaffold*sin(angolo_45)-
raggio_centro_scaffold*sin(alfa_rad));
filename =
sprintf('SCAFFOLD%3.0fx%3.0f_%1.0fx%1.0f.gcode',d*1000,l*1000,R,n);
fid = fopen(filename,'wt');
fprintf(fid,';-----
\n');

```

```

fprintf(fid,';                                GCODE SCAFFOLD \n');
fprintf(fid,';-----
\n');
fprintf(fid,'; generato con uno script! \n');
fprintf(fid,'; SCAFFOLD %3.0fx%3.0f\t\n; #layers: %3.0f\t larghezza: %3.2f
mm\t altezza: %3.2f mm \n',d*1000,l*1000,n,width,H_mm);
fprintf(fid,'; SCAFFOLD velocità di stampa %4.0f mm/min \n',V);
%APERTURA --- DA CAMBIARE
fprintf(fid,'T0 \n');
fprintf(fid,'G21                ;metric values \n');
fprintf(fid,'G90                ;absolute positioning \n');
fprintf(fid,'M82                ;set extruder to absolute mode \n');
fprintf(fid,'M107               ;start with the fan off \n');
fprintf(fid,'G28 X0 Y0          ;move X/Y to min endstops \n');
fprintf(fid,'G28 Z0            ;move Z to min endstops \n');
fprintf(fid,'G1 Z5 F9000        ;move the platform down 15mm \n');
fprintf(fid,'G92 E0              ;zero the extruded length \n');
fprintf(fid,'G1 F200 E6          ;extrude 3mm of feed stock \n');
fprintf(fid,'G92 E0              ;zero the extruded length again \n');
fprintf(fid,'M117 Printing...    ;Put printing message on LCD screen \n');
fprintf(fid,'M106 S10 \n');
%POSIZIONAMENTO iniziale
%fprintf(fid,'G0 Z5 \n')
%fprintf(fid,'F 500 \n')
%fprintf(fid,'G1 X0 Y5 \n')
%fprintf(fid,'G1 X5 Y5 \n');
%fprintf(fid,'G1 Z%3.2f F800 \n',h);
%fprintf(fid,'G91 \n'); %coordinate relative
%fprintf(fid,'G1 X%3.3f Y%3.3f F450 \n',5+corr_X,5+corr_Y);
fprintf(fid,'G1 F3000 X-11.98 Y-26.19 Z0 \n');
%fprintf(fid,'G1 F3000 X-11.98 Y-26.19 Z0\n');
%NON SO PERCHE' L'HA SCRITTO 2 VOLTE QUELLO DELLA WASP
fprintf(fid,'G1 F750 E0 \n');
fprintf(fid,'G92 E0 \n');
X=-20-L; %POSIZIONE DI AVVICINAMENTO
Y=-20-L;
Z=0;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X, Y, Z);
Z=h;

```

```

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;avvicinamento \n', V, X, Y,
Z);
for j=1:2:n
    fprintf(fid,';BLOCCO 1 (andata) inizio layer %3.0f \n',j);
    X=-L/2-offc; %POSIZIONE DI PARTENZA
    Y=-L/2;
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;posizione di partenza \n',
V, X, Y, Z);
    for i=1:R %BLOCCO 1 (direzione X)
        X=X+(L+offc*2)*cos(alfa_rad);
        Y=Y+(L+offc*2)*sin(alfa_rad);
        fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X, Y, Z);
    %spostamento lungo x
        X=X-(l_d)*sin(alfa_rad);
        Y=Y+(l_d)*cos(alfa_rad);
        fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X, Y, Z);
    %spostamento lungo y
        X=X-(L+offc*2)*cos(alfa_rad);
        Y=Y-(L+offc*2)*sin(alfa_rad);
        fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X, Y, Z);
    %spostamento lungo x
        X=X-(l_d)*sin(alfa_rad);
        Y=Y+(l_d)*cos(alfa_rad);
        fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X, Y, Z);
    %spostamento lungo y
        fprintf(fid,'G1\t X%3.3f\t Y%3.3f\t E1 \n',
((L+offc*2)*cos(alfa_rad)),((L+offc*2)*sin(alfa_rad)));
        fprintf(fid,'G1\t X%3.3f\t Y%3.3f\t E1 \n',-((l_d)*sin(alfa_rad)),
(l_d*cos(alfa_rad)));
        fprintf(fid,'G1\t X%3.3f\t Y%3.3f\t E1 \n',-((L+offc*2)*cos(alfa_rad)),-
((L+offc*2)*sin(alfa_rad)));
        fprintf(fid,'G1\t X%3.3f\t Y%3.3f\t E1 \n',-((l_d)*sin(alfa_rad)),
(l_d*cos(alfa_rad)));
    end
    X=X+(L+offc*2)*cos(alfa_rad);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X, Y, Z); % chiusura
layer 1
    %OK FINO A QUA
    fprintf(fid,';Percorso di RACCORDO tra LAYERS \n');

```

```

    fprintf(fid,'G1\t X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f \n\n', -
    ((offc/cos(angolo_45))*cos(angolo_45-alfa_rad)),
    ((offc/sin(angolo_45))*sin(angolo_45-alfa_rad)), h)
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(1_d*2)+1, Y, Z);
%passo 1
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(1_d*2), Y+1, Z);
%passo 1
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(1_d*2), Y-
(L+offc)-1, Z); %passo 2
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(1_d*2)+1, Y-
(L+offc), Z); %passo 2
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(1_d*2+2*offc+L)-
1, Y-(L+offc), Z); %passo 3
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(1_d*2+2*offc+L),
Y-(L+offc)-1, Z); %passo 3
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(1_d*2+2*offc+L),
Y+offc+2, Z); %passo 4
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(1_d*2+2*offc+L)-
1, Y+offc+1, Z); %passo 4
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-offc, Y+offc+1,
Z); %passo 5
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-offc, Y+offc, Z);
%passo 5
    fprintf(fid,';BLOCCO 2 (ritorno) inizio layer %3.0f \n',j+1);
    X=X-offc;
    Y=Y+offc;
    Z=Z+h;
    for i=1:R %BLOCCO 2 (direzione Y)
        %X=X+(L+offc*2)*sin(alfa_rad);
        %Y=Y-(L+offc*2)*cos(alfa_rad);
        fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X, Y, Z);
%spostamento lungo x
        X=X-(1_d*cos(alfa_rad));
        Y=Y-(1_d)*sin(alfa_rad);
        fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X, Y, Z);
%spostamento lungo y
        X=X-(L+offc*2)*sin(alfa_rad);
        Y=Y-(L+offc*2)*cos(alfa_rad);
        fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X, Y, Z);
%spostamento lungo x

```

```

X=X-(l_d*cos(alfa_rad));
Y=Y-(l_d)*sin(alfa_rad);
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X, Y, Z);
%spostamento lungo y
X=X+(L+offc*2)*sin(alfa_rad);
Y=Y+(L+offc*2)*cos(alfa_rad);
%fprintf(fid,'G1\t X%3.3f\t Y%3.3f\t E1 \n',(L+offc*2)*sin(alfa_rad),-
((L+offc*2)*cos(alfa_rad)));
%fprintf(fid,'G1\t X%3.3f\t Y%3.3f\t E1 \n', -((l_d)*cos(alfa_rad)), -
((l_d)*sin(alfa_rad)));
%fprintf(fid,'G1\t X%3.3f\t Y%3.3f\t E1 \n', -
((L+offc*2)*sin(alfa_rad)),(L+offc*2)*cos(alfa_rad));
%fprintf(fid,'G1\t X%3.3f\t Y%3.3f\t E1 \n',-((l_d)*cos(alfa_rad)), -
((l_d)*sin(alfa_rad)));
end
Y=Y-(L+offc*2)*cos(alfa_rad);
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X, Y, Z); % chiusura
layer 2
fprintf(fid,';Percorso di RACCORDO tra LAYERS \n');
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X, Y-(l_d*2)-1, Z);
%passo 1
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-1, Y-(l_d*2), Z);
%passo 1
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(L+offc)+1, Y-
(l_d*2), Z); %passo 2
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(L+offc), Y-
(l_d*2)-1, Z); %passo 2
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(L+offc),
Y+(l_d*2+2*offc+L)+1, Z); %passo 3
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(L+offc)+1,
Y+(l_d*2+2*offc+L), Z); %passo 3
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(offc+2),
Y+(l_d*2+2*offc+L), Z); %passo 4
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(offc+1),
Y+(l_d*2+2*offc+L)+1, Z); %passo 4
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(offc+1), Y+offc,
Z); %passo 5
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-offc, Y+offc, Z);
%passo 5
X=X-offc;

```

```

Y=Y+offc;
Z=Z+h;
end
%CHIUSURA
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X, Y-(l_d+offc)+10,
Z); %si allontana
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X, Y-(l_d+offc)+25,
Z+100); %si alza
fprintf(fid,'G92 E0');
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V/2, X, Y-(l_d+offc)+25,
Z+100);
fprintf(fid,'G92 E0');
fprintf(fid,';End GCode');
fprintf(fid,'M104 S0 ;extruder heater off');
fprintf(fid,'M140 S0 ;heated bed heater off (if you have it)');
fprintf(fid,'G91 ;relative positioning');
fprintf(fid,'G1 E-1 F300 ;retract the filament a bit');
fprintf(fid,'G1 Z+1 E-5 F9000 ;move Z up a bit and retract filament even
more');
fprintf(fid,'M107 ;fan off');
fprintf(fid,'G28 X0 Y0 ;move X/Y to min endstops, so the head is out of the
way');
fprintf(fid,';M84 ;steppers off');
fprintf(fid,'G90 ;absolute positioning');
%CHIUSURA PROGRAMMA
fclose (fid);
disp('OK il procedimento e'' andato a buon fine.' );
disp('Il file .gcode e'' stato creato nella cartella di lavoro.');
```

Provino auxetico tetrachirale

```

% scaffold.m
%
% Auxetic G-code generator 1.0
% CD
% maggio 2020
%
clc
clear all
% Definizione parametri geometrici scaffold quadrato
```

```

d = input('diametro filamento in [mm] (es. 0.4) '); % diametro
filamento = nozzle
l = input('distanza tra i filamenti in [mm] (es. 0.4) '); % distanza tra
i filamenti
h = d*0.8; % altezza di alzata per
ogni layer (compenetrazione filamenti)
C = input('numero di colonne, pari__');
if mod(C,2) ~=0
    fprintf('hai sbagliato, deve essere un multiplo di 2 \n');
    C = input('Quante colonne e righe? Metti un multiplo di 2');
end
R = input('numero di righe, pari__');
if mod(R,2) ~=0
    fprintf('hai sbagliato, deve essere un multiplo di 2 \n');
    R = input('Quante colonne e righe? Metti un multiplo di 2');
end
Q = input('vuoi l''altezza scaffold in mm o numero di layers? scrivi 1 per
mm o 2 per layers ');
while (Q~= 1)&&(Q~=2)
    fprintf('hai sbagliato, deve essere 1 o 2 \n');
    Q = input('vuoi l''altezza scaffold in mm o numero di layers? scrivi 1
per mm o 2 per layers ');
end
if Q == 1
    H_mm = input('quanto alto in mm? ');
    n = H_mm/h; %numero layers
    n = ceil(n);
    H_mm = n*h;
    fprintf ('l''altezza finale del tuo scaffold sara'' circa %3.3f mm
\n\n', H_mm);
elseif Q == 2
    n = input('quanti layers?'); %numero layers
    H_mm = n*h;
    fprintf ('l''altezza finale del tuo scaffold sara'' circa %3.3f mm
\n\n', H_mm);
end
offc = input('Spessore attacchi (Ø = a filo) [mm] '); %offsetcurva
V = input('velocità di stampa mm/min '); %METTERE INPUT VELOCITÀ DI STAMPA
DA 200 A 1500 OK

```

```

%PARAMETRI SCAFFOLD DERIVATI
r=1.87/2+h+d/2; %RAGGIO DEL CERCHIETTO
alfa=atan(2*r/l);
P = (1-(2*l*d/cos(alfa)+pi*r*(3*h+2*d))/(l^2))*100; %porosità
L = l*R+2*r; % lunghezza utile scaffold
width = l*C+2*r+4*h; %larghezza scaffold
fprintf('Dimensione utile scaffold dello scaffold: LxWidth = %2.3fx%2.3f
\n', L, width);
O = width/h; %NUMERO PASSAGGI PER GLI ATTACCHI
O = ceil (O);

%SCRITTURA GCODE
filename = sprintf('TETRA AUX d%3.0fxl%3.0f_%1.0fx%1.0fx%1.0f.gcode',
d*1000, l*1000, R, C, n);
fid = fopen(filename,'wt');
fprintf(fid,';-----
\n');
fprintf(fid,';                                GCODE AUXETIC \n');
fprintf(fid,';-----
\n');
fprintf(fid,'; generato con uno script! \n');
fprintf(fid,'; TETRA AUX  dxl %3.0fx%3.0f \n', d*1000, l*1000);
fprintf(fid,'; layers: %3.0f, righe %1.0f, colonne %1.0f \n', n, R, C);
fprintf(fid,'; lunghezza: %3.2f mm - larghezza: %3.2f mm - altezza: %3.2f mm
\n', L, width, H_mm);
fprintf(fid,'; porosità %3.0f \n - volume necessario = %3.3f', P,
L*width*H_mm+2*offc);
fprintf(fid,'; Velocità di stampa %4.0f mm/min \n',V);
%APERTURA --- DA CAMBIARE
fprintf(fid,'T0 \n');
fprintf(fid,'G21                ;metric values \n');
fprintf(fid,'G90                ;absolute positioning \n');
fprintf(fid,'M82                ;set extruder to absolute mode \n');
fprintf(fid,'M107               ;start with the fan off \n');
fprintf(fid,'G28 X0 Y0          ;move X/Y to min endstops \n');
fprintf(fid,'G28 Z0            ;move Z to min endstops \n');
fprintf(fid,'G1 Z5 F9000        ;move the platform down 15mm \n');
fprintf(fid,'G92 E0            ;zero the extruded length \n');
fprintf(fid,'G1 F200 E6         ;extrude 3mm of feed stock \n');
fprintf(fid,'G92 E0            ;zero the extruded length again \n');

```

```

fprintf(fid,'M117 Printing... ;Put printing message on LCD screen \n');
fprintf(fid,'M106 S10 \n');
%POSIZIONAMENTO iniziale --- METTERE UNA CORSA LENTA

%NON SO PERCHE' L'HA SCRITTO 2 VOLTE QUELLO DELLA WASP
fprintf(fid,'G1 F750 E0 \n');
fprintf(fid,'G92 E0 \n');
X=-20-width/2; %POSIZIONE DI AVVICINAMENTO
Y=-20-L/2;
Z=0;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V/2, X, Y, Z); %Si
avvicina a metà della velocità
Z=h;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;avvicinamento \n', V, X, Y,
Z);

%POSIZIONE DI PARTENZA 1
X=-width/2;
Y=-L/2;
Xp=X;
Yp=Y;

%INIZIO LAYER
for j=1:n
fprintf(fid, ';inizio layer %3.0f \n',j);
Y=Y-1;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+2*h), Y+h, Z);

%GIRO PRELIMINARE
for i=1:C/2
%POS 2
Y=Y+1;
%PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA esterno
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;GIRO PRELIMINARE \n', V, X-
(r+2*h)*cos(alfa), Y-(r+2*h)*sin(alfa), Z);
%G2 ARCO IN SENSO ORARIO I QUADRANTE esterno
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(alfa), Y+(r+h)*sin(alfa), Z);

```

```

    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/4), Y+(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO II QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/4),
Y+r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(alfa),
Y+r*sin(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO II QUADRANTE interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*cos(alfa), Y+(r-h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(pi/4), Y+(r-h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(alfa), Y+(r-h)*cos(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO I QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/4),
Y+r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(alfa),
Y+r*sin(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO IV QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(alfa), Y-(r+h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/4), Y-(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA esterno
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+2*h)*sin(alfa),
Y-(r+2*h)*cos(alfa), Z);
%POS 3
X=X+1;
%PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA esterno
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 3 \n', V, X-
(r+2*h)*sin(alfa), Y+(r+2*h)*cos(alfa), Z);

```

```

%G2 ARCO IN SENSO ORARIO II QUADRANTE esterno
  fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
  fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/4), Y+(r+h)*cos(pi/4), Z);
  fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(alfa), Y+(r+h)*sin(alfa), Z);
%G2 ARCO IN SENSO ORARIO III QUADRANTE centro
  fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(alfa), Y-
r*sin(alfa), Z);
  fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/4), Y-
r*cos(pi/4), Z);
  fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
%G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO III QUADRANTE interno
  fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(alfa), Y-(r-h)*cos(alfa), Z);
  fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(pi/4), Y-(r-h)*cos(pi/4), Z);
  fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*cos(alfa), Y-(r-h)*sin(alfa), Z);
%G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO II QUADRANTE centro
  fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(alfa),
Y+r*sin(alfa), Z);
  fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/4),
Y+r*cos(pi/4), Z);
  fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
%G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO I QUADRANTE esterno
  fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
  fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/4), Y+(r+h)*cos(pi/4), Z);
  fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(alfa), Y+(r+h)*sin(alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA esterno
  fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 3 \n', V, X-
(r+2*h)*cos(alfa), Y-(r+2*h)*sin(alfa), Z);
Y=Y-1;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+2*h), Y+h, Z);

```

```

X=X+1;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+2*h), Y+h, Z);
end
%POS 2
Y=Y+1;
%PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA esterno
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;GIRO PRELIMINARE \n', V, X-
(r+2*h)*cos(alfa), Y-(r+2*h)*sin(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO I QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(alfa), Y+(r+h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/4), Y+(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO II QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/4),
Y+r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(alfa),
Y+r*sin(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO II QUADRANTE interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*cos(alfa), Y+(r-h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(pi/4), Y+(r-h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(alfa), Y+(r-h)*cos(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO I QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/4),
Y+r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(alfa),
Y+r*sin(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO IV QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(alfa), Y-(r+h)*sin(alfa), Z);

```

```

    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/4), Y-(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA esterno
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+2*h)*sin(alfa),
Y-(r+2*h)*cos(alfa), Z);

%BLOCCO INFERIORE
X=X+(r+2*h);
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;VA AL BLOCCO INFERIORE \n',
V, X, Y-(r+2*h)*cos(alfa), Z);
Y=Yp-(r+2*h);
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;VA AL BLOCCO INFERIORE \n',
V, X, Y, Z);
for i=1:width/h/2
    Y=Y-offc;
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;BLOCCO INFERIORE \n', V,
X, Y, Z);
    X=X-h;
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;BLOCCO INFERIORE \n', V,
X, Y, Z);
    Y=Y+offc;
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;BLOCCO INFERIORE \n', V,
X, Y, Z);
    X=X-h;
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;BLOCCO INFERIORE \n', V,
X, Y, Z);
end

%PASSAGGIO ALLA POS 1
Y=Y-offc;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PASSAGGIO ALLA POS 1 \n', V,
X, Y, Z);
X=X-offc/2;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PASSAGGIO ALLA POS 1 \n', V,
X, Y, Z);
Y=Yp;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PASSAGGIO ALLA POS 1 \n', V,
X, Y, Z);

```

```

X=Xp;
%PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA esterno
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 1 \n', V, X-
(r+2*h)*sin(alfa), Y+(r+2*h)*cos(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO II QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/4), Y+(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(alfa), Y+(r+h)*sin(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO III QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(alfa), Y-
r*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/4), Y-
r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO IV QUADRANTE interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(alfa), Y-(r-h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(pi/4), Y-(r-h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*cos(alfa), Y-(r-h)*sin(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO IV QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(alfa), Y-
r*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/4), Y-
r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO III QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/4), Y-(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(alfa), Y-(r+h)*sin(alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA esterno

```

```

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 1 \n', V,
X+(r+2*h)*cos(alfa), Y+(r+2*h)*sin(alfa), Z);

for i=1:R/2
%RIGA DISPARI
for k=1:C/2
%POS 2
Y=Y+1;
%PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA esterno
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 2 \n', V, X-
(r+2*h)*cos(alfa), Y-(r+2*h)*sin(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO I QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(alfa), Y+(r+h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/4), Y+(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO II QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/4),
Y+r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(alfa),
Y+r*sin(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO II QUADRANTE interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*cos(alfa), Y+(r-h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(pi/4), Y+(r-h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(alfa), Y+(r-h)*cos(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO I QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/4),
Y+r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(alfa),
Y+r*sin(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO IV QUADRANTE esterno

```

```

    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(alfa), Y-(r+h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/4), Y-(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA esterno
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+2*h)*sin(alfa),
Y-(r+2*h)*cos(alfa), Z);
%POS 3
X=X+1;
%PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA esterno
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 3 \n', V, X-
(r+2*h)*sin(alfa), Y+(r+2*h)*cos(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO II QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/4), Y+(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(alfa), Y+(r+h)*sin(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO III QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(alfa), Y-
r*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/4), Y-
r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO III QUADRANTE interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(alfa), Y-(r-h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(pi/4), Y-(r-h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*cos(alfa), Y-(r-h)*sin(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO II QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(alfa),
Y+r*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/4),
Y+r*cos(pi/4), Z);

```

```

    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO I QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/4), Y+(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(alfa), Y+(r+h)*sin(alfa), Z);
    %PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 3 \n', V, X-
(r+2*h)*cos(alfa), Y-(r+2*h)*sin(alfa), Z);
%POS 4
Y=Y-1;
%PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA esterno
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 4 \n', V,
X+(r+2*h)*cos(alfa), Y+(r+2*h)*sin(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO III QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(alfa), Y-(r+h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/4), Y-(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO IV QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/4), Y-
r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(alfa), Y-
r*sin(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO I QUADRANTE interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*cos(alfa), Y+(r-h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(pi/4), Y+(r-h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(alfa), Y+(r-h)*cos(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO I QUADRANTE centro

```

```

    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/4),
Y+r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(alfa),
Y+r*sin(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO IV QUADRANTE esterno
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(alfa), Y-(r+h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/4), Y-(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    %PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA esterno
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 4 \n', V,
X+(r+2*h)*sin(alfa), Y-(r+2*h)*cos(alfa), Z);
    %POS 5
    X=X+1;
    %PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA esterno
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 5 \n', V, X-
(r+2*h)*sin(alfa), Y+(r+2*h)*cos(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO II QUADRANTE esterno
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/4), Y+(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(alfa), Y+(r+h)*sin(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO III QUADRANTE centro
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(alfa), Y-
r*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/4), Y-
r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO IV QUADRANTE interno
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(alfa), Y-(r-h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(pi/4), Y-(r-h)*cos(pi/4), Z);

```

```

    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*cos(alfa), Y-(r-h)*sin(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO IV QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(alfa), Y-
r*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/4), Y-
r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO III QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/4), Y-(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(alfa), Y-(r+h)*sin(alfa), Z);
    %PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 5 \n', V,
X+(r+2*h)*cos(alfa), Y+(r+2*h)*sin(alfa), Z);
end
%POS 6
Y=Y+1;
%PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA esterno
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 6 \n', V, X-
(r+2*h)*cos(alfa), Y-(r+2*h)*sin(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO I QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(alfa), Y+(r+h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/4), Y+(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO II QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/4),
Y+r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(alfa),
Y+r*sin(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO III QUADRANTE interno

```

```

    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*cos(alfa), Y-(r-h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(pi/4), Y-(r-h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(alfa), Y-(r-h)*cos(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO III QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/4), Y-
r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(alfa), Y-
r*sin(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO II QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(alfa), Y+(r+h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/4), Y+(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
    %PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 6 \n', V, X-
(r+2*h)*sin(alfa), Y+(r+2*h)*cos(alfa), Z);

    %RIGA PARI
    for k=1:C/2
    %POS 7
    X=X-1;
    %PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 7 \n', V,
X+(r+2*h)*sin(alfa), Y-(r+2*h)*cos(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO IV QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/4), Y-(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(alfa), Y-(r+h)*sin(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO I QUADRANTE centro

```

```

    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(alfa),
Y+r*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/4),
Y+r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO I QUADRANTE interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(alfa), Y+(r-h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(pi/4), Y+(r-h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*cos(alfa), Y+(r-h)*sin(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO IV QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(alfa), Y-
r*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/4), Y-
r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO III QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/4), Y-(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(alfa), Y-(r+h)*sin(alfa), Z);
    %PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 7 \n', V,
X+(r+2*h)*cos(alfa), Y+(r+2*h)*sin(alfa), Z);
    %POS 8
    Y=Y+1;
    %PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 8 \n', V, X-
(r+2*h)*cos(alfa), Y-(r+2*h)*sin(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO I QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(alfa), Y+(r+h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/4), Y+(r+h)*cos(pi/4), Z);

```

```

    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO II QUADRANTE centro
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/4),
Y+r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(alfa),
Y+r*sin(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO III QUADRANTE interno
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*cos(alfa), Y-(r-h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(pi/4), Y-(r-h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(alfa), Y-(r-h)*cos(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO III QUADRANTE centro
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/4), Y-
r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(alfa), Y-
r*sin(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO II QUADRANTE esterno
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(alfa), Y+(r+h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/4), Y+(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
    %PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA esterno
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 8 \n', V, X-
(r+2*h)*sin(alfa), Y+(r+2*h)*cos(alfa), Z);
    %POS 9
    X=X-1;
    %PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA esterno
    fprintf(fid, 'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 9 \n', V,
X+(r+2*h)*sin(alfa), Y-(r+2*h)*cos(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO IV QUADRANTE esterno

```

```

    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/4), Y-(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(alfa), Y-(r+h)*sin(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO I QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(alfa),
Y+r*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/4),
Y+r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO II QUADRANTE interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(alfa), Y+(r-h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(pi/4), Y+(r-h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*cos(alfa), Y+(r-h)*sin(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO II QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(alfa),
Y+r*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/4),
Y+r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO I QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/4), Y+(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(alfa), Y+(r+h)*sin(alfa), Z);
    %PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 9 \n', V, X-
(r+2*h)*cos(alfa), Y-(r+2*h)*sin(alfa), Z);
    %POS 10
    Y=Y-1;
    %PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA esterno

```

```

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 10 \n', V,
X+(r+2*h)*cos(alfa), Y+(r+2*h)*sin(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ORARIO III QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(alfa), Y-(r+h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/4), Y-(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO IV QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/4), Y-
r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(alfa), Y-
r*sin(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO IV QUADRANTE interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*cos(alfa), Y-(r-h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(pi/4), Y-(r-h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(alfa), Y-(r-h)*cos(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO III QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/4), Y-
r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(alfa), Y-
r*sin(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO II QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(alfa), Y+(r+h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/4), Y+(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA esterno
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 10 \n', V, X-
(r+2*h)*sin(alfa), Y+(r+2*h)*cos(alfa), Z);

```

end

%PERCORSO ESTERNO

X=X-offc/2;

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PERCORSO ESTERNO \n', V, X,
Y, Z);

Y=Y+l;

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PERCORSO ESTERNO \n', V, X,
Y, Z);

X=Xp;

%POS 1 RIGA SUCCESSIVA

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 1 RIGA SUCCESSIVA \n',
V, X-(r+2*h)*sin(alfa), Y+(r+2*h)*cos(alfa), Z);

%G2 ARCO IN SENSO ORARIO II QUADRANTE esterno

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/4), Y+(r+h)*cos(pi/4), Z);

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(alfa), Y+(r+h)*sin(alfa), Z);

%G2 ARCO IN SENSO ORARIO III QUADRANTE centro

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(alfa), Y-
r*sin(alfa), Z);

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/4), Y-
r*cos(pi/4), Z);

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);

%G2 ARCO IN SENSO ORARIO IV QUADRANTE interno

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(alfa), Y-(r-h)*cos(alfa), Z);

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(pi/4), Y-(r-h)*cos(pi/4), Z);

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*cos(alfa), Y-(r-h)*sin(alfa), Z);

%G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO IV QUADRANTE centro

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(alfa), Y-
r*sin(alfa), Z);

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/4), Y-
r*cos(pi/4), Z);

```

    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO III QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/4), Y-(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(alfa), Y-(r+h)*sin(alfa), Z);
    %PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 1 RIGA SUCCESSIVA \n',
V, X+(r+2*h)*cos(alfa), Y+(r+2*h)*sin(alfa), Z);
end

%PERCORSO ESTERNO

X=Xp;
for i=1:C/2
Y=Y+1;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PERCORSO ESTERNO \n', V, X-
(r+2*h), Y-h, Z);
X=X+1;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PERCORSO ESTERNO \n', V, X-
(r+2*h), Y-h, Z);
%POS 4
Y=Y-1;
%PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA esterno
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 4 \n', V,
X+(r+2*h)*cos(alfa), Y+(r+2*h)*sin(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO III QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(alfa), Y-(r+h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/4), Y-(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO IV QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);

```

```

    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/4), Y-
r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(alfa), Y-
r*sin(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO I QUADRANTE interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*cos(alfa), Y+(r-h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(pi/4), Y+(r-h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(alfa), Y+(r-h)*cos(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO I QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/4),
Y+r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(alfa),
Y+r*sin(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO IV QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(alfa), Y-(r+h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/4), Y-(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    %PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 4 \n', V,
X+(r+2*h)*sin(alfa), Y-(r+2*h)*cos(alfa), Z);
    %POS 5
    X=X+1;
    %PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 5 \n', V, X-
(r+2*h)*sin(alfa), Y+(r+2*h)*cos(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO II QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/4), Y+(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(alfa), Y+(r+h)*sin(alfa), Z);

```

```

%G2 ARCO IN SENSO ORARIO III QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(alfa), Y-
r*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/4), Y-
r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
%G2 ARCO IN SENSO ORARIO IV QUADRANTE interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(alfa), Y-(r-h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(pi/4), Y-(r-h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*cos(alfa), Y-(r-h)*sin(alfa), Z);
%G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO IV QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(alfa), Y-
r*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/4), Y-
r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
%G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO III QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/4), Y-(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(alfa), Y-(r+h)*sin(alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA esterno
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 5 \n', V,
X+(r+2*h)*cos(alfa), Y+(r+2*h)*sin(alfa), Z);
end
Y=Y+(r+2*h);
X=X+(r+2*h);
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;VA AL BLOCCO SUPERIORE \n',
V, X, Y, Z);
for i=1:width/h/2
    Y=Y+offc;
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;BLOCCO SUPERIORE \n',
V, X, Y, Z);

```

```

        X=X-h;
        fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;BLOCCO SUPERIORE \n',
V, X, Y, Z);
        Y=Y-offc;
        fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;BLOCCO SUPERIORE \n',
V, X, Y, Z);
        X=X-h;
        fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;BLOCCO SUPERIORE \n',
V, X, Y, Z);
    end
Y=Y+offc;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PERCORSO ESTERNO \n', V, X,
Y+h, Z);
X=Xp+l*C+offc/2;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PERCORSO ESTERNO \n', V, X,
Y+h, Z);
Y=Yp+l*R;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;LATO DESTRO \n', V, X, Y,
Z);
%LATO DESTRO
for i=1:R/2
%POS 9
X=X-offc/2;
%PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA esterno
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 9 \n', V,
X+(r+2*h)*sin(alfa), Y-(r+2*h)*cos(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO IV QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/4), Y-(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(alfa), Y-(r+h)*sin(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO I QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(alfa),
Y+r*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/4),
Y+r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);

```

```

%G2 ARCO IN SENSO ORARIO II QUADRANTE interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(alfa), Y+(r-h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(pi/4), Y+(r-h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*cos(alfa), Y+(r-h)*sin(alfa), Z);
%G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO II QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(alfa),
Y+r*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/4),
Y+r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
%G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO I QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/4), Y+(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(alfa), Y+(r+h)*sin(alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA esterno
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 9 \n', V, X-
(r+2*h)*cos(alfa), Y-(r+2*h)*sin(alfa), Z);
%POS 4
Y=Y-1;
%PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA esterno
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 4 \n', V,
X+(r+2*h)*cos(alfa), Y+(r+2*h)*sin(alfa), Z);
%G2 ARCO IN SENSO ORARIO III QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(alfa), Y-(r+h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/4), Y-(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
%G2 ARCO IN SENSO ORARIO IV QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);

```

```

    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/4), Y-
r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(alfa), Y-
r*sin(alfa), Z);
    %G2 ARCO IN SENSO ORARIO I QUADRANTE interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*cos(alfa), Y+(r-h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(pi/4), Y+(r-h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(alfa), Y+(r-h)*cos(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO I QUADRANTE centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/4),
Y+r*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(alfa),
Y+r*sin(alfa), Z);
    %G3 ARCO IN SENSO ANTIORARIO IV QUADRANTE esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(alfa), Y-(r+h)*sin(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/4), Y-(r+h)*cos(pi/4), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    %PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 4 \n', V,
X+(r+2*h)*sin(alfa), Y-(r+2*h)*cos(alfa), Z);
    X=X+offc/2;
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;LATO DESTRO \n', V, X, Y,
Z);
    Y=Y-l;
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;LATO DESTRO \n', V, X, Y,
Z);
    end

    %GIRO ALLA POSIZIONE INIZIALE DEL LAYER SUCCESSIVO
    Y=Yp;
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;TORNA IN BASSO \n', V, X, Y-
offc-l/2-h, Z);

```

```

X=Xp;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;TORNA SOTTO LA POS 1 \n', V,
X-(r+h), Y-offc-1/2-h, Z);
%ALZATA AL LAYER SUCCESSIVO
Z=Z+h;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;ALZATA AL LAYER SUCCESSIVO
\n', V, X+(r+h), Y-offc-1/2-h, Z);
end

```

```

%CHIUSURA
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X, Y-offc, Z); %si
allontana
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X, Y-offc, Z+100);
%si alza
fprintf(fid,'G92 E0 \n');
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V/2, X, Y-(1+d+offc)+25,
Z+100);
fprintf(fid,'G92 E0 \n');
fprintf(fid,';End GCode \n');
fprintf(fid,'M104 S0 ;extruder heater off \n');
fprintf(fid,'M140 S0 ;heated bed heater off (if you have it) \n');
fprintf(fid,'G91 ;relative positioning \n');
fprintf(fid,'G1 E-1 F300 ;retract the filament a bit \n');
fprintf(fid,'G1 Z+1 E-5 F9000 ;move Z up a bit and retract filament even
more \n');
fprintf(fid,'M107 ;fan off \n');
fprintf(fid,'G28 X0 Y0 ;move X/Y to min endstops, so the head is out of the
way \n');
fprintf(fid,';M84 ;steppers off \n');
fprintf(fid,'G90 ;absolute positioning \n');
%CHIUSURA PROGRAMMA
fclose (fid);
disp('OK il procedimento e'' andato a buon fine.' );
disp('Il file .gcode e'' stato creato nella cartella di lavoro.');
```

Provino auxetico esachirale

```

% scaffold.m
%
% Auxetic G-code generator 1.0
% CD
% giugno 2020
%
clc
clear all
% Definizione parametri geometrici scaffold quadrato
d = input('diametro filamento in [mm] (es. 0.4) '); % diametro
filamento = nozzle
l = input('distanza tra i filamenti in [mm] (es. 0.4) '); % distanza tra
i filamenti
h = d*0.8; % altezza di alzata per
ogni layer (compenetrazione filamenti)
C = input('numero di colonne, pari__');
a=l*sin(pi/3);
if mod(C,2) ~=0
    fprintf('hai sbagliato, deve essere un multiplo di 2 \n');
    C = input('Quante colonne e righe? Metti un multiplo di 2');
end
R = input('numero di righe, pari__');
if mod(R,2) ~=0
    fprintf('hai sbagliato, deve essere un multiplo di 2 \n');
    R = input('Quante colonne e righe? Metti un multiplo di 2');
end
end
Q = input('vuoi l''altezza scaffold in mm o numero di layers? scrivi 1 per
mm o 2 per layers ');
while (Q~= 1)&&(Q~=2)
    fprintf('hai sbagliato, deve essere 1 o 2 \n');
    Q = input('vuoi l''altezza scaffold in mm o numero di layers? scrivi 1
per mm o 2 per layers ');
end
end
if Q == 1
    H_mm = input('quanto alto in mm? ');
    n = H_mm/h; %numero layers
    n = ceil(n);
    H_mm = n*h;
    fprintf ('l''altezza finale del tuo scaffold sara'' circa %3.3f mm
\n\n', H_mm);

```

```

elseif Q == 2
    n = input('quanti layers?');
    H_mm = n*h;
    fprintf ('l'altezza finale del tuo scaffold sara' circa %3.3f mm
\n\n', H_mm);
end
offc = input('Spessore attacchi (Ø = a filo) [mm] '); %offsetcurva
V = input('velocità di stampa mm/min '); %METTERE INPUT VELOCITÀ DI STAMPA
DA 200 A 1500 OK

%PARAMETRI SCAFFOLD DERIVATI
r=2.055/2; %RAGGIO DEL CERCHIETTO
alfa=atan(2*r/l);
L = l*R+2*r; % lunghezza utile scaffold
width = l*C+2*r+4*h; %larghezza scaffold
fprintf('Dimensione utile scaffold dello scaffold: LxWidth = %2.3fx%2.3f
\n', L, width);
O = width/h; %NUMERO PASSAGGI PER GLI ATTACCHI
O = ceil (O);

%SCRITTURA GCODE
filename = sprintf('Vmax 10-10 d%3.0fxl%3.0f_%1.0fx%1.0fx%1.0f.gcode',
d*1000, l*1000, R, C, n);
fid = fopen(filename,'wt');
fprintf(fid,';-----
\n');
fprintf(fid,';                GCODE AUXETIC \n');
fprintf(fid,';-----
\n');
fprintf(fid,'; generato con uno script! \n');
fprintf(fid,'; HEXA AUX  dxl %3.0fx%3.0f \n', d*1000, l*1000);
fprintf(fid,'; layers: %3.0f, righe %1.0f, colonne %1.0f \n', n, R, C);
fprintf(fid,'; lunghezza: %3.2f mm - larghezza: %3.2f mm - altezza: %3.2f mm
\n', L, width, H_mm);
fprintf(fid,'; Velocità di stampa %3.2f mm/min = 250 mm/min +10%',V);
fprintf(fid,'; Velocità di stampa struts -10%',V);
%APERTURA --- DA CAMBIARE
fprintf(fid,'T0 \n');
fprintf(fid,'G21                ;metric values \n');
fprintf(fid,'G90                ;absolute positioning \n');

```

```

fprintf(fid,'M82                ;set extruder to absolute mode \n');
fprintf(fid,'M107              ;start with the fan off \n');
fprintf(fid,'G28 X0 Y0        ;move X/Y to min endstops \n');
fprintf(fid,'G28 Z0          ;move Z to min endstops \n');
fprintf(fid,'G1 Z5 F9000      ;move the platform down 15mm \n');
fprintf(fid,'G92 E0          ;zero the extruded length \n');
fprintf(fid,'G1 F200 E6       ;extrude 3mm of feed stock \n');
fprintf(fid,'G92 E0          ;zero the extruded length again \n');
fprintf(fid,'M117 Printing... ;Put printing message on LCD screen \n');
fprintf(fid,'M106 S10 \n');
%POSIZIONAMENTO iniziale --- METTERE UNA CORSA LENTA

%NON SO PERCHE' L'HA SCRITTO 2 VOLTE QUELLO DELLA WASP
fprintf(fid,'G1 F750 E0 \n');
fprintf(fid,'G92 E0 \n');
X=-20-width/2; %POSIZIONE DI AVVICINAMENTO
Y=-20-L/2;
Z=0;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V/2, X, Y, Z); %Si
avvicina a metà della velocità
Z=h;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;avvicinamento \n', V, X, Y,
Z);

%POSIZIONE DI PARTENZA 1
X=-width/2;
Y=-L/2;
Xp=X;
Yp=Y;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;posizione di partenza \n',
V/2, X, Y-1/2, Z);

%INIZIO LAYER
for j=1:n
fprintf(fid, ';inizio layer %3.0f \n',j);

%GIRO PRELIMINARE
for i=1:C/2
%POS 5

```

```

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 5 \n', 0.8*V, X-
(r+2*h)*sin(alfa), Y-(r+2*h)*cos(alfa), Z+d);
%III QUADRANTE SENSO ANTIORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/6), Y-(r+h)*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+h)*sin(pi/3-
alfa), Y-(r+h)*cos(pi/3-alfa), Z);
%II QUADRANTE SENSO ANTIORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+r*sin(pi/3+alfa), Y-r*cos(pi/3+alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r, Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(pi/6-
alfa), Y+r*sin(pi/6-alfa), Z);
%I QUADRANTE SENSO ANTIORARIO interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*cos(pi/6+alfa), Y+(r-h)*sin(pi/6+alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*cos(pi/3), Y+(r-h)*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(alfa), Y+(r-h)*cos(alfa), Z);
%I QUADRANTE SENSO ORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(pi/3),
Y+r*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+r*cos(pi/6+alfa), Y+r*sin(pi/6+alfa), Z);
%II QUADRANTE SENSO ORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+h)*cos(pi/6-
alfa), Y+(r+h)*sin(pi/6-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+h), Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/3+alfa), Y-(r+h)*cos(pi/3+alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS DI PARTENZA
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 5 \n', V,
X+(r+2*h)*sin(pi/3-alfa), Y-(r+2*h)*cos(pi/3-alfa), Z);
Y=Y-1/2;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 5 \n', V, X, Y, Z+d);

```

```

X=X+a;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 5 \n', V, X, Y+(r+2*h),
Z+d);
X=X+a;
Y=Y+l/2;
end
%POS 5
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 5 \n', 0.8*V, X-
(r+2*h)*sin(alfa), Y-(r+2*h)*cos(alfa), Z);
%III QUADRANTE SENSO ANTIORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/6), Y-(r+h)*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+h)*sin(pi/3-
alfa), Y-(r+h)*cos(pi/3-alfa), Z);
%II QUADRANTE SENSO ANTIORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+r*sin(pi/3+alfa), Y-r*cos(pi/3+alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r, Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(pi/6-
alfa), Y+r*sin(pi/6-alfa), Z);
%I QUADRANTE SENSO ANTIORARIO interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*cos(pi/6+alfa), Y+(r-h)*sin(pi/6+alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*cos(pi/3), Y+(r-h)*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(alfa), Y+(r-h)*cos(alfa), Z);
%I QUADRANTE SENSO ORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(pi/3),
Y+r*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+r*cos(pi/6+alfa), Y+r*sin(pi/6+alfa), Z);
%II QUADRANTE SENSO ORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+h)*cos(pi/6-
alfa), Y+(r+h)*sin(pi/6-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+h), Y, Z);

```

```

    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/3+alfa), Y-(r+h)*cos(pi/3+alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS DI PARTENZA
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 5 \n', V,
X+(r+2*h)*sin(pi/3-alfa), Y-(r+2*h)*cos(pi/3-alfa), Z);

%BLOCCO INFERIORE
X=X+(r+2*h);
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PASSAGGIO AL BLOCCO
INFERIORE \n', V, X, Y-(r+2*h)*cos(pi/3-alfa), Z);
Y=Y-(r+2*h);
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PASSAGGIO AL BLOCCO
INFERIORE \n', V, X, Y, Z+d);
for i=1:2*h:l*C
Y=Y-offc;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;BLOCCO INFERIORE \n', 0.8*V,
X, Y, Z+d);
X=X-h;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;BLOCCO INFERIORE \n', 0.8*V,
X, Y, Z+d);
Y=Y+offc;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;BLOCCO INFERIORE \n', 0.8*V,
X, Y+h, Z+d);
X=X-h;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;BLOCCO INFERIORE \n', 0.8*V,
X, Y+h, Z+d);
end
Y=Yp;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS PASSAGGIO ALLA POS 1
\n', V, X, Y-1/2, Z+2*h);
X=Xp;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS PASSAGGIO ALLA POS 1
\n', V, X+(r+2*h), Y-1/2, Z+2*h);

for i=1:C/2
%RIGA DISPARI
for k=1:R
%POS 1
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 1 \n', 0.8*V,
X+(r+2*h)*cos(pi/6-alfa), Y+(r+2*h)*sin(pi/6-alfa), Z);

```

```

%I QUADRANTE SENSO ANTIORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(pi/6+alfa), Y+(r+h)*sin(pi/6+alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(pi/3), Y+(r+h)*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
%VI QUADRANTE SENSO ANTIORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(pi/3),
Y+r*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
r*cos(pi/6+alfa), Y+r*sin(pi/6+alfa), Z);
%V QUADRANTE SENSO ANTIORARIO interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-h)*cos(pi/6-
alfa), Y+(r-h)*sin(pi/6-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-h), Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-h)*cos(pi/6-
alfa), Y-(r-h)*sin(pi/6-alfa), Z);
%V QUADRANTE SENSO ORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(pi/6-
alfa), Y-r*sin(pi/6-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r, Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(pi/6-
alfa), Y+r*sin(pi/6-alfa), Z);
%VI QUADRANTE SENSO ORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(pi/6+alfa), Y+(r+h)*sin(pi/6+alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(pi/3), Y+(r+h)*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS DI PARTENZA
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 1 \n', V,
X+(r+2*h)*sin(alfa), Y+(r+2*h)*cos(alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA
Y=Y+1/2;
X=X+a;
%POS 2

```

```

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 2 \n', 0.8*V, X-
(r+2*h)*sin(alfa), Y-(r+2*h)*cos(alfa), Z);
%III QUADRANTE SENSO ANTIORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/6), Y-(r+h)*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+h)*sin(pi/3-
alfa), Y-(r+h)*cos(pi/3-alfa), Z);
%II QUADRANTE SENSO ANTIORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+r*sin(pi/3+alfa), Y-r*cos(pi/3+alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r, Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(pi/6-
alfa), Y+r*sin(pi/6-alfa), Z);
%II QUADRANTE SENSO ORARIO interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-h)*cos(pi/6-
alfa), Y+(r-h)*sin(pi/6-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-h), Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(pi/3+alfa), Y-(r-h)*cos(pi/3+alfa), Z);
%III QUADRANTE SENSO ORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/3-
alfa), Y-r*cos(pi/3-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/6), Y-
r*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
%IV QUADRANTE SENSO ORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/6), Y-(r+h)*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r+h)*sin(pi/3-
alfa), Y-(r+h)*cos(pi/3-alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS DI PARTENZA
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 2 \n', V, X-
(r+2*h)*sin(pi/3+alfa), Y-(r+2*h)*cos(pi/3+alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA
Y=Y+1/2;

```

```

X=X-a;
end
%POS 3
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 1 \n', 0.8*V,
X+(r+2*h)*cos(pi/6-alfa), Y+(r+2*h)*sin(pi/6-alfa), Z);
%I QUADRANTE SENSO ANTIORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(pi/6+alfa), Y+(r+h)*sin(pi/6+alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(pi/3), Y+(r+h)*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
%VI QUADRANTE SENSO ANTIORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(pi/3),
Y+r*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
r*cos(pi/6+alfa), Y+r*sin(pi/6+alfa), Z);
%V QUADRANTE SENSO ANTIORARIO interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-h)*cos(pi/6-
alfa), Y+(r-h)*sin(pi/6-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-h), Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-h)*cos(pi/6-
alfa), Y-(r-h)*sin(pi/6-alfa), Z);
%V QUADRANTE SENSO ORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(pi/6-
alfa), Y-r*sin(pi/6-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r, Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(pi/6-
alfa), Y+r*sin(pi/6-alfa), Z);
%VI QUADRANTE SENSO ORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(pi/6+alfa), Y+(r+h)*sin(pi/6+alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(pi/3), Y+(r+h)*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS DI PARTENZA

```

```

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 1 \n', V,
X+(r+2*h)*sin(alfa), Y+(r+2*h)*cos(alfa), Z);
Y=Y+1/2;
X=X+a;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 3 \n', 0.8*V, X-
(r+2*h)*sin(alfa), Y-(r+2*h)*cos(alfa), Z);
% %III QUADRANTE SENSO ANTIORARIO esterno
%   fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
%   fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/6), Y-(r+h)*cos(pi/6), Z);
%   fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/3-alfa), Y-(r+h)*cos(pi/3-alfa), Z);
% %II QUADRANTE SENSO ANTIORARIO centro
%   fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+r*sin(pi/3+alfa), Y-r*cos(pi/3+alfa), Z);
%   fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r, Y, Z);
%   fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(pi/6-
alfa), Y+r*sin(pi/6-alfa), Z);
% %I QUADRANTE SENSO ANTIORARIO interno
%   fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*cos(pi/6+alfa), Y+(r-h)*sin(pi/6+alfa), Z);
%   fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*cos(pi/3), Y+(r-h)*sin(pi/3), Z);
%   fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(alfa), Y+(r-h)*cos(alfa), Z);
% %I QUADRANTE SENSO ORARIO centro
%   fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
%   fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(pi/3),
Y+r*sin(pi/3), Z);
%   fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+r*cos(pi/6+alfa), Y+r*sin(pi/6+alfa), Z);
% %II QUADRANTE SENSO ORARIO esterno
%   fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(pi/6-alfa), Y+(r+h)*sin(pi/6-alfa), Z);
%   fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+h), Y, Z);
%   fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/3+alfa), Y-(r+h)*cos(pi/3+alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS DI PARTENZA

```

```

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 3 \n', V,
X+(r+2*h)*sin(pi/3-alfa), Y-(r+2*h)*cos(pi/3-alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS SUCCESSIVA
Y=Y-1;
%RIGA PARI
for k=1:R
%POS 4
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 4 \n', 0.8*V, X-
(r+2*h)*cos(pi/6+alfa), Y+(r+2*h)*sin(pi/6+alfa), Z);
%V QUADRANTE SENSO ANTIORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r+h)*cos(pi/6-
alfa), Y+(r+h)*sin(pi/6-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r+h), Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r+h)*cos(pi/6-
alfa), Y-(r+h)*sin(pi/6-alfa), Z);
%IV QUADRANTE SENSO ANTIORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/3-
alfa), Y-r*cos(pi/3-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/6), Y-
r*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
%IV QUADRANTE SENSO ORARIO interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(alfa), Y-(r-h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(pi/6), Y-(r-h)*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-h)*sin(pi/3-
alfa), Y-(r-h)*cos(pi/3-alfa), Z);
%V QUADRANTE SENSO ORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(pi/6-
alfa), Y-r*sin(pi/6-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r, Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(pi/6-
alfa), Y+r*sin(pi/6-alfa), Z);
%VI QUADRANTE SENSO ORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(pi/6+alfa), Y+(r+h)*sin(pi/6+alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(pi/3), Y+(r+h)*sin(pi/3), Z);

```

```

    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS DI PARTENZA
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 4 \n', V,
X+(r+2*h)*sin(alfa), Y+(r+2*h)*cos(alfa), Z);
%PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA
Y=Y+1/2;
X=X+a;
%POS 5
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 5 \n', 0.8*V, X-
(r+2*h)*sin(alfa), Y-(r+2*h)*cos(alfa), Z);
%III QUADRANTE SENSO ANTIORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/6), Y-(r+h)*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+h)*sin(pi/3-
alfa), Y-(r+h)*cos(pi/3-alfa), Z);
%II QUADRANTE SENSO ANTIORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+r*sin(pi/3+alfa), Y-r*cos(pi/3+alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r, Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(pi/6-
alfa), Y+r*sin(pi/6-alfa), Z);
%I QUADRANTE SENSO ANTIORARIO interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*cos(pi/6+alfa), Y+(r-h)*sin(pi/6+alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*cos(pi/3), Y+(r-h)*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(alfa), Y+(r-h)*cos(alfa), Z);
%I QUADRANTE SENSO ORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(pi/3),
Y+r*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+r*cos(pi/6+alfa), Y+r*sin(pi/6+alfa), Z);
%II QUADRANTE SENSO ORARIO esterno

```

```

    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+h)*cos(pi/6-
alfa), Y+(r+h)*sin(pi/6-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+h), Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/3+alfa), Y-(r+h)*cos(pi/3+alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS DI PARTENZA
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 5 \n', V,
X+(r+2*h)*sin(pi/3-alfa), Y-(r+2*h)*cos(pi/3-alfa), Z);
%PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA
Y=Y-1;
%POS 6
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 6 \n', 0.8*V, X-
(r+2*h)*cos(pi/6+alfa), Y+(r+2*h)*sin(pi/6+alfa), Z);
%V QUADRANTE SENSO ANTIORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r+h)*cos(pi/6-
alfa), Y+(r+h)*sin(pi/6-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r+h), Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r+h)*cos(pi/6-
alfa), Y-(r+h)*sin(pi/6-alfa), Z);
%IV QUADRANTE SENSO ANTIORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/3-
alfa), Y-r*cos(pi/3-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/6), Y-
r*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
%III QUADRANTE SENSO ANTIORARIO interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(alfa), Y-(r-h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(pi/6), Y-(r-h)*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-h)*sin(pi/3-
alfa), Y-(r-h)*cos(pi/3-alfa), Z);
%III QUADRANTE SENSO ORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/3-
alfa), Y-r*cos(pi/3-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/6), Y-
r*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);

```

```

%IV QUADRANTE SENSO ORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/6), Y-(r+h)*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r+h)*sin(pi/3-
alfa), Y-(r+h)*cos(pi/3-alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS DI PARTENZA
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 6 \n', V, X-
(r+2*h)*sin(pi/3+alfa), Y-(r+2*h)*cos(pi/3+alfa), Z);
%PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA
Y=Y+l/2;
X=X-a;
%POS 7
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 7 \n', 0.8*V,
X+(r+2*h)*cos(pi/6-alfa), Y+(r+2*h)*sin(pi/6-alfa), Z);
%I QUADRANTE SENSO ANTIORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(pi/6+alfa), Y+(r+h)*sin(pi/6+alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(pi/3), Y+(r+h)*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
%VI QUADRANTE SENSO ANTIORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(pi/3),
Y+r*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
r*cos(pi/6+alfa), Y+r*sin(pi/6+alfa), Z);
%VI QUADRANTE SENSO ORARIO interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*cos(pi/6+alfa), Y+(r-h)*sin(pi/6+alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*cos(pi/3), Y+(r-h)*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-
h)*sin(alfa), Y+(r-h)*cos(alfa), Z);
%I QUADRANTE SENSO ORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);

```

```

    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(pi/3),
Y+r*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+r*cos(pi/6+alfa), Y+r*sin(pi/6+alfa), Z);
%II QUADRANTE SENSO ORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+h)*cos(pi/6-
alfa), Y+(r+h)*sin(pi/6-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+h), Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/3+alfa), Y-(r+h)*cos(pi/3+alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS DI PARTENZA
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 7 \n', V,
X+(r+2*h)*sin(pi/3-alfa), Y-(r+2*h)*cos(pi/3-alfa), Z);
%PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA
Y=Y-1;
end
%RITORNO ALLA POS 1 RIGA SUCCESSIVA
Y=Y-1/2;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;RITORNO ALLA POS 1 RIGA
SUCCESSIVA \n', V, X-(r+2*h), Y, Z+2*h);
X=X+a;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;RITORNO ALLA POS 1 RIGA
SUCCESSIVA \n', V, X+a-(r+2*h), Y, Z+2*h);
Y=Yp;
end

%POS 1 ULTIMA COLONNA
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 1 \n', 0.8*V,
X+(r+2*h)*cos(pi/6-alfa), Y+(r+2*h)*sin(pi/6-alfa), Z);
%I QUADRANTE SENSO ANTIORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(pi/6+alfa), Y+(r+h)*sin(pi/6+alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(pi/3), Y+(r+h)*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
%VI QUADRANTE SENSO ANTIORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);

```

```

    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(pi/3),
Y+r*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
r*cos(pi/6+alfa), Y+r*sin(pi/6+alfa), Z);
%V QUADRANTE SENSO ANTIORARIO interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-h)*cos(pi/6-
alfa), Y+(r-h)*sin(pi/6-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-h), Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-h)*cos(pi/6-
alfa), Y-(r-h)*sin(pi/6-alfa), Z);
%V QUADRANTE SENSO ORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(pi/6-
alfa), Y-r*sin(pi/6-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r, Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(pi/6-
alfa), Y+r*sin(pi/6-alfa), Z);
%VI QUADRANTE SENSO ORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(pi/6+alfa), Y+(r+h)*sin(pi/6+alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(pi/3), Y+(r+h)*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS DI PARTENZA
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 1 \n', V,
X+(r+2*h)*sin(alfa), Y+(r+2*h)*cos(alfa), Z);

%LATO DESTRO
for i=1:R
X=X+a;
Y=Y+l/2;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PERCORSO ESTERNO \n', V, X-
(r+2*h)*sin(alfa), Y-(r+2*h)*cos(alfa), Z);
Y=Y+l/2;
X=X-a;
%POS 1 CHIUSURA LATO DESTRO
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 1 \n', 0.8*V,
X+(r+2*h)*cos(pi/6-alfa), Y+(r+2*h)*sin(pi/6-alfa), Z);
%I QUADRANTE SENSO ANTIORARIO esterno

```

```

    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(pi/6+alfa), Y+(r+h)*sin(pi/6+alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*cos(pi/3), Y+(r+h)*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
%VI QUADRANTE SENSO ANTIORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(pi/3),
Y+r*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
r*cos(pi/6+alfa), Y+r*sin(pi/6+alfa), Z);
%V QUADRANTE SENSO ANTIORARIO interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-h)*cos(pi/6-
alfa), Y+(r-h)*sin(pi/6-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-h), Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r-h)*cos(pi/6-
alfa), Y-(r-h)*sin(pi/6-alfa), Z);
%V QUADRANTE SENSO ORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(pi/6-
alfa), Y-r*sin(pi/6-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r, Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*cos(pi/6-
alfa), Y+r*sin(pi/6-alfa), Z);
%VI QUADRANTE SENSO ORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(pi/6+alfa), Y+(r+h)*sin(pi/6+alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*cos(pi/3), Y+(r+h)*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y+(r+h)*cos(alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS DI PARTENZA
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 1 \n', V,
X+(r+2*h)*sin(alfa), Y+(r+2*h)*cos(alfa), Z);
end

%PERCORSO ESTERNO
Y=Y+1/2;
X=X+a;

```

```

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PERCORSO ESTERNO \n', V, X,
Y, Z);
for i=1:C/2+1
X=X-a;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PERCORSO ESTERNO \n', V, X,
Y, Z);
Y=Y-1/2;
%POS 6
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 6 \n', 0.8*V, X-
(r+2*h)*cos(pi/6+alfa), Y+(r+2*h)*sin(pi/6+alfa), Z);
%V QUADRANTE SENSO ANTIORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r+h)*cos(pi/6-
alfa), Y+(r+h)*sin(pi/6-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r+h), Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r+h)*cos(pi/6-
alfa), Y-(r+h)*sin(pi/6-alfa), Z);
%IV QUADRANTE SENSO ANTIORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/3-
alfa), Y-r*cos(pi/3-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/6), Y-
r*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
%III QUADRANTE SENSO ANTIORARIO interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(alfa), Y-(r-h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(pi/6), Y-(r-h)*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-h)*sin(pi/3-
alfa), Y-(r-h)*cos(pi/3-alfa), Z);
%III QUADRANTE SENSO ORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/3-
alfa), Y-r*cos(pi/3-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/6), Y-
r*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
%IV QUADRANTE SENSO ORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);

```

```

    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/6), Y-(r+h)*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r+h)*sin(pi/3-
alfa), Y-(r+h)*cos(pi/3-alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS DI PARTENZA
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 6 \n', V, X-
(r+2*h)*sin(pi/3+alfa), Y-(r+2*h)*cos(pi/3+alfa), Z);
%PASSAGGIO AL PUNTO DI PARTENZA
Y=Y+l/2;
X=X-a;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PERCORSO ESTERNO \n', V, X,
Y, Z);
end
%BLOCCO SUPERIORE
Y=Yp+l*R+(r+h);
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PERCORSO ESTERNO \n', V, X,
Y, Z+d);
X=Xp+a*C+(r+2*h);
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PERCORSO ESTERNO \n', V, X,
Y, Z+d);
Y=Y+h;
for i=1:2*h:l*C
Y=Y+offc;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;BLOCCO SUPERIORE \n', 0.8*V,
X, Y, Z+d);
X=X-h;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;BLOCCO SUPERIORE \n', 0.8*V,
X, Y, Z+d);
Y=Y-offc;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;BLOCCO SUPERIORE \n', 0.8*V,
X, Y, Z+d);
X=X-h;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;BLOCCO SUPERIORE \n', 0.8*V,
X, Y, Z+d);
end
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;BLOCCO SUPERIORE \n', V, X,
Y, Z+2*h);
%POS 5 CHIUSURA LATO SINISTRO
X=Xp;
Y=Y-l/2-(r+2*h);

```

```

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PERCORSO ESTERNO \n', V, X-
a, Y+(r+2*h), Z+2*h);
Y=Y+1/2;
for i=1:R
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 5 \n', 0.8*V, X-
(r+2*h)*sin(alfa), Y-(r+2*h)*cos(alfa), Z);
%III QUADRANTE SENSO ANTIORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/6), Y-(r+h)*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+h)*sin(pi/3-
alfa), Y-(r+h)*cos(pi/3-alfa), Z);
%II QUADRANTE SENSO ANTIORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+r*sin(pi/3+alfa), Y-r*cos(pi/3+alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r, Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(pi/6-
alfa), Y+r*sin(pi/6-alfa), Z);
%I QUADRANTE SENSO ANTIORARIO interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*cos(pi/6+alfa), Y+(r-h)*sin(pi/6+alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*cos(pi/3), Y+(r-h)*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(alfa), Y+(r-h)*cos(alfa), Z);
%I QUADRANTE SENSO ORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa),
Y+r*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*cos(pi/3),
Y+r*sin(pi/3), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+r*cos(pi/6+alfa), Y+r*sin(pi/6+alfa), Z);
%II QUADRANTE SENSO ORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+h)*cos(pi/6-
alfa), Y+(r+h)*sin(pi/6-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r+h), Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V,
X+(r+h)*sin(pi/3+alfa), Y-(r+h)*cos(pi/3+alfa), Z);
%PASSAGGIO ALLA POS DI PARTENZA

```

```

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 5 \n', V,
X+(r+2*h)*sin(pi/3-alfa), Y-(r+2*h)*cos(pi/3-alfa), Z);
Y=Y-1;
%POS 6
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 6 \n', 0.8*V, X-
(r+2*h)*cos(pi/6+alfa), Y+(r+2*h)*sin(pi/6+alfa), Z);
%V QUADRANTE SENSO ANTIORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r+h)*cos(pi/6-
alfa), Y+(r+h)*sin(pi/6-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r+h), Y, Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r+h)*cos(pi/6-
alfa), Y-(r+h)*sin(pi/6-alfa), Z);
%IV QUADRANTE SENSO ANTIORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/3-
alfa), Y-r*cos(pi/3-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(pi/6), Y-
r*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
%III QUADRANTE SENSO ANTIORARIO interno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(alfa), Y-(r-h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-
h)*sin(pi/6), Y-(r-h)*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+(r-h)*sin(pi/3-
alfa), Y-(r-h)*cos(pi/3-alfa), Z);
%III QUADRANTE SENSO ORARIO centro
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/3-
alfa), Y-r*cos(pi/3-alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(pi/6), Y-
r*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X+r*sin(alfa), Y-
r*cos(alfa), Z);
%IV QUADRANTE SENSO ORARIO esterno
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(alfa), Y-(r+h)*cos(alfa), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-
(r+h)*sin(pi/6), Y-(r+h)*cos(pi/6), Z);
    fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X-(r+h)*sin(pi/3-
alfa), Y-(r+h)*cos(pi/3-alfa), Z);

```

%PASSAGGIO ALLA POS DI PARTENZA

```
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;POS 6 \n', V, X-
(r+2*h)*sin(pi/3+alfa), Y-(r+2*h)*cos(pi/3+alfa), Z);
X=X-a;
Y=Y+1/2;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PERCORSO ESTERNO \n', V, X,
Y+(r+2*h), Z);
Y=Y-1;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PERCORSO ESTERNO \n', V, X,
Y+(r+2*h), Z);
X=X+a;
Y=Y+1/2;
end
```

%GIRO ALLA POSIZIONE INIZIALE DEL LAYER SUCCESSIVO

```
X=Xp-offc;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;PERCORSO ESTERNO \n', V, X,
Y+(r+2*h), Z);
Y=Yp;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;TORNA IN BASSO \n', V, X, Y,
Z);
%ALZATA AL LAYER SUCCESSIVO
Z=Z+h;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;ALZATA AL LAYER SUCCESSIVO
\n', V, X, Y, Z);
X=Xp;
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 ;posizione di partenza layer
successivo \n', V, X, Y-1/2, Z+d);
end
```

%CHIUSURA

```
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X, Y-offc, Z); %si
allontana
fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V, X, Y-offc, Z+100);
%si alza
fprintf(fid,'G92 E0 \n');
```

```

fprintf(fid,'G1 F%4.0f X%3.3f Y%3.3f Z%3.3f E0 \n', V/2, X, Y-(1+d+offc)+25,
Z+100);
fprintf(fid,'G92 E0 \n');
fprintf(fid,';End GCode \n');
fprintf(fid,'M104 S0 ;extruder heater off \n');
fprintf(fid,'M140 S0 ;heated bed heater off (if you have it) \n');
fprintf(fid,'G91 ;relative positioning \n');
fprintf(fid,'G1 E-1 F300 ;retract the filament a bit \n');
fprintf(fid,'G1 Z+1 E-5 F9000 ;move Z up a bit and retract filament even
more \n');
fprintf(fid,'M107 ;fan off \n');
fprintf(fid,'G28 X0 Y0 ;move X/Y to min endstops, so the head is out of the
way \n');
fprintf(fid,';M84 ;steppers off \n');
fprintf(fid,'G90 ;absolute positioning \n');
%CHIUSURA PROGRAMMA
fclose (fid);
disp('OK il procedimento e'' andato a buon fine.' );
disp('Il file .gcode e'' stato creato nella cartella di lavoro.');
```

Bibliografia

- [1] A. International, *ASTM F2792-12a*, 2012.
- [2] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, Chapter 3, Second Edition.
- [3] S. C. Filippo Zanini, *Additive manufacturing technologies, Lecture #5, dispense del corso di METODI DI MODELLAZIONE E TECNOLOGIE PER L'ADDITIVE MANUFACTURING, Università di Padova*, 2018.
- [4] [Online]. Available: <http://drrajivdesaimd.com/2017/06/26/3d-printing/>.
- [5] Optomec, *Metal 3D printing for prototype and for repair applications for small parts*, <https://optomec.com/3d-printed-metals/lens-technology/>, 2018.
- [6] Y. Ding et Al. «Process planning for 8-axis robotized laser-based direct metal deposition system: A case on building revolved part,» *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 44, pp. 67-76, 2017.
- [7] S.W. William et Al. «Wire + Arc additive manufacturing,» *Material Science Technologies*, 2015.
- [8] L. Yuan et Al. «Investigation of humping phenomenon for the multi-directional robotic wire and arc additive manufacturing,» *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 63, 2020.
- [9] I. Gibson et Al. «Directed Energy Deposition Processes,» *Additive Manufacturing Technologies*, pp. 245-268, 2015.
- [10] 3Faktur, 2020. [Online]. Available: <https://3faktur.com/en/3d-printing-materials-technologies/fdm-materials-pla-and-abs/>. [Consultato il giorno 06 2020].
- [11] D.I. Wimpenny et Al. «Rapid laminated tooling,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 138, n. 1-3, pp. 214-218, 2003.
- [12] S. Carmignato, F. Zanini *Additive manufacturing technologies, Lecture #1, dispense del corso di METODI DI MODELLAZIONE E TECNOLOGIE PER L'ADDITIVE MANUFACTURING, Università di Padova*, 2018.

- [13] F. Wulle et Al. «Workpiece and Machine Design in Additive Manufacturing for Multi-Axis Fused Deposition Modeling,» *Procedia CIRP* 60, pp. 229-234, 2017.
- [14] S. Carmignato, F. Zanini *Additive manufacturing technologies, Lecture #3, dispense del corso di METODI DI MODELLAZIONE E TECNOLOGIE PER L'ADDITIVE MANUFACTURING, Università di Padova, 2018.*
- [15] S. Carmignato, F. Zanini *Lecture #4, dispense del corso di METODI DI MODELLAZIONE E TECNOLOGIE PER L'ADDITIVE MANUFACTURING, Università di Padova, 2018..*
- [16] S. Lim et Al., «Modelling curved-layered printing paths for fabricating large-scale construction components,» *Additive Manufacturing* 12, pp. 216-230, 2016.
- [17] J.C.S. McCaw, E. Cuan-Urquizo «Curved-Layer Additive Manufacturing of non-planar, parametric lattice structures,» *Materials and Design* 160, pp. 949-963, 2018.
- [18] G. Kalmanovich, «"Curved-Layer" Laminated Object Manufacturing®,» in *1996 International Solid Freeform Fabrication Symposium, 1996.*
- [19] D. A. Klosterman et Al, «Development of a curved layer LOM process for monolithic ceramics and ceramic matrix composites,» *Rapid Prototyping Journal*, p. 61–71, 1999.
- [20] D. Chkraborty et Al. «Extruder path generation for Curved Layer fused deposition Modeling,» *Computer Aided Des.* 40, pp. 235-243, 2008.
- [21] R.J.A. Allen, R. Trask «An experimental demonstration of effective curved layer fused filament fabrication utilising a parallel deposition robot,» *Additive Manufacturing* 8, pp. 78-87, 2015.
- [22] L. Chen et Al. «Variable-depth curved layer fused deposition modeling of thin-shells,» *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, pp. 422-434, 2019.
- [23] P. Urhal et Al. «Robot assisted additive manufacturing: A review,» *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, n. 59, pp. 335-345, 2019.
- [24] L. Li, A. Haghghi, Y. Yang «A novel 6-axis hybrid additive-subtractive manufacturing process: Design and case studies,» *Journal of Manufacturing Processes*, n. 33, pp. 150-160, 2018.

- [25] Z. Zhu, et Al. «A review of hybrid manufacturing processes - state of the art and future perspectives,» *Int. J. Computer Integrated Manufacturing* 26, pp. 596-615, 2013.
- [26] S. Keating, N. Oxman «Compound fabrication: a multi-functional robotic platform for digital design and fabrication,» *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2013.
- [27] I. L. Mohammed A. Isa, «Five-axis additive manufacturing of freeform models through buildup of transition layers,» *Journal of Manufacturing Systems*, n. 50, pp. 69-80, 2019.
- [28] J. Laarman et Al. «Anti-Gravity Additive Manufacturing,» in *Fabricate 2014: Negotiating Design & Making*, by Fabio Gramazio et al., London, UCL Press, 2017, pp. 192-197.
- [29] Xuan Song, Y. Pan, Y. Chen «Development of a Low-Cost Parallel Kinematic Machine for Multidirectional Additive Manufacturing,» *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2015.
- [30] Tam, K.-M. Mark, C. T. Mueller «Additive Manufacturing Along Principal Stress Lines,» *3D Printing and Additive Manufacturing* 4, 2 (June 2017), pp. 63-81, © 2017 Mary Ann Liebert, Inc.
- [31] Mariam Mir et Al. «Review of Mechanics and Applications of Auxetic Structures,» *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2014, pp. 1-17, 2014.
- [32] A. Alderson, K. E. Evans «Auxetic materials: functional materials and structures from lateral thinking!,» *Advanced Materials*, vol. 12, n. 9, pp. 617-628, 200.
- [33] G. N. Greaves et Al. «Poisson's ratio and modern materials,» *Nature Materials*, vol. 10, pp. 823-839, 2011.
- [34] T. Fíla et Al. «Strain Dependency of Poisson's Ratio of SLS Printed Auxetic Lattices Subjected to Quasi-Static and Dynamic Compressive Loading,» *Advanced Engineering Materials*, n. 21, pp. 1-12, 2019.
- [35] Y. Prawoto, «Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: A structural review on the negative Poisson's ratio,» *Computational Materials Science*, n. 58, pp. 140-153, 2012.
- [36] P. U. Kelkar et Al. «Cellular Auxetic Structures for Mechanical Metamaterials: A Review,» *Sensors*, vol. 11, n. 20, 2020.

- [37] Mark Schenk, S. D. Guest «Origami Folding: A Structural Engineering Approach,» in *5OSME*, Singapore, 2010.
- [38] <https://www.youtube.com/watch?v=3E12uju1vgQ>. [Online].
- [39] Faisal Amin et Al. «Auxetic coronary stent endoprosthesis: fabrication and structural analysis,» *Appl Biomater Funct Mater*, vol. 13, n. 2, pp. 127-135, 2015.
- [40] J. Wong, A. Gong, P. Defnet, L. Meabe, B. Beauchamp, R. Sweet, H. Sardon, C. Cobb e A. Nelson, «3D printing ionogel auxetic frameworks for stretchable sensors,» *Adv. Mater. Technol*, vol. 4, n. 4, 2019.
- [41] Adriano Ambrosi, M. Pumera «3D-printing technologies for electrochemical applications,» *Chemical Society Reviews*, n. 45, p. 2740 — 2755 , 2016.
- [42] B. Y. Ahn et Al. «Planar and Three-Dimensional Printing of Conductive Inks,» *Journal of Visualized Experiments*, n. 58, pp. 1-8, 2011.
- [43] S. Mostafavi et Al. «Materially Informed design to robotic production: a robotic 3D printing system for informed material deposition,» *Robot. Fabr. Archit. Art Des.*, 2016.
- [44] H. Elsayed, P. rebesan, G. Giacomello, M. Pasetto, C. Gardin, L. Ferroni, B. Zavan, L. Biasetto «Direct ink writing of porous titanium (Ti6Al4V) lattice structures,» *Materials Science & Engineering*, vol. C, n. 103, 2019.
- [45] J. Gonzalez-Gutierrez et Al. «Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives,» *Materials*, vol. 5, n. 11, p. 840, 2018.
- [46] «<https://www.3dwasp.com>,» [Online].
- [47] <https://www.metalpowder.sandvik/en/products/metal-powder-alloys/austenitic-stainless-steels/>. [Online].
- [48] C. Martinuzzi, «Tesi di laurea magistrale "STAMPA ADDITIVA ROBOTIZZATA DI STRUTTURE AUSETTICHE",» presso DTG, Università di Padova, 2019.
- [49] Jian-Wei Tseng et Al. «Screw extrusion-based additive manufacturing of PEEK,» *Materials and Design*, n. 140, pp. 209-221, 2018.
- [50] Timothy W. Womer, Xaloy Inc. «*Basic Screw Geometry, "Things your screw designer never told you about screws!!" »*,

<https://pdf.directindustry.com/pdf/nordson-xaloy/things-your-screw-designer-never-told-you-about-screw-design/20438-50401.html>, 2011.

- [51] S. kalpakjian, S. Schmidt «TECNOLOGIA MECCANICA,» Milano-Torino, Pearson Italia, 2014, p. 694.
- [52] E. Barnett, C. Gosselin «Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot,» *Additive Manufacturing*, vol. 7, pp. 27-44, 2015.
- [53] L. Grigolato, «Tesi di laurea magistrale "Stampa 3D via Direct Ink Writing e caratterizzazione di scaffold di Ti6Al4V per applicazioni funzionali",» presso DTG, Università di Padova, 2018.