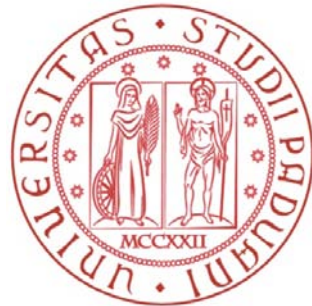


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



**ANALISI E CARATTERIZZAZIONE DI STAMPI AD
INIEZIONE MICRO-STRUTTURATI PRODOTTI
MEDIANTE ADDITIVE MANUFACTURING**

Relatore: Prof. Giovanni Lucchetta

**Correlatori: Dott. Marco Sorgato
Dott. Davide Masato**

**Laureando: Andrea Stevanato
Matr. 1111164**

ANNO ACCADEMICO 2016/2017

SOMMARIO

Il mercato globale richiede processi di produzione sempre più rapidi, e se possibile meno costosi, per restare al passo con una concorrenza sempre più agguerrita. L'ottimizzazione che riguarda il processo di produzione di un prototipo può essere la chiave e la via per rendersi più competitivi. Le tecniche di Additive Manufacturing (AM), nell'ultimo decennio, hanno raggiunto un ruolo molto importante nell'ambito della prototipazione rapida. La necessità di ricreare un prototipo, da utilizzare nello stampaggio ad iniezione, andando a contenere i costi di produzione e il tempo di lavoro, ha favorito lo sviluppo, e numerose innovazioni, nel campo dell'AM in quanto capace di ricreare, ad alta fedeltà e in tempi molto ridotti rispetto alle tecniche tradizionali, un oggetto, di forma solida tridimensionale, partendo dalla progettazione dello stesso utilizzando un software CAD. Questo lavoro ha come obiettivo la caratterizzazione del processo di AM andando a sviluppare degli inserti funzionali, dotati di micro strutture, da utilizzare nel micro-stampaggio ad iniezione. È stata effettuata successivamente una caratterizzazione metrologica degli inserti e dei pezzi stampati così da poterli confrontare sperimentalmente. Sono stati inoltre prodotti componenti dotati di micro strutture semplici di diverse dimensioni per ricercare i limiti del processo di stampaggio 3D. La stampante utilizzata è una *Objet350-Connex3* di *Stratasys* che utilizza la tecnologia *Polyjet*.

RINGRAZIAMENTI

Vorrei ringraziare tutti coloro che in questi anni hanno pazientato e mi hanno appoggiato in questo lungo percorso formativo. La mia famiglia, Marika, Laila e gli amici che, caparbiamente, non hanno mai smesso di incoraggiarmi.

Andrea

INDICE

INTRODUZIONE	1
I REVISIONE DELLA LETTERATURA	5
1 DISPOSITIVI LAB-ON-A-CHIP	7
2 TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI DISPOSITIVI LAB-ON-A-CHIP	13
2.1 Additive Manufacturing	17
2.1.1 Sviluppi futuri	23
2.2 Il Micro-stampaggio ad iniezione	24
2.2.1 Le fasi del processo	28
2.3 La Micro-fresatura	30
II MATERIALI E METODI	33
3 LA REALIZZAZIONE DEGLI INSERTI E DEGLI ELEMENTI DI PROVA	35
3.1 La stampante 3D – OBJET350	35
3.1.1 Le basi del processo	38
3.2 Il centro di lavorazione a 5 assi	41
4 IL MICRO-STAMPAGGIO AD INIEZIONE	51
4.1 La pressa a iniezione	51
4.2 Lo stampo	53
4.3 Il materiale	55
4.4 I parametri di processo	57

5 CARATTERIZZAZIONE METROLOGICA	63
5.1 Il Microscopio elettronico a scansione - SEM	64
5.2 Analisi al SEM	67
5.3 Il Profilometro	70
5.4 Analisi al Profilometro	74
III RISULTATI E DISCUSSIONI	77
6 RISULTATI DELLE CARATTERIZZAZIONI	79
6.1 CARATTERIZZAZIONE AM	80
6.2 GLI INSERTI	84
6.2.1 Gli inserti dopo lo stampaggio ad iniezione	97
6.3 I COMPONENTI STAMPATI	102
6.4 LA FORZA DI ESTRAZIONE	109
IV CONCLUSIONI	113
7 CONCLUSIONI	115
V APPENDICI	119
A MATERIALI	121
BIBLIOGRAFIA	123

ELENCO DELLE FIGURE

- Figura 1.1: Generico Lab-on-a-chip 8
- Figura 1.2: Lab-on-a-chip progettato da Griffith 10
- Figura 1.3: Canali micro-fluidici prodotti da Kitson 11
- Figura 2.1: Esempio di dispositivo LOC per stampaggio ad iniezione in (a) PMMA e in (b) COC 13
- Figura 2.2: Processo di stampaggio a rilievo a caldo - HE 14
- Figura 2.3: Processo di stampaggio a rilievo a caldo - HE 15
- Figura 2.4: Esempio di dispositivo LOC prodotto per stampaggio 3D 16
- Figura 2.5: Stampo in materiale polimerico prodotto da *Stratasys* 20
- Figura 2.6: Modello iniziale 21
- Figura 2.7: Modello finale 21
- Figura 2.8: Rappresentazione macchina a stampaggio ad iniezione 25
- Figura 2.9: Rappresentazione schematica delle unità di plastificazione e iniezione in una pressa per μ IM 28
- Figura 3.1: Stampante 3D Objet350-Connex3 36
- Figura 3.2: Modello CAD inserito con geometria rappresentativa del dispositivo LOC 40
- Figura 3.3: Esempi di elemento di prova 40
- Figura 3.4: Il centro di lavorazione a 5 assi Kugler Micromaster 5X 42
- Figura 3.5: Percorso eseguito dall'utensile Kyocera 1610-0197L059 durante la prima operazione di fresatura 44
- Figura 3.6: Percorso eseguito dall'utensile Kyocera 1610-0197L059 durante la seconda operazione di fresatura 44
- Figura 3.7: Geometria di riferimento dell'utensile Kyocera 1610-0197L059 45
- Figura 3.8: Percorso eseguito dall'utensile Kyocera 1610-0079L024 durante la finitura in testa 46
- Figura 3.9: Percorso eseguito dall'utensile Kyocera 1610-0079L024 durante la finitura delle pareti laterali 46

Figura 3.10:	Lavorazione dell'inserto maggiorato tramite centro di lavorazione a 5 assi 48
Figura 3.11:	Inserto con geometria micro-strutturata maggiorata dedicato alla lavorazione tramite micro-fresatura 49
Figura 4.1:	La pressa ad iniezione Wittmann Battenfeld MicroPower 15 52
Figura 4.2:	Parte fissa e mobile dello stampo 54
Figura 4.3:	Posizionamento dell'inserto micro-strutturato all'interno della piastra porta-inserti 54
Figura 4.4:	Curve PVT al variare della pressione per il Total PS Crystal 1540 da Autodesk Moldflow® database 56
Figura 4.5:	Grafico di viscosità al variare delle temperatura del Total PS Crystal 1540 da Autodesk Moldflow® database 56
Figura 4.6:	Componente stampato per stampaggio ad iniezione 58
Figura 4.7:	Dimensione e rappresentazione del sensore piezoelettrico Kistler 9223° 60
Figura 4.8:	Posizionamento del sensore nello stampo 61
Figura 4.9:	Alloggiamento sensore all'interno dello stampo 61
Figura 4.10:	Schermata di acquisizione del software LabVIEW 62
Figura 5.1:	Il microscopio elettronico a scansione FEI Quanta 400 SEM 64
Figura 5.2:	Inserti ed elementi di prova preparati per essere scansionati al SEM 66
Figura 5.3:	Esempio di scansione al SEM 69
Figura 5.4:	<i>Cold Sputtering Platform</i> 69
Figura 5.5:	Il profilometro Sensofar S Neox 70
Figura 5.6:	Posizionamento punti di controllo sulla geometria micro-strutturata dell'inserto 71
Figura 6.1	Immagini acquisite al SEM per gli elementi di prova 82
Figura 6.2	Immagini acquisite al SEM per gli elementi di prova 83

Figura 6.3:	Immagini acquisite al SEM per l'inserto	86
Figura 6.4:	Grafico altezza-spessore – Inserto nominale – A	88
Figura 6.5:	Elemento circolare – Inserto nominale – A	88
Figura 6.6:	Grafico altezza-spessore – Inserto nominale – B	89
Figura 6.7:	Elemento circolare – Inserto nominale – B	89
Figura 6.8:	Grafico altezza-spessore – Inserto nominale – C	90
Figura 6.9:	Elemento a U – Inserto nominale – C	90
Figura 6.10:	Grafico altezza spessore – Inserto nominale – D	91
Figura 6.11:	Serpentina – Inserto nominale – D	91
Figura 6.12:	Elemento circolare – Inserto micro-fresato – A	93
Figura 6.13:	Elemento circolare – Inserto micro-fresato – B	93
Figura 6.14:	Elemento a U – Inserto micro-fresato – C	94
Figura 6.15:	Serpentina – Inserto micro-fresato – D	94
Figura 6.16:	Grafico altezza-spessore – Inserto micro-fresato A	95
Figura 6.17:	Grafico altezza-spessore – Inserto micro-fresato B	95
Figura 6.18:	Grafico altezza-spessore – Inserto micro-fresato C	95
Figura 6.19:	Grafico altezza-spessore – Inserto micro-fresato D	95
Figura 6.20:	Grafico di confronto per inserto maggiorato zona A	96
Figura 6.21:	Grafico di confronto per inserto maggiorato zona C	96
Figura 6.22:	Elemento circolare – Inserto micro-fresato post stampaggio ad iniezione – A	99
Figura 6.23:	Elemento circolare – Inserto micro-fresato post stampaggio ad iniezione – B	99
Figura 6.24:	Elemento a U – Inserto micro-fresato post stampaggio ad iniezione – C	100

Figura 6.25:	Serpentina – Insetto micro-fresato post stampaggio ad iniezione – D 100
Figura 6.26:	Grafico altezza-spessore – Insetto micro-fresato post stampaggio ad iniezione – A 101
Figura 6.27:	Grafico altezza-spessore – Insetto micro-fresato post stampaggio ad iniezione – B 101
Figura 6.28:	Grafico altezza-spessore – Insetto micro-fresato post stampaggio ad iniezione – C 101
Figura 6.29:	Grafico altezza-spessore – Insetto micro-fresato post stampaggio ad iniezione – D 101
Figura 6.30:	Grafico di confronto tra altezza muretti componenti stampati con inserto nominale 103
Figura 6.31:	Particolare A nei componenti stampati 104
Figura 6.32:	Elemento circolare – Componente stampato da inserto fresato – A 106
Figura 6.33:	Elemento circolare – Componente stampato da inserto fresato – B 106
Figura 6.34:	Elemento a U – Componente stampato da inserto fresato – C 107
Figura 6.35:	Serpentina – Componente stampato da inserto fresato – D 107
Figura 6.36:	Grafico altezza-spessore – Componente stampato da inserto micro-fresato – A 108
Figura 6.37:	Grafico altezza-spessore – Componente stampato da inserto micro-fresato – B 107
Figura 6.38:	Grafico altezza-spessore – Componente stampato da inserto micro-fresato – C 107
Figura 6.39:	Grafico altezza-spessore – Componente stampato da inserto micro-fresato – D 107
Figura 6.40:	Grafico forza di estrazione per l'inserto nominale 111
Figura 6.41:	Grafico forza di estrazione per l'inserto lavorato 111

ELENCO DELLE TABELLE

- Tabella 2.1: Principali caratteristiche del SAE 1045, Zamak e Digital ABS 23
- Tabella 3.1: Principali caratteristiche tecniche della stampante Objet350 36
- Tabella 3.2: Le principali proprietà del Digital ABS 37
- Tabella 3.3: Principali caratteristiche tecniche del centro di lavorazione a 5 assi Kugler Micromaster 5X 41
- Tabella 3.4: Principali parametri geometrici dell'utensile Kyocera 1610-0197L059 45
- Tabella 3.5: Principali parametri geometrici dell'utensile Kyocera 1610-0079L024 45
- Tabella 3.6: Principali parametri di lavorazione utilizzati per ottenere l'inserto 47
- Tabella 4.1: Principali caratteristiche tecniche della pressa ad iniezione Wittmann Battenfeld MicroPower 15 52
- Tabella 4.2: I parametri utilizzati nel processo di stampaggio ad iniezione 58
- Tabella 4.3: Scheda tecnica sensore Kistler 9223° 62
- Tabella 5.1: Principali caratteristiche tecniche del microscopio elettronico a scansione FEI Quanta 400 SEM 66
- Tabella 5.2: Caratteristiche profilometro Sensofar S Neox 74
- Tabella 6.1: Dimensioni principali degli elementi di prova 84
- Tabella 6.2: Valori di altezza e spessore dei particolari 87
- Tabella 6.3: Confronto altezza dell'inserto nominale prima e dopo lo stampaggio ad iniezione 97

- Tabella 6.4: Valore massimi forza di estrazione per l'inserto nominale e per l'inserto lavorato [110](#)
- Tabella A.1: Scheda tecnica del materiale TOTAL Polystyrene Crystal 1540 [121](#)
- Tabella A.2: Temperatura raccomandate per iniettare TOTAL Polystyrene Crystal 1540 [122](#)

INTRODUZIONE

Il mondo odierno è in continua evoluzione. Tecnologia, materiali, macchine, processi devono stare al passo con il cambiamento e il progresso, che giorno per giorno trasformano la nostra realtà. Il mercato ha bisogno di cambiare velocemente. Di conseguenza le aziende hanno l'obbligo di rinnovarsi se vogliono essere competitive. La domanda, nel suo aspetto generale, è aumentata esponenzialmente nel corso degli anni, e con essa la diversificazione dei prodotti. Ci sono produzione di massa come produzione al dettaglio, prodotti che necessitano di una certa qualità e prodotti che hanno bisogno di determinate specifiche tecniche.

Nella produzione di oggetti in materiale polimerico, nello specifico nell'uso di macchine a stampaggio ad iniezione, il costo di stampi e inserti è molto elevato a causa del tempo di produzione degli stessi che può richiedere settimane e migliaia di ore di lavoro oltre al costo dei materiali di cui sono composti. Costo che si riesce ad ammortizzare quando i livelli di produzione sono molto elevati o quando il singolo oggetto ha un valore, nel mercato, relativamente alto. Gli stampi generalmente sono costruiti in acciaio o in particolari leghe, in modo tale da resistere all'usura e alle elevate pressioni messe in gioco durante le varie fasi di stampaggio. Alla luce di queste problematiche, l'industria dei polimeri sta cercando nuove strade per ottimizzare i propri processi di produzione, dedicando particolare attenzione alla fase di prototipazione.

La prototipazione rapida (*Rapid Prototyping - RP*) è una famiglia di tecniche industriali atte alla realizzazione di prototipi tridimensionali partendo da un file *stl* generato da un software CAD/CAE. Il principale vantaggio è quello di realizzare il prototipo in tempi relativamente brevi grazie alla modellazione tra-

mite software e alla velocità di realizzazione delle macchine utilizzate per la sua produzione. I vantaggi sono numerosi, dai tempi di progettazione ottimizzati alla personalizzazione. Differentemente dalla progettazione tradizionale, il prototipo può essere creato e modificato più volte e quindi non è più necessario uno stampo su misura o la ripresa da parte di un artigiano del settore. Se fino a qualche anno fa, utilizzando le tecniche tradizionali, la realizzazione di un prototipo richiedeva anche parecchi giorni, utilizzando la prototipazione rapida il processo di realizzazione può essere eseguito in poche ore, evidenziando il guadagno temporale del processo.

Ad oggi non esiste una tecnologia che possa realizzare qualunque prototipo. Infatti in base ai materiali utilizzati, al tipo di finitura richiesta, al colore, alla resistenza agli urti, all'usura o al costo esiste una macchina apposita. Le macchine 3D sono molto diverse tra loro e ognuna elabora un determinato tipo di materiale che può essere in polvere, liquido o solido.

Questo lavoro si prefigge l'obiettivo di realizzare un inserto per stampaggio ad iniezione, avente sulla sua superficie una geometria micro-strutturata, utilizzando una stampante 3D. L'inserto verrà poi utilizzato in uno stampo metallico montato su una stampante a micro-iniezione per verificarne l'effettivo valore. La geometria micro-strutturata è stata disegnata cercando di replicare la geometria di un dispositivo micro-fluidico in modo da soddisfare un interesse più ampio. Un dispositivo micro-fluidico, denominato *Lab-on-a-chip*, racchiude, in uno spazio ristretto, caratteristiche e funzionalità di un intero laboratorio. Il chip è costituito da micro-canali i quali elaborano una quantità molto piccola di fluido. È utilizzato specialmente in campo biomedicale e chimico, oltre che in quello farmaceutico dove sta ottenendo risultati molto promettenti. I vantaggi nell'uso di questi chip sono molte-

plici: diminuzione dei costi di produzione, una maggiore automazione, il consumo, durante l'uso vero e proprio, ridotto di reagenti e la miniaturizzazione dello spazio di lavoro (nell'ordine di centinaia di μm). In principio, il vetro, è stato il materiale più utilizzato per la creazione di chip micro-fluidici. Materiale molto duttile e ben caratterizzato, ma anche molto costoso, soprattutto per quanto riguarda la sua produzione. Proprio a causa dei troppi costi nell'utilizzo del vetro, l'industria dei *Lab-on-a-chip* ha ricercato, negli anni, nuovi materiali e metodi per la realizzazione di questi componenti. I materiali polimerici si sono affermati in questo settore, grazie soprattutto al basso costo della materia prima e alle nuove tecnologie utilizzate per la produzione. Altri vantaggi nell'uso dei polimeri sono: ottima trasparenza, bassa tossicità, alta permeabilità all'ossigeno e all'anidride carbonica (richiesta soprattutto in campo biomedico).

Possono essere utilizzate numerose tecniche per la produzione di un chip micro-fluidico spaziando dalla micro-fresatura allo stampaggio ad iniezione. La micro-fresatura è una delle tecniche utilizzate per la prototipazione rapida e nel campo dei componenti micro-fluidici riscuote molte interesse grazie soprattutto alla possibilità di ricreare geometrie con spessori che possono arrivare a 0.1 mm. Tuttavia, la maggior parte dei polimeri utilizzati per la produzione di sistemi micro-fluidici, destinati all'uso scientifico, richiedono specifiche velocità di rotazione dell'utensile e strumenti di taglio difficili da selezionare, compromettendo la praticità della tecnologia.

Lo stampaggio ad iniezione, più precisamente il micro-stampaggio ad iniezione, può essere utilizzato per la produzione di un basso o elevato numero di uno stesso prototipo. Per micro-stampaggio si intende la produzione di parti polimeriche aventi dimensione strutturali nell'ordine dei μm . La possibilità di utilizzare un inserto in materiale polimerico da utilizzare in uno

stampo per micro-stampaggio ad iniezione è una soluzione alternativa all'uso di acciaio, alluminio e zinco, materiali tipici utilizzati per la costruzione di stampi.

In questo studio è stato valutato, come sostituto ai tipici materiali utilizzati nella creazione di inserti per micro-stampaggio ad iniezione, il nuovo materiale prodotto da *Stratasys*, denominato *Digital ABS*.

Il *Digital ABS* è una resina appositamente formulata per resistere alle alte pressioni e temperature oltre alla capacità di ricreare strutture con spessori che possono arrivare a 0.1 mm. L'obiettivo è quello di analizzare le prestazioni di questo nuovo materiale, sia durante lo stampaggio ad iniezione che nella sua lavorazione utilizzando la tecnica di micro-fresatura, concentrandosi principalmente sulla stabilità dimensionale e superficiale oltre all'analisi dei campioni ottenuti tramite stampaggio ad iniezione.

Questo lavoro è suddiviso in quattro parti:

- "Revisione della letteratura" illustrerà lo stato attuale in letteratura delle conoscenze sulle superfici micro-strutturate oltre a descrivere quali sono state le tecnologie per la loro realizzazione.
- "Materiali e metodi" va a descrivere nel dettaglio la strumentazione e le macchine utilizzate, oltre che alle attività e ai procedimenti svolti nella fase pratica.
- "Risultati e discussioni" metterà in risalto l'analisi e i risultati conseguiti.
- "Conclusioni" ultima parte che andrà a riassumere l'intero lavoro, considerazione ed eventuali sviluppi futuri.

Parte I

REVISIONE DELLA LETTERATURA

LAB-ON-A-CHIP

Lab-on-a-chip (LOC) è il nome che viene dato a un avanzato dispositivo micro-fluidico il quale ha la capacità di integrare una o più funzioni, svolte generalmente all'interno di un laboratorio di ricerca, in un chip che va da pochi μm a qualche centimetro. Superficialmente presenta una geometria micro-strutturata, generalmente composta da canali micro-fluidici, e sono utilizzati soprattutto in ambito chimico e alimentare per l'analisi in laboratorio. Recentemente vengono utilizzati nella sintesi di nuovi componenti chimici e nella fabbricazione di nano-strutture oltre che nel campo biomedico per la simulazione di cellule, tessuti e interi organi. In questi micro-sistemi, il comportamento di un determinato flusso è molto diverso da quello che siamo abituati ad osservare in scala macroscopica. Si ha quindi la possibilità di approfondire particolari proprietà che in un flusso tradizionale non appaiono o vengono trascurate. La differenza più evidente è che un flusso caotico e turbolento, come può essere lo scorrere dell'acqua, non appare a livello microscopico. Qui il flusso è laminare, più ordinato, avendo un numero di Reynolds nei micro-canali inferiore a 10 (moto laminare $Re < 2000$). Più un sistema riduce le proprie dimensioni, più aumenterà il suo rapporto area/volume determinando una predominanza degli effetti superficiali sugli effetti volumetrici. Questo fenomeno dà la possibilità di poter trascurare effetti puramente inerziali privilegiando forze viscosive e forze di tensione superficiale.

Lo sviluppo di sistemi LOC si basa fortemente sulla presenza e sulla corretta funzionalità dei canali micro-fluidici e di altri componenti che possono svolgere diversi ruoli. Possono semplicemente trasportare il fluido da un punto A a un punto B, oppure, avendo un ruolo più attivo, possono essere strutturati in modo tale da permettere la miscelazione di due fluidi.

I dispositivi LOC sono sempre più sviluppati a livello mondiale, da gruppi di ricerca e imprese commerciali, i quali richiedono che le prestazioni di tali dispositivi diventino sem-

pre più sofisticate. Di conseguenza diventa più difficile progettare un dispositivo LOC che soddisfi l'esigenza di tutti, dall'ambito biomedicale a quello ambientale e industriale.

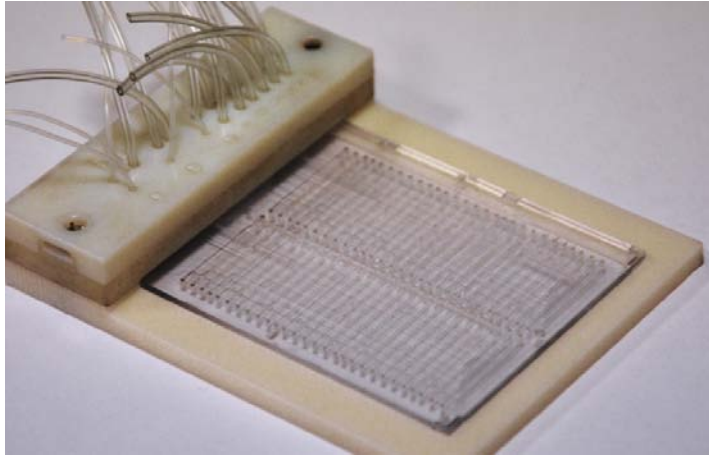


Figura 1.1: Generico Lab-on-a-chip

Come per la maggior parte dei componenti realizzati sul mercato, esistono molteplici modi per realizzarlo, dalla scelta dei materiali ai metodi di produzione e parametri di lavorazione. Mentre può essere possibile ignorare immediatamente alcuni materiali, non ce ne sono di generici "corretti" per la realizzazione di un LOC. Ogni materiale ha i relativi vantaggi e svantaggi e tutti devono essere considerati durante la fase di progettazione. Oltre alle proprietà fisiche di un dispositivo, il processo di selezione dei materiali deve tener conto anche del fattore produzione, in quanto, se destinata su larga scala, ci saranno macchine più o meno adatte al tipo di processo da utilizzare. Per i primi dispositivi LOC è stato utilizzato il vetro, soprattutto grazie alle sue numerose proprietà superficiali e strutturali. Negli anni sono stati utilizzati siliceni e materiali polimerici, più adatti ad una produzione su vasta scala.

I vantaggi nell'utilizzo di materiali polimerici sono:

- Possibilità di produrre grandi volumi in modo rapido, costante, economico ed efficiente utilizzando lo stampaggio ad iniezione.

- Possibilità di ricreare geometrie complesse.
- Vasta gamma di metodi di produzione e di materiali.
- La trasparenza ottica di alcuni polimeri aumenta il numero di analisi e funzionalità che un dispositivo può eseguire.
- Materia prima relativamente poco costosa, soprattutto utilizzando lo stampaggio ad iniezione.

Tra gli svantaggi possiamo annoverare:

- Alcuni polimeri dimostrano una compatibilità limitata con solventi e reagenti acidi.
- Resistenza termica relativamente bassa rispetto a materiali come il vetro.
- Conoscenza delle specifiche dei polimeri utilizzati.

Se fosse necessaria però una modifica allo stampo, utilizzato per lo stampaggio del dispositivo LOC, in uno stadio avanzato di progettazione o comparissero problemi durante l'effettiva produzione, le conseguenti operazioni di modifica comporterebbero una elevata perdita in termini di tempo e denaro. Questo lavoro esamina la possibilità di realizzare un dispositivo LOC, tramite stampaggio ad iniezione, utilizzando uno stampo prodotto per AM. Proprio grazie a questa tecnica di produzione, eventuali errori di progettazioni o modifiche necessarie allo stampo, possono essere elaborati in maniera ottimale rendendo più flessibile tutto il processo di produzione. Griffith [7] esamina la fattibilità di utilizzare inserti in materiale polimerico da utilizzare in stampanti a micro-iniezione. Utilizza un provino avente dimensione di 20x30x1 mm, progettato per l'industria biomedica, con canali che variano dai 100 ai 1000 μm sia in altezza che in profondità.

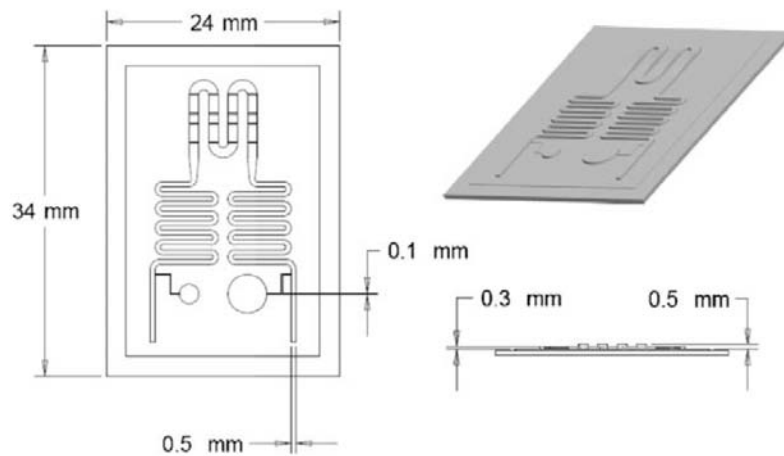


Figura 1.2: Lab-on-a-chip progettato da Griffith

L'inserto è prodotto in PEEK tramite il processo di stampaggio in rilievo a caldo (*Hot Embossing – HE*). Il processo di HE può essere suddiviso in quattro parti: riscaldamento del materiale al di sopra della sua temperatura di transizione vetrosa, ma sotto quella di fusione (materiale rammollito), il materiale viene pressato contro uno stampo aperto riscaldato, raffreddamento del componente stampato fino alla temperatura di estrazione mantenendo costante la forza di chiusura, estrazione del componente aprendo lo stampo.

Cooper [141] utilizza nel suo lavoro il PDMS (polidimetilsilossano) per la produzione di un LOC prodotto tramite *Soft Lithography*. Questo materiale risulta essere ottimo per la fabbricazione di sistemi con micro-canali per l'utilizzo di campioni biologici in soluzione acquosa, soprattutto grazie alla possibilità di ottenere superfici ad alta fedeltà, oltre al fatto di non essere tossico e di possedere un'ottima trasparenza.

Kitson [13] vuole dimostrare la versatilità delle stampanti 3D a basso costo, utilizzando una stampante 3DTouch, per la produzione di componenti milli- e micro-fluidici.

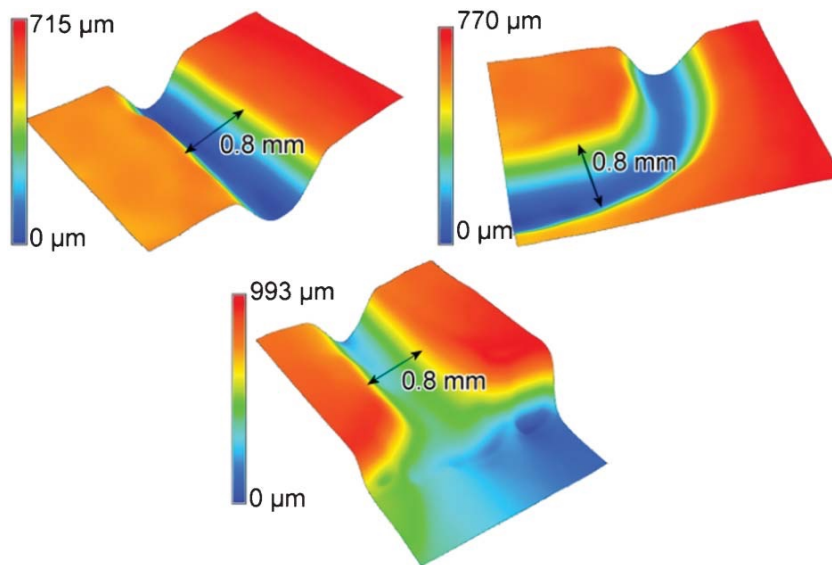


Figura 1.3: Canali micro-fluidici prodotti da Kitson

Nell'arco di una giornata è stato in grado di progettare e realizzare una geometria micro-fluidica in polipropilene (PP) adatta ad essere utilizzata nelle sintesi organiche, inorganiche e di nuovi materiali.

In conclusione l'enorme potenzialità del Lab-on-a-chip ne ha favorito lo sviluppo e il miglioramento negli anni andando ad interessare numerose aree disciplinari e non solo grazie alle sue proprietà fisiche e strutturali ma in quanto l'idea intrinseca di base, cioè di ricreare un sistema in grado di soddisfare le necessità di un ambiente macroscopico in uno spazio di pochi millimetri, rispecchia la filosofia moderna di sostenibilità e di abbattimento dei costi.

TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI DISPOSITIVI LAB-ON-A-CHIP

Dall'introduzione dei dispositivi Lab-on-a-chip (LOC) nei primi anni 90, il vetro è stato il primo materiale utilizzato su larga scala per la loro fabbricazione. Ciò è stato principalmente determinato dal fatto che l'industria ne aveva già caratterizzato i diversi metodi di lavorazione e fabbricazione, oltre che allo studio delle proprietà superficiali, per numerosi prodotti soprattutto nell'industria dei semiconduttori ed elettronica. Diverse proprietà del vetro lo rendono un materiale allettante nella produzione di sistemi micro-fluidici come lo può essere un LOC, tuttavia il costo per la produzione di tali sistemi ha guidato, e lo fa tuttora, le aziende verso la scoperta e l'utilizzo di nuovi materiali. I produttori hanno scorto nel tempo i molti vantaggi che l'uso di materiali polimerici possono offrire, dai costi ridotti a procedure di fabbricazione semplificate, in particolare se confrontate con vetro e silicio [12]. Questo capitolo andrà ad illustrare i più comuni metodi di fabbricazione di un dispositivo LOC. Le considerazioni che saranno esposte si baseranno sull'effettivo potenziale delle tecniche di lavorazione per una eventuale produzione di massa oltre a considerare, come variabili significative, anche tempo e costo effettivo del prodotto finale in quanto elementi fondamentali per l'utilizzo di tali dispositivi su vasta scala.

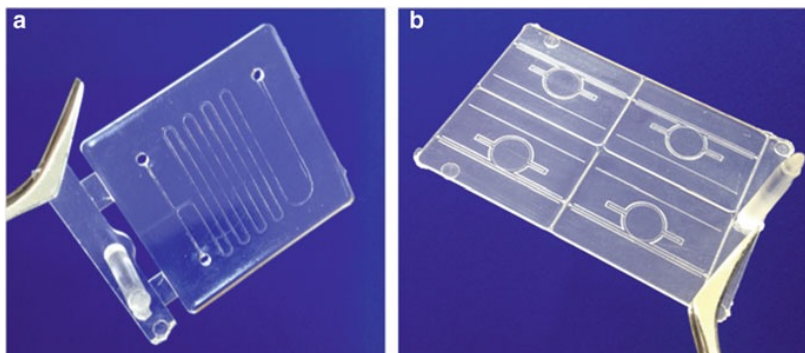


Figura 2.1: Esempio di dispositivo LOC per stampaggio ad iniezione in (a) PMMA e in (b) COC. [15]

Il metodo primario per la produzione di massa di un dispositivo LOC è lo stampaggio ad iniezione che ha il potenziale per la produzione di una grande quantità di dispositivi, con un'ottima rifinitura superficiale, a basso costo e con un buon grado di automazione. Questa tecnica di produzione verrà esaminata successivamente in un paragrafo dedicato.

Sebbene non sia utilizzato per la produzione di oggetti di uso quotidiano o di prodotti di largo consumo, il processo di stampaggio in rilievo a caldo (*Hot Embossing – HE*) possiede molte analogie con lo stampaggio ad iniezione. Infatti per la prima volta questo metodo di produzione utilizza uno stampo invertito che include tutte le caratteristiche strutturali del dispositivo da stampare.

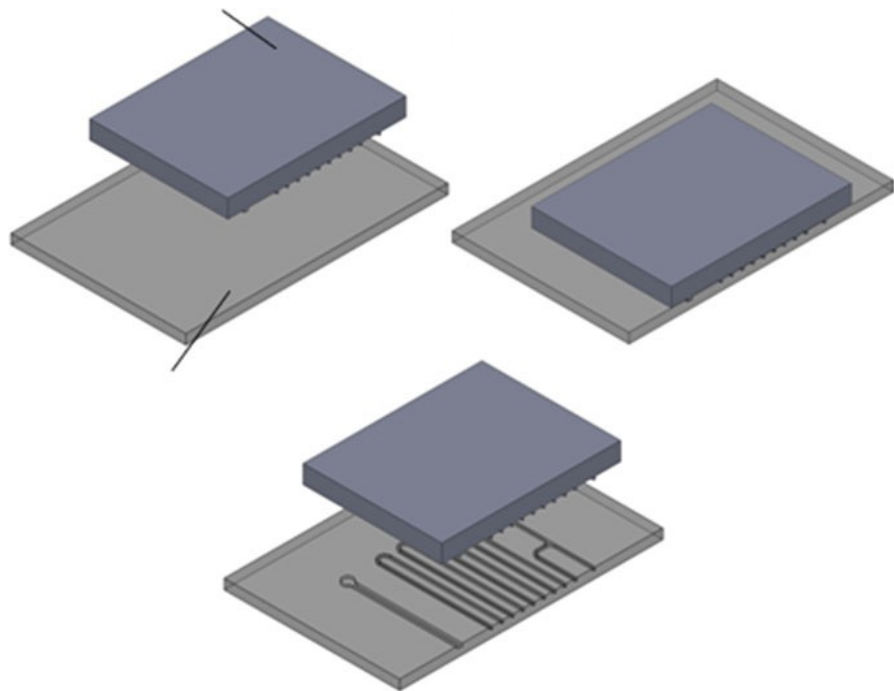


Figura 2.2: Processo di stampaggio a rilievo a caldo – HE. [15]

La figura 2.3 mostra schematicamente il processo di HE per la fabbricazione di un dispositivo LOC. Un pezzo di materiale polimerico industriale viene posizionato in una macchina a HE (Fig.2.3(a)), quindi lo stampo, avente superficialmente le caratteristiche desiderate, viene pressato sul materiale con una pressione prestabilita (Fig.2.3(b)). Grazie al calore dello stampo il materiale polimerico si “ammorbidisce” permettendo alla parte premente di replicare la geometria micro-strutturata sulla sua superficie (Fig.2.3(c)). Tali stampi possono essere fabbricati in materiale metallico, grazie alle sue note proprietà termiche, ma anche in silicio e in polimero. Per aumentare la produzione, in termini di quantità in un determinato intervallo di tempo, è possibile utilizzare un rullo al posto dello stampo premente. In questo modo si va aumentare la produzione a scapito del costo elevato dell’attrezzatura utilizzata. L’HE presenta diverse problematiche in fase di stampaggio che riguardano la riproduzione di determinate caratteristiche geometriche finali, come ad esempio l’impossibilità di stampare dei fori direttamente nel dispositivo, necessitando quindi di trattamenti di post-produzione.

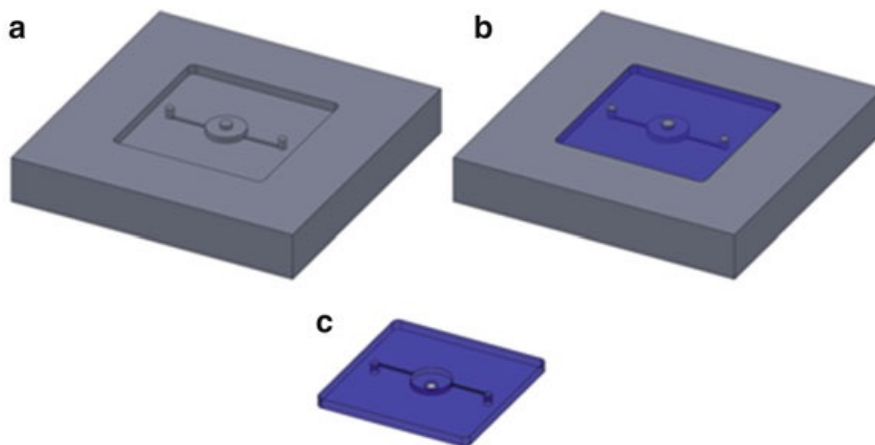


Figura 2.3: Processo di stampaggio per *Soft Lithography*. [15]

Un progresso significativo nello sviluppo di dispositivi LOC è stato dato dall'introduzione di una tecnica di stampaggio che utilizza uno stampo elastomerico, recante sulla sua superficie una geometria micro-strutturata, conosciuta come *Soft Lithography*. Un polimero elastomerico viene introdotto nello stampo e lasciato polimerizzare a temperatura ambiente o ad una temperatura leggermente più elevata per velocizzarne il processo (generalmente 40 – 70 °C per il PDMS). Successivamente il polimero elastomerico viene estratto dallo stampo. In questo processo è possibile utilizzare una grande varietà di materiali polimerici anche se il più utilizzata rimane il PDMS. Questa tecnica di produzione possiede numerosi vantaggi tra cui la possibilità di avviare la produzione sostenendo un costo contenuto, stampi utilizzati con una grande varietà di materiali polimerici in quanto non vengono sottoposti ad elevate temperature e pressioni, è possibile replicare con precisione strutture tridimensionali con un elevato *aspect ratio*. Tra gli svantaggi possiamo ritrovare la fragilità intrinseca dei materiali utilizzati per la produzione dei componenti, il tempo di polimerizzazione elevato che ne preclude l'utilizzo per una produzione su larga scala, la presenza di solventi può provocare il rigonfiamento e deformazioni nei canali da riprodurre.

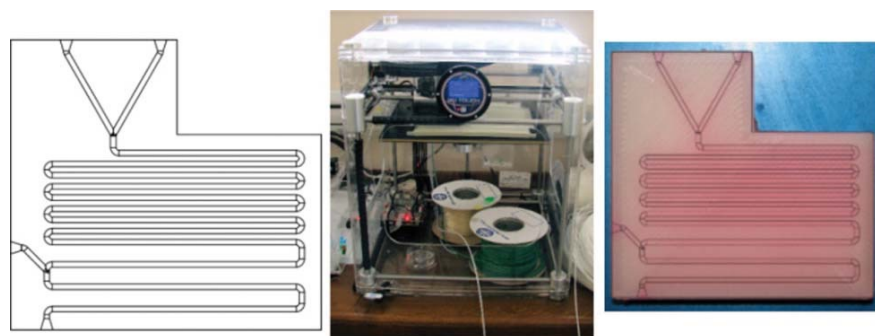


Figura 2.4: Esempio di dispositivo LOC prodotto per stampaggio 3D. [13]

Negli ultimi anni la stampa 3D è diventata rilevante nella produzione di componenti e beni di consumo. L'evoluzione di questa tecnica e i progressi che ne sono derivati hanno spinto le aziende interessate alla produzione di dispositivi LOC a studiarne le effettive capacità tecniche e pratiche. Questa tecnica di produzione sarà evidenziata successivamente in un paragrafo dedicato.

2.1 ADDITIVE MANUFACTURING

L'Additive Manufacturing (AM), conosciuto anche come stampa 3D, è un processo additivo, utilizzato per la produzione di componenti tridimensionali attraverso una tecnica di stratificazione. Differisce da i processi convenzionali quali processi sottrattivi (micro-fresatura), processi di formativi (fusione o forgiatura) e processi di adesione (saldatura e fissaggio). Il principio di funzionamento di tutte le tecniche di AM è il medesimo, e prevede di ricreare un determinato oggetto *layer-by-layer* [4], ovvero depositare o sinterizzare strati di materiale di dimensione dell'ordine di μm . Il passo iniziale è quello di andare a disegnare, tramite software CAD, il modello digitale del componente da realizzare. Questo disegno viene quindi trasformato in un file avente il formato *stl* (*STereo Lithography interface format*) nel quale le superfici del componente vengono discretizzate in triangoli. Le tecnologie utilizzate nel campo di AM hanno tre caratteristiche in comune: risoluzione, porosità e la resistenza del materiale [8]. La quantità di ciascuna di queste caratteristiche è legata fortemente al tipo di metodo di produzione utilizzato. La risoluzione è influenzata direttamente dallo spessore di ogni strato. Più lo strato sarà sottile maggiormente definite saranno, ad

esempio, le zone curve. La percentuale di porosità, all'interno di un componente stampato per AM, può essere causata dalla presenza di lacune all'interno di strati successivi di materiale (presenza di bolle d'aria) o da l'adesione incompleta tra i vari materiali utilizzati nella fabbricazione. La resistenza del materiale è legata a tre fattori principali: dal tipo di materiale utilizzato, dalla tipologia di legami presenti nel componente e dalla porosità. Esistono diverse tecniche di AM, ed è necessario tener conto di un numero considerevole di fattori per determinare quale sia la più adatta alle proprie esigenze:

- *Stereolitografia*, è stata la prima ad affermarsi nel campo della stampa 3D nel 1986. Una piattaforma mobile è sommersa in una vaschetta riempita di resina foto-polimerizzante ad una profondità corrispondente allo spessore di uno strato. Un fascio laser viene proiettato, da un sistema di specchi, sulla resina in base al tipo di modello definito in fase di progetto. La piattaforma viene successivamente abbassata dello spessore dello strato e ripetuto il processo di foto-polimerizzazione.
- *Selective Laser Sintering (SLS)*, un letto di polvere, composto da materiale polimerico, metallo, ceramica o vetro, distribuito sulla superficie di una piattaforma mobile racchiusa in un ambiente controllato, viene investito da un laser ad anidride carbonica che ne innalza la temperatura fino a raggiungere la sinterizzazione, in modo che le particelle di polvere si ammorbidiscano e diventino in grado di fondere l'una con l'altra.
- *Fused Deposition Modelling (FDM)*, tecnologia meno utilizzata perché meno accurata e precisa. C'è una bobina di re-

sina o di un altro materiale polimerico che viene gradatamente srotolata. Il materiale finisce in un ugello di estrusione nel quale viene liquefatto e delicatamente posizionato nella zona interessata del componente. Il tutto è naturalmente regolato da un computer.

- *Tecnologia a getto d'inchiostro e PolyJet*, il funzionamento è praticamente uguale a quello di una stampante a carta tradizionale. Al posto dell'inchiostro c'è una miscela di resina e polimeri che viene depositata sulla superficie di una piattaforma mobile. La testa stampante può essere fornita di sorgente UV per attivare la foto-polimerizzazione del materiale.

Ognuna di queste tecniche di AM ha i suoi punti di forza, vantaggi e limitazioni che includono materiali, volumi di produzione, velocità del processo, qualità del prodotto finale (prestazioni meccaniche, accuratezza dimensionale e finitura superficiale), e lavorazioni di rifinitura in post-produzione. Per quanto riguarda la produzione su vasta scala, come beni e prodotti di consumo, queste tecnologie non risultano adeguate in quanto i tempi di produzione risulterebbero troppo elevati.

Questo lavoro si prefigge il compito di studiare la possibilità di realizzare inserti con superficie micro-strutturata, generalmente utilizzati in un processo di stampaggio a micro-iniezione, utilizzando la stampa 3D. Tipicamente gli stampi/inserti utilizzati nello stampaggio ad iniezione sono costituiti da metalli resistenti e durevoli come acciaio e alluminio. Proprio a causa dei materiali utilizzati e dal tipo di lavorazioni che devono subire prima della messa in opera, risultano molto costosi e richiedono un certo lasso di tempo per essere realizzati. Questi fattori possono essere

determinanti e possono risultare sconvenienti quando è in programma una produzione limitata. L'utilizzo di una tecnica di AM per la produzione di stampi può essere una soluzione interessante sotto l'aspetto economico anche per la realizzazione di prototipi [1-2-3].

Stratasys ha testato le proprie stampanti 3D per la realizzazione di veri e propri stampi (Fig. 2.1), da utilizzare in una macchina ad iniezione, per la produzione di prototipi [5]. Da qui l'interesse crescente da parte della comunità scientifica e del settore industriale.



Figura 2.5: Stampo in materiale polimerico prodotto da *Stratasys*

Rodriguez [6] applica allo studio del problema un approccio diretto andando a progettare più stampi aventi geometria progressiva, ovvero con un modello da realizzare via via più complesso (Fig. 2.2-3). In questo modo cerca di comprendere gli effetti del processo di stampaggio e di regolarsi in base ai risultati ottenuti oltre che ha selezionare i parametri che regolano l'iniezione. Dai

test effettuati ha constatato che il raffreddamento dello stampo non ha avuto un impatto significativo sulla durata dello stesso né sul numero di parti di qualità prodotte. In fine raccomanda di avere, fin da subito, la caratterizzazione dei materiali da utilizzare, in modo da poter prevedere, in modo affidabile, il comportamento del processo.



Figura 2.6: Modello iniziale



Figura 2.7: Modello finale

Rahmati [8] studia la possibilità di realizzare inserti in resina epossidica per lo stampaggio ad iniezione tramite stereolitografia. Tali inserti sono stati poi utilizzati in stampi di acciaio e testati per produrre parti in polipropilene (PP) e acrilonitrile butadiene stirene (ABS) utilizzando una pressa ad iniezione Battenfeld da 50 tonnellate.

La resina epossidica, utilizzata per la creazione degli inserti, ha una temperatura di transizione vetrosa relativamente ampia (T_g 60-90 °C). Se si aumenta la temperatura dello stampo si avrà un abbassamento della resistenza a trazione ma un aumento della

resistenza all'urto. Queste proprietà lavorano a favore della stereolitografia. Rahmati sostiene che esiste una temperatura ottimale alla quale lo stampo non subisce danneggiamenti. Questa temperatura sarà un compromesso tra l'aver un'accettabile resistenza a trazione e un'accettabile resistenza a taglio. Per diminuire drasticamente il tempo di ciclo del processo di iniezione (da 4,3 a 2 minuti) suggerisce di raffreddare lo stampo con aria compressa in modo tale da portare la temperatura dello stampo a 40-50 °C. In conclusione Rahmati si focalizza sull'importante della bassa conducibilità termica dell'inserto prodotto per SL e il breve tempo di iniezione durante l'omonimo processo.

Volpato [9] propone un confronto tra inserti per stampaggio ad iniezione prodotti in tre materiali differenti: acciaio SAE 1045, Zamak 8 (zinco più altri elementi tra cui alluminio, magnesio e rame) e il Digital ABS (combinazione tra RGD515 e RGD535). Lo scopo di questo confronto è stato quello di analizzare la qualità superficiale degli inserti oltre alle sue variazioni dimensionali, utilizzando del polipropilene (PP) per la produzione di un certo numero di campioni (50). Lo stampo in Digital ABS è stato realizzato con una stampante Stratasys Connex 500, ponendo la direzione delle linee di stampaggio parallele alla direzione del fuso durante l'iniezione, come suggerito da Zonder and Sella [10]. Non ha applicato nessuna finitura superficiale all'inserto in Digital ABS. Volpato, in conclusione, non registra nessuna rottura catastrofica dello stampo in Digital ABS, avendo tenuto conto della geometria molto semplice della cavità e del numero di stampe molto limitato. Dopo 50 stampe la cavità ha subito una lieve deformazione permanente e la superficie ha mantenuto, in alcune zone, gran parte della sua struttura originale (rugosità). Il Digital ABS ha quindi presentato una buona stabilità dimensionale e superficiale durante tutto il processo di iniezione.

Tabella 2.1: Principali caratteristiche del SAE 1045, Zamak e Digital ABS

Proprietà	SAE 1045	Zamak 8	Digital ABS
Densità [g/cm ³]	7.85	6.3	N/D
Calore specifico [J/kgK]	800	448	N/D
Conducibilità termica [W/mK]	52.9	114.7	0.17-0.19
Coefficiente di dilatazione termica [K ⁻¹]	12	23.3	N/D
Modulo di elasticità [Gpa]	200	85.5	2.6-3.0
Resistenza a trazione	450	374	55-60

Note: N/D – non disponibile.

2.1.1 SVILUPPI FUTURI

Tecnologicamente, l'AM fornisce un controllo senza precedenti sulla forma, la composizione e la funzione dei prodotti fabbricati, nonché un altro grado di personalizzazione. Acclamata da alcuni come "la terza rivoluzione industriale" [11] i processi di AM hanno il potenziale per rivoluzionare il costo-beneficio della personalizzazione di prodotti complessi, i quali non possono essere realizzati facilmente utilizzando le tecnologie convenzionali. Utilizzando l'AM, i prodotti possono essere fabbricati con dimensioni molto differenti (da i nanometri/micrometri a decine di metri), con un'ampia gamma di materiali (metalli, polimeri, ceramiche, compositi e materiali biologici) e funzionalità. L'AM non sostituirà i metodi tradizionali di fabbricazione nel prossimo futuro, soprattutto per la produzione di massa di componenti

con bassa complessità e un'elevata precisione. Tuttavia può fornire un supporto tecnologico, sia come partner per l'uso combinato di più tecniche di lavorazione (come può essere l'accoppiata con una macchina da micro fresatura) sia attraverso la fabbricazione o la riparazione di stampi utilizzati per lo stampaggio ad iniezione, situazione interessante che si prefigge di esaminare questo lavoro.

In termini di economia e sostenibilità, l'AM offre diversi vantaggi rispetto alle tecniche di produzione tradizionali, tra cui la riduzione dei rifiuti dovuti agli scarti, dei consumi energetici, del tempo di ciclo e del *time-to-market*, aspetti fondamentali per l'ottimizzazione di un ciclo di produzione. Proprio la natura stessa della stampa 3D, andando a formare il componente *layer-by-layer*, garantisce un notevole abbassamento degli scarti di materiale, in quanto si va ad "aggiungere" e non a "togliere".

2.2 IL MICRO-STAMPAGGIO AD INIEZIONE

Il micro-stampaggio ad iniezione è uno dei processi di produzione industriale più importante nella realizzazione di microcomponenti in materiale polimerico. Condivide, con lo stampaggio ad iniezione tradizionale, caratteristiche funzionali e parti principali, anche se è errore comune considerare e utilizzare queste macchine allo stesso modo.

Lo stampaggio ad iniezione, nella sua forma originale, permette la produzione su vasta scala di oggetti in materiale plastico ad un costo relativamente basso, da forme molto semplici a quelle più complesse e dettagliate, garantendo un'ottima qualità superficiale e utilizzando un processo di realizzazione molto semplice

visto l'elevato grado di automazione. Per tutti questi motivi, a partire dagli anni '80 e '90, si è cercato di modificare le macchine a stampaggio tradizionale per poter produrre micro-componenti in modo da ottimizzarne il processo produttivo. L'evoluzione di tali macchine ha portato a vere e proprie stampanti che utilizzassero di base il processo di μ IM. I materiali che vengono processati sono per lo più polimeri termoplastici (bassa viscosità), ma possono essere lavorati anche termoindurenti o elastomeri. Per poter produrre in maniera ottimale, utilizzando un processo ad iniezione, bisogna tener conto delle variabili che regolano il tempo di ciclo, delle caratteristiche della macchina, dal tipo di polimero, dal tipo di stampo utilizzato, in base al tipo di oggetto da realizzare.

Il processo di produzione utilizzato da una macchina a micro-stampaggio ad iniezione è molto simile allo stampaggio ad iniezione tradizionale. Il materiale polimerico viene fornito, sotto forma di granuli o di pellet di dimensione che variano da 2 a 5 mm, ad una tramoggia.

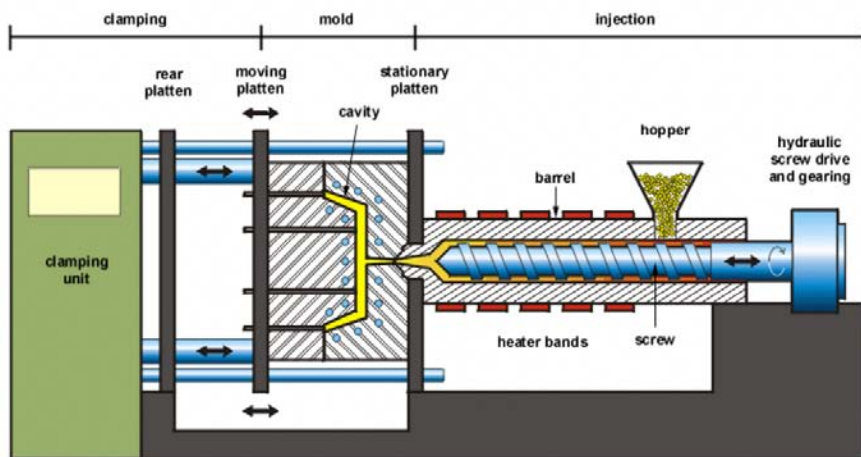


Figura 2.8: Rappresentazione macchina a stampaggio ad iniezione. [16]

La tramoggia è messa in collegamento con un cilindro contenente al suo interno una vite senza fine. Il cilindro è riscaldato tramite una serie di resistenze poste al suo esterno, in grado di regolarne la temperatura. La vite senza fine ha il compito di fondere ed omogeneizzare il materiale polimerico oltre che ha spingerlo all'interno di una camera di raccolta, arretrando e spingendolo, pronto per essere iniettato nello stampo. Diversamente dallo stampaggio tradizionale dove la vite ha il compito di iniettare il fuso all'interno dello stampo, nel μ IM il compito dell'iniezione è affidato ad un pistoncino.

A causa del ritiro naturale del materiale durante il raffreddamento e solidificazione, viene immessa, all'interno dello stampo, una quantità maggiore di fuso in modo da contrastare tale fenomeno mantenendo un livello di pressione adeguato in cavità.

L'estrazione del pezzo avviene per mezzo di piccoli estrattori che agiscono solo dopo che la temperatura del materiale polimerico è scesa al di sotto della temperatura di transizione vetrosa. Tale temperatura varia a seconda del tipo di polimero che stiamo utilizzando. Questa soluzione è l'ideale per non corrompere la geometria del pezzo con deformazioni e imperfezioni superficiali.

Prima di procedere allo stampaggio è necessario tener conto delle numerose variabili che vanno a regolare il processo. Durante lo stampaggio ad iniezione, Griffith [7], tiene sotto controllo quattro fattori principali:

- T_b (Temperatura del fuso) importante scegliere un opportuno intervallo di temperature per prevenire la degradazione del materiale ed avere un buon flusso.
- T_m (Temperatura dello stampo) per prevenire una prematura solidificazione del fuso.

- V_i (Velocità di iniezione) se alta permette un più facile riempimento delle micro-cavità, allo stesso tempo si avrà un aumento dello *shear rate* che può portare alla degradazione del polimero.
- P_h (Pressione di mantenimento) dipende dal materiale utilizzato, aumentandola può aumentare o diminuire il riempimento delle micro-cavità.

È un errore considerare il μ IM semplicemente come la riduzione in scala del processo tradizionale di stampaggio in ambito micro-metrico. Se si producessero micro-componenti con una macchina tradizionale, lo scarto che ne risulterebbe sarebbe troppo elevato essendo il peso del pezzo da realizzare solo una piccola parte del peso complessivo di tutto il materiale polimerico iniettato. Oltre allo spreco in peso della materozza bisognerebbe tener conto dei tempi di raffreddamento e solidificazione della stessa. Altro problema molto importante da tenere in considerazione è la degradazione del materiale in quanto il fuso resterebbe all'interno del cilindro per un periodo più prolungato a causa delle basse dosi di materiale da iniettare ad ogni ciclo.

Guardando al sistema di controllo del processo di iniezione, un sistema idraulico non sarebbe in grado di garantire una buona replicazione della parte da realizzare, preferendo nelle macchine di μ IM servomeccanismi azionati elettricamente.

2.2.1 LE FASI DEL PROCESSO

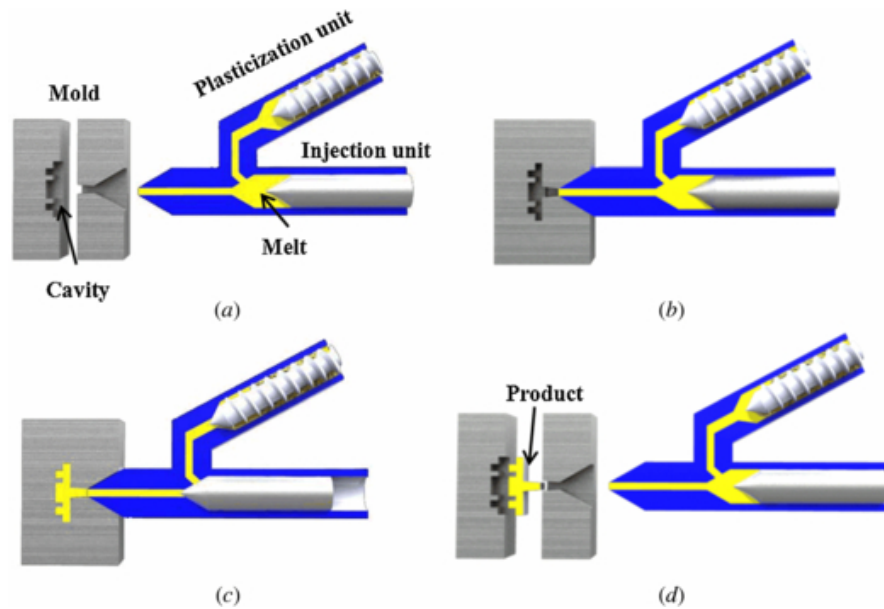


Figura 2.9: Rappresentazione schematica delle unità di plastificazione e iniezione in una pressa per μ IM

Le fasi di μ IM possono essere così suddivise [18]:

- **PLASTIFICAZIONE:** L'unità di plastificazione ha il compito di portare a fusione il materiale polimerico utilizzato, accumulare il fuso in una camera tra ugello e testa della vite senza fine, iniettare il fuso nella cavità dello stampo e mantenere, durante la fase di raffreddamento, una pressione adeguata in cavità per contrastare eventuali ritiri del materiale. Il polimero, sotto forma di grani o pellet, viene depositato, grazie a una tramoggia, all'interno del cilindro contenente la vite. La vite, ruotando, spinge il polimero forzandolo ad avanzare, fornendo l'energia necessaria alla fusione. Il cilindro è avvolto da una serie di resistenze

che lo riscaldano e grazie a questo accorgimento è in grado di mantenere una temperatura uniforme del fuso. Durante la rotazione la vite arretra ricreando una camera di accumulo di fronte alla stessa. A questo punto il fuso viene iniettato dalla spinta della vite. Viene utilizzata una valvola di non ritorno per impedire al fuso di fare ritorno all'interno del cilindro.

- **INIEZIONE:** La fase di iniezione inizia quando avviene la chiusura dello stampo. Il fuso accumulato tra l'ugello e la testa della vite viene spinto dalla vite all'interno delle cavità dello stampo in un tempo molto breve. A contatto con la superficie delle cavità si forma una pellicola solida di materiale plastico a causa della differenza di temperatura tra fuso e stampo. La fase di iniezione prosegue fino al riempimento volumetrico della cavità.
- **IMPACCAMENTO:** Dopo il completo riempimento delle cavità dello stampo si continua ad iniettare materiale. Questa operazione è estremamente importante in quanto il fuso, durante il progressivo raffreddamento ha un inevitabile ritiro. L'iniezione prosegue fino al congelamento del gate. Il profilo di impiccamento, se eseguito in maniera appropriata, condiziona buona parte dell'aspetto finale del pezzo prodotto. Grazie all'ottimizzazione di questa fase si riescono a controllare le deformazioni di post-stampaggio.
- **RAFFREDDAMENTO:** Conclusa la fase di impaccamento, non appena avviene la solidificazione del gate, il fuso continua a raffreddarsi fino a quando anche il punto più caldo del pezzo non raggiunge la temperatura di

estrazione. Contemporaneamente la vite continua a ruotare proseguendo il lavoro di plastificazione andando così ad accumulare polimero fuso necessario allo stampaggio del pezzo successivo. Questa fase è tipicamente la più lunga dell'intero ciclo ed è legata allo spessore delle pareti del pezzo da realizzare. Il tempo di raffreddamento risulta essere proporzionale al quadrato dello spessore di parete.

- **ESTRAZIONE:** Dopo l'avvenuto raffreddamento del materiale può iniziare la fase di estrazione del pezzo. È la fase conclusiva del processo di stampaggio ed avviene solo quando il pezzo all'interno dello stampo raggiunge una determinata temperatura. Dopo l'apertura dello stampo l'estrazione è realizzata per azione meccanica attraverso degli appositi estrattori. Solo a questo punto può cominciare un nuovo ciclo di stampaggio.

2.3 LA MICRO-FRESATURA

La micro-fresatura è una tecnica di lavorazione sottrattiva che permette di eseguire delle micro-lavorazioni, utilizzando utensili di taglio rotanti, con lo scopo di rimuovere una certa quantità di materiale da un pezzo adeguatamente maggiorato.

Il sistema di micro-fresatura, come il sistema tradizionale, è costituito dalle medesime parti principali:

- un piano di lavoro per posizionare il pezzo
- un utensile da taglio
- un mandrino utilizzato per il bloccaggio e la rotazione dell'utensile da taglio

La micro-fresatura ha più di due secoli di storia alle spalle e nel corso degli anni ha conosciuto una continua evoluzione divenendo uno degli strumenti più utilizzati nella produzione industriale. Le prime macchine sono state utilizzate per la lavorazione di materiali non ferrosi a causa dell'elevata fragilità degli utensili da taglio utilizzati, che nel tempo, si usuravano facilmente. Solo con l'effettivo utilizzo dell'acciaio, in campo industriale, e di speciali rivestimenti in nitruro di titanio, il campo di utilizzo di queste macchine è aumentato esponenzialmente.

Le posizioni del piano di lavoro (assi x e y di spostamento) e del utensile di taglio (asse z) sono tradizionalmente movimentate a mano da manovelle meccaniche e leve. Al giorno d'oggi, i sistemi meccanici, sono stati sostituiti da i più moderni computer a controllo numerico che oltre a rendere il processo automatizzato ne migliorano ripetibilità e precisione, riducendo il possibile errore umano. In aggiunta permette la rapida conversione di modelli CAD andando a velocizzare l'interno ciclo di produzione. Proprio la possibilità di realizzare un modello/prototipo a partire da un disegno CAD da a questa tecnica di lavorazione un valore aggiunto e la possibilità di essere utilizzata la prototipazione rapida.

La micro-fresatura può essere utile nella produzione di componenti micro-fluidici in due modi principali: può essere utilizzata per lavorare un elemento in materiale polimerico in modo diretto o essere utilizzata per la lavorazione dello stampo che poi successivamente potrà essere utilizzato per la produzione dei componenti micro-fluidici. Fornendo dei parametri di lavorazione corretti, la micro-fresatura di una superficie polimerica è relativamente semplice, grazie soprattutto alla bassa resistenza al ta-

glio tipica del materiale. Sarà necessaria un adeguato raffreddamento durante la lavorazione in modo tale da scongiurare ogni possibile fenomeno di rammollimento del polimero e accumulo di materiale sull'utensile che può provocarne la rottura. La rimozione del materiale attraverso la fresatura può portare ad una ridistribuzione delle sollecitazioni interne del pezzo, se presenti, con conseguente rischio di deformazioni anche permanenti.

Parte II

MATERIALI E METODI

LA REALIZZAZIONE DEGLI INSERTI E DEGLI ELEMENTI DI PROVA

3.1 LA STAMPANTE 3D – OBJET350

La realizzazione degli inserti con superficie micro-strutturata e degli elementi di prova è stata affidata alla stampante 3D professionale Objet350-Connex3 prodotta da *Stratasys*. Questa stampante 3D utilizza la tecnologia *Polyjet*, tecnologia molto simile alla stampa a getto d'inchiostro. In questo caso al posto di depositare gocce di inchiostro su carta la stampante deposita strati su strati di fotopolimero liquido su un vassoio rettangolare. Il fotopolimero liquido viene successivamente polimerizzato grazie a una sorgente di raggi UV. Prima di depositare il fotopolimero la stampante deposita sul piatto uno strato di materiale (gel) di supporto rimovibile chiamato *FullCure 705*, anch'esso un fotopolimero non tossico. Tale materiale di supporto oltre a fornire una base per il pezzo stampato ne facilita la rimozione dal piatto e viene utilizzato come supporto per eventuali strutture sporgenti. I materiali, allo stato liquido, vengono forniti alla stampante tramite cartucce ad aggancio rapido dal peso che varia dai 700 g a 1 kg e posti in un vano apposito a lato della macchina. Ogni qualvolta si rende necessario un cambio di cartuccia è doveroso compiere un ciclo di spurgo della stampante a causa di eventuali residui presenti nel sistema di circolo del materiale. In tabella 3.1 sono riportate le caratteristiche principali della stampante Objet350.

Tabella 3.1: Principali caratteristiche tecniche della stampante
Objet350

Caratteristica	Valore	Unità
Resolution (XYZ)	600 – 600 - 1600	dpi
Accuracy	20-200	μm
Minimum Layer Thickness	16	μm
Maximum Build Size (XYZ)	340 x 340 x 200	mm



Figura 3.1: Stampante 3D Objet350-Connex3

La *Objet350-Connex3* utilizza la tecnologia a *triple-jetting* capace di funzionare con una dozzina di diversi materiali in base al tipo di esigenza e applicazione che dovrà garantire il componente da

produrre. Si possono utilizzare materiali adatti al campo biomedico, materiali dalle caratteristiche simili alla gomma, materiali adatti alle alte temperature.

In questo studio è stato utilizzato il *Digital ABS* (nuovo polimero realizzato da *Stratasys*) ottenuto dalla combinazione di RGD515 e RGD535, progettato per simulare plastiche standard ABS coniugando la resistenza alle alte temperature con la robustezza. Secondo il produttore ha una resistenza all'urto pari a 65-80 J/m ed una *heat deflection temperature* (HDT) di 58-68 °C quando viene rimosso dalla stampante. Può essere riprodotto in una stampante Polyjet che è in grado di mixare il RGD515 e il RGD535 in una proporzione predefinita. Si presenta di colore verdastro.

Il *Digital ABS* è ideale per la realizzazione di:

- Prototipi funzionali
- Stampi/inserti (compresi stampi ad iniezione)
- Parti a pressione per un uso alle alte e alle basse temperature
- Componenti elettrici, alloggiamenti
- Parti di motore e coperchi
- Utensili

Tabella 3.2: Le principali proprietà del Digital ABS

Caratteristica	Valore	Unità
Resistenza alla trazione	55-60	MPa
Allungamento alla rottura	25-40	%
Modulo di elasticità	2600-3000	MPa
Tg	47-53	°C

3.1.1 LE BASI DEL PROCESSO

Il processo di stampa 3D per tutti i pezzi stampati tramite la *Objet350-Connex3* segue questi passaggi:

- È stato importato, nel software di controllo della stampante, un file *stl* (*Stereo Lithography interface format*) contenente il modello del pezzo da stampare disegnato utilizzando il software CAD *SolidWorks*. Di norma è consigliabile inserire più pezzi contemporaneamente, soprattutto se di ridotte dimensioni, in modo tale da ottimizzare il lavoro della stampante. Ad ogni avvio di una nuova stampa infatti avviene uno spurgo del materiale residuo nei circuiti di alimentazione interni alla macchina che non può essere recuperato. Il software riorganizzerà in maniera ottimale la disposizione dei pezzi nel piatto, orientandoli preferibilmente lungo l'asse x della macchina, asse preferenziale di spostamento della testa stampante.
- La testa stampante deposita prima di tutto il materiale di supporto in modo da creare un sottile cuscinetto di poche centinaia di μm di spessore affinché non avvenga il contatto diretto tra il pezzo stampato e il piatto. Questa fase può durare da 1 a 12 ore, dipendentemente dal numero e dalle dimensioni dei pezzi da stampare. Nel caso in cui il componente lo richiedesse viene depositato uno strato di materiale di supporto rimovibile con lo scopo di sostenere parti sospese o sporgenti. A questo punto la testa stampante deposita minuscole quantità di materiale fotopolimerico, successivamente polimerizzate tramite una sorgente di raggi UV.

- Alla fine della fase di stampaggio i pezzi vengono rimossi dal piatto utilizzando una sottile spatola metallica. Questa operazione viene svolta solo dopo il raffreddamento completo del pezzo, infatti una rimozione prematura potrebbe generare una distorsione strutturale del pezzo rendendolo inutilizzabile.
- Infine i pezzi sono stati opportunamente trattati con acqua e spazzola per la rimozione del materiale di supporto. Particolare attenzione è stata data a questa fase in quanto la geometria micro-strutturata utilizzata presentava delle criticità strutturali dovute allo spessore molto contenuto dei muretti e dalla natura stessa del materiale utilizzato.

Nella fase preliminare del progetto, dopo un'attenta ricerca nella letteratura presente in questo settore, è stata definita un'opportuna geometria per la superficie micro-struttura, in modo tale da racchiudere in uno stesso disegno più criticità, sia strutturali che dimensionali. Grazie a questi accorgimenti è stato possibile eseguire uno studio su più fronti, massimizzando le informazioni ottenibili da un singolo pezzo in esame. In figura 3.2 sono riportate le dimensioni principali del dispositivo LOC progettato, modellato su un inserto di dimensione 11 x 19 x 1,2 mm. Sono stati prodotti degli elementi di prova, aventi semplice geometria, formati da muretti con aspect ratio uguale a 1 e 3, per avere un quadro più generale sulle reali capacità della macchina. Tali elementi sono costituiti da un fascio di muretti paralleli, ad altezza variabile, con spessore che varia dai 100 ai 350 μm , posti nei bordi più lunghi dell'elemento rettangolare. Utilizzando il software di controllo sono stati collocati, nel piatto di lavoro, in posizioni differenti, andando a variare la direzione della normale dell'elemento rispetto alla terna assoluta propria della stampante. In questo

modo si è dato importanza allo spessore di materiale rilasciato dalla testa stampante in modo da poter analizzare la differenza dei muretti prodotti lungo un asse preferenziale e non.

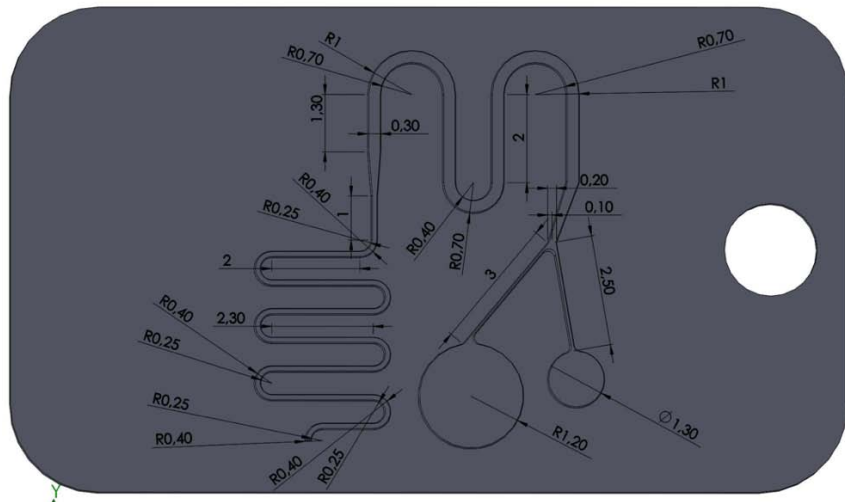


Figura 3.2: Modello CAD inserto con geometria rappresentativa del dispositivo LOC



Figura 3.3: Esempi di elemento di prova

3.2 IL CENTRO DI LAVORAZIONE A 5 ASSI

L'inserto per micro-stampaggio ad iniezione, precedentemente prodotto tramite AM, è stato lavorato con il centro di lavorazione a 5 assi *Kugler Micromaster 5X*. Questa macchina, ad elevata precisione, permette di lavorare superfici 2.5D, 3D e *free-form* riuscendo a compiere complessi movimenti che sfruttano simultaneamente i 5 assi a disposizione [18]. La macchina poggia su una solida base in granito la quale, oltre a garantire una certa stabilità meccanica e termica, permette l'abbattimento delle vibrazioni causate dalla lavorazione e dai movimenti propri della macchina. Questi accorgimenti permettono la realizzazione di componenti ad elevata precisione e qualità superficiale.

Alla macchina viene fornito un file G-code risultato dalla elaborazione software Delcam del file CAD di progetto del componente. In questo modo possono essere definite eventuali restrizioni di processo o accorgimenti atti a ottimizzare il lavoro della macchina stessa.

Tabella 3.3: Principali caratteristiche tecniche del centro di lavorazione a 5 assi Kugler Micromaster 5X

Caratteristica	Valore	Unità
All-over accuracy	$\leq \pm 0.5$	μm
Positioning error	$\leq \pm 0.3$	μm
Axis Run-out	$\leq \pm 0.15$	μm
Massima velocità di rotazione	180000	rpm



Figura 3.4 Il centro di lavorazione a 5 assi Kugler Micromaster 5X

3.2.1 LE BASI DEL PROCESSO

Con riferimento al *centro di lavorazione a 5 assi* si è deciso di procedere in due direzioni ben distinte nella lavorazione degli inserti micro-strutturati:

- Riprendere, per una rifinitura superficiale, l'inserto precedentemente stampato tramite AM con geometria della superficie micro-strutturata lievemente maggiorata. Idea

successivamente scartata a causa di complicazioni tecniche.

- Realizzare la geometria delle micro-strutture su un inserto, stampato tramite AM, opportunamente modificata in modo tale da ottimizzare il lavoro del *centro di lavorazione a 5 assi*.

A causa delle dimensioni ridotte e alla fragilità strutturale che contraddistingue il tipo di materiale utilizzato nella fase di realizzazione tramite AM, gli inserti sono stati incollati alla base del centro di lavorazione a 5 assi e non tramite morsa, in modo tale da resistere alle sollecitazioni provocate dall'intensa rotazione del mandrino utilizzato per la fresatura.

Il processo di micro-fresatura dedicato all'inserto maggiorato, e prodotto esclusivamente per essere lavorato, è stato suddiviso in quattro parti in quanto la geometria della micro-struttura da realizzare presentava delle criticità difficilmente risolvibili attraverso una sola passata dell'utensile. Si è fatto uso di un utensile Kyocera 1610-0197L059, di diametro 0,5 mm per eseguire le prime due operazioni di fresatura più grossolana. La prima ha interessato l'intero disegno da realizzare ad esclusione della serpentina. Quest'ultima è stata ricreata in un secondo momento dopo aver ottimizzato il percorso seguito dall'utensile in modo da garantire una corretta realizzazione dei muretti, vista la vicinanza degli stessi. In figura 3.5 e 3.6 sono riportati i percorsi eseguiti dall'utensile mentre le sue dimensioni caratteristiche e la sua geometria sono riportate rispettivamente nella tabella 3.4 e nella figura 3.7.

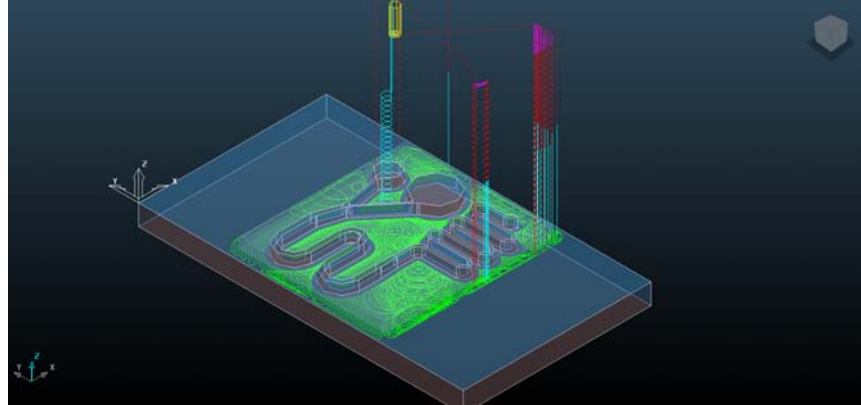


Figura 3.5: Percorso eseguito dall'utensile Kyocera 1610-0197L059 durante la prima operazione di fresatura

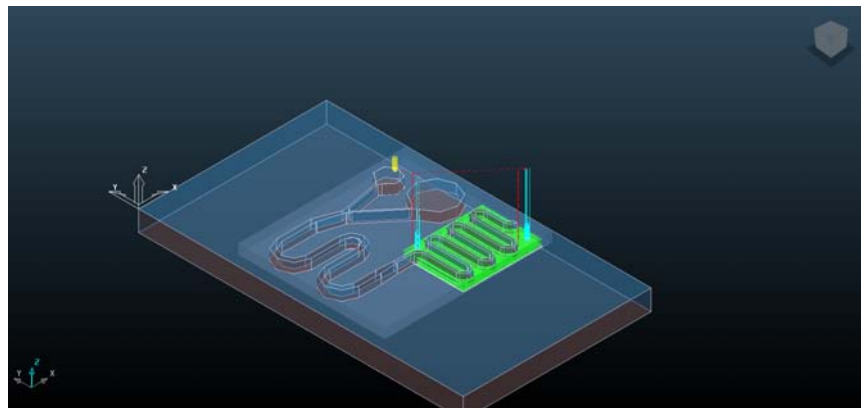


Figura 3.6: Percorso eseguito dall'utensile Kyocera 1610-0197L059 durante la seconda operazione di fresatura



Figura 3.7: Geometria di riferimento dell'utensile Kyocera 1610-0197L059

Tabella 3.4: Principali parametri geometrici dell'utensile Kyocera 1610-0197L059

Codice produttore	D [mm]	d[mm]	l[mm]	L [mm]
1610-0197L059	0,50	3	1,50	38

Le ultime due operazioni di micro-fresatura, svolte per rifinire superficialmente le zone precedentemente lavorate, sono state eseguite utilizzando l'utensile Kyocera 1610-0079L024 di diametro 0,2 mm. È stata eseguita una prima finitura in testa alla geometria micro-strutturata e successivamente ritoccate completamente le pareti esterne. In figura 3.8 e 3.9 sono riportati i percorsi svolti dall'utensile nelle lavorazioni finali. Le dimensioni caratteristiche e la geometria dell'utensile sono riportate rispettivamente nella tabella 3.5 e nella figura 3.7.

Tabella 3.5: Principali parametri geometrici dell'utensile Kyocera 1610-0079L024

Codice produttore	D [mm]	d[mm]	l[mm]	L [mm]
1610-0079L024	0,20	3	0,60	38

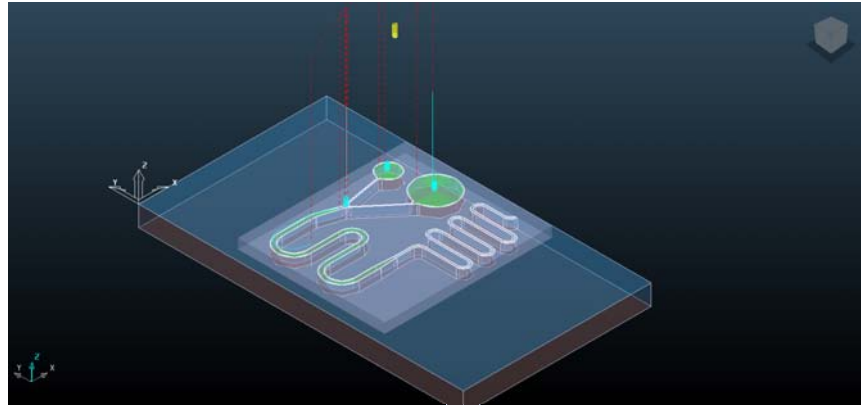


Figura 3.8: Percorso eseguito dall'utensile Kyocera 1610-0079L024 durante la finitura in testa

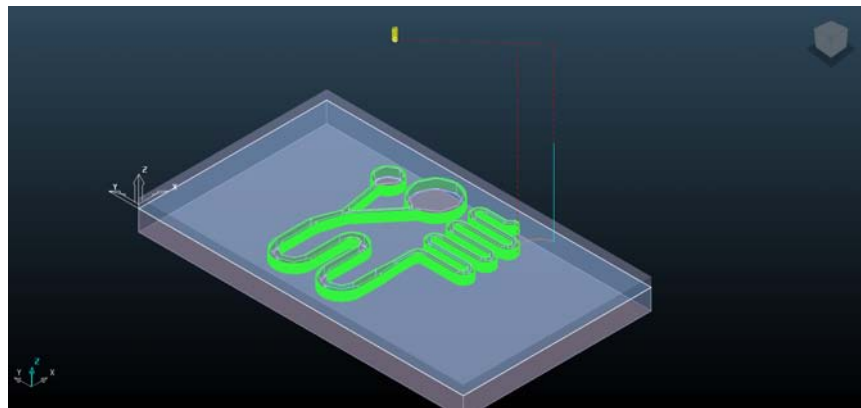


Figura 3.9: Percorso eseguito dall'utensile Kyocera 1610-0079L024 durante la finitura delle pareti laterali

I parametri della lavorazione, riportati in tabella 3.6, sono stati modificati in base al tipo di utensile utilizzato in modo da ottimizzare il processo di micro-fresatura a seconda dell'operazione svolta.

Tabella 3.6: Principali parametri di lavorazione utilizzati per ottenere l'inserto

Utensile	Velocità rotazione [giri/min]	Feed Rate [mm/min]	Velocità taglio [m/min]
0,2	159155	640	100
0,5	95493	573	150

Dopo aver importato all'interno del software Delcam il modello CAD dell'inserto si sono definiti i parametri di processo e i percorsi da far eseguire all'utensile come descritto precedentemente, quindi il software ha fornito il programma G-code da inserire nella macchina.

Per eseguire le varie lavorazioni stabilite in fase di progetto l'inserto è stato posizionato all'interno del centro di lavorazione a 5 assi, ed è stata eseguita la seguente procedura:

1. L'inserto è stato posizionato e vincolato al piano di lavoro utilizzando un adesivo ed una colla comune in modo tale da garantire un corretto ancoraggio dello stesso alla superficie. Quindi attraverso il sensore *Touch Probe*, prodotto da *Renishaw*, si è centrato il riferimento della macchina andando a misurare la posizione dell'inserto in tre punti: il primo sulla parete laterale della base dell'inserto e gli ultimi due sulla superficie superiore parallela al piano.

2. Dopo aver determinato il sistema di riferimento e conclusasi la procedura automatica per la stabilizzazione della velocità del mandrino è stato avviato il programma G-code per la realizzazione della micro-struttura desiderata. In base al tipo di lavorazione superficiale sono state modificate le variabili di processo essendo diversi i percorsi dell'utensile e le dimensioni delle pareti.

A causa delle distanze molto ridotte tra i vari muretti della geometria micro-strutturata si è posta particolare attenzione alle dimensioni degli utensili utilizzati in modo da facilitarne il passaggio nelle zone critiche della struttura ma anche di ottimizzare il tempo di lavoro complessivo, in modo tale da non vanificare il vantaggio, in termini temporali, acquisito nelle lavorazioni precedentemente eseguite.

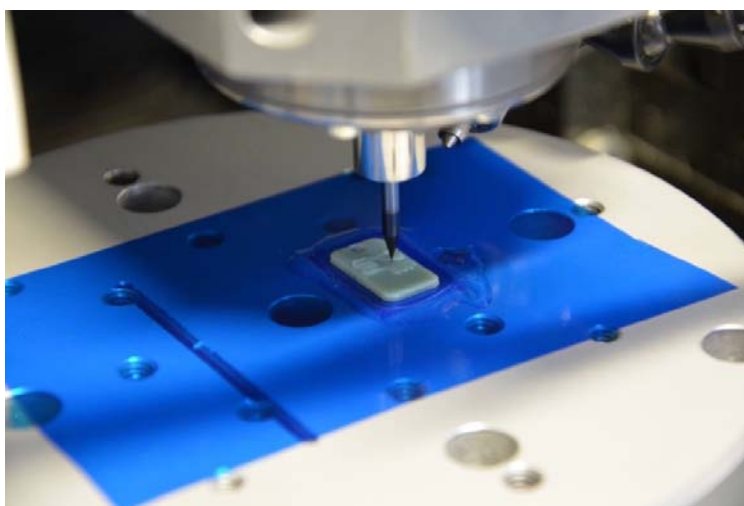


Figura 3.10: Lavorazione dell'inserto maggiorato tramite centro di lavorazione a 5 assi

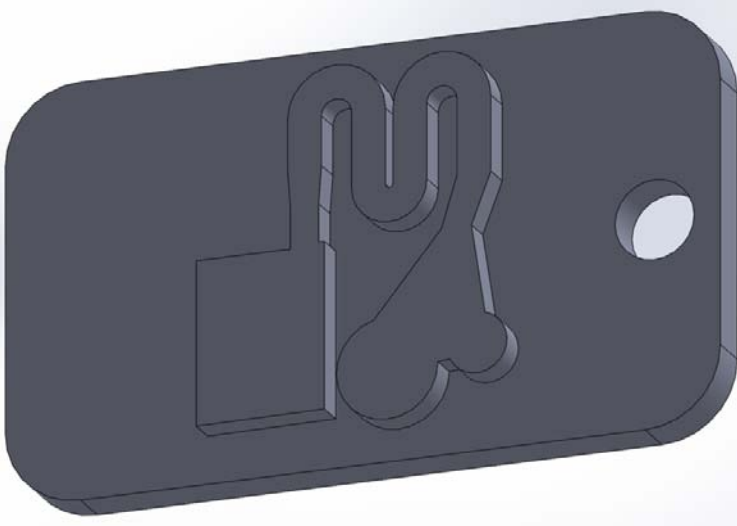


Figura 3.11: Inserto con geometria micro-strutturata maggiorata dedicato alla lavorazione tramite micro-fresatura

4.1 LA PRESSA AD INIEZIONE

Dopo aver caratterizzato e lavorato l'inserto è stata utilizzata la pressa ad iniezione *Wittmann-Battenfeld MicroPower 15* per lo stampaggio dei componenti micro-strutturati. La pressa utilizza un'unità di plastificazione e chiusura elettrica ed è utilizzata specialmente per la realizzazione di micro-componenti ad elevata precisione. Inoltre grazie alla possibilità di utilizzare bassi tempi di ciclo e un basso consumo di materiale si ha un notevole risparmio di costi ed energia.

La pressa è composta da una vite di 14 mm di diametro con una geometria standard così da poter operare con materiali con caratteristiche differenti. Diversamente dalle presse tradizionali non è presente una vite pistonante. L'iniezione del polimero fuso all'interno dello stampo avviene attraverso la camera di iniezione dove opera un pistoncino di diametro 5 mm, il quale garantisce una velocità massima di 760 mm/s. In questo modo oltre ad avere una elevata velocità di iniezione e un accurato controllo del volume iniettato si possono raggiungere diametri del nocciolo della vite più contenuti in quanto non più soggetta alle elevate pressioni tipicamente in gioco in questa fase che potrebbero pregiudicarne la resistenza. Nella parte posteriore del pistone è presente un sensore di pressione, strumento necessario per garantire qualità e ripetibilità dei pezzi stampati perché ci permette di eseguire un accurato controllo del processo di iniezione.

Attraverso il sistema di visualizzazione UNILOG è possibile il controllo del processo. Permette di modificare le principali variabili e di osservarne la variazione durante lo stampaggio. Le caratteristiche tecniche della macchina sono riportate nella Tabella 4.1.



Figura 4.1: La pressa ad iniezione Wittmann Battenfeld MicroPower 15

Tabella 4.1: Principali caratteristiche tecniche della pressa ad iniezione Wittmann Battenfeld MicroPower 15

Caratteristica	Valore	Unità
Massima Forza di chiusura	150	kN
Massima forza di apertura	15	kN
Massima forza di estrazione	5	kN
Diametro vite di plastificazione	14	mm
Corsa della vite	26	mm
Rapporto L/D vite	20	
Diametro pistone di iniezione	5	mm
Volume di iniezione	1.4 ÷ 4	cm ³
Massima pressione di iniezione	300	MPa
Massima velocità di iniezione	750	mm/s

4.2 LO STAMPO

Gli stampi per micro-stampaggio ad iniezione sono medesimi a quelli utilizzati nei processi tradizionali. Sono composti da una piastra fissa, solidale al sistema di iniezione, una piastra mobile la quale ha il compito di ruotare dalla posizione di iniezione a quella di estrazione, da un apparato espulsore che rimuoverà il componente stampato dallo stampo a fine ciclo e un inserto lavorato con la geometria prefissata in fase di progetto. Dopo aver opportunamente allineato le due piastre attraverso un sistema di serraggio può cominciare il processo di iniezione con l'immissione del materiale nello stampo. La piastra mobile viene spinta contro la piastra fissa applicando la forza di chiusura, stabilita precedentemente, in modo tale da garantire la lavorazione. Una volta completata la formazione del componente la parte mobile ruota portando con sé il componente stampato il quale sarà proiettato al di fuori dello stampo con l'aiuto di tre estrattori. La piastra mobile possiede una cavità dove poter alloggiare uno stampo di forma cilindrica, il quale possiede esso stesso una cavità per l'inserimento di un inserto in modo tale da rendere più flessibile e versatile l'apparato. In questo lavoro si è utilizzato un stampo opportunamente modificato che permette l'inserimento di inserti di forma rettangolare. Grazie a questo accorgimento è stato possibile utilizzare il medesimo stampo per tutti i tipi di inserti prodotti andando ad ottimizzare il lavoro in termini di tempo e praticità. È una soluzione pratica e conveniente in quanto gli inserti possono essere sostituiti di volta in volta senza dover ricalibrare tutto il sistema di stampaggio.

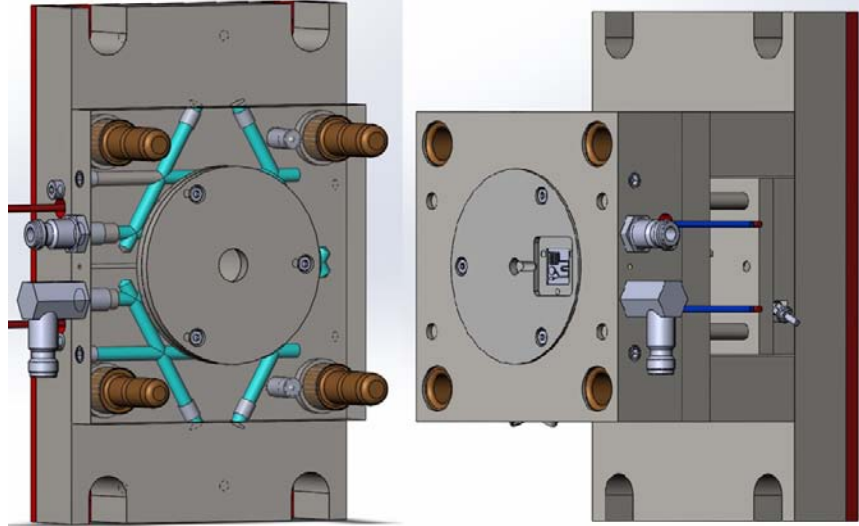


Figura 4.2: Parte fissa e mobile dello stampo

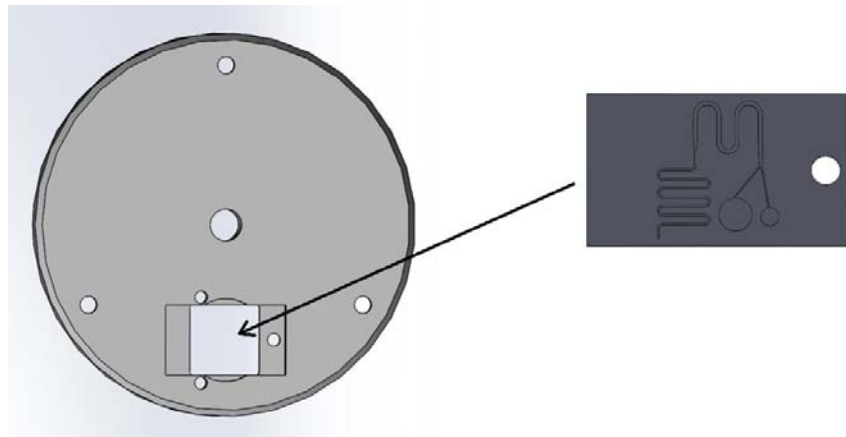


Figura 4.3: Posizionamento dell'inserto micro-strutturato all'interno della piastra porta-inserti

4.3 IL MATERIALE

Per lo stampaggio dei componenti micro-strutturati è stato utilizzato un materiale polimerico amorfo, il polistirene (*Total PS crystal 1540*), adatto nel campo della micro-iniezione ed estrusione in quanto molto scorrevole. Adottato molto spesso in sostituzione a vetro e siliceni, per la produzione di dispositivi Lab-on-a-chip. Visto il costo contenuto viene utilizzato anche come copolimero. Possiede numerose proprietà tra cui:

- Bassa densità
- Elevata trasparenza
- Biocompatibilità

Il polistirene viene utilizzato in numerosi prodotti a livello industriale che comprendono:

- Scatole per alimenti
- Imballaggi tradizionali e per uso sanitario
- Posate, piatti, bicchieri
- Componenti tecnici

Il PS riesce a combinare eccellenti caratteristiche di fluidità con un buon punto di rammollimento. Possiede un Melt Index (5 kg – 200°C) di 12 g/10', un modulo a flessione di 2900 MPa e un Vicat Temp (1 kg) di 86°C [17]. Nell'appendice A è riportata la scheda dettagliata del materiale.

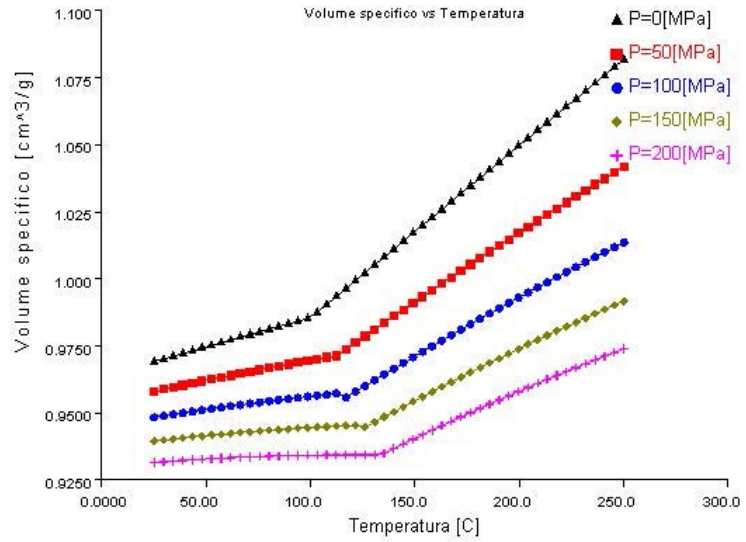


Figura 4.4: Curve PVT al variare della pressione per il Total PS Crystal 1540 da Autodesk Moldflow® database

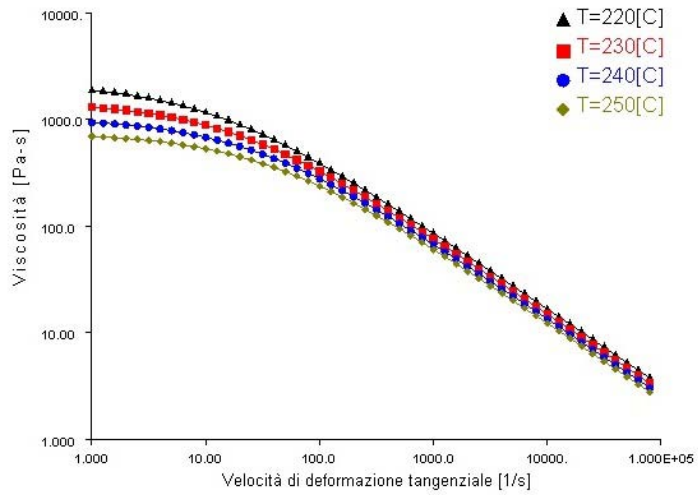


Figura 4.5: Grafico di viscosità al variare delle temperatura del Total PS Crystal 1540 da Autodesk Moldflow® database

4.4 I PARAMETRI DI PROCESSO

Vista la natura degli inserti utilizzati sono stati scelti dei parametri di processo tali da permettere, in via teorica, di eseguire un ciclo di produzione adeguato in modo da soddisfare a pieno ogni fase del micro-stampaggio ad iniezione. Per un confronto diretto tra l'inserto nominale, derivante esclusivamente dallo stampaggio per AM, e tra l'inserto lavorato tramite micro-fresatura, sono stati utilizzati gli stessi parametri di processo, riportati in Tabella 4.2. Per l'inserto nominale sono stati stampati 300 pezzi, mentre l'inserto lavorato per micro-fresatura ne ha prodotti 12. La differenza di produzione tra i due inserti è stata provocata dalla rottura della micro-struttura nell'inserto lavorato che ne ha compromesso l'utilizzo. Prima di procedere alla numerazione dei pezzi stampati, nel caso dell'inserto nominale, è stato ottimizzato il processo di produzione andando a modificare i parametri di processo stabiliti in fase di progetto. In questo modo sono stati scartati i pezzi non del tutto formati e i pezzi dove la replicazione non è risultata soddisfacente. Per la caratterizzazione sono stati conservati, nel caso dell'inserto nominale, il primo pezzo completamente formato e, dopo la stabilizzazione del processo, il centesimo, duecentesimo e trecentesimo pezzo prodotto. Nel caso dell'inserto lavorato si sono utilizzati gli stessi parametri di processo utilizzati per l'inserto nominale, ciò ha reso possibile produrre un pezzo completo già al primo tentativo. A causa della fragilità e la conseguente rottura di quest'ultimo inserto sono stati conservati tutti i pezzi prodotti. Particolare attenzione è stata data alla velocità d'iniezione 30 mm/s, mantenuta a livelli molto bassi per non compromettere la geometria micro-strutturata dell'inserto.

Tabella 4.2: I parametri utilizzati nel processo di stampaggio ad iniezione

Caratteristica	Valore	Unità
Temperatura dello stampo	40	°C
Temperatura del cilindro	240	°C
Pressione di switch-over	120	bar
Pressione di mantenimento	100	bar
Pressione di iniezione	29	bar
Velocità di riempimento	30	mm/s
Tempo di mantenimento	8	s
Tempo di riempimento	2,82	s
Tempo di raffreddamento	10	s
Tempo del ciclo	39,83	s



Figura 4.6: Componente stampato per stampaggio ad iniezione

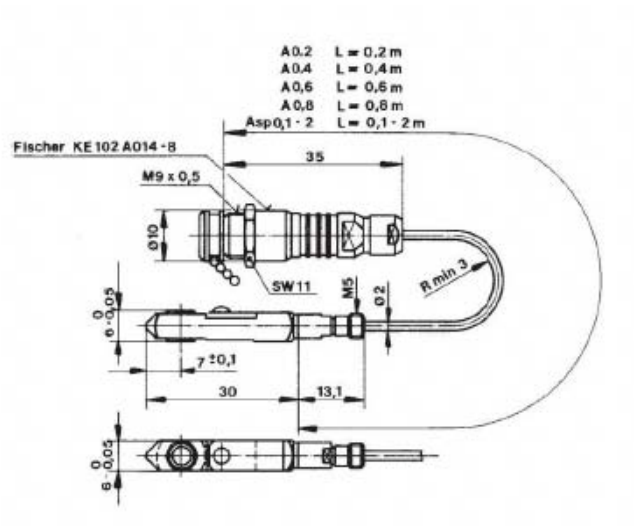
4.5 FORZA DI ESTRAZIONE

Per acquisire i dati sperimentali per il calcolo delle forze di estrazione è stato utilizzato il software *LabView*. Nella schermata principale è possibile l'inserimento di vari parametri che andranno a regolare l'acquisizione della forza:

- Dati relativi al sensore
- Offset della forza
- Dati relativi all'acquisizione
- Percorso dove saranno salvati i dati acquisiti dal sensore
- Nome del file per ogni prova

Il sensore di forza piezoelettrico utilizzato per l'acquisizione dei dati è il KISTLER 9223A (Fig. 4.7) le cui caratteristiche principali sono riportate in Tabella 4.3. Tale sensore è predisposto per la misurazione di forze dinamiche. Si basa sulla proprietà di piezoelettricità, caratteristica peculiare di materiali con struttura cristallina, ovvero sulla capacità di certi materiali, nel momento in cui vengono sollecitati da un carico, di generare una differenza di potenziale proporzionale al carico stesso. Vengono utilizzati due materiali principalmente per la costruzione di sensori piezoelettrici: la ceramica piezoelettrica e i materiali cristallini.

È stato posizionato in un punto strategico, precisamente dietro al dischetto d'acciaio dove sono montati i tre estrattori, in modo da poter determinare la variazione della forza nella fase di estrazione del componente stampato. Tramite il software *LabView* si sono acquisite le forze di estrazione per un numero prefissato di componenti stampati utilizzando di volta in volta gli inserti differenti.



(a) Valori dimensionali del sensore piezoelettrico Kistler 9223A



(b) Il sensore piezoelettrico Kistler 9223A

Figura 4.7: Dimensione e rappresentazione del sensore piezoelettrico Kistler 9223°

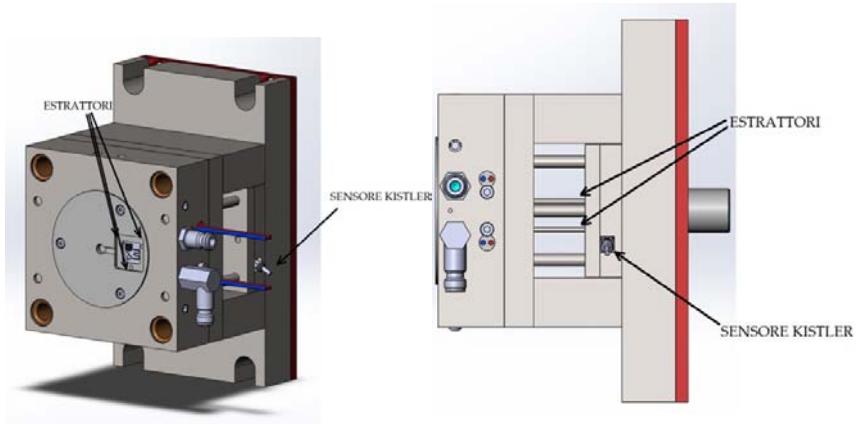


Figura 4.8: Posizionamento del sensore nello stampo

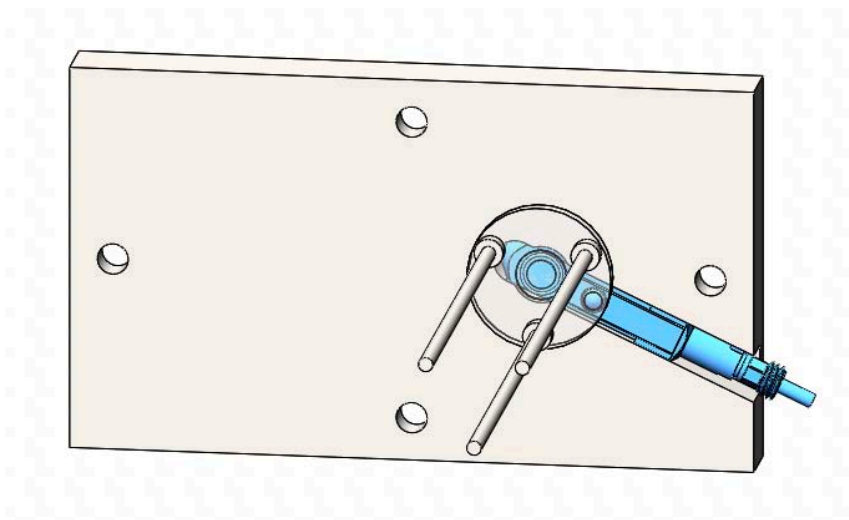


Figura 4.9: Alloggiamento sensore all'interno dello stampo

Tabella 4.3: Scheda tecnica sensore Kistler 9223A

Caratteristica	Valore	Unità
Range	N	0 ÷ 2500
Gamma parziale calibrata	N	0 ÷ 250
Sovraccarico	N	0/3000
Soglia	N	0.01
Sensibilità	pC/N	-4.5
Linearità	%FSO	≤±1
Isteresi	%FSO	≤1
Rigidità, valore medio	N/μm	≈460
Frequenza naturale	kHz	≈200
Intervallo operativo di temperatura	°C	-40÷ 150
Errore di temperatura	N/°C	≤±0.9
Capacità (con cavo tipo 1645C0, 4)	pf	13
Resistenza a isolamento a 20 °C	TΩ	≥10
Resistenza a isolamento a 120 °C	TΩ	≥1
Peso (senza cavo)	g	7

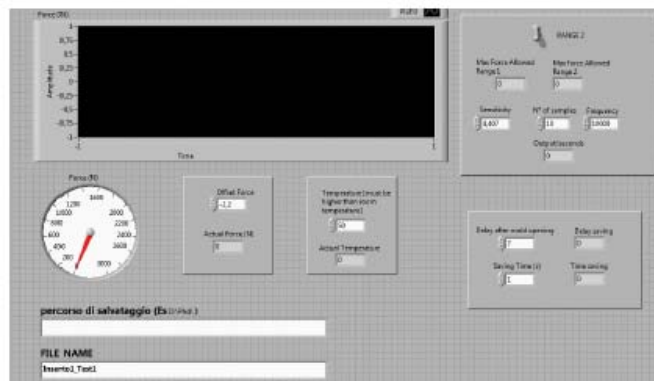


Figura 4.10: Schermata di acquisizione del software LabVIEW

In questo capitolo si andranno ad esporre procedure e metodi per la caratterizzazione metrologica degli inserti. La caratterizzazione metrologica consiste nell'andare ad analizzare superficialmente l'inserto e la sua geometria micro-strutturata oltre ai componenti stampati tramite la pressa ad iniezione, in modo da andare a stabilire la bontà dei vari processi che sono stati utilizzati. Le varie misurazioni sono state effettuate prima e dopo lavorazioni e stampaggio in modo da poter ricostruire il ciclo di vita degli oggetti in esame nel corso dell'intero processo di produzione.

Sono stati utilizzate principalmente due macchine per la caratterizzazione dei componenti:

- Il microscopio elettronico a scansione SEM, utile nello studio geometrico degli inserti.
- Profilometro, per determinare le reali dimensioni dei murretti e canali precedentemente stampati e lavorati.

Entrambe le macchine saranno in seguito descritte in dettaglio per quanto riguarda funzionamento, procedure utilizzate e caratteristiche. Come preparazione alle varie misurazioni gli inserti e i componenti stampati sono stati meticolosamente trattati per rimuovere materiale di supporto proveniente dalla fase di AM, bave dovute al processo di fresatura e di stampaggio e a depositi dovuti al particolato sospeso nell'atmosfera. Questo accorgimento ha consentito una misurazione più accurata e pulita, minimizzando eventuali errori di misurazione dovuti alla presenza di corpi estranei sulla superficie degli elementi in esame.

5.1 IL MICROSCOPIO ELETTRONICO A SCANSIONE

L'analisi geometrica degli inserti è stata eseguita per mezzo del microscopio elettronico a scansione FEI Quanta 400 SEM. Nella pratica è denominato SEM dall'inglese *Scanning Electron Microscope*. I componenti principali del microscopio SEM sono:

- Sorgente di elettroni
- Sistema di lenti e aperture guida per gli elettroni
- Rilevatore di elettroni
- Camera a vuoto
- Computer e display per visionare le immagini scansionate



Figura 5.1: Il microscopio elettronico a scansione FEI Quanta 400 SEM

La particolarità di questo strumento è quella di utilizzare come fonte di radiazione un fascio di elettroni che andrà a colpire il campione diversamente dal fascio di luce utilizzato dai più comuni microscopi ottici. Il microscopio è detto a scansione in quanto il fascio di elettroni non va ad esaminare un unico punto del campione ma andrà a scansionare riga dopo riga una predefinita area rettangolare. Il vantaggio nell'utilizzo di questo tipologia di microscopi è quella di poter raggiungere una risoluzione molto maggiore rispetto a un comune microscopio a causa della lunghezza d'onda della radiazione incidente, inversamente proporzionale al potere di risoluzione.

Il fascio di elettroni è generato da un filamento incandescente in tungsteno per effetto termoelettronico e viene concentrato passando attraverso una combinazione di obiettivi e aperture. Fornendo poi un'elevata tensione tra i 200 V e 30 kV gli elettroni sono fortemente accelerati. All'interno della macchina si crea il vuoto attraverso un sistema di pompe per favorire la propagazione del fascio di elettroni. A causa dell'interazione tra fascio e campione si generano i cosiddetti elettroni secondari che vengono raccolti da un rivelatore e commutati in impulsi elettrici elaborati successivamente da un computer, per mezzo software, per la generazione di immagini. Quest'ultime grazie alla sensazione di tridimensionalità sono di facile comprensione. Le principali caratteristiche dello strumento utilizzato sono riassunte nella tabella 5.1.

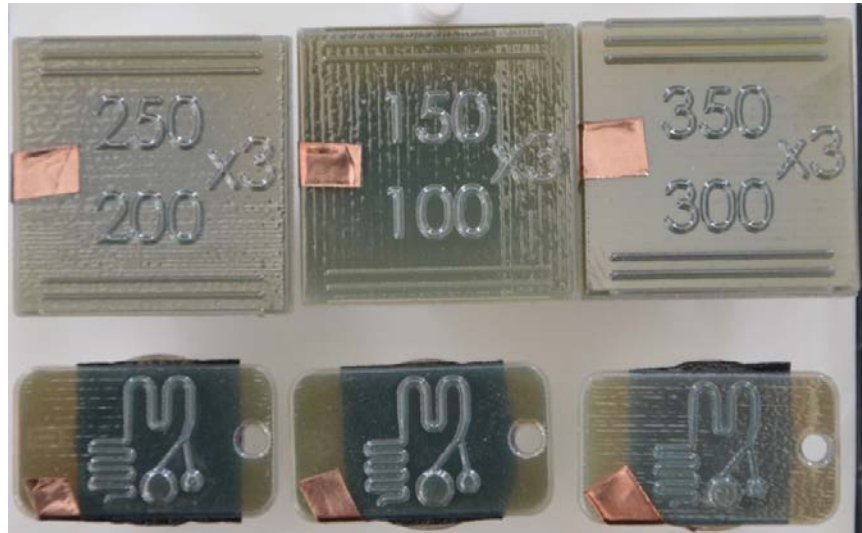


Figura 5.2: Inserti ed elementi di prova preparati per essere scansionati al SEM

Tabella 5.1: Principali caratteristiche tecniche del microscopio elettronico a scansione FEI Quanta 400 SEM

Caratteristica	Valore	Unità
Tensione di accelerazione	0.2 ÷ 30	kV
Ingrandimento	6 ÷ 1000000	kN
Pressione in camera (Alto Vuoto)	$\leq 6 \cdot 10^{-4}$	Pa
Sistema di movimento a 5 assi		
Spostamento in X,Y	150	mm
Spostamento in Z	65	mm
Rotazione attorno asse Z	365°	
Rotazione trasversale	70°	

Il microscopio è stato utilizzato per la caratterizzazione di più componenti:

- Tre inserti prodotti tramite AM aventi geometria superficiale stabilita in fase di progetto e non lavorata (Fig. 5.1 basso).
- Tre elementi di prova prodotti tramite AM aventi geometria superficiale semplice con *aspect ratio* pari a 3, composta da muretti ad altezza differenti in modo da poter esaminare la bontà del processo di AM (Fig. 5.1 alto).

ANALISI AL SEM

Per l'analisi al SEM si è perseguita una procedura comune per tutti i campioni esaminati:

1. Tutti i campioni, dopo essere stati posti in un becher contenente dell'acqua, sono stati immersi in una macchina per il lavaggio ad ultrasuoni. Questa fase è necessaria per andare a ripulire completamente la superficie dei campioni in modo da eliminare corpi estranei che possono pregiudicare la fase successiva di rivestimento superficiale.
2. Dopo essere stati trattati i campioni devono essere rivestiti superficialmente, utilizzando una *Cold Sputtering Platform* prodotta da Denton Vacuum (Fig. 5.4), con un materiale conduttore in modo da poter essere visionati al SEM.

3. I campioni dopo essere stati rivestiti vengono incollati su delle apposite basi utilizzando un particolare adesivo chiamato *Carbon Tape*. Essendo i campioni di materiali polimerico è necessario collegare la superficie rivestita con le basi utilizzando del nastro adesivo di rame, creando così un collegamento fisico e garantendone la messa a terra.
4. Conclusa la parte di collegamento tra le basi e i campioni si è proceduto al loro fissaggio nella tavola del SEM. Ogni posizione della tavola è caratterizzata da un numero, quindi prima della chiusura della camera a vuoto sono state registrate le posizioni di ciascun campione in modo tale da riconoscerne il tipo una volta messo in opera il microscopio.

Utilizzando un'apposita strumentazione di controllo, collegata al computer di gestione del SEM, sono state effettuate le operazioni di messa a fuoco. In alcune immagini effettuate sono state riportate i dettagli delle misurazioni in modo tale da poter avere un primo confronto con le dimensioni nominali di progetto.

Per ogni tipologia di campione sono state ricavate immagini perpendicolari all'obbiettivo in grado di fornire una visione d'insieme del campione oltre alla possibilità di misurare, per mezzo software, alcune zone di interesse. Inoltre sono state raccolte un numero prefissato di immagini andando a modificare l'angolo di pendenza della tavola. In questo modo è stato possibile apprezzare la forma, profondità ed i difetti dei muretti nei campioni andando a variare l'ingrandimento delle immagini a seconda delle dimensioni geometriche superficiali.

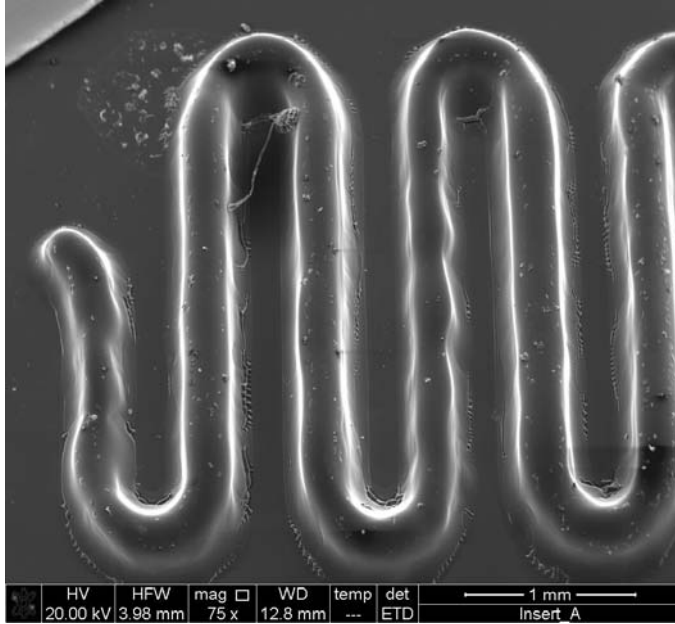


Figura 5.3: Esempio di scansione al SEM



Figura 5.4: Cold Sputtering Platform

5.3 PROFILOMETRO

Il profilometro è uno strumento di misura in grado di scansionare il profilo di una superficie e viene utilizzato generalmente per rilevare la rugosità. I profilometri si dividono in due grandi famiglie, i profilometri a contatto e i profilometri senza contatto.



Figura 5.5: Il profilometro Sensofar S Neox

I primi utilizzano uno stilo di diamante a contatto con la superficie del campione, molto utile nel caso in cui sia presente del particolato sulla superficie.

In questo lavoro è stato utilizzato un profilometro senza contatto che prende il nome di Sensofar S Neox. Il vantaggio principale è quello di poter scansionare un oggetto senza dover entrare in

contatto con esso, molto utile quando si devono misurare campioni fragili o di dimensioni contenute. Diversamente da un microscopio ottico che riceve istantaneamente l'onda riflessa dell'oggetto in misura, questo profilometro utilizza un fascio luminoso che andrà ad investire punto per punto la superficie in esame andando a ricostruire, a fine scansione, l'area di interesse. Il profilometro è stato utilizzato per la misurazione degli inserti e dei componenti stampati oltre alla misurazione degli elementi di prova necessari per verificare la bontà dello stampaggio 3D della OBJET350.

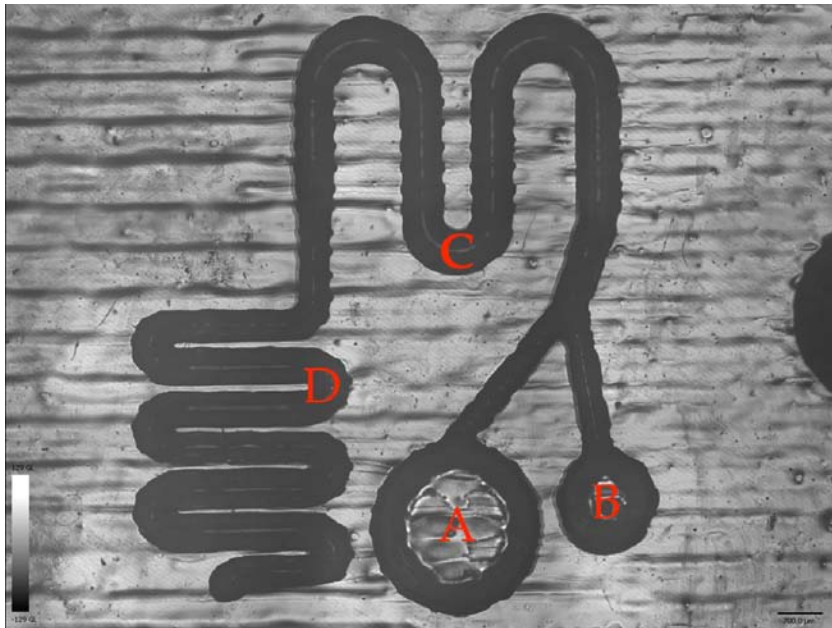


Figura 5.6: Posizionamento punti di controllo sulla geometria micro-strutturata dell'inserto

Prima di procedere alla scansione degli inserti e dei componenti stampati per micro-iniezione sono stati stabiliti, sulle superficie,

alcuni punti strategici di maggior interesse così da avere per ogni campione le misurazioni nei medesimi punti (Fig. 5.6).

La procedura per la scansione dei vari campioni, che ha validità generale, è stata la medesima:

1. Il campione è stato posto sopra la piastra di supporto e bloccato tramite plastilina in modo tale da evitare ogni minimo spostamento o vibrazione durante la movimentazione della tavola. Attraverso la rotazione della piastra si è allineato il bordo superiore del campione in modo tale da renderlo parallelo all'asse X del profilometro.
2. Agendo sulla manopola presente lungo la colonna sorreggi obiettivi si è regolato approssimativamente l'altezza lungo l'asse Z con l'accortezza di non avvicinare troppo l'obiettivo al campione per non incappare in pericolosi contatti.
3. Utilizzando l'obiettivo con ingrandimento più basso (2,5x) e posizionando il sistema di scansione al centro del campione è stata ricavata una prima immagine che andasse a coprire l'intera superficie da esaminare. In questo modo l'immagine ricavata è stata utilizzata come "mappa" nella fase successiva in quanto l'obiettivo, con ingrandimento superiore (20x), presentava delle difficoltà di posizionamento a causa del ridotto campo visivo dello stesso.
4. Prima di far partire l'analisi vera e propria è necessario portarsi nel punto di inizio scansione utilizzando una pulsantiera esterna con joystick per la movimentazione della piastra. Per le scansioni, in questo lavoro, è stato utilizzato

il metodo del *Focus Variation*, tecnologia sviluppata per la misurazione di grandi superfici ruvide. Il principale vantaggio di questo metodo è la velocità di acquisizione (mm/s). Esso quindi è in grado di elaborare, tramite *Stitching*, un'area relativamente vasta in poco tempo ottimizzando i tempi di acquisizione. Lo *Stitching* consiste nell'acquisizione di più immagini, una vicina all'altra con una certa percentuale di sovrapposizione stabilita a priori, subito elaborate via software, in modo da ottenere un'unica immagine dell'area desiderata. Questo ci permette di avere un'area da analizzare di maggiori dimensioni in grado di fornire una visione di insieme più accurata.

5. È necessario stabilire i punti estremi della scansione lungo l'asse *Z* andando ad agire manualmente sull'altezza dell'obiettivo. Questa operazione è fondamentale in quanto si definirà il range ΔZ all'interno del quale ci sarà l'acquisizione delle immagini da parte dell'obiettivo. Un ΔZ troppo ristretto provocherà la perdita di informazioni necessarie alla ricostruzione del profilo della superficie. Un ΔZ troppo elevato non comprometterà la misurazione ma ne aumenterà il tempo di acquisizione.

Dopo aver regolato luminosità, focus e *Speed Factor* è possibile iniziare la scansione. Lo *Speed Factor* ci permette di stabilire ogni quanti m, lungo l'asse *Z*, acquisire un'immagine. Aumentandone il valore aumenterà lo spazio tra un'immagine e l'altra. In questo modo si aumenterà la velocità di acquisizione complessiva ma si perderanno informazioni che potrebbero essere rilevanti. Queste considerazioni sono dovute in base al tipo di studio da effettuare.

Tabella 5.2: Caratteristiche profilometro Sensofar S Neox

Caratteristica	Valore	Unità
Massimo campo di visione	877x660	μm
Dimensione pixel sulla superficie	0,65	μm
Risoluzione ottica	0,31	μm
Misura confocale		
Risoluzione verticale	2	nm
Sistema movimentazione		
Risoluzione verticale	2	nm

5.5 ANALISI AL PROFILOMETRO

È stato utilizzato il software SensoSCAN per l'elaborazione e l'analisi delle scansioni effettuate sui diversi campioni. Dopo ogni misurazione il software genera un file *.plu* così da poter essere consultabile anche in un secondo momento.

Il software SensoSCAN permette di visionare la topografia del componente scansionato utilizzando tre diverse modalità di visualizzazione: *Confocal*, *Interferometric* e *Focus Variation*. In questo studio è stata utilizzata la modalità *Focus Variation*. Prima di iniziare l'analisi vera e propria sono state effettuate delle modifiche alla scansione grezza in modo da ricreare un profilo uniforme

dell'intera superficie. Il profilometro ha il limite di non poter rilevare perfettamente le pareti verticali lasciando nell'immagine post scansione dei vuoti che rende il tutto meno comprensibile. È stato utilizzato un comando apposito di riempimento, chiamato *Restore* con la quale è stato possibile ricostruire, in linea di massima, la geometria nel profilo nelle zone poste con un certo angolo rispetto al piano dell'obiettivo.

Per ogni punto di interesse, stabiliti in fase di progetto, sono state ricavate informazioni riguardanti altezza e larghezza dei muretti per gli inserti con geometria micro-strutturata e profondità e larghezza per i campioni ricavati dallo stampaggio ad iniezione. Dopo aver posizionato il piano di sezione nel punto desiderato, parallelo all'asse x o all'asse y a seconda della zona in esame, sono stati estrapolati i valori numerici del profilo attraverso la creazione di un file *.dat* contenente, in forma tabellare, punto per punto le informazioni sull'asse variabile e sull'asse Z. In questo modo è stato possibile ricostruire per via grafica il profilo della sezione.

Le informazioni ricavate dalle varie sezioni sono state successivamente elaborate tramite software Excel e comparate una con l'altra per un confronto diretto tra geometria micro-strutturata dell'inserto stampato per AM, lavorato o meno attraverso il centro di lavorazione a 5 assi, e la micro-struttura presente nel componente stampato per micro-iniezione.

Parte III

RISULTATI E DISCUSSIONI

RISULTATI DELLE CARATTERIZZAZIONI

La caratterizzazione degli inserti micro-strutturati, dei componenti successivamente stampati e degli elementi di prova utilizzati per analizzare l'effettiva accuratezza della stampante 3D Object350, è stata svolta con le modalità descritte nel capitolo 5, dove l'utilizzo del microscopio elettronico a scansione SEM e del profilometro Sensoscan S Neox, hanno permesso la visione di particolari punti e zone di interesse, garantendo uno studio dell'intero processo di produzione di inserti tramite AM, più profondo e dettagliato. La caratterizzazione è stata ottenuta in questo modo:

- la caratterizzazione degli elementi di prova e degli inserti realizzati ha avuto due distinte fasi. L'analisi al microscopio elettronico a scansione ha permesso di valutare l'estensione e le dimensioni della geometria micro-strutturata, focalizzando l'analisi sulle differenze tra le geometrie realizzate e le effettive dimensioni stabilite in fase di progetto e ricreate tramite software CAD. Successivamente i vari campioni sono stati analizzati tramite profilometro Sensoscan S Neox, con il quale è stato possibile eseguire un'analisi approfondita su altezza e profondità rispettivamente di muretti e canali realizzati.
- A causa del tempo molto elevato di acquisizione delle scansioni e del tempo di elaborazione dei dati ottenuti, è stata effettuata una cernita dei punti e delle zone da esaminare in ognuno dei componenti realizzati. Come mo-

strato in figura 5.6, sono state scelte delle porzioni di inserto che sono: i due elementi circolari nella parte inferiore, il canale a U superiore e la serpentina. Sono stati scelti questi elementi perché ritenuti più interessanti da un punto di vista strutturale e dimensionale.

Nei paragrafi successivi verranno analizzate separatamente le caratterizzazioni svolte su elementi di prova, inserti e componenti stampati. Oltre alla descrizione dei risultati ottenuti, verranno presentate le immagini, delle scansioni e delle elaborazioni, più rappresentative, in modo da poterne valutare direttamente l'uniformità e correttezza geometrica.

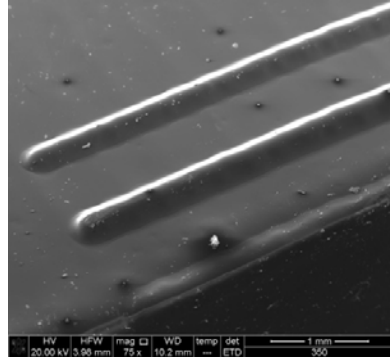
In conclusione sono riportati i risultati dell'analisi della forza di estrazione, attraverso un confronto tra inserto nominale, prodotto tramite AM, ed inserto ripreso tramite micro-fresatura.

6.1 CARATTERIZZAZIONE AM

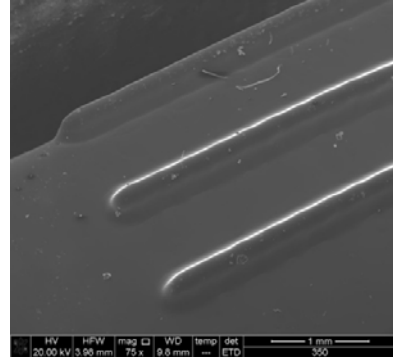
Per ogni elemento di prova utilizzato (il valore dell'*aspect ratio* è stato fissato a 3 portando il muretto ad un'altezza di tre volte il suo spessore), sono state eseguite due scansioni: la prima perpendicolare alla superficie superiore dell'elemento e la seconda inclinando l'elemento di prova, utilizzando la tavola di movimentazione, rispetto all'obiettivo, per apprezzarne lo sviluppo lungo l'asse Z. Le immagini acquisite al SEM sono riportate in Figura 6.1 e 6.2, ed evidenziano fin da subito i limiti di produzione derivanti dallo stampaggio 3D. I muretti presentano, più o meno mar-

catamente, un cedimento provocato dal rilassamento del materiale in fase di stampaggio, rilassamento che comporta l'arrotondamento di tutti gli spigoli vivi oltre che della congiunzione tra muretto e base del provino. A causa di questo fenomeno la geometria micro strutturata risulta compromessa rispetto alle dimensioni nominali. Nell'elemento di prova con muretti più piccoli, di spessore $100\ \mu\text{m}$, si può notare come l'altezza della struttura non venga conservata in tutta la sua interezza e risulti profondamente schiacciata. Al contrario nell'elemento avente dimensione maggiore, con spessore da $350\ \mu\text{m}$, i muretti hanno mantenuto una certa rigidità strutturale, andando a rappresentare, in parte, la geometria nominale stabilita in fase di progetto. Le misurazioni effettuate sono state calcolate con un certo margine di errore in quanto la mancanza di uno spigolo vivo completamente formato, e quindi di un punto di riferimento ben definito, ha reso il procedimento più complesso e meno preciso. L'estremità del muretto è rappresentativa dell'intero fenomeno di arrotondamento delle superfici, in quanto si può notare come non ci sia una geometria ben definita a causa del rammollimento della struttura. Risulta marcato il parallelismo tra i muretti in tutte le configurazioni dimensionali realizzate, mentre nei muretti aventi dimensioni maggiori di $200\ \mu\text{m}$, si può apprezzare la perpendicolarità della parete rispetto alla base del provino. Le zone che risultano più critiche sono in corrispondenza delle estremità dei muretti, dove la rotondità delle forme è più pronunciata.

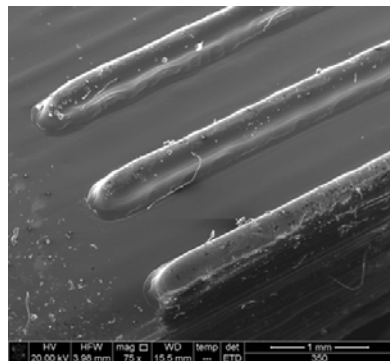
Le misurazioni effettuate dimostrano come lo spessore del muretto venga rispettato solo dalle strutture con dimensioni maggiori di $200\text{-}250\ \mu\text{m}$. Al di sotto il materiale non riesce ad avere una consistenza tale, e quindi formare una base adeguata, per sostenere il proprio peso.



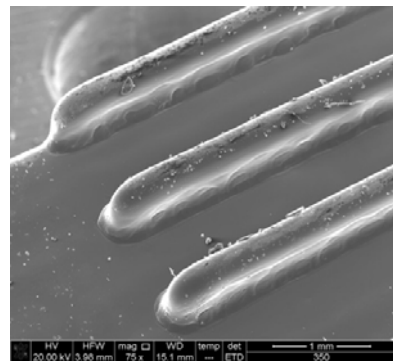
(a) Muretto 100 x3



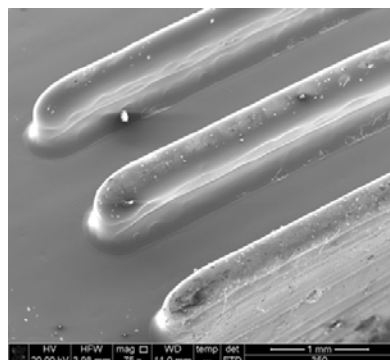
(b) Muretto 150 x3



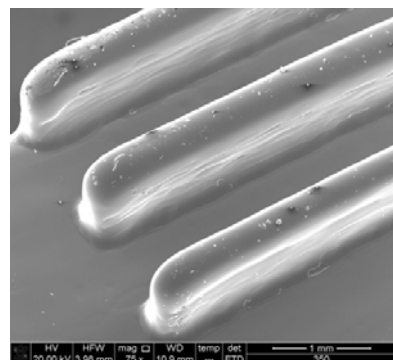
(c) Muretto 200 x3



(d) Muretto 250 x3

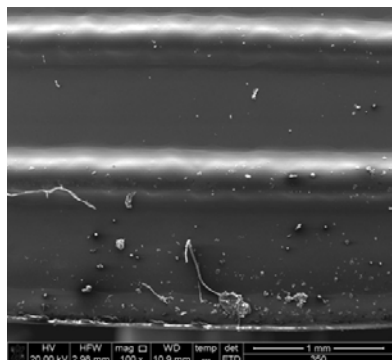


(e) Muretto 300 x3

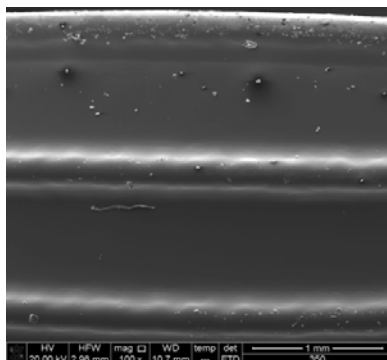


(f) Muretto 350 x3

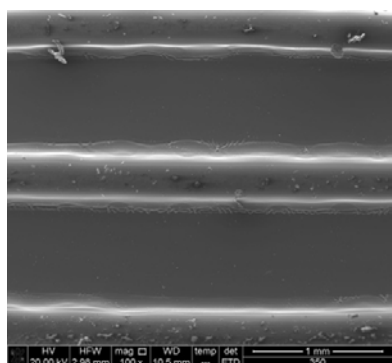
Figura 6.1 Immagini acquisite al SEM per gli elementi di prova



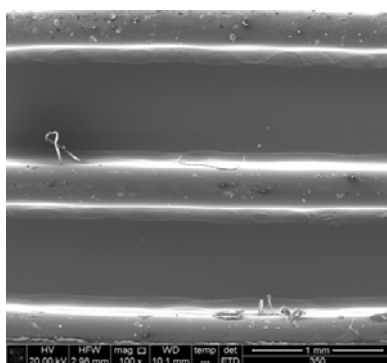
(g) Muretto 100 x3



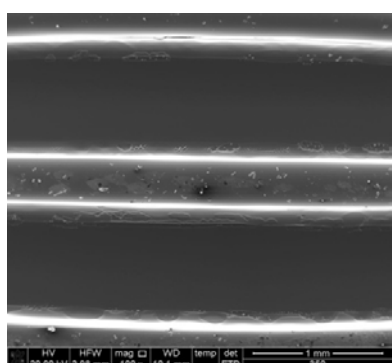
(h) Muretto 150 x3



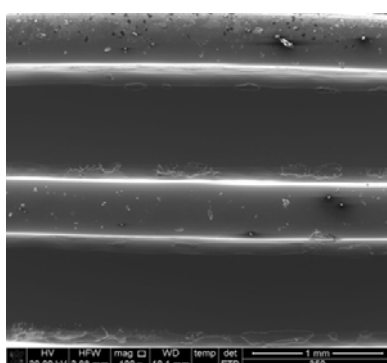
(i) Muretto 200 x3



(l) Muretto 250 x3



(m) Muretto 300 x3



(n) Muretto 350 x3

Figura 6.2: Immagini acquisite al SEM per gli elementi di prova

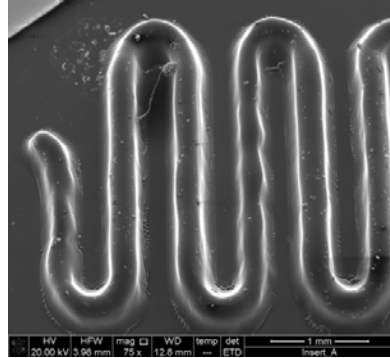
Tabella 6.1: Dimensioni principali degli elementi di prova

Elemento di prova	W(μm)	H(μm)	Aspect Ratio
100	100	100	1
150	150	150	1
200	200	200	1
250	250	250	1
300	300	300	1
350	350	350	1
100 x3 (a) (g)	100	300	3
150 x3 (b) (h)	150	450	3
200 x3 (c) (i)	200	600	3
250 x3 (d) (l)	250	750	3
300 x3 (e) (m)	300	900	3
350 x3 (f) (n)	350	1050	3

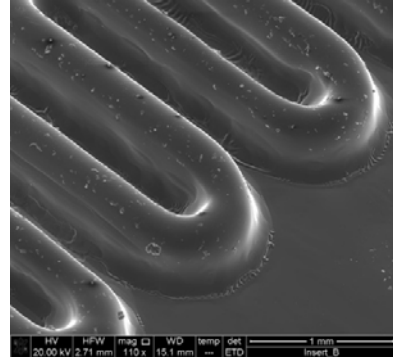
6.2 GLI INSERTI

Utilizzando il microscopio elettronico a scansione SEM sono stati analizzati i vari inserti stampati tramite la stampante 3D Object350. Gli inserti esaminati, uno per ogni tipologia di micro struttura progettata, presentano i medesimi fenomeni morfologici ritrovati nei muretti appartenenti agli elementi di prova, descritti nel paragrafo precedente. La geometria del chip micro-fluidico è stata scelta in modo tale da avere in uno stesso disegno più forme e spessori differenti, mantenendo un'altezza uniforme, per ottimizzare e velocizzare lo studio di questi componenti. Si può notare come questo aspetto progettuale sia messo in risalto dalla

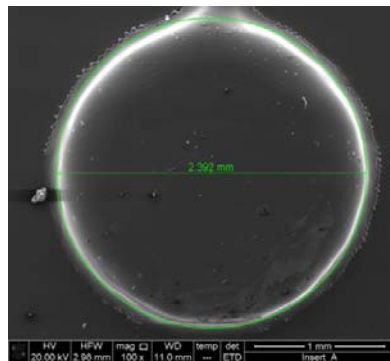
Fig. 6.3 (f) dove lo spessore dei muretti nella biforcazione, $100\ \mu\text{m}$, è la metà dello spessore del muretto singolo precedente, $200\ \mu\text{m}$. A causa di questa differenza di spessore l'altezza dei muretti nella biforcazione assume un valore minore rispetto al muretto che la precede. La mancanza di una superficie più ampia di appoggio per il materiale depositato dalla testa stampante ne ha portato l'inesorabile cedimento strutturale, accentuando l'arrotondamento dell'intera sezione. Il canale a U, posizionato nella parte superiore centrale del disegno, mantiene in gran parte la sua geometria nominale, ricreando con accuratezza il percorso desiderato. L'altezza del muretto viene rispettata, con un certo margine di errore, per poi calare drasticamente ai bordi. Segue apparentemente una buona perpendicolarità della parete esterna ed un ulteriore arrotondamento nella parte inferiore, dove il muretto si congiunge con la superficie del provino. La morfologia completa in sezione del muretto sarà esaminata successivamente attraverso il profilometro. Interessanti sono le formazioni "palmate" che si presentano alla base di alcuni muretti e degli elementi circolari, le quali potrebbero avere particolare importanza durante l'estrazione nello stampaggio ad iniezione, potendo fornire un punto di aggancio, all'inserto, per il materiale iniettato. Tale eventualità non sarà trattata in questo studio ma potrebbe risultare rilevante negli sviluppi futuri. La misura degli elementi circolari è risultata soddisfacente, avendo misurato un diametro pari a $2,392\ \text{mm}$ per il particolare A e $1,297\ \text{mm}$ per il particolare B ove la dimensione nominali sono rispettivamente di $2,4\ \text{mm}$ e $1,3\ \text{mm}$. Questa misura è stata effettuata nella parte superiore degli elementi, dove la mancanza di un contorno circonferenziale definito può aver provocato un certo errore di misurazione. La valutazione non tiene conto dell'aumento dimensionale, alla base, prodotto dal rilassamento del materiale.



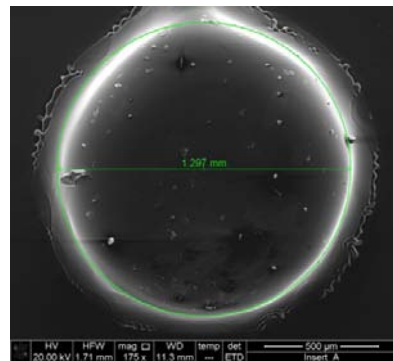
(a) *Serpentina*



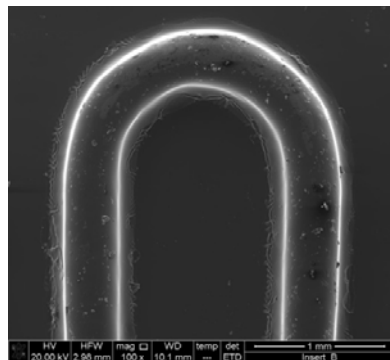
(b) *Particolare D*



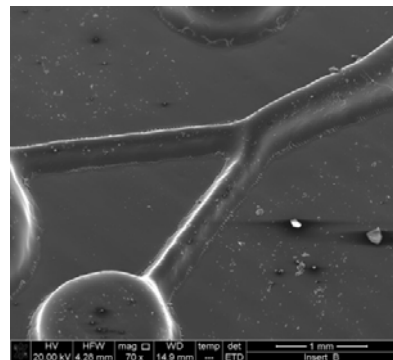
(c) *Particolare A*



(d) *Particolare B*



(e) *Particolare C*



(f) *Biforcazione*

Figura 6.3: Immagini acquisite al SEM per l'inserto

Tabella 6.2: Valori di altezza e spessore dei particolari.

Particolare	Valore	NOMINALE	Differenza	Unità
A	552	600	48	μm
B	551	600	49	μm
C	548	600	52	μm
D	317	600	283	μm
Spessore lungo X				
A	2548	2400	148	μm
B	1355	1300	55	μm
C	770	300	470	μm
D	515	150	365	μm

Sia l'inserto nominale, stampato per AM e utilizzato direttamente all'interno dello stampo per lo stampaggio ad iniezione, e sia l'inserto con geometria maggiorata, lavorato per micro-fresatura con il centro di lavorazione a 5 assi, sono stati analizzati al profilometro prima e dopo il loro utilizzo.

L'inserto nominale presenta una geometria micro-strutturata che va a discostarsi di molto rispetto al modello CAD sviluppato in fase di progetto. Viene conservata la linea generale del chip micro-fluidico, essendo stata replicata la fisionomia del modello CAD, ma il processo di stampaggio 3D non possiede la capacità, in questo caso, di replicare fedelmente la morfologia a spigoli vivi del modello. Come già verificato durante l'utilizzo del microscopio elettronico a scansione, il cedimento della struttura è evidente nelle zone adiacenti al punto di incontro tra muretto e superficie dell'inserto. In questa zona vi è una concentrazione di materiale dovuta al rammollimento della struttura nella parte più esterna del muretto, probabilmente provocato dalle dimensioni ridotte dello spessore dello stesso. Come diretta conseguenza a questo fenomeno, l'altezza del muretto non viene rispettata rendendo

l'intera geometria più bassa rispetto all'altezza stabilita in fase di progetto.

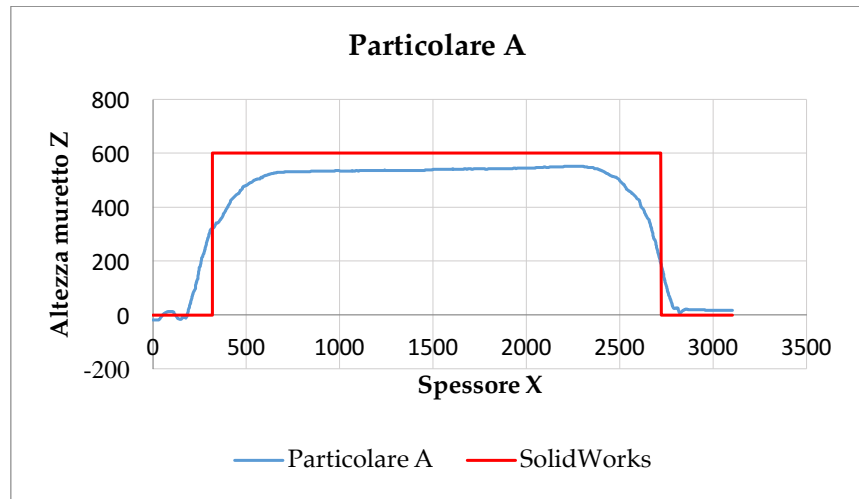


Figura 6.4: Grafico altezza-spessore – Insetto nominale - A

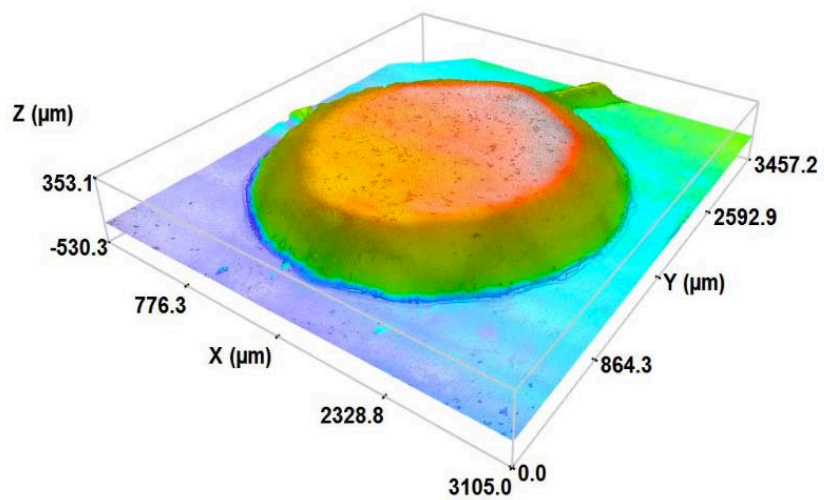


Figura 6.5: Elemento circolare – Insetto nominale - A

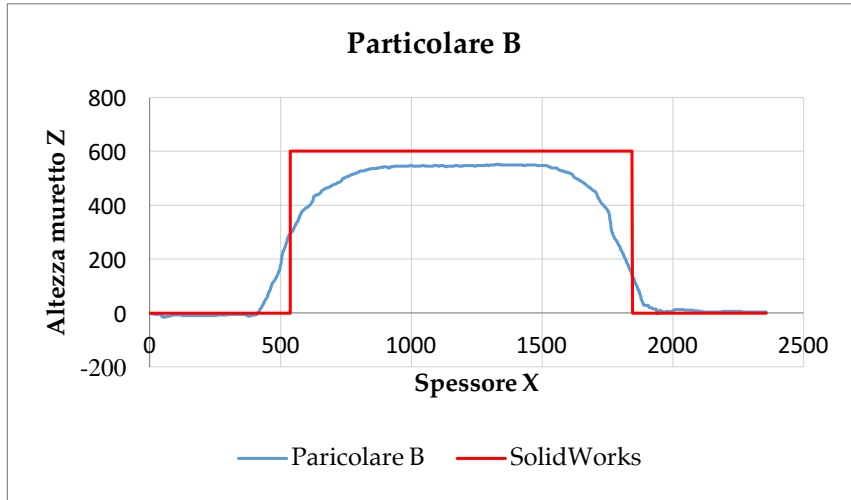


Figura 6.6: Grafico altezza-spessore – Inserto nominale - B

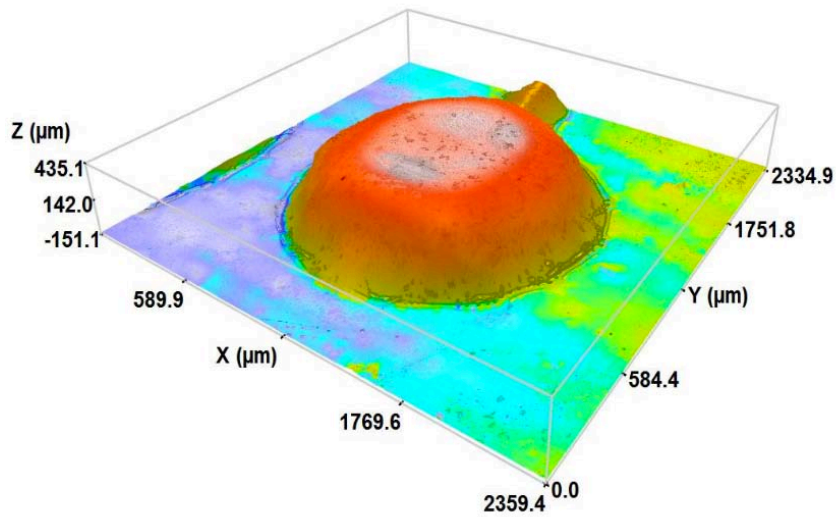


Figura 6.7: Elemento circolare – Inserto nominale - B

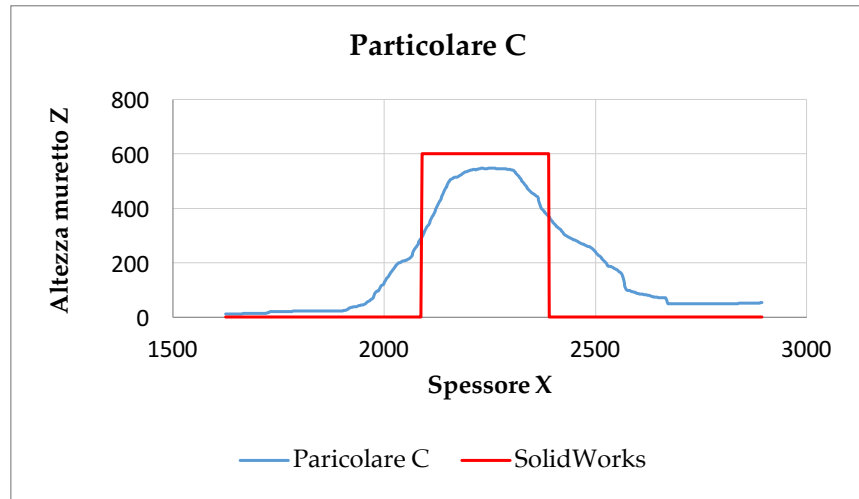


Figura 6.8: Grafico altezza-spessore – Inserto nominale - C

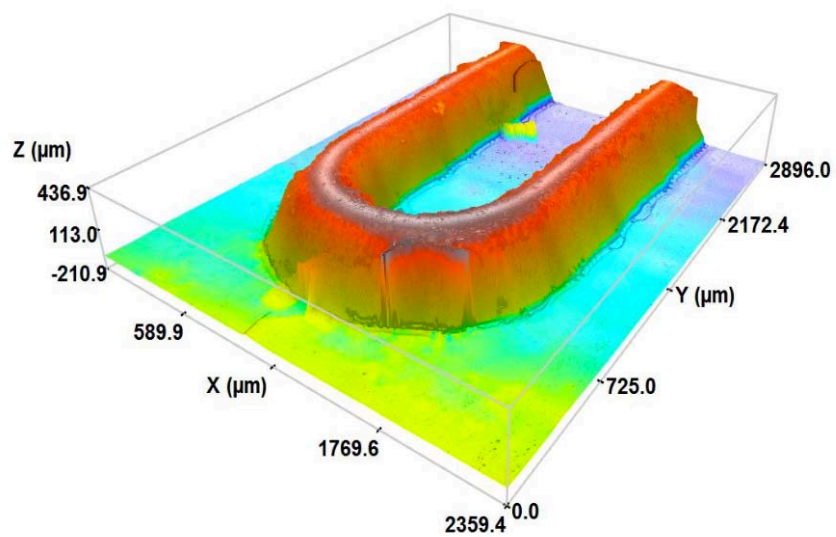


Figura 6.9: Elemento a U – Inserto nominale - C

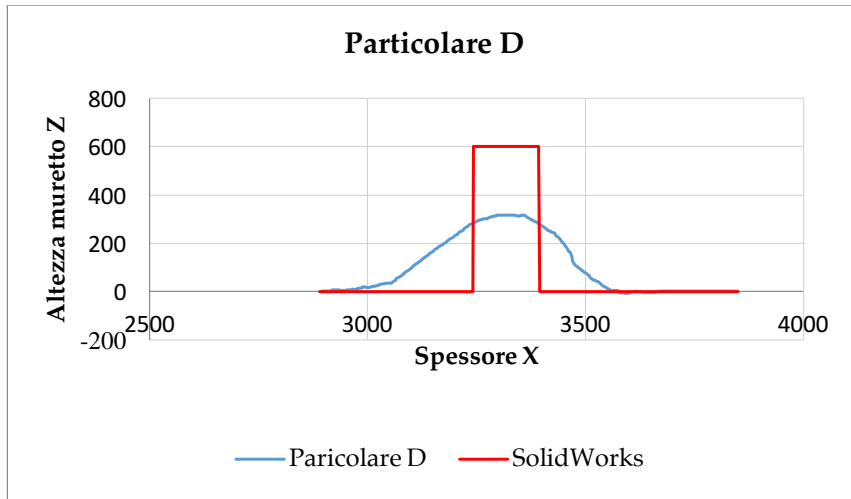


Figura 6.10: Grafico altezza spessore – Inserto nominale - D

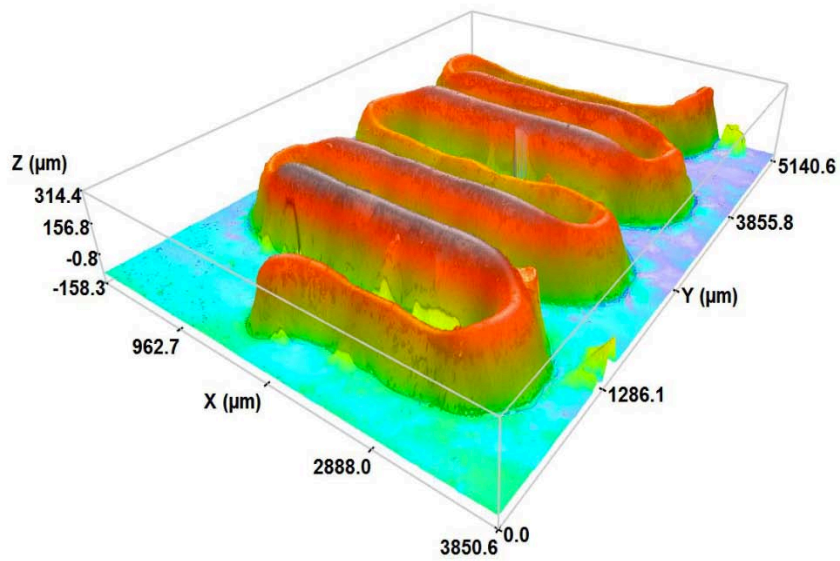


Figura 6.11: Serpentina – Inserto nominale - D

Come si può notare dalle figure precedenti, elaborate tramite software SensoSCAN, le altezze dei muretti e degli elementi circolari non vengono rispettate e divergono da quelle stabilite nel modello CAD in ognuno dei particolari. Oltretutto il rilassamento del materiale alla base supera il limite imposto dal modello producendo uno spessore di molto maggiore rispetto a quello nominale. Questo fenomeno si può riscontrare soprattutto nei particolari C e D, dove lo spessore dei muretti alla base risulta molto marcato. Il particolare D soffre maggiormente di questo fenomeno a causa dello spessore ridotto del muretto stabilito a 150 μm .

L'inserto lavorato tramite micro-fresatura presenta una geometria nettamente migliore rispetto all'inserto stampato direttamente per AM. La superficie micro-strutturata possiede le caratteristiche volute in fase di progetto, mantenendo le dimensioni di altezza e spessore senza presentare cedimenti o rottura dei muretti. Questo è dovuto soprattutto alla buona capacità del materiale utilizzato, il Digital ABS, nel resistere adeguatamente alla lavorazione a cui è stato sottoposto. Attraverso l'elaborazione software sono stati ricavati i grafici rappresentati le varie sezioni dei muretti e degli elementi a disco in modo da analizzare l'effettiva morfologia della struttura. In questo caso vengono mantenuti, nella parte superiore del muretto, i profili degli spigoli vivi diversamente da quanto accaduto nell'inserto nominale. Durante la progettazione di questo inserto dedicato alla micro-fresatura, è stato tenuto in considerazione il fenomeno di cedimento strutturale del materiale derivante dallo stampaggio 3D. Proprio per questo è stato progettato con una geometria maggiorata tale da permettere sia un decadimento dell'intera struttura ma tale da permettere una successiva lavorazione come mostrato dai grafici in Figura 6.21-22. Quest'analisi ha confermato le precauzioni geometriche prese in fase di sviluppo.

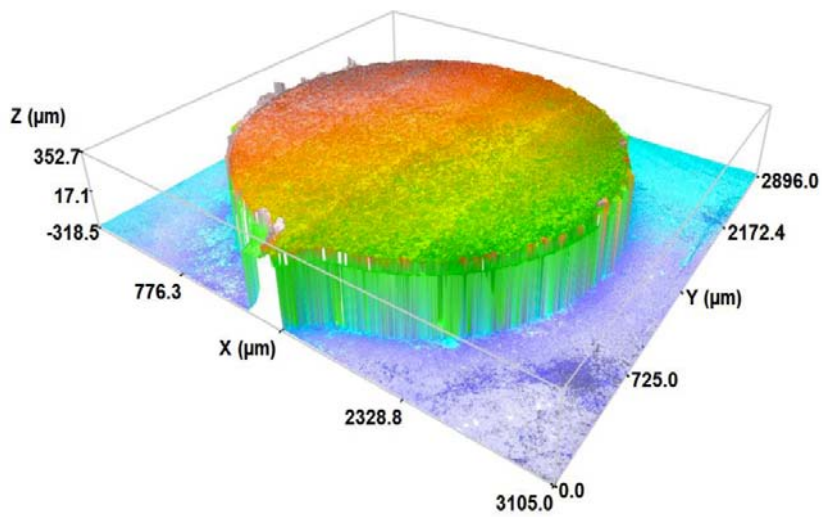


Figura 6.12: Elemento circolare – Insetto micro-fresato - A

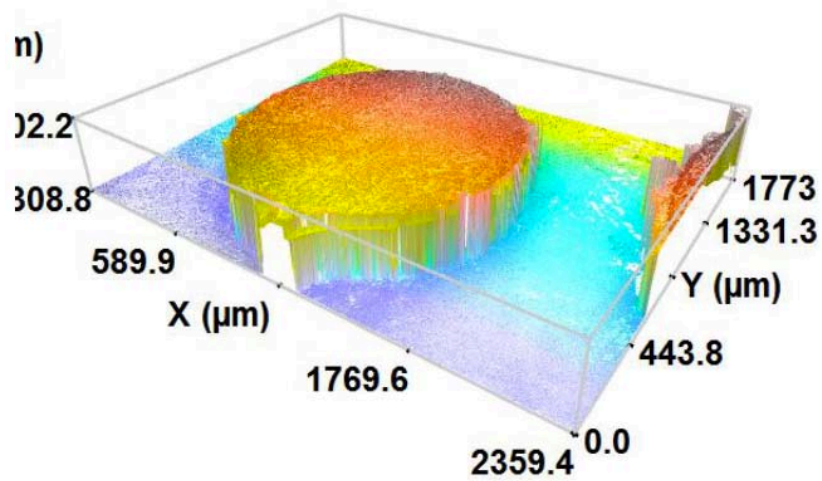


Figura 6.13: Elemento circolare – Insetto micro-fresato - B

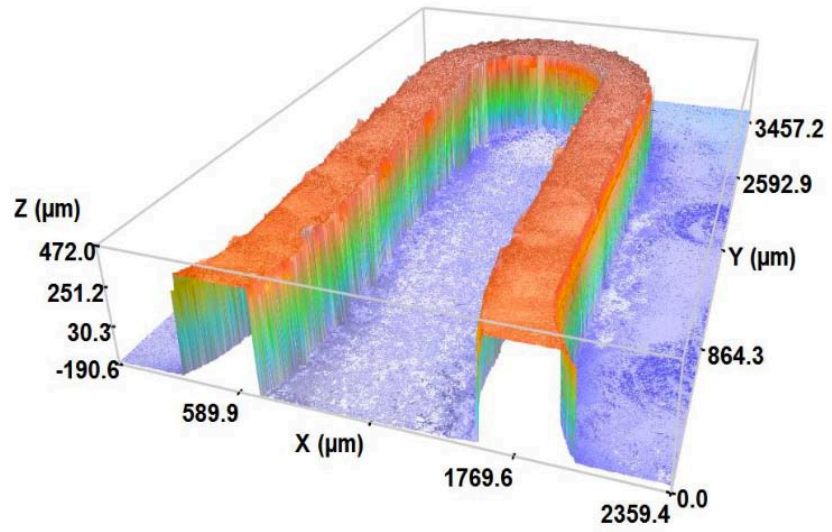


Figura 6.14: Elemento a U – Inseto micro-fresato - C

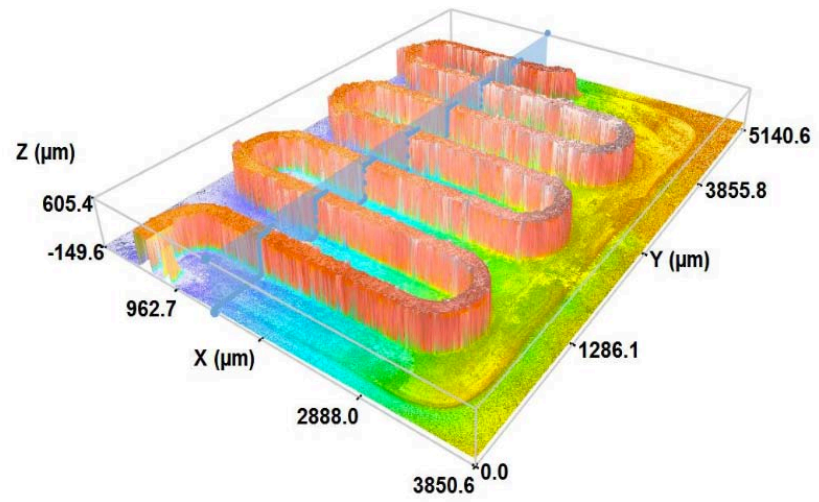


Figura 6.15 Serpentina – Inseto micro-fresato - D

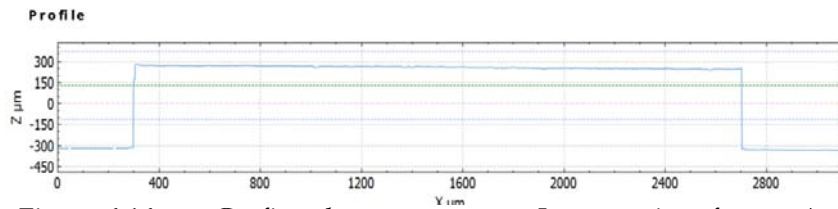


Figura 6.16: Grafico altezza-spessore – Inserto micro-fresato A

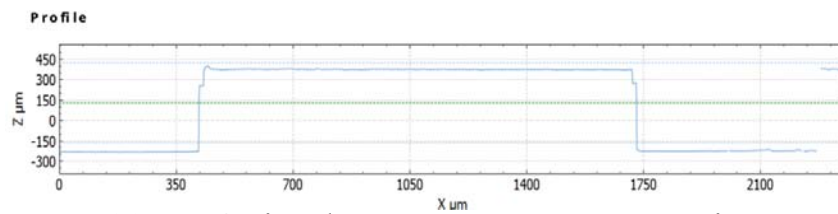


Figura 6.17: Grafico altezza-spessore – Inserto micro-fresato B

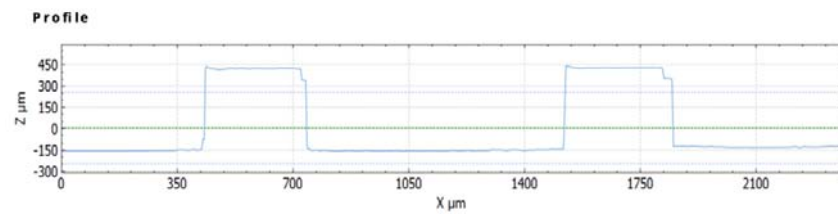


Figura 6.18: Grafico altezza-spessore – Inserto micro-fresato C

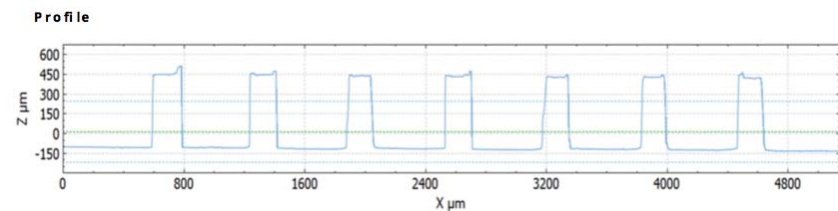


Figura 6.19: Grafico altezza-spessore – Inserto micro-fresato D

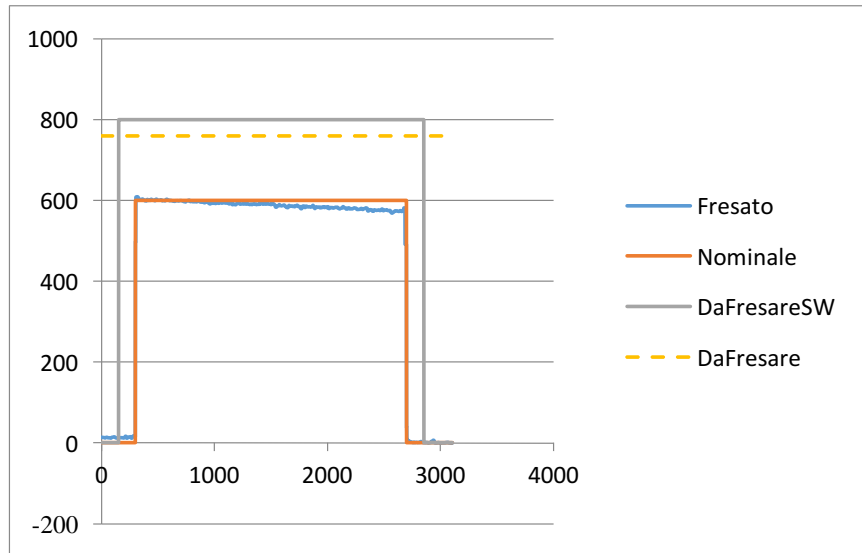


Figura 6.20: Grafico di confronto per inserto maggiorato zona A

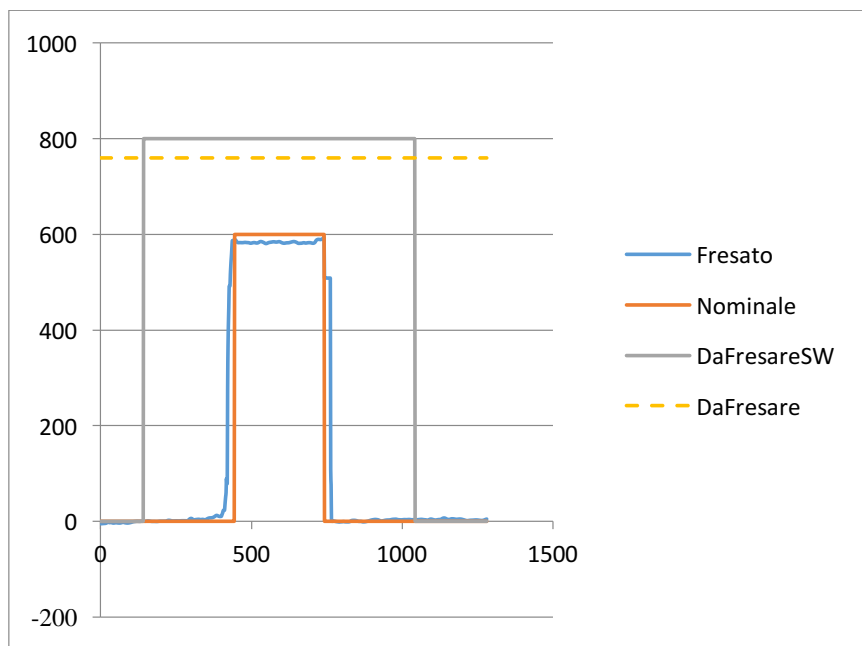


Figura 6.21: Grafico di confronto per inserto maggiorato zona C

6.2.1 GLI INSERTI DOPO LO STAMPAGGIO AD INIEZIONE

L'inserto nominale, direttamente stampato per AM, e l'inserto lavorato tramite micro-fresatura, dopo essere stati utilizzati per lo stampaggio ad iniezione, sono stati nuovamente scansionati attraverso il profilometro per verificarne l'integrità strutturale.

L'inserto nominale non ha riportato, superficialmente, danneggiamenti d'area o in punti particolari. Sono stati scansionati i particolari decisi in fase di progetto e confrontati con i dati ricavati dalle scansioni precedenti, effettuate prima del suo utilizzo in macchina. Come riportato in Tabella 6.3, le differenze di altezza nei vari particolari non risultano importanti e l'intero andamento non fa pensare ad una usura marcata dell'intera struttura micro-strutturata oltre che nella superficie stessa dell'inserto. La morfologia della geometria micro-strutturata può aver favorito la diffusione del fuso all'interno del materiale, andando ad agire in minima parte contro le pareti dei muretti. Questo fenomeno, oltre alla bassa velocità di iniezione e ai parametri di processo utilizzati tenuti al minimo indispensabile, ha probabilmente assicurato una vita maggiore all'inserto permettendogli di produrre una buona quantità di pezzi.

Tabella 6.3: Confronto altezza dell'inserto nominale prima e dopo lo stampaggio ad iniezione

Particolare	Prima	Dopo	Nominale	Unità
A	552	550	600	μm
B	552	553	600	μm
C	548	547	600	μm
D	317	320	600	μm

L'inserto lavorato tramite micro-fresatura ha prodotto 12 pezzi in totale, registrando i primi cedimenti strutturali dopo 5 pezzi prodotti. La zona corrispondente al particolare D, la serpentina, è stata la prima ad essere colpita dalla rottura della geometria micro-strutturata andando a compromettere la funzionalità del pezzo finale. A questo punto si è deciso di continuare con il processo di stampaggio ad iniezione per analizzare gli altri particolari presi in esame. Successivamente hanno ceduto completamente le due curve a U poste ai lati del particolare C nella parte superiore, la forcella e per ultimi parte degli elementi circolari A e B. Analizzando l'orientamento dell'inserto, all'interno dello stampo porta-inserto, si può notare come le zone colpite dalla rottura precoce dei muretti sono risultate essere quelle ortogonali alla direzione del fuso all'interno della cavità. Il particolare C ha resistito per tutta la durata di utilizzo dell'inserto probabilmente grazie alla geometria a U del muretto, con la "base" rivolta verso la direzione di provenienza del fuso, in modo da poterne smorzare l'effetto tagliente. I muretti a U ai lati del particolare C e geometricamente identici a quest'ultimo, accogliendo in maniera diretta gran parte del fuso, hanno subito l'effetto tagliente provocato dalla diffusione del materiale non riuscendo a contrastarla ed a rimanere integri. L'altezza del particolare C e degli elementi circolari A e B, nelle zone integre, non ha subito variazione rispetto alla caratterizzazione precedente allo stampaggio ad iniezione, rimanendo in linea con i dati riscontrati nella scansione dell'elemento nominale. I parametri di processo utilizzati per lo stampaggio ad iniezione sono stati i medesimi utilizzati durante l'uso dell'inserto nominale.

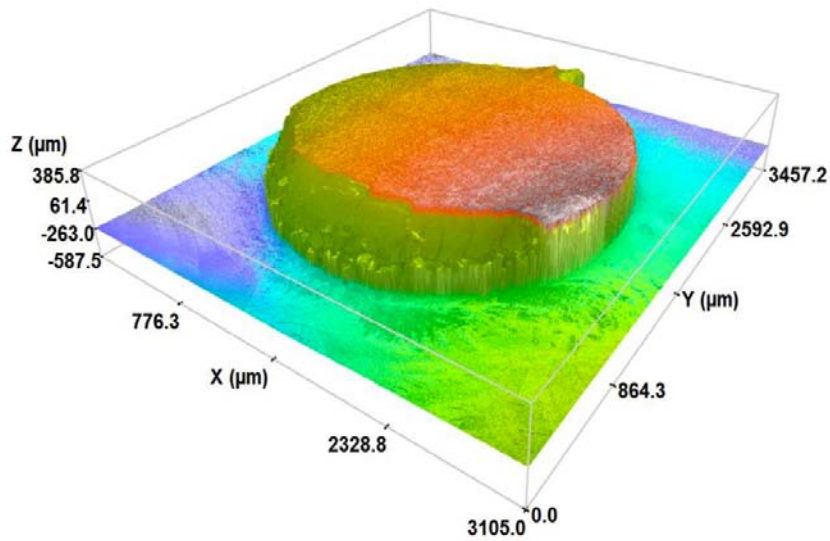


Figura 6.22: Elemento circolare – Insetto micro-fresato post stampaggio ad iniezione - A

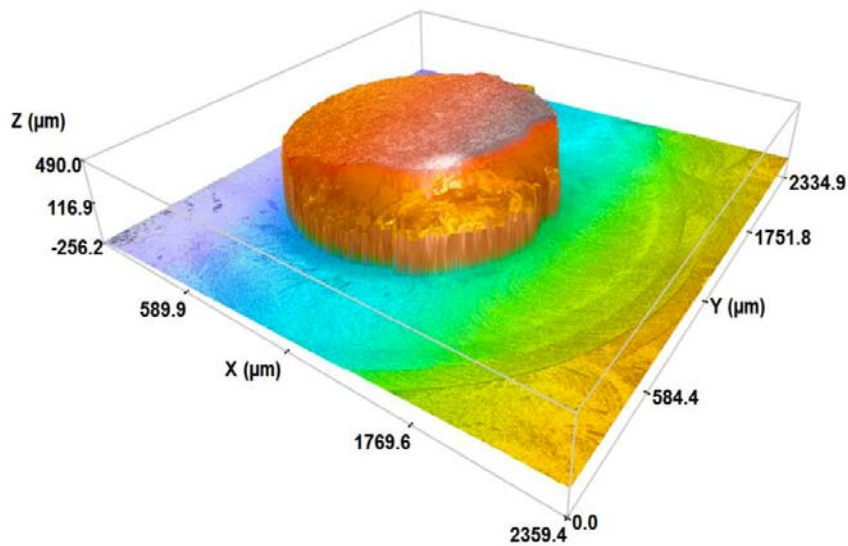


Figura 6.23: Elemento circolare – Insetto micro-fresato post stampaggio ad iniezione - B

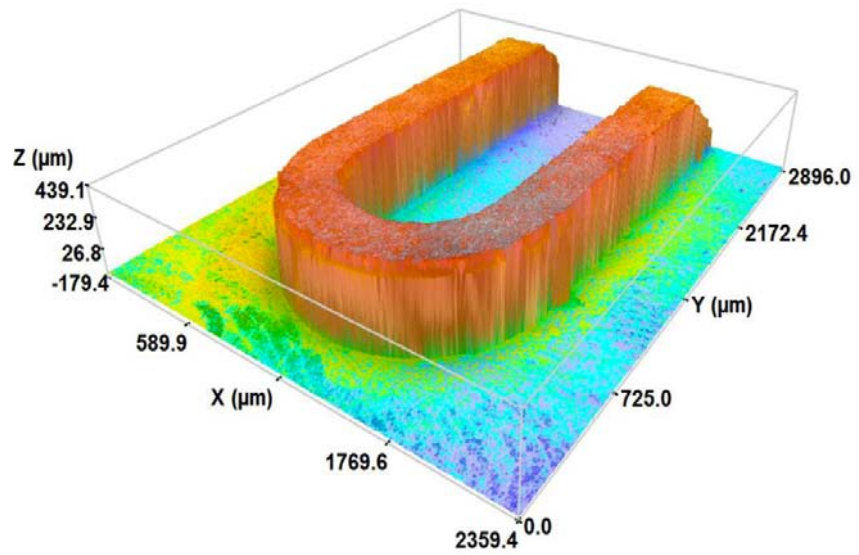


Figura 6.24: Elemento a U – Insetto micro-fresato post stampaggio ad iniezione - C

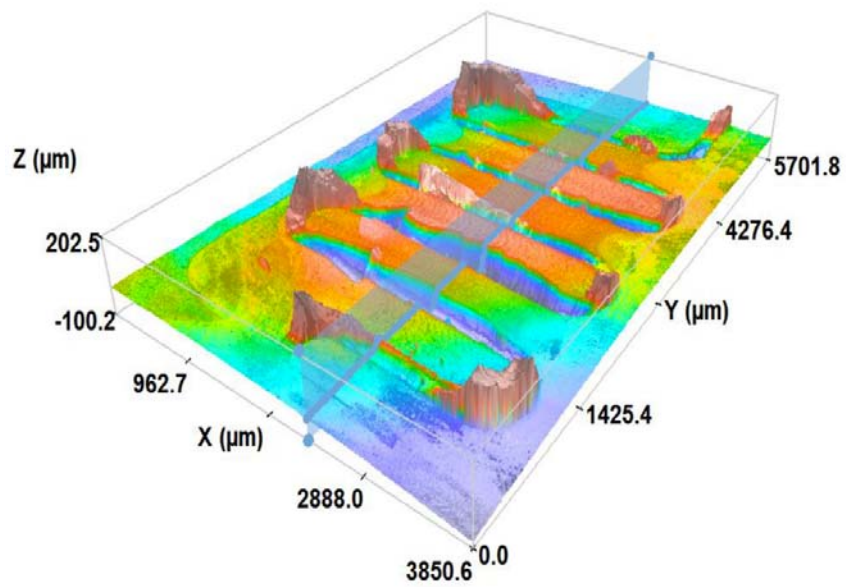


Figura 6.25: Serpentina – Insetto micro-fresato post stampaggio ad iniezione - D

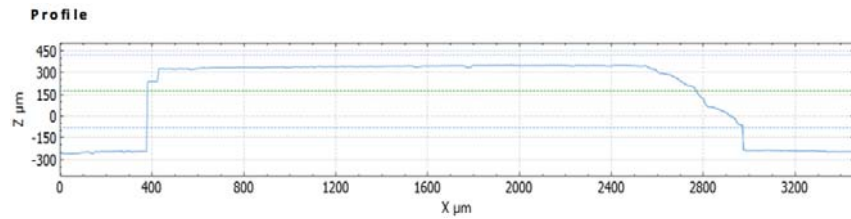


Figura 6.26: Grafico altezza-spessore – Insetto micro-fresato post stampaggio ad iniezione - A

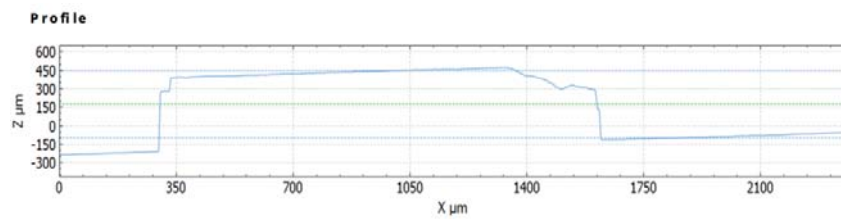


Figura 6.27: Grafico altezza-spessore – Insetto micro-fresato post stampaggio ad iniezione - B

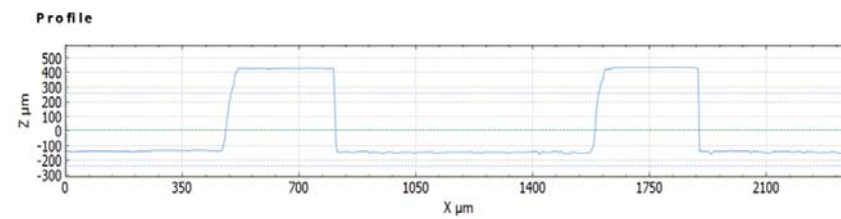


Figura 6.28: Grafico altezza-spessore – Insetto micro-fresato post stampaggio ad iniezione - C

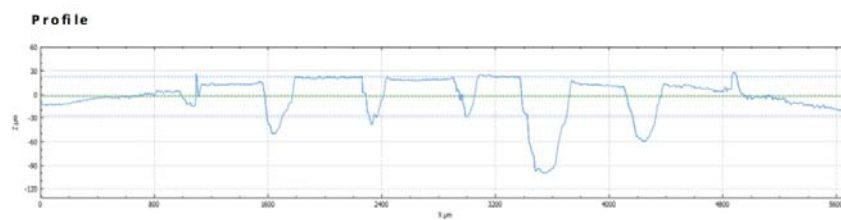


Figura 6.29: Grafico altezza-spessore – Insetto micro-fresato post stampaggio ad iniezione - D

6.3 I COMPONENTI STAMPATI

I componenti stampati tramite micro-stampaggio ad iniezione sono stati esaminati al profilometro per verificarne la corretta replicazione in modo da stabilire la bontà dell'inserto prodotto tramite AM e dell'inserto lavorato tramite micro-fresatura.

Diversamente da quanto svolto nella caratterizzazione degli inserti e degli elementi di prova, i componenti stampati non sono stati esaminati attraverso il microscopio elettronico a scansione in quanto avrebbero richiesto un maggior dispendio di tempo oltre al fatto che tale caratterizzazione non perseguiva gli stessi obiettivi svolti precedentemente. Lo scopo dell'analisi dei componenti stampati perseguiva il fine di:

- Verificare la corretta replicazione della superficie micro-strutturata;
- Verificare l'effettiva usura dell'inserto utilizzato.

Vista la natura degli inserti prodotti il rischio di danneggiare la micro-struttura, a causa del riempimento della cavità durante l'iniezione, era molto elevato e quindi sono state prese delle precauzioni andando ad utilizzare dei parametri di processo che rendessero minime le possibilità di usura precoce dell'inserto. L'ottimizzazione del processo di stampaggio ad iniezione non è stato analizzato profondamente in quanto non pertinente allo scopo finale di questo lavoro, pertanto sono stati scelti dei valori tali da rendere possibile la replicazione cercando un compromesso tra un ottimo riempimento e un tempo di ciclo adeguato. Si è pertanto deciso di esaminare gli eventuali componenti prodotti, eventuali in quanto la resistenza dell'inserto non era scontata, dopo un certo numero, stabilito via via durante la produzione in base ai pezzi realizzati. Per un confronto diretto con gli inserti, i

componenti stampati sono stati analizzati al profilometro rispettando le zone e i punti caratterizzati precedentemente, ricercati per un'acquisizione ottimale. In questo modo è stato possibile l'analisi dimensionale contrapposta tra l'altezza dei muretti e la profondità dei canali, oltre a determinare l'usura dell'inserto durante l'intero ciclo di produzione. Nei grafici esposti successivamente la contrapposizione tra sommità del muretto e fondo del canale è stata rielaborata per una visione di insieme più diretta andando a ribaltare di 180° le misurazioni dei componenti stampati.

L'inserto nominale, stampato per AM ed utilizzato direttamente in macchina per il micro-stampaggio ad iniezione, è stato utilizzato per la produzione di 300 componenti in polistirene (*Total PS crystal 1540*). Questo ha permesso di stabilire un intervallo piuttosto ampio per la scelta dei campioni da analizzare come descritto nel precedente capitolo.

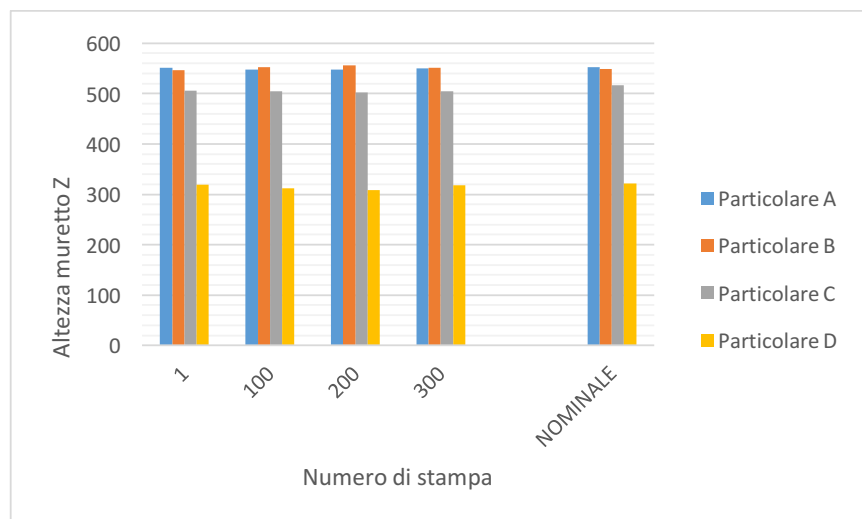


Figura 6.30: Grafico di confronto tra altezza muretti componenti stampati con inserto nominale

Come si può vedere dal grafico di Figura 6.30, dove sono confrontate le misure di profondità dei canali dei componenti stampati, per il primo, centesimo, duecentesimo e trecentesimo pezzo, con l'altezza dei muretti nell'inserto nominale nei vari particolari considerati, lo scostamento dal valore nominale risulta essere minimo, dimostrando l'effettiva resistenza di questo tipo di inserto e la corretta replicazione nel proseguire delle stampe.

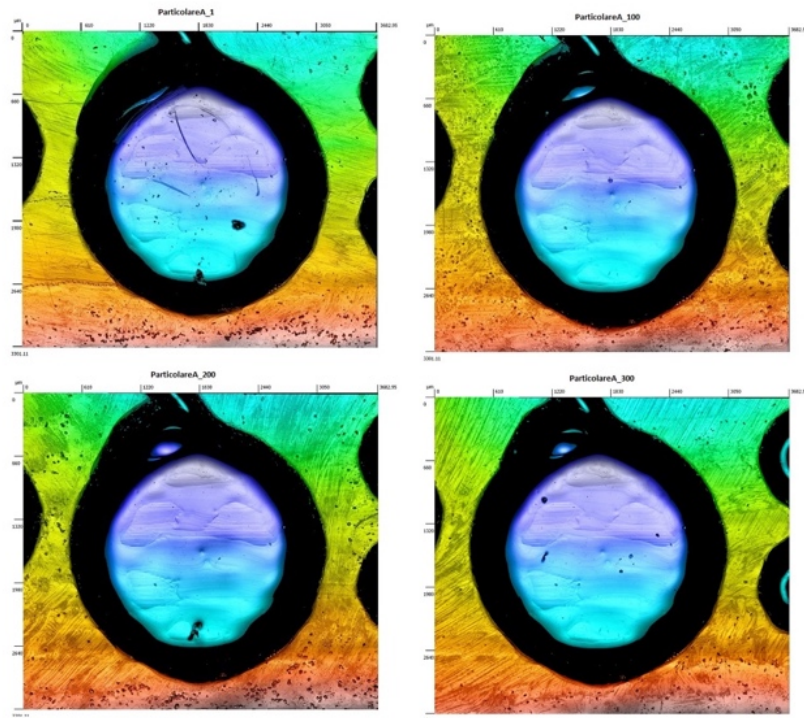


Figura 6.31: Particolare A nei componenti stampati

La Figura 6.31 mostra l'evoluzione geometrica dell'elemento circolare A nei vari intervalli presi in considerazione. Nella parte superiore sinistra è presente un'imperfezione modesta in contrasto con la geometria circolare dell'elemento che va ad evolvere, accentuandosi nel proseguire delle stampe. Questo può essere

provocato da una non ottimale fase di riempimento o da una imperfezione della superficie dell'inserto. Le zone più scure, all'interno dell'immagine, mostrano i limiti della caratterizzazione al profilometro non riuscendo a scansionare la superficie arrotondata dell'elemento circolare che sarà comunque ricostruita approssimativamente come descritto nel paragrafo 5.5.

I componenti stampati utilizzando l'inserto lavorato tramite micro-fresatura risultano nel complesso migliori rispetto ai precedenti. Come si può vedere nelle figure sottostanti, la geometria micro-strutturata è stata replicata in buona parte in tutti i particolari esaminati. Nel particolare C (Fig. 6.34) si può notare come non ci sia stato un completo riempimento della cavità, lasciando la zona finale interna della curva parzialmente vuota. Questo fenomeno si può notare, in maniera meno pronunciata anche nel particolare D (Fig. 6.35) dove le zone interne della serpentina, tra un canale e il successivo, non sono state completamente riempite. Questi difetti possono essere stati causati da una fase di riempimento non ottimale provocata da una velocità troppo bassa di iniezione, da una temperatura troppo bassa dello stampo, da una pressione di riempimento troppo bassa o da una quantità di materiale non perfettamente dosata. Le pareti dei canali risultano essere ben definite e in direzione perpendicolare alla base del componente oltre a mostrare un ottimo parallelismo in tutta la serpentina. La profondità e lo spessore dei canali è oltremodo rispettata come dimostra il grafico in Figura 6.39 dove viene riportato il profilo della serpentina in sezione per apprezzarne più adeguatamente la morfologia.

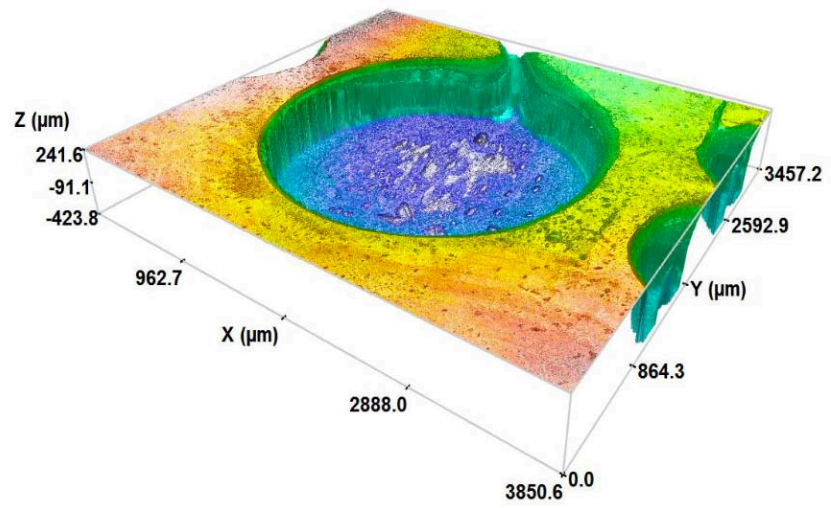


Figura 6.32: Elemento circolare – Componente stampato da inserto fresato - A

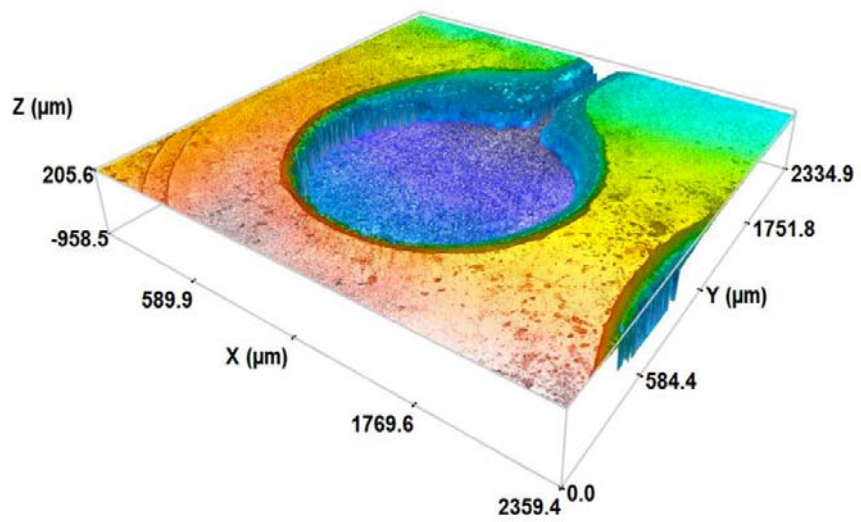


Figura 6.33: Elemento circolare – Componente stampato da inserto fresato - B

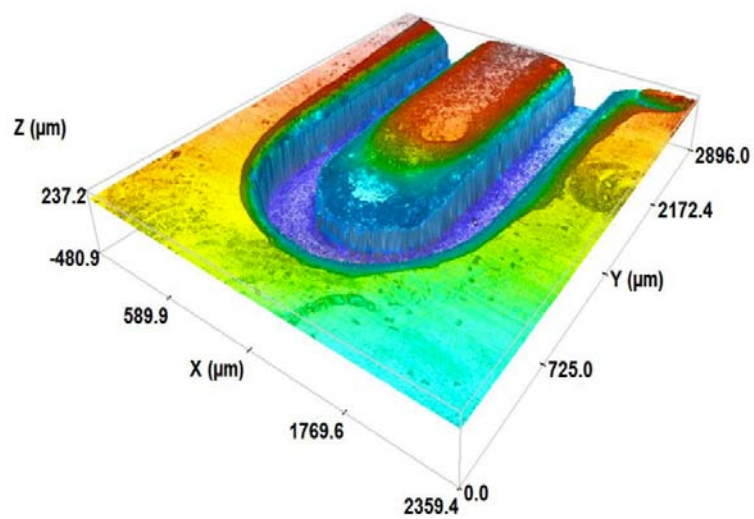


Figura 6:34 Elemento a U – Componente stampato da inserto fresato - C

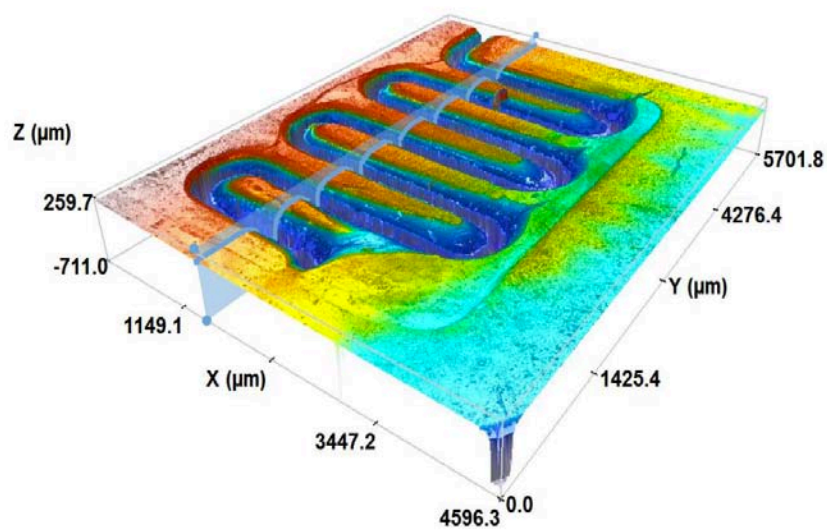


Figura 6.35: Serpentina – Componente stampato da inserto fresato - D

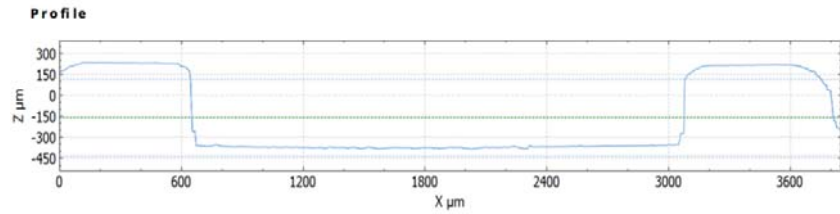


Figura 6.36: Grafico altezza-spessore – Componente stampato da inserto micro-fresato - A

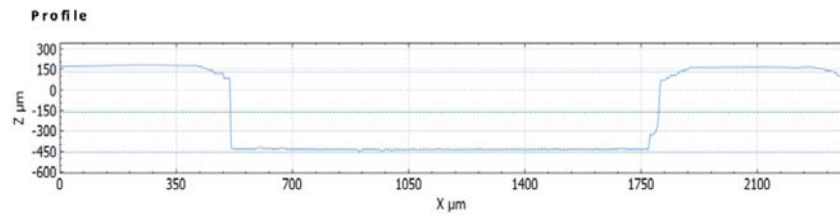


Figura 6.37: Grafico altezza-spessore – Componente stampato da inserto micro-fresato - B

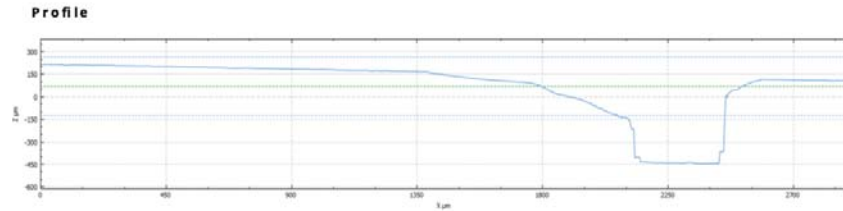


Figura 6.38: Grafico altezza-spessore – Componente stampato da inserto micro-fresato - C

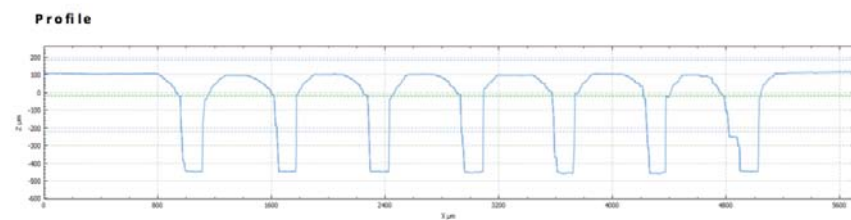


Figura 6.39 Grafico altezza-spessore – Componente stampato da inserto micro-fresato - D

6.4 LA FORZA DI ESTRAZIONE

È stata eseguita l'analisi della forza di estrazione su entrambi gli inserti prodotti, in modo da valutare la resistenza esercitata dalla superficie micro-strutturata durante l'azione di spinta degli estrattori sul componente stampato. Per la raccolta dei dati è stato utilizzato un sensore piezoelettrico come già esposto nel paragrafo 4.5 posizionato in un punto strategico all'interno dello stampo. Per ogni misurazione è stato generato automaticamente un file, di tipo Excel, contenente la variazione della forza nel tempo. Sono state eseguite 25 misurazioni per l'inserto nominale e 12 per l'inserto lavorato a causa della rottura precoce della superficie micro-strutturata. Per ogni misurazione è stato conservato il valore massimo espresso dalla forza, come riportato in Tabella 6.4, ed infine è stata calcolata la media complessiva per ogni inserto. Ne risulta un valore maggiore, seppure di poco, calcolato per l'inserto lavorato con una media della forza di estrazione pari a 30,83 N contro i 28,97 N dell'inserto nominale. La mancanza di un numero maggiore di campioni può aver prodotto un certo errore nel calcolo finale della forza di estrazione in quanto non è stato garantito un campionamento adeguato che rendesse stabile il processo di stampaggio ad iniezione.

La superficie micro-strutturata, di miglior qualità geometrica, dell'inserto lavorato può essere la causa dell'aumento della forza di estrazione, a causa dell'aumento della superficie di presa del componente stampato e al conseguente aumento di attrito. La geometria più "morbida" dell'inserto nominale al contrario può aver favorito il lavoro di estrazione degli estrattori. La differenza tra le due forze di estrazione misurate può essere anche imputata alla diversa finitura superficiale dei due inserti, in quanto la lavorazione alla micro-fresa può aver generato una superficie con un coefficiente d'attrito maggiore rispetto alla superficiale più omogenea dell'inserto nominale.

Tabella 6.4: Valore massimi forza di estrazione per l'inserto nominale e per l'inserto lavorato

	Inserto Nominale	Inserto Lavorato
	Valore Max FE (N)	Valore Max FE (N)
1	32,78	23,56
2	32,26	32,97
3	29,21	32,88
4	29,37	32,23
5	29,48	30,04
6	29,22	30,79
7	30,43	29,58
8	30,65	32,97
9	30,63	33,50
10	30,22	30,25
11	30,55	30,64
12	29,26	30,63
13	25,95	
14	30,26	
15	27,88	
16	30,21	
17	30,16	
18	30,52	
19	25,69	
20	23,55	
21	24,01	
22	30,26	
23	27,88	
24	28,34	
25	25,40	
MEDIA	28,97	30,83

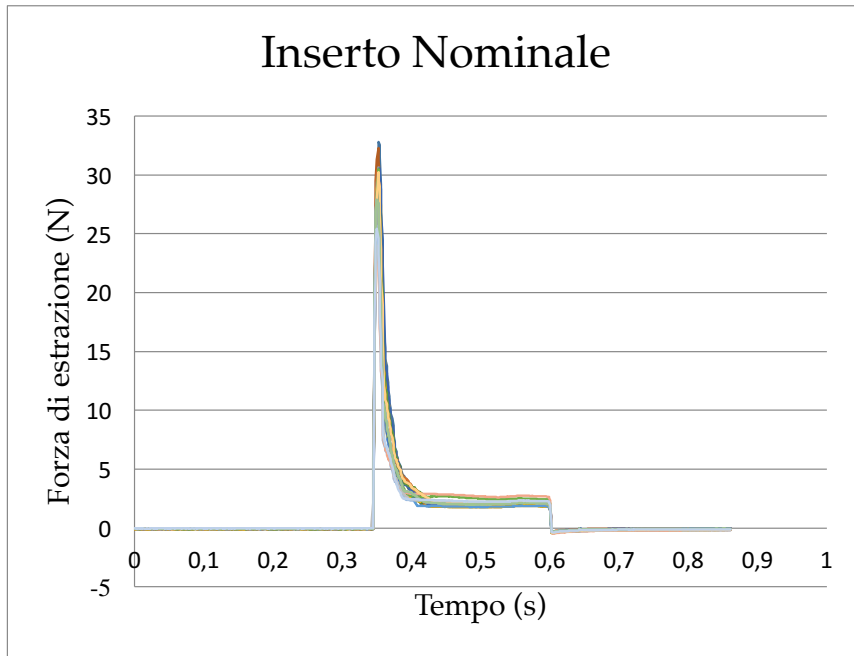


Figura 6.40: Grafico forza di estrazione per l'inserito nominale

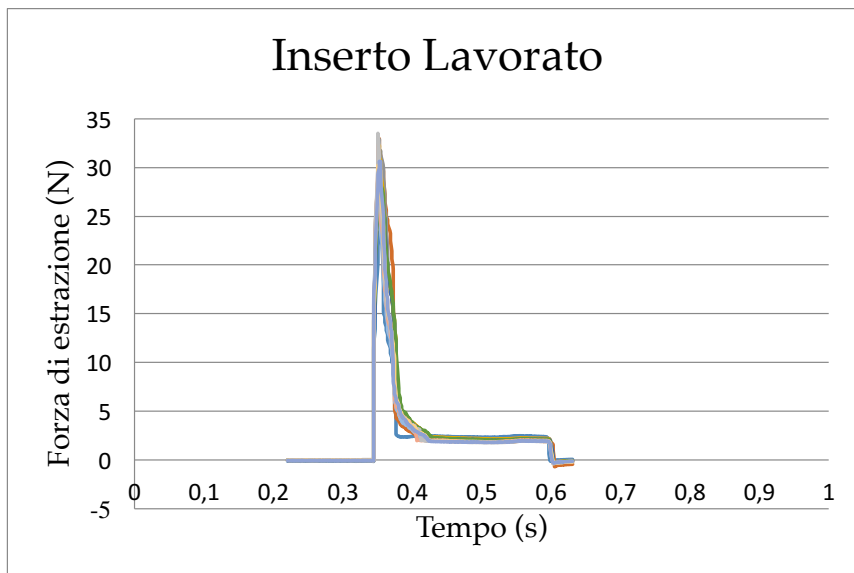


Figura 6.41: Grafico forza di estrazione per l'inserito lavorato

Parte IV

CONCLUSIONI

CONCLUSIONI

Il lavoro svolto in questa tesi è la caratterizzazione del processo di additive manufacturing per la realizzazione di stampi ad iniezione micro-strutturati. L'obiettivo è quello di realizzare un inserto, avente la geometria micro-strutturata di un dispositivo Lab-on-a-chip, capace di replicare la propria struttura in un processo di stampaggio ad iniezione in maniera ottimale. È stata dapprima eseguita una ricerca nella letteratura internazionale in modo da carpire l'evoluzione dell'argomento negli ultimi anni e successivamente è stato definito un piano di lavoro in grado di fornire gli strumenti e i dati per un'adeguata caratterizzazione del processo.

Sono stati prodotti due tipologie di inserti:

- Il primo inserto è stato realizzato con la geometria micro-strutturata di progetto, esclusivamente per additive manufacturing attraverso la stampante Objet350, e successivamente caratterizzato tramite microscopio elettronico a scansione e profilometro. Dopo l'analisi superficiale è stato utilizzato in una macchina a stampaggio ad iniezione per constatare l'effettiva validità del componente prodotto.
- Il secondo inserto è stato prodotto anch'esso con la stampante Objet350, ma presentando una geometria superficiale maggiorata, in modo da poter essere successivamente ripreso tramite il centro di lavorazione a 5 assi per micro-fresatura. Dopo essere stato caratterizzato al profilometro è stato utilizzato, come fatto per il primo inserto, in una macchina a stampaggio ad iniezione.

I risultati, per i due inserti prodotti, sono stati molto differenti. Il primo ha presentato una geometria micro-strutturata poco definita. L'assenza di spigoli vivi e la forma a "campana" dei murettoni hanno pregiudicato lo scopo finale, andando a produrre dei componenti stampati non adeguati all'utilizzo come dispositivi Lab-on-a-chip. Allo stesso tempo la geometria realizzata ha resistito in modo ottimale per tutte le stampe eseguite su di essa, valorizzando il Digital ABS e rendendolo idoneo ad un uso per la realizzazione di stampi per stampaggio ad iniezione.

L'inserto lavorato per micro-fresatura ha raggiunto superficialmente una qualità molto elevata. La presenza di una geometria micro-strutturata avente le caratteristiche desiderate in fase di progetto ha fatto sì di ottenere dei componenti stampati di ottima fattura, essendo stata replicata in buona parte la morfologia del dispositivo Lab-on-a-chip. A causa del suo precoce deterioramento il numero di stampe è risultato limitato ma ha permesso comunque di realizzare un discreto numero accettabile di componenti stampati.

La forza di estrazione, calcolata su entrambe le tipologie di inserti prodotti, è risultata molto simile, ma per una caratterizzazione più completa, in questo ambito, sono necessari un quantitativo maggiore di dati da analizzare.

Nel presente lavoro non è stato ottimizzato il processo di stampaggio ad iniezione, il quale potrebbe essere la chiave per sfruttare al meglio la tecnologia di Additive Manufacturing. Parametri come velocità e pressione di iniezione, temperatura dello stampo e il mantenimento, potrebbero risultare fondamentali per dar maggior vita agli inserti utilizzati rendendo di qualità maggiore i componenti stampati.

In conclusione l'Additive Manufacturing, o più precisamente la stampa 3D in questo caso, ha il potenziale per entrare come tec-

nologia di supporto nel campo dello stampaggio ad iniezione, aumentando di molto la flessibilità di processo e quindi tutto il ciclo di produzione di un determinato prodotto.

Parte V

APPENDICI

MATERIALI

Tabella A.1 Scheda tecnica del materiale TOTAL Polystyrene Crystal 1540 [17]			
Descrizione	Norma test	Valore	Unità
Reologiche			
Melt flow index (200°C-5 kg)	ISO 1133 H	12	g/10 min
Termiche			
Temperatura di rammollimento 10 N (T aumenta=50°C/h)	ISO 306A50	91	°C
Temperatura di rammollimento 50 N (T aumenta=50°C/h)	ISO 306B50	86	°C
Temperatura di distorsione termica senza tempra (1,8 Mpa)	ISO 75-2A	73	°C
Temperatura di distorsione termica con tempra (1,8 Mpa)	ISO 75-2A	83	°C
Meccaniche			
Resistenza all'urto senza intaglio	ISO 180	7,50	kJ/M ²
Carico di snervamento a trazione	ISO 527	450,0	kg/cm ²
Allungamento a rottura	ISO 527	2	%
Modulo	ISO 178	33000	kg/cm ²
Durezza Rockwell	ISO 2039	L - 70	-
Elettriche			
Forza dielettrica	-	135	kV/mm
Resistività superficiale	ISO IEC 93	> 10 ¹³	Ohms ⁻¹
Miscelazione			
Densità	ISO 1183	1,04	g/cm ³
Mould shrinkage	-	0,4 ÷ 0,7	%
Assorbimento umidità	ISO 62	<0,1	%

Tabella A.2: Temperatura raccomandate per iniettare TOTAL Polystyrene Crystal 1540 [17]

Temperatura cilindro	Sigla	Valore	Unità
Zona 1	T ₁	°C	170 ÷ 180
Zona 2	T ₂	°C	180 ÷ 220
Zona 3	T ₃	°C	210 ÷ 240
Zona 4	T ₄	°C	210 ÷ 240
Ugello		°C	210 ÷ 240

BIBLIOGRAFIA

- [1] Jacobs, P. F. (1996). Recent Advances in Rapid Tooling for Stereolithography. *Proceedings of the National Conference on Rapid Prototyping and Tooling Research*. In Buckinghamshire: Buckinghamshire College. pp. 18-19.
- [2] Jacobs, P. F., and Hilton, P. D. (2000). Rapid Tooling: Technologies and Industrial Applications. In P. F. Peter D. Hilton. New York: Marcel Dekker.
- [3] Nagahanumaiah, Subburaj, and Ravi. (2008). Computer Aided Rapid Tooling Process Selection and Manufacturability Evaluation for Injection Mold Development. *Computers in Industry*, 59 (2-3), 262-276.
- [4] Christopher Barnatt (2013). *3D Printing: The Next Industrial Revolution* in CreateSpace Independent.
- [5] Stratasys and Worrell Collaboration. 3DP Injection Molding Process Spread.
<http://3dprintingindustry.com/2014/11/05/injection-molding-stratasys-worrell/>
- [6] Jorge Rodriguez P.E (2016). 'Use of Additive Manufacturing (AM) for Mold Inserts in Injection Molding'
- [7] C. A. Griffiths, S. Bigot, E. Brousseau, M. Worgull, M. Heckeke, J. Nestler, J. Auerswald (2009). 'Investigation of polymer inserts as prototyping tooling for micro injection moulding'.
- [8] Sadegh Rahmati, Phill Dickens (2006). 'Rapid tooling analysis of Stereolithography injection mould tooling'.

- [9] Neri Volpato (2016). 'An analysis of Digital ABS as a rapid tooling material for polymer injection moulding'
- [10] Zonder, L. and Sella, N. (2013). 'Precision Prototyping – The Role of 3D Printed Molds in the Injection Molding Industry, White paper'. <http://www.stratasys.com/resources/white-papers>.
- [11] The Economist (2012). 'Manufacturing: The Third Industrial Revolution'. <http://www.economist.com/printedition/2012-04-21>.
- [12] Jaime Castillo-León, Winnie E. Svendsen (2015). 'Lab-on-a-Chip Devices and Micro-Total Analysis Systems'.
- [13] Philip J. Kitson, Mali H. Rosnes, Victor Sans, Vincenza Dragone, Leroy Cronin (2012). 'Configurable 3D-Printed millifluidic and microfluidic 'lab on a chip' reactionware devices'.
- [14] J. Cooper McDonald, George M. Whitesides (2002). 'Poly(dimethylsiloxane) as a Material for Fabricating Microfluidic Devices'
- [15] G.D. Kipling, S.J. Haswell, and N.J. Brown (2015). 'A Considered Approach to Lab-on-a-Chip Fabrication'
- [16] IDSA. http://www.idsa-mp.org/proc/plastic/injection/injection_process.html
- [17] Coloschi Andrea (2015). 'Analisi delle forze di estrazione nel micro-stampaggio ad iniezione al variare della finitura superficiale dello stampo e dei parametri di processo'.
- [18] Bragagnolo Mirco (2016). 'Studio degli effetti della micro-strutturazione superficiale sull'attrito radente di

componenti ottenuti da micro-strampaggio ad iniezione'.

