



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA GESTIONALE

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

STAMPA ADDITIVA ROBOTIZZATA DI STRUTTURE AUSETTICHE

Relatore: Giovanni Boschetti

Correlatore: Lisa Biasetto

Laureanda: Chiara Martinuzzi
1171823-IG

ANNO ACCADEMICO: 2018-19

SOMMARIO

Negli ultimi decenni le tecnologie di stampa additiva hanno attirato l'attenzione di molti settori industriali, grazie alla loro adattabilità alle più diverse applicazioni. Nonostante si possa affermare che le tecnologie tradizionali abbiano raggiunto una fase di maturità, la versione robotizzata è ancora in forte espansione, e lascia aperte numerose prospettive di ricerca. Proprio in questo contesto si inserisce questa Tesi, la cui parte sperimentale ha l'obiettivo di comprendere la fattibilità di un processo di stampa additiva robotizzata che coniughi la tecnica del *Direct Ink Writing* con il moto di un manipolatore a 7 gradi di libertà *KUKA LBR iiwa*. Questo sistema presenta diversi vantaggi rispetto alle tecniche attualmente presenti in letteratura. Guardando agli aspetti di automazione, l'utilizzo di un robot garantisce flessibilità, scalabilità e la possibilità di destinarlo ad altri utilizzi terminata l'applicazione. Dal punto di vista della stampa vera e propria, il contenuto innovativo risiede nell'inchiostro utilizzato, una miscela dalle particolari proprietà reologiche che sostituisce l'acqua ai tradizionali solventi come il cloro, tossici e inquinanti.

Il focus di questa Tesi è la parte di automazione del movimento, che parte da considerazioni sulla geometria da stampare e arriva alla scrittura di un codice in linguaggio Java (quello letto dal manipolatore utilizzato) che ha portato, in ultima istanza, alla realizzazione del pezzo finito. Si presentano le diverse tipologie di difetti riscontrati nella fase sperimentale, e la modalità con cui sono stati dedotti i parametri di processo.

*PER ASPERA
AD ASTRA*

*Se il mondo ti confonde, non lo capisci più,
se nulla ti soddisfa, ti annoi sempre più
scienziati ed ingegneri hanno inventato già
una generazione di bambole robot.*

RINGRAZIAMENTI

Per questo lavoro di Tesi non posso non ringraziare il professore Giovanni Boschetti, per la passione che ha trasmesso durante le lezioni di Robotica Industriale che mi hanno portata sino a qui e per il supporto durante questi mesi.

Ringrazio anche la professoressa Lisa Biasetto, che mi ha accompagnata durante tutta l'attività sperimentale.

Un grazie anche a Riccardo, senza il quale la programmazione del KUKA sarebbe stata ben più impegnativa, e alla tempestività (e pazienza) di Aldo, nel ristampare il *tool* ogni volta che qualcuno lo rompeva.

Quanto ai miei cari, il primo doveroso ringraziamento va a mia madre, che in questi anni è riuscita a sostenermi anche quando non era d'accordo con le mie scelte.

Grazie a mia sorella, che ha imparato a sopportare i miei scleri da sessione e che sono sicura finiranno per mancarle.

Grazie a Fiorenza, amica fedele e sostenitrice d'eccezione in questi anni di magistrale, senza i cui "che problema c'è? Si fa!" non mi ritroverei ora a scrivere questi ringraziamenti.

Ringrazio Sofia, per essermi vicina nonostante la distanza fisica che ora ci separa.

A Jacopo, che mi ha aiutato a trovare la mia strada quando procedo in direzione ostinata e contraria.

Vorrei ringraziare per nome tutti gli amici che negli anni mi sono stati vicino, ma citando Fermat "*hanc marginis exiguitas non caperet*". A voi dico solo: vi voglio bene.

INDICE

1	INTRODUZIONE	1
2	STAMPA ADDITIVA	3
2.1	Introduzione	3
2.2	Storia della stampa 3D	4
2.3	Tecnologie di stampa 3D	8
2.3.1	Tecnologie attuali	9
2.3.2	Sfide future	18
2.4	Materiali stampabili	18
2.4.1	Plastiche	18
2.4.2	Metalli	19
2.4.3	Ceramici	19
2.4.4	Biomateriali	20
2.5	Effetti globali sulla produzione manifatturiera	20
2.6	Vantaggi della stampa	21
2.6.1	Personalizzazione	21
2.6.2	Complessità	21
2.6.3	Assenza di utensili	21
2.6.4	Sostenibilità ambientale	22
2.7	Applicazioni	22
2.7.1	Settore medico e dentale	22
2.7.2	Settore aerospaziale	23
2.7.3	Settore automotive	23
3	AUSETTICI	25
3.1	Storia	25
3.2	Proprietà	25
3.3	Tipologie di ausettici	26
3.3.1	Ausettici a nervatura mancante	29
3.4	Applicazioni	31
4	STAMPA ADDITIVA ROBOTIZZATA	35
4.1	Capacità aggiuntive della stampa additiva robotizzata	35
4.1.1	Stampa additiva multidirezionale	36
4.1.2	Stampa additiva per strati conformati	37
4.1.3	Assemblaggio di componenti prefabbricati	39
4.1.4	Stampa additiva priva di supporti	39
4.1.5	Stampa additiva di oggetti di grandi dimensioni	42
4.2	Processi di stampa additiva robotizzata	44
4.2.1	Processi basati sull'estrusione	45
4.2.2	Deposizione diretta di energia	46
4.3	Vantaggi, svantaggi e sfide future	46
5	ATTIVITÀ SPERIMENTALE	49

5.1	Setup sperimentale	50
5.1.1	KUKA LBR iiwa 14 R820	50
5.1.2	Tecnologia di stampa	58
5.2	Iter sperimentale	62
5.2.1	Definizione della struttura ausettica da stampare	62
5.2.2	Programmazione del robot	63
5.2.3	Test di stampa e set-up dei parametri	63
5.3	Analisi del codice di programmazione	67
5.3.1	Programma principale	68
5.3.2	Avvio forzato	72
	Conclusioni	75
	Appendix	77
A	CODICI DI PROGRAMMAZIONE	79
A.1	Programma V+	79
A.2	Programma di avvio iniziale	81
A.3	Programma principale	82
A.4	Programma di avvio forzato	86
	BIBLIOGRAFIA	89

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1	Modello SLA-1 di 3D System, primo sistema commerciale di RP	5
Figura 2	Modello BfB RapMan di RepRap	7
Figura 3	Panoramica delle tecnologie di stampa 3D. Figura tratta da [2]	10
Figura 4	Sistema di stampa <i>binder jetting</i> . Figura tratta da [2].	11
Figura 5	Sistema di stampa <i>fused deposition modeling</i> . Figura tratta da [2].	12
Figura 6	Sistema di stampa <i>material jetting</i> . Figura tratta da [2].	13
Figura 7	Sistema di stampa <i>selective laser sintering</i> . Figura tratta da [2].	14
Figura 8	Sistema di stampa <i>electron beam melting</i> . Figura tratta da [2].	16
Figura 9	Sistema di stampa stereolitografico. Figura tratta da [2].	17
Figura 10	Alcune tipologie di strutture ausettiche. Immagine tratta da [31]	27
Figura 11	Modalità di induzione del comportamento ausettico. Figura tratta da [17]	28
Figura 12	Cella base e sviluppo tridimensionale di una struttura ausettica a nervatura mancante. Figura tratta da [17]	29
Figura 13	Costruzione e parametri geometriche delle strutture a nervatura mancante. Figura tratta da [26]	30
Figura 14	Rappresentazione schematica del modello di un elemento volumetrico rappresentativo sotto sforzo di taglio puro: (a) la configurazione non deformata (linee nere) e quella deformata (linee blu); (b) il modello ad aste rigide e molle per l'elemento volumetrico rappresentativo.	31
Figura 15	Andamento del rapporto tra modulo di taglio e rigidità effettivi (G/\bar{E}) al variare dell'inclinazione delle nervature α_0 . Immagine tratta da [18].	31
Figura 16	Andamento del rapporto tra modulo di taglio e rigidità effettivi (G/\bar{E}) al variare dell'inclinazione delle nervature α_0 . Immagine tratta da [18].	32
Figura 17	R_K vs E_r/E_h . Immagine tratta da [18].	32

Figura 18	Stampa senza supporto sfruttando la stampa additiva robotizzata. Esempio tratto da [16]	37
Figura 19	Stratificazione (A) tradizionale, (B) conformata. Esempio tratto da [13]	37
Figura 20	Principali configurazioni per la stampa additiva conformata	38
Figura 21	Setup sperimentale per la laminazione. Esempio tratto da [12]	41
Figura 22	Differenza tra pezzi stampati cambiando l'orientazione di stampa (a sinistra) e pezzi stampati in modo tradizionale (a destra). Esempio tratto da [30]	41
Figura 23	Sequenze di stampa dell'esperimento citato in [27].	43
Figura 24	Struttura a ragnatela realizzata in <i>free forming</i> . Esempio tratto da [32]	45
Figura 25	Panoramica del sistema	51
Figura 26	Spazio di lavoro di KUKA LBR iiwa R820	52
Figura 27	<i>Null space motion</i>	55
Figura 28	Separazione delle operazioni di controllo e di programmazione	56
Figura 29	Dispositivo di stampa con siringa-serbatoio e aria compressa	58
Figura 30	Stampante 3D Delta WASP 2040 Clay	59
Figura 31	Caratteristiche reologiche di un inchiostro di polveri di Ti6Al4V.	61
Figura 32	Tipologie di difetti riscontrati nei test sperimentali	66
Figura 33	Processo di stampa del pezzo	67

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1	Vantaggi e svantaggi dei diversi approcci di stampa additiva robotizzata.	40
Tabella 2	Vantaggi e svantaggi dei diversi approcci di stampa additiva robotizzata. Dati ricavati dall'articolo [5]	43
Tabella 3	Dimensioni dello spazio di lavoro di KUKA LBR iiwa R820	51
Tabella 4	Caratteristiche tecniche di KUKA LBR iiwa R820	52
Tabella 5	Informazioni sugli assi di KUKA LBR iiwa R820	53

Tabella 6	Valore dei bit che definiscono il numero di status 54
Tabella 7	Specifiche tecniche della stampante 3D <i>Delta WASP 2040 Clay</i> 60
Tabella 8	Classificazione e cause dei difetti riscontrati nei test sperimentali 65

INTRODUZIONE

In un mercato globale sempre più competitivo, da cui emergono a ritmo incalzante *trend* spesso imprevedibili, le aziende devono riuscire a rispondere in modo dinamico ed economicamente sostenibile ai mutamenti del contesto in cui operano. Per soddisfare esigenze di differenziazione e requisiti di prodotto sempre più stringenti, l'industria manifatturiera è alla stregua ricerca di tecnologie, metodi e processi che consentano di abbattere il *time to market* dei nuovi prodotti, senza penalizzare (e anzi, spesso migliorando) la qualità della propria offerta. A questa sfida si aggiunge la necessità di rivedere i processi tradizionali in chiave sostenibile, per migliorare la condizione dei lavori, preservare quanto più possibile le risorse naturali e promuovere un comportamento responsabile di consumo e produzione.

Il cambio di paradigma introdotto dall'industria 4.0 sembra accogliere - almeno in parte - queste istanze. Intelligenza artificiale, stampa 3D, interazione uomo-macchina, robotica e automazione sono solo alcuni dei campi di ricerca esplosi negli ultimi anni che hanno permesso l'inizio e lo sviluppo della rivoluzione digitale nel settore manifatturiero, e che uniti ad una potenza di calcolo in crescita esponenziale e ad una quantità di dati sempre più massiccia, allontanano i limiti del realizzabile.

I processi industriali tradizionali, caratterizzati da una preponderante componente di lavoro umana e da lunghi tempi di sviluppo prodotto, sono progettati per produrre quantità massive di oggetti indifferenziati; aumentare la varietà è possibile, ma il prezzo da pagare è un aumento dei costi unitari e/o dei tempi di progettazione. Ogni fase del ciclo di vita del prodotto è efficiente a regime, ma tutt'altro che flessibile in caso di cambiamenti improvvisi. D'altro canto, il concetto di *digital manufacturing* è figlio di quelle tendenze come *lean manufacturing*, *design for manufacturability* e *computer integrated manufacturing*, che fanno dell'interazione tra le diverse fasi del ciclo di vita del prodotto un efficace strumento di flessibilità.

Tra le tecnologie che meglio rispondono al requisito di flessibilità vi è sicuramente la stampa additiva. La sua capacità unica di realizzare prodotti con geometrie complesse e in alcuni casi anche polimerici ha trovato applicazioni in numerosi ambiti, dall'automotive all'aerospaziale, dall'architettura all'abbigliamento, dal medicale all'industria del cibo. Nonostante la *mass customisation* sia una tendenza, a detta di alcuni detrattori, figlia del consumismo, la possibilità di personalizzare i prodotti a costi più contenuti trova nell'ambito biomedicale un risvolto etico, essendo in grado di migliorare la qualità della vita dell'utilizzatore finale.

La diffusione crescente delle tecniche additive di formatura e la presenza sempre più incisiva di applicazioni robotiche in ambito industriale ha visto come naturale conseguenza la nascita del concetto di stampa additiva robotizzata, ed è qui che l'argomento della Tesi si sviluppa.

Si esploreranno le potenzialità di queste tecniche "aumentate" di stampa, cercando di proporre delle soluzioni più semplici dal punto di vista del setup sperimentale rispetto a quelle presenti in letteratura, ma che consentano allo stesso tempo buoni risultati in termini di ripetibilità e accuratezza. L'obiettivo specifico è quello di realizzare delle strutture ausettiche di forma cilindrica abbinando un processo di stampa per estrusione, il *Direct Ink Writing* alla movimentazione di un braccio robotizzato a 7 gradi di libertà. L'attività di ricerca in cui la parte sperimentale si inserisce è frutto di sforzi congiunti nell'ambito dello studio dei materiali di stampa e della movimentazione del sistema di stampa. In questa Tesi sarà approfondito soprattutto il secondo aspetto, accennando alla parte di proprietà dei materiali al solo scopo di fornire un'adeguata contestualizzazione.

L'approccio che guiderà la trattazione è di tipo deduttivo: sarà fornita una panoramica generale sullo stato dell'arte e sui recenti sviluppi della ricerca in quest'ambito per scendere gradualmente nel dettaglio dell'applicazione sperimentale.

Nel primo capitolo si presenterà il concetto di stampa additiva tradizionale, raccontandone la storia, le applicazioni attuali e gli sviluppi futuri. Si approfondiranno le tecniche disponibili, i materiali lavorabili nonché vantaggi e limiti.

Nel secondo capitolo saranno trattate le strutture ausettiche, evidenziando sin da subito eventuali problematiche per l'utilizzo nell'applicazione sperimentale con la tecnica di formatura scelta. Si darà maggior rilievo alle proprietà della struttura selezionata per la stampa.

Nel terzo capitolo l'attenzione sarà rivolta alle soluzioni più recenti nell'ambito della stampa additiva robotizzata, e in particolare a quelle che possano offrire un miglior termine di paragone con la procedura seguita nell'attività sperimentale. Lo scopo di questo capitolo non è solo di contestualizzare l'ambito di ricerca, ma anche di suggerire i vantaggi che la soluzione proposta può portare.

Infine, nel quarto capitolo, sarà approfondita e discussa l'attività sperimentale che ha consentito di realizzare il prodotto finito prestabilito. Saranno esaminati l'iter sperimentale, il *setup* dei macchinari, si presenteranno i difetti riscontrati e le soluzioni per attenuarli o rimuoverli. Attenzione particolare sarà rivolta alla programmazione del codice per il manipolatore e alla sincronizzazione dei due sistemi, stampante e robot, che compongono il *setup* di stampa, poiché maggiormente curati durante l'attività pratica.

La stampa additiva, più comunemente definita stampa 3D, copre un vasto numero di processi e tecnologie volti alla produzione di parti e prodotti completi in diversi materiali. Ciò che accomuna questa varietà di processi e tecnologie è la modalità con cui l'oggetto viene prodotto, strato per strato, secondo un processo di tipo additivo [10] che si discosta dai metodi tradizionali di produzione, sottrattivi o di fonderia.

L'obiettivo primario della stampa additiva ricade, oggi come in origine, sulla personalizzazione di prodotti caratterizzati da bassi volumi di produzione ed elevato grado di dettaglio, che possano essere allo stesso tempo realizzati velocemente. Negli ultimi anni tale tecnologia si è diffusa a macchia d'olio nei settori industriale, manifatturiero e di consumo, tanto che quasi ogni giorno ne emergono nuove applicazioni.

Oggi si possono trovare veicoli con componenti del motore ottenuti per stampa additiva [21], alcuni dispositivi stampati per uso umano sono stati approvati dall'ente regolatore statunitense *Food and Drug Administration* [4], e persino la Stazione Spaziale Internazionale possiede una stampante 3D per la produzione di componenti e parti nello spazio [3].

2.1 INTRODUZIONE

La stampa 3D è un processo di fabbricazione di prodotti *fisici* a partire da un modello *digitale* tridimensionale, tipicamente per deposizione successiva di sottili strati di materiale. La stampa 3D ha portato due importanti innovazioni [24]:

- la manipolazione della forma degli oggetti avviene nel loro formato digitale;
- la formazione di oggetti per addizione di materiale sotto forma di strati dello spessore di frazioni di millimetro.

Il settore manifatturiero ha visto negli ultimi decenni una forte automazione dei processi. Lavorazione alle macchine utensili, colata, stampaggio, forgiatura, sono tutti processi - relativamente nuovi e complessi - che richiedono macchine, computer e dispositivi robotizzati. Un altro aspetto che accomuna queste tecnologie è la necessità di sottrarre materiale da un blocco iniziale per ottenere il prodotto finito o gli strumenti necessari alla sua formazione (come nei processi

di *casting* e *moulding*). Questo aspetto rappresenta un grande limite (e costo) nel processo complessivo di produzione.

Per molte applicazioni, i processi tradizionali di progettazione e produzione impongono un numero elevato di vincoli quali saldature, fissaggi, necessità di assemblare parti complesse e lo stesso utilizzo di strumenti e/o stampi costosi [11]. Un altro svantaggio legato alle tecniche tradizionali è l'elevata percentuale di scarti, che possono raggiungere il 90% del materiale di partenza. Al contrario la stampa 3D è un processo che crea gli oggetti in modo diretto, aggiungendo materiale strato dopo strato, secondo modalità che dipendono dal materiale adottato.

I componenti possono essere progettati in modo specifico per evitare requisiti di assemblaggio dalle geometrie intricate e caratteristiche complesse, senza costi aggiuntivi.

La stampa 3D sta emergendo anche come tecnologia efficiente dal punto di vista ambientale, sia in termini di prodotto, che lascia spazio a design più leggeri e al tempo stesso resistenti, che in termini di processo stesso, con una riduzione fino al 90% del materiale utilizzato.

Dapprima processo di prototipazione e produzione ad appannaggio esclusivo delle multinazionali, le stampanti 3D hanno raggiunto negli ultimi anni anche le piccole imprese e i privati, grazie alle economie di scala che hanno ridotto il prezzo di acquisto a qualche centinaio di euro.

Questo aspetto ha aperto la tecnologia ad un pubblico di ben più vasto e, con un tasso di adozione in crescita esponenziale su tutti i settori, si stanno affacciando sempre più tecnologie, materiali, servizi e sistemi di supporto.

2.2 STORIA DELLA STAMPA 3D

Risalgono alla fine degli anni '80 le prime forme di stampa 3D, allora note come tecnologie di rapida prototipazione (RP, *Rapid Prototyping technologies*) poiché il processo era stato concepito come un metodo più rapido ed economico per creare prototipi per lo sviluppo prodotto [1]. La prima richiesta di brevetto fu depositata da Hideo Kodama in Giappone nel maggio 1980, ma non si trasformò mai in una licenza di esclusività vera e propria perché Kodama non inviò entro l'anno tutta la documentazione necessaria. L'origine della stampa 3D si può far risalire al 1986, anno in cui fu approvato il primo brevetto per l'apparato stereolitografico (SLA, *Stereo Lithography Apparatus*). Tale brevetto appartiene a Charles Hull, che per primo inventò la macchina SLA nel 1983. Hull fu in seguito co-fondatore di 3D System Corporation, ad oggi una delle maggiori e più prolifiche organizzazioni operanti nel settore della stampa 3D.

Il primo sistema commerciale di prototipazione rapida della 3D

Figura 1: Modello SLA-1 di 3D System, primo sistema commerciale di RP

System, SLA-1, fu introdotto nel 1987, e dopo rigorosi test il primo di questi sistemi fu venduto nel 1988.

Come spesso accade con le nuove tecnologie, nonostante il sistema SLA sia riconosciuto come il primo esempio di stampante 3D non fu l'unica tecnologia RP sviluppata in quegli anni. Nel 1987 Carl Deckard, della University of Texas, depositò un brevetto negli Stati Uniti per il processo RP di sinterizzazione laser selettiva (SLS, Selective Laser Sintering). Tale brevetto fu rilasciato nel 1989 e la licenza fu successivamente rilasciata alla DTM Inc., più tardi acquisita da 3D Systems. Nello stesso anno Scott Crump, co-fondatore di Stratasys Inc., depositò un brevetto per la tecnica di Fused Deposition Modeling (FDM), la cui proprietà appartiene ancora all'azienda originaria ma rappresenta allo stesso tempo il processo utilizzato da molte delle macchine entry-level in commercio, basate sul modello open source RepRap, oggi molto diffuse. Il brevetto per l'FDM fu conferito a Stratasys Inc. nel 1992. Il 1989 vide in Germania la fondazione di EOS GmbH da parte di Hans Langer. Dopo le prime ricerche sui processi stereolitografici, la Ricerca e Sviluppo di EOS spostò l'attenzione sulla sinterizzazione laser, cambio che garantì a EOS di configurarsi oggi come uno dei produttori industriali di sistemi per la prototipazione rapida e produzione di oggetti per stampa 3D di maggiore qualità. La vendita del primo sistema "Stereos" EOS risale al 1990. Il processo di Direct Metal Laser Sintering (DMLS) dell'azienda è invece il risultato di un progetto in collaborazione con la divisione finlandese di Electrolux, più tardi acquisito da EOS.

Stanno tuttora emergendo tecnologie e processi di stampa 3D, quali:

- *Ballistic Particle Manufacturing* (BPM);
- *Laminated Object Manufacturing* (LOM);
- *Solid Ground Curing* (SGC);
- *Three Dimensional Printing* (3DP).

I primi anni '90 hanno visto l'insorgere di numerose aziende nel mercato dei sistemi di prototipazione rapida, di cui oggi rimangono solo 3 delle originali - 3D Systems, EOS e Stratasys.

Tra gli anni '90 e i primi anni 2000 continuarono ad essere introdotte nuove tecnologie, ancora completamente focalizzate sulle applicazioni industriali, e mentre c'era ancora ampio margine per le applicazioni di prototipazione, la ricerca e sviluppo si è parimenti concentrata sulla lavorazione alle macchine utensili (*Rapid Tooling*), fonderia (*Rapid Casting*) e manifattura (*Rapid Manufacturing*).

Nello stesso periodo proliferarono anche aziende specializzate: Sanders Prototype (diventata poi Solidscape) e ZCorporation furono fondate nel 1996, Arcam nel 1997, Objet Geometries nel 1998, MCP Technologies, affermata azienda di formatura sottovuoto introdusse la tecnologia SLM nel 2000, EnvisionTec fu istituita nel 2002, ExOne nel 2005 come spin-off di Extrude Hone Corporation, mentre Sciaky Inc fu pioniera in un processo additivo basato sulla tecnologia di saldatura per fascio di elettroni di cui era già proprietaria. Queste aziende ampliarono il bacino di aziende occidentali operanti nel mercato globale.

Anche la terminologia dei processi è evoluta con la proliferazione di applicazioni manifatturiere, ed il termine collettivo per identificare tali tecnologie diventò Additive Manufacturing.

Molte tecnologie stavano prendendo piede anche nel fronte asiatico, ma nonostante il successo locale, nessuna delle aziende proprietarie riuscì a ritagliarsi una significativa quota di mercato nel panorama globale.

Il settore ha iniziato a ramificarsi a partire dalla prima metà degli anni 2000 secondo due strade oggi nettamente distinte:

- Stampa 3D di alta gamma, con sistemi tuttora costosi, volta alla produzione di parti di elevato valore, ad alto contenuto ingegneristico e notevolmente complesse. Questa branchia sta ancora crescendo, ma i primi risultati sono visibili solo ora con applicazioni nei settori aerospaziale, automotive, medicale e alta gioielleria risultato di pesanti investimenti in R&S. Queste applicazioni sono gelosamente custodite dalle aziende proprietarie da patti di non divulgazione o metodi semi-formali di protezione.
- Sviluppo di “*concept modellers*”. L’obiettivo di questi produttori di sistemi di stampa 3D era di migliorare lo sviluppo del concetto e della funzionalità di prototipazione, con il chiaro obiettivo di essere sistemi “da ufficio”, semplici da usare ed economici. Fu il preludio delle attuali macchine da scrivania.

Nonostante la distinzione, entrambi i filoni erano in origine fortemente finalizzati alle applicazioni industriali.

Nel segmento industriale *low-end* (le attuali stampanti di fascia media) scoppiò un’accesa competizione basata sui prezzi, che determinò miglioramenti in accuratezza, velocità e varietà di materiali di stampa.

3D Systems lanciò sul mercato il suo primo sistema sotto i 10.000\$ nel 2007, ma non ottenne mai il consenso sperato a causa del sistema in sé ma soprattutto per la struttura del mercato. Secondo esperti del settore, utilizzatori e commentatori esterni la chiave di volta per una diffusione più ampia dei sistemi di stampa 3D erano macchine al di sotto dei 5.000\$. Quell’anno gli occhi erano tutti puntati sull’azienda Desktop Factory, che stava lavorando a quell’obiettivo, ma il tutto si

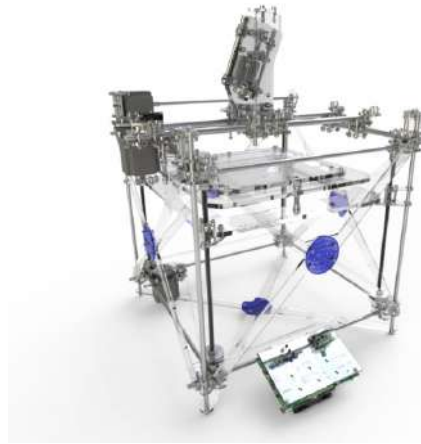


Figura 2: Modello BfB RapMan di RepRap

trasformò in un nulla di fatto a causa di tentennamenti nel periodo che precedette la produzione. Desktop Factory, il suo CEO e la proprietà intellettuale delle ricerche condotte vennero dunque acquisite da 3D Systems nel 2008, ma tutto il lavoro andò in fumo.

Il 2007 si configurò ugualmente come l'anno di svolta per tecnologie di stampa 3D accessibili, anche se all'epoca furono pochi i dispositivi realizzati, dal momento che prese piede il fenomeno RepRap. Adrian Bowyer, docente del dipartimento di Ingegneria Meccanica presso la University of Bath, concepì RepRap nel 2004 come una stampante 3D open source e auto-replicante [6]. Con il suo gruppo di ricerca di Bath, di cui fecero parte Vik Oliver e Rhys Jones, riuscì a trasformare il suo concept in un prototipo funzionante di stampante 3D sfruttando il processo di deposizione. Con la circolazione, nel 2007, delle prime immagini del prototipo embrionale di RepRap, il concetto di stampante 3D open source ottenne notevole visibilità, ma per la prima stampante 3D basata sul concept di RepRap disponibile a livello commerciale bisognerà attendere fino al 2009, con il modello BfB RapMan.

Ad aprile dello stesso anno uscì un modello rilasciato da Makerbot Industries, azienda che aveva collaborato a stretto giro con Bowyer per lo sviluppo di RepRap per poi abbandonare la filosofia Open Source in seguito agli ingenti investimenti erogati. A partire dal 2009 proliferarono una serie di stampanti per deposizione, adottando la strategia di marketing di Unique Selling Point. Interessante è la dicotomia per cui, mentre il fenomeno RepRap ha fatto insorgere un intero nuovo settore commerciale, quello delle stampanti 3D economiche, l'etica della comunità RepRap è focalizzata sugli sviluppo Open Source per la stampa 3D e mantenere controllata la commercializzazione.

Il 2012 fu l'anno di introduzione di processi di stampa 3D alternativi nella fascia di mercato più accessibile. A giugno comparve sul mercato il **B9Creator**, a tecnologia DLP, seguito a dicembre da **Form 1**, basato invece sulla stereolitografia. Entrambi furono lanciati

dalla piattaforma di fundraising Kickstarter, e riscontrarono uguale successo.

Come risultato della sempre più netta segmentazione del mercato delle stampanti 3D, di notevoli miglioramenti a livello industriale in termini di capacità e applicazioni, della crescita di notorietà dei dispositivi e di un mercato in crescita, anche le testate più comuni iniziarono a divulgare ampiamente sull'argomento.

Il 2013 si profilò come un anno di forte crescita e consolidamento, come dimostra l'acquisizione di Makerbot da parte di Stratasys.

2.3 TECNOLOGIE DI STAMPA 3D

Il punto di partenza di ogni processo di stampa 3D è un modello digitale tridimensionale, che può essere realizzato con diversi programmi di software 3D (in ambito industriale il CAD 3D, per il mercato di consumo ci sono programmi più semplici e accessibili) o per scannerizzazione con scanner 3D. Il modello viene quindi suddiviso in strati, per poi essere convertito in un progetto leggibile dalle stampanti 3D. Il materiale lavorato dalla stampante 3D viene stratificato coerentemente al disegno progettuale e al processo specifico scelto [28].

Ci sono diversi tipi di tecnologie di stampa 3D, che processano i materiali con diverse modalità per realizzare l'oggetto finale. Polimeri, metalli, ceramici sono attualmente di impiego comune per applicazioni di prototipazione e produzione industriali. La ricerca nell'ambito dei materiali stampabili comprende anche biomateriali e cibo. Nel mercato di fascia più bassa, invece, i materiali sono molto più limitati, dove la plastica - tipicamente ABS o PLA, e più recentemente il nylon - è il materiale più diffuso.

Ogni tipologia di stampante 3D fa ricorso a diverse tecnologie, ciascuna delle quali processa materiali differenti in modi altrettanto diversi. Questo perché la limitazione principale della stampa 3D, in termini di materiali e di applicazioni, è l'assenza di una tecnologia che copra tutti i possibili scopi.

Ad esempio alcune stampanti 3D processano materiali sotto forma di polveri (nylon, materiali plastici, ceramici, metalli), che attraverso una fascia di luce o una fonte di calore sinterizzano o fondono strati di polveri per assemblarli nella forma predefinita. Altre lavorano resine polimeriche, e utilizzano ancora un fascio di luce o laser per solidificare la resina in strati molto sottili. Un altro processo, retaggio della stampa bidimensionale a inchiostro, prevede il getto di piccole gocce di materiale, ricorrendo però a materiali più nobili come inchiostro e a dei leganti per compattare gli strati.

Il più comune e riconoscibile dei processi è quello di deposizione, adottato dalla maggior parte delle stampanti 3D *entry level*. Consiste nell'estrusione di una plastica, tipicamente PLA o ABS, in filamenti

che attraversano un estrusore riscaldato e vanno a formare, strato dopo strato, la forma predefinita.

Dal momento che le operazioni di deposizione e direzionamento sono più semplici allo stato fluido, materiali quali i polimeri e i suoi derivati (polimeri a matrice composita, materiali ibridi e FGM) - caratterizzati da temperature di fusione e di transizione vetrosa inferiori rispetto a ceramici e metalli - consentono di eseguire i processi a temperature inferiori e senza la necessità di camere sotto vuoto o controllate con gas inerte.

Anche i processi di indurimento, legame e raffreddamento sono più semplici per i polimeri, sempre a causa delle elevate temperature di fusione di metalli e ceramici. Per questo motivo, al fine di formare i materiali più duri sono preferibili i processi di sinterizzazione allo stato solido, che coinvolgono la fusione dei bordi di grano seguita dall'accrescimento dei grani stessi. Il *direct laser melting* funziona altrettanto bene per la formazione di ceramici e metalli, ma richiede in linea di principio apparecchiature più costose.

Un altro aspetto che merita menzione è che nessun processo di stampa 3D può, ad oggi, essere definito come *plug-and-play*. Ci sono diversi passaggi da eseguire prima di poter avviare la stampa e ancor più quando l'oggetto è stato stampato (questi sono spesso trascurati) [11]. Nonostante i continui aggiornamenti che semplificano l'utilizzo dei software di supporto, risultano ancora complessi sia la parte progettuale, intesa come preparazione del disegno e conversione del file per la processazione da parte del dispositivo di stampa, sia per l'elaborazione post stampa. Sono molte infatti le parti che devono essere sottoposte a operazioni di finitura. La più ovvia di queste è la rimozione dei supporti, ma alcuni componenti possono richiedere sabbiatura, verniciatura, laccatura o altre lavorazioni di finitura tradizionali, che sovente richiedono un intervento manuale e di estrema precisione.

2.3.1 Tecnologie attuali

Il regolamento ISO/ASTM 52900:2015 [10], che stabilisce e definisce i termini utilizzati tecnologia di stampa additiva, suddivide i processi di Additive Manufacturing in 7 categorie:

1. Binder Jetting (BJ);
2. Directed Energy Deposition (DED);
3. Material Extrusion (ME);
4. Material Jetting (MJ);
5. Power Bed Fusion (PBF);
6. Sheet Lamination (SL);

7. Vat Photopolymerisation (VP).

Le caratteristiche delle diverse tecnologie e la loro applicabilità ai vari materiali di stampa è riassunta nello schema in figura 3.

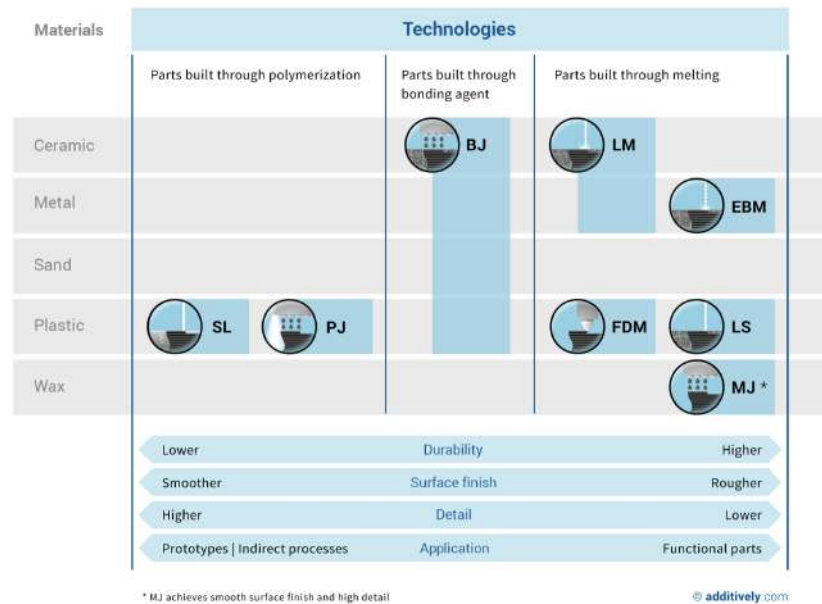


Figura 3: Panoramica delle tecnologie di stampa 3D. Figura tratta da [2]

2.3.1.1 Binder jetting

Il *binder jetting* (BJ) è un processo di rapida prototipazione e stampa 3D in cui un agente legante in forma liquida è depositato in modo selettivo su un letto di polveri affinché queste si aggregino uno strato alla volta fino a creare il componente desiderato [24]. Come altri sistemi basati su un letto di polveri, una volta completato uno strato il letto scende gradualmente, e un rullo o una lama levigano la polvere superficiale prima che sia erogato getto successivo di legante, compatando allo stesso tempo il nuovo strato con quelli precedentemente creati (figura 4).

Tra i vantaggi del binder jetting si possono elencare:

- Si presta alla formatura di diversi materiali quali metalli, sabbie, polimeri, compositi e ceramici;
- il processo è semplice, rapido ed economico in quanto risultato dell'aggregazione di particelle pulviscolari;
- non sono necessari supporti esterni poiché tale funzionalità è assolta dal letto di polveri;
- è possibile ottenere oggetti colorati, aggiungendo dei coloranti ai leganti;
- è possibile ottenere oggetti di notevoli dimensioni.

Il principale svantaggio del binder jetting è legato alla scarsa durezza del pezzo finito, specialmente se paragonato alla sinterizzazione. Per assicurare una maggiore durabilità è necessario procedere con processi di finitura.

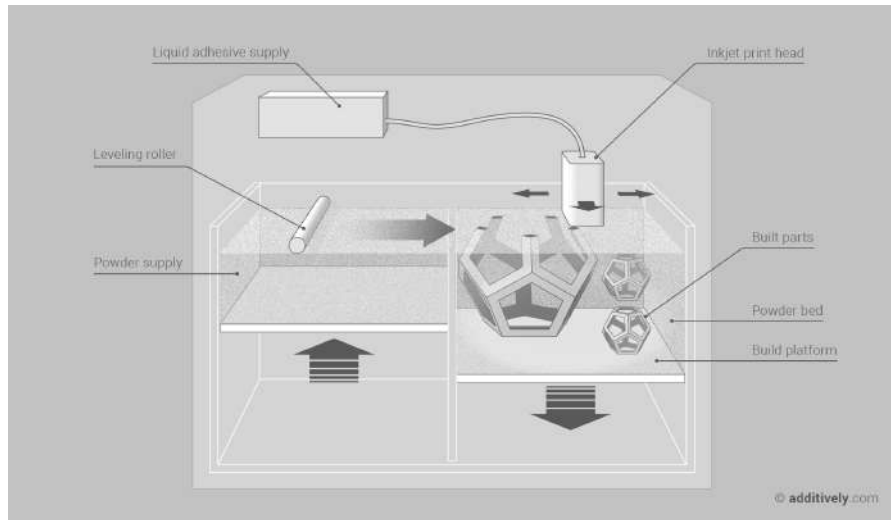


Figura 4: Sistema di stampa *binder jetting*. Figura tratta da [2].

2.3.1.2 *Directed energy deposition*

Il processo di deposizione diretta di energia è più complesso, ed è solitamente utilizzato per riparare o aggiungere del materiale a componenti esistenti. Questa metodologia consente un elevato controllo della grana del materiale e può perciò produrre oggetti di elevata qualità. Il principio di base del processo DED è simile a quello di estrusione, ma l'ugello non è fisso secondo uno specifico asse bensì può muoversi in diverse direzioni.

Il processo si presta alla lavorazione di ceramici e polimeri, ma è più comunemente impiegato con metalli e compositi metallici, sotto forma di filamento o polveri.

Esempi di questa tecnologia sono il *Laser Deposition* e il *Laser Deposition Net Shaping* (LENS). La deposizione laser è una tecnologia emergente e può essere utilizzata per produrre o riparare componenti dell'ordine del millimetro. Grazie alla sua scalabilità e capacità di fornire opzioni diverse con un unico sistema, il LD sta prendendo sempre più piede nei settori aerospaziale, dei trasporti, *oil & gas* e nella costruzione di utensili.

Il LENS invece può sfruttare energia termica per fondere le polveri durante il processo di formatura, consentendo una realizzazione sequenziale delle parti.

2.3.1.3 *Materials extrusion*

La tecnologia di stampa 3D basata sull'estrusione di materiale può essere impiegata per la stampa di oggetti polimerici, di stampe policrome o persino di cibi e materiali biologici, anche se il più noto e semplice è quello di polimeri termoplastici.

Il nome più diffuso di questo processo è *Fused Deposition Modeling* (FDM), anche se si tratterebbe di un marchio commerciale, depositato dall'azienda Stratasys che l'ha inventato [9]. Mentre la tecnologia FDM introdotta da Stratasys nei primi anni '90 rappresenta un tipico processo industriale di stampa 3D, i processi *entry-level* diffusi a partire dal 2009 sono generalmente definiti come *Freeform Fabrication* (FFF). Anche le prime macchine RepRap e tutte le successive evoluzioni, open source e commerciali, utilizzano un metodo a estrusione. Il processo consiste nella fusione di un filamento di materiale plastico che viene depositato, attraverso un estrusore riscaldato, strato dopo strato, seguendo il percorso fornito alla stampante. Ogni strato si solidifica nel momento in cui viene depositato, e si lega allo strato precedente [24], come schematizzato in figura 5.

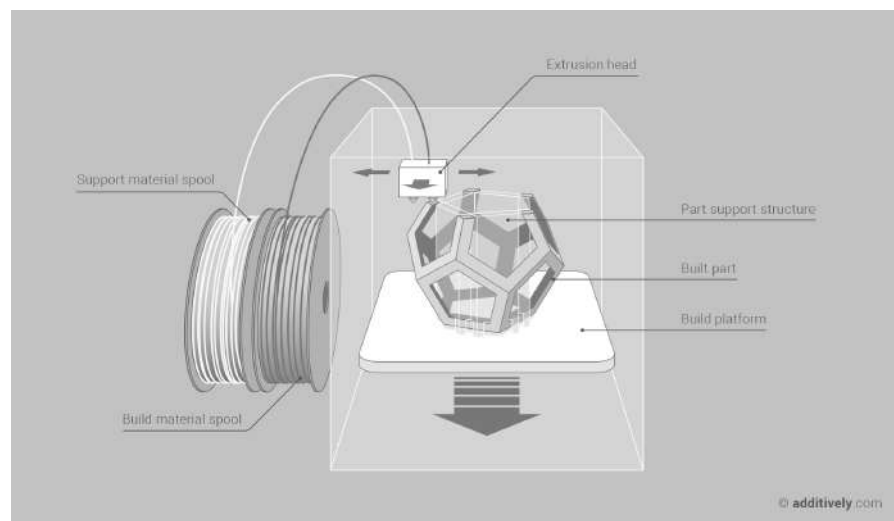


Figura 5: Sistema di stampa *fused deposition modeling*. Figura tratta da [2].

La Stratasys ha sviluppato una vasta gamma di materiali industriali di proprietà per il suo processo FDM, adatti per alcune applicazioni produttive. Per le stampanti *entry-level*, invece, la varietà dei materiali è ancora limitata, anche se in crescita. I materiali più comuni per le stampanti FFF di fascia inferiore sono ABS e PLA.

Uno svantaggio considerevole legato a entrambe le tecniche è la necessità di creare dei supporti per qualsiasi struttura dalla geometria a sbalzo [28].

Per l'FDM ciò comporta l'adozione di un secondo materiale idrosolubile, che supporti la struttura e al tempo stesso si possa facilmente rimuovere per lavaggio una volta completata la stampa. In alternativa

si può ricorrere a materiali di facile rottura, poi rimossi manualmente spezzandoli dalla parte desiderata.

La presenza di strutture di supporto o la loro mancanza ha rappresentato a lungo una forte limitazione per le stampanti 3D FFF di bassa gamma, problema assottigliatosi grazie all'introduzione di una doppia testina di estrusione.

Circa l'accuratezza dei modelli prodotti, il processo FDM offre accuratezza e affidabilità adeguate per le applicazioni da ufficio o da studio, anche se potrebbero risultare necessari lavorazioni successive. Per la fascia inferiore, il processo FFF risulta di gran lunga meno accurato, ma in costante miglioramento.

Il processo può risultare lento per alcuni parti delle geometrie, così come problematica può risultare l'adesione dei layer.

2.3.1.4 *Material jetting*

Il material jetting è un processo di stampa 3D in cui un dispositivo deposita selettivamente del materiale goccia per goccia [24]. Nello specifico, le diverse testine di stampa dispensano gocce di materiale fotosensibile che solidifica, costruendo un componente strato per strato, per effetto di una luce UV figura 6). Altre testine invece erogano in contemporanea materiali di supporto. Il MJ consente di creare parti caratterizzate da elevate qualità superficiale e accuratezza dimensionale, e si presta alla formatura di polimeri, ceramici, compositi, biomateriali e componenti polimerici [28].

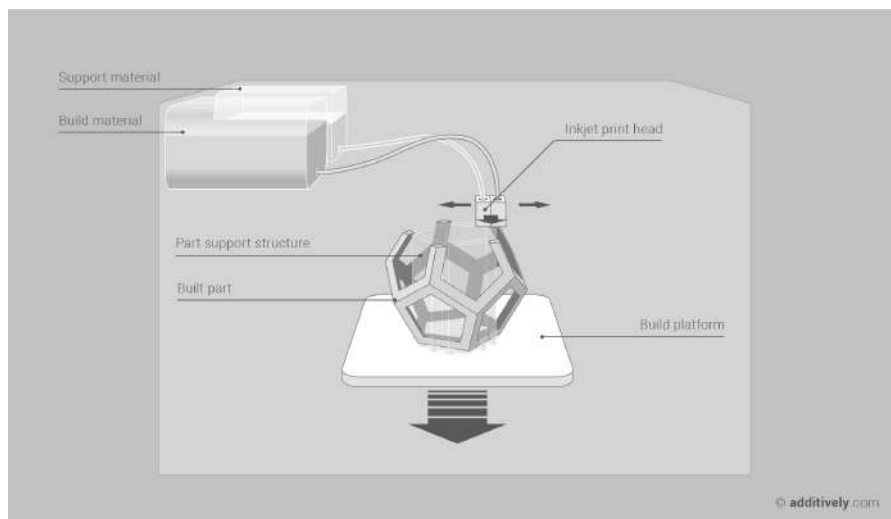


Figura 6: Sistema di stampa *material jetting*. Figura tratta da [2].

2.3.1.5 *Powder bed fusion*

Il processo di *power bed fusion* include le tecniche di *Electron Beam Melting* (EBM), *Selective Laser Sintering* (SLS) e *Selective Heat Sintering* (SHS). questo metodo utilizza una fonte di energia, sia essa un fascio

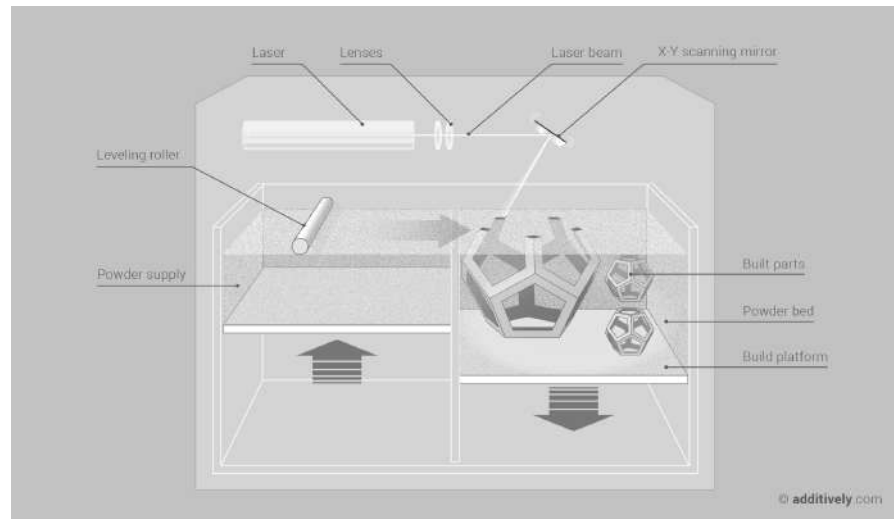


Figura 7: Sistema di stampa *selective laser sintering*. Figura tratta da [2].

di elettroni o un laser, per fondere delle polveri di materiali tra loro. I materiali utilizzati in questo processo sono metalli, ceramici, polimeri e compositi.

2.3.1.6 *Selective Laser Sintering*

La tecnologia SLS è il principale esempio di stampa 3D basata sulle polveri, sviluppata da Carl Deckard nel 1987. L'SLS prevede l'utilizzo di un fascio laser ad alta energia per fondere piccole particelle di materiale (plastica, metallo, ceramico o polveri di vetro) nella forma tridimensionale ricercata. Il laser fonde in modo selettivo uno strato di polveri secondo la geometria prevista. Al termine di ogni strato il letto di polveri si abbassa dell'altezza dello strato e vi si applica sopra un nuovo strato di polveri, iterando il procedimento fino al completamento dell'oggetto, come in figura 7).

Dal momento che la densità del componente finale dipende dal picco di potenza del laser più che dalla sua durata, le macchine SLS utilizzano generalmente laser pulsato. Solitamente la polvere viene preriscaldata fino a raggiungere una temperatura appena al di sotto di quella di fusione, rendendo di conseguenza più semplice la fusione per il laser.

L'SLS consente di ottenere rapidamente parti dall'elevata accuratezza e con diverse finiture superficiali. A differenza di altre tecniche di stampa additiva, come la stereolitografia o l'FDM, che spesso richiedono strutture aggiuntive per realizzare modelli con aggetti, l'SLS non richiede un bacino di alimentazione per il materiale di supporto dal momento in cui il componente è circondato durante tutto il processo da polveri non sinterizzate, e questo consente la realizzazione di geometrie prima impossibili. Inoltre, essendo la camera della macchina sempre riempita con polvere di materiale, la realizzazione

di componenti multipli è meno impattante sulla difficoltà generale e sul costo del progetto complessivo perché grazie al *nesting* si possono posizionare diversi componenti all'interno dei confini imposti dal macchinario.

D'altra parte con l'SLS è impossibile produrre un oggetto che sia contemporaneamente cavo e totalmente chiuso, perché la polvere non sinterizzata all'interno dell'elemento non riuscirebbe ad essere smaltita.

Con il decadere di molte licenze brevettuali si è aperta la strada a dispositivi di stampa domestici, anche se il controllo della temperatura e l'elevato fabbisogno energetico ne allontanano la realizzazione.

SELECTIVE HEATING SINTERING Il selective heating sintering è una tecnologia simile all'SLS, dove al posto di un fascio laser ad alta energia si ricorre ad una testina di stampa riscaldata che fonde la polvere di materiale termoplastico creando la geometria desiderata. La sostituzione del laser rende l'SHS una soluzione meno accurata ma decisamente più economica, per cui trova applicazione per la creazione di prototipi grossolani da utilizzare durante la fase di test del concept nel processo di sviluppo prodotto, e può essere adattata in scala per dispositivi da scrivania.

ELECTRON BEAM MELTING Il processo di fusione per fascio di elettroni è una tecnica di proprietà dell'azienda svedese Arcam. Simile al *Direct Metal Laser Sintering*, anche questo processo prevede la formazione dell'oggetto a partire da polveri metalliche; la differenza principale è la fonte di calore: il fascio di elettroni, a differenza del laser, necessita che il processo sia condotto sotto vuoto. Il sistema è schematizzato in figura 8). L'EBM ha la capacità di creare parti piene in diverse leghe metalliche anche di tipo medicale, e ha trovato per questo vasta applicazione nel settore medicale, nello specifico quello impiantistico, e altri settori *hi-tech* come quello aerospaziale e automotive si stanno avvicinando a questo metodo per la produzione di componenti.

2.3.1.7 Sheet lamination

La laminazione per fogli è il processo di stampa 3D in cui fogli di materiale sono legati insieme per produrre l'oggetto finale. Si basano su questo processo di stampa 3D le tecnologie di *Laminated Object Manufacturing* (LOM) e di *Ultrasound Additive Manufacturing* (UAM).

Tra i vantaggi di questi processi sono la possibilità di effettuare stampe colorate, i costi contenuti, la semplicità di gestione del materiale e la possibilità di riciclare gli scarti. Il LOM può produrre componenti dalla geometria complessa a costi e tempi di lavorazione ridotti; l'UAM è una tecnologia di processo innovativa che utilizza gli ultrasuoni per unire fogli di lamiera.

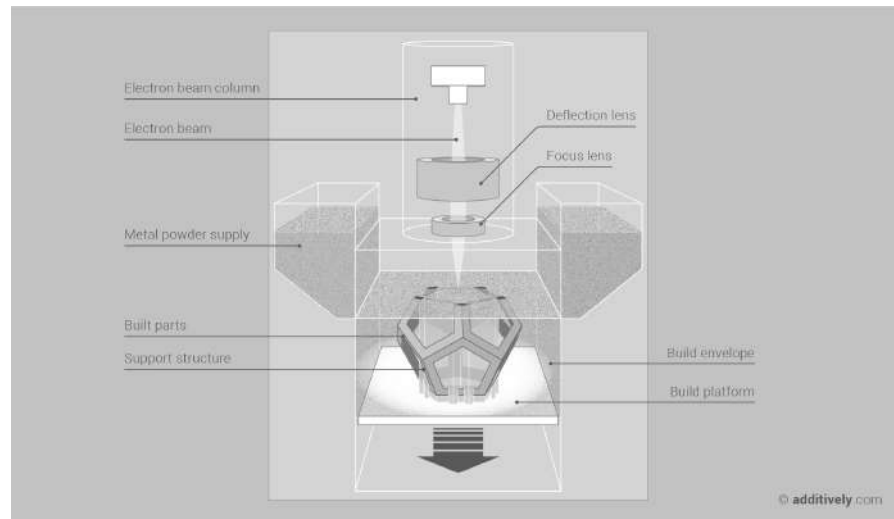


Figura 8: Sistema di stampa *electron beam melting*. Figura tratta da [2].

2.3.1.8 Vat Photopolymerization

La fotopolimerizzazione è una delle principali tecniche di stampa 3D, e fa riferimento all'indurimento di polimeri fotosensibili attraverso un fascio laser, di luce o ultravioletto.

Gli esempi principali di stampa per fotopolimerizzazione sono la stereolitografia (SLA) e il *Digital Light Processing* (DLP).

I parametri fondamentali nella *Vat Photopolymerization* sono:

- tempo di esposizione;
- lunghezza d'onda;
- energia fornita.

I materiali utilizzati si trovano inizialmente allo stato liquido, e vengono solidificati nel momento in cui sono esposti alla fonte luminosa.

La fotopolimerizzazione è un processo che si presta alla realizzazione di prodotti di alta qualità, con buon grado di dettaglio e ottima finitura superficiale.

STEREOLITHOGRAPHY La stereolitografia è ampiamente riconosciuta il come primo processo di stampa 3D, e comunque il primo ad essere commercializzato.

Nella stereolitografia una resina fotopolimerica reagisce con un fascio laser, grazie al quale indurisce fino a formare un solido caratterizzato da un'elevata precisione. La resina fotopolimerica è conservata in una vasca al cui interno si trova una piattaforma mobile. Un fascio laser è direzionato sulla superficie della resina muovendosi lungo gli assi X – Y, coerentemente con il disegno 3D fornito alla macchina di stampa. Una volta completato lo strato, il supporto all'interno della vasca scende lungo Z di un'altezza pari allo spessore dello strato, ed

il laser procede colpendo lo strato successivo. I passaggi sono ripetuti fino a completamento della forma desiderata, momento in cui si solleva il supporto e si estrae il pezzo (9).

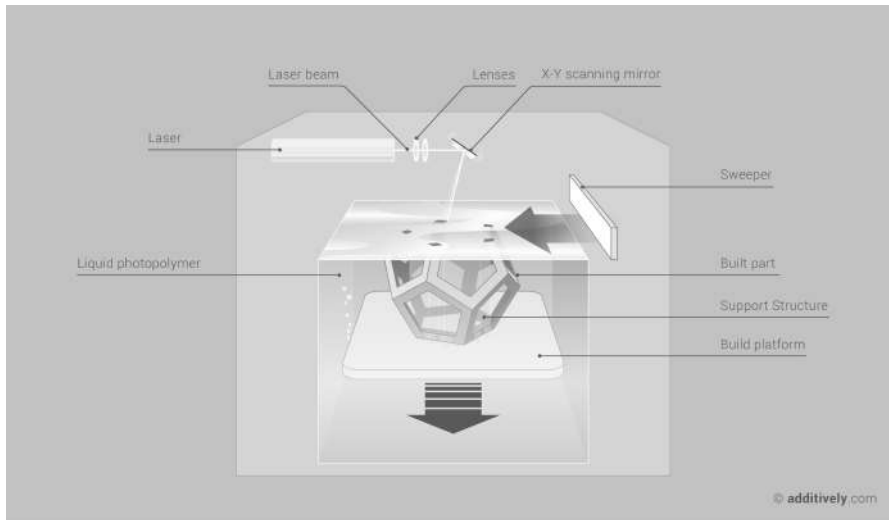


Figura 9: Sistema di stampa stereolitografica. Figura tratta da [2].

Questo processo richiede l'aggiunta di strutture di supporto per alcune geometrie dei pezzi, soprattutto quelle con parti aggettanti o con sottosquadri, parti che dovranno essere rimosse manualmente al termine della stampa.

Sono spesso necessarie anche altre lavorazioni successive, come pulitura e indurimento (spesso ottenuto con fasci luminosi o con processi di forno).

La stereolitografia risulta quindi uno dei processi di stampa 3D più accurati, che garantisce un'ottima finitura superficiale, ma richiede spesso ulteriori lavorazioni per garantire la stabilità del pezzo nel tempo, che altrimenti tende a infragilirsi.

DIGITAL LIGHT PROCESSING Il processo DLP come la stereolitografia, lavora con fotopolimeri, ma differisce da quest'ultima per la fonte di luce. Il DLP, infatti, utilizza fonti luminose più tradizionali come lampade ad arco, abbinate a pannelli con display a cristalli liquidi o a dispositivi a specchio deformabile (*Deformable Mirror Device*, DMD). La luce viene applicata all'intera superficie del bagno di resina fotopolimerica in una sola passata, rendendo questo processo più rapido rispetto alla stereolitografia.

Al pari della stereolitografia, il DLP è in grado di realizzare parti con elevato grado di accuratezza e risoluzione, ma analogamente richiede strutture di supporto e post-lavorazioni.

Il vantaggio del DLP rispetto alla stereolitografia è che il primo richiede un bagno di resina di profondità modesta per rendere il processo più semplice e comporta conseguentemente minori sprechi e minori costi di funzionamento.

2.3.2 *Sfide future*

La principale sfida per il futuro delle tecnologie di stampa additiva consiste nella capacità di sviluppare sistemi robusti, integrati, sicuri e *user-friendly* in grado di realizzare rapidamente oggetti di elevata risoluzione contenendo il consumo energetico e mantenendo un buon controllo dimensionale [28].

Un'altra sfida riguarda la riduzione della variabilità nei pezzi (finitura, dimensione e qualità) da macchina a macchina e tra lotti di produzione, cui è legata una scarsa comprensione dell'impatto delle variabili di processo sulla qualità del prodotto finale.

Per i metalli è necessario introdurre un sistema adeguato di schermatura dall'ossidazione, che può gravemente compromettere la qualità e l'utilizzo del pezzo. Attualmente l'iniezione di gas inerti nella camera di stampa è piuttosto diffusa, ma in molti casi (soprattutto per i metalli non ferrosi) è necessario ricorrere a camere a vuoto o ad ambienti riducenti.

2.4 MATERIALI STAMPABILI

Il mercato dei materiali lavorabili per stampa 3D è molto vario, sia in termini di tipologia che di forma in cui il materiale è venduto (polveri, filamenti, pellet, granuli, resine, ...) [28].

La tendenza recente è quella di creare dei materiali appositi per ogni processo di stampa e applicazione specifica, come dimostra il settore dentale, di modo che le proprietà del materiale ricoprano alla perfezione la funzione che sono chiamati ad assolvere. Sono quindi gli stessi produttori di stampanti che spesso realizzano i materiali a formulazione speciale e li commercializzano a proprio nome.

Le macrocategorie di materiali più diffuse sono senza dubbio plastiche, metalli e ceramici, ma si trovano sempre più spesso anche applicazioni con biomateriali, carta e persino cibo.

Per non allontanarsi eccessivamente dallo scopo di questa ricerca, si offrirà una panoramica delle sole prime quattro categorie.

2.4.1 *Plastiche*

I materiali plastici più ricorrenti e le relative proprietà sono:

NYLON materiale comunemente usato sotto forma di polveri nei processi di sinterizzazione o in filamenti nel processo FDM. è un materiale plastico forte, flessibile e durevole, di testata affidabilità per le applicazioni di stampa 3D. Al naturale è di colore bianco, ma può essere colorato prima o dopo il processo di stampa. Quando in forma pulviscolare, può essere combinato con polveri di alluminio per produrre *alumide*, altro materiale molto comune nella stampa 3D per sinterizzazione.

ABS altro materiale plastico molto diffuso, soprattutto come filamento per l'utilizzo nei processi di *freeforming* con stampanti di bassa gamma. È un materiale resistente e disponibile in una vasta gamma cromatica. Le bobine di filamento di ABS possono essere acquistate da numerosi fonte non proprietarie, motivo per cui risulta così diffuso.

PLA materiale plastico biodegradabile, caratteristica che negli ultimi anni ne ha cresciuto la popolarità. Può essere utilizzato come resina per processi come il DLP o la stereolitografia, ma anche in filamento per processi FDM. È acquistabile in diversi colori e persino trasparente, ma non presenta resistenza o flessibilità pari all'ABS.

LAYWOOD materiale sviluppato appositamente per le stampanti 3D per estrusione di tipo *entry-level*, consiste in un filamento composito di legno e polimero, motivo per cui è comunemente noto anche come *Wood Plastic Composite*.

2.4.2 Metalli

A livello industriale si trova un numero sempre crescente di metalli e compositi a base metallica (soprattutto derivati di alluminio e cobalto) impiegati nella stampa 3D.

Tra i materiali più diffusi si possono citare:

ACCIAIO INOX materiale tra i più resistenti e di conseguenza più utilizzati nei processi di stampa 3D. Lavorato a partire da polveri, si presta a processi di sinterizzazione, fusione o EBM. Il colore naturale è argenteo, ma può essere placcato con altri materiali per conferire all'oggetto finito un colore bronzeo o dorato.

ORO E ARGENTO stampabili in via diretta solo a partire dagli ultimi anni, trovano crescente applicazione nella gioielleria. Entrambi i materiali hanno elevata resistenza e vengono lavorati a partire da polveri.

TITANIO uno dei metalli più resistenti, è lavorato a partire da polveri con processi di sinterizzazione, fusione o EBM.

2.4.3 Ceramiche

I ceramici sono materiali relativamente recenti nell'ambito della stampa 3D, in cui hanno riscontrato diversi livelli di successo. Al pari dei ceramici ottenuti con processi tradizionali di formatura, necessitano dopo la stampa di processi di essiccazione e cottura.

2.4.4 Biomateriali

L'ambito biomedicale (ma non solo) ha vissuto negli ultimi anni un intenso sforzo di ricerca volto a indagare le potenzialità dei biomateriali. Molti istituti di ricerca si sono concentrati sull'analisi dei tessuti vivi nel tentativo di sviluppare applicazioni tra cui la stampa di organi umani per il trapianto o la creazione di tessuti esterni per la sostituzione in alcune parti del corpo.

Altre ricerche nell'ambito dei biomateriali si sono concentrate invece sullo sviluppo di cibi, carni *in primis*.

2.5 EFFETTI GLOBALI SULLA PRODUZIONE MANIFATTURIERA

La stampa 3D non rappresenta per il settore manifatturiero solo una nuova tecnologia: sempre più evidente è l'impatto sociale, economico, ambientale e di sicurezza che può avere sul settore. Basti pensare alla capacità della stampa 3D di avvicinare il produttore all'utilizzatore finale o al consumatore, accorciando notevolmente la filiera. La possibilità di offrire prodotti personalizzati e produrre in lotti sempre più piccoli su fabbisogno (MTO) si configura come un ottimo modo per attrarre i clienti e al tempo stesso consente di ridurre le scorte a magazzino [1].

La stampa 3D apre le porte alla produzione *in situ* di componenti, per cui sarà possibile eliminare gli ingenti costi di trasporto legati al trasferimento di componenti prodotti in stabilimenti localizzati su scala globale. Questa possibilità comporterebbe una rivoluzione nel modo di operare e interagire su scala globale di piccole e medie imprese, eserciti e privati.

Lo scopo ultimo, secondo molti esperti del settore, è offrire la possibilità ai consumatori di stampare a casa o all'interno della loro comunità dei prodotti personalizzabili il cui design è scaricabile da internet. Un'adozione più diffusa delle stampanti 3D comporterebbe la reinvenzione di una lunga serie di prodotti già esistenti, e la diffusione di prodotti completamente innovativi.

Gli effetti potenziali derivanti dall'adozione su scala globale di tecnologie di stampa 3D non si limitano al settore manifatturiero, ma colpiscono anche l'economia globale. Il passaggio dall'attuale modello di produzione e distribuzione ad una produzione locale di tipo *pull* e personalizzabile può ridurre lo squilibrio tra paesi di esportazione e importazione.

La stampa 3D rivoluzionerebbe anche il mercato del lavoro, determinando la necessità di nuove figure professionali, dai designer di prodotto, operatori di stampa, fornitori di materiali fino agli esperti di proprietà intellettuale, dato che la pirateria è uno degli attuali problemi che affligge molti produttori.

Il continuo invecchiamento della società e l'impatto che l'allungamento della vita ha sulla forza lavoro rende i paesi industrializzati i maggiori beneficiari (potenziali) della diffusione massiva di queste tecnologie. Anche gli sviluppi in ambito medicale gioverebbero senz'altro ai paesi con età demografica media più alta.

Nei paesi in via di sviluppo, invece, la stampa 3D può rappresentare un'arma a doppio taglio. Un esempio è l'effetto positivo sulla riduzione dei costi di fabbricazione grazie al ricorso di materiali riciclati e locali, ma la riduzione della domanda di manodopera può affliggere pesantemente molti di questi paesi, che impiegherebbero molto tempo a risollevarsi.

2.6 VANTAGGI DELLA STAMPA

La stampa 3D, che sia su scala industriale o a livello locale e personale, porta benefici che i tradizionali metodi di prototipazione fabbricazione non sono in grado di raggiungere.

2.6.1 *Personalizzazione*

Uno dei risvolti industriali più importanti dei processi di stampa 3D è la *mass customisation*, capacità di personalizzare prodotti secondo specifici bisogni e richieste. La natura di tali processi consente la realizzazione contemporanea di più prodotti, anche diversi tra loro, all'interno della stessa camera di stampa senza costi aggiuntivi.

2.6.2 *Complessità*

L'avvento della stampa 3D ha visto la proliferazione di prodotti, progettati in ambiente digitale, con un livello di complessità non ottenibile in altri modi. Se questo vantaggio è stato colto con entusiasmo da artisti e designer, ha avuto un impatto altrettanto positivo nelle applicazioni industriali, consentendo la realizzazione di componenti complessi più leggeri e resistenti delle versioni tradizionali. Per questo motivo i processi di stampa 3D si stanno facendo largo nel settore aerospaziale, dove queste caratteristiche sono di primaria importanza.

2.6.3 *Assenza di utensili*

Uno degli elementi più onerosi in termini di costo, tempo e forza lavoro dell'industria manifatturiera è la produzione di utensili da lavorazione. Per applicazioni con volumi medio-bassi, la stampa 3D industriale può eliminare la necessità di lavorazione alle macchine utensili e conseguentemente costi e *lead time* associati. Ciò rappresenta un be-

neficio molto attraente per il settore industriale, tanto che un numero sempre crescente di produttori sta affiancando queste tecnologie ai processi tradizionali.

La combinazione di assenza di utensili e maggiore complessità ottenibile consente la realizzazione di prodotti e componenti ottimizzati, evitando geometrie intricate finalizzate all'assemblaggio ed eliminando conseguentemente costi e manodopera associati a tale operazione.

2.6.4 *Sostenibilità ambientale*

La stampa 3D sta emergendo anche come una tecnologia efficiente dal punto di vista energetico e ambientale, grazie alla riduzione degli scarti di processo e alla possibilità di produrre componenti con minore fabbisogno di materiale a parità di caratteristiche resistenziali. La possibilità di fabbricare componenti più leggeri ha un impatto secondario sulle emissioni, sia legati ai metodi di trasporto che all'utilizzo finale in automobili o dispositivi aerospaziali.

2.7 APPLICAZIONI

Il principio cui è dovuta la nascita della stampa 3D nei processi di prototipazione rapida era fondato sulla necessità di velocizzare le prime fasi di sviluppo prodotto. Si cercava un metodo rapido e diretto di produrre prototipi che conducesse alla soluzione di prodotto ottimale attraverso un ciclo di iterazioni, consentendo il risparmio di tempo e denaro sul processo complessivo di sviluppo e assicurando una maggiore sicurezza nella realizzazione degli utensili necessari alla lavorazione del prodotto da commercializzare.

Ad oggi la prototipazione è ancora una delle applicazioni più diffuse della stampa 3D, anche se probabilmente sottostimata [1].

Lo sviluppo e il miglioramento di materiali e processi seguito all'introduzione della stampa 3D ha fatto spostare l'attenzione dalla prototipazione alla realizzazione di prodotti finiti in diversi settori.

Tra i settori che hanno beneficiato maggiormente della stampa 3D industriale, declinandola in metodologie e applicazioni specifiche, si possono citare quello medico-dentale, l'automotive, l'aerospaziale, ma anche settori più creativi come la gioielleria, le arti e la gastronomia.

Per lo scopo di questa tesi si approfondiranno solamente i primi tre.

2.7.1 *Settore medicale e dentale*

Il settore medicale è stato uno dei primi ad adottare i sistemi di stampa 3D, e allo stesso tempo quello che promette maggiori crescita e sviluppo grazie alla possibilità di personalizzazione offerti da

queste tecnologie e la capacità di migliorare la vita delle persone di pari passo all'avanzamento della ricerca in processi e materiali fino al raggiungimento degli standard richiesti dal settore. Le tecnologie di stampa 3D sono utilizzate in una lunga serie di diverse applicazioni. Oltre alla creazione di prototipi a supporto dello sviluppo prodotto nei settori medicale e dentale, le tecnologie sono utilizzate per realizzare gli stampi delle corone dentali ottenute per fonderia e gli strumenti necessari alla creazione di bite dentali attraverso la fusione di plastica sottovuoto. La tecnologia è utilizzata anche per i produrre impianti di anca e ginocchio, prodotti su misura del paziente come dispositivi auditivi, plantari ortopedici, protesi e impianti unici per pazienti che soffrono di patologie quali osteoartrite, osteoporosi e cancro, nonché per le vittime di incidenti e traumi. Un'ulteriore applicazione che sta emergendo negli ultimi anni è la creazione di guide chirurgiche a supporto di specifiche operazioni e per la riabilitazione dei pazienti. Altro filone di ricerca è rappresentato dalla stampa di epidermide, tessuti, ossa, prodotti farmaceutici e organi, anche se la commercializzazione di questa serie di prodotti è ancora lontana.

2.7.2 Settore aerospaziale

Parimenti a quello medicale, anche il settore aerospaziale è stato un *early adopter* delle tecnologie di stampa 3D per lo sviluppo prodotto e la prototipazione, appoggiandosi spesso per la ricerca a università e istituti di ricerca. Data la natura critica dello sviluppo di velivoli la ricerca e sviluppo in questo settore è estremamente dispendiosa e incessante, caratterizzata da standard vincolanti, e le stampanti 3D industriali hanno dovuto tenere il passo con questi requisiti. Lo sviluppo di materiali e processi si è dovuto in molti casi al settore aerospaziale, e alcuni componenti non critici sono già utilizzati nei velivoli in commercio di grandi aziende come General Electrics, Airbus, Rolls Royce, BAE Systems e Boeing. E se la maggior parte di queste aziende hanno un approccio molto cauto nei confronti delle possibilità attuali offerte dalla stampa 3D, e con altrettanta prudenza guidano i reparti di R&S, alcune non temono di spingersi oltre nel prossimo futuro.

2.7.3 Settore automotive

Altro settore che ha abbracciato subito le tecnologie di prototipazione rapida è senza dubbio l'automotive. Molte case automobilistiche, in particolare quelle più all'avanguardia nella realizzazione di motori sportivi e di Formula 1, hanno seguito un percorso simile a quello attraversato dalle aziende del settore aerospaziale: da una prima limitazione alla realizzazione di prototipi fino al tentativo di incorporare nella produzione finale i benefici offerti in termini di materiali e

di risultato finale, inserendo componenti stampate. Molte case automobilistiche stanno ora rivolgendo l'attenzione alle potenzialità della stampa 3D di coprire il fabbisogno post vendita di pezzi di ricambio, con la possibilità di realizzarli su ordine anziché mantenere elevati livelli di scorte.

AUSETTICI

Gli ausettici (dal greco αὐξετικός, “che tende ad aumentare”) sono strutture o materiali che si espandono quando sollecitati a trazione in una direzione, e si restringono se sollecitati a compressione [31]. Questo comportamento è anomalo se comparato ai materiali tradizionali, che sollecitati a trazione in una direzione, si comprimono lungo le due direzioni ortogonali, ed è associato ad un coefficiente di Poisson ν negativo.

3.1 STORIA

A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity, pubblicato nel 1944 dal matematico Augustus Edward Hough Love, è il primo testo scientifico che tratti di materiali con coefficiente di Poisson negativo [23]. L'autore riscontrò tale proprietà in un materiale naturale, scatenando tra gli scienziati non pochi dibattiti. Nonostante questi suggerì che il valore anomalo fosse dovuto al gemellaggio di particolari cristalli, la maggior parte degli esperti in meccanica classica considerano ancora oggi impossibile avere materiali naturali con coefficiente di Poisson non positivo.

Fu invece Gibson nel 1982 a riscontrare per la prima volta un effetto ausettico in materiali artificiali, a partire da gomme siliconiche bidimensionali e da strutture alveolari in alluminio deformate per flessione delle nervature (The mechanics of two-dimensional cellular materials). Lo sviluppo intenzionale del concetto di ausettico fu pubblicato nel 1987 nella rivista *Science* da Lakes, 5 anni dopo la scoperta di Gibson, ma il termine “ausettico” fu coniato solo nel 1991 da Evans et al., quando produssero del polietilene microporoso con coefficiente di Poisson negativo.

Da quel momento in poi furono introdotti diverse tipologie di ausettici artificiali, sotto forma di schiume, fibre, compositi e metamateriali strutturati ottenuti con tecniche di fabbricazione avanzate, o basati su origami, kirigami planari e strutture cilindriche.

3.2 PROPRIETÀ

Il coefficiente di Poisson è definito come l'opposto del rapporto tra la deformazione trasversale ϵ_t e la deformazione longitudinale o assiale (ossia nella direzione di applicazione dello sforzo) ϵ_l :

$$\nu = -\frac{\epsilon_t}{\epsilon_l} \quad (1)$$

La deformazione a trazione è considerata per convenzione positiva, quella a compressione negativa, per cui i materiali tradizionali sono caratterizzati da $\nu > 0$. Analizzando quanto accade a livello micro-strutturale, il motivo diventa evidente. Sottoponendo un materiale a sollecitazione i legami interatomici tendono a riallinearsi con la deformazione. Per fare ciò il sistema cerca di preservare la sua densità, e ne risulta una deformazione di segno opposto nelle direzioni perpendicolari allo sforzo applicato [23].

Ad un coefficiente di Poisson negativo sono associate le seguenti proprietà:

- maggiore modulo di taglio a parità di modulo di Young, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, e conseguente maggiore resistenza a sforzi di taglio ($\tau = G \cdot \gamma$, con γ deformazione a taglio);
- maggiore modulo di compressione a parità di modulo di Young, $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$, e conseguente maggiore resistenza a variazioni volumetriche ($P = -K \frac{\Delta V}{V_0}$, con P la pressione applicata);
- maggiore durezza;
- più lenta propagazione delle cricche a fatica;
- elevata tenacità e modulo di resilienza;
- assorbimento delle vibrazioni.

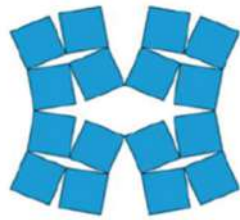
Nonostante i numerosi benefici legati all'impiego degli ausettici, questi materiali necessitano di porosità strutturale, che li rende meno rigidi dei corrispettivi solidi da cui sono formati. Questo aspetto costituisce un importante limite per l'impiego di materiali con coefficiente di Poisson negativo in applicazioni strutturali portanti.

3.3 TIPOLOGIE DI AUSETTICI

Dalla prima diffusione in ambito scientifico, sono nate diverse tipologie di strutture ausettiche, alcune delle quali sono schematizzate in figura 10.

Classificando gli ausettici secondo il modello di deformazione strutturale seguito dal materiale, è possibile distinguere le seguenti macro-categorie:

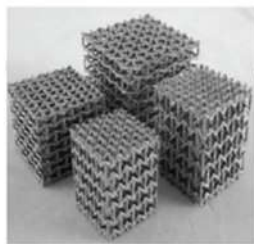
1. concavi;
2. a nervatura mancante;
3. rotazione rigida o semi-rigida;
4. chirali;
5. con instabilità elastica;



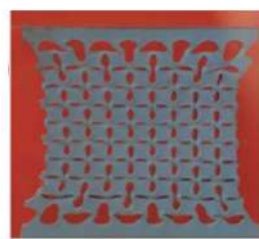
(a) *Rotazione rigida*



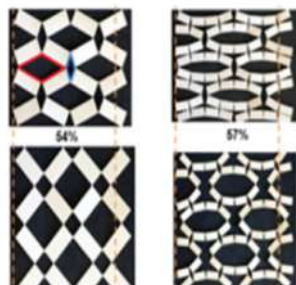
(b) *Anti-tetrachirale*



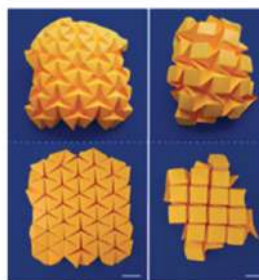
(c) *Rientrante*



(d) *Instabilità elastica*



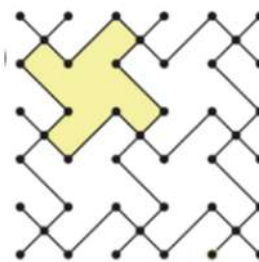
(e) *Kirigami a taglio frattale*



(f) *Origami*



(g) *A stella*



(h) *A nervatura mancante*

Figura 10: Alcune tipologie di strutture ausettiche. Immagine tratta da [31]

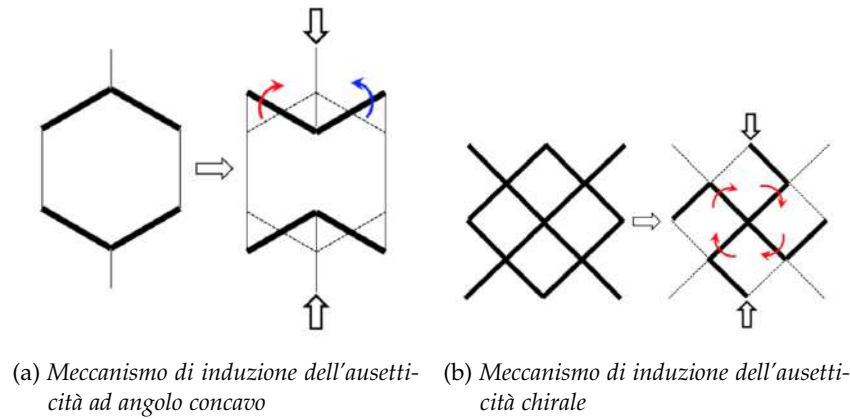


Figura 11: Modalità di induzione del comportamento ausettico. Figura tratta da [17]

6. a stella;
7. origami;
8. kirigami a taglio frattale.

Il principale meccanismo per ottenere un comportamento ausettico è fare in modo che le nervature che formano l'angolo concavo della struttura ruotino quando sollecitate da uno sforzo monoassiale, in particolare verso l'interno se sollecitate a compressione e verso l'esterno quando sollecitate a trazione [23].

Uno dei più vecchi materiali ausettici a cella aperta¹, la struttura alveolare concava (*re-entrant honey-comb*), fu sviluppata a partire da una cella alveolare esagonale introducendovi degli angoli concavi, come mostrato in figura 11.a.

Negli anni '90 si sviluppò un'altra categoria di materiali ausettici a celle aperte, i solidi cellulari chirali. In questa classificazione rientrano le strutture alveolari a nervatura mancante (*missing-rib honeycomb*), descritte per la prima volta da Smith et al. nel 2000. In figura 12 è rappresentata la cella base e uno sviluppo tridimensionale di questo tipo di struttura.

Per entrambe le categorie di materiali, l'effetto ausettico è indotto dalla rotazione delle nervature oblique. Come mostrato in figura 11, le nervature nella cella concava ruotano in direzioni opposte, a causa dell'effetto simmetrico della struttura; nella cella chirale invece le nervature ruotano nella stessa direzione.

Di conseguenza, celle con una geometria chirale hanno in linea teorica un comportamento più robusto del coefficiente di Poisson [17].

¹ La distinzione tra strutture a cella aperta e strutture a cella chiusa riguarda le schiume solide. La prima categoria contiene pori interconnessi tra loro a formare una rete di interconnessione; la seconda non contiene pori interconnessi.

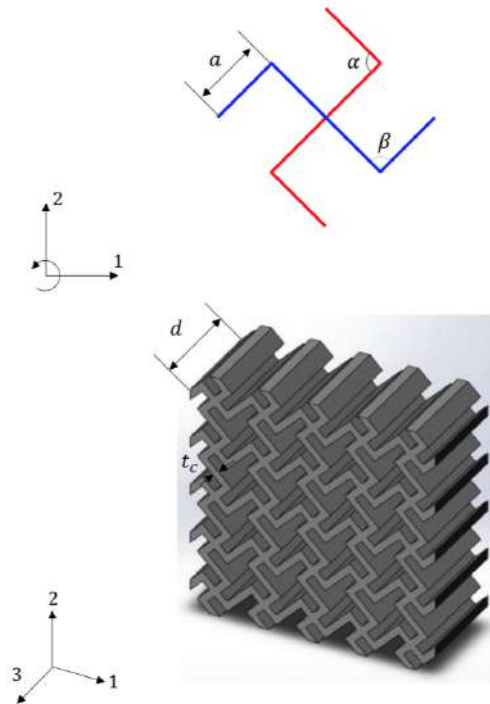


Figura 12: Cella base e sviluppo tridimensionale di una struttura ausettica a nervatura mancante. Figura tratta da [17]

Un altro filone di ricerca si concentra sugli effetti dell'instabilità indotta in materiali porosi e strutture di lattice. Inducendo instabilità, strutture inizialmente simmetriche perdono questa loro proprietà e manifestano un comportamento ausettico. Ad ogni modo, come avvenga la deformazione della struttura inizialmente simmetrica non è definito in modo deterministico poichè quale sia la prima cella ad essere deformata è stabilito in modo casuale e determina la forma deformata complessiva finale. Viceversa, i materiali ausettici chirali a celle aperte hanno chiralità deterministica, e comportamento meccanico e proprietà ad essi correlate può essere ben controllata attraverso geometria e composizione del materiale.

In questa Tesi si tratteranno più in dettaglio le strutture a nervatura mancante, in quanto scelte per l'approccio sperimentale.

3.3.1 Ausettici a nervatura mancante

Il modello a nervatura mancante (*missing-rib model*) o strutture chirali a croce (*cross chiral structures*) si basa sull'osservazione della differenza di dimensioni della cella di base e sulla rottura delle nervature. In figura 13 sono mostrate due reti di celle ideali, una versione "intatta" e una versione "tagliata", in cui alcune nervature sono state rimosse o spezzate. Le nervature hanno subito una rotazione rigida della base, e l'unità di base per ciascun pattern è evidenziata in figura.

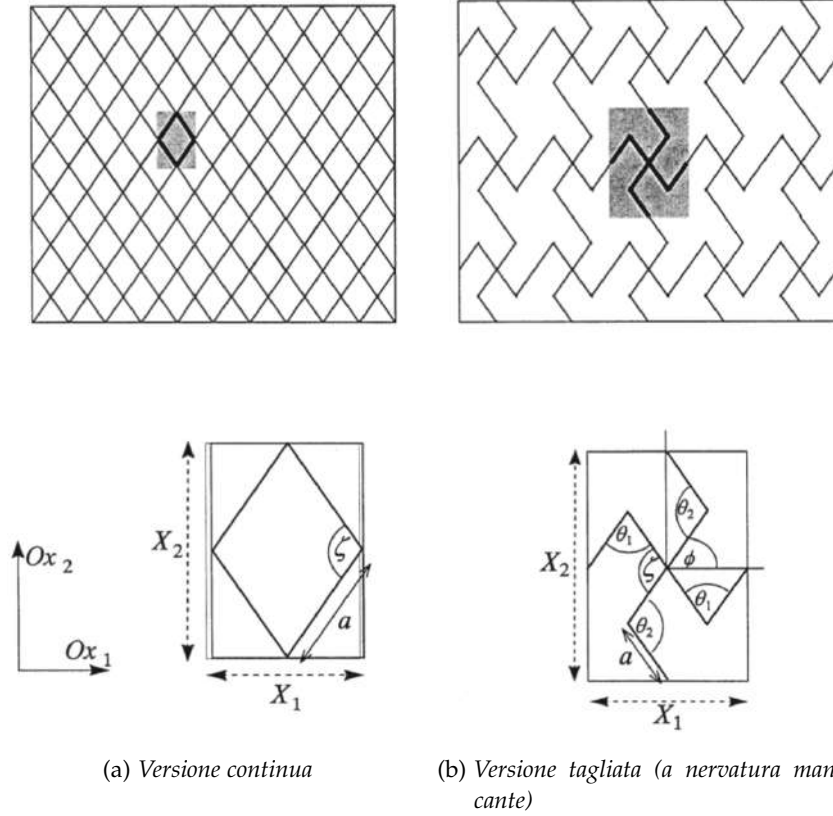


Figura 13: Costruzione e parametri geometriche delle strutture a nervatura mancante. Figura tratta da [26]

In tali strutture è possibile migliorare le proprietà meccaniche che caratterizzano l'ausettico accentuando la rotazione interna.

Uno studio sulla resistenza a taglio della cella chirale è offerto da [18] in cui si mostra l'influenza della geometria chirale e della rigidità rotazionale di centro e giunti angolari su tale proprietà. La soluzione analitica proposta è ottenuta dalla modellizzazione della cella chirale come un insieme di aste rigide e molle elicoidali, come rappresentato in figura 14.

Si è dimostrato che il rapporto tra il modulo di taglio effettivo \bar{G} e la rigidità (espressa attraverso il modulo di Young) effettiva \bar{E} è determinato da:

- angolo α_0 ;
- rapporto di rigidità R_K tra la rigidità della molla centrale K_ϕ e la rigidità della molla angolare K_α

In termini generali, quando R_K aumenta e/o α_0 diminuisce, il rapporto tra modulo di taglio effettivo e rigidità effettiva dell'ausettico chirale può essere aumentata significativamente (figura 15).

Hanno inoltre evidenziato, attraverso una simulazione agli elementi finiti, che il parametro di modello R_K è influenzato solo in mini-

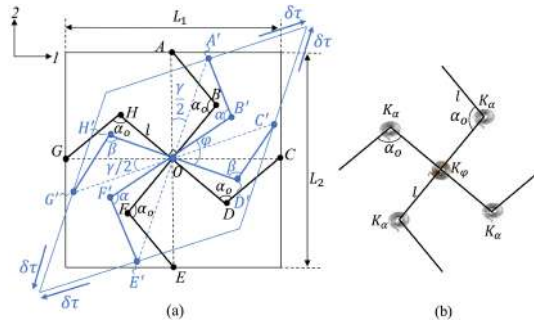


Figura 14: Rappresentazione schematica del modello di un elemento volumetrico rappresentativo sotto sforzo di taglio puro: (a) la configurazione non deformata (linee nere) e quella deformata (linee blu); (b) il modello ad aste rigide e molle per l'elemento volumetrico rappresentativo.

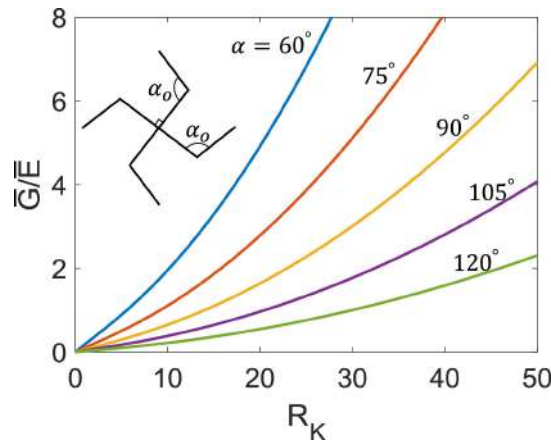


Figura 15: Andamento del rapporto tra modulo di taglio e rigidità effettivi (G/\bar{E}) al variare dell'inclinazione delle nervature α_0 . Immagine tratta da [18].

ma parte dai parametri geometrici della cella chirale, in particolare spessore (t) e lunghezza (l) delle nervature e angolo α_0 (figura 16).

R_K risulta invece molto sensibile al rapporto tra la rigidità del materiale delle nervature (E_r , *ribs stiffness*) e la rigidità del materiale ai giunti angolari (E_h , *hinges stiffness*), come si può interpretare dal grafico riportato in 17

(a) R_K vs. E_r/E_h (; (b) The ratio between the effective shear modulus and effective stiffness vs. corner angle (solid lines represent the analytical prediction; symbols represent the FE results, and different colors represent different values of E_r/E_h).

3.4 APPLICAZIONI

Grazie alle loro proprietà meccaniche, le applicazioni - attuali e potenziali - dei materiali ausettici sono numerose e coprono i principali settori industriali.

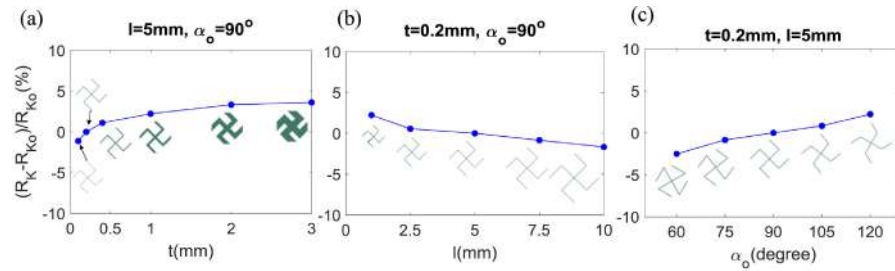


Figura 16: Andamento del rapporto tra modulo di taglio e rigidità effettivi (G/\bar{E}) al variare dell'inclinazione delle nervature α_0 . Immagine tratta da [18].

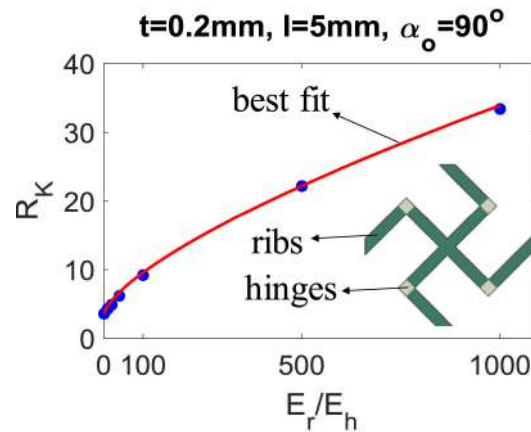


Figura 17: R_K vs E_r/E_h . Immagine tratta da [18].

AEROSPAZIALE pale per turbine dei motori a gas, protezioni termiche, muso dei velivoli, pannelli delle ali, dispositivi fonoassorbenti, smorzatori di vibrazioni, rivetti.

AUTOMOTIVE paraurti, cuscinetti, protezioni termiche, parti che assorbono il suono e le vibrazioni e richiedono un'elevata resistenza a taglio, fissaggi.

BIOMEDICALE bendaggi, fasce compressive, fili interdentali, vasi sanguigni artificiali (un ausetico è in grado di riprodurre con l'espansione in tutte le direzioni l'assottigliamento delle pareti dei vasi sanguigni nel momento in cui fluisce il sangue), pelle artificiale, unità di rilascio di farmaci, ancoraggi per legamenti, impianti chirurgici.

MATERIALI COMPOSITI utilizzati come rafforzatori delle fibre, in quanto rallenta la formazione di cricche tra fibre e matrice.

MILITARE/DIFESA caschi, indumenti antiproiettile, ginocchiere, protezioni, sfruttando le proprietà di smorzamento degli urti.

SENSORISTICA/ATTUATORI idrofoni, dispositivi piezoelettrici, sensori vari. In particolare, si è dimostrato come i polimeri ausettici

siano più efficaci di quelli non ausettici per la creazione di compositi piezoelettrici formati da barre ceramiche, grazie alla capacità degli ausettici di convertire la sollecitazione planare complessiva in una compressione longitudinale, e quindi rafforzare l'incidenza dello sforzo di compressione verticale.

TESSILE fibre, tessuti funzionali, nastri e tessuti che cambiano colore, filati. Sono stati proposti dei filamenti in grado di rilasciare degli agenti attivi, che potrebbero portare a tessuti intelligenti dalle proprietà anti-infiammatorie e anti-odore.

STAMPA ADDITIVA ROBOTIZZATA

La stampa additiva tradizionale è basata sulla costruzione di oggetti per strati planari [15]. Questa logica comporta una serie di limitazioni:

- l'approssimazione di superfici curve a strati planare richiede un elevato numero di strati, che comporta lunghi tempi di lavorazione e il manifestarsi dell'effetto a gradino, che riduce la qualità superficiale. Il miglioramento della qualità superficiale richiede, una quantità significativa di lavorazioni successive, che aumentano ulteriormente tempi e costi di lavorazione.
- alcune geometrie non sono realizzabili senza ridurre drasticamente risoluzione e/o accuratezza;
- l'adesione tra gli strati non è sempre ottimale, causando proprietà anisotropiche nel materiale e riducendo la resistenza complessiva del pezzo;
- la maggior parte delle stampanti in commercio non consente la realizzazione di oggetti di grandi dimensioni a causa di limiti hardware della stampante stessa e dall'incapacità di assemblare parti prefabbricate senza giunzioni visibili sul pezzo finito.

L'utilizzo di robot nel campo della stampa additiva ha l'obiettivo di superare i limiti imposti dalla stampa additiva tradizionale. Contraddistinti da un elevato numero di gradi di libertà, i robot sono in grado di eseguire operazioni di manipolazione complesse, e quindi di stampare geometrie articolate senza strutture di supporto, migliorandone l'accuratezza, riducendo il numero di lavorazioni successive necessarie e minimizzando di conseguenza lo spreco di materiale.

4.1 CAPACITÀ AGGIUNTIVE DELLA STAMPA ADDITIVA ROBOTIZZATA

Nonostante lo scopo ultimo della stampa 3D robotizzata sia un miglioramento complessivo del processo e della qualità del prodotto finito, le direttrici su cui si è mossa la ricerca sono distinte, e fanno riferimento a specifici limiti della stampa tradizionale che questa versione "aumentata" vuole superare.

Bhattet al. propongono una classificazione delle applicazioni finora sperimentate in base alle capacità aggiuntive (attuali o potenziali) che la stampa additiva robotizzata promette, distinguendo le seguenti categorie:

- stampa additiva multidirezionale;
- stampa additiva a strati conformati;
- assemblaggio di componenti prefabbricati con la stampa additiva;
- stampa additiva priva di supporti;
- stampa additiva di pezzi di grandi dimensioni.

4.1.1 *Stampa additiva multidirezionale*

Le stampanti 3D tradizionali sono per lo più a 3 assi. Prendendo come esempio il processo di estrusione, la testina di stampa si muove lungo un piano (2 gradi di libertà) e può spostarsi in verticale aggiustando l'altezza aggiungendo un ulteriore grado di libertà.

I sistemi multidirezionali consentono di realizzare oggetti attraverso una sequenza di strati planari modificando durante il processo di formatura la direzione di costruzione dei piani. L'utilizzo di un sistema a 3 gradi di libertà per la stampa di parti multidirezionali porta facilmente a difetti nel pezzo, ad esempio nella stampa per estrusione, la testina può entrare in collisione con le parti già stampate [13]. Per risolvere questo problema è necessario introdurre almeno un ulteriore grado di libertà per inclinare il pezzo in direzione di stampa, o inclinare la testina di stampa in direzione ortogonale al pezzo.

I principali benefici che si possono ottenere andando a modificare l'orientazione dei piani sono:

- la riduzione dell'effetto "a gradino" che caratterizza la stampa 3D tradizionali;
- la riduzione dell'effetto di delaminazione degli strati che compongono l'oggetto che si verifica nel momento in cui sono applicati sforzi di trazione o di taglio, grazie alla maggiore robustezza in direzione di formatura garantita da una definizione dell'orientazione dei piani conforme ai carichi cui l'oggetto sarà sottoposto in utilizzo;
- può in alcuni casi eliminare la necessità di strutture di supporto, come in [16].

La stampa multidirezionale, sia essa con entrambe le configurazioni si adatta con successo ai processi di estrusione e *material jetting*. Non si ottengono risultati soddisfacenti, invece, quando ad essere lavorate sono polveri o liquidi, poiché non mantengono la posizione richiesta.

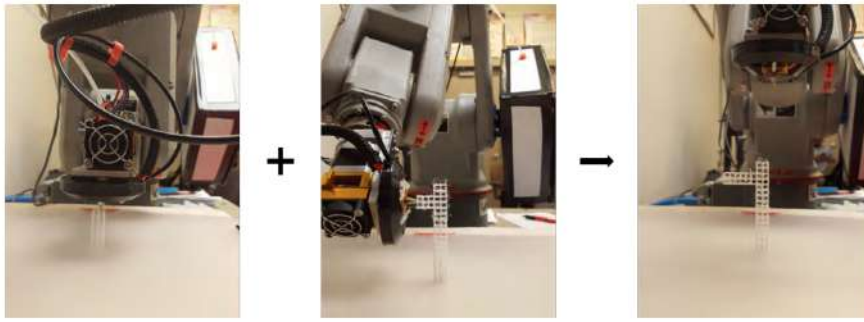


Figura 18: Stampa senza supporto sfruttando la stampa additiva robotizzata.
Esempio tratto da [16]

4.1.2 Stampa additiva per strati conformati

Per geometrie curve o inclinate, la realizzazione del prodotto finale attraverso sezioni planari a due dimensioni risulta inadeguata in termini di resistenza e qualità superficiale (effetto a gradino). Con la stratificazione tradizionale, infatti, il legame tra i diversi *layer* di materiale non è molto forte, e limita la resistenza del pezzo quando è sottoposto a carichi in direzione diversa da quella longitudinale.

La stampa conformata cerca di superare questi limiti, stratificando il pezzo secondo la curvatura della superficie o nella direzione lungo cui si vogliono ottenere migliori proprietà fisiche quali maggiore resistenza meccanica, specifiche proprietà termiche, elettriche e biologiche [33]. In figura 19 sono riportate le due tipologie di stratificazione, tradizionale e conformata.

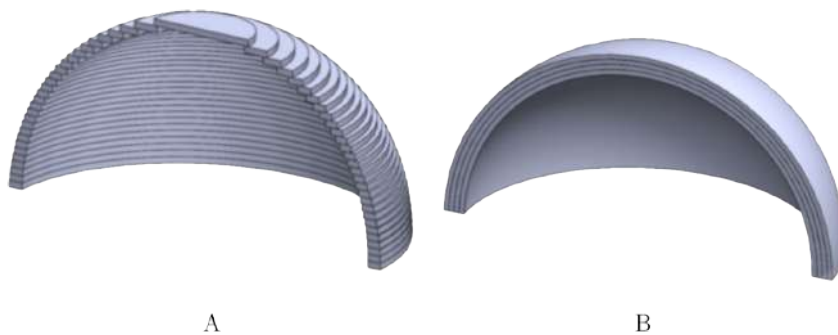


Figura 19: Stratificazione (A) tradizionale, (B) conformata. Esempio tratto da [13]

La realizzazione di strati non planari avviene tipicamente in due modalità: ricorrendo a macchine CNC multiassiali (con almeno 4 gradi di libertà) o a bracci robotizzati (figura 20).

I sistemi con macchine CNC multiassiali sono di facile costruzione e caratterizzati da una buona accuratezza posizionale entro tutto lo

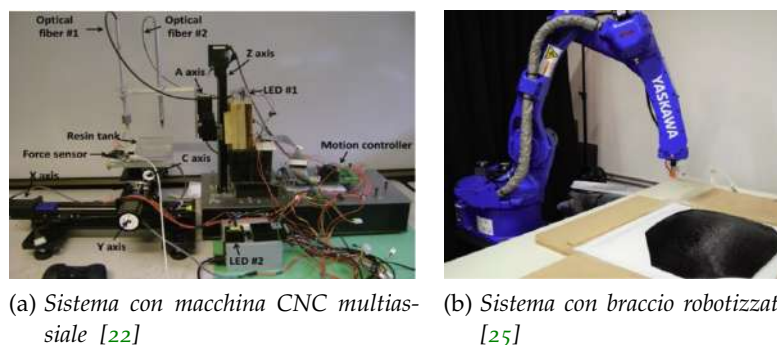


Figura 20: Principali configurazioni per la stampa additiva conformata

spazio di lavoro; quelli con bracci robotizzati invece sono più flessibili e maggiormente scalabili.

La ricerca in ambito della stampa conformata è focalizzata sullo sviluppo di algoritmi che consentano di mappare le superfici curve e le suddividano in strati non planari. Da tali strati bisogna costruire il percorso che seguirà l'utensile di stampa, che richiederà algoritmi di gran lunga più complessi rispetto al caso planare a causa dell'orientazione sempre diversa tra testina e piatto di stampa e del numero di parametri da processo da controllare affinché il pezzo finito presenti le proprietà fisiche e meccaniche desiderate [25].

La realizzazione di strati conformati riduce l'effetto gradino che caratterizza le superfici curve o inclinate ottenute con metodi tradizionali, e di conseguenza la necessità di lavorazioni successive volte al miglioramento della qualità superficiale. Per pezzi di spessore uniforme, la deposizione del materiale e la creazione del legame avviene direttamente lungo una superficie curva; quando invece è richiesto uno spessore non uniforme è possibile procedere per strati tradizionali planari, riducendo i tempi di stampa, e ricorrere ad una stratificazione conformata solo per i *layer* superficiali.

La stampa per strati conformati non migliora solo la qualità superficiale del prodotto finito, ma riduce anche i tempi di lavorazione. Nei sistemi di stampa tradizionale, infatti, pezzo desiderato e struttura di supporto sono costruiti in parallelo, e questo richiede del tempo aggiuntivo alla macchina di stampa per cambiare continuamente le impostazioni per ottenere le due parti. Al contrario per generare strati conformati è possibile realizzare rapidamente delle strutture di supporto in anticipo, e su queste depositare il materiale che formerà il prodotto finito.

Lo svantaggio principale della stampa conformata è legato alla limitata varietà di applicazioni, intese come tecniche e dimensione dei pezzi, su cui finora abbia dimostrato efficacia. Non è possibile ad oggi ottenere pezzi conformati per laminazione; neppure con la fusione per letto di polveri ed i processi di deposizione diretta di energia si riescono ad ottenere risultati soddisfacenti dal momento

che risulta difficile distribuire uniformemente lo strato di polveri sulle superfici curve. Gli strati conformati si coniugano bene invece con processi di estrusione [25]- [22], *material jetting*, *binder jetting* e fotopolimerizzazione.

Un'ulteriore lacuna della stratificazione conformata è la mancanza di modelli in grado di definire quali siano i parametri corretti per migliorare qualità e resistenza del pezzo.

Per quanto riguarda la scala dimensionale, infine, la ricerca sta esplorando la realizzazione di superfici conformate di grandi dimensioni attraverso manipolatori mobili, mentre oggetti conformati su micro e nanoscala non sono ancora stati indagati.

4.1.3 *Assemblaggio di componenti prefabbricati*

La stampa additiva tradizionale è in grado di combinare in un pezzo finale unico assemblati complessi solo se tutte le parti sono ottenute con questo processo. Se al contrario dei componenti ottenuti con altri processi devono essere incorporati nella struttura, è necessario procedere con delle operazioni esterne di assemblaggio, che se manuali (come spesso accade) fanno incrementare notevolmente così il rischio di difetti nel pezzo finito [13].

Ricorrendo ad un assemblaggio robotizzato, invece, il problema non si pone. Le operazioni di assemblaggio richiedono una buona manovrabilità nello spazio cartesiano a 6 dimensioni, sicché ricorrere ad un robot ad almeno 6 gradi di libertà risulta un'opzione ragionevole.

Per produrre un pezzo con componenti prefabbricati incorporati è necessario un robot che esegua l'assemblaggio durante il processo di formatura. Le configurazioni possibili per ottenere ciò sono due:

- Dispositivo di stampa additiva tradizionale abbinato ad un manipolatore con un elevato numero di gradi di libertà, il quale svolge le operazioni di assemblaggio quando richiesto;
- Robot *multipurpose* ad almeno 6 gradi di libertà che esegua sia la stampa che l'assemblaggio.

Vantaggi e svantaggi dei due approcci sono riassunti in tabella 1.

Ad oggi questo campo di ricerca risulta poco esplorato poiché per ottenere di operazioni efficienti richiede una totale riprogettazione della cella e del processo di lavorazione. Bhatt et al. hanno studiato il *setup* sperimentale per la laminazione (figura 21), determinando le caratteristiche di processo in termini di accuratezza, resistenza e tempo di lavorazione dei pezzi.

4.1.4 *Stampa additiva priva di supporti*

La maggior parte dei processi di stampa additiva richiede l'utilizzo di strutture di supporto a perdere, le quali incidono negativamente

	Stampa tradizionale e assemblaggio robotizzato	Stampa e assemblaggio robotizzati
<i>Vantaggi</i>	facilmente adattabile con poche modifiche a impianto e processo	sistema più pratico ed operazioni più efficienti
<i>Svantaggi</i>	basso coefficiente di utilizzo del robot	maggiore sforzo di progettazione dell'impianto e del processo di costruzione

Tabella 1: Vantaggi e svantaggi dei diversi approcci di stampa additiva robotizzata.

te sui processi di stampa, aumentandone tempo di processo¹, costi complessivi e spreco di materiale.

In molti processi, primo tra tutti quello estrusivo, il materiale è depositato allo stato semi-fuso. Per evitare che il peso degli ultimi strati gravi su quelli precedenti deformandoli è necessario fornire un adeguato supporto: nel caso di strutture semplici è sufficiente allungare il tempo che intercorre tra la deposizione di strati successivi, dando modo al materiale di solidificare e svolgere esso stesso la funzione portante, mentre per elementi aggettanti o inclinati di angoli inferiori ad un angolo critico, dei supporti esterni sono indispensabili [12]. I sistemi cartesiani a 3 assi normalmente impiegati nella stampa 3D tradizionale non dispongono dell'agilità necessaria per evitare tali strutture; i bracci robotici invece, caratterizzati da un elevato numero di gradi di libertà, possono evitare o minimizzare la necessità di strutture di supporto modificando la direzione della testina di stampa o della base del pezzo.

È importante sottolineare che le metodologie di stampa senza supporti e stampa multidirezionale differiscono per l'orientazione relativa tra utensile e piatto di stampa. Mentre nella stampa multidirezionale la deposizione avviene sempre lungo strati planari, la stampa priva di supporti sfrutta i gradi di libertà aggiuntivi per minimizzare o eliminare l'utilizzo di strutture di supporto, riuscendo di conseguenza a seguire traiettorie di stampa su superfici curve.

Per realizzare con metodo FDM un pezzo privo di supporti, Wu et al. hanno sfruttato un manipolatore che modificasse l'orientazione della base durante la stampa. Gli autori hanno scelto per la base un movimento intermittente, ossia l'orientazione cambiava dopo un certo numero di strati. Il cambio di orientazione è evidenziato nel pezzo finito dallo stacco di colore, come apprezzabile nel pezzo di sinistra

¹ Negli articoli esaminati sono riportati allungamenti nel tempo di stampa fino all'86% nel caso tradizionale, e frequentemente nella fascia 60-80%.

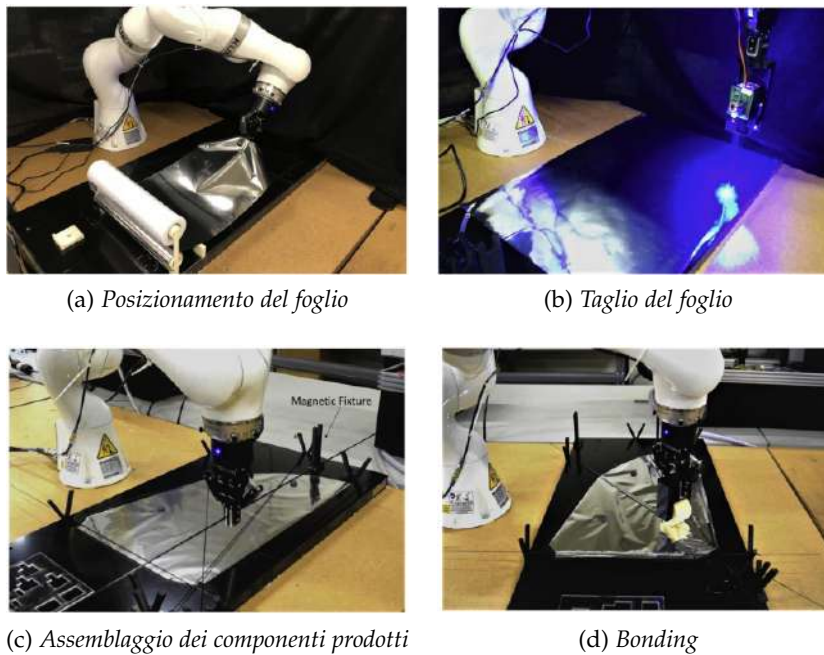


Figura 21: Setup sperimentale per la laminazione. Esempio tratto da [12]

della figura figura 22; quello a destra è invece l'equivalente stampato con metodo tradizionale.

Figura 22: Differenza tra pezzi stampati cambiando l'orientazione di stampa (a sinistra) e pezzi stampati in modo tradizionale (a destra). Esempio tratto da [30]

La stampa priva di supporti può essere realizzata con diverse modalità, che fanno capo a due principi di base: l'aggiunta di gradi di libertà al sistema di stampa (base e/o testina) o la scelta di particolari caratteristiche di processo.

AGGIUNTA DI GRADI DI LIBERTÀ AL SISTEMA DI STAMPA Per ottenere strutture complesse prive di supporti, la modalità più diffusa consiste nell'aggiungere gradi di libertà al sistema di stampa attraverso macchine CNC multiassiali o bracci robotizzati. Le possibili configurazioni sono:

- testina di stampa trasla, piatto di stampa trasla e ruota;
- testina e piatto di stampa traslano e ruotano.

Aggiungendo gradi di libertà alla testina di stampa il sistema risulta più agile, e consente di evitare collisioni con le parti già stampate (problema ineludibile nel caso [63], dove i gradi di libertà aggiuntivi sono limitati alla base).

Un'altra caratteristica discriminante è la modalità con cui si cambia l'orientazione della direzione di stampa in modo che avvenga sempre in favore di gravità. La variazione può essere [13]:

- intermittente, come nel caso esemplificato in [30];
- continua.

Una variazione continua nell'orientazione del piatto di stampa è certamente più complessa dal punto di vista della programmazione poiché richiede la sincronizzazione degli elementi che costituiscono il *setup* sperimentale, ma è più flessibile in termini di complessità geometrica del pezzo finale.

SFRUTTAMENTO DELLE CARATTERISTICHE DI PROCESSO Ricorrere a specifici materiali, processi di formatura e tempi di raffreddamento ridotti consente di realizzare geometrie complesse senza supporti. Due esempi di stampa senza supporti e anti-gravitazionale, ossia realizzata a mezz'aria, arrivano dal Joris Laarman Lab, che ha realizzato i sistemi **MATAERIAL** in collaborazione con l'Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC) e **MX3D Metal** con Aco-tech ed il supporto di Autodesk. Di particolare interesse è il secondo metodo, che abbina una torcia saldatrice ad un braccio robotizzato per legare, attraverso saldatura, il nuovo materiale depositato con gli strati precedenti. *MX3D Metal* è in grado di lavorare una grande varietà di metalli quali acciaio, acciaio inox, alluminio, bronzo o rame, ognuno dei quali richiede una calibrazione dei parametri sperimentale effettuata *ad hoc*.

L'assenza di supporti in pezzi metallici comporta benefici ancor più evidenti dal momento che la loro rimozione è più complessa e costosa rispetto ai materiali plastici o solubili.

La stampa priva di supporti è attualmente limitata dalla scarsa conoscenza di quale combinazione di parametri influenzi esattamente la qualità del pezzo stampato, impedendo l'ottimizzazione del processo.

4.1.5 *Stampa additiva di oggetti di grandi dimensioni*

Per applicazioni di grandi dimensioni, la stampa 3D tradizionale risulta inefficiente sia nei costi che nel rapporto tra volume stampabile e ingombro del macchinario (V_s/V_m), come si può evincere dalla tabella 2.

L'inefficienza volumetrica risiede nel fatto che il macchinario necessita, oltre ad un piatto di stampa di notevoli dimensioni, di una serie di dispositivi di supporto in grado di movimentare, calibrare e controllare un'area di stampa tanto grande. Il peso elevato limita inoltre la mobilità di tali portali di lavorazione.

Ricorrendo a dei manipolatori con un elevato numero di gradi di libertà, invece, si è in grado di aumentare la produttività in termini

[h]

Tabella 2: Vantaggi e svantaggi dei diversi approcci di stampa additiva robotizzata. Dati ricavati dall'articolo [5]

Modello	Casa produttrice	Volume di stampa	Ingombro	V_s/V_m	Prezzo
The Box	BLB Industries (SE)	2.80m ³	7.88m ³	31%	> 50.000\$
Tractus 3D 350	Tractus 3D (NL)	2.00m ³	6.47m ³	31%	40.000\$
The Atlas	Titan Robotics (US)	1.39m ³	ND	ND	> 100.000\$
Delta WASP 3MT	WASP (IT)	1.2m ³	15.41m ³	8%	25.200\$
The BigRep One	BigRep (DE)	1.50m ³	7.18m ³	21%	17.200 ÷ 57.250\$

di area di stampa, tempo di formatura e costi [13]. In figura 26 è rappresentato lo spazio di lavoro del manipolatore KUKA LBR iiwa 14 R820, utilizzato per la parte sperimentale di questa Tesi. Il primo giunto può ruotare di ± 170 deg, consentendo di stampare non solo in direzione frontale ma anche di lato e dietro. Il volume nominale complessivo dello spazio di lavoro è di 1.8m³, che il robot può sfruttare pressoché *in toto* come area di stampa. Una stampante tradizionale per ottenere un pari volume stampabile richiederebbe strutture ben più ingombranti (si faccia ancora una volta riferimento alla tabella 2).

Collocando il robot su una base mobile è possibile raggiungere aree di stampa potenzialmente infinite, o comunque di gran lunga superiori allo spazio di lavoro del manipolatore utilizzato per la stampa, come dimostra lo studio di Tiriyaki et al.. Gli autori hanno costruito una struttura in cemento di 2100 × 450 × 100 mm³ a fronte di un braccio robotizzato di 870 mm, fissando il manipolatore ad una base mobile (figura 23).

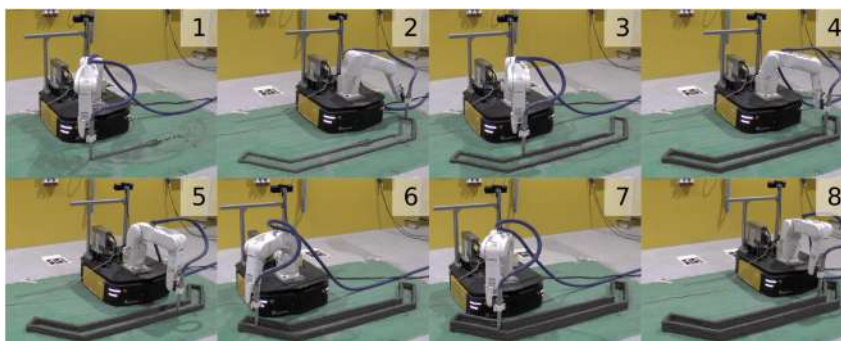


Figura 23: Sequenze di stampa dell'esperimento citato in [27].

La realizzazione di una stampa in movimento pone davanti a di-

verse sfide quali la pianificazione e coordinazione del moto di manipolatore e piattaforma mobile ed un appropriato controllo in *feedback* per assicurare che l'estrusore depositi il materiale (nell'esperimento cemento) nella posizione e alla velocità prestabilite.

Possibili svantaggi legati all'utilizzo di robot mobili per la stampa additiva sono le scarse accuratezza e ripetibilità dovute alla base mobile. L'attuatore terminale del manipolatore mobile potrebbe non essere in grado di seguire una traiettoria di elevata risoluzione in modo preciso. Per superare questi limiti, il manipolatore dovrebbe essere dotato di sensori aggiuntivi che registrino i movimenti e pianifichino un *feedback* dinamico. Inoltre il mercato propone a ritmi crescenti dispositivi mobili con migliori accuratezza posizionale e destrezza.

Oltre alla compattezza dimensionale a parità di volume di stampa, i sistemi robotizzati consentono un notevole risparmio di tempo grazie alla possibilità di stampare *in situ*, rimuovendo la necessità di spostare dal piatto di stampa pezzi ingombranti e/o poco maneggevoli, e all'eliminazione di strutture di supporto e lavorazioni successive.

L'utilizzo di robot a 6 gradi di libertà può utilizzare come supporti delle strutture preesistenti, a differenza dei sistemi tradizionali a cabina in cui ciò non è possibile per il rischio di collisioni.

Anche sotto il profilo dei costi le tecniche robotizzate sono più convenienti. Venendo meno la necessità di ricollocare il pezzo e assemblarlo riduce i costi di manodopera, mentre la compattezza del dispositivo robotizzato consente di ridurre i costi di installazione.

4.2 PROCESSI DI STAMPA ADDITIVA ROBOTIZZATA

A differenza della stampa 3D tradizionale, che ha visto uno sviluppo omogeneo tra le diverse tecniche quanto a materiali impiegati e applicazioni, gran parte della ricerca nell'ambito della stampa additiva robotizzata ha seguito il filone dei processi di estrusione, più economici e adatti ad una grande varietà di materiali. Anche i processi di deposizione diretta di energia sono oggetto di studio, e rappresentano ad oggi l'unico metodo presente in letteratura per la stampa di metalli, sia a partire da polveri che da filamento [29]. I processi di fotopolimerizzazione sono limitati all'utilizzo di idrogel e riguardano per lo più l'ambito medico, ad esempio per la stampa *in situ*, e non saranno quindi approfonditi in questa Tesi.

Per motivazioni analoghe anche la trattazione di sistemi ibridi robot-assistiti non sarà trattata in dettaglio. Per sistemi ibridi si intende la coniugazione di processi additivi e sottrattivi in un processo unico o in processi sequenziali. Nonostante una simile combinazione di processi sia in grado di conferire una migliore qualità superficiale, riducendo allo stesso tempo l'usura degli utensili e il tempo di lavorazione, e consenta di produrre pezzi altrimenti non ottenibili (in termini di sostenibilità economica) con processi separati, le poche applicazio-

ni legate alla robotica sono per lo più limitate alla combinazione di stampa 3D e lavorazioni con macchine CNC multiassiali.

4.2.1 Processi basati sull'estrusione

I processi di stampa additiva robotizzata basati sull'estrusione prevedono, come il corrispettivo tradizionale, la deposizione selettiva di materiale attraverso un ugello o un orifizio. Le applicazioni principali della versione robotizzata comprendono la creazione *freeform* di forme organiche, elementi per la costruzione di edifici a scopo progettuale e oggetti di grandi dimensioni, grazie ai continui progressi ottenuti dalla stampa priva di supporti. Un esempio interessante arriva dalla Tongji University, i cui ricercatori hanno combinato un processo FDM a un manipolatore antropomorfo per realizzare una struttura a rete in ABS ispirata ad una ragnatela [32]. La struttura della ragnatela (figura 24) è costituita da un filo centrale (struttura primaria) cui si annodano dei fili laterali (strutture ausiliarie), tre secondo lo studio di ottimizzazione geometrica descritto nell'articolo. Per questo motivo l'apparato di stampa è costituito da un ugello fisso e tre ugelli flessibili in grado di muoversi in modo flessibile e sincrono gli uni con gli altri.

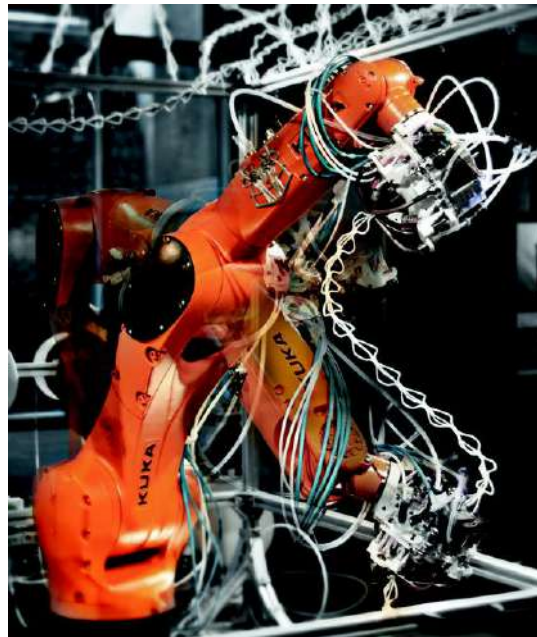


Figura 24: Struttura a ragnatela realizzata in *free forming*. Esempio tratto da [32]

I robot più utilizzati in combinazione con i processi estrusivi sono i manipolatori antropomorfi, al cui organo terminale viene la testina di stampa, ma in letteratura si trovano esperimenti anche con piccoli robot mobili e robot a cavi.

4.2.2 Deposizione diretta di energia

I processi di deposizione di energia diretta o DED (*Directed Energy Deposition*) ricorrono a fonti di energia termica quali laser, fascio di elettroni o plasma, per fondere i materiali nel momento in cui sono depositati. Come già accennato, sono le uniche tecniche di stampa additiva a più gradi di libertà in grado di lavorare materiali metallici, siano essi in forma pulviscolare (con sistema di alimentazione coassiale polvere-fascio di energia) o filamenti.

Questi processi sono utilizzati per:

- creare componenti nuovi o geometrie nuove in parti esistenti a piena densità e con prestazioni elevate;
- riparare utensili di grandi dimensioni come gli stampi per *injection molding*;
- creare strutture multimateriali e FGM modificando il materiale fornito all'ugello [20];
- creare rivestimenti termicamente e chimicamente resistenti.

I processi DED non sono in grado di realizzare geometrie troppo complesse, ed hanno problemi nella distribuzione efficiente delle polveri (se il materiale di partenza si trova in questo stato) e nel controllo delle proprietà del materiale. Con lo scopo di utilizzare il processo laser per applicazioni aerospaziali, ricercatori dell'Oak Ridge National Laboratory hanno condotto numerosi esperimenti finalizzati a ottimizzare i parametri di processo come l'energia del laser, la velocità di alimentazione del filo, la velocità del robot e il tempo di raffreddamento, e a minimizzare le tensioni residue e distorsioni nei pezzi.

Un'alternativa al laser è l'utilizzo di un fascio di elettroni come fonte energetica per fondere il metallo depositato. Questo metodo richiede un ambiente sotto vuoto, che elimina le impurezze nel materiale e migliora le proprietà meccaniche nel pezzo finito. Inoltre le alte temperature coinvolte nei processi a fascio di elettroni riducono gli sforzi residui.

4.3 VANTAGGI, SVANTAGGI E SFIDE FUTURE

I robot a più gradi di libertà consentono di implementare metodi di produzione flessibili, efficienti e riconfigurabili, in grado di eseguire operazioni che spaziano dalla semplice manipolazione di oggetti a lavorazioni come fresatura, taglio, saldatura e verniciatura.

Questi pregi, uniti al potenziale offerto dalla stampa additiva (robotizzata e non) di ridurre il *time to market* e aumentare la personalizzazione dei prodotti, rendono molto più ampio lo spettro di geometrie e soluzioni realizzabili se paragonate ai metodi tradizionali.

Si è già discusso di come la stampa robotizzata possa superare i principali limiti della stampa tradizionale, ma è importante sottolineare come non sia un approccio privo di problemi [29]:

- è difficile controllare e coordinare contemporaneamente il robot ed il sistema di stampa;
- gli attuali algoritmi di stratificazione non sono in grado di realizzare dati in G-code compatibili con i software dei robot, così come manca uno standard sul flusso di informazioni che lega il sistema CAD al processo di stampa additiva robotizzata;
- la qualità del pezzo finito, che dipende in larga parte dall'accuratezza del moto dei sistemi delle macchine di stampa, è bassa, poiché bassa è l'accuratezza nel moto dei robot;
- l'utilizzo di robot multipli per la realizzazione di oggetti di grandi dimensioni può determinare problematiche in tema di sicurezza, aree di collaborazione uomo-robot ed elusione degli ostacoli.

Quanto agli sviluppi futuri, la rapida evoluzione di sistemi di visualizzazione dell'ambiente circostante promette soluzioni che consentiranno ai robot di adattare in tempo reale i loro movimenti al contesto fisico in cui si trovano. Questa funzione sarà resa più facile dall'introduzione dell'Intelligenza Artificiale nei sistemi robotizzati, che consentirà anche di ottimizzare i processi di produzione.

ATTIVITÀ SPERIMENTALE

La trattazione dei precedenti capitoli vuole aiutare a contestualizzare l'attività sperimentale di questa Tesi, volta alla realizzazione di strutture cilindriche con motivi ausetici. Per superare la stratificazione bidimensionale offerta dalle tecnologie di stampa 3D tradizionali, gli approcci robotizzati forniscono diverse soluzioni. I processi di deposizione diretta di energia consentono di realizzare geometrie molto complesse con accuratezza e precisione elevate, ma sono accompagnate da diversi svantaggi quali elevati costi unitari ed elevato dispendio energetico. I processi DED, inoltre, provocano modifiche microstrutturali imprevedibili nelle polveri metalliche, a causa degli intensi cicli di fatica termica cui sono sottoposti durante la stampa. Per omogeneizzare la struttura e migliorare le proprietà meccaniche si rendono necessari processi di post produzione, che fanno crescere ulteriormente tempi e costi di processo [14].

L'obiettivo del progetto di ricerca è trovare delle alternative più sostenibili rispetto ai metodi per deposizione diretta di energia, ma che garantiscano allo stesso tempo accuratezza e ripetibilità dei risultati soddisfacenti.

L'indagine è stata rivolta quindi ai processi estrusivi di *Direct Ink Writing*, che permettono:

- un minore controllo dell'ambiente di stampa, evitando costose procedure camere sotto vuoto o riempite con gas inerti;
- un ridotto consumo energetico per l'alimentazione dei macchinari;
- un'ampia varietà di materiali stampabili.

La maggior parte delle applicazioni di stampa robotizzata per estrusione descritte nel capitolo precedente, tuttavia, fanno uso dei manipolatori per movimentare l'ugello di stampa. In tale modo diventa fondamentale calibrare in ogni punto le caratteristiche di pressione e velocità di estrusione, poiché le proprietà reologiche dell'inchiostro, un fluido non newtoniano, dipendono dagli sforzi di taglio che agiscono su di esso. Una soluzione, questa, che complica notevolmente il sistema dal punto di vista computazionale e di controllo.

L'approccio seguito in questa Tesi, invece, prevede di mantenere fermo l'apparato di stampa, e di sfruttare l'elevato numero di gradi di libertà del manipolatore per movimentare il supporto di stampa, così da mantenere l'estrusione sempre in favore di gravità e con l'ugello a orientazione costante rispetto al punto di deposizione. Per

l'applicazione oggetto di studio sono stati sufficienti due tipologie di movimenti, rotazioni e traslazioni lungo lo stesso asse, ma provata la validità di questo approccio, è possibile complicare a piacere il percorso di moto per realizzare un'ampia varietà di geometrie.

5.1 SETUP SPERIMENTALE

L'apparato sperimentale è costituito da due sistemi distinti, la stampante additiva *Delta WASP 2040 Clay* ed il manipolatore *KUKA LBR iiwa 14 R820*. I due dispositivi sono integrati e coordinati all'avvio tramite programmazione, nei parametri per iterazioni sperimentali.

5.1.1 KUKA LBR iiwa 14 R820

Progettato dalla casa tedesca KUKA, *LBR iiwa* è il primo robot sensibile, ovvero adatto ad applicazioni collaborative, ad essere stato prodotto in serie e vincitore del prempio *Reddot award* nel 2016 [7]. Il termine "*iiwa*" fa riferimento proprio a questa sua caratteristica collaborativa, acronimo di *intelligent industrial work assistant*; "*LBR*" invece sta per *Leichtbauroboter*, robot leggero. La variante 14 presente in laboratorio ha infatti un peso di soli 29.9kg ma una capacità di carico di 14kg, da cui deriva il nome del modello.

KUKA LBR iiwa 14 R820 è un sistema robotizzato che comprende tutti i componenti tipici di un robot industriale [19]:

- manipolatore (3 in figura 25);
- controllore del robot *KUKA Sunrise Cabinet* (5 in figura 25);
- pannello di controllo *KUKA smartPAD* (2 in figura 25);
- cavi di connessione (in figura 25 1 è il cavo che si connette alla *SmartPAD*, 4 al *KUKA Sunrise Cabinet*);
- software;
- accessori.

5.1.1.1 Caratteristiche del manipolatore

LBR iiwa 14 R820 è un manipolatore a 7 gradi di libertà, in grado di spostare carichi pari a metà del suo peso¹ e di estendersi fino a 820mm all'interno di uno spazio di lavoro di volume 1.8m³, a fronte di un'altezza dalla base alla flangia di 1306mm. Compattezza e leggerezza sono caratteristiche che permettono di accorciare notevolmente i tempi di risposta del robot.

¹ Il rapporto *payload*-peso è di 0.47.



Figura 25: Panoramica del sistema

In figura 26 è rappresentato lo spazio di lavoro del manipolatore; nelle tabelle 3, 4 5 si riportano rispettivamente i dati dimensionali dello spazio di lavoro, le specifiche tecniche principali e le informazioni sugli assi.

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

Tabella 3: Dimensioni dello spazio di lavoro di KUKA LBR iiwa R820

A rendere i modelli LBR iiwa così sensibili, sicuri, flessibili e precisi ([7]) sono essenzialmente due aspetti tecnico-costruttivi:

- il numero ridondante di giunti, che consente di raggiungere uno stesso punto dello spazio con (potenzialmente) infinite configurazioni;
- la presenza di sensori di coppia, oltre che di posizione, su ogni singolo giunto. In questo modo i giunti sono in grado di rispondere ad ogni minimo stimolo esterno, abilitando di fatto la modalità collaborativa in sicurezza.

Oltre a queste caratteristiche, ciò che rende questo manipolatore KUKA adatto a così diverse e numerose applicazioni (ordine di prodotti sigillanti, collanti o materiale simile; montaggio, caricamento e allestimento; fissaggio e pressatura; manipolazione su macchine utensili; modifica; misurazione, collaudo e prova; imballaggi e approntamento; pallettizzazione; lavorazione meccanica; smontaggio; ...) è la possibilità di scegliere fra tre modalità di controllo:

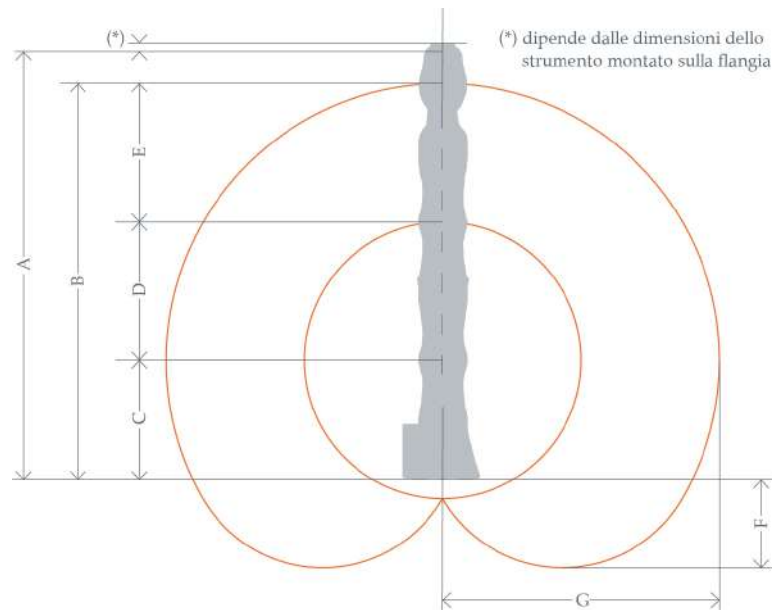


Figura 26: Spazio di lavoro di KUKA LBR iiwa R820

Carico di lavoro	14kg
Numero di assi	7
Flangia di montaggio	DIN ISO 9409-1-A50
Posizioni di montaggio	<i>Pavimento</i> / parete / soffitto
Accuratezza di posizionamento (ISO 9283)	$\pm 0.1\text{mm}$
Accuratezza di coppia su specifico asse	$\pm 2\%$
Peso	29.9kg
Codice di protezione	IP 54 (polvere e getto d'acqua)

Tabella 4: Caratteristiche tecniche di emphKUKA LBR iiwa R820

MODALITÀ "POSITION CONTROLLER" Logica tradizionale di controllo: il manipolatore raggiunge la posizione desiderata con una velocità programmata.

MODALITÀ "GRAVITY COMPENSATION" Il manipolatore compensa il peso del carico applicato in modo da ridurre al minimo la forza esterna necessaria per movimentarlo. Questa modalità è particolarmente utile per facilitare l'esecuzione di *task* non ergonomici o altamente ripetitivi.

MODALITÀ "COMPLIANCE CONTROLLER" Ogni asse può essere configurato in modo differente, agendo sia sulle modalità di traslazione che di rotazione per ottimizzare e adattare le caratteristiche del robot alle specifiche dell'operazione da svolgere. È

Asse	Intervallo di rotazione	Coppia massima	Velocità massima
A1	$\pm 170^\circ$	320Nm	$85^\circ/\text{s}$
A2	$\pm 120^\circ$	320Nm	$85^\circ/\text{s}$
A3	$\pm 170^\circ$	176Nm	$100^\circ/\text{s}$
A4	$\pm 120^\circ$	176Nm	$75^\circ/\text{s}$
A5	$\pm 170^\circ$	110Nm	$130^\circ/\text{s}$
A6	$\pm 120^\circ$	40Nm	$135^\circ/\text{s}$
A7	$\pm 175^\circ$	40Nm	$135^\circ/\text{s}$

Tabella 5: Informazioni sugli assi di KUKA LBR iiwa R820

inoltre possibile attivare una determinata forza e sovrapporla al moto.

RIDONDANZA CINEMATICA Dal punto di vista cinematico, si possono definire due tipologie di problemi:

- *Problema cinematico diretto*, che definisce la posizione dell'organo terminale TCP (*Tool Center Point*) a partire dalle coordinate dei giunti;
- *Problema cinematico inverso*, che determina le coordinate nello spazio dei giunti a partire dalla posizione cartesiana del TCP.

Se il problema cinematico diretto ha una sola soluzione per ogni manipolatore, il problema cinematico inverso può averne più di una. I robot antropomorfi (6 gradi di libertà) possono raggiungere la maggior parte dei punti interni allo spazio di lavoro con due configurazioni, a gomito alto e a gomito basso; LBR iiwa, con 7 gradi di libertà, può raggiungere la posizione obiettivo con un numero infinito di configurazioni dei suoi assi.

Questa caratteristica porta a due considerazioni:

- per determinare in modo univoco la configurazione degli assi data una locazione obiettivo definita nello spazio cartesiano è necessario definire il parametro di status l'angolo di ridondanza;
- si può sfruttare l'ambiguità nella configurazione degli assi per raggiungere locazioni obiettivo in spazi angusti.

Definizione univoca del problema cinematico inverso Per determinare senza ambiguità le coordinate dei 7 giunti del robot, i parametri di posizione e orientazione cartesiana (x, y, z, A, B, C) non sono sufficienti. Bisogna specificare anche:

ANGOLO DI RIDONDANZA Nei modelli *LBR iiwa* l'angolo di ridondanza assume il valore del terzo asse.

STATUS Valore descritto da un numero binario a 3 bit:

BIT 0 specifica la posizione del centro del polso sferico (intersezione tra gli assi A5, A6 e A7) in riferimento all'asse x del sistema di coordinate di A1. Il sistema di riferimento di A1 coincide con quello base del robot se l'asse A1 è a 0° , e si muove con esso.

BIT 1 specifica la posizione dell'asse A4.

BIT 2 specifica la posizione dell'asse A6.

Le specifiche dei 3 bit che definiscono lo status sono riportate in tabella 6.

Valore	Posizione
Bit 0=0	<i>Basic area</i> . Il robot è in area di base se il valore x della posizione del centro del polso sferico relativa al sistema di riferimento di A1 è positivo.
Bit 0=1	<i>Overhead area</i> . Il robot si trova in posizione a soffitto se la coordinata x del centro del polso sferico nel sistema di riferimento di A1 è negativa.
Bit 1=0	$A4 \geq 0^\circ$
Bit 1=1	$A4 < 0^\circ$
Bit 2=0	$A6 > 0^\circ$
Bit 2=1	$A6 \leq 0^\circ$

Tabella 6: Valore dei bit che definiscono il numero di status

Null space motion Quando il manipolatore si muove nello spazio cartesiano, la presenza della ridondanza rende possibile il cosiddetto *null space motion*, durante il quale gli assi ruotano in modo tale da mantenere posizione e orientazione del TCP durante tutto il movimento (figura 27). Questo risulta particolarmente utile in caso di spazi di lavoro angusti o per cercare di spostare un asse arrivato a fine corsa. Il moto nello spazio nullo è eseguito dal gomito del manipolatore, la cui posizione è definita dall'angolo di gomito R. Per modificare il valore di R è possibile agire sui *jog key* attivando la modalità manuale T1 nella *teach pendant*, o ridefinirlo nel codice di programmazione per la modalità automatica AUT.



Figura 27: *Null space motion*

5.1.1.2 Componenti software

Il cuore dell'attività sperimentale di questa Tesi è la programmazione del movimento del robot in ambiente software. I componenti software di *LBR iiwa* sono i seguenti:

- KUKA Sunrise.OS 1.13;
- KUKA Sunrise.Workbench 1.13;
- WorkVisual 4.0.

Di questi si accennerà solo ai primi due, utilizzati nell'attività sperimentale. WorkVisual 4.0, invece, assolve le funzioni di configurazione, diagnostica e mappatura dei bus.

KUKA SUNRISE.OS Nel sistema operativo per robot industriali KUKA Sunrise.OS, le attività di programmazione e di controllo operativo sono nettamente separate le une dalle altre. Le applicazioni del robot sono programmate nell'ambiente KUKA Sunrise.Workbench ([1] in figura 28) da PC, e sono inviate al controllore del robot mediante connessione KLI. La cella robotizzata o stazione, costituita da controllore [2], manipolatore [3] ed eventualmente altri dispositivi, può essere gestita dal pannello di controllo KUKA smartPAD [4]. Una stazione può eseguire *task* multipli.

I *task* sono così suddivisi tra smartPAD e KUKA Sunrise.Workbench: strumento di configurazione iniziale della stazione e per lo sviluppo delle applicazioni del robot.

può essere utilizzato sia per la configurazione iniziale, nei casi in cui non è possibile (per ragioni pratiche o di sicurezza) assolvere questa funzione mediante Workbench, sia terminata lo sviluppo dell'applicazione per ricalibrare o svolgere semplici attività di servizio. Non può cambiare le configurazioni della stazione, di sicurezza o il codice di programmazione.

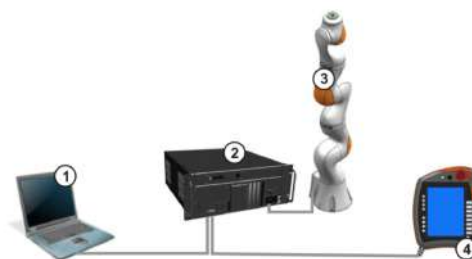


Figura 28: Separazione delle operazioni di controllo e di programmazione

KUKA SUNRISE.WORKBENCH È l'ambiente di programmazione della cella robotizzata, attraverso il quale è possibile realizzare:

- **Funzioni di avvio**, quali:
 - installazione del sistema software;
 - configurazione della cella robotizzata;
 - modifica delle impostazioni di sicurezza;
 - configurazione di I/O;
 - trasferimento del progetto al controllore del robot.
- **Sviluppo di applicazioni**, ad esempio:
 - programmazione di applicazioni del robot in linguaggio Java;
 - gestione di progetti e programmi;
 - modifica e gestione dei dati *runtime*;
 - sincronizzazione dei progetti;
 - *debugging* da remoto (impostazione dei punti di arresto, esecuzione del programma in operazioni *single-step*, visualizzazione e modifica delle variabili o modifica del codice durante l'esecuzione del programma).

La scelta da parte dei costruttori di ricorrere al linguaggio Java ha lo scopo di rendere più flessibile la programmazione del robot da parte degli utilizzatori finali, essendo questo un linguaggio di programmazione molto diffuso. La conoscenza di questo linguaggio, tuttavia, non è sufficiente, poiché molte funzioni sono caratteristiche dell'ambiente KUKA Sunrise.Workbench.

PACCHETTI L'esecuzione del codice di programmazione è vincolata al caricamento di pacchetti che abilitano funzionalità specifiche del robot. Quelli utilizzati per i programmi dell'attività sperimentale di questa Tesi sono descritti di seguito.

- **import** `javax.inject.Inject` integra le risorse mediante *dependency injection*;
- **import** `com.kuka.common.ThreadUtil` implementa i *Thread*;
- **import** `com.kuka.roboticsAPI.applicationModel.RoboticsAPIApplication` l'applicazione scritta viene considerata un'estensione della classe `RoboticsAPIApplication`.
- **import static** `com.kuka.roboticsAPI.motionModel.BasicMotions.*` abilita le modalità di moto di base (PTP, LIN, CIRC);
- **import** `com.kuka.roboticsAPI.deviceModel.JointEnum` e **import** `com.kuka.roboticsAPI.deviceModel.JointPosition` consentono di definire le posizioni nello spazio dei giunti;
- **import** `com.kuka.roboticsAPI.deviceModel.LBR` definisce il tipo di robot;
- **import** `com.kuka.roboticsAPI.deviceModel.LBRAlphaRedundancy` e **import** `com.kuka.roboticsAPI.deviceModel.LBRE1Redundancy` consentono di definire l'angolo di ridondanza;
- **import** `com.kuka.roboticsAPI.geometricModel.Frame` e **import** `com.kuka.roboticsAPI.geometricModel.ObjectFrame` abilitano definizione e utilizzo di oggetti di tipo `Frame`

STRUTTURA DI BASE L'estensione della classe dell'applicazione scritta dal programmatore alla classe `RoboticsAPIApplication` genera un codice di *default* da integrare con le istruzioni specifiche. Prendendo come esempio il programma principale scritto per questa Tesi, si ha:

```
public class ChiaraLayer extends RoboticsAPIApplication
{
    @Inject
    private LBR lBR_iiwa_14_R820_1;

    @Override
    public void initialize()
    {
        // initialize your application here
    }

    @Override
    public void run()
    {
```

```

        // your application execution starts here
        layer();
    }

```

dove:

- `@Inject` richiama tutti gli oggetti che si vogliono utilizzare. Nel caso di specie **private** `LBR lBR_iiwa_14_R820_1`, che definisce il tipo di robot utilizzato;
- `@Override` riscrive i metodi ereditati, in particolare:
 - **public void** `initialize()`, che inizializza l'applicazione;
 - **public void** `run()`, che contiene i metodi che compongono l'applicazione;

5.1.2 Tecnologia di stampa

Per realizzare il processo di estrusione si sono sondate due metodologie alternative:

- l'utilizzo di una siringa-serbatoio sorretta da un supporto metallico con sistema di estrusione ad aria compressa, in cui il controllo della pressione che permette di estrarre il materiale avviene in modo manuale (figura 29);
- l'ausilio di una stampante *desktop* a tecnologia FDM, programmabile nei parametri di estrusione attraverso file G-code (figura 30).

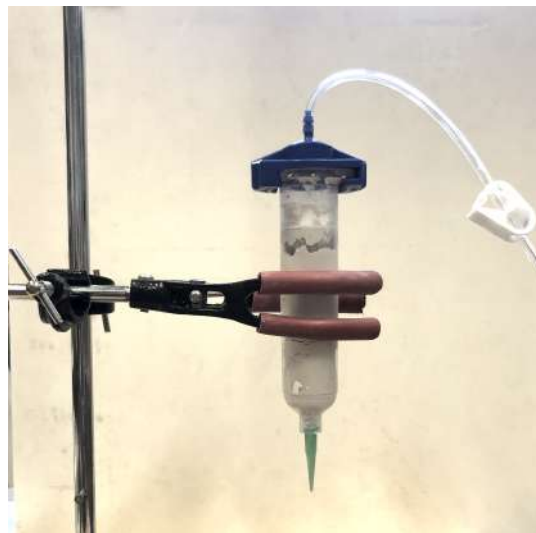


Figura 29: Dispositivo di stampa con siringa-serbatoio e aria compressa

Già dalle prime prove sperimentali si è abbandonato il primo metodo, troppo poco accurato per l'interazione con il robot. Sarà quindi esaminata in dettaglio solo la seconda procedura.



Figura 30: Stampante 3D Delta WASP 2040 Clay

5.1.2.1 Stampante Delta WASP 2040 Clay

Delta WASP 2040 Clay (30) è una stampante 3D *desktop* con configurazione delta del robot, muove la testina di stampa attraverso tre bracci snodati che corrono lungo delle guide verticali [8]. Prodotta dall'azienda italiana Wasproject, questa stampante deve il suo nome al volume di stampa (20cm di diametro, 40cm di altezza, che generano un volume cilindrico di circa 250cm^3) e ai materiali che è in grado di estrarre in modo ottimale, ovvero i ceramici.

La stampante è equipaggiata con scheda microcontroller Arduino MEGA 2560 con *firmware opensource* Marlin, presente nella maggior parte delle stampanti 3D di tipo *desktop*. Le interfacce caratteristiche sono USB e scheda SD, ed è possibile navigare tra le diverse funzioni della stampante attraverso un display LCD posto sulla parte superiore del telaio.

Per il controllo del processo di stampa è possibile agire in due modi:

- tramite il software PronterFace, collegando opportunamente il PC alla stampante;
- caricando i file G-code su una scheda di memoria SD e selezionando il programma da eseguire attraverso il display che si trova sulla sommità della stampante. Sarà questa la procedura utilizzata per l'attività sperimentale.

Per le specifiche tecniche del dispositivo si rimanda alla tabella (7).

5.1.2.2 Inchiostro di stampa

La possibilità di semplificare il processo di stampa robotizzata e di agire in ambiente aerobico senza particolari accorgimenti si deve in

Informazioni sulla stampa 3D	
Tecnologia	<i>Liquid Deposition Modeling</i>
Volume di stampa	d = 200mm, h = 400mm
Risoluzione <i>layer</i>	0.5mm (max)
Velocità di stampa	150mm/s (max)
Velocità di moto	150mm/s (max)
Precisione	12μm sul piano xy, 4μm sull'asse z
Materiali estrudibili	Porcellana, gres, argilla
Estrusore	LDM WASP Extruder (d = 1.2mm)
Software	
Sistemi operativi compatibili	Windows, Mac, Linux
Software di stratificazione	Cura, SLic3r, Simplify 3D
Estensione file	.stl, .obj, .gcode
Interfacce	Scheda SD, display LCD
Dimensioni fisiche	
Ingombro	49 × 44 × 87cm ³
Peso	40kg
Alimentazione	
Ingresso	220/240V, 50/60Hz
Potenza assorbita	180W
Aria compressa necessaria	≥ 8bar
Temperatura	
Utilizzo	20 – 30°C
Conservazione	0 – 30°C
Componenti meccaniche	
Telaio	Alluminio, acciaio
Piatto di stampa	Alluminio
Movimento	Cinghie dentate di nylon su rotaie di alluminio

Tabella 7: Specifiche tecniche della stampante 3D *Delta WASP 2040 Clay*

larga parte agli inchiostri utilizzati. Per questo motivo si è scelta la tecnica di stampa additiva di *Direct Ink Writing* (DIW), che si basa sull'estrusione di un filamento viscoso attraverso un ugello di diametro ridotto [14].

Tecniche di fabbricazione di materiali informi come il gel casting richiedono reazioni di polimerizzazione organica o solidificazione di un polimero fuso; il *direct ink writing* invece si affida alle caratteristiche reologiche e alla parziale asciugatura dei singoli strati per produrre il pezzo. Per ottenere prestazioni ottimali con questa metodologia bisogna adattare la viscosità e la sua dipendenza reologica dalla velocità di taglio durante la lavorazione.

L'inchiostro utilizzato è composto da:

- 50 – 60% di polvere di argilla;
- < 1% di additivi organici;
- 35 – 50% di acqua (in alternativa è possibile utilizzare altri solventi volatili).

PROPRIETÀ REOLOGICHE DEGLI INCHIOSTRI PER DIW In generale, una miscela per *direct ink writing* deve:

- avere sufficiente comportamento pseudoplastico da scorrere attraverso un ugello di piccole dimensioni ad una velocità di taglio modesta. Ciò significa che deve diminuire la sua viscosità quando è applicato uno sforzo di taglio ((a) in figura 31).
- tornare, entro un certo tempo di recupero, a valori elevati di viscosità dopo la cessazione dello sforzo di taglio, in modo da essere in grado di autosostenersi ((b) in figura 31).

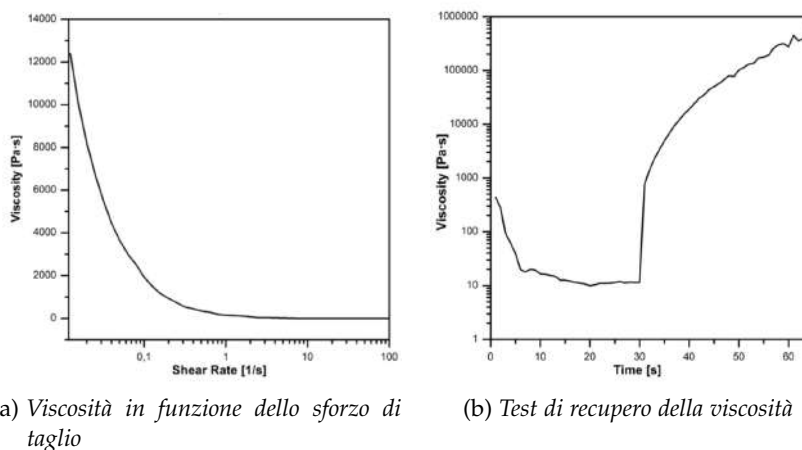


Figura 31: Caratteristiche reologiche di un inchiostro di polveri di Ti6Al4V.

Le polveri ceramiche che compongono gli impasti tradizionali hanno dimensione uniforme dell'ordine di $10\mu\text{m}$, e dopo l'essiccazione raggiungono una densità di aggregazione del 65%. Negli impasti per DIW, il comportamento cambia a seconda frazione volumetrica di parte solida ($V\%_S$) :

- $V\%_S < 40\%$: comportamento newtoniano, viscosità modesta;
- $V\%_S = 40 \div 60\%$: comportamento pseudoplastico, viscosità modesta;
- $V\%_S > 60\%$: comportamento estremamente pseudoplastico, viscosità aumenta.

Quando la frazione volumetrica di parte solida raggiunge il 63%, la mobilità delle particelle è limitata e l'impasto diventa una massa dilatante. Ne consegue che il valore ottimale di $V\%_S$ per la stampa è prossimo alla densità di aggregazione teorica, di modo che una minima esposizione all'aria renda il filamento abbastanza solido da restare in forma e poter essere sormontato da un'ulteriore strato di materiale.

Per facilitare la solidificazione, accade spesso che i pezzi vengano stampati su piattaforme preriscaldate a $40 - 60^\circ\text{C}$ per incentivare il passaggio da comportamento pseudoplastico a dilatante.

La velocità di asciugatura è quindi un parametro cruciale per la solidità strutturale del materiale depositato:

- se troppo bassa, la transizione pseudoplastico-dilatante avviene in ritardo, e nel frattempo il peso degli strati può provocare cedimenti e creare pareti non uniformi;
- se troppo elevata, possono generarsi cricche, deformazioni e destratificazione tra *layer*.

5.2 ITER SPERIMENTALE

5.2.1 Definizione della struttura ausettica da stampare

Per rispondere alla richiesta di stampare una struttura cilindrica che presentasse proprietà ausettiche si è dovuto in primo luogo confrontare i *pattern* disponibili con i vincoli imposti dal *setup* di stampa.

Gli apparati estrusivi analizzati nella precedente sezione non consentono di interrompere in tempi ragionevolmente brevi l'erogazione del flusso di materiale, imponendo di fatto un'estrusione continua. Il sistema tecnicamente più semplice, la siringa con pistone, è gravato da una regolazione di tipo manuale del flusso e dal tempo di risposta meccanico della valvola dell'aria compressa; la più sofisticata soluzione con stampante 3D, invece, richiederebbe una sincronizzazione nella programmazione software tra robot e macchina di stampa che

penalizzerebbe la scalabilità dell'applicazione. Queste considerazioni hanno portato a escludere le geometrie i cui nodi presentano un numero dispari di connessioni, giacché renderebbero impossibile entrare e uscire dagli stessi senza percorrere due volte uno stesso ramo o modificare la trama complessiva.

Un ulteriore vincolo connesso al precedente è quello di monopassata, ossia di non percorrere lo stesso tratto all'interno di uno strato per una distanza maggiore a quella necessaria per realizzare i nodi con lo strato inferiore. Questo ha portato ad escludere la maggior parte delle strutture ausettiche che, seppur idonee per una stampa planare, avrebbero imposto un margine di chiusura longitudinale evidente, determinando potenzialmente proprietà anisotropiche indesiderate nel pezzo finito.

La scelta è quindi ricaduta nelle strutture chirali a nervatura mancante o *missing rib*, che incontrano i prerequisiti sovracitati e consentono un discreto margine di libertà nella scelta delle dimensioni dell'elemento base.

5.2.2 Programmazione del robot

Stabilito il motivo da realizzare, si è passati alla definizione del percorso e alla struttura del codice per movimentare il robot.

Il codice iniziale è stato concepito per la realizzazione del *task* con un manipolatore antropomorfo Adept, e dunque in linguaggio V+ (in appendice A.1). Rispetto ai modelli LBR iiwa di KUKA, il manipolatore Adept offriva sulla carta una maggiore flessibilità di rotazione dell'organo terminale, fondamentale per eseguire la rotazione di circa 480° richiesta per completare il cilindro. Lo svantaggio di Adept, tuttavia, è l'azzeramento dell'angolo di rotazione nel momento in cui il relativo giunto arriva a fine corsa, comportando movimenti non controllabili che creano difetti nel pezzo finale. KUKA invece segue una logica di programmazione differente, e manda in stop forzato il manipolatore se, durante la pianificazione del movimento successivo, il software rileva una qualche violazione dei vincoli meccanici. Questo aveva portato in prima analisi a scartare LBR iiwa perché limitato nell'ultimo giunto ad una rotazione di 370° nominali, vincolo poi superato sfruttando la ridondanza offerta dal terzo giunto.

Il codice definitivo è stato quindi scritto in linguaggio Java in ambiente KUKA Sunrise.Workbench, compatibile con il pacchetto software KUKA Sunrise.OS con cui si interfaccia il manipolatore LBR iiwa 14 R820 presente in laboratorio.

5.2.3 Test di stampa e set-up dei parametri

La fase più complessa dell'intera ricerca è stata la sincronizzazione del sistema di stampa, costituito da manipolatore e stampante 3D. Ci

sono volute diverse prove di stampa per determinare come i parametri di processo influenzino le caratteristiche del pezzo finito, e di conseguenza quelli ottimi. Di seguito saranno descritte la procedura di attrezzaggio e le modalità con cui sono stati definiti i parametri di processo.

5.2.3.1 *Attrezzaggio*

Per ottenere il cilindro con *pattern* ausettico si è deciso di mantenere l'estrusore in posizione fissa e muovere il supporto cilindrico su cui depositare il materiale su uno spazio cartesiano tridimensionale per mezzo del braccio robotizzato. Questa scelta ha consentito di semplificare il controllo dell'inchiostro, mantenendo un assetto in favore di gravità durante tutto il processo di stampa, particolarmente vantaggiosa dal momento che il fluido utilizzato è di tipo non newtoniano, e quindi fortemente influenzato nelle proprietà reologiche dalla forza di taglio agente su di esso.

L'inchiostro fluisce dal serbatoio in cui è contenuto all'estrusore per la pressione esercitata da un sistema ad aria compressa, regolabile in modo manuale. Quando raggiunge l'estrusore, il materiale attraversa una vite senza fine che ruota, ed esce dall'ugello ad una velocità che è frutto della combinazione del parametro di velocità imposto per programmazione e della pressione dell'aria compressa regolata manualmente.

La stampa è effettuata in aria, in condizioni di umidità e temperatura ambiente (18 – 24°C), grazie alle miscele di inchiostro impiegate che non necessitano di particolari atmosfere protettive. Il materiale è depositato su un foglio di PVC che riveste il supporto, per facilitare il distacco del pezzo a stampa ultimata. Per una deposizione ottimale, si è visto che il filamento di materiale debba formare un angolo di circa 90° rispetto alla verticale, perciò la distanza tra ugello e punto di deposizione deve essere tale da non comprimere il filamento e allo stesso tempo non sia ad una distanza eccessiva.

5.2.3.2 *Set-up dei parametri*

Il moto del supporto di stampa è il risultato di una sequenza di pure rotazioni e pure traslazioni lungo l'asse z , orientato parallelamente al pavimento. Tali movimenti, di pari lunghezza, dovevano avvenire alla stessa velocità, ragione per cui la velocità angolare di rotazione ω_r [rad/s] e quella cartesiana di traslazione v_{cart} [mm/s] sono stati parametrizzati in funzione della circonferenza del cilindro stampato:

$$\omega_r = v_{cart} \cdot \frac{\delta[\text{rad}]}{dh[\text{mm}]} \quad (2)$$

dove δ è l'angolo di rotazione di un singolo tratto espresso in radianti, e dh la lunghezza del singolo moto di traslazione.

È stato dunque necessario coordinare tali velocità con le due variabili caratteristiche del sistema di stampa:

- velocità di estrusione v_{ext} ;
- pressione di estrusione p_{ext} .

L'approccio sperimentale alla ricerca della combinazione ottimale delle tre variabili v_{cart} , v_{ext} e p_{ext} ha consentito di riscontrare una serie di difetti che possono colpire il pezzo in via di formazione, raccolti di seguito nella tabella 8 e mostrati in figura 32.

Difetto	Cause
Arricciatura del tratto	Velocità di estrusione e/o pressione troppo elevate rispetto alla velocità di moto del robot.
Segni circolari sul tratto depositato	Pressione troppo elevata e/o ugello troppo vicino alla superficie di deposizione.
Ricciolo negli angoli	Freno meccanico del robot dovuto al cambio nella direzione di moto e <i>blending</i> insufficiente.
Angoli troppo smussati	Velocità del robot e/o <i>blending</i> troppo elevati rispetto alla velocità di estrusione.
Tratti consecutivi non ortogonali	Velocità del robot troppo elevata rispetto alla velocità di estrusione.
Rottura del filamento durante la deposizione	Presenza di bolle di aria nell'inchiostro; umidità dell'inchiostro e/o pressione di estrusione insufficienti.

Tabella 8: Classificazione e cause dei difetti riscontrati nei test sperimentali

I parametri ottimali per la stampa di argilla ricavati in modo empirico sono riassunti in tabella 5.2.3.2.

v_{cart}	v_{ext}	p_{ext}
6[mm/s]	100	0.2[atm]

5.2.3.3 Risultato finale

Definiti i parametri ottimali e perfezionato il codice di programmazione, si è riusciti a stampare un pezzo multistrato con le caratteristiche



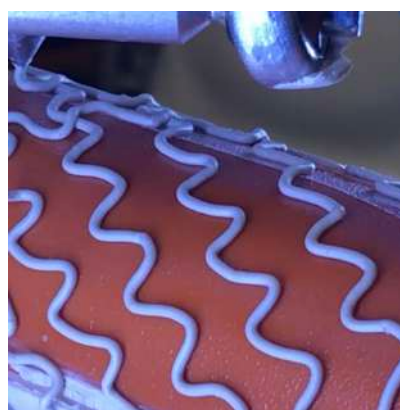
(a) Arricciatura del tratto



(b) Segni circolari sul tratto depositato



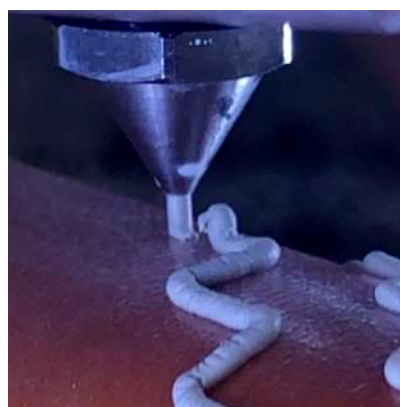
(c) Ricciolo negli angoli



(d) Angoli troppo smussati



(e) Tratti consecutivi non ortogonali



(f) Rottura del filamento durante la deposizione

Figura 32: Tipologie di difetti riscontrati nei test sperimentali

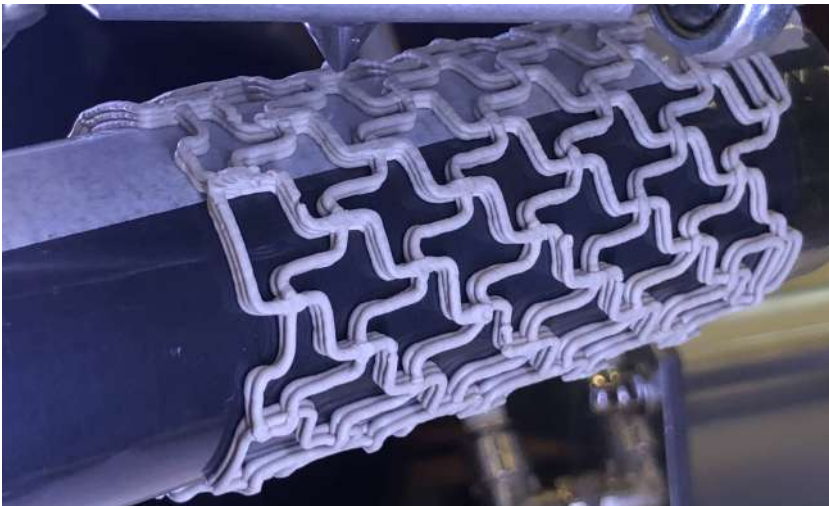
desiderate. In figura 33 si possono vedere alcune sequenze di stampa.



(a) Primo layer, movimento di andata



(b) Primo layer, movimento di ritorno



(c) 3 coppie di layer (andata e ritorno)

Figura 33: Processo di stampa del pezzo

5.3 ANALISI DEL CODICE DI PROGRAMMAZIONE

Lo scopo di questa sezione è di spiegare la logica sottostante alle funzioni principali del programma scritto per il robot, e come queste abbiano consentito, in ultima istanza, di stampare dei pezzi con le caratteristiche prefissate. Per il codice nella sua interezza si rimanda all'appendice A.3.

L'apparato di stampa è caratterizzato da un notevole ingombro ed una scarsa manovrabilità, e richiede una ricalibrazione dei parametri di posizione ogni volta che viene spostato. Per agevolare le prove sperimentali e la stampa consecutiva di più campioni si è quindi deciso di suddividere il codice .java in tre programmi distinti:

AVVIO INIZIALE Porta il robot in posizione di *home* definita come punto di partenza per la stampa. La posizione di *home* è riferita allo spazio dei giunti anziché alle tradizionali coordinate cartesiane attraverso il comando `JointPosition`. In questo modo il manipolatore riesce a raggiungere la locazione obiettivo senza il rischio di imbattersi in fermi meccanici conseguenti alla violazione dei limiti sugli assi.

PROGRAMMA PRINCIPALE Movimenta il cilindro di supporto in modo coerente con la trama da realizzare. Il movimento del cilindro è opposto a quello di formazione del pattern.

AVVIO FORZATO Consente di portare il robot in posizione di *home* senza che il manipolatore si arresti per violazione dei limiti sugli assi ruotando solamente terzo e settimo giunto, ovvero annullando la probabilità di cadere in configurazioni singolari.

5.3.1 *Programma principale*

Il programma principale racchiude la definizione della sequenza di movimenti che, combinati all'estrusione del materiale di stampa, porterà alla formazione del pezzo con la geometria desiderata. Il metodo principale è `layer()`, all'interno del quale sono richiamati i metodi ausiliari `muovi()`, `muovi2()` e `waitTouch()`.

5.3.1.1 *Definizione del frame di riferimento*

Tutti i movimenti sono stati definiti rispetto ad un unico *frame* di base, `Frame homeC`, collocato ad un'altezza tale da non far collidere il gomito del robot con la base nei punti in cui la ridondanza raggiunge il valore massimo di $\pm 170^\circ$. La scelta di definire i movimenti rispetto al medesimo sistema di riferimento anziché sulla base della posizione immediatamente precedente ha come obiettivo minimizzare l'errore di posizionamento tra pianificazione ed esecuzione del movimento stesso.

Per definire un *frame* rispetto al sistema di riferimento assoluto del robot bisogna definire sei parametri: i primi tre esprimono la posizione nello spazio cartesiano rispetto agli assi x, y, z , gli ultimi tre la sequenza di rotazioni del sistema di riferimento per ottenere l'orientazione finale secondo la convenzione di Cardano z, y', x'' . Nel caso in cui si voglia esprimere il sistema di riferimento relativo ad un altro *frame* è richiesto un parametro aggiuntivo, il *frame* di partenza, che viene inserito come primo argomento della variabile. Per la posizione di partenza è stato definito un frame di base, `Frame homeC0`, successivamente ruotato del massimo angolo consentito al settimo giunto (170°) per massimizzare la rotazione eseguibile dallo stesso.

Al fine di ampliare la massima rotazione complessiva del robot attorno l'asse z è stata associata alla posizione `homeC` un valore di

ridondanza pari a metà dell'angolo di rotazione del settimo giunto in tale posizione. Questo rapporto 1 : 2 tra rotazione del settimo giunto e del giunto ridondante è mantenuta in tutti i movimenti successivi, in modo da garantire un buon compromesso tra flessibilità di rotazione e vibrazioni sull'organo terminale.

Il moto con cui il manipolatore raggiunge la posizione di *home* è di tipo LIN, ossia seguendo una traiettoria lineare, con velocità relativa dei giunti pari a 0.1rad/s.

```
Frame homeC0 = new Frame(695,0,510,
Math.toRadians(0),Math.toRadians(90),Math.toRadians(0));

Frame homeC = new Frame(homeC0,0,0,0,Math.toRadians(angl1st),//
Math.toRadians(0),Math.toRadians(0));

LBRAlphaRedundancy alpha = new LBRAlphaRedundancy();
alpha.setAlpha(Math.toRadians(angl1st/2));
homeC.setRedundancyInformation(LBR_iiwa_14_R820_1, alpha);

LBR_iiwa_14_R820_1.move(lin(homeC0).setJointVelocityRel(0.1));
LBR_iiwa_14_R820_1.move(lin(homeC).setJointVelocityRel(0.1));
```

5.3.1.2 Comando di moto: metodi *muovi()* e *muovi2()*

I nodi che contraddistinguono il motivo ausettico a nervatura mancante sono ottenuti per sovrapposizione di due *layer* di materiale, depositati l'uno rispetto all'altro con una rotazione complessiva opposta. La coppia di *layer* può essere ripetuta per un numero *n* strati a piacere, per ottenere strutture di maggiore o minore spessore in direzione radiale. Questa stratificazione ha imposto l'adozione dei due metodi distinti *muovi()* e *muovi2()* che, seppur governati dalla stessa logica, necessitano di *frame* di riferimento differenti. Ad ogni nuovo strato, infatti, la posizione del manipolatore deve abbassarsi lungo l'asse *z* del sistema di riferimento assoluto di una quota pari allo spessore del materiale estruso, onde evitare interferenze dell'ugello con quanto già depositato.

Si consideri a titolo di esempio *muovi()*:

```
public void muovi(Frame base, double theta,double d)
{
//DEFINIZIONE PARAMETRI
double angl1st=-170;
double circ = 127;
double vcart = 6;
double vrad=vcart*2*Math.PI/circ;

//DEFINIZIONE LOCAZIONE OBIETTIVO
Frame mov0 = new Frame(base,0,0,d,Math.toRadians(theta),0,0);

//DEFINIZIONE RIDONDANZA
```

```

LBRAAlphaRedundancy alpha = new LBRAAlphaRedundancy();
alpha.setAlpha(Math.toRadians(theta/2+ang1st/2));
mov0.setRedundancyInformation(lBR_iiwa_14_R820_1, alpha);

//COMANDO DI MOTO
lBR_iiwa_14_R820_1.moveAsync(lin(mov0).setCartVelocity(vcart).//
setOrientationVelocity(vrad).setBlendingOri(0.05));
ThreadUtil.sleep(120);
}

```

Il metodo `muovi()` riceve tre parametri in ingresso:

- *base*, *frame* utilizzato come riferimento per definire le locazioni da raggiungere;
- *theta*, angolo di rotazione attorno *z* rispetto al *frame* di base per raggiungere la locazione obiettivo, espresso in gradi;
- *d*, lunghezza da percorrere lungo l'asse *z* del sistema di riferimento base per raggiungere la locazione obiettivo, espressa in millimetri.

Questi parametri, oltre a definire il *frame* che esprime la locazione obiettivo da raggiungere con il moto, servono per impostare la ridondanza, sempre pari a metà della quota angolare del settimo giunto rispetto il sistema di riferimento base.

All'interno del metodo sono riportati i parametri geometrici dell'applicazione specifica per assicurare congruenza tra gli spostamenti longitudinali e tangenziali e tra le corrispondenti velocità. Come anticipato poco sopra, la ridondanza è sempre la metà della rotazione del settimo giunto.

È definita infine l'istruzione di moto, che fa spostare il manipolatore nella locazione obiettivo `mov0`. Per eseguire il movimento si utilizza ancora una volta un moto di tipo `LIN`, per evitare manovre imprevedibili del manipolatore, cui sono associate le velocità `vcart` e `vrad` (velocità cartesiana e radiale) attraverso i comandi `setCartVelocity()` e `setOrientationVelocity()` rispettivamente.

Per quanto riguarda la modalità di esecuzione del moto si è passati, dopo i primi test sperimentali, dal metodo di esecuzione sincrona delle righe di comando, `move()`, a quello non sincronizzato, `moveAsync()`. La distinzione tra i due, come si può leggere in [19] è la seguente:

- `move()` si utilizza per esecuzioni sincronizzate, che significa che i comandi di moto sono mandati in successione al controllore *real-time* e poi eseguiti. Finché non è terminato il movimento elaborato, il programma non avanza nella lettura del codice e nella programmazione del moto.
- `moveAsync()` si utilizza per esecuzioni asincrone, ovvero quando si vuole che la riga di comando successiva sia eseguita subito dopo che il comando di moto è stato lanciato.

Con la modalità sincrona, dunque, il manipolatore esegue un nuovo comando di moto solo dopo aver completato il precedente. Questo, unito al netto cambio di direzione del moto dovuto al continuo alternarsi di moti di pura traslazione e pura rotazione, determina un accumulo di materiale maggiore negli angoli rispetto ai tratti rettilinei. Si è quindi optato per la modalità asincrona, avendo premura di aggiungere una breve pausa di 120ms al termine di ogni movimento (`ThreadUtil.sleep(120)`) per evitare che il calcolatore, procedendo troppo rapidamente nella lettura del codice rispetto all'attuale posizione nello spazio, manchi di eseguire alcuni movimenti caratterizzati da locazioni di partenza e arrivo coincidenti.

All'istruzione di moto è stato aggiunto il parametro di *blending*, `setBlendingOri()`, per approssimare l'orientazione della posizione obiettivo. L'approssimazione inizia non appena la differenza (in valore assoluto) tra l'angolo dell'orientazione dominante e l'angolo dell'orientazione finale è minore del valore (in radianti) inserito come argomento. Quello assegnato per l'applicazione è il valore minimo non nullo (0.05rad), che riesce a conciliare un moto privo di scatti con una trascurabile curvatura degli spigoli. Aumentando questo valore la smussatura del percorso diventa eccessiva, rimuovendolo completamente si creano riccioli o accumuli di materiale indesiderati (5.2.3.2).

5.3.1.3 Comando di partenza per contatto: metodo `waitTouch()`

Coordinare manualmente l'inizio dell'estrusione con il moto del robot è impossibile senza un certo margine di ritardo. Per automatizzare questa fase e migliorare la sincronizzazione dei due dispositivi si è sfruttato il controllo di coppia di KUKA, ottenuto mediante il comando `getExternalTorque()`. Una volta che il robot si è portato in posizione di partenza `homeC`, resta in attesa (per un massimo di 2.000.000ms) di una coppia percepita dal terzo giunto prima di procedere con i movimenti necessari alla stampa. La scelta del terzo giunto è legata al punto di applicazione della forza esterna, impressa dalla punta dell'estrusore: programmando un file G-code si porta l'ugello in posizione di stampa, quindi lo si fa scendere lentamente verso la base cilindrica di modo che il contatto faccia percepire al terzo giunto una coppia. L'estrusore risale verso la posizione di stampa subito dopo il contatto e inizia, dopo una pausa di 0.2s, a depositare il materiale.

Se il robot non riceve una coppia entro l'intervallo di tempo prefissato, il programma termina.

```
public void waitTouch() {  
  
    boolean forza = true;  
    long date = System.currentTimeMillis();  
  
    ThreadUtil.sleep(500);  
  
    System.out.println("In_attesa...");  
}
```

```

while(forza) {
double torqueJ3 = lBR_iiwa_14_R820_1.getExternalTorque().//
getSingleTorqueValue(JointEnum.J3);

forza = Math.abs(torqueJ3) < 3;

long time = System.currentTimeMillis()-date;

if (time > 2000000) {
    System.out.println("Nessun_input,_programma_terminato");
    return;
}
}

```

5.3.2 Avvio forzato

Quando si vogliono realizzare due stampe consecutive, lanciare nuovamente il programma principale non è sufficiente. Dopo l'esecuzione dell'ultima riga di codice, infatti, il manipolatore si trova in una configurazione tale da non consentirgli di riportarsi in homeC con soli movimenti di tipo LIN. Per riportarlo ad una configurazione consona sarebbe sufficiente eseguire nuovamente il programma di avvio iniziale, che prevede un moto PTP (la cui traiettoria è stabilita cioè dal manipolatore in modo da minimizzare il tempo di viaggio) verso una posizione espressa nel sistema di riferimento dei giunti. Questa soluzione, seppur semplice dal punto di vista di codice, imporrebbe come già accennato ad una nuova calibrazione dell'estrusore, operazione poco efficiente in termini di tempo.

Si è quindi creato un programma collaterale di avvio forzato, da lanciare nei casi in cui l'esecuzione del programma principale vada in errore per violazione dei limiti sugli assi. Il metodo principale `azzera()` svolge le seguenti funzioni:

1. legge le coordinate cartesiane della posizione corrente della flangia e le utilizza per inizializzare il nuovo *frame* current;
2. associa alla posizione current un valore della ridondanza pari a 0°;
3. legge l'angolo di rotazione attuale del terzo giunto *rid* per stabilire il segno della rotazione del settimo al fine di portarlo a inizio corsa: se il terzo giunto è ruotato di un angolo positivo, il valore attuale del settimo giunto sarà sovrascritto con -170°, viceversa con +170°²;
4. porta il settimo giunto a ±170° con un movimento PTP tenendo gli altri giunti fermi;

² Nel codice si vede il comando `.get(2)` per riferirsi al terzo giunto e `.set(6, ...)` intendendo il settimo perché la numerazione dei giunti parte da 0.

5. porta il giunto di ridondanza a zero, mantenendo fermi gli altri sei.

```
public void azzera()
{
    Frame current = lBR_iiwa_14_R820_1.//
    getCurrentCartesianPosition(lBR_iiwa_14_R820_1.getFlange());
    LBRAlphaRedundancy beta = new LBRAlphaRedundancy();
    beta.setAlpha(Math.toRadians(0));
    current.setRedundancyInformation(lBR_iiwa_14_R820_1, beta);

    JointPosition hold = new JointPosition(lBR_iiwa_14_R820_1.//
    .getCurrentJointPosition());
    double rid = hold.get(2);

    if(rid > 0){
        hold.set(6, Math.toRadians(-170));}
    else{
        hold.set(6, Math.toRadians(170));}
    }

    lBR_iiwa_14_R820_1.move(ptp(hold).setJointVelocityRel(0.1));
    lBR_iiwa_14_R820_1.move(lin(current).setJointVelocityRel(0.1));

    System.out.println("Posizione_raggiunta.");
}
}
```


CONCLUSIONI

L'attività sperimentale di questa Tesi mostra come la tecnica del *Direct Ink Writing* assistita da robot sia efficace per la realizzazione di superfici curve senza la necessità di saldature o assemblaggi. Allo stesso tempo è un metodo che supera il vincolo di stratificazione planare imposto dalla stampa 3D tradizionale, eliminando l'effetto gradino ad esso associato.

Una buona qualità superficiale e un ridotto rischio di delaminazione non sono i soli vantaggi dell'approccio utilizzato. La tecnica del DIW è flessibile in termini di diametri di estrusione e di materiali stampabili, ed è un'alternativa valida e più economica rispetto ad altre soluzioni di stampa additiva per la formatura di metalli, *in primis* le tecniche di *Direct Energy Deposition* [14].

Ulteriore elemento di successo sono l'utilizzo di un robot cinematicamente ridondante per la realizzazione del moto e la scelta - controcorrente se si guarda alla maggior parte degli esempi in letteratura - di sfruttare i gradi di libertà in più per movimentare la base di stampa anziché la testina di stampa, semplificando il controllo dei parametri di stampa e abilitando potenzialmente a sistemi di estrusione ancor più economici e semplici. È doveroso sottolineare, inoltre, che le potenzialità del manipolatore utilizzato, il 7 assi *KUKA LBR iiwa*, non sono state sfruttate a pieno. Un attento studio preliminare sulla geometria da stampare e sulla programmazione della traiettoria da seguire ha consentito di realizzare un movimento a 2 gradi di libertà (rotazione e traslazione lungo l'asse *z*), ma è possibile complicare il moto a piacere per realizzare le più diverse geometrie.

L'attività sperimentale ha dimostrato, tuttavia, anche dei limiti. Il più importante è quello di dovere coordinare in modo sperimentale i parametri di velocità e pressione di estrusione e velocità del robot, che impone di rivedere l'attrezzaggio dei due dispositivi, robot e stampante, ogni qual volta si cambia il materiale e/o l'ugello. Se questo non risulta particolarmente gravoso a livello di laboratorio, ne rallenta senz'altro l'introduzione nei processi industriali.

Gli obiettivi di ricerca futura dovranno essere quindi orientati non solo all'affinazione della tecnica e allo studio di nuovi materiali, ma anche alla creazione di algoritmi che consentano di stabilire, entro un intervallo ragionevolmente piccolo, i valori ottimali dei principali parametri di processo.

APPENDIX



CODICI DI PROGRAMMAZIONE

A.1 PROGRAMMA V+

```
.PROGRAM chiara2()

    ATTACH ()
    DISABLE SCALE.ACCEL

    SET home = TRANS(400,140,370,0,180,-300)

    SPEED 2 ALWAYS

    WAIT SIG(1001)

; definizione parametri

    nmoduli = 20 ; moduli lungo la circonferenza
    rcil = 27 ; mm
    deltag = 360/nmoduli ; 18
    deltar = deltag*3.14/180
    dh = deltar*rcil ;9.42
    nh = 8 ; numero moduli in altezza, deve valere dh*nh<180

    MOVE home

    DELAY 2

; PROMPT Inizio layer 1.

    FOR j = 0 TO 4

; gradini in andata

        MOVES home:TRANS(0,0,0,deltag*(1+4*j),0,0)
        BREAK

        FOR i = 1 TO nh

            MOVES home:TRANS(0,0,dh*i,deltag*(i+4*j),0,0)
            BREAK

            MOVES home:TRANS(0,0,dh*i,deltag*(1+i+4*j),0,0)
            BREAK

        END

;movimento di chiusura gradini in andata layer1

        MOVES home:TRANS(0,0,dh*(1+nh),deltag*(1+nh+4*j),0,0)
        BREAK
```

```

MOVES home:TRANS(0,0,dh*(1+nh),deltag*(3+nh+4*j),0,0)
BREAK

MOVES home:TRANS(0,0,dh*(nh),deltag*(3+nh+4*j),0,0)
BREAK

; movimento gradini di ritorno

MOVES home:TRANS(0,0,dh*(nh),deltag*(2+nh+4*j),0,0)
BREAK

FOR k = nh-1 TO 0 STEP -1

    MOVES home:TRANS(0,0,dh*k,deltag*(k+3+4*j),0,0)
    BREAK

    MOVES home:TRANS(0,0,dh*k,deltag*(k+2+4*j),0,0)
    BREAK

END

;movimento di chiusura gradini in ritorno layer1

MOVES home:TRANS(0,0,dh*(-1),deltag*(2+4*j),0,0)
BREAK

MOVES home:TRANS(0,0,dh*(-1),deltag*(7/2+4*j),0,0)
BREAK

MOVES home:TRANS(0,0,dh*(-1/2),deltag*(7/2+4*j),0,0)
BREAK

MOVES home:TRANS(0,0,dh*(-1/2),deltag*(4+4*j),0,0)
BREAK

MOVES home:TRANS(0,0,0,deltag*(4+4*j),0,0)
BREAK

END

; Fine layer 1.

;torna indietro di un giro - provo a partire considerando il fine giro

DELAY 2

MOVES home:TRANS(0,0,dh*(-1),deltag*(21),0,0)
BREAK

MOVES home:TRANS(0,0,dh*(-1/2),deltag*(43/2),0,0)
BREAK

; Inizio layer 2.

FOR j = 0 TO 4

    MOVES home:TRANS(0,0,dh*(1/2),deltag*(27/2+nh-4*j),0,0)
    BREAK

    FOR i = 1 TO nh

        MOVES home:TRANS(0,0,dh*(-1/2+i),deltag*(27/2+nh-i-4*j),0,0)
        BREAK
    
```

```

MOVES home:TRANS(0,0,dh*(1/2+i),deltag*(27/2+nh-i-4*j),0,0)
BREAK

END

;chiusura movimento di andata layer 2

MOVES home:TRANS(0,0,dh*(1/2+nh),deltag*(4+nh-4*j),0,0)
BREAK

MOVES home:TRANS(0,0,dh*(1+nh),deltag*(4+nh-4*j),0,0)
BREAK

MOVES home:TRANS(0,0,dh*(1+nh),deltag*(3+nh-4*j),0,0)
BREAK

MOVES home:TRANS(0,0,dh*(1/2+nh),deltag*(3+nh-4*j),0,0)
BREAK

MOVES home:TRANS(0,0,dh*(1/2+nh),deltag*(7/2+nh-4*j),0,0)
BREAK

;movimento di ritorno a gradino layer 2

MOVES home:TRANS(0,0,dh*(-1/2+nh),deltag*(7/2+nh-4*j),0,0)
BREAK

FOR k = 1 TO nh

MOVES home:TRANS(0,0,dh*(1/2+nh-k),deltag*(7/2+nh+k-4*j),0,0)
BREAK

MOVES home:TRANS(0,0,dh*(-1/2+nh-k),deltag*(7/2+nh+k-4*j),0,0)
BREAK

END

; chiusura movimento di ritorno layer 2

MOVES home:TRANS(0,0,dh*(-1/2),deltag*(3/2+2*nh-4*j),0,0)
BREAK

END

DETACH ()

.END

```

A.2 PROGRAMMA DI AVVIO INIZIALE

```

package printing;

import javax.inject.Inject;

import com.kuka.common.ThreadUtil;
import com.kuka.roboticsAPI.applicationModel.RoboticsAPIApplication;
import static com.kuka.roboticsAPI.motionModel.BasicMotions.*;

import com.kuka.roboticsAPI.deviceModel.JointEnum;
import com.kuka.roboticsAPI.deviceModel.JointPosition;
import com.kuka.roboticsAPI.deviceModel.LBR;
import com.kuka.roboticsAPI.deviceModel.LBRAlphaRedundancy;
import com.kuka.roboticsAPI.deviceModel.LBRE1Redundancy;

```

```

import com.kuka.roboticsAPI.geometricModel.Frame;
import com.kuka.roboticsAPI.geometricModel.ObjectFrame;
import com.kuka.roboticsAPI.motionModel.Spline;

/**
 * Implementation of a robot application.
 * <p>
 * The application provides a {@link RoboticsAPITask#initialize()} and a
 * {@link RoboticsAPITask#run()} method, which will be called successively in
 * the application lifecycle. The application will terminate automatically after
 * the {@link RoboticsAPITask#run()} method has finished or after stopping the
 * task. The {@link RoboticsAPITask#dispose()} method will be called, even if an
 * exception is thrown during initialization or run.
 * <p>
 * <b>It is imperative to call <code>super.dispose()</code> when overriding the
 * {@link RoboticsAPITask#dispose()} method.</b>
 *
 * @see UseRoboticsAPIContext
 * @see #initialize()
 * @see #run()
 * @see #dispose()
 */
public class StartChiara extends RoboticsAPIApplication {
    @Inject
    private LBR LBR_iiwa_14_R820_1;

    @Override
    public void initialize() {
        // initialize your application here
    }

    @Override
    public void run() {
        // your application execution starts here

        motoIniziale();
    }

    public void motoIniziale()
    {

        //FRAME

        JointPosition homeJ = new JointPosition(0, Math.toRadians(32.43),0,//
        Math.toRadians(-88.32),0, Math.toRadians(-30.74),0);

        //POSIZIONE DI HOME

        LBR_iiwa_14_R820_1.move(ptp(homeJ).setJointVelocityRel(0.1));

        System.out.println("Posizione_raggiunta.");

    }
}

```

A.3 PROGRAMMA PRINCIPALE

```

package printing;

import javax.inject.Inject;

```



```

import com.kuka.common.ThreadUtil;
import com.kuka.roboticsAPI.applicationModel.RoboticsAPIApplication;
import static com.kuka.roboticsAPI.motionModel.BasicMotions.*;

import com.kuka.roboticsAPI.deviceModel.JointEnum;
import com.kuka.roboticsAPI.deviceModel.JointPosition;
import com.kuka.roboticsAPI.deviceModel.LBR;
import com.kuka.roboticsAPI.deviceModel.LBRAlphaRedundancy;
import com.kuka.roboticsAPI.deviceModel.LBRE1Redundancy;
import com.kuka.roboticsAPI.geometricModel.Frame;
import com.kuka.roboticsAPI.geometricModel.ObjectFrame;
import com.kuka.roboticsAPI.motionModel.Spline;

/**
 * Implementation of a robot application.
 * <p>
 * The application provides a {@link RoboticsAPITask#initialize()} and a
 * {@link RoboticsAPITask#run()} method, which will be called successively in
 * the application lifecycle. The application will terminate automatically after
 * the {@link RoboticsAPITask#run()} method has finished or after stopping the
 * task. The {@link RoboticsAPITask#dispose()} method will be called, even if an
 * exception is thrown during initialization or run.
 * <p>
 * <b>It is imperative to call <code>super.dispose()</code> when overriding the
 * {@link RoboticsAPITask#dispose()} method.</b>
 *
 * @see UseRoboticsAPIContext
 * @see #initialize()
 * @see #run()
 * @see #dispose()
 */
public class ChiaraLayer extends RoboticsAPIApplication {
    @Inject
    private LBR lbr_iiwa_14_R820_1;

    @Override
    public void initialize() {
        // initialize your application here
    }

    @Override
    public void run() {
        // your application execution starts here

        layer();
    }

    public void muovi(Frame base, double theta, double d)
    {
        //DEFINIZIONE PARAMETRI
        double anglst=-170;
        int nmoduli = 20;
        double circ = 127;
        double dh = circ/nmoduli;
        double deltar = 2*Math.PI/nmoduli;
        double vcart = 6;
        double vrad=deltar*vcart/dh;

        LBRAlphaRedundancy alpha = new LBRAlphaRedundancy();
        Frame mov0 = new Frame(base,0,0,d,Math.toRadians(theta),0,0);
        alpha.setAlpha(Math.toRadians(theta/2+anglst/2));
        mov0.setRedundancyInformation(lbr_iiwa_14_R820_1, alpha);
        lbr_iiwa_14_R820_1.moveAsync(lin(mov0).setCartVelocity(vcart).//
        setOrientationVelocity(vrad).setBlendingOri(0.05));

```

```

ThreadUtil.sleep(120);
}

public void muovi2(Frame base, double theta, double d)
{
//DEFINIZIONE PARAMETRI
double anglst=-170;
int nmoduli = 20;
double dz = -0.75;
double circ = 127;
double dh = circ/nmoduli;
double deltar = 2*Math.PI/nmoduli;
double vcart = 6*0.80;
double vrad=deltar*vcart/dh;

LBRAAlphaRedundancy alpha = new LBRAAlphaRedundancy();
Frame mov0 = new Frame(base,0,0,d,Math.toRadians(theta),0,0);
alpha.setAlpha(Math.toRadians(theta/2+anglst/2));
mov0.setRedundancyInformation(lBR_iiwa_14_R820_1, alpha);
lBR_iiwa_14_R820_1.moveAsync(lin(mov0).setCartVelocity(vcart).//
setOrientationVelocity(vrad).setBlendingOri(0.05));
ThreadUtil.sleep(120);
}

public void layer()
{
//DEFINIZIONE PARAMETRI

int nmoduli = 20; // moduli lungo la circonferenza
int nh = 8; //numero moduli in altezza, deve valere dh*nh<180
int nstrati = 2; //numero di strati (layer1+layer2)
double dz = -0.75; // considerat
double anglst=-170; //angolo partenza ridondanza

//CON CIRCONFERENZA
double circ = 170;
double dh = circ/nmoduli;
double deltag = 360/nmoduli;

//FRAME

Frame homeC0 = new Frame(695,0,510,Math.toRadians(0),Math.toRadians(90),Math.toRadians(0));
Frame homeC = new Frame(homeC0,0,0,0,Math.toRadians(anglst),Math.toRadians(0),Math.toRadians(0));

LBRAAlphaRedundancy alpha = new LBRAAlphaRedundancy();
alpha.setAlpha(Math.toRadians(anglst/2));
homeC.setRedundancyInformation(lBR_iiwa_14_R820_1, alpha);

lBR_iiwa_14_R820_1.move(lin(homeC0).setJointVelocityRel(0.1));
lBR_iiwa_14_R820_1.move(lin(homeC).setJointVelocityRel(0.1));

waitTouch();

for (int n=0; n<=nstrati; n++)
{

Frame basex = new Frame(695,0,510+(dz*n),Math.toRadians(0),Math.toRadians(90),Math.toRadians(0));
Frame base = new Frame(basex,0,0,0,Math.toRadians(anglst),Math.toRadians(0),Math.toRadians(0));

for (int j=0;j<=4;j++)
{

```

```

muovi(base,deltag*(1+4*j),0 );

for (int i=1; i<=nh; i++)
{
muovi(base,deltag*(i+4*j) ,dh*i );
muovi(base,deltag*(i+4*j+1),dh*i );
}

//chiusura andata
muovi(base,deltag*(1+nh+4*j),dh*(1+nh));
muovi(base,deltag*(3+nh+4*j),dh*(1+nh));
muovi(base,deltag*(3+nh+4*j),dh*(nh));

// ritorno
muovi(base,deltag*(2+nh+4*j),dh*(nh));

for (int k=nh-1; k>=0; k--)
{
muovi(base,deltag*(3+k+4*j),dh*k);
muovi(base,deltag*(2+k+4*j),dh*k);
}

muovi(base,deltag*(2+4*j) ,dh*(-1));
muovi(base,deltag*(3.5+4*j),dh*(-1));
muovi(base,deltag*(3.5+4*j),dh*(-0.5) );
muovi(base,deltag*(4+4*j) , dh*(-0.5));

muovi(base,deltag*(4+4*j),0);
// System.out.println("quota z: "+lBR_iiwa_14.R820_1.getFlange().getX());

}

// fine layer 1

//movimento di attacco tra layer 1 e layer 2
muovi(base,deltag*(21),dh*(-1));
muovi(base,deltag*(21.5),dh*(-0.5));

// inizio layer 2.
double cor=0;
//circ = 127+(Math.abs(dz)*2*Math.PI);

basex = new Frame(695,0,510+(dz*(n+1)),Math.toRadians(0),Math.toRadians(90),Math.toRadians(0));
base = new Frame(basex,0,0,0,Math.toRadians(ang1st),Math.toRadians(0),Math.toRadians(0));

muovi2(base,deltag*(21.5)+cor,dh*(-0.5));

for(int j=0; j<=4; j++)
{

// System.out.println("indice"+j);

muovi2(base,deltag*(13.5+nh-4*j)+cor,dh*(0.5));

for(int i=1; i<=nh; i++)
{
muovi2(base,deltag*(-i+13.5+nh-4*j)+cor,dh*(i-0.5));
muovi2(base,deltag*(-i+13.5+nh-4*j)+cor,dh*(i+0.5));
}

muovi2(base,deltag*(4+nh-4*j)+cor,dh*(0.5+nh));
muovi2(base,deltag*(4+nh-4*j)+cor,dh*(1+nh));
muovi2(base,deltag*(3+nh-4*j)+cor,dh*(1+nh));

```

```

muovi2(base,deltag*(3+nh-4*j)+cor,dh*(0.5+nh));
muovi2(base,deltag*(3.5+nh-4*j)+cor,dh*(0.5+nh));

muovi2(base,deltag*(3.5+nh-4*j)+cor,dh*(-0.5+nh));

for (int k=1; k<=nh; k++)
{
muovi2(base,deltag*(k+3.5+nh-4*j)+cor,dh*(-k+0.5+nh));
muovi2(base,deltag*(k+3.5+nh-4*j)+cor,dh*(-k-0.5+nh));
}

muovi2(base,deltag*(1.5+2*nh-4*j)+cor,dh*(-0.5));

}

System.out.println("fine_strato_"+n);
}

}

public void waitTouch() {

boolean forza = true;
long date = System.currentTimeMillis();

ThreadUtil.millisSleep(500);

System.out.println("In_attesa...");
while(forza)
{
double torqueJ3 = LBR_iiwa_14_R820_1.getExternalTorque().getSingleTorqueValue(JointEnum.J3);

//Verifico valore della forza
forza = Math.abs(torqueJ3) < 3;

// oltre i 20 secondi di attesa il programma termina
long time = System.currentTimeMillis()-date;
if (time > 2000000) {
System.out.println("Nessun_input,_programma_terminato");
return;
}
}
}

```

A.4 PROGRAMMA DI AVVIO FORZATO

```

package printing;

import javax.inject.Inject;

import com.kuka.common.ThreadUtil;
import com.kuka.roboticsAPI.applicationModel.RoboticsAPIApplication;
import static com.kuka.roboticsAPI.motionModel.BasicMotions.*;

import com.kuka.roboticsAPI.deviceModel.JointEnum;
import com.kuka.roboticsAPI.deviceModel.JointPosition;
import com.kuka.roboticsAPI.deviceModel.LBR;
import com.kuka.roboticsAPI.deviceModel.LBRAlphaRedundancy;
import com.kuka.roboticsAPI.deviceModel.LBRE1Redundancy;
import com.kuka.roboticsAPI.geometricModel.Frame;
import com.kuka.roboticsAPI.geometricModel.ObjectFrame;
import com.kuka.roboticsAPI.motionModel.Spline;

```

```

/**
 * Implementation of a robot application.
 * <p>
 * The application provides a {@link RoboticsAPITask#initialize()} and a
 * {@link RoboticsAPITask#run()} method, which will be called successively in
 * the application lifecycle. The application will terminate automatically after
 * the {@link RoboticsAPITask#run()} method has finished or after stopping the
 * task. The {@link RoboticsAPITask#dispose()} method will be called, even if an
 * exception is thrown during initialization or run.
 * <p>
 * <b>It is imperative to call <code>super.dispose()</code> when overriding the
 * {@link RoboticsAPITask#dispose()} method.</b>
 *
 * @see UseRoboticsAPIContext
 * @see #initialize()
 * @see #run()
 * @see #dispose()
 */
public class ForcedStartChiara extends RoboticsAPIApplication {
    @Inject
    private LBR lBR_iiwa_14_R820_1;

    @Override
    public void initialize() {
        // initialize your application here
    }

    @Override
    public void run() {
        // your application execution starts here

        azzera();
    }

    public void azzera()
    {

        Frame current = lBR_iiwa_14_R820_1.getCurrentCartesianPosition(lBR_iiwa_14_R820_1.getFlange());
        LBRAlphaRedundancy beta = new LBRAlphaRedundancy();
        beta.setAlpha(Math.toRadians(0));
        current.setRedundancyInformation(lBR_iiwa_14_R820_1, beta);

        JointPosition hold = new JointPosition(lBR_iiwa_14_R820_1.getCurrentJointPosition());
        double disc = hold.get(2);
        if(disc > 0){
            hold.set(6, Math.toRadians(-170));}
        else{
            hold.set(6,Math.toRadians(170));}
    }

    lBR_iiwa_14_R820_1.move(ptp(hold).setJointVelocityRel(0.1));
    lBR_iiwa_14_R820_1.move(lin(current).setJointVelocityRel(0.1));

    System.out.println("Posizione_raggiunta.");

}
}

```


BIBLIOGRAFIA

- [1] Storia della stampa 3d. URL <https://3dprintingindustry.com/>.
- [2] Tecnologie di stampa 3d. URL <https://www.additively.com/en/learn-about/3d-printing-technologies>.
- [3] 3d printing our future in space and on earth. URL https://www.esa.int/Applications/Telecommunications_Integrated_Applications/Technology_Transfer/3D_Printing_our_future_in_space_and_on_Earth.
- [4] Fda approved 3d printed drug available in the us. URL <https://www.forbes.com/sites/jenniferhicks/2016/03/22/fda-approved-3d-printed-drug-available-in-the-us/#59c821c666b3>.
- [5] Migliori stampanti 3d del 2019 di grandi dimensioni. URL <https://www.3dnatives.com/en/best-large-fdm-3dprinters-2019-100120194/>.
- [6] Reprap project. URL <http://www.reprap.org>.
- [7] Pagina web kuka lbr iiwa, . URL <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots/lbr-iiwa>.
- [8] Pagina web delta wasp 2040 clay, . URL <https://www.3dwasp.shop/en/product/clay-3d-printer-delta-wasp-2040-clay/>.
- [9] Stratays. URL <https://www.stratasys.com/fdm-technology>.
- [10] ISO ASTM. Astm52900-15 standard terminology for additive manufacturing—general principles—terminology. *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2015.
- [11] Barry Berman. 3-d printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2):155 – 162, 2012. ISSN 0007-6813. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007681311001790>.
- [12] Prahar M. Bhatt, Ariyan M. Kabir, Max Peralta, Hugh A. Bruck, and Satyandra K. Gupta. A robotic cell for performing sheet lamination-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 27:278 – 289, 2019. ISSN 2214-8604. doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.002>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860418305207>.

- [13] Prahar M. Bhatt, Rishi K. Malhan, Aniruddha V. Shembekar, Yeo Jung Yoon, and Satyandra K. Gupta. Expanding capabilities of additive manufacturing through use of robotics technologies: A survey. *Additive Manufacturing*, 31:100933, 2020. ISSN 2214-8604. doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100933>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860419312266>.
- [14] Hamada Elsayed, Pietro Rebesan, Giovanni Giacomello, Marco Pasetto, Chiara Gardin, Letizia Ferroni, Barbara Zavan, and Lisa Biasetto. Direct ink writing of porous titanium (ti6al4v) lattice structures. *Materials Science and Engineering: C*, 103:109794, 2019. ISSN 0928-4931. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.109794>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928493119307970>.
- [15] ASTM F2792-12a. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, (Withdrawn 2015)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [16] Ismayuzri Bin Ishak, Joseph Fisher, and Pierre Larochelle. Robot arm platform for additive manufacturing using multi-plane tool-paths. In *ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pages Vo5ATo7Ao63–Vo5ATo7Ao63. American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- [17] Yunyao Jiang, Bodhi Rudra, Jongmin Shim, and Yaning Li. Limiting strain for auxeticity under large compressive deformation: Chiral vs. re-entrant cellular solids. *International Journal of Solids and Structures*, 162:87 – 95, 2019. ISSN 0020-7683. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.11.035>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002076831830489X>.
- [18] Shengguang Jin, Yannis P. Korkolis, and Yaning Li. Shear resistance of an auxetic chiral mechanical metamaterial. *International Journal of Solids and Structures*, 174-175:28 – 37, 2019. ISSN 0020-7683. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.06.005>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768319302835>.
- [19] *Operating and Programming Instructions for System Integrators*. KUKA Roboter GmbH, 04 2017.
- [20] Christopher S. Lefky, Brian Zucker, Abdalla R. Nassar, Timothy W. Simpson, and Owen J. Hildreth. Impact of compositional gradients on selectivity of dissolvable support structures for directed energy deposited metals. *Acta Materialia*, 153:1 – 7, 2018. ISSN 1359-6454. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.04>.

009. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645418302829>.
- [21] Megan R. Nichols. How does the automotive industry benefit from 3d metal printing? *Metal Powder Report*, 74(5):257 – 258, 2019. ISSN 0026-0657. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2019.07.002>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002606571930267X>.
- [22] Yayue Pan, Chi Zhou, Yong Chen, and Jouni Partanen. Multitool and multi-axis computer numerically controlled accumulation for fabricating conformal features on curved surfaces. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(3):031007, 2014.
- [23] Yunan Prawoto. Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: A structural review on the negative poisson's ratio. *Computational Materials Science*, 58:140 – 153, 2012. ISSN 0927-0256. doi: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.02.012>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092702561200078X>.
- [24] N. Shahrubudin, T.C. Lee, and R. Ramlan. An overview on 3d printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manufacturing*, 35:1286 – 1296, 2019. ISSN 2351-9789. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919308169>. The 2nd International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing, SMPM 2019, 8-10 March 2019, Sun City, South Africa.
- [25] Aniruddha V Shembekar, Yeo Jung Yoon, Alec Kanyuck, and Satyandra K Gupta. Trajectory planning for conformal 3d printing using non-planar layers. In *ASME 2018 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2018.
- [26] C.W Smith, J.N Grima, and K.E Evans. A novel mechanism for generating auxetic behaviour in reticulated foams: missing rib foam model. *Acta Materialia*, 48(17):4349 – 4356, 2000. ISSN 1359-6454. doi: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00269-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00269-X). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135964540000269X>.
- [27] Mehmet Efe Tiryaki, Xu Zhang, and Quang-Cuong Pham. Printing-while-moving: a new paradigm for large-scale robotic 3d printing. *arXiv preprint arXiv:1809.07940*, 2018.
- [28] Syed A.M. Tofail, Elias P. Koumoulos, Amit Bandyopadhyay, Sumita Bose, Lisa O'Donoghue, and Costas Charitidis. Additive

- manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, 21(1):22 – 37, 2018. ISSN 1369-7021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702117301773>.
- [29] Pinar Urhal, Andrew Weightman, Carl Diver, and Paulo Bartolo. Robot assisted additive manufacturing: A review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 59:335 – 345, 2019. ISSN 0736-5845. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.05.005>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584518303636>.
- [30] C. Wu, C. Dai, G. Fang, Y. Liu, and C. C. L. Wang. Robofdm: A robotic system for support-free fabrication using fdm. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1175–1180, May 2017. doi: 10.1109/ICRA.2017.7989140.
- [31] Wenwang Wu, Wenxia Hu, Guian Qian, Haitao Liao, Xiaoying Xu, and Filippo Berto. Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review. *Materials Design*, 180:107950, 2019. ISSN 0264-1275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107950>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519303880>.
- [32] Philip F. Yuan, Hao Meng, Lei Yu, and Liming Zhang. *Robotic Multi-dimensional Printing Based on Structural Performance*, pages 92–105. Springer International Publishing, Cham, 2016. ISBN 978-3-319-26378-6. doi: 10.1007/978-3-319-26378-6_7. URL https://doi.org/10.1007/978-3-319-26378-6_7.
- [33] G. Q. Zhang, W. Mondesir, C. Martinez, X. Li, T. A. Fuhlbrigge, and H. Bheda. Robotic additive manufacturing along curved surface — a step towards free-form fabrication. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pages 721–726, Dec 2015. doi: 10.1109/ROBIO.2015.7418854.