

Politecnico di Torino Facoltà di Ingegneria Meccanica Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Caratterizzazione del processo Polyjet

Relatore: Prof. Iuliano Luca

Co-Relatrici: Ing. Calignano Flaviana Ing. Galati Manuela Candidato: Ostuni Giuseppe

Anno accademico 2020-2021

INDICE

RINGRAZIAMENTI
INTRODUZIONE
1. TECNOLOGIE DI ADDITIVE MANUFACTURING E POLYJET
1.1. Additive Manufacturing: Overview
1.2. Polyjet: Tecnologia e Processo
1.3. Macchinari
1.4. Materiali e Applicazioni
2. CARATTERIZZAZIONE DELLA QUALITA' GEOMETRICA E DIMENSIONALE
2.1. Rugosità Superficiale18
2.2. Accuratezza Dimensionale e Geometrica
2.3. Feature of Size
3. CARATTERIZZAZIONE DELLE PROPRIETA' MECCANICHE
3.1. Proprietà Meccaniche Statiche
3.2. Proprietà Meccaniche Dinamiche85
4. CONCLUSIONI
INDICE DELLE FIGURE
INDICE DELLE TABELLE
INDICE EQUAZIONI104
BIBLIOGRAFIA

RINGRAZIAMENTI

INTRODUZIONE

L'oggetto della tesi è la caratterizzazione del processo Polyjet, un processo di additive manufacturing. Questa tecnologia può essere quasi considerata un'evoluzione delle tradizionali stampanti ad inchiostro e prevede la deposizione dello strato di fotopolimero e la contemporanea solidificazione di quest'ultimo per mezzo di una testina di stampa multi-ugello provvista di lampade a luce ultravioletta. Tra i numerosi vantaggi, la capacità di produrre oggetti multi-materiale e l'elevata qualità superficiale delle parti prodotte sono i più rilevanti.

Nonostante un certo numerosi di studi scientifici hanno come oggetto la caratterizzazione del processo sono presenti in letteratura, una overview completa che delinei in maniera chiara le linee guida per una corretta progettazione e gestione del processo è ancora assente

L'obiettivo del lavoro è per cui fornire una sintesi onnicomprensiva e cercare, ove possibile, delle correlazioni e delle consistenze tra i vari studi proposti, evidenziando e fornendo indicazioni per delle future ricerche, rispetto quelle che possono essere le scelte migliori di progettazione nel momento in cui un manufatto debba essere prodotto per mezzo della tecnologia Polyjet.

L'elaborato è composto da tre macro capitoli dove verranno analizzati studi relativi:

• Overview sulle tecnologie di Additive Manufacturing, Tecnologia Polyjet e le sue potenzialità,

• la qualità estetica (superficiale, dimensionale e geometrica) delle parti prodotte ed i fattori che la influenzano,

• la caratterizzazione delle proprietà meccaniche (statiche, di durezza e dinamiche) delle parti prodotte.

1. TECNOLOGIE DI ADDITIVE MANUFACTURING E POLYJET

Il primo capito del seguente lavoro di tesi vuole fornire delle competenze generali riguardo la Fabbricazione Additiva in generale, e più nello specifico ciò che concerne la tecnologia Polyjet, il processo ed i parametri di funzionamento coinvolti, le caratteristiche dei materiali utilizzati ed i campi di utilizzo di questa tecnica di Additive Manufacturing.

1.1. Additive Manufacturing: Overview

Secondo la normativa ASTM F2792-12a [1], con il termine Additive Manufacturing (AM, Fabbricazione Additiva), si intende quel processo produttivo secondo il quale, generalmente tramite l'unione di più strati sovrapposti, vengono prodotti oggetti partendo da un modello tridimensione.



Figura 1.1 Descrizione complessiva del processo di AM [2]

Il funzionamento generale è schematizzato in (fig. 1.1). Partendo da una geometria 3D realizzata tramite appositi software, si genera un file in formato .STL (Standard Triangulation Language), uno standard universale nel campo della fabbricazione additiva che approssima le geometrie tridimensionali con un modello a triangoli. Questo modello viene inserito nel programma della macchina AM. A questo punto, un software dedicato si occupa di orientare il pezzo, generare automaticamente i supporti utili per un corretto stampaggio (soprattutto delle parti sporgenti e delle pareti laterali) e delle operazioni di Slicing, cioè l'intersezione del modello .STL con piani paralleli aventi normale all'asse Z e distanti una quantità ΔZ (che può essere costante o adattiva in funzione della geometria). La macchina quindi, in base al tipo di tecnologia sulla quale si basa, costruisce in modo sequenziale le varie sezioni del modello (definite dal software macchina nella fase di slicing). Seguiranno quindi le operazioni finali, che riguardano la rimozione del pezzo dalla macchina, la rimozione dei supporti con le annesse operazioni di pulizia. Se necessarie, saranno inoltre presenti fasi successive che comprendono operazioni meccaniche al fine di ottenere finiture superficiali migliori ed altre operazioni di finitura, che si concentrano però puramente sul lato estetico del componente (come ad esempio la verniciatura).

Le tecnologie di Fabbricazione Additiva stanno guadagnando sempre più rilevanza grazie alla possibilità di creare geometrie estremamente complesse e libera da quelli che sono i limiti dei processi di produzione tradizionali [3]. In questi ultimi, infatti, gli step necessari per arrivare al prodotto finito sono i più disparati, talvolta comprendono lavorazioni per asportazione di truciolo, operazioni di deformazione meccanica del componente, post trattamenti termici oltre che operazioni di finitura superficiale e montaggio. Ovviamente, tutte queste fasi comportano una analisi preliminare del design e della geometria e tutto ciò porta, come conseguenza, a costi elevati, necessità di personale specializzato ed un elevato numero di macchinari coinvolti nel processo di produzione [4]. Tuttavia, uno degli svantaggi legati alla fabbricazione additiva, che non le permette di essere utilizzata in modo estremamente diffuso nell'industria odierna, è la mancanza di uno standard che definisca in maniera chiara quali saranno le caratteristiche estetiche, geometriche e resistenziali che le parti possederanno una volta prodotte [5].

Sebbene i processi di Additive Manufacturing siano basati tutte sullo stesso principio, cioè quello della progressiva unione delle diverse sezioni che compongono la parte, le tecnologie coinvolte sono le più variegate. La fig.1.2, schematizza i processi AM che utilizzano polimeri come materiale di costruzione [6].



Figura 1.2 Schematizzazione dei principali processi AM basati sulla base dello stato fisico del materiale principale di costruzione.

Nel grafico, i processi AM sono classificati sulla base dello stato fisico del materiale utilizzato per la costruzione del manufatto. È possibile osservare, in base a quest'ultimo, tre diverse classificazioni:

- Materiale allo stato liquido
- Materiale allo stato solido
- Materiale sotto forma di polvere

Partendo quindi da questa prima distinzione, i processi di AM per polimeri vengono classificati in base alla tecnica di unione dei vari layer deposti: fusione, polimerizzazione ed unione tramite legante (poi rimosso tramite post-processi termici).

Tra le tecnologie che utilizzano polimeri (resine) in fase liquida vi è il processo Polyjet, il cui principio di funzionamento, che sarà meglio approfondito nel paragrafo seguente e si basa sulla fotopolimerizzazione del polimero mediante fascio di luce ultravioletta, secondo la tecnica del Drop On Demand (DOD) [7]. Questa si differenzia dalla stampa a getto continuo per la sua caratteristica di depositare il materiale sotto forma di goccioline sul vassoio di costruzione per poi polimerizzarlo in modo selettivo [8] [9].

La tecnologia Polyjet si basa sul concetto di Material Jetting, una tecnica di 3D Printing in cui il materiale di costruzione ed il materiale di supporto vengono depositati in modo similare al funzionamento delle tradizionali stampanti ad inchiostro [10].

1.2. Polyjet: Tecnologia e Processo

Il principio di funzionamento di una macchina Polyjet può essere quasi considerando un'evoluzione delle stampanti ad inchiostro tradizionali e prevede la deposizione dello strato di fotopolimero e la contemporanea solidificazione di quest'ultimo.

Come mostrato in fig. 1.3 [11], viene utilizzata una testina di stampa multigetto in cui gli ugelli sono alternati tra polimero fotoindurente e materiali per i supporti idrosolubili.

Ad ogni step la testina si muove nel piano X-Y. Una volta che uno strato di goccioline viene depositato tramite le testine di stampa, un rullo (o una lama livellante) si occupa di uniformare la superficie dello strato, mentre le lampade a luce UV (poste ai lati della testa multi-ugello) passano più volte sul layer di materiale appena deposto, per avviare il processo di polimerizzazione [12][13].

Una volta ultimata il processo di polimerizzazione del singolo layer, il piano di lavoro/deposizione si abbassa di una quantità ΔZ . Si procede quindi alla deposizione dello strato successivo di fotopolimero, ripetendo dall'inizio i passaggi descritti, fino al completamento del pezzo.



Figura 1.3 Schematizzazione del funzionamento di una macchina Polyjet

La maggior parte delle macchine Polyjet offrono differenti tipi di impostazioni di stampa. È infatti possibile decidere lo spessore di materiale deposto nel singolo layer di fotopolimero (solitamente da 14 a 16 µm fino a 27 a 30 µm in base al modello di macchina). Questa scelta influenza, di conseguenza, la velocità di costruzione del pezzo, che è quindi maggiore quando lo spessore del layer selezionato è il più elevato. È possibile anche scegliere tra due tipi di finitura superficiale: Lucida e Opaca. La scelta del tipo di una qualità superficiale piuttosto che un'altra condiziona la strategia di deposizione del materiale di supporto. Nel caso di finitura Lucida, infatti, il materiale di supporto sarà depositato solo alla base del componente ed in tutte quelle zone dove il manufatto presenta delle strutture "a sbalzo", al fine di garantire il corretto completamento del pezzo evitando il collasso dello stesso. Nel caso invece di finitura Opaca, il materiale di supporto verrà depositato indistintamente su tutte le superfici del pezzo, laterali e superiori, a sbalzo e piane, inglobando, in sintesi, il componente [14][15].

La tecnologia Polyjet può rivelarsi la scelta ideale quando è richiesto un elevato dettaglio nelle superfici, una elevata precisione e tutte le volte che il componente che si vuole produrre necessità di parti o insiemi multi-colore e/o aventi diverse proprietà meccaniche (elasticità, rigidità, ecc.). [16]



Figura 1.4 Modello di organo realizzato con tecnologia Polyjet usando diversi materiali [16]

Tuttavia, come ogni tecnologia di AM, anche il processo Polyjet presenta degli svantaggi. In particolare, Li, Y., Linke, B. S., Voet, H. et al., nella loro indagine di confronto tra diverse tecnologie di AM, hanno evidenziato come il processo Polyjet, sebbene ottenga le migliori prestazioni in termini di qualità estetica, mostrava le prestazioni più scarse in termini di impatto ambientale e costi [17]. In fig.1.5, sulla base di [18], [19], [17], sono stati quindi evidenziati i principali vantaggi e svantaggi di questo processo.





1.3. Macchinari

La tecnologia Polyjet è stata sviluppata nel 1999 dalla società israeliana Objet Geometries Ltd, poi assorbita da Stratasys nel 2011. Attualmente Stratasys divide le sue stampanti in tre macro settori:

- Industria (Objet350, Objet260, Objet500, J8 Series, Objet1000 Plus)
- **Design** (Objet260, J55, Objet30, J750 Digital Anatomy)
- Medicina (J5 DentaJet, J5 MediJet, J700 Dental, J720 Dental, Objet30 Dental Prime, Objet 260 Dental)

Una ulteriore differenziazione delle varie macchine proposte dal produttore può essere basata sulla possibilità o meno di depositare simultaneamente diversi tipi di resina. Infatti, sebbene i volumi di costruzione varino tra le varie macchine (da $0,084 m^3$ per Objet30 Pro a $0,4 m^3$ per Objet1000 Plus), ciò che caratterizza davvero quest'ultime è la compatibilità con i diversi materiali. Nella Tab. I sono riportate come esempio le specifiche di due sistemi di stampa Polyjet.

Caratteristica	Objet30 Pro	Stratasys J750
Volume massimo di costruzione (mm^3)	294 x 192 x 148.6	490 × 390 × 200
Spessore Layer minimo ottenibile (mm)	0.016	0.014
Famiglie di Materiali utilizzabili	Rigid Opaque Vero Clear Polipropilene Simulato	Tutti i materiali Vero Vero Clear e RGD720 Materiali simil-gomma VeroFlex, VeroFlex Vivid
Possibile Utilizzo Digital Materials	No	Si
Costo (€) [21]	30000	> 250000

Tabella I. Caratteristiche sistemi Objet30 Pro e Stratasys J750 (adattamento di [20])

Nella Tab.I sono riportati a titolo d'esempio 2 sistemi di stampa, uno "entry level", rappresentato dalla macchina Objet30 Pro, ed un altro tecnicamente più avanzato, proposto con una macchina Stratasys J750. Come si osserva, sebbene lo spessore del layer deposto sia tutto sommato comparabile (0,016 mm per Objet30 Pro e 0,014 mm per Statasys J750), la differenza di prezzo è sostanziale. Questa discrepanza è principalmente legata alla vasta scelta dei materiali (e delle loro combinazioni nel caso di Digital Materials) adoperabili nel caso di tecnologia Stratasys J750. Questa peculiarità non permette solo di ottenere una elevata resa estetica della parte finale ma anche caratteristiche funzionali uniche, come una risposta tattile ultra-realistica nel caso di riproduzione di parti anatomiche, che forniscono, di fatto, una nuova dimensione al concetto di precisione.

1.4. Materiali e Applicazioni

I materiali utilizzati in AM sono molteplici, sia per quanto riguarda lo stato fisico (liquido, sottoforma di polveri, ecc.), sia per quanto riguarda la natura chimica degli stessi. Nei processi AM che coinvolgono materiali metallici, i materiali si presentano spesso sotto forma di polveri che vengono fuse sul momento, come avviene ad esempio nel processo EBM, per mezzo di fonti di energia termica. Nel processo FDM, d'altro canto, i materiali prediletti sono policarbonati, ABS e PLA, che si presentano sotto forma di bobine di filo successivamente fuso dalla testa della macchina mentre, nel caso di processo di Stereolitografia e Polyjet, i fotopolimeri utilizzati sono resine liquide su base epossidica. Generalmente, i polimeri amorfi vengono utilizzati nei processi in cui l'estrusione del materiale è necessaria per la fusione e deposizione dello stesso (processo FDM). Nel caso invece di fusione a letto di polvere saranno più indicati polimeri semicristallini e, in alcuni casi, è possibile anche adoperare polimeri amorfi (come il polistirene). Per quanto riguarda il Material Jetting ed i processi di AM in vasca (Stereolitografia), i materiali utilizzati sono termoindurenti fotosensibili, in cui la viscosità viene controllata affinché rimanga bassa al momento della deposizione. Volendo spostare il focus proprio su questi ultimi, è importante sapere, come mostrato in fig.1.6, che i fotopolimeri sono composti principalmente da Monomeri, Oligomeri, Fotoiniziatori ed Additivi, usati per cambiare le proprietà del polimero in base all'utilizzo finale dello stesso. Visti gli svantaggi in termini di ritiro del materiale (con conseguente accumulo di tensioni residue) e di resistenza all'ambiente atmosferico, verso gli inizi degli anni 90, le resine acriliche sono state via via sostituite dalle resine epossidiche che, sebbene andassero a risolvere i problemi prima citati, presentavano formulazioni più complesse.



Figura 1.6 Principali elementi di un Fotopolimero

Il processo di polimerizzazione della resina è fondamentalmente composto tre fasi:

- Attivazione
- Propagazione
- Conclusione

Per mezzo della luce ultravioletta (ad una specifica lunghezza d'onda), il fotopolimero si attiva e la sua parte reattiva reagisce con una molecola di monomero formando un radicale libero. Inizia così il processo di creazione e propagazione di lunghe catene polimeriche fino alla sua interruzione, che può avvenire per ricombinazione, sproporzione oppure occlusione [22][23].

L'analisi dei materiali, della loro natura e delle loro proprietà è di fondamentale importanza. Questi rappresentano una delle scelte fondamentali che il progettista deve compiere e che può influenzare le caratteristiche finali della parte prodotta. Partendo da questo presupposto, i produttori hanno sviluppato e brevettato diversi materiali. Tra questi, numerose sono le proposte di Stratasys, che differenzia la sua vasta gamma di materiali in base alle loro proprietà ingegneristiche ed in base ai settori di utilizzo (dall'aeronautico a quello delle protesi mediche).

Volendo semplificare la classificazione dei materiali in funzione delle loro proprietà, è possibile dividerli in tre famiglie:

- a) Materiali Rigidi
- b) Materiali Elastici
- c) Materiali con caratteristiche intermedie e caratteristiche speciali (trasparenza, flessibilità congiunta a rigidezza, ...)

Le caratteristiche dei principali materiali appartenenti alle famiglie sopra citate sono schematizzate in Tab.II mentre in Tab. III, tratta da [20], è riportata a scopo illustrativo la composizione chimica del materiale VeroWhite Plus, polimero appartenente alla famiglia dei materiali Vero Rigid Opaque e che condivide con questi le stesse proprietà meccaniche. Oltre al VeroWhite Plus, la famiglia Rigid Opaque comprende numerosi materiali aventi differenti colorazioni, come giallo, magenta e ciano. I materiali Rigid Opaque sono caratterizzati da colori brillanti, ideali per test di forma e montaggio. Per quanto concerne i materiali aventi caratteristiche speciali, tra questi sicuramente rientrano il VeroClear ed il RGD720, materiali rigidi trasparenti ideali, ad esempio, per applicazioni in cui è necessario osservare il flusso di liquidi all'interno del materiale, ed il RGD525, avente eccezionale stabilità dimensionale per i test funzionali termici. Tra i materiali elastici, le proposte principali sono rappresentate dalla serie Tango e dalla serie Agilus30, polimeri dalle caratteristiche elastomeriche elevate con proprietà di resistenza agli urti, assorbimento delle vibrazioni e feedback tattile anti-scivolo. Tutti questi materiali (e molti altri) sono miscelabili tra loro, creando quindi i cosiddetti Digital Materials, unione di più materiali (fino a 14 contemporaneamente) aventi diverse proprietà estetiche e tecniche, al fine di crearne di nuovi, che possano soddisfare le sempre più esigenti richieste di mercato, aumentando radicalmente i campi di utilizzo e le possibili applicazioni.

Tabella II. Caratteristiche meccaniche dei principali materiali di costruzione Stratasys

MATERIALE	Resistenza a	Allungamento a	Modulo	Resistenza a	Modulo	Durezza Shore	Caratteristiche
	Trazione	Rottura	Elastico	Flessione	Flessionale	Scala D	
Vero "Rigid	Fino a 65 MPa	Fino al 25%	2000-3000	75-110 MPa	2200-3200 MPa	83-86 Scala D	А
Opaque" family			MPa				
D C D 720	5 (5) (5	c 1050/	2000 2000	75.110 \ (C)	5 2200		
RGD /20	fino a 65 MPa	fino al 25%	2000-3000	75-110 MPa	fino a 3300	83-86 Scala D	A C
VeroClear			MPa		MPa		
VaraFlav	fino a 64 Mna	fino al 20%	050 1600	48 88 MDa	1600 2300 MPa	75 85 Scala D	C
VeloPiex,	nno a 04 wipa	11110 at 2070	950-1000	40-00 WII a	1000-2300 Ivii a	75-65 Scala D	C
veroflex vivid			MPa				
Tango Black	1.8 – 5 MPa	45-55%				60-77 Scala A	В
Tango Grav	110 0 1111 4	10 0070				oo ,, Sould II	2
Tungo Giuy							
Agilus30	fino a 3.1 MPa	fino al 240%	\sim	\sim	\sim	30-40 Scala A	В
-							
TangoBlack Plus	0.8-1.5 MPa	fino al 220%	\sim			26-28 Scala A	В
RGD525	70-80 Mpa	10-15%	fino a 3500	110-130 MPa	3100-3500 MPa	87-88 Scala D	A C
			MPa				

Tabella III. Composizione chimica in peso % dei principali componenti di un fotopolimero appartenente alla famiglia Vero Rigid Opaque.

Component	Approximate % by weight
Acrylic monomer	<30
Isobornyl acrylate	<25
Phenol, 4,4'-(1-methylethylidene)bis-, polymer with (chloromethyl) oxirane, 2-propenoate	<15
Diphenyl-2,4,6-trimethylbenzoyl phosphine oxide	<2
Titanium dioxide	<0.8
Acrylic acid ester	<0.3
Propylene glycol monomethyl ether acetate	0.1–0.125
Phosphoric acid	0.002-0.015

Per quanto riguarda le proprietà di densità relative ai principali polimeri, queste non sono state inserite in Tab.II poiché non variano in modo rilevante tra un materiale e l'altro, con valori medi di 1.17 g/cm³. Un'ulteriore curiosità è rappresentata dal fatto che i polimeri utilizzati con questa tecnologia siano resistenti all'acqua, ma non del tutto impermeabili. In riferimento ai dati forniti dal produttore in [20], mediamente il tasso percentuale di aumento del peso dopo 24h di immersione in acqua è pari a 1.5% (misurato secondo la normativa ASTM D570).

In diversi studi, i ricercatori hanno invece analizzato l'influenza di alcuni parametri di processo sulla variazione della temperatura di transizione vetrosa T_g , un parametro caratteristico dei polimeri amorfi e, di fondamentale importanza, per l'analisi delle proprietà viscoelastiche di questi ultimi. In [24], per esempio, i ricercatori hanno osservato come la stampa del provino con orientamento lungo l'asse X della macchina ed utilizzando lo spessore di layer deposto più spesso, portasse a valori di T_g più elevati.

Per la corretta costruzione dei manufatti e per preservare le geometrie più complesse dei manufatti, è spesso necessario l'utilizzo di un materiale di supporto. Tuttavia, le intricate geometrie interne possono rimanere complesse da realizzare ed una di queste complessità è legata proprio alla rimozione del

materiale di supporto che dovrà essere effettuata al termine del processo di fabbricazione.

Nel caso di tecnologia Polyjet, ma più in generale di tecnologie appartenenti alla famiglia delle tecnologie di Material Jetting, la rimozione del materiale di supporto può avvenire manualmente, tramite getto d'acqua in pressione (con idropulitrice apposita) oppure per via chimica, tramite bagni in soluzioni speciali in grado di sciogliere il materiale di supporto [25].

Il materiale di supporto Polyjet più utilizzato in assoluto è il Fullcure 705, un fotopolimero atossico il cui aspetto può essere ricondotto a quello di un gel la cui rimozione è affidata solitamente ad un getto d'acqua in pressione oppure all'immersione del componente in un bagno di idrossido di sodio (soluzione di soda caustica all'1%). Quest'ultimo trattamento, oltre che a facilitare la rimozione del materiale di supporto, permette di ottenere superfici uniformi e levigate sulla parte prodotta. Come osservato anche in [26], il glicole polietilenico (PEG)non reattivo, polimero preparato per polimerizzazione dell'ossido di etilene, è il componente principale di tali sistemi. Ciò che permette alla soda caustica di assistere nella rimozione del materiale di supporto è la presenza di bicarbonati che, a contatto con la soluzione acida, permettono il rilascio di CO₂. In Tab.IV, in riferimento a quanto riportato in [27], è riportata la composizione chimica del polimero con la percentuale in peso dei singoli componenti.

Component	Approximate % by weight
Poly(oxy-1,2-ethanediyl),α-(1-oxo-2-propenyl)-ω-hydroxy-	<50
1,2-Propylene glycol	<35
Polyethylene glycol	<30
Glycerin	<25
Phosphine oxide, phenylbis(2,4,6-trimethylbenzoyl)-	<0.5
Acrylic acid ester	<0.3

Tabella IV Composizione chimica del materiale di supporto Fullcure705

Come già detto, gli ambiti di utilizzo dei materiali Polyjet sono i più diversificati. Dal settore dei beni di consumo, con la realizzazione di prototipi concettuali e parti finali, alla ricerca medica, con la realizzazione di modelli visivi complessi (fig.7a) e svolgendo un importante ruolo nella pianificazione di interventi chirurgici, per mezzo di accurati modelli realizzati con Digital Materials ed in grado di restituire feedback tattili ultra-realistici (fig.7b), (fig.7c) [28]. In [29], Kim et al. hanno sottolineato l'importanza di una corretta scelta del materiale per preservare l'accuratezza dimensionale delle parti prodotte con tecnologia Polyjet, quando i campi applicativi sono critici come quello medico. In particolare, nello studio, è stata analizzato l'errore dimensionale di differenti geometrie prodotte con materiale rigido e con materiale elastico. Si è osservato come il materiale elastico producesse errori tra le 2.7 e le 42.5 volte superiori rispetto ad un materiale duro. Inoltre, è emerso come man mano che la geometria diveniva più complessa (da un semplice cubo, ad una geometria a manubrio, fino ad una geometria a rene) generalmente l'errore aumentava. Nel recente studio [30], sono stati proposti dei modelli anatomici articolari (in fig.7d), utili per la formazione medica, in sostituzione a quelli scheletrici reali. In particolare, i ricercatori hanno osservato che i digital materials impiegati riuscivano ad emulare bene il comportamento dei tessuti molli che andavano a sostituire, aprendo così la strada allo sviluppo di nuovi modelli e tecnologie. Tuttavia, come già anticipato, il campo medico non è l'unico dove la tecnologia Polyjet trova spazio. Come illustrato in [31] e [32], le tecnologie AM stanno rivoluzionando anche la Fashion Industry. Un esempio di tecnologia Polyjet utilizzata nell'industria della moda è la collezione VOLTAGE di Iris Van Herpen, dove due capi della collezione sono stati fabbricati usando la tecnologia Objet Connex con vari materiali, incorporando elementi sia duri che morbidi, dando movimento e consistenza ai capi (fig.7e).



Figura 1.7 Differenti campi di impiego della tecnologia Polyjet

È doveroso sottolineare, come riportato in fig. 1.5, che uno degli svantaggi principali delle macchine Polyjet, e che non permette alla tecnologia di essere estremamente diffusa, è legato all'elevato costo dei materiali di costruzione e di supporto. Questi sono disponibili sotto forma di cartucce (fig. 1.8), di diversa capacità, dotate di un tag RFID di riconoscimento per la macchina, all'interno del quale sono inserite tutte le informazioni del fotopolimero, utili per il settaggio dei parametri di processo che la stampante dovrà impiegare per la corretta deposizione della resina. Un'ulteriore informazione inserita all'interno del Tag RFID è la data di scadenza del prodotto. Superata tale data, il Tag renderà inutilizzabile la resina. I materiali Polyjet hanno solitamente una durata di circa 18 mesi dalla data di produzione, durata che scenderà a poco più di 12 mesi quando il prodotto raggiunge il consumatore finale. Questa caratteristica, congiunta al costo

oneroso dei materiali, si rivela un problema nel caso di usi non intensivi della macchina e nei casi in cui la tecnologia dovesse essere impiegata per piccole produzioni.



Figura 1.8 Cartuccia di una resina per tecnologia Polyjet

2. CARATTERIZZAZIONE DELLA QUALITA' GEOMETRICA E DIMENSIONALE

L'accuratezza dimensionale e geometrica, la qualità superficiale dei componenti e la ripetibilità di queste caratteristiche rappresentano delle condizioni necessarie affinché i processi di AM diventino a tutti gli effetti parte fondamentale dei processi di produttivi all'interno delle Smart Factory [33]. Lo studio e l'ottimizzazione di queste proprietà diviene quindi di primaria importanza [34]. La resa estetica delle parti è fondamentale in numerosi settori, dall'automotive a quello degli elettrodomestici, come altrettanto numerosi sono i fattori che la influenzano [35]. Nei diversi studi proposti all'interno di questo capitolo, i ricercatori si sono occupati di investigare l'influenza e l'interdipendenza di questi fattori, analisi imprescindibile al fine della previsione delle proprietà estetiche del manufatto desiderate. L'eventuale presenza di evidenze sperimentali che ottimizzano le caratteristiche in esame e la classificazione delle varie ricerche, verranno proposte e discusse alla fine del capitolo.

2.1. Rugosità Superficiale

La rugosità superficiale quantifica la deviazione della superficie del manufatto dalla sua forma ideale ed il suo valore descrive in qualche modo anche quale potrebbe essere il comportamento del pezzo nel suo ambiente di funzionamento (ad esempio in alcune applicazioni, elevata rugosità superficiale porta ad un elevato attrito).

A seguito di una review di diversi studi riguardanti l'argomento, in [7] vengono identificati in modo generico quelle che possono essere le possibili fattori che influenzano la qualità superficiale nei processi di AM. Questi sono schematizzati in fig. 2.1.

Pre-Processo						
Preparazione del File CAD Preparazion		arazione file .STL Eventuali Conve file in altri fo		Conversioni del altri formati		
	Processo					
Macchina e strategia di deposizione del materiale	i Orientazione Proprietà d		el materiale	Finitu	ra Superficiale	Spessore Layer deposto
Post-Processo						
Operazioni di rimozione materiale di supporto Post operazioni di finitura.				finitura.		

Figura 2.1 Schematizzazione dei fattori influenti sulla qualità superficiale. (adattamento di [7])

Sebbene alcuni di questi fattori non siano modificabili dall'utente finale (ad esempio la strategia di deposizione del fotopolimero e il modo in cui gli ugelli di stampa siano attivati), molti altri, invece, possono essere considerati come variabili di processo che i ricercatori possono modificare, combinare ed ottimizzare al fine di ottenere le migliori proprietà superficiali possibili.

Udroiu & Mihail in [36] hanno analizzato la rugosità superficiale di provini piatti di base quadrata (in fig. 2.2) al variare della finitura superficiale. I provini sono stati prodotti utilizzando una macchina Objet EDEN 350 e spessore di layer di 16 µm. Il materiale principale utilizzato per la costruzione del test era il Fullcure 720 mentre, come materiale di supporto, è stato utilizzato il Fullcure 705. La rugosità media Ra e la rugosità totale Rt sono state misurate con un rugosimetro Surtronic 25 effettuando quattro rilevazioni in direzione traversale alla texture del materiale ed una rilevazione in direzione concorde alla texture del materiale. I risultati sperimentali indicavano la finitura lucida come quella più indicata ai fini della qualità superficiale, con un valore medio di Ra uguale a 0,84 µm ed un valore medio di Rt pari a 3,8 µm. dallo studio si nota inoltre come la rugosità misurata in direzione trasversale alla texture del materiale presenti valori più elevati rispetto alle altre misurazioni. Il risultato ottenuto in termini di finitura superficiale (finitura lucida più vantaggiosa) è in linea con lo studio [37] riguardo la tecnologia della Stereolitografia. Anche in quel caso, la presenza del materiale di supporto generava delle imperfezioni a seguito della rimozione dello stesso



Figura 2.2 Provino piano utilizzato nella ricerca [37]

Nella ricerca [38] condotta da Krishnan & Gurunathan è stata studiata la variazione della rugosità superficiale variando due fattori: finitura superficiale e orientamento ϑ della superficie. Il provino, avente la forma di un prisma contorto, è mostrato in (fig. 2.3). Sono stati poi elaborati 2 modelli teorici (uno basato su polinomi di 4° grado ed uno basato sulla somma di funzioni trigonometriche). La macchina scelta per la produzione del test, molto simile a quello osservato negli studi [17], [39], è una Objet EDEN 350V con uno spessore di layer di 16 µm. Il materiale principale utilizzato per la costruzione era il VeroBlue RGD 840, con materiale di supporto Fullcure 705.



Figura 2.3 Provino avvitato a facce piane [38]

Il DoE sviluppato per l'indagine ha condotto gli autori ad osservare che nel caso di finitura opaca la rugosità aumentava all'aumentare dell'orientamento delle facce ϑ , fino a 90°, per poi diminuire fino a 180°, mostrando un comportamento tra 0° e 180° ripetitivo per gli angoli da 180° e 360°. Nel caso di finitura lucida la rugosità invece si mantiene bassa per angoli da 0 a 80° per poi aumentare repentinamente fino a 90° e diminuire gradualmente fino a 180°. Anche in questo caso si presenta uno schema ripetitivo per gli angoli ϑ da 180° a 360°.

Al fine di migliorare la conoscenza del processo Polyjet e dei fattori che influenzano la rugosità superficiale e le caratteristiche meccaniche, Morer et al., autori di [40], hanno analizzato l'effetto dell'orientamento e del post processo di pulitura delle superfici dal materiale di supporto, sulla qualità superficiale di provini di trazione orientati come in fig. 2.4, prodotti con una stampante Objet EDEN 330, materiale di costruzione Fullcure 720 e materiale di supporto Fullcure 705. Per le misurazioni della rugosità è stato utilizzato un rugosimetro Mitutoyo SJ301.



Figura 2.4 Provini di trazione e orientamenti in macchina nella ricerca [40]

L'analisi statistica ha portato a identificare la finitura lucida come quella che permette di ottenere i migliori risultati in termini di finitura superficiale. Il bagno di soda caustica dopo il la rimozione del materiale di supporto migliora i risultati sia per i provini disposti con l'orientamento lungo l'asse X e lungo l'asse Y. Risulta invece infruttuoso usare questa tecnica quando il provino è orientato con la dimensione maggiore lungo l'asse Z. La finitura lucida, tuttavia, non è sempre consigliata a causa delle limitazioni geometriche di alcune Feature of Size (come le pareti sottili). Quindi, nel caso in cui non fosse possibile utilizzare lo stile di costruzione lucido per i motivi sopra descritti, i ricercatori suggeriscono come pratica migliore l'utilizzo dello stile di finitura opaco con successivo bagno di soda caustica, dopo aver rimosso il materiale di supporto per mezzo di un getto d'acqua in pressione.

L'indagine [41] proposta da J. D. Kechagias & Maropoulos analizzava gli effetti dell'angolo di inclinazione della superfice del provino (rispetto al piano di costruzione della macchina) sulla rugosità superficiale. Sette provini, mostrati in fig. 2.5, sono stati prodoti per mezzo di una stampante Objet EDEN 250, con uno spessore di layer di 16 μ m, finitura superficiale opaca ed usando come materiale principale il Fullcure 720.



Figura 2.5 Provino prismatico e vari orientamenti utilizzato nella ricerca [41]. Nota: gli intagli mostrati servono per identificare più facilmente i campioni in fase di misurazione.

L'indagine sperimentale guardava all'acquisizione dei parametri Ra ed Rt per mezzo di un rugosimetro Mitutoyo Surftest RJ- 210. I risultati della ricerca mostravano come la rugosità superficiale aumentava all'aumentare dell'angolo di inclinazione. Sia per i provini inclinati lungo l'asse X che per quelli inclinati l'ungo l'asse Y, i migliori risultati in termini di rugosità superficiale erano ottenuti per un'inclinazione nulla (angolo di 0°).

Nella ricerca, viene inoltre confutato il modello matematico proposto in un altro studio da Reeves & Cobb ([42]), che vedeva la rugosità superficiale diminuire all'aumentare dell'angolo di inclinazione della superficie. In realtà, come si può osservare in fig. 2.6, sperimentalmente i ricercatori hanno rilevato che il comportamento era esattamente opposto.



Figura 2.6 Confronto tra i risultati sperimentali della ricerca [41] e risultati del modello matematico proposto in [42]

Al fine di definire una metodologia per la valutazione della qualità superficiale, Udroiu et al. nella ricerca [7], hanno realizzato il provino riportato in fig. 2.7, composto da un asse orizzontale sul quale sono connesse delle lamine a diversi livelli di angolazione, con angoli tra 0° e 90°. I fattori di influenza studiati erano la finitura superficiale, l'orientamento delle lamine intorno all'asse orizzontale sul quale erano costruite e l'orientamento dell'intero provino all'interno del piano XY, quest'ultimo, secondo 3 configurazioni (allineato lungo lasse X, allineato lungo l'asse Y ed a 45° tra i 2 assi).



Figura 2.7 Provino a lamine inclinate utilizzato in [7]

La macchina utilizzata per la fabbricazione dei provini era una Objet EDEN 350, con spessore di layer scelto di 16 µm, materiale principale Fullcure 870 (VeroBlack) e materiale di supporto Fullcure 705. Lo strumento di misura selezionato per la rilevazione del profilo superficiale di rugosità era un rugosimetro SURTRONIC 25. I ricercatori, mediante l'uso dell'approccio al DoE, hanno selezionato 8 possibili configurazioni del provino, mentre, un'analisi ANOVA è stata impiegata per capire l'influenza dei singoli fattori e delle loro interazioni sulla qualità superficiale del componente. Quest'ultima ha portato ad individuare l'orientamento delle singole lamine come il fattore che incide maggiormente sulla rugosità del componente, segue poi per importanza la finitura superficiale selezionata, mentre, l'orientamento dell'intero manufatto non è risultato un parametro caratterizzante. Anche l'interazione tra i primi due fattori (orientamento delle lamine e finitura superficiale) è risultato significativo. Nel caso di finitura opaca, i valori di Ra rilevati oscillavano tra 0.5 e 15 μ m, raggiungendo un valore massimo per un'inclinazione della superficie della lamina di 80°, per poi decrescere di nuovo fino a 7 µm per un angolo di 90°. Nel caso di finitura opaca, la configurazione con angolo di 45° del manufatto nel piano XY, aveva mediamente valori di rugosità più bassi. Nel caso di finitura lucida, invece, erano quelli che offrivano i valori di Ra migliori in assoluto, con rilevazioni sperimentali tra 0.5 µm e 4 µm. Il manufatto orientato l'ungo l'asse Y aveva mediamente i valori migliori di rugosità superficiale. Nel caso di angolo di inclinazione a 90°, la finitura lucida e l'orientamento dell'artefatto lungo l'asse X, si sono mostrati come i parametri più indicati per mantenere i valori di Ra contenuti. Quindi, si può concludere, anche in questo caso, che l'angolo di inclinazione della superficie oggetto dell'analisi influisce moltissimo sulla qualità superficiale del componente ed in particolare, all'aumentare di questa inclinazione, le caratteristiche superficiali peggiorano.

Allo scopo di riassumere le informazioni sopra riportati, gli studi sopra proposti sono stati condensati all'interno di tabelle, al fine di confrontare i risultati ottenuti ed eventualmente evidenziare la presenza di linee guida di progettazione proposte comuni ai vari ricercatori. In Tab. V sono presenti i risultati principali ottenuti, mentre nelle tabelle (VI – IX) sono riportate le migliori configurazioni in relazione ai singoli parametri analizzati.

Tabella V. Risultati principali degli studi sulla rugosità

Riferimento	Forma Provino	Materiale	Risultati Ottenuti
[36]	Prisma Piano	Fullcure720	Il materiale di supporto genera imperfezioni sulla superficie del pezzo e la rugosità misurata in direzione trasversale alla direzione di deposizione mostra valori più elevati
[38]	Provino con facce ritorte	VeroBlue RGD840	Aumento della rugosità all'aumentare dell'angolo di inclinazione delle facce. Nel caso di finitura lucida, la rugosità mostra valori più bassi con aumenti repentini per angoli di inclinazione tra gli 80° ed i 90°.
[40]	Provino di trazione	Fullcure720	La finitura lucida mostra migliori valori di rugosità. Quando la finitura lucida non è selezionabile, il bagno con soda caustica per la rimozione del materiale di supporto si rivela la scelta migliore per ridurre la rugosità. Nei provini con la dimensione maggiore orientata lungo Z si osservano i peggiori valori di rugosità.
[41]	Prisma rettangolare	Fullcure720	L'aumento dell'angolo di inclinazione rispetto al piano XY portava ad un aumento di rugosità.
[7]	Lamine con inclinazione variabile	Fullcure870 VeroBlack	Il fattore che incideva di più sulla rugosità era l'orientamento delle lamine
[43]	Staffa ad "U" con fori	Fullcure720	Dall'Analisi ANOVA è emerso che lo stile di costruzione è il fattore che influisce maggiormente sulle prestazioni di finitura superficiale (contributo del 95%), mentre, spessore dello strato e del fattore di scala hanno un peso irrisorio (con un tasso di contribuzione inferiore al 3%).
[44]	Prisma rettangolare	Fullcure720	Sperimentalmente si osserva un aumento della rugosità all'aumentare dell'angolo di inclinazione. Inoltre, lungo la direzione X, le superfici appaiono striate, problema probabilmente dovuto al materiale solidificato depositatosi sulla lama livellante.

Riferimento	Macchina	Parametri analizzati	Configurazione Migliore
[36]	Objet EDEN 350	Finitura Lucida e Opaca	Finitura Lucida
[38]	Objet EDEN 350V	Finitura Lucida e Opaca	Finitura Lucida
[40]	Objet EDEN 330	Finitura Lucida e Opaca	Finitura Lucida
[7]	Objet EDEN 350	Finitura Lucida e Opaca	Finitura Lucida
[43]	Objet EDEN 250	Finitura Lucida e Opaca	Finitura Lucida
[44]	Objet EDEN 250	Finitura Lucida e Opaca	Finitura Lucida

Tabella VI. Ottimizzazione della rugosità superficiale in funzione dello stile di costruzione

Tabella VII. Ottimizzazione della rugosità superficiale in funzione del processo di rimozione del materiale di supporto

Riferimento	Macchina	Parametri analizzati	Configurazione Migliore
[40]	Objet EDEN 350	Post-processo di pulizia del	Rimozione materiale di supporto con getto
		materiale di supporto	d'acqua in pressione e successivo bagno in
			soda caustica (per un tempo controllato,
			poiché potrebbe causare la degradazione del
			polimero)

Tabella VIII. Ottimizzazione della rugosità superficiale in funzione dell'orientamento

Riferimento	Macchina	Parametri analizzati	Configurazione Migliore
[38]	Objet EDEN 350V	Orientamento incrementale delle facce del provino di 2°.	Angoli di inclinazione più bassi possibile
[40]	Objet EDEN 330	Orientamento secondo i 3 assi coordinati X, Y, Z	Lunghezza maggiore del provino lungo X
[41]	Objet EDEN 250	Rotazione intorno all'asse X e Rotazione intorno all'asse Y	Superficie all'interno del piano XY (angolo di 0°)
[7]	Objet EDEN 350	Orientamento nel piano XY Orientamento rispetto al piano XY	Orientamento del manufatto lungo l'asse Y (le lamine ruotano intorno all'asse Y) e orientamento delle lamine nel piano XY
[44]	Objet EDEN 250	Rotazione intorno all'asse X e Rotazione intorno all'asse Y	Superficie del provino all'interno del piano XY (angolo di inclinazione 0°), sia con orientamento lungo l'asse X che con orientamento lungo l'asse Y.

Tabella IX. Ottimizzazione della rugosità superficiale in funzione del fattore di scala.

Riferimento	Macchina	Parametri analizzati	Configurazione Migliore
[44]	Objet EDEN 250	Fattore di scala al 50% ed al 90%	Fattore di scala (dimensione) più piccola considerata

Materiali Utilizzati • Fullcure720 • VeroBlack • VeroBlue

Figura 2.8 Aerogramma dei principali materiali utilizzati nell'analisi della rugosità superficiale.



Figura 2.9. Istogramma dei parametri processo investigati negli studi relativi la rugosità superficiale

Dai risultati proposti, appare chiaro come i ricercatori coinvolti nell'analisi delle prestazioni di rugosità superficiale del sistema Polyjet, concordino sul fatto che la finitura superficiale Lucida sia preferibile a quella Opaca quando si vuole mantenere basso il valore di rugosità superficiale.

Un'altra evidenza riguarda l'orientamento del manufatto all'interno del vassoio di costruzione. Anche in questo caso, sulla base delle ricerche proposte è possibile affermare che, per garantire risultati ottimali in termini di rugosità, le superfici critiche dovrebbero essere orientate "distese" all'interno della piattaforma di deposizione, quindi nel piano XY.

Dal grafico in fig. 2.8, invece, si nota facilmente come il Fullcure720 sia il materiale maggiormente scelto dagli autori per valutare l'accuratezza superficiale dei componenti. Questo polimero è caratterizzato da una stabilità dimensionale elevata che lo rende ottimo per la realizzazione di prototipi per la valutazione dell'uniformità delle superfici [20]. Infine, dall'istogramma riportato in fig. 2.9, è possibile constatare che gli studi relativi la qualità superficiale delle parti prodotte con tecnologia Polyjet siano particolarmente incentrati sulla Finitura Superficiale e sull'Orientamento, indice di come questi 2 fattori siano i più incidenti sul risultato finale.

2.2. Accuratezza Dimensionale e Geometrica

Le tecnologie digitali di acquisizione forniscono, ad esempio in campo medico, grandi riduzioni di costi. I modelli ortodontici ne sono un chiaro esempio. In passato, infatti, ci si affidava a calchi in gesso, fragili e soggetti a degradazione nel tempo, mentre oggi, grazie ai modelli digitali tutti questi problemi non sono presenti, permettendo inoltre più semplice il richiamo dei dati e delle informazioni del paziente da parte del medico.

Lo scopo di questo paragrafo è di evidenziare gli studi riguardanti l'accuratezza dimensionale e geometrica delle parti prodotte mediante tecnologia Polyjet e confrontare i risultati ottenuti dai vari studi al fine di determinare delle possibili linee nella progettazione quando l'accuratezza dimensionale e di forma rappresenta la finalità principale.

Ogni processo di Additive Manufacturing ha i suoi limiti e la tecnologia Polyjet non fa eccezione. La conoscenza di questi limiti ha grande valore pratico quando è importante garantire una produzione accurata e di qualità e, sebbene i vincoli teorici di una tecnologia siano dichiarati dal produttore della stessa, le analisi sperimentali spesso dimostrano una incoerenza all'atto pratico.

In [45], gli autori hanno confrontato 3 diverse tecnologie per la creazione di modelli per calchi dentali ad uso odontoiatrico. Per tre tecnologie (FDM, SLA e Polyjet) è stata studiata l'accuratezza dimensionale. Nel caso Polyjet, la produzione di 12 modelli mascellari e 12 modelli mandibolari è stata la affidata alla macchina Objet EDEN500V, con spessore di layer di 16 µm, mentre le misurazioni sono state effettuate per mezzo di un calibro digitale portatile (O4OO-EEP). 12 modelli dentali mascellari e 12 mandibolari sono stati analizzati e misurati separatamente in diverse zone rilevanti da un punto di vista funzionale dei modelli. I modelli FDM presentavano la minor quantità di variazione rispetto ai modelli SLA e Polyjet. Per quanto riguarda questo tipo di applicazioni, la tecnologia FDM offriva migliori prestazioni rispetto alla tecnologia Polyjet.

Tuttavia, lo studio si è concentrato sull'accuratezza delle repliche dei denti piuttosto che su prodotti e forme/geometrie ingegneristiche.



Figura 2.10 Modelli per protesi dentarie realizzati con diversi processi di AM [45]

Provando quindi a comprendere meglio questo aspetto, Radomir Mendricky nella sua ricerca [46] si è occupato di analizzare l'accuratezza di un test benchmark contenente al suo interno differenti tipi di geometrie, mostrato in fig. 2.11 e fig. 2.12 Nello studio, la produzione del benchmark è affidata a due tecnologie, Polyjet ed FDM. Nel caso del processo Polyjet, la macchina utilizzata era una Objet CONNEX 500, con materiale principale di costruzione VeroGray RGD850 e spessore dello layer deposto variabile (16 μ m oppure 30 μ m). Per le misurazioni è stato utilizzato uno scanner ottico senza contatto GOM – ATOS II 400 3D ed i dati sono stati successivamente elaborati dal software GOM Inspect Professional v8



Figura 2.11. Modello Cad con tolleranze geometriche del test benchmark utilizzato in [46]. Nota: misure in mm.



Figura 2.12 Rendering del modello 3D tratto dal disegno in fig. 2.11. [46]

Riassumendo le evidenze sperimentali della ricerca:

- le dimensioni degli elementi sferici rientravano nei valori di tolleranza richiesti,
- i diametri dei cilindri interni sono più piccoli (deviazione tra -0,11 mm
 e -0,28 mm),
- dimensioni della larghezza della base del benchmark test inferiori (deviazione tra -0,24 mm a -0,32 mm) quando si stampava con spessore layer di 30 μm,
- quando l'impostazione di spessore di 16 μm è impostata sulla macchina, le dimensioni del modello rientravano nelle precisioni dichiarate fornite dal produttore e, comunque, offriva caratteristiche geometriche e dimensionali migliori rispetto al caso 30 μm.

K. Kitsakis, Z. Moza, V. Iakovakis et al. [47], si sono occupati di analizzare ed l'accuratezza dimensionale di un campione di forma "ad L", mostrato in fig. 2.13, contenente su una delle superfici una caratteristica cilindrica. Il provino è stato prodotto per mezzo di una stampante Polyjet Objet EDEN 250, usando l'impostazione di finitura superficiale lucida, spessore di layer deposto di 30 μ m, il Veroblack Opaque come materiale principale di costruzione ed il Fullcure705 come materiale di supporto.


Figura 2.13 Provino ad L con particolare cilindrico [47]. Nota: misure in mm.

I provini prodotti sono stati esaminati, per mezzo di micrometri, in diversi punti di interesse, investigando l'altezza delle superfici (asse Z), lunghezza del provino (asse Y), larghezza del provino (asse X) e diametro della caratteristica cilindrica.

Dai risultati delle misurazioni è emerso che lungo l'asse Y, il provino è risultato essere sovradimensionato e, in particolare, le misurazioni in corrispondenza della base avevano una deviazione maggiore. Questo effetto si spiegherebbe con la presenza dello strato di materiale di supporto sul quale viene costruito il campione. Anche per quanto riguarda la larghezza del provino (asse X), quest'ultimo è risultato essere sovradimensionato. Infine, l'accuratezza relativa all'altezza del provino (asse Z) è risultata essere la più scadente rispetto alle dimensioni lungo gli altri assi di riferimento. Per quanto riguarda i diametri misurati in corrispondenza della faccia superiore del cilindro, questi erano inferiori rispetto ai diametri misurati alla base dello stesso. La geometria, quindi, è confermata come un aspetto fondamentale da tenere in considerazioni. I ricercatori hanno inoltre assegnato il grado IT alle dimensioni di lunghezza, altezza e diametro del provino, in riferimento alla normativa ISO 286-1:2010. I risultati trovati sono proposti nella Tab. X.

Tabella X. Gradi IT calcolati nella ricerca [47].

Grandezza di riferimento	Grado IT
Lunghezza	IT 8
Larghezza	IT 9
Diametro	IT 11

Tuttavia, nello studio non si è tenuto conto né dell'influenza del tipo di finitura superficiale, né dell'orientamento del campione all'interno del vassoio di produzione della macchina così come la variazione dello spessore del layer deposto.

Cercando di analizzare i fattori che influenzano le caratteristiche parti cilindriche cave, Beltran et al. in [48], hanno valutato l'influenza di tre parametri (dimensione, posizione e orientamento all'interno del vassoio di costruzione) sulla qualità dimensionale e geometrica. Utilizzando una macchina Stratasys Objet 30 con spessore di layer deposto di 28 μ m, finitura superficiale opaca, materiale di costruzione principale VeroWhite RGD835 e materiale di supporto Fullcure 705, i provini sono stati prodotti con diversi orientamenti descritti in fig. 2.15 da gli angoli $\vartheta \in \varphi$ (rispettivamente polare ed azimutale). Per la misurazione degli stessi, i ricercatori si sono affidati ad una macchina CMM Dea Global Imagine 091



Figura 2.14 Provino a forma di cilindro cavo utilizzato nella ricerca [48].

Un DoE è stato utilizzato come metodo statistico per la pianificazione delle prove mentre l'ANOVA, è stata usata per capire quali fattori incidevano maggiormente sulle evidenze rilevate. Sono stati quindi misurati l'errore dimensionale della superficie esterna, "*eD*", ed interna, "*ed*", dei cilindri e l'errore geometrico rispettivamente per la cilindricità (errore di forma) della superficie esterna, "*eG*", ed interna, "*eg*", che valuta rispettivamente la cilindricità (errore di forma) della superficie interna ed esterna. I risultati più rilevanti riscontrati dai ricercatori sono stati raccolti nella tab. XI.

Indicatore	Risultato Ottenuto	Analisi ANOVA	Configurazione Migliore
		Fattori di Influenza	
eD	Negativo	Interazione tra $\varphi \in \vartheta$, Angolo φ	$\vartheta=90^\circ\;\phi=0^\circ$
ed	Positivo	Angolo Ə	$\vartheta = 90^{\circ}$
eG	$79~\mu m \div 203~\mu m$	Fattore di scala	dim. minori
eg	68 μm ÷ 209 μm	Fattore di Scala, Interazione tra ϕ e ϑ	dim. minori e $\vartheta = 90^{\circ} \phi = 90^{\circ}$

Tabella XI. Raccolta dei fattori più influenti e delle loro configurazioni migliori nella ricerca [48]

Le conclusioni sottolineano come non esista un orientamento che offra caratteristiche geometrico-dimensionali in assoluto migliori rispetto ad un altro. Tutto, quindi, dipenderà dalle caratteristiche che vorremmo meglio preservare, rispetto al progetto, in fase di produzione. Vista la quota di influenza dei singoli parametri sulle dimensioni e la forma dei provini, i ricercatori consigliano, in primo luogo, di orientare le caratteristiche cilindriche con l'asse di simmetria lungo l'asse X per preservare l'aspetto dimensionale e, in secondo luogo, valutare se l'errore geometrico è accettabile.

Dall'analisi di un provino di forma "ad U", J. Kechagias, P. Stavropoulos et al. [49], hanno osservato come lo spessore del layer deposto, la qualità della finitura

superficiale ed il fattore di scala influenzavano l'accuratezza dimensionale. Più nel dettaglio, per la produzione del campione in esame riportato in fig. 2.15, è stata utilizzata una macchina Objet EDEN 250 con materiale di costruzione principale il Fullcure 720 ed un calibro digitale per la rilevazione delle misurazioni. Per ridurre il numero di esperimenti nel processo produttivo è stato utilizzato il metodo Taguchi, mentre, ANOVA e ANOM sono stati utilizzati come strumenti per la determinazione dei parametri che influenzavano maggiormente l'accuratezza e per determinare quale configurazione di questi portava ad un risultato ottimale.



Figura 2.15 Provino a forma di staffa ad U forato utilizzato nella ricerca [49]. Nota: dimensioni in mm.

I risultati relativi le influenze dei parametri relativi lo spessore layer (LT), la finitura superficiale (BS) ed il fattore di scala (S) sono riportati nella tab. XII.

Dimensione considerata	Quota Influenza	Fattori più influenti
	dei singoli fattori	
Asse X	LT:44%, BS:38%, S:18%	Spessore layer, finitura superficiale
Asse Y	LT:97%, BS:1%, S:1%	Spessore layer
Asse Z	LT:14%, BS:23%, S:37%	Fattore di Scala, finitura superficiale
Diametri	LT≈ 50%, BS:<10%, S≈40%	Spessore layer, fattore di scala

 Tabella XII. Influenza dei singoli fattori sulle dimensioni considerate nella ricerca [49]

Per la valutazione dell'accuratezza dimensionale, in [50] i ricercatori hanno prodotto il benchmark, di forma e dimensioni riportate in fig. 2.16, usando una macchina Objet500 Connex3 ed il materiale VeroWhite Plus (RGD835), analizzando l'altezza, la larghezza e l'altezza del test. Tre sono i parametri di processo valutati nello studio:

- spessore del layer deposto,
- finitura superficiale,
- posizione del provino all'interno del piano di costruzione.



Figura 2.16. Provino angolare a facce perpendicolari [50]

Le misurazioni sono state eseguite con una macchina a misura di coordinate Werth Video-Check-IP con una risoluzione di 0.5µm. Per lo svolgimento degli esperimenti e l'analisi degli stessi è stato progettato un full factorial design, seguito da un'analisi ANOVA.

La finitura superficiale incide molto sull'accuratezza dimensionale lungo X. La posizione all'interno del piano di costruzione influisce sull'accuratezza dell'asse Z, a causa della disuniformità della radiazione UV nel vassoio di costruzione. Le parti in alto a sinistra nel piano di costruzione potrebbero essere sovraesposte alla luce UV. L'accuratezza lungo l'asse Z è risultata essere maggiore rispetto a quella lungo gli altri due assi coordinati. I ricercatori hanno relazionato questo risultato ad una efficiente azione congiunta del motore passo-passo (che movimenta il vassoio di costruzione) con la lama livellante della macchina.

Un altro studio proposto da Singh et al. [51], analizza l'accuratezza dimensionale ed il Grado IT di una parte prodotta con tecnologia Polyjet, considerando 3 diversi orientamenti (lunghezza maggiore lungo Z, lunghezza maggiore lungo Y, inclinazione di 45° rispetto al piano XY di costruzione con larghezza perpendicolare all'asse X) ed usando per la costruzione del componente (case di una pen-drive) una macchina Objet EDEN 260 con 3 diversi materiale: Fullcure720, VeroWhite e VeroBlue. Per la valutazione delle dimensioni e degli scostamenti è impiegata macchina CMM. stata una Dalle varie prove sperimentali sui materiali e gli orientamenti è emerso che la configurazione migliore prevedeva l'utilizzo di VeroWhite posizionando il componente con la lunghezza maggiore lungo l'asse Y. In relazione all'orientamento orizzontale (il migliore), è stato calcolato un Grado IT minimo IT8.

Haghighi A., Yang Y. e Li L. [52], usando un campione prismatico in fig. 2.17 formato da due componenti: una base prismatica con un particolare estruso al centro di essa e da un anello rettangolare nel quale il particolare alloggia. Tra l'anello e la parte centrale è presente, da progetto, una intercapedine costante di 0.2mm. La macchina utilizzata per la fabbricazione dei manufatti è una Objet 30 Prime, seleziona uno spessore di layer deposto di 28 µm ed impiegando come materiale di costruzione principale il VeroClear RGD810. Un calibro digitale con precisione di 0.01mm è stato utilizzato per la rilevazione delle misure.



Figura 2.17. Campione prismatico considerato nella ricerca [52]



Figura 2.18. Orientamenti e configurazioni di stampa (provino assemblato e componenti singoli) della ricerca [52]

È stata analizzata l'influenza dell'orientamento (orizzontale oppure ruotato di 90°) e del tipo di montaggio (accoppiato oppure individuale) sull'accuratezza dimensionale dell'intercapedine (fig. 2.18). In totale sono stati prodotti 8 campioni, 2 per ogni configurazione. A seguito delle misurazioni, la configurazione che prevedeva la stampa del campione in modo individuale con un orientamento del prisma parallelo al piano XY di costruzione della macchina (orientamento orizzontale) si è rivelata essere la migliore ai fini dell'accuratezza dimensionale. Il gioco finale presente con l'orientamento sul lato è sempre minore rispetto a quello osservato con orientamento orizzontale. Per concludere, le dimensioni del particolare estruso della base (sia in larghezza che in lunghezza) risultano essere generalmente sovradimensionate mentre le dimensioni dell'anello rettangolare sottodimensionate. Si dimostra così un risultato più generale, ossia che la geometria del componente rappresenta un fattore chiave ed incide fortemente sull'accuratezza dimensionale dello stesso.

Ricalcando quanto fatto alla fine del paragrafo 2.1 sulla rugosità superficiale, sono stati riassunti i risultati più importanti ottenuti dai ricercatori negli studi gli studi sopra proposti.

In Tab. XIII sono presenti i risultati principali ottenuti, mentre nelle Tab. XIV-XVI sono riportate le migliori configurazioni in relazione ai singoli parametri analizzati.

Tabella XIII. Risultati principali ottenuti nelle ricerche relative l'accuratezza dimensionale e geometrica.

Riferimento	Forma Provino	Materiale	Risultati Ottenuti
[46]	Test Benchmack	VeroGray	Lo spessore di layer deposto da 30 µm produceva deviazioni maggiori (rispetto alle dimensioni di progetto) alla base del campione. Gli elementi sferici erano riprodotti in modo piuttosto accurato.
[47]	Staffa ad "L" con caratteristica cilindrica	VeroBlack	L'accuratezza dimensionale lungo l'asse Z risulta essere piuttosto scadente. La geometria rappresenta un importante parametro da tenere in considerazione per l'accuratezza dimensionale
[48]	Cilindro cavo	VeroWhite	Non esiste un orientamento che in assoluto garantisce l'ottimizzazione dell'accuratezza dimensionale e geometrica contemporaneamente.
[49]	Staffa ad "U" forata	Fullcure720	Dimensioni lungo l'asse X e l'asse Y influenzate principalmente dallo spessore del layer deposto. Dimensioni lungo l'asse Z influenzate principalmente dal fattore di scala e dalla finitura superficiale.
[50]	Provino angolare a facce perpendicolari	VeroWhite Plus	Le dimensioni lungo l'asse X e lungo l'asse Z influenzate rispettivamente da finitura superficiale e posizione all'interno del Vassoio di costruzione.
[51]	Case pen-drive	Fullcure720 VeroWhite VeroBlue	Miglior grado IT ottenibile con orientamento orizzontale e materiale VeroWhite, con qualità tra IT9 e IT8
[52]	Provino prismatico a 2 componenti	VeroClear	Dimensioni del particolare prismatico centrale generalmente sovradimensionate mentre, dimensioni dell'anello rettangolare generalmente sottodimensionate. La geometria gioca un ruolo chiave.
[53]	Staffa ad "U" forata	Fullcure720	Il metodo Grey-Taguchi è stato utilizzato per investigare l'influenza dei vari parametri di processo. I risultati hanno portato ad individuare il fattore di scala come il fattore più rilevante per l'accuratezza dimensionale mentre, lo spessore del layer deposto, influisce poco.

Riferimento	Macchina	Parametri analizzati	Configurazione Migliore
[46]	Objet Connex500	Spessore layer: 16 um e 30 um	16 μm
[50]	Objet 500 Connex3	Spessore layer: 16 μm e 32 μm	16 µm
[53]	Objet EDEN 250	Spessore layer: 16 μm e 30 μm	16 µm

Tabella XIV. Ottimizzazione dell'accuratezza dimensionale e geometrica in funzione dello spessore del layer deposto

Tabella XV. Ottimizzazione dell'accuratezza dimensionale e geometrica in funzione dell'orientamento

Riferimento	Macchina	Parametri analizzati	Configurazione Migliore
[47]	Objet EDEN 250	Dimensioni lungo i 3 assi coordinati	Asse Y
[48]	Objet 30	Orientamento nello spazio X, Y, Z	Asse di simmetria cilindro = Asse X
[50]	Objet 500 Connex3	Dimensioni lungo i 3 assi coordinati	Asse Z (con finitura opaca)
[51]	Objet EDEN 260	Orientamenti con dimensione maggiore lungo Y, lungo Z ed a 45°	Asse Y
[52]	Objet 30 Prime	Orientamento (lunghezza, larghezza): (XY) e (YZ)	Lunghezza lungo l'asse X e larghezza lungo l'asse Y

Tabella XVI.	Ottimizzazione	dell'accuratezza	dimensionale	e	geometrica	in	funzione	della	finitura
superficiale									

Riferimento	Macchina Parametri analizzati		Configurazione Migliore
[50]	Objet 500 Connex3	Finitura Superficiale:	Lucida
		Lucida, Opaca	
[53]	Objet EDEN 250	Finitura Superficiale:	Lucida
		Lucida, Opaca	





Figura 2.19 Aerogramma dei principali materiali utilizzati nell'analisi dell'accuratezza dimensionale e geometrica.



Figura 2.20. Numero di studi condotti rispettivamente per l'accuratezza dimensionale e geometrica



Parametri di processo analizzati

Figura 2.21 Istogramma dei parametri processo investigati negli studi relativi l'accuratezza dimensionale e geometrica.

Osservando le evidenze sperimentali raccolte e concentrandoci sullo spessore del layer deposto, appare chiaro come, secondo gli autori, uno spessore di layer di 16 µm contribuisca ad ottimizzare l'accuratezza dimensionale e geometrica dei manufatti prodotti con tecnologia Polyjet. Per quanto riguarda l'orientamento del manufatto, la maggior parte degli studi proposti dagli autori convergono sul fatto che sia preferibile disporre il manufatto con le dimensioni critiche allineate lungo gli assi X e Y, al fine di preservare l'accuratezza dimensionale. Tuttavia, in diverse ricerche, è stato osservato come la geometria della parte da produrre giochi un ruolo chiave al fine dell'accuratezza della stessa. È, inoltre, interessante osservare che un ulteriore parametro ritenuto importante dai ricercatori, oltre l'orientamento, lo spessore del layer e la finitura superficiale, è la posizione del manufatto all'interno del vassoio di costruzione (fig. 2.21). Questa ipotesi ha trovato riscontro in [50]. A causa, infatti, della diversa permanenza della luce UV all'interno del vassoio di costruzione, gli autori indentificano la zona in alto a sinistra del vassoio come quella sovraesposta alla luce UV, dove il materiale è più coinvolto nel processo di polimerizzazione e si può osservare una più marcata contrazione dello stesso, con conseguente effetto negativo sull'accuratezza dimensionale. Questo viene evidenziato anche in [54], dove si osserva che il ritiro del fotopolimero è uno dei principali problemi che affligge l'accuratezza. Per quanto concerne i materiali utilizzati nei vari studi proposti, dal grafico in fig. 2.19, è possibile osservare come, anche in questo caso così come per quanto visto negli studi relativi la rugosità superficiale, i materiali traslucidi VeroClear e Fullcure 720 (40% sul totale delle ricerche riportate) siano i prediletti dai ricercatori, grazie all'elevata stabilità dimensionale posseduta. Dallo stesso grafico, si nota inoltre come anche il VeroWhite, appartenente alla famiglia dei materiali rigidi, sia piuttosto utilizzato nelle ricerche. È possibile concludere che gli elevati valori di rigidezza, comuni e simili per queste famiglie di materiali, rappresentino un fattore importante per l'accuratezza del manufatto prodotto. Per concludere, come evidenziato nel grafico in fig. 2.20, si nota come la maggior parte degli studi si concentrino sull'accuratezza dimensionale piuttosto che sulla valutazione dell'errore geometrico. Come sottolineato anche in [48], ci sono diversi studi che valutano l'accuratezza dei componenti realizzati con tecnologia Polyjet, ma basandosi più su applicazioni e geometrie di natura medica e valutando l'errore volumetrico invece che su geometrie "base" per analisi ingegneristiche.

2.3. Feature of Size

Le tecnologie di Additive Manufacturing, ed il processo Polyjet non fa eccezione, permettono la produzione di parti aventi geometrie di elevata complessità, in maniera estremamente semplice se paragonate ai processi tradizionali per asportazione di materiale. Tuttavia, sebbene non ci siano vincoli alla complessità geometrica ottenibile, lo stesso non si può dire per i vincoli di progettazione. Come viene evidenziato nella ricerca [55] di Rebaioli & Fassi, numerosissimi studi legati alla valutazione delle proprietà geometriche e di minime Feature of Size sono stati condotti nel corso degli anni, tuttavia, gli studi relativi ai processi MJ (material jetting), di cui anche processo Polyjet fa parte, restano molto limitati.

Gli studi analizzati in questo paragrafo riguarderanno l'analisi di questi limiti e descriveranno le condizioni necessarie per garantire che le Feature of Size prodotte mantengano le loro caratteristiche estetiche e di funzionalità.

Nel loro studio [14], Kim e Oh, hanno analizzato la possibilità di produrre correttamente nervature sottili (mediante il provino riportato in fig. 2.22 A) per mezzo della tecnologia Polyjet. La macchina utilizzata per la prova era una Objet EDEN 500V, con materiale di costruzione Fullcure720 e spessore di layer deposto di 16 μ m. Dall'osservazione dei dati sperimentali si è osservato che la tecnologia Polyjet era in grado di costruire correttamente nervature sottili verticali fino ad uno spessore minimo di 1 mm, oltre questo valore la feature of size iniziava a collassare su sé stessa, come si osserva per gli spessori di 0.5mm, 0.3mm e 0.2mm in fig. 2.22 B.



Figura 2.22 A) Modello 3D a lamine B) Lamine al termine del processo produttivo [14].

A questo proposito N. A. Meisel & Williams[56], si sono occupati di determinare i vincoli di processo per la tecnologia Polyjet, identificando 4 vincoli di produzione che potrebbero la progettazione delle parti:

- Rimozione materiale di supporto
- Minima Feature of Size ottenibile
- Resistenza della Feature of Size alla rimozione del materiale di supporto
- Minimo angolo auto-portante

Per quanto riguarda la rimozione del materiale di supporto, i ricercatori si sono chiesti che dimensione e geometria dovessero avere le caratteristiche affinché il materiale di supporto fosse eliminato con efficacia. A questo proposito, è stato realizzato il provino mostrato in fig. 2.23, fondamentalmente costituito da un prisma contenete un canale al suo interno. I fattori presi in considerazione erano Geometria, Area trasversale e Connettività del canale (se passante oppure cieco) del canale. Come è intuibile aspettarsi, i risultati suggerivano che una maggiore area trasversale contribuiva efficacemente alla rimozione del materiale di supporto. Ciò è in linea su studi simili relativi al processo EBM [57], un'altra tecnologia di AM per la produzione di componenti metallici e dove la polvere sinterizzata per certe dimensioni di overhang è sufficiente a garantire un adeguato supporto alla costruzione della superficie.



Figura 2.23. Provino a canale per la valutazione del processo di pulizia [56]

Tuttavia, gli autori hanno osservato che il parametro relativo alla connettività potrebbe non svolgere alcun ruolo significativo nella rimozione del materiale di supporto (secondo l'analisi ANOVA). Probabilmente l'effetto della connettività potrebbe diventare rilevante nel momento in cui il tempo di pulizia fosse considerato una variabile indipendente. Infatti, a mano a mano che il tempo aumenta, il materiale viene rimosso sempre più facilmente e velocemente nel caso di canale aperto da entrambe le estremità.

Al fine di analizzare quale fosse la più piccola caratteristica realizzabile e quali fattori influenzano la sua fabbricazione, Meisel & Williams [58], hanno preso in considerazione diversi parametri, tra cui:

- Il tipo di materiale (VeroWhite + e TangoBlack +),
- Il tipo di finitura superficiale (opaca oppure lucida),
- L' orientamento della parte (XY o XZ)
- La direzione della FoS (in alto rilievo oppure in basso rilievo)
- La geometria della lavorazione.

Per la produzione del provino riportato in fig. 2.24, gli autori si sono ispirati ai numerosi benchmark proposti in letteratura ([59],[60],[61]), per la valutazione ed il confronto delle potenzialità di altri tipi di tecnologie di AM. Dall'analisi ANOVA è emerso che i 2 fattori che hanno maggior influenza sulla corretta realizzazione della più piccola Feature of Size sono principalmente il materiale scelto per la stampa (con una variazione del risultato di circa 0.330 mm) e la direzione della caratteristica (con una variazione del risultato di circa 0.288 mm). I materiali più rigidi, come il VeroWhite+, tendono a produrre caratteristiche dalla geometria maggiormente definita. La natura spugnosa di materiali più elastici, come il TangoBlack+, tendono invece a sfocare i confini della caratteristica.



Figura 2.24. Benchmark test con geometrie in alto rilevo e basso rilevo usato in [58].

È stato visto come la dimensione media della minima FoS, che manteneva le sue proprietà estetiche, era di circa 0.73mm. La stampa del benchmark nel piano XY offriva caratteristiche migliori e, probabilmente, ciò era dovuto alla migliore accuratezza della macchina lungo l'asse Z piuttosto che all'interno del piano XY. In assoluto, comunque, non si può dire quale sia la minima FoS realizzabile se non si tiene conto del post-processo di pulizia al quale le caratteristiche sono sottoposte, nel momento in cui la finitura opaca viene scelta come metodo di costruzione. Si è visto come, sebbene le geometrie in alto rilievo fossero costruite meglio di quelle in basso rilievo, queste fossero particolarmente sensibili ai processi di pulizia ed andassero incontro a rottura durante la rimozione del materiale di supporto. A questo proposito, in [58], i ricercatori hanno analizzato la resistenza dei materiali VeroWhite+ e TangoBlack+ (rispettivamente materiale rigido e flessibile) alle operazioni di pulizia con getto d'acqua in pressione, progettando il provino illustrato in fig. 2.25. Si è evidenziato come, nel caso di materiale rigido, è necessario che la sezione della caratteristica sia la più grande possibile ed entrambe le estremità della stessa sia vincolate. Nel caso, invece, di materiale flessibile è fondamentale per la sopravvivenza della caratteristica che quest'ultima sia vincolata solo da un lato ("a sbalzo").



Figura 2.25 Provino a pilastro per valutare la resistenza alle operazioni di pulizia [58].

Un altro test benchmark riportato in fig. 2.26 è quello studiato da Yang et al., all'interno di [62]. Lo studio si basa sul confronto e le potenziali di 2 tipi di tecnologie di Material Jetting, 3DP e Polyjet. Per la realizzazione del manufatto è stata utilizzata una macchina Objet EDEN 260VS, usando come materiale principale l'RGD840 VeroBlue, come materiale di supporto il SUP707, la finitura opaca ed uno spessore di layer di 16 µm.



Figura 2.26. Test benchmark con varie geometrie, scanalature e fori, usato in [62].

Dai risultati, è emerso come le piccole caratteristiche costituite da fori di dimensione inferiore a 250 μ m e le caratteristiche laterali del benchmark di dimensione inferiore ai 500 μ m presentino problemi di fabbricazione fig. (2.27).



Figura 2.27. Errori nella riproduzione di geometrie forate all'interno del test benchmark [62].

Il problema è in parte dovuto al fatto che, quando si realizzano caratteristiche di dimensione molto ridotta, il materiale di supporto ed il materiale principale di costruzione si fondono insieme prima di essere polimerizzati. Di conseguenza, il nuovo composto che si crea, non è idrosolubile come il materiale di supporto e non è resistente come il materiale di costruzione principale. Al loro termine, quindi, le operazioni di pulizia fanno emergere errori dimensionali e geometrici nelle feature of size di dimensioni molto ridotte.

Vijayan et al. [63] si sono occupati di determinare la capacità del processo Polyjet di produrre microstrutture (elementi fluidici). Allo scopo, sono state sviluppate microstrutture di altezza e larghezza variabili (100 \div 3000 µm) usando una stampante Objet 30 Prime, la resina VeroClear come materiale principale e considerando tre diverse modalità di costruzione offerte dalla macchina:

- Alta qualità HQ (spessore layer deposto di 16 μm),
- Alta velocità HS (spessore layer deposto di 28 μm),
- Draft (spessore layer deposto di 36 µm).

Per l'analisi e l'osservazione delle sezioni trasversali delle geometrie prodotte è stato utilizzato un MU500 AmScope usando ImageJ per l'elaborazione delle immagini. Le caratteristiche prodotte erano caratterizzate da una larghezza wp ed una altezza hp, che si discostavano da quelle di progetto. In particolare, lo studio ha rivelato che esisteva una larghezza di soglia (wd' = 300 µm) necessaria per raggiungere l'altezza progettata e che lo spessore del layer deposto influenzava la larghezza di soglia (modalità HS produceva sistematicamente caratteristiche di dimensioni maggiori). Se la caratteristica aveva valori di larghezza inferiori a wd', allora l'altezza di progetto non veniva raggiunta. È stato inoltre sviluppato un modello matematico polinomiale (Eq. 2.1) che fosse in grado di prevedere con un'elevata accuratezza (>96%) le dimensioni della micro-caratteristica prodotta, valido per entrambe per entrambe le regioni di interesse di wd, andando ad utilizzare specifici coefficienti correttivi riportati in Tab. XVII.

Equazione 2.1. Modello matematico polinomiale di predizione delle dimensioni della microcaratteristica.

$$Z(x, y) = C_4 x^2 + C_5(y) + C_3 x y + C_1 x + C_2 y + C_0$$

Nell'equazione Eq. 2.1, x e y rappresentano rispettivamente larghezza e altezza di progetto della micro-caratteristica cuboide che si vuole realizzare. Z invece rappresenta, in base ai coefficienti scelti dalla Tab. XVII, la stima dell'altezza o della larghezza della feature prodotta.

Printed Dimension	R^2	C_0	C_1	<i>C</i> ₂	<i>C</i> ₃	C_4	C_5
$w_p(1)$	0.9632	$8.76 imes10^{-2}$	5.84	$-1.78 imes10^{-2}$	$8.77 imes 10^{-5}$	$-1.63 imes10^{-2}$	$4.58 imes10^{-7}$
h_p (1)	0.9999	$1.23 imes10^{-3}$	$8.21 imes 10^{-2}$	$4.73 imes10^{-1}$	$2.25 imes 10^{-3}$	$-7.77 imes10^{-5}$	$-5.57 imes10^{-6}$
w_p (2)	0.9995	3.41×10^2	$8.54 imes10^{-1}$	$3.94 imes10^{-2}$	$7.62 imes 10^{-6}$	$4.22 imes 10^{-5}$	$-1.00 imes10^{-5}$
h_p (2)	0.9999	6.58	$1.62 imes 10^{-1}$	1.02	$1.68 imes 10^{-6}$	-4.45×10^{-6}	$1.49 imes 10^{-6}$

Tabella XVII. Coefficienti correttivi ordinati in base alla dimensione della caratteristica rispetto al valore di soglia wd'

Al fine di determinare le capacità dei processi AM di produrre geometrie provviste di angoli acute, per implicazioni cliniche, Yoshiaki Ide et al. [64], hanno sviluppato dei provini di forma prismatica triangolare mostrati in fig. 2.28, mediante l'utilizzo di 2 tecnologie: Polyjet ed FDM (fused deposition modelling).



Figura 2.28 Dimensioni e variazione della geometria esamina nel provino prismatico triangolare in [64]

Sei provini sono stati stampati secondo 3 diversi orientamenti (A, B, C) mostrati in fig. 2.29 e, per ogni orientamento, sono stati stampati 15 campioni con angolo variabile ϑ tra i 60° ed i 5°. I campioni di forma prismatica triangolare avevano tutti la stessa altezza H = 15 mm e sono stati prodotti per mezzo di una macchina Objet Alaris 30, con spessore di layer deposto pari a 16 µm, finitura lucida e come materiale principale il VeroWhite +. La finitura lucida è stata preferita a quella opaca, poiché quest'ultima poteva portare al danneggiamento delle parti più sottili del componente, a valle delle operazioni di pulizia con getto d'acqua in pressione.



Figura 2.29. Orientamenti A, B, C del campione in [64].

Dalle misurazioni, effettuate su campioni scelti casualmente, per mezzo di un calibro digitale a corsoio Mitutoyo Absolute Digimatic e su campioni scelti casualmente, i ricercatori hanno riscontrato che i provini prodotti per mezzo della tecnologia Polyjet presentavano superfici lisce. Si è osservato che l'altezza del prisma triangolare prodotto diminuiva al diminuire dell'ampiezza dell'angolo 9. La differenza di altezza tra quella nominale di progetto (15 mm) e quella prodotta era sempre inferiore ad 1mm e, più nel dettaglio, i campioni orientati secondo la direzione C erano quelli che presentavano la minor differenza di altezza (0.2mm) per l'angolo 9 più basso (5°). I risultati della ricerca sono meglio schematizzati in fig. 2.30.



Figura 2.30. Andamenti delle altezze raggiunte dal campione prismatico triangolare al variare dell'angolo al vertice [64].

Nel loro studio, gli autori di [58], hanno analizzato quale fosse il minimo angolo autoportante (privo di materiale di supporto) di una caratteristica laminare prodotta con tecnologia Polyjet. A questo scopo, il manufatto mostrato in fig. 2.31 stato prodotto considerando variazioni graduali dell'angolo di inclinazione delle 10 lamine, partendo da una lamina verticale di 90 gradi (misurata dall'orizzontale) e passando ad una faccia di 72 gradi, con incrementi di 2 gradi.



Figura 2.31. Provino a lamine per la valutazione del minimo angolo autoportante in [58].

Come fattori in grado di influire sull'angolo minimo autoportante delle lamine sono stati considerati l'orientamento ed il materiale di costruzione (VeroWhite+ oppure TangoBlack+). Gli orientamenti del manufatto del manufatto considerati sono stati due. Il primo orientamento prevedeva che la dimensione più lunga del manufatto fosse parallela all'asse X, mentre, il secondo orientamento era disposto con la sua dimensione più lunga parallela all'asse Y.



Figura 2.32. Formazione di stalagmiti alla base delle facce inclinate delle lamine. [58]

Dall'analisi delle parti prodotte è emerso che nessuna delle lamine riusciva a raggiungere l'angolazione minima di 72°. Prima di raggiungere quel valore di inclinazione, infatti, sopraggiungeva la formazione di stalagmiti di materiale (fig. 2.32). L'angolo medio minimo ottenuto con i due orientamenti era di 84.5° e l'orientamento migliore era quello con il campione allineato lungo l'asse Y. Inoltre, dall'analisi ANOVA è emerso come il tipo di materiale scelto per la costruzione del provino non abbia molta influenza. Tuttavia, questo risultato, secondo i ricercatori, meriterebbe ulteriori approfondimenti.

In [50], gli autori hanno analizzato la geometria, riportata in fig. 2.33, costituita da una serie di lamine sottili aventi 4 differenti altezze e 13 orientamenti da 0° a 180°, con la base del campione all'interno del piano XY (0° e 180° riportati lungo l'asse Y).



Figura 2.33 Benchmark test con pareti sottili a diverse inclinazioni e diverse altezze utilizzato in [50]. Nota: misure in mm.

La macchina utilizzata per la produzione del benchmark era una Objet 500 Connex3, con spessore di layer deposto di 32 µm e materiale di costruzione VeroWhitePlus. I campioni sono stati stampanti valutando 9 diversi spessori per le nervature, da 0.2mm ad 1mm. Dall'analisi sperimentale si è osservato che i campioni con spessori uguali o inferiori a 0.4 mm erano caratterizzati da errori che si presentano in inclinazioni delle pareti e mancata perpendicolarità delle stesse rispetto alla base del manufatto. Da un'analisi dell'orientamento delle nervature, invece, l'allineamento lungo l'asse Y (angolo di inclinazione 0° e 180°) è risultato essere il più vantaggioso ai fine della corretta costruzione della feature of size. Un'ulteriore curiosità è rappresentata dal fatto che lo spessore della FoS non è costante su tutta l'altezza, ma varia. In particolare, lo spessore misurato nei punti più alti della parete era inferiore rispetto a quello misurato alla base. Questo fenomeno è stato attribuito alla diffusione del materiale prima dell'esposizione alla luce ultravioletta.

Per una più semplice analisi e consultazione dei risultati degli studi fino ad ora proposti, le evidenze rilevate dai ricercatori per quanto riguarda le Feature of Size sono raccolte nelle Tab XVIII-XVV seguenti.

Tabella XVIII. Risultati principali ottenuti negli studi riguardanti le Feature of Size.

Rif.	Forma Provino	Materiale	Risultati Ottenuti
[14]	Pareti sottili	Fullcure720	Per piccoli spessori la FoS non preserva le sue caratteristiche geometriche e dimensionali. Ciò è causato dalla pressione del rullo (o lama) livellante che agisce sul layer superiore in costruzione.
[56]	Benchmark con geometrie in alto rilievo e basso rilievo	VeroWhite Plus TangoBlack Plus	I 2 fattori che hanno maggior influenza sulla corretta realizzazione della più piccola Feature of Size sono: il materiale scelto per la stampa e la direzione della caratteristica.
[58]	Piccola colonna di materiale, connessa da una e da entrambe le estremità	VeroWhite Plus TangoBlack Plus	I fattori importanti per la corretta pulizia di piccole FoS costruite con sono: lo spessore della caratteristica, la sua lunghezza ed il tipo di connettiva. Quest'ultimo fattore è particolarmente significativo per i materiali elastici. L'elevata rigidezza del VeroWhite Plus permette la corretta pulizia (senza rottura) della piccola colonna di materiale solo nel caso in cui questa sia vincolata da entrambe le estremità. Al contrario il materiale elastico TangoBlack Plus necessita di un solo vincolo unilaterale per migliorare significativamente la resistenza ai post-processi di pulizia.
[62]	Benchmark con diverse geometrie e fori	VeroBlue	Quando si realizzano caratteristiche di dimensione molto ridotta, il materiale di supporto ed il materiale principale di costruzione si fondono insieme prima di essere polimerizzati. Ciò non permette una corretta pulizia del componente e causa problemi di costruzione alla FoS.
[63]	Microstrutture prismatiche per stampi per fluidici	VeroClear	Esiste una larghezza di soglia minima della caratteristica che le permette di raggiungere le altezze desiderate.
[64]	Prismi Triangolari con angolo acuto	VeroWhite Plus	L'altezza del manufatto diminuiva al diminuire dell'angolo al vertice
[58]	Lamine inclinate autoportanti	VeroWhite Plus	L'angolo minimo di inclinazione prefissato (72°) per la costruzione della FoS senza l'uso di materiale di supporto non viene raggiunto da nessuna lamina. Inoltre, l'orientamento della stessa nel piano di lavoro ha influenza sul risultato finale
[50]	Pareti sottili e Intercapedini	VeroWhite Plus	Lo spessore è un fattore che incide sulla corretta costruzione delle nervature. È stato osservato che il fenomeno della diffusione del materiale causava lo spessore variabile a diverse altezze della caratteristica. In particolare, lo spessore misurato nei punti più alti della parete era inferiore rispetto a quello misurato alla base. Per quanto riguarda le intercapedini, il tipo di finitura superficiale e l'orientamento erano fattori influenti.

Rif.	Macchina	Parametri analizzati	Configurazione
[58]	Objet 350 Connex	Materiale provino: Rigido ed Elastico. Connettività provino: una estremità e due estremità	Spessore minimo FoS per materiali rigidi: 1.5mm vincolato da entrambe le estremità. Spessore minimo FoS con materiale elastico: 0.75mm con vincolo da una sola estremità
[56]	Objet 350 Connex	Area Canale Forma Canale Connettività Canale	Forma del canale più ampia possibile con sezione quadrata.

Tabella XIX. Ottimizzazione del processo di pulizia delle FoS.

Tabella XX. Geometrie limite ottenibili.

Rif.	Macchina	Parametri analizzati	Configurazione
[14]	Objet EDEN	Spessore Lamine (mm):	Spessore minimo 0.5mm
	500V	3, 2, 1, 0.5, 0.3, 0.2.	
[56]	Objet 350 Connex	Orientamento: (XY) o (XZ)	FoS preservata fino a 0.73mm con Materiali rigidi,
		Direzione caratteristica:	orientamento XY e caratteristica in alto rilievo.
		alto rilievo e basso rilievo.	
		Materiale:	
		Rigido o Flessibile	
[63]	Objet 30 Prime	Larghezze caratteristica	Larghezza limite per prevenire il fenomeno della
			diffusione: 300µm
[64]	Objet Alaris 30	Orientamento Prisma:	Orientamento su un lato e angolo al vertice di 5°
		sulla base, in verticale e su un lato.	permettevano di preservare lo spigolo della FoS,
		Angolo al vertice	producendo errori di altezza minimi
[58]	Objet 350 Connex	Orientamento Manufatto:	Angolo minimo auto portante:
		lungo X e lungo Y.	80° con orientamento Y
		Inclinazione lamine:	
		da 90° a 72° (rispetto al piano XY).	
[50]	Objet 500	Orientamento: da 0° a 180°	Spessore minimo parete sottile
[20]	Connew?	Subscription (mm) , $d_0 = 0$	So 5 mm lungo oggo V
	Connexs	spessore famme (mm): da 0.2 a 1	≥0.3 mm lungo asse 1

Rif.	Macchina	Parametri analizzati	Configurazione
[62]	Objet EDEN	Orientamento micro-fori:	Caratteristiche minime correttamente prodotte:
	260VS	piano XY, piano ZX	>250 µm nel piano XY
			>500 μm nel piano ZX
[50]	Objet 350 Connex	Orientamento intercapedini	Finitura Opaca; migliore per la realizzazione di
		(perpendicolare all'asse):	intercapedini. Intercapedini minime ottenibili di 0.15mm
		X, Y, Z	con orientamenti X e Y, di 0.1mm con orientamento Z.
		Accoppiamento Albero-Foro	Minima intercapedine tra albero-foro: 0.2mm
		Finitura Superficiale: Lucida, Opaca	

Tabella XXI. Geometrie di fori e intercapedini limite.

Le vari risultati proposti dai ricercatori sono state suddivisi in tre gruppi per mezzo delle Tab. XIX-XX-XXI. In particolare, le informazioni sono state raccolte secondo:

- L'analisi degli studi riguardanti il processo di pulizia delle FoS,
- L'analisi degli studi riguardanti le geometrie particolari ottenibili,
- L'analisi degli studi relativi le FoS costituite da fori e scanalature.

Le informazioni offerte posso essere utilizzate come suggerimenti per eventuali soluzioni costruttive fornendo, inoltre, indicazioni per l'assemblaggio di componenti mobili prodotti con tecnologia Polyjet grazie, ad esempio, alla caratterizzazione dei fori e dello spazio minimo (intercapedini) tra le pareti. Molte delle strutture geometriche sviluppate dai ricercatori erano basate su manufatto di riferimento NIST (Nation Institute of Standards and Technology). Tuttavia, non si è tenuto conto della più recente normativa ISO/ASTM 52902:2019 [65], che detta delle chiare regole per valutare la capability dei delle macchine e dei processi di Additive Manufacturing. Sono proposte a scopo di esempio, rispettivamente in fig. 2.34 e fig. 2.35, le geometrie standard per valutare le pareti sottili/nervature (resolution ribs) e le intercapedini (resolution slots) proposte nella normativa.



Figura 2.34 Resolution Ribs test tratto da ISO/ASTM 52902:2019 [65].



Figura 2.35 Resolution Slots test tratto da ISO/ASTM 52902:2019 [65].

3. CARATTERIZZAZIONE DELLE PROPRIETA' MECCANICHE

Per lo studio delle proprietà meccaniche dei materiali è importante conoscere la loro composizione chimica e la struttura atomica dei materiali coinvolti [66]. Tuttavia, la sola conoscenza delle proprietà intrinseche del materiale, nel caso delle tecnologie coinvolte nei processi di Additive Manufacturing, non assicura che le parti prodotte abbiano i requisiti previsti in fase di progettazione [67] [68]. Cercare, quindi, delle linee guida di progettazione è fondamentale al fine di ottenere le migliori proprietà meccaniche possibili [69].

Di seguito verranno riportati gli studi più rilevanti riguardo alla caratterizzazione delle proprietà meccaniche delle parti prodotte per mezzo della tecnologia Polyjet.

3.1. Proprietà Meccaniche Statiche

Barclift e Williams [70] hanno cercato una correlazione tra le caratteristiche meccaniche di provini di trazione prodotti e dei parametri di processo caratteristici di questo tipo di tecnologia. Partendo da quelle che sono le linee guida per la corretta costruzione fornite dalla casa madre, sono stati scelti i parametri di prova per l'analisi sperimentale. L'ipotesi di partenza è che le proprietà meccaniche dei pezzi prodotti con questa tecnologia siano influenzate dall'orientamento di stampa e dalla spaziatura tra le parti, poiché questi fattori incidono sul tempo di esposizione del fotopolimero alla luce UV e quindi sulle caratteristiche intrinseche del polimero. Tre sono stati i parametri tenuti in considerazione per nell'analisi sperimentale: orientazione X-Y, orientazione Z e la distanza tra le parti. Il materiale utilizzato per la realizzazione delle parti è l'Objet Vero White-Fullcure 830 (resistenza alla trazione di 49,8 MPa e un modulo di trazione di 2495 Mpa).

La macchina utilizzata per la produzione dei componenti è la Objet Connex 350 con impostazione di finitura opaca, mentre, per la pulizia dei componenti è stato utilizzato un getto d'acqua in pressione. Tramite un DOE a 3 parametri e 2 livelli si sono ottenuti un totale di 8 esperimenti. La norma seguita per misurare la resistenza a trazione è l'ASTM D638-10 usando il provino per la prova di trazione è di "tipo-1" (in fig. 3.1) e la macchina di trazione Instron 4468 (Velocità di deformazione 50mm/min fino a rottura), abbinata al software MTS System Testworks per l'acquisizione dei dati. Per la misurazione dei campioni è stato utilizzato il calibro elettronico digitale Marathon (precisione di 0.01 mm). Non sono stati effettuati successivi trattamenti di tempra.



Figura 3.1. Provino ASTM D638 Tipo 1. Tratto da [70]. Nota: misure in mm.

Nella notazione utilizzata, la prima lettera rappresenta l'asse secondo cui è orientata la lunghezza del provino, la seconda lettera rappresenta l'asse secondo cui è orientata la larghezza del provino, mentre, la terza lettera rappresenta la spaziatura tra i provini (T: vicini, F: lontani). La più alta resistenza a trazione è stata misurata nei provini XZT, con un valore di minore di 12 MPa (rispetto al valore teorico riportato dal produttore di 49 Mpa). La minore resistenza a Trazione è stata rilevata nei provini XZF. Il massimo Modulo Elastico è stato rilevato nel provino XZT, con un valore di 1874 MPa (rispetto al valore di 2495 MPa riportato dal produttore). I risultati anche per gli altri orientamenti sono riportati in fig. 3.2.



Figura 3.2 Resistenza a trazione per i diversi orientamenti proposti nello studio

Tuttavia, le poche replicazioni dell'esperimento hanno portato a risultati statisticamente non significativi, così come l'intervallo di tempo intercorso, tra la produzione dei provini ed i test sperimentali. Inoltre, un altro fattore non monitorato e possibile fonte di errore potrebbe risiedere nell'umidità dell'aria, ricordando la natura igroscopica dei materiali [71]. Ulteriori possibili differenze rispetto ai valori teorici di resistenza a trazione e modulo elastico riportati dal produttore potrebbero essere dovuti al fatto che quest'ultimo ha utilizzato dei provini con dimensioni caratteristiche diverse (D638-03, D638-04). Le conclusioni dello studio relative all'influenza della quantità di luce ultravioletta restano comunque consistenti con quelle presenti all'interno di [72], dove gli autori si occupano della caratterizzazione delle parti prodotto con la Stereolitografia.

In [73] è stata studiato l'effetto dell'orientamento del provino sulle caratteristiche meccaniche e di durezza di parti prodotte con tecnologia di Polymer Jetting. 30 provini di forma e dimensioni riportate in fig. 3.3 sono stati stampati secondo 3 orientamenti (XY,YZ,XZ), 10 per ogni orientamento, come mostrato in fig. 3.4. Per la produzione dei provini la macchina utilizzata era una EDEN 260 ed il materiale usato era il Fullcure 720. Per il prova di trazione dei provini è stata utilizzata una macchina Walter and Bai AG (FS-LFM-100 type) con celle di carico da 10KN e velocità di 5 mm/min, mentre per la misura della Durezza Shore Hd è stato utilizzato un durometro Stoltman type-D.



Figura 3.3 Dimensioni campione di trazione utilizzato nello studio



Figura 3.4 Notazione orientamenti all'interno del vassoio di costruzione

Dall'analisi dei risultati della prova di trazione è emerso che il 1° e 2° orientamento (rispettivamente XY e YZ) presentavano un chiaro punto di snervamento prima della rottura, a differenza del 3° orientamento che invece presentava una rottura di tipo fragile. L'orientamento YZ presentava la migliore resistenza a trazione (60.44 MPa) ed il maggior allungamento a rottura. Per quanto riguarda invece la durezza Shore Hd, tutti e 3 gli orientamenti presentavano valori simili, che oscillavano tra 76÷80. Secondo i ricercatori, la maggiore resistenza del 2° orientamento è imputabile all'eterogeneità con cui i bordi, rispetto alle varie superfici del provino, sono sovraesposti all'azione della luce ultravioletta (i bordi sono più esposti rispetto alle zone centrali alla luce UV). Gli autori sottolineano la presenza valori di densità e durezza comparativamente più elevati (correlati a un più alto grado di polimerizzazione), riscontrati in bordi costruiti parallelamente all'asse X. In [74] i ricercatori si sono concentrati sul confronto delle proprietà meccaniche di provini prodotti con due diverse tecnologie di stampa: FDM e Polyjet. Per ottenere dei risultati confrontabili per le due macchine, vista la necessità di utilizzo di resine liquide nel caso Polyjet, i ricercatori hanno combinato 2 fotopolimeri (Fullcure 535 e Fullcure515) andando a creare un cosiddetto *Digital Material*, avente proprietà simili all' ABS (Acrilonitrile-butadiene-stirene), polimero termoplastico utilizzato invece nel caso di tecnologia FDM. In accordo con la norma DIN EN ISO 527-2 è stato realizzato il modello del provino per il test di trazione. La macchina utilizzata per la fabbricazione dei provini nel caso Polyjet era una CONNEX 500, mentre per il test di trazione è stata utilizzata una Hounsfield H10KT. È stata valutata anche l'influenza di post trattamenti di tempra sulla resistenza a trazione. Di seguito sono riportati i risultati della ricerca (fig. 3.5.)



Figura 3.5 Resistenza a trazione in funzione dei 3 orientamenti considerati in [74].

Quello che si è osservato è che tra i vari orientamenti proposti (longitudinalmente, lateralmente e perpendicolarmente alla direzione di movimento della testina di stampa) le migliori caratteristiche di resistenza si ottenevano con l'orientamento laterale combinato con il post-trattamento di tempra (ciclo di 7 ore). L'incremento del tempo del post trattamento portava ad una limitata riduzione della resistenza a trazione del provino. Inoltre, la variazione di resistenza a trazione tra i vari orientamenti era nell'intorno del 10%, mentre la tempra portava ad un aumento delle caratteristiche di circa il 20%, rendendo così questa pratica sicuramente

indispensabile nel momento in cui si vogliono aumentare le performance della parte stampate.

In [75], gli autori hanno condotto uno studio volto ad analizzare la presenza del comportamento viscoelastico nelle parti prodotte con tecnologia Polyjet e se l'orientamento di quest'ultime sul vassoio di costruzione possa influenzare le caratteristiche meccaniche del componente. Il modulo di rilassamento E(t) è stato caratteristico la caratterizzazione utilizzato come parametro per del comportamento viscoelastico. Per la stampa del provino riportato in fig. 3.6 è stata utilizzata una macchina Statasys Objet 30, usando come spessore di layer 28 µm, Materiale di costruzione RGD 240, Materiale di supporto Fullcure 705 e finitura superficiale Glossy. La macchina con cui è stato effettuato il test di flessione a 3 punti per la determinazione di E(t) (applicando una deformazione costante dello 0,1 %) era una RSA3 (TA Instruments), in grado di applicare carichi sia stati che oscillanti condizioni in di temperatura controllata.



Figura 3.6 Provino a lamina piana ed inclinata utilizzato nella ricerca [75].

In un primo momento è stato condotto un esperimento inclinando il provino a 0° , 45° e 90° rispetto al piano XY, effettuando le misurazioni in 3 intervalli di tempo definiti, entro i 10.5 secondi. Dall'analisi statistica dei risultati è emerso che il tempo di applicazione del carico e l'inclinazione del campione all'interno del vassoio di costruzione sono entrambi parametri significativi per le caratteristiche finali del materiale. Inoltre, valori di E(t) crescenti nel tempo, indicavano un chiaro comportamento viscoelastico. Si è osservato un valore minimo di E(t) per 45°, massimo per 0° ed intermedio per 90°. Ulteriori misurazioni per intervalli di
tempo più elevati (120 secondi) sono state effettuate per caratterizzare meglio il materiale ed il comportamento di rilassamento. L'evoluzione di E(t) non aveva un andamento lineare in funzione della pendenza e nel nuovo esperimento, introducendo ulteriori inclinazioni intermedie tra 0° e 90°, è emerso che il valore di E(t) presenta una riduzione tra i 0° ed i 60° per poi aumentare repentinamente fino ai 90° fig. 3.7



Figura 3.7 Evoluzione di E(t) al variare dell'angolo di inclinazione del provino [75].

Per cercare di comprendere meglio questo aumento non previsto del Modulo di Rilassamento dopo i 60° e seguendo l'ipotesi che questo aumento potesse essere dovuto al fatto che, quando il provino è posto a 90°, il materiale di supporto è totalmente assente, gli autori hanno condotto un nuovo esperimento andando a modificare la geometria del test, in modo che le superfici del campione posto in verticale (90°) all' interno del vassoio di costruzione, fossero ricoperte dal materiale di supporto. Si è visto come, effettivamente, il materiale di supporto in qualche modo causi un effetto schermante nei confronti della luce ultravioletta, con conseguente inibizione dell'indurimento del materiale.

In [76], sono stati presi in considerazione 4 fattori ritenuti importanti e sono stati studiati in modo indipendente per capire l'influenza che avevano sulle proprietà meccaniche del materiale. Questi parametri erano: la spaziatura delle parti lungo l'asse X, la spaziatura delle parti lungo l'asse Y, l'orientazione della parte nel

piano X-Y e la finitura superficiale (lucida oppure opaca). A questo proposito, i ricercatori hanno progettato un provino a forma di prisma rettangolare di dimensioni 50mm x 12 mm x 2 mm (in fig.3.8) in RGD 240, usando come materiale di supporto il Fullcure 705, per mezzo di una stampante Stratasys Objet 30, con spessore di layer stampato di 28 μ m. I provini sono stati stampati con lo spessore di 2mm parallelo all'asse Z, usando come strategia sperimentale la OFAT (one-factor-at-a-time).



Figura 3.8 Orientamento del provino all'interno del piano XY. Nota: dimensione l pari a 50 mm, dimensione w pari a 12 mm [76].

E(t) è stato ancora una volta scelto per caratterizzare il comportamento viscoelastico del materiale. Dalle rilevazioni sperimentali è emerso che la spaziatura lungo l'asse X non influisce sul modulo di rilassamento, sebbene dal grafico in fig. 3.9 appare chiara la riduzione del valore di E(t) col passare del tempo (riduzione totale 25%), chiaro sintomo di comportamento viscoelastico del materiale. La spaziatura lungo l'asse Y, d'altro canto, ha mostrato avere effetti sul modulo E(t), mostrando caratteristiche migliori per piccole spaziature tra le parti (5mm).



Figura 3.9 Andamento di E al variare del tempo [76].

Per quanto riguarda l'orientamento del provino all'interno del piano XY, le parti disposte a 45° presentano i valori di E(t) più bassi, mostrando inoltre una sorta di comportamento simmetrico proprio rispetto a questo angolo (fig. 3.10).



Figura 3.10. Variazione di E in funzione dell'angolo φ di orientamento rispetto all'asse Y [76].

Per concludere, la finitura superficiale, non sembra influenzare il modulo E(t) e quindi le proprietà meccaniche delle parti prodotte, almeno per quanto riguarda le

parti di forma piana parallele al piano X-Y. Da questo punto di vista non risultano esserci preferenze.

È tuttavia importante ricordare che il metodo di analisi sperimentale OFAT usato in questa ricerca, come riportato in [77], presenta grandi limitazioni rispetto ad un classico DoE (design of experiments), poiché:

- Sono necessari molti esperimenti, talvolta ridondanti,
- Non viene considerato l'effetto delle interazioni tra i parametri di processo,
- Non si hanno informazioni su quale sia il miglior set di parametri ai fini dell'obiettivo della ricerca.

Das et al. [78] hanno indagato gli effetti dell'orientazione del provino sulle proprietà meccaniche ed i costi di produzione. I provini ASTM D638 Tipo 1, sono stati prodotti per mezzo di una stampante Polyjet Objet 260 Connex secondo 6 orientamenti, come riportato in fig. 3.11.



Figura 3.11 Orientamento dei provini di trazione all'interno del build tray in [78].

Il materiale principale scelto per la costruzione dei provini era VeroWhite+ (RGD835) mentre il materiale di supporto era il Fullcure 705. La finitura superficiale opaca e la modalità di stampa ad High Speed (spessore layer 28 µm) sono stati selezionati. Da un'analisi dei costi è emerso che il costo di produzione più basso si ottiene quando il provino viene prodotto con orientamento Flat-X, con una riduzione del costo del 90.2% rispetto al costo di produzione nel caso peggiore, ovvero Vert-45. Tuttavia, il costo di produzione per Flat-X è inferiore del 66.4% rispetto al successivo costo più basso, ovvero per Flat-Y. Si può affermare che, se la prerogativa è la riduzione del costo, Flat-X è l'orientamento migliore. Da una ulteriore un'analisi condotta tramite prova di trazione si è evidenziato che l'orientamento Flat-X (insieme a Flat-45° e Vert-45°) offre una resistenza alla trazione migliore (8,19% rispetto al caso peggiore Flat-Y). La stima della produzione porta alla conclusione che l'orientamento Flat-X ha un consumo minimo di materiale e tempi di costruzione ridotti, quindi costi di produzione bassi, inoltre, offre anche la migliore resistenza alla trazione. Per quanto riguarda l'allungamento a rottura, l'orientamento Vert-X detiene il valore di allungamento più alto, ovvero il 14,83% in più rispetto all'allungamento più basso, osservabile nell'orientamento Flat-Y. Una seguente analisi frattografica fig. 3.12 e fig. 3.13 eseguita sui provini che avevano la più alta e la più bassa resistenza a trazione ha rivelato come nei provini appartenenti alla prima categoria (flat-X) presentavano solchi e concavità nella zona di rottura tipici dei materiali con comportamento un comportamento duttile. Nel caso di provino orientato secondo l'asse Y, si è osservato come la direzione del carico favoriva l'apertura delle crepe, già presenti a livello microscopico del provino, conducendo quindi ad una rottura di tipo fragile.

Fracture surface of Flat-X specimen



Figura 3.12 Analisi frattografica della sezione del provino con orientamento Flat-X, tratta da [78].



Fracture surface of Vert-Y specimen

Figura 3.13 Analisi frattografica della sezione del provino con orientamento Flat-X, tratta da [78]

Riprendendo gli stessi identici provini adoperati in [78], Wei et al. [11] hanno investigato gli effetti dell'orientamento del provino e dello spessore di strato deposto sulle proprietà meccaniche (Modulo elastico, Carico di Rottura (UTS) ed allungamento) di provini prodotti con tecnologia Polyjet. Per la produzione dei provini di trazione, sono stati scelti i 6 orientamenti mostrati in fig. 3.14, ricorrendo ad una macchina Stratasys J750, selezionando la finitura superficiale opaca ed utilizzando il VeroMagenta (RGD 851) ed il SUP705 rispettivamente come materiale principale di costruzione e materiale di supporto. La macchina

Stratasys J750 permette la deposizione di due diverse altezze di layer, 14 μ m e 27 μ m.



Figura 3.14. Disposizione ed orientamento dei provini all'interno del build tray, tratta da [11].

La nomenclatura degli orientamenti è definita come segue: la prima lettera rappresenta la direzione alla quale è parallela la dimensione più lunga del campione, la seconda lettera rappresenta la direzione alla quale è perpendicolare la superficie più grande del campione. Per il test di trazione è stata utilizzata la macchina Instron 4411 con celle di carico di 50 kN ed una v = 5.08 mm/min. I risultati fondamentali ottenuti dai ricercatori sono riportati nella Tab. XXII.

Orientamento	Risultato Ottenuto
YZ	Miglior Resistenza a Trazione (UTS)
XY	Miglior Modulo Elastico ed Ottimi valori di Allungamento
ZX, ZY	Peggiori prestazioni in termini di UTS ed allungamento
XZ	Ottimi valori di allungamento

Tabella XXII Risultati notevoli ottenuti per gli orientamenti YZ, XY, ZX, ZY, XZ.

L'indagine riguardo lo spessore del layer deposto ha evidenziato che uno spessore di layer maggiore (in questo caso $27 \mu m$) offriva, generalmente, proprietà

meccaniche migliori, tranne nel caso del Modulo Elastico dove, invece, non venivano osservate differenze significative al variare dello strato di materiale deposto. In aggiunta, l'analisi ANOVA ha evidenziato che l'effetto dello spessore del layer deposto influenzava principalmente la resistenza a trazione ed il modulo elastico, mentre, l'orientamento del provino influenzava tutte e tre le proprietà meccaniche (UTS, E ed Allungamento), così come l'interazione tra spessore dello strato deposto ed orientamento del provino.

Volendo approfondire quali fossero le condizioni operative migliori, in [79], i ricercatori hanno utilizzato dei provini normati (standard ASTM D638) (fig.3.15), usando come materiale principale di costruzione l'RGD 840 (VeroBlue) e come materiale di supporto il SUP705. La macchina usata, anche in questo caso era una Stratasys Objet 30, con spessore di layer stampato di 28 μ m. I parametri oggetto di studio erano l'angolo di orientamento del pezzo all'interno del piano X-Y (0°, 30°, 60°, 60°), l'orientamento del pezzo rispetto al piano X-Y (quindi se posizionato di piatto o su un lato) ed il tipo di finitura superficiale. La macchina per il test di trazione utilizzata è la UTM Logic Controller, con una velocità di deformazione di 0.1 mm/min a T= 20°C.



Figura 3.15 Provino di trazione utilizzato nella ricerca. Nota: dimensioni in mm. [79]

I risultati sperimentali più rilevanti sono stati schematizzati nella tabella XXIII seguente:

Tabella XXIII – Schematizzazione in forma tabellare delle evidenze sperimentali dello studio.

Orientamento nel piano X-Y (0° allineato con asse X, 90° allineato con asse Y)	Finitura Superficiale	Orientamento rispetto al piano X-Y (flat oppure on-the-edge)	Risultato
90°	Lucida	Flat	Tensione di Rottura più elevata (27,85Mpa) e Modulo elastico E più elevato (2891,5 Mpa)
0°	Lucida	On-the-Edge	Tensione di Rottura più bassa (20,58Mpa)
60°	Opaca	On-the-Edge	Modulo elastico E più basso (1534,4 MPa)
60°	Opaca	Flat	Allungamento percentuale più elevato (23,38%)
60°	Opaca	On-the-Edge	Allungamento percentuale più basso (12,08%)

I risultati trovati, relativi alla finitura lucida, erano concordi con quelli presenti nello studio [80], dove gli autori hanno analizzato l'influenza di 2 parametri di processo, finitura superficiale e spessore del layer stampato, sulle caratteristiche meccaniche dei componenti prodotti con tecnologia Polyjet. Al fine di analizzare resistenza a trazione, resistenza a flessione e la durezza Shore, sono stati scelti i campioni normalizzati riportati nella Tab. XXIV, prodotti con una macchina Stratasys Objet 260 Connex con materiale di costruzione il VeroBlue.

Tipo di prova	Denominazione provino e standard di riferimento	Forma	Dimensioni (in mm)
Trazione	ASTM D638 - tipo 1	Doppia T	165x19x3,2
Flessione a 3 punti	ASTM D790	Lamina rettangolare	127x12,7x3,2
Durezza Shore	ASTM D2240	Disco circolare	Diametro: 25 Altezza: 10

Tabella XXIV. Campioni utilizzati per i test delle proprietà meccaniche di Trazione, Flessione a tre punti e Durezza Shore.

La macchina di trazione utilizzata per la prova di trazione è una Zwich Universal testing machine, mentre per la prova di durezza un Durometro Shore D. Le 4 combinazioni dei parametri di studio sono state analizzate e identificati con la seguente nomenclatura: HQ-M, HQ-G, HS-M, HS-G. le prime lettere indicano lo spessore del layer (HQ: 16 µm, HS: 30 µm), mentre l'ultima lettera indica il tipo di finitura superficiale (M: opaca, G: lucida). La ricerca ha portato ad indentificare il provino HS-G come quello caratterizzato dalla più alta resistenza a trazione (49,47 MPa), la più alta resistenza a flessione (1009,66 MPa), il più alto allungamento a rottura (34,33%) e la più alta durezza Shore (80,16 D). La finitura superficiale lucida risulta essere in questo caso la scelta ottimale per incrementare le caratteristiche meccaniche dei componenti prodotti. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che, nel caso di finitura opaca, il materiale di supporto che ricopre il pezzo, una volta rimosso, lascia sulla superficie del componente delle micro-striature. Questi "solchi" potrebbero rappresentare possibili fonti di innesco per le cricche.

Al fine di supportare i ricercatori in futuri studi riguardanti la caratterizzazione delle proprietà meccaniche e con lo scopo di individuare delle linee guida di progettazione per il miglioramento di queste ultime, i risultati delle ricerche sopra descritte saranno riassunti, per mezzo di grafici e tabelle, al fine di renderne più semplice ed immediata la fruizione. Inoltre, per semplificare ancor di più la consultazione di tali tabelle, le notazioni degli orientamenti dei campioni usati negli studi sono state uniformate come segue:

- *prima lettera*: indica l'asse secondo il quale si sviluppa la dimensione maggiore del provino,
- *seconda lettera*: indica l'asse secondo il quale si sviluppa la seconda dimensione (per grandezza) del provino,
- *terza lettera*: indica l'asse secondo il quale si sviluppa la dimensione più piccola del provino.

Tabella XXV. Risultati principali ottenuti dai ricercati negli studi di riguardo le caratteristiche meccaniche.

Ct-dia	Maashira	Matariala	Disultata attaunta
Studio	массина	wrateriale	Risultato ottenuto
[70]	Ohist Commen 200	Vana Wilste	Mielien Medele election - Mielien maisterne e tradica con
[/0]	Objet Connex 300	v ero w nite	Miglior Modulo elastico e Miglior resistenza a trazione con
			orientamento XZY e provini vicini.
[73]	EDEN 260	Fullcure 720	Miglior resistenza a trazione con orientamento XZY
[74]	Objet Connex 500	Fullcure 535 +	Miglior resistenza a trazione con orientamento XZY +
			Tempra di 7h
		Fullcure 515	I
[75]	Stratasys Objet 30	RGD 240	Miglior modulo E(t) con orientamento a XYZ. La finitura
			lucida contribuisce a migliorare le prestazioni
[76]	Stratasys Objet 30	RGD240	Miglior modulo E(t) con distanziamento dei test basso lungo
	<i>J J</i>		l'assa V a orientamento VV7 a VV7
[79]	Stratasys Objet 30	RGD840	Maggior tensione di rottura e Miglior modulo elastico E con
[//]	Stratusys Objet 50	Roboto	
			orientazione YXZ con finitura Lucida.
50.01	~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~		
[80]	Stratasys Objet 260	VeroBlue	Miglior resistenza trazione, resistenza a flessione, durezza
	Connex		Shore e allungamento a rottura con spessore di layer di
			30μm con finitura Lucida

Il grafico a barre in fig. 3.16 seguente mostra su quali fattori si sono concentrati principalmente i ricercatori degli studi in precedenza descritti, evidenziando un interesse particolare per quello che è l'orientamento del pezzo all'interno del vassoio di produzione e della finitura superficiale, trascurando invece i possibili effetti dello spessore del layer stampato.



Figura 3.16. Istogramma dei principali parametri analizzati negli studi relativi alle caratteristiche meccaniche.

Materiali Utilizzati



Figura 3.17. Aerogramma dei principali materiali utilizzati nell'analisi delle caratteristiche meccaniche statiche.

Le seguenti tabelle invece evidenziano per argomento quelli che sono i parametri analizzati ed i risultati dei singoli studi, per argomento

Studio	Parametri Analizzati	Metodo di analisi	Orientamento Migliore
[70]	Orientamento nel piano X-Y,	Full Factorial,	XZY
	Orientamento Z.	ANOVA	
[73]	Orientamenti XY, YZ, XZ.	Sperimentale	XZY
[74]	Orientamento Longitudinale,	Sperimentale	XZY
	Laterale, Perpendicolare		
[75]	Orientamento (angolo di	Full Factorial	XYZ
	inclinazione) rispetto al piano X Y		
[76]	Orientamento nel piano XY	O-F-A-T	XYZ, YXZ (0° e 90°)
	$(X=0^{\circ}, Y=90^{\circ})$		
[79]	Orientamento nel piano XY,	Sperimentale	YXZ
	XY, (flat o on-the-edge)		
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		

Tabella XXVI. Influenza dell'orientamento sulle caratteristiche meccaniche statiche.

Tabella XXVII. Influenza della spaziatura tra le parti sulle caratteristiche meccaniche statiche.

Studio	Parametri Analizzati	Metodo di analisi	Spaziatura migliore
[70]	Spaziatura tra i provini	Full Factorial,	Provini ravvicinati
	(vicini e lontani)	ANOVA	
[76]	Spaziatura lungo l'asse X e lungo l'asse Y	O-F-A-T	Spaziatura lungo Y ridotta

Studio	Parametri Analizzati	Metodo di analisi	Finitura Migliore
[75]	Finitura Lucida e Opaca	Full Factorial	Lucida
[76]	Finitura Lucida e Opaca	O-F-A-T	Indifferente
[79]	Finitura Lucida e Opaca	Sperimentale	Lucida
[80]	Finitura Lucida e Opaca	Sperimentale	Lucida

Tabella XXVIII. Influenza della finitura superficiale sulle caratteristiche meccaniche statiche

Tabella XXIX. Influenza dello spessore del layer sulle caratteristiche meccaniche statiche

Studio	Parametri Analizzati	Metodo di analisi	Spessore layer migliore
[80]	Modalità di stampa "alta velocità"	sperimentale	HS (30 µm)
	HS e "alta qualità" HQ		

Dagli studi analizzati, emerge chiaramente come orientare il provino nel piano XY permetta di ottenere migliori risulta. Orientare il campione di trazione con la dimensione lungo l'asse Z, infatti, tende a causare un tipo di rottura fragile. Ciò è dovuto alla strategia intrinseca di deposizione del materiale layer-by-layer. Nel caso Polyjet, gli strati di materiale vengono depositati e polimerizzati uno per volta. Questo tipo di processo di polimerizzato, mentre legami più deboli all'interno del singolo strato polimerizzato, mentre legami più deboli all'interfaccia tra i vari strati. È proprio in queste in zone che si osserva una rottura di tipo fragile. Inoltre, risulta interessante come l'orientamento XZY offra i migliori risultati. Questo effetto, in prima ipotesi, è stato correlato ad una maggiore esposizione degli strati di materiale ai raggi UV, che si traduce in una maggior polimerizzazione e quindi maggiore rigidezza. I risultati riportati in tab. XXVIII sono in qualche modo correlati con questa linea di principio. La finitura lucida mostra, infatti, risultati migliori nella quasi totalità degli studi revisionati. Questo perché con una finitura opaca il materiale di supporto ricoprirebbe l'intero

provino, inibendo in un certo senso l'esposizione ai raggi UV nel provino e portando ad una polimerizzazione più attenuata. Anche la spaziatura tra i provini sembra essere associata a questo effetto. Come riportato in tab. XXVII, le caratteristiche meccaniche migliori sono ottenute con una spaziatura ridotta tra i componenti nel piano di costruzione. Posizionare i provini in modo ravvicinato, permette l'esposizione di questi ultimi alla luce UV più frequentemente rispetto ad un posizionamento degli stessi più distanziato. Anche in questo caso un maggiore irraggiamento UV migliora le proprietà meccaniche.

3.2. Proprietà Meccaniche Dinamiche

L'analisi delle proprietà di resistenza a fatica è di fondamentale importanza se si vuole estendere l'uso della tecnologia alla produzione di manufatti finali, non limitandosi quindi alla sola prototipazione rapida. La rottura a causa di carichi dinamici dalla propagazione di cricche, generata dalla presenza di vuoti o altri difetti all'interno del materiale. Risalire ai fattori che causano tali difetti all'interno delle parti prodotte non è semplice. Questi, infatti, sono molteplici e possono essere ricondotti alle diverse caratteristiche intrinseche della tecnologia (come la strategia di deposizione layer-by-layer), del processo (come l'orientamento della parte all'interno del vassoio di costruzione, il materiale scelto, il tipo di finitura superficiale) oppure ancora alla geometria della parte (presenza di variazioni di sezioni importanti). Cercare delle linee guida di progettazione può quindi essere utile per riuscire a produrre parti le cui caratteristiche non siano affidabili solo da un punto di vista estetico, ma anche funzionale.

Moore e Williams [81] si sono occupati della caratterizzazione delle proprietà a fatica del materiale elastico TangoBlack Plus, utilizzando la normativa ASTM D4482-11 per testare la resistenza a fatica di materiali elastici. La macchina utilizzata nella prova era una Objet Connex 350 con spessore di layer deposto di 32 µm e finitura opaca, orientando i provini di trazione modificati mostrati in fig. 3.18, in linea con il movimento della testina di deposizione del materiale, in modo che potessero riceve tutti la stessa quantità di luce UV con un processo di polimerizzazione uniforme. La macchina utilizzata per il test era una MTS Tytron 250 con cella di carico di 250N e frequenza di prova di 1,7 Hz. La prova era composta da più fasi, che prevedevano l'estensione del provino fino alla deformazione oggetto di studio, il mantenimento di tale deformazione e il ritorno a deformazione nulla.



Figura 3.18 Provino per test di fatica con materiale elastomerico. Nota: misure in mm.

Poiché la maggior parte delle applicazioni pratiche del TangoBlackPlus coinvolgono anche altri materiali che si interfacciano con esso, anche le caratteristiche di fatica dell'interfaccia multi-materiale erano interessanti. È stato ipotizzato dagli autori che l'interfaccia multi-materiale avrebbe portato a cedimento sotto carico di fatica prima che il materiale principale si rompesse. Se questo si fosse rivelato vero, le caratteristiche di fatica dell'interfaccia sarebbero più preziose per il progettista delle caratteristiche di fatica del materiale TangoBlack Plus stesso. Dal confronto del cedimento tra i provini costituiti solo da TangoBlack Plus ed i provini realizzati con l'interfaccia piana e materiale secondario VeroWhite Plus, è emerso che questi ultimi erano più resistenti. Ciò ha portato gli autori a realizzare un nuovo provino a doppia interfaccia (fig. 3.19), per caratterizzare il materiale TangoBlack Plus, ipotizzando che questo costituisse il punto debole del design. Tuttavia, i risultati delle prove non hanno portato a risultati statisticamente significativi a favore di questa ipotesi. Nel caso di doppia interfaccia angolata di 45° (fig. 3.20), invece, sperimentalmente si è osservato che quasi tutti i campioni cedevano in corrispondenza dell'interfaccia. Ciò indica che l'interfaccia angolata potrebbe essere effettivamente il punto debole del provino.



Figura 3.19 Provino di trazione a doppia interfaccia utilizzato in [81]. Nota: misure in mm.



Figura 3.20. Interfaccia multi-materiale inclinata di 45°. Tratta da [81].

A seguito di diverse prove con allungamenti che andavano dal 20% al 60% è stato costruito un grafico a dispersione di dati, mostrato in fig. 3.21A, dove si osserva che i campioni che hanno ceduto in corrispondenza del materiale sembrano avere vite a fatica che sono raggruppate abbastanza strettamente nell'intorno della zona centrale. I provini che cedevano in corrispondenza dell'interfaccia multimateriale, invece, mostrano un comportamento decisamente più variabile, mostrando a volte cedimento prematuro mentre altre volte un'ottima resistenza. Dal grafico a dispersione è stata costruita la curva di Wohler (in fig. 3.21B), con un intervallo di confidenza del 95% (indicato con le linee tratteggiate)



Figura 3.21. A) grafico a dispersione di dati B) Curva di Wohler. Tratti da [81].

In conclusione, dalla fig. 3.21B, si osserva come, per bassi allungamenti percentuali (20%), la vita a fatica del componente arrivi a 10^6 cicli di carico. Inoltre, la presenza dell'interfaccia multimateriale piana non mostra una evidente correlazione con la rottura dei campioni. Tuttavia, lo stesso non vale per interfacce sottoposte a sforzi di taglio (interfacce inclinate a 45°), dove il cedimento del componente si manifestava molto più frequentemente.

Gli stessi ricercatori, hanno esteso la ricerca in [82], approfondendo l'analisi della relazione tra deformazione, vita a fatica e posizione del punto di rottura, oltre che ad analizzare l'influenza della finitura superficiale selezionata per la produzione. Utilizzando lo stesso provino mostrato in fig. 3.19 ed analizzando i risultati della prova di carico hanno sviluppando un diagramma di Wohler simile a quello in fig.3.21B. Anche in questo caso, gli autori hanno osservato delle irregolarità negli andamenti delle curve di confidenza, dovute allo schema non prevedibile di cedimento delle interfacce dei provini. Vista la grande variabilità dovuta alla presenza dell'interfaccia multi-materiale, i ricercatori hanno tracciato la curva di Wohler utilizzando i dati dei soli campioni che presentavano rottura al centro del provino, cioè in corrispondenza del materiale TangoBlack Plus e non dell'interfaccia. Come si osserva dal grafico in fig.3.22, l'intervallo di confidenza è molto più regolare e presenta una variabilità inferiore. Ciò confermava che tale variabilità derivava dai guasti all'interfaccia piuttosto che dalla resistenza del materiale TangoBlack Plus.



Figura 3.22 Curva di Wohler per i soli dati di cedimento in corrispondenza del materiale TangoBlackPlus. Tratta da [82].

Sono stati stampati 12 manufatti per entrambi i tipi di finitura superficiale in modo da investigare l'influenza di quest'ultima sulla resistenza a fatica del componente. Tutti i campioni sono stati testati con una deformazione fissata al 40% fino a cedimento. Sebbene i risultati ottenuti non siano statisticamente significativi, nei campioni prodotti con finitura lucida, è stato possibile osservare una maggiore resistenza a fatica (37%) rispetto ai campioni con prodotti con

finitura opaca. Tuttavia, è importante ricordare che questi risultati non possono essere generalizzati in assoluto, poiché l'esposizione ai raggi UV del manufatto (e quindi l'effetto del materiale di supporto) cambia a seconda della geometria e della posizione all'interno del vassoio di costruzione che questi possiede. Inoltre, è stata evidenziata una possibile causa di cedimento nei cambi di sezione. Ciò è dovuto all'approssimazione bitmap, tipica di questo tipo di tecnologia, che semplifica le geometrie curve. Ciò porta ad una concertazione locale delle tensioni che riduce la durata della vita a fatica del componente.



Figura 3.23 Approssimazione bitmap eseguita dalla stampante nei cambi di sezione. Tratta da [82].

Kaweesa et al. [83] hanno analizzato delle possibili configurazioni di distribuzione del materiale nelle zone di interfaccia di un provino di trazione, osservando l'effetto che queste configurazioni hanno sulla vita a fatica del componente. Nella ricerca sono state analizzate differenti lunghezze della zona di transizione tra i 2 materiali e diversi tipi di transizione tra i materiali (continua e graduale). I provini, mostrati in fig. 3.24, sono stati prodotti con orientamento XY, per mezzo di una macchina Objet 350 Connex 3 con finitura superficiale opaca ed utilizzando due diversi materiali, il VeroCyan ed il TangoBlack Plus.



Figura 3.24 Provini di trazione con interfaccia multi-materiale con transizione graduale (sopra) e continua (sotto). Tratta da [83]

Per il test di resistenza fatica è stata utilizzata una macchina MTS 880, impostando una deformazione del 40% con una frequenza di carico di 1.7 Hz. È stata inoltre condotta un'analisi ANOVA per determinare l'influenza del tipo di tipo di gradiente scelto e della lunghezza di transizione del materiale. Dall'analisi delle prove è emerso che la presenza di una transizione risultava essere sempre vantaggiosa, ancor più se questa era di tipo continuo. L'impatto della lunghezza del gradiente non influiva molto sui risultati, sebbene lunghezze di transizione del gradiente di materiale più corte portassero a migliori prestazioni a fatica per le parti multi-materiale. Le informazioni contenute all'interno dello studio sono importanti e possono essere ampliate permettendo, ad esempio, future ricerche mirate ad ottimizzare la durata a fatica di componenti multi-materiale e prevedere in modo specifico il punto di rottura.

Gli autori Saravana et. al [84], hanno investigato il comportamento a fatica di un provino di trazione ASTM D7791-12 (fig. 3.25) al variare dell'orientamento nel piano XY.



Figura 3.25 Provino di trazione per il test di fatica utilizzato in [84].

I test sono stati costruiti per mezzo di una stampante Stratasys EDEN 350V, con materiale di costruzione VeroClear, utilizzando la finitura opaca, lo spessore di layer deposto di 16 μ m ed orientando la parte secondo l'asse X (orientamento XYZ) e secondo l'asse Y (orientamento YXZ). Il test è stato condotto con una macchina UTS servoidraulica, con una frequenza di carico di 20 Hz e cicli di carico a tensione controllata. I risultati hanno mostrato il raggiungimento del limite di fatica (10⁶ cicli) a 8 Mpa per l'orientamento XYZ ed a 9 MPa per l'orientamento YXZ. Tuttavia, il numero di campioni testati era veramente basso.

In [85], gli autori hanno analizzato due possibili soluzioni costruttive per attuatori a soffietto prodotti con tecnologia Polyjet. I risultati non servono solo lo sviluppo di cerniere robotiche, ma contribuiscono anche alla conoscenza generale sull'uso degli elastomeri Polyjet sotto carichi ripetuti. Le parti sono state costruite utilizzando 2 diversi materiali, TangoBlack Plus e Agilus30, e quest'ultimo si è rivelato essere il più resistente a fatica.

La ricerca [86] si è invece concentrata sull'analisi della diminuzione della rigidità del componente durante dei cicli di carico a fatica. Allo scopo, di provini di trazione modificati con una sezione trasversale quadrata (13 x 13 mm) sono stati prodotti con una stampante Stratasys J750, con orientamento XYZ ed usando la combinazione di 2 materiali, VeroPureWhite e TangoBlack Plus, per formarne un terzo (RGD8530) che simulasse le proprietà del polipropilene.

Prova di fatica condotta secondo la normativa ASTM D779, con un rapporto di sollecitazione R= 0.1 e frequenza di 1 Hz. Il test è stato condotto con valori di tensione dal 50% all'80% del valore di UTS (precedentemente calcolata tramite test di trazione). È stata inoltre sviluppato una funzione di regressione lineare per la stima della vita a fatica ed è stato osservato che esisteva una buona correlazione tra il ciclo di vita sperimentale e il comportamento del ciclo di vita previsto con un coefficiente di correlazione R = 0.9971. Il modello empirico sviluppato dalla funzione di regressione è un polinomio di grado 4° che può essere utilizzato per stimare la riduzione di rigidità nel materiale a qualsiasi percentuale di livello di stress da fatica, senza quindi la necessità di test di fatica lunghi ed approfonditi.

I risultati principali delle ricerche sono stati raccolti all'interno della tabella XXV seguente. Visto il numero ridotto di ricerche presenti in merito all'argomento, all'interno della stessa tabella sono state anche raccolte le configurazioni migliori per incrementare la vita a fatica dei componenti, sulla base dei risultati evidenziati dagli autori.

Tabella XXX. Schematizzazione studi relativi la resistenza a fatica di parti prodotte con processo Polyjet

Rif.	Forma	Materiale	Macchina	Risultati Ottenuti	Configurazione Migliore
	Provino				
[81]	Provino di	VeroWhite Plus	Objet	Bassi allungamenti percentuali,	Evitare interfacce
	trazione	TangoBlack	Connex350	permettono di ottenere resistenza a	multimateriale inclinate a
	modificato	Plus		fatica del componente fino a 10 ⁶ cicli di	45°. Sono invece
	con bordi			carico. Inoltre, l'inclinazione	preferibili quelle piane.
	arrotondati			dell'interfaccia multimateriale ha	
				effetto sulla resistenza della stessa	
				interfaccia.	
[82]	Provino di	VeroWhite Plus	Objet	La presenza dell'interfaccia	Evitare di introdurre nel
	trazione	TangoBlack	Connex350	multimateriale causa variabilità nel	componente elevati cambi
	modificato	Plus		comportamento di resistenza a fatica	di sezione. La finitura
	con bordi			del componente. Inoltre, la finitura	Lucida porta a risultati
	arrotondati			sembra avere effetti.	migliori
					e
[83]	Provino di	VeroCyan	Objet 350	In tipo di transizione tra i materiali che	Zona di transizione
	trazione	TangoBlack	Connex 3	costituiscono il pezzo all'interfaccia	all'interfaccia multi-
	modificato	Plus		multi-materiale ha effetto sulla	materiale di tipo
	con bordi			resistenza a fatica del componente.	CONTINUO
	arrotondati				
[84]	Provino di	VeroClear	Stratasys EDEN	L'orientamento del componente	Orientamento XYZ
[0.]	trazione		350V	all'interno del piano di costruzione	
	trazione		2201	della macchina influisce sulla sua	
				resistenza a fatica	
[85]	Attuatore a	TangoBlack	\searrow	Il design ottimizzato e l'uso di materiali	Il materiale Agilus30
	soffietto	Plus		di nuova generazione migliorano la	offriva prestazioni
		Agilus30		resistenza a fatica.	nettamente migliori
[86]	Provino di	RGD8530	Stratasys J750	Sviluppo di un modello in grado di	\backslash
	trazione a	(combinazione		prevedere la riduzione delle proprietà	\mathbf{X}
	sezione	di VeroWhite		meccaniche a determinati livello di	\sim
	quadrata	Plus e		tensione	\sim
		TangoBlack			\sim
		- Plus)			
		·			

Le ricerche presenti in merito alla caratterizzazione delle proprietà meccaniche a seguito di carichi dinamici, per il processo Polyjet non sono numerose come per altre tecnologie di AM. Gli studi rilevati si concentravano principalmente sulla caratterizzazione di provini composti da interfacce multi-materiale, utilizzando principalmente campioni composti da resine con caratteristiche molto diverse tra loro (rigide come il VeroWhite Plus ed elastiche come il TangoBlack Plus).

Tuttavia, l'analisi è stata utile per scovare tali lacune nella letteratura. Attualmente non vi è una buona caratterizzazione del comportamento a fatica considerando, ad esempio, l'influenza della variazione di più variabili di controllo contemporaneamente. Un altro aspetto non approfondito in modo accurato è sicuramente l'orientamento all'interno del vassoio di costruzione, come anche l'influenza dello spessore del layer deposto. Tali argomenti, potrebbero essere investigati meglio in future ricerche.

Per quanto riguarda ciò che è emerso dagli studi analizzati, la scelta della finitura lucida mostra delle prestazioni di resistenza a fatica migliori. Ciò potrebbe essere correlato alla asperità (maggiore rugosità) che il materiale di supporto lascia sulla superficie del componente. Un effetto simile, d'altronde, è stato osservato nei repentini cambi di sezione, assolutamente da evitare se si vuole incrementare la vita a fatica del componente. Nel caso di processo Polyjet, infatti, l'approssimazione bitmap impiegata dal software della macchina, fa in modo che la testina di deposizione deponga il materiale generando un effetto a scalino. Ognuno di quegli scalini, esattamente come accade nei processi di produzione tradizionali, rappresenta un intaglio, che si traduce in una zona dove le tensioni si concentrano e l'innesco della cricca è più probabile. Per quanto riguarda l'interfaccia tra due diversi materiali, secondo quanto analizzato nelle ricerche, questa deve essere piana e presentare un gradiente di transizione tra i materiali quanto più continuo possibile. Per quanto invece riguarda la natura dei materiali, come è intuitivo aspettarsi, l'aumento delle proprietà elastiche aumenta la durata del componente sottoposto a carichi ciclici.

4. CONCLUSIONI

Il processo Polyjet è un processo di AM basato sul Material Jetting in cui il materiale di costruzione è costituito da resine fotosensibili che vengono polimerizzate per mezzo delle lampade a luce UV presenti sulla testina di deposizione. La precisione di deposizione dello strato, fino a 14 μ m, e la possibilità di poter usare contemporaneamente materiali con diverse proprietà estetiche e tecniche, creando i cosiddetti Digital Materials, rendono questa tecnologia unica e adattabile ai contesti più disparati, dalla ricerca media ai beni di consumo.

Come è stato analizzato nello studio, le caratteristiche di qualità estetica e meccanica non sono costanti, ma variano in funzione di diversi fattori. Alcuni di questi, come la strategia di deposizione/polimerizzazione e i parametri di processo di manipolazione della resina, non sono in alcun modo modificabili. Altri invece, come l'orientamento della parte all'interno del vassoio di costruzione oppure il tipo di finitura superficiale, possono essere modificati dal progettista, al fine di ottenere il miglior risultato possibile.

In questo studio, sulla base dell'analisi degli studi già condotti relativi la tecnologia, è stato possibile definire delle linee guida di progettazione per quanto riguarda l'aspetto superficiale, l'accuratezza dimensionale e le caratteristiche meccaniche di tipo statico. Inoltre, grazie all'analisi effettuata in questo studio, è stato possibile identificare delle carenze in letteratura, che potrebbero essere oggetto di indagine da parte dei ricercatori in futuri studi. Tra questi sicuramente ricade l'analisi dell'accuratezza geometrica e la caratterizzazione della vita a fatica delle parti prodotte con tecnologia Polyjet. Le configurazioni migliori per garantire le migliori prestazioni in termini di rugosità superficiale, caratteristiche meccaniche ed accuratezza geometrica e dimensionale, identificate nel presente studio, sono state raggruppate nello schema in fig. 4.1.



Figura 4.1 Linee guida di progettazione identificate

Notare che nel caso di caratteristiche meccaniche dinamiche, le best practices sono evidenziate in arancione, in ragion del fatto che non sono stati identificati in letteratura un numero consistente di studi riguardo l'argomento.

Per quanto riguarda i fattori che potrebbero essere possibile fonte di errore nella parte finale, questi sono correlati principalmente al materiale di supporto ed all'orientamento della parte nel build tray. Questi sono stati schematizzati per mezzo di un diagramma di Ishikawa (causa effetto), riportato in fig. 4.2.



Figura 4.2. Diagramma di Ishikawa sulle fonti errori nel componente finale.

Le osservazioni ed i risultati ottenuti nel presente studio potranno essere impiegati in future ricerche, per una migliore e più completa caratterizzazione del processo Polyjet. Da una analisi della letteratura è emerso che non sono presenti pubblicazioni che utilizzano la normativa ISO/ASTM 52902:2019 per la valutazione della capacità geometrica della tecnologia Polyjet. Essendo questa analisi una delle principali carenze della attuale letteratura, gli autori potrebbero proseguire le indagini di caratterizzazione del processo partendo proprio da tale punto schematizzati.

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 Descrizione complessiva del processo di AM [2]1
Figura 1.2 Schematizzazione dei principali processi AM basati sulla base dello
stato fisico del materiale principale di costruzione3
Figura 1.3 Schematizzazione del funzionamento di una macchina Polyjet5
Figura 1.4 Modello di organo realizzato con tecnologia Polyjet usando diversi
materiali [16]6
Figura 1.5 Vantaggi e svantaggi processo Polyjet
Figura 1.6 Principali elementi di un Fotopolimero9
Figura 1.7 Differenti campi di impiego della tecnologia Polyjet15
Figura 1.8 Cartuccia di una resina per tecnologia Polyjet16
Figura 2.1 Schematizzazione dei fattori influenti sulla qualità superficiale.
(adattamento di [7])18
Figura 2.2 Provino piano utilizzato nella ricerca [37]20
Figura 2.3 Provino avvitato a facce piane [38]20
Figura 2.4 Provini di trazione e orientamenti in macchina nella ricerca [40]21
Figura 2.5 Provino prismatico e vari orientamenti utilizzato nella ricerca [41].
Nota: gli intagli mostrati servono per identificare più facilmente i campioni in fase
di misurazione
Figura 2.6 Confronto tra i risultati sperimentali della ricerca [41] e risultati del
modello matematico proposto in [42]23
Figura 2.7 Provino a lamine inclinate utilizzato in [7]23
Figura 2.8 Aerogramma dei principali materiali utilizzati nell'analisi della
rugosità superficiale
Figura 2.9. Istogramma dei parametri processo investigati negli studi relativi la
rugosità superficiale
Figura 2.10 Modelli per protesi dentarie realizzati con diversi processi di AM [45]

Figura 2.11. Modello Cad con tolleranze geometriche del test benchmark
utilizzato in [46]. Nota: misure in mm31
Figura 2.12 Rendering del modello 3D tratto dal disegno in fig. 2.11. [46]32
Figura 2.13 Provino ad L con particolare cilindrico [47]. Nota: misure in mm33
Figura 2.14 Provino a forma di cilindro cavo utilizzato nella ricerca [48]34
Figura 2.15 Provino a forma di staffa ad U forato utilizzato nella ricerca [49].
Nota: dimensioni in mm
Figura 2.16. Provino angolare a facce perpendicolari [50]37
Figura 2.17. Campione prismatico considerato nella ricerca [52]39
Figura 2.18. Orientamenti e configurazioni di stampa (provino assemblato e
componenti singoli) della ricerca [52]
Figura 2.19 Aerogramma dei principali materiali utilizzati nell'analisi
dell'accuratezza dimensionale e geometrica43
Figura 2.20. Numero di studi condotti rispettivamente per l'accuratezza
dimensionale e geometrica44
Figura 2.21 Istogramma dei parametri processo investigati negli studi relativi
l'accuratezza dimensionale e geometrica44
Figura 2.22 A) Modello 3D a lamine B) Lamine al termine del processo
produttivo [14]47
Figura 2.23. Provino a canale per la valutazione del processo di pulizia [56]48
Figura 2.24. Benchmark test con geometrie in alto rilevo e basso rilevo usato in
[58]
Figura 2.25 Provino a pilastro per valutare la resistenza alle operazioni di pulizia
[58]
Figura 2.26. Test benchmark con varie geometrie, scanalature e fori, usato in [62].
Figura 2.27. Errori nella riproduzione di geometrie forate all'interno del test
benchmark [62]
Figura 2.28 Dimensioni e variazione della geometria esamina nel provino
prismatico triangolare in [64]54
Figura 2.29. Orientamenti A, B, C del campione in [64]55

Figura 2.30. Andamenti delle altezze raggiunte dal campione prismatico
triangolare al variare dell'angolo al vertice [64]56
Figura 2.31. Provino a lamine per la valutazione del minimo angolo autoportante
in [58]
Figura 2.32. Formazione di stalagmiti alla base delle facce inclinate delle lamine.
[58]
Figura 2.33 Benchmark test con pareti sottili a diverse inclinazioni e diverse
altezze utilizzato in [50]. Nota: misure in mm
Figura 2.34 Resolution Ribs test tratto da ISO/ASTM 52902:2019 [65]62
Figura 2.35 Resolution Slots test tratto da ISO/ASTM 52902:2019 [65]62
Figura 3.1. Provino ASTM D638 Tipo 1. Tratto da [70]. Nota: misure in mm64
Figura 3.2 Resistenza a trazione per i diversi orientamenti proposti nello studio.65
Figura 3.3 Dimensioni campione di trazione utilizzato nello studio
Figura 3.4 Notazione orientamenti all'interno del vassoio di costruzione
Figura 3.5 Resistenza a trazione in funzione dei 3 orientamenti considerati in [74].
Figura 3.6 Provino a lamina piana ed inclinata utilizzato nella ricerca [75]68
Figura 3.7 Evoluzione di E(t) al variare dell'angolo di inclinazione del provino
[75]69
Figura 3.8 Orientamento del provino all'interno del piano XY. Nota: dimensione l
pari a 50 mm, dimensione w pari a 12 mm [76]70
Figura 3.9 Andamento di E al variare del tempo [76]71
Figura 3.10. Variazione di E in funzione dell'angolo ϕ di orientamento rispetto
all'asse Y [76]71
Figura 3.11 Orientamento dei provini di trazione all'interno del build tray in [78].
Figura 3.12 Analisi frattografica della sezione del provino con orientamento Flat-
X, tratta da [78]74
Figura 3.13 Analisi frattografica della sezione del provino con orientamento Flat-
X, tratta da [78]74
Figura 3.14. Disposizione ed orientamento dei provini all'interno del build tray,
tratta da [11]75

Figura 3.15 Provino di trazione utilizzato nella ricerca. Nota: dimensioni in mm.
[79]76
Figura 3.16. Istogramma dei principali parametri analizzati negli studi relativi alle
caratteristiche meccaniche
Figura 3.17. Aerogramma dei principali materiali utilizzati nell'analisi delle
caratteristiche meccaniche statiche
Figura 3.18 Provino per test di fatica con materiale elastomerico. Nota: misure in
mm
Figura 3.19 Provino di trazione a doppia interfaccia utilizzato in [81]. Nota:
misure in mm
Figura 3.20. Interfaccia multi-materiale inclinata di 45°. Tratta da [81]87
Figura 3.21. A) grafico a dispersione di dati B) Curva di Wohler. Tratti da [81].
Figura 3.22 Curva di Wohler per i soli dati di cedimento in corrispondenza del
materiale TangoBlackPlus. Tratta da [82]88
Figura 3.23 Approssimazione bitmap eseguita dalla stampante nei cambi di
sezione. Tratta da [82]
Figura 3.24 Provini di trazione con interfaccia multi-materiale con transizione
graduale (sopra) e continua (sotto). Tratta da [83]90
Figura 3.25 Provino di trazione per il test di fatica utilizzato in [84]90
Figura 4.1 Linee guida di progettazione identificate96
Figura 4.2. Diagramma di Ishikawa sulle fonti errori nel componente finale97

INDICE DELLE TABELLE

Tabella I. Caratteristiche sistemi Objet30 Pro e Stratasys J750 (adattamento di
[20])
Tabella II. Caratteristiche meccaniche dei principali materiali di costruzione
Stratasys
Tabella III. Composizione chimica in peso % dei principali componenti di un
fotopolimero appartenente alla famiglia Vero Rigid Opaque12
Tabella IV Composizione chimica del materiale di supporto Fullcure70513
Tabella V. Risultati principali degli studi sulla rugosità25
Tabella VI. Ottimizzazione della rugosità superficiale in funzione dello stile di
costruzione
Tabella VII. Ottimizzazione della rugosità superficiale in funzione del processo di
rimozione del materiale di supporto
Tabella VIII. Ottimizzazione della rugosità superficiale in funzione
dell'orientamento
Tabella IX. Ottimizzazione della rugosità superficiale in funzione del fattore di
scala
Tabella X. Gradi IT calcolati nella ricerca [47]. 34
Tabella XI. Raccolta dei fattori più influenti e delle loro configurazioni migliori
nella ricerca [48]
Tabella XII. Influenza dei singoli fattori sulle dimensioni considerate nella
ricerca [49]
Tabella XIII. Risultati principali ottenuti nelle ricerche relative l'accuratezza
dimensionale e geometrica
Tabella XIV. Ottimizzazione dell'accuratezza dimensionale e geometrica in
funzione dello spessore del layer deposto42
Tabella XV. Ottimizzazione dell'accuratezza dimensionale e geometrica in
funzione dell'orientamento42

Tabella XVI. Ottimizzazione dell'accuratezza dimensionale e geometrica in
funzione della finitura superficiale43
Tabella XVII. Coefficienti correttivi ordinati in base alla dimensione della
caratteristica rispetto al valore di soglia wd'54
Tabella XVIII. Risultati principali ottenuti negli studi riguardanti le Feature of
Size
Tabella XIX. Ottimizzazione del processo di pulizia delle FoS60
Tabella XX. Geometrie limite ottenibili
Tabella XXI. Geometrie di fori e intercapedini limite
Tabella XXII Risultati notevoli ottenuti per gli orientamenti YZ, XY, ZX, ZY,
XZ75
Tabella XXIII – Schematizzazione in forma tabellare delle evidenze sperimentali
dello studio77
Tabella XXIV. Campioni utilizzati per i test delle proprietà meccaniche di
Trazione, Flessione a tre punti e Durezza Shore
Tabella XXV. Risultati principali ottenuti dai ricercati negli studi di riguardo le
caratteristiche meccaniche
Tabella XXVI. Influenza dell'orientamento sulle caratteristiche meccaniche
statiche
Tabella XXVII. Influenza della spaziatura tra le parti sulle caratteristiche
meccaniche statiche
Tabella XXVIII. Influenza della finitura superficiale sulle caratteristiche
meccaniche statiche
Tabella XXIX. Influenza dello spessore del layer sulle caratteristiche meccaniche
statiche
Tabella XXX. Schematizzazione studi relativi la resistenza a fatica di parti
prodotte con processo Polyjet

INDICE EQUAZIONI

Equazione 2.1.	Modello	matematico	polinomiale	di	predizione	delle	dimensioni
della microcara	tteristica.		•••••				53
BIBLIOGRAFIA

- ASTM international, "StandardTerminology for Additive Manufacturing Technologies," pp. 5–7, doi: 10.1520/F2792-12A.2.
- M. Cotteleer, M. Mahto, and J. Holdowsky, "The 3D opportunity primer," *A Deloitte Ser. Addit. Manuf.*, pp. 2–14, 2013, [Online]. Available: http://dupress.com/ collection/3d-opportunity.
- [3] B. S. I. Gibson, D. W. Rosen, *Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. 2010.
- [4] I. Vecchi, L. Iuliano, M. Galati, and F. Calignano, "Progettazione di un telaio motociclistico realizzato mediante tecnologia Additive Manufacturing," 2019.
- [5] F. Giuffrida, "Aspetti metodologici per la qualifica del processo di fusione laser selettiva a letto di polvere per componenti metallici," 2019.
- [6] K. V. Wong and A. Hernandez, "A Review of Additive Manufacturing," *ISRN Mech. Eng.*, vol. 2012, pp. 1–10, 2012, doi: 10.5402/2012/208760.
- [7] R. Udroiu, I. C. Braga, and A. Nedelcu, "Evaluating the quality surface performance of additive manufacturing systems: Methodology and a material jetting case study," *Materials (Basel).*, vol. 12, no. 6, 2019, doi: 10.3390/ma12060995.
- [8] D. Xie, H. Zhang, X. Shu, J. Xiao, and S. Cao, "Multi-materials drop-ondemand inkjet technology based on pneumatic diaphragm actuator," *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 53, no. 6, pp. 1605–1611, 2010, doi: 10.1007/s11431-010-3149-7.
- [9] ISO/ASTM International, "BSI Standards Publication Additive

manufacturing — General principles — Terminology," pp. 1–19, 2017.

- [10] amfg.ai, "A Comprehensive Guide to Material Jetting 3D Printing," 2018. https://amfg.ai/2018/06/29/material-jetting-3d-printing-guide/.
- [11] X. Wei, A. Bhardwaj, C. C. Shih, L. Zeng, B. Tai, and Z. Pei, "Experimental investigation of stratasys J750 polyjet printer: Effects of orientation and layer thickness on mechanical properties," *ASME 2019 14th Int. Manuf. Sci. Eng. Conf. MSEC 2019*, vol. 1, pp. 1–7, 2019, doi: 10.1115/MSEC2019-2717.
- [12] N. A. Meisel, A. M. Elliott, and C. B. Williams, "A procedure for creating actuated joints via embedding shape memory alloys in PolyJet 3D printing," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 26, no. 12, pp. 1498–1512, 2015, doi: 10.1177/1045389X14544144.
- [13] L. Justin Stiltner, A. M. Elliott, and C. B. Williams, "A method for creating actuated joints via fiber embedding in a polyjet 3D printing process," 22nd Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. - An Addit. Manuf. Conf. SFF 2011, no. 540, pp. 583–592, 2011.
- [14] G. D. Kim and Y. T. Oh, "A benchmark study on rapid prototyping processes and machines: Quantitative comparisons of mechanical properties, accuracy, roughness, speed, and material cost," 2008, doi: 10.1243/09544054JEM724.
- [15] B. Vaupotič, M. Brezočnik, and J. Balič, "Use of PolyJet technology in manufacture of new product," *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 18, no. 1, pp. 319–322, 2006.
- [16] Materialise.com, "Applicazioni ideali per la tecnologia PolyJet," 2021. https://www.materialise.com/it/manufacturing/tecnologie-di-stampa-3d/polyjet.
- [17] R. Schmitt, M. Lam, Y. Li, B. S. Linke, and H. Voet, "CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology Cost, sustainability and surface

roughness quality – A comprehensive analysis of products made with personal 3D printers," 2016, doi: 10.1016/j.cirpj.2016.10.001.

- [18] 3Space and Cthornsberry, "PolyJet: Material Jetting," 2019. https://3space.com/blog/polyjet-material-jetting/.
- [19] Stratasys Ltd., "5 REASONS POLYJET IS PERFECT FOR PROTOTYPING." https://www.stratasysdirect.com/applications/rapidprototyping/5-reasons-polyjet-prototyping.
- [20] Stratasys, "PolyJet 3D Printers Systems and Materials Overview," pp. 1– 10, 2018, [Online]. Available: https://www.stratasys.com/-/media/files/printer-spec-sheets/polyjet-3d-printers-systems-materials-specsheet.pdf.
- [21] Aniwaa Pte. Ltd., "3D printers comparison," 2021. https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/stratasys-objet1000-plus/.
- [22] D. Bourell *et al.*, "Materials for additive manufacturing," *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 2, pp. 659–681, 2017, doi: 10.1016/j.cirp.2017.05.009.
- [23] L. Iuliano, Tecniche di Additive Manufacturing per polimeri, Slide. 2020.
- [24] J. Sanders, X. Wei, and Z. Pei, "Experimental investigation of polyjet 3D printing process: Effects of orientation and layer thickness on thermal glass transition temperature," ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo. Proc., vol. 2A-2019, no. February, 2019, doi: 10.1115/IMECE2019-11999.
- [25] AIIC, "LE TECNOLOGIE DI ADDITIVE MANUFACTURING IN SANITÀ Linea Guida," 2021.
- [26] S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, and R. Mülhaupt, "Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing," *Chem. Rev.*, vol. 117, no. 15, pp. 10212–10290, 2017, doi: 10.1021/acs.chemrev.7b00074.
- [27] M. A. Bhat and A. A. Shaikh, "Stress intensity factors for a plate with slant

edge crack built with rapid manufacturing process," *Lect. Notes Mech. Eng.*, vol. 1, no. April, pp. 353–362, 2019, doi: 10.1007/978-981-13-2697-4 39.

- [28] Stratasys Ltd, "J750 Digital Anatomy Printer Datasheet," pp. 1–8, 2019.
- [29] T. Kim, G. B. Kim, H. K. Song, Y. S. Kyung, C. S. Kim, and N. Kim, "Accuracies of 3D printers with hard and soft materials," *Rapid Prototyp*. *J.*, vol. 26, no. 7, pp. 1227–1235, 2020, doi: 10.1108/RPJ-09-2019-0236.
- [30] O. G. Ruiz and Y. Dhaher, "Multi-color and Multi-Material 3D Printing of Knee Joint models," *3D Print. Med.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–16, 2021, doi: 10.1186/s41205-021-00100-0.
- [31] A. Vanderploeg, S. E. Lee, and M. Mamp, "The application of 3D printing technology in the fashion industry," *Int. J. Fash. Des. Technol. Educ.*, vol. 10, no. 2, pp. 170–179, 2017, doi: 10.1080/17543266.2016.1223355.
- [32] H.-S. Kim and I.-A. Kang, "Study on Status of Utilizing 3D Printing in Fashion Field," J. Korea Fash. Costume Des. Assoc., vol. 17, no. 2, pp. 125–143, 2015.
- [33] W. S. Chu *et al.*, "From design for manufacturing (DFM) to manufacturing for design (MFD) via hybrid manufacturing and smart factory: A review and perspective of paradigm shift," *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Green Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 209–222, 2016, doi: 10.1007/s40684-016-0028-0.
- [34] C. Cajal, J. Santolaria, J. Velazquez, S. Aguado, and J. Albajez,
 "Volumetric error compensation technique for 3D printers," *Procedia Eng.*,
 vol. 63, pp. 642–649, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.08.276.
- [35] A. S. Biris, M. K. Mazumder, C. U. Yurteri, R. A. Sims, J. Snodgrass, and S. De, "Gloss and texture control of powder coated films," *Part. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 3, pp. 199–217, 2001, doi: 10.1080/02726350290057804.

- [36] R. Udroiu and L. A. Mihail, "Experimental determination of surface roughness of parts obtained by rapid prototyping," *Proc. 8th WSEAS Int. Conf. Circuits, Syst. Electron. Control Signal Process.*, no. January 2015, pp. 283–286, 2009, [Online]. Available: http://www.wseas.us/e-library/conferences/2009/tenerife/CSECS/CSECS-50.pdf.
- [37] P. E. Reeves and R. C. Cobb, "Reducing the surface deviation of stereolithography using in-process techniques," vol. 3, no. 1, pp. 20–31, 1997.
- [38] K. Krishnan and S. K. Gurunathan, "A STUDY ON SURFACE ROUGHNESS OF RAPID PROTOTYPES FABRICATED USING POLY-JET 3D PRINTING SYSTEM A STUDY ON SURFACE ROUGHNESS OF RAPID PROTOTYPES FABRICATED USING POLY-JET 3D PRINTING SYSTEM," no. December, 2013.
- [39] R. I. Campbell, M. Martorelli, and H. S. Lee, "Surface roughness visualisation for rapid prototyping models," vol. 34, pp. 717–725, 2002.
- [40] P. Morer and L. Matey, "PolyJet technology for product prototyping: Tensile strength and surface roughness properties," vol. 228, no. 12, pp. 1664–1675, 2014, doi: 10.1177/0954405413518515.
- [41] J. D. Kechagias and S. Maropoulos, "An Investigation of Sloped Surface Roughness of Direct Poly-Jet 3D Printing," *Proc. Int. Conf. Ind. Eng.*, no. July 2015, pp. 150–153, 2015, [Online]. Available: http://www.inase.org/library/2015/zakynthos/bypaper/CIMC/CIMC-26.pdf.
- [42] P. E. Reeves and R. C. Cobb, "Surface deviation modelling of LMT processes: a comparative analysis," *Proc. 5th Eur. Conf. Rapid Prototyp. Manuf. Helsinki, Finl.*, pp. 59–76, 1996.
- [43] K. E. Aslani, F. Vakouftsi, J. D. Kechagias, and N. E. Mastorakis, "Surface Roughness Optimization of Poly-Jet 3D Printing Using Grey Taguchi Method," Proc. - 2019 3rd Int. Conf. Control. Artif. Intell. Robot. Optim. ICCAIRO 2019, pp. 213–218, 2019, doi:

10.1109/ICCAIRO47923.2019.00041.

- [44] N. Vidakis, M. Petousis, N. Vaxevanidis, and J. Kechagias, "Surface roughness investigation of poly-jet 3D printing," *Mathematics*, vol. 8, no. 10, pp. 1–14, 2020, doi: 10.3390/math8101758.
- [45] R. E. Rebong, K. T. Stewart, A. Utreja, and A. A. Ghoneima, "Accuracy of three-dimensional dental resin models created by fused deposition modeling, stereolithography, and Polyjet prototype technologies: A comparative study," *Angle Orthod.*, vol. 88, no. 3, pp. 363–369, 2018, doi: 10.2319/071117-460.1.
- [46] R. Mendricky, "Accuracy analysis of additive technique for parts manufacturing," *MM Sci. J.*, vol. 2016, no. NOVEMBER, pp. 1502–1508, 2016, doi: 10.17973/MMSJ.2016_11_2016169.
- [47] K. Kitsakis, Z. Moza, V. Iakovakis, N. Mastorakis, and J. Kechagias, "An investigation of dimensional accuracy of Multi-Jet Modeling parts An investigation of dimensional accuracy of Multi-Jet Modeling parts," *Appl. Math. Comput. Sci. Eng.*, no. OCTOBER, pp. 151–157, 2015.
- [48] N. Beltrán, F. Carriles, B. J. Álvarez, D. Blanco, and J. C. Rico, "Characterization of Factors Influencing Dimensional and Geometric Errors in PolyJet Manufacturing of Cylindrical Features," *Procedia Eng.*, vol. 132, pp. 62–69, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.480.
- [49] J. Kechagias, P. Stavropoulos, A. Koutsomichalis, I. Ntintakis, and N. Vaxevanidis, "Dimensional Accuracy Optimization of Prototypes produced by PolyJet Direct 3D Printing Technology," pp. 61–65, 2014.
- [50] Y. L. Yap, C. Wang, S. L. Sing, V. Dikshit, W. Y. Yeong, and J. Wei, "Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks," *Precis. Eng.*, vol. 50, pp. 275–285, 2017, doi: 10.1016/j.precisioneng.2017.05.015.
- [51] R. Singh, "Process capability study of polyjet printing for plastic

components," *Evol. Ecol.*, vol. 25, no. 4, pp. 1011–1015, 2011, doi: 10.1007/s12206-011-0203-8.

- [52] A. Haghighi, Y. Yang, and L. Li, "DIMENSIONAL PERFORMANCE OF AS-BUILT ASSEMBLIES IN POLYJET ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS," Proc. ASME 2017 12th Int. Manuf. Sci. Eng. Conf., pp. 1–8, 2017.
- [53] K.-E. Aslani, A. Korlos, J. D. Kechagias, and K. Salonitis, "Impact of process parameters on dimensional accuracy of PolyJet 3D printed parts using grey Taguchi method," *MATEC Web Conf.*, vol. 318, p. 01015, 2020, doi: 10.1051/matecconf/202031801015.
- [54] T. Brajlih, I. Drstvensek, M. Kovacic, and J. Balic, "Optimizing scale factors of the PolyJet rapid prototyping procedure by genetic programming," *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 16, no. 1, pp. 101–106, 2006, [Online]. Available: http://www.journalamme.org/papers cams05/167.pdf.
- [55] L. Rebaioli and I. Fassi, "A review on benchmark artifacts for evaluating the geometrical performance of additive manufacturing processes," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 93, no. 5–8, pp. 2571–2598, 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0570-0.
- [56] N. Meisel and C. Williams, "An Investigation of Key Design for Additive Manufacturing Constraints in Multimaterial Three-Dimensional Printing," *J. Mech. Des. Trans. ASME*, vol. 137, no. 11, pp. 1–9, 2015, doi: 10.1115/1.4030991.
- [57] B. Vayre, F. Vignat, and F. Villeneuve, "Identification on some design key parameters for additive manufacturing: Application on Electron Beam Melting," *Procedia CIRP*, vol. 7, pp. 264–269, 2013, doi: 10.1016/j.procir.2013.05.045.
- [58] N. A. Meisel, C. B. Williams, and V. Tech, "DFAM FOR POLYJET 3D PRINTING PolyJet Overview," Proc. 25th Annu. Int. solid Free. Fabr.

Symp., pp. 746–763, 2014.

- [59] M. Mahesh, Y. S. Wong, J. Y. H. Fuh, and H. T. Loh, "Benchmarking for comparative evaluation of RP systems and processes," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 10, no. 2, pp. 123–135, 2004, doi: 10.1108/13552540410526999.
- [60] P. M. J.-P. Kruth, B. Vandenbroucke, J. Van Vaerenbergh, "BENCHMARKING OF DIFFERENT SLS/SLM PROCESSES AS RAPID MANUFACTURING TECHNIQUES," Int. Conf. Polym. Mould. Innov. (PMI), Gent, Belgium, April 20-23, 2005, 2005, doi: 10.3850/2424-8967 V02-N778.
- [61] M. A. D. S.Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurrens, "Proposal for a Standardized Test Artifact for Additive," *Solid Free. Fabr. Symp.*, pp. 902–920, 2012, [Online]. Available: https://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=911953.
- [62] H. Yang *et al.*, "Performance evaluation of ProJet multi-material jetting 3D printer," *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 12, no. 1, pp. 95–103, 2017, doi: 10.1080/17452759.2016.1242915.
- [63] S. Vijayan, P. Parthiban, and M. Hashimoto, "Evaluation of Lateral and Vertical Dimensions of Micromolds Fabricated by a PolyJet TM Printer," pp. 1–13, 2021.
- [64] Y. Ide, S. Nayar, H. Logan, B. Gallagher, and J. Wolfaardt, "The effect of the angle of acuteness of additive manufactured models and the direction of printing on the dimensional fidelity : clinical implications," *Odontology*, vol. 105, no. 1, pp. 108–115, 2017, doi: 10.1007/s10266-016-0239-4.
- [65] ISO, "BS EN ISO / ASTM 52902 : 2019 BSI Standards Publication Additive manufacturing - Test artifacts - Geometric capability assessment of additive manufacturing systems," 2019.
- [66] M. Engineering and T. Education, "Simulation study on rapid solidification of eutectic Al-Cu alloy : a molecular dynamics approach Seshadev Sahoo,"

vol. 7, no. 1, pp. 18–25, 2017.

- [67] A. M. Khorasani and M. R. S. Yazdi, "Analysis of machining parameters effects on surface roughness : a review Mir Saeed Safizadeh," vol. 5, no. 1, pp. 68–84, 2012.
- [68] D. D. Gu *et al.*, "components : materials , processes and mechanisms Laser additive manufacturing of metallic components : materials , processes and mechanisms," vol. 6608, 2013, doi: 10.1179/1743280411Y.0000000014.
- [69] M. F. Ashby, D. Cebon, and L. Salvo, "Selection strategies for materials and processes," vol. 25, no. 03, pp. 51–67, 2004, doi: 10.1016/S0261-3069(03)00159-6.
- [70] M. W. Barclift and C. B. Williams, "Examining variability in the mechanical properties of parts manufactured via polyjet direct 3D printing," 23rd Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. - An Addit. Manuf. Conf. SFF 2012, no. January 2012, pp. 876–890, 2012.
- [71] J. Brady, T. Du, I. Lee, and J. Li, *Polymer Properties and Characterization*. 2017.
- [72] P. F. Jacobs, "Jacobs, Paul F. Stereolithography and Other RP&M Technologies from Rapid Prototyping to Rapid Tooling. Dearborn: SME, 1996. Print.," no. June 1996.
- [73] A. KĘSY and J. KOTLIŃSKI, "Mechanical properties of parts produced by using polymer jetting technology," vol. X, no. 3, 2010, doi: 10.1016/S1644-9665(12)60135-6.
- [74] P. Zelený, J. Šafka, and I. Elkina, "The mechanical characteristics of 3D printed parts according to the build orientation," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 474, pp. 381–386, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.474.381.
- [75] D. Blanco, P. Fernandez, and A. Noriega, "Nonisotropic experimental characterization of the relaxation modulus for PolyJet manufactured parts Nonisotropic experimental characterization of the relaxation modulus for

PolyJet manufactured parts," no. April 2016, 2014, doi: 10.1557/jmr.2014.200.

- [76] P. Gay, D. Blanco, F. Pelayo, A. Noriega, and P. Fernández, "Analysis of Factors Influencing the Mechanical Properties of Flat PolyJet Manufactured Parts," *Procedia Eng.*, vol. 132, pp. 70–77, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.481.
- [77] "One-Factor-at-a-Time versus Designed Experiments Authors (s): Veronica Czitrom Source: The American Statistician, Vol. 53, No. 2 (May, 1999), pp. 126-131 Published by: Taylor & Francis, Ltd. on behalf of the American Statistical Association," vol. 53, no. 2, pp. 126–131, 2016.
- [78] S. C. Das, R. Ranganathan, and N. Murugan, "Effect of build orientation on the strength and cost of PolyJet 3D printed parts," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 24, no. 5, pp. 832–839, 2018, doi: 10.1108/RPJ-08-2016-0137.
- [79] N. K. Maurya, V. Rastogi, and P. Singh, "Experimental and computational analysis of mechanical properties of RGD840 material manufactured through PolyJet process," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 27, no. 1, pp. 207–214, 2020, doi: 10.1108/RPJ-03-2020-0049.
- [80] A. Pugalendhi, R. Ranganathan, and M. Chandrasekaran, "Effect of process parameters on mechanical properties of VeroBlue material and their optimal selection in PolyJet technology," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 108, no. 4, pp. 1049–1059, 2020, doi: 10.1007/s00170-019-04782-z.
- [81] J. P. Moore and C. B. Williams, "Fatigue characterization of 3D printed elastomer material," 23rd Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. - An Addit. Manuf. Conf. SFF 2012, pp. 641–655, 2012.
- [82] J. P. Moore and C. B. Williams, "Fatigue properties of parts printed by PolyJet material jetting," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 21, no. 6, pp. 675–685, 2015, doi: 10.1108/RPJ-03-2014-0031.

- [83] D. V. Kaweesa and N. A. Meisel, "Quantifying fatigue property changes in material jetted parts due to functionally graded material interface design," *Addit. Manuf.*, vol. 21, no. February, pp. 141–149, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.03.011.
- [84] J. A. Suresh, G. Saravana kumar, P. Ramu, and J. Rengaswamy, "Fatigue Life Characterization of Additively Manufactured Acrylic like Poly-Jet Printed Parts," *Adv. Struct. Integr.*, no. January, 2018, doi: 10.1007/978-981-10-7197-3.
- [85] G. Dammer, S. Gablenz, A. Hildebrandt, and Z. Major, "Design and shape optimization of PolyJet bellows actuators," 2018 IEEE Int. Conf. Soft Robot. RoboSoft 2018, pp. 282–287, 2018, doi: 10.1109/ROBOSOFT.2018.8404933.
- [86] R. Pratap, S. Tomar, F. I. Ulu, A. Kelkar, and R. V Mohan, "STIFFNESS DEGRADATION OF DIGITAL POLYPROPYLENE UNDER FATIGUE LOADING – INVESTIGATIONS VIA 3-DIMENSIONAL POLYJET PRINTED COUPONS," pp. 1–9, 2020.