



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**FACOLTA' DI INGEGNERIA MECCANICA**

---

Corso di Laurea triennale

**Studio della deformazione di stampi in materiale composito realizzati  
mediante fabbricazione additiva sottoposti a cicli termici**

**Study of the deformation of composite material molds realized by  
additive manufacturing processes and subjected to thermal cycles.**

Relatore:

*Prof. Forcellese*

Correlatori:

*Prof.ssa Simoncini*

*Ing. Mancia*

Tesi di Laurea di:

*Tommaso Toccaceli*

**A.A. 2021 / 2022**



## Sommario

1	Introduzione .....	1
2	Storia della letteratura .....	3
2.1	Additive manufacturing (AM) .....	3
2.2	Stampa 3D .....	4
2.2.1	Categorie .....	4
2.3	Materiali .....	13
2.4	autoclave .....	18
2.5	Caso studio .....	21
3	Macchinari e metodi .....	23
3.1	Sabbiatrice .....	23
3.1.1	Componenti.....	23
3.2	Fresatrice.....	23
3.2.1	Fresatura.....	23
3.2.2	Caratteristiche utensile.....	24
3.3	Alesatrice.....	26
3.3.1	Alesatura.....	27
3.4	Macchina di misura a coordinate (CMM) .....	27
3.5	Stampante 3D.....	29
3.6	CarbonPA.....	32
3.7	Chiave torsionometrica.....	34
3.8	Trattamento termico (Forno) .....	34
4	Procedimento .....	37
4.1	Stampaggio del pezzo .....	37
4.2	Alesatura dei fori .....	39
4.3	Misurazioni pretrattamento termico .....	39
4.4	Riscaldamento dello stampo nel forno.....	40
4.5	Misurazione post trattamento termico .....	40
4.6	2° ciclo termico.....	40
4.7	Caso studio .....	42
5	Risultati .....	46
5.1:	Analisi dello stampo a 80° C.....	48
5.1.1:	Pezzo non trattato termicamente.....	48
5.1.2	1° ciclo termico .....	50

5.1.3 2°ciclo termico .....	53
5.2: Analisi stampo a 100° .....	55
5.2.1: pezzo non trattato termicamente .....	55
5.2.2: 1° ciclo termico .....	56
5.2.3: 2° ciclo termico .....	59
6 Conclusione .....	62
7 Bibliografia .....	64
8 Ringraziamenti .....	65

# 1 Introduzione

La stampa 3D e l'additive manufacturing (AM) possono essere annoverati tra le tecnologie più disruptive della nostra epoca, nonché quali protagoniste della quarta rivoluzione industriale. Infatti, la tecnologia AM sta acquisendo sempre più popolarità grazie alla sua versatilità e al minor costo dell'attrezzatura per la stampa e per la vari materiali.

Al fine di ottenere dei materiali plastici rinforzati in fibra di carbonio (compositi CFRP) vengono utilizzati dei processi di produzione differenti, ma la maggior parte di essi richiede investimenti elevati e lunghi tempi di consegna. Inoltre, il materiale di scarto prodotto è piuttosto rilevante e, di conseguenza, si ha un notevole aumento dei costi.

Diverse tecnologie di produzione di CFRP, come ad esempio la lavorazione in pressa o l'autoclave, richiedono l'uso di stampi; attualmente, sono prodotti tramite l'utilizzo di materiali come alluminio, acciaio o compositi a fibra lunga, i quali sono caratterizzati da lunga durata, alti costi e impatto ambientale negativo. Di conseguenza, per piccoli lotti e prodotti personalizzati, aumentano notevolmente i costi dei componenti da stampare.

Per evitare tali problemi, sono stati realizzati nuovi metodi di produzione innovativi e alternativi, come la tecnologia di stampa 3D citata in precedenza.

Il processo di produzione della stampa 3D offre l'opportunità di ridurre i tempi e i costi della produzione delle parti, in maniera più importante sulla quantità delle materie prime utilizzate per la lavorazione.

Sul mercato attualmente ci sono diversi metodi di stampa 3D che consentono la realizzazione di più prodotti con caratteristiche diverse tra loro grazie alla loro molteplice scelta di materiale e macchinari.

Nel caso studiato si utilizza una stampante "roboze – ONE +400", come materiale, il carbon PA per la realizzazione di due semi-stampi che, a loro volta, serviranno a creare un componente richiesto nel settore dell'automotive.

La stampa 3D risulta molto utile perché, per la realizzazione di questi componenti molto piccoli, si vanno a minimizzare costi, tempi ed energia, molto importante

oggi per l'impatto ambientale, visto che si parla sempre di più di cambiamento climatico e di un mondo sempre più verde.

I due semi-stampi realizzati mediante l'uso della stampante 3D FFF saranno serrati esercitando una coppia di 10 Nm e, successivamente, dopo aver subito delle lavorazioni post stampaggio, verranno trattati termicamente. Il riscaldamento del pezzo avverrà in un forno e sarà successivamente sottoposto ad una misurazione tramite la CMM. A seguire, con i dati acquisiti dalla macchina, si analizzeranno le deformazioni ottenute tramite il trattamento termico.

Nello studio affrontato si analizzeranno le deformazioni di due pezzi dove:

- il primo stampo verrà sottoposto a due cicli termici ad una temperatura di 80°;
- Il secondo invece sarà sottoposto sempre a due cicli termici, ma ad una temperatura di 100° C.

Lo studio è finalizzato alla realizzazione di stampi in CarbonPA che possano essere riutilizzati per più lavorazioni in autoclave, così da sostituire gli stampi realizzati con tecniche e materiali tradizionali; quindi si effettueranno più cicli termici sul manufatto in composito per verificare se le deformazioni dovute dal trattamento termico siano tali da non compromettere lo stampo per la lavorazione successiva.

## 2 Storia della letteratura

### 2.1 Additive manufacturing (AM)

L'additive manufacturing (AM) è definita come una famiglia di processi basati sulla stratificazione progressiva di materiale su livelli sovrapposti lungo un determinato asse di crescita, al fine di ottenere un oggetto tridimensionale che soddisfi le specifiche richieste del progetto. [1]

La creazione di prototipi è sempre stata parte integrante dell'attività industriale. Fino a pochi anni fa tali prototipi venivano realizzati artigianalmente, utilizzando macchine a controllo numerico che sottraevano porzioni di materiale da un blocco per poi estrapolare l'oggetto desiderato.

La stampa 3D permette di raggiungere lo stesso risultato, ma con il procedimento contrario, cioè depositando materiale, affinché si vada a creare l'oggetto desiderato in modo più economico e in tempi più brevi.

Il termine AM è un termine utilizzato per racchiudere varie accezioni:

- rapid prototyping: insieme di tecniche industriali indotte al realizzare la parte fisica del prototipo a partire da un CAD, una definizione matematica tridimensionale dell'oggetto. Precedentemente la realizzazione del prototipo veniva affidata a degli artigiani e ciò comportava maggiori costi e tempi di esecuzione più lunghi. L'obiettivo è ideare dei processi che riducano sia i costi che i tempi di costruzione necessari per la realizzazione del prototipo.
- rapid tooling: tecnica che permette di realizzare le attrezzature necessarie per la creazione dei prototipi in tempi più rapidi e senza l'utilizzo di uno dello stampo metallico.
- rapid manufacturing: produzione rapida di prodotti personalizzati richiesti dal cliente. Rispetto al rapid prototyping, il rapid manufacturing non serve alla realizzazione di un prototipo, ma per prodotti finali utili in condizioni reali.

Il processo di produzione additiva ha come input la realizzazione del modello 3D dell'oggetto (CAD); successivamente avviene un processo semi-automatico di

conversione del file in formato STL che, poi, attraverso un software di modellazione si scompone l'oggetto in strati (layer) stampabili con stampante in stampa 3D. Segue quindi il processo di stampa ed infine, a seconda dell'utilizzo del prodotto stampato, vengono eseguite delle lavorazioni post-produzione e finitura, per ottenere i parametri di finitura e le proprietà meccaniche desiderate. Il vantaggio principale di tutte le tecnologie AM è la possibilità di realizzare oggetti che tradizionalmente erano composti da più elementi singoli e poi da assemblare oppure componenti non realizzabili con le tradizionali tecniche di lavorazione. In prima stesura, l'AM era utilizzato solo per la realizzazione di prototipo, poi, con l'avanzare del tempo e con il loro successo ottenuto, applicato in diversi settori industriali, per la produzione di oggetti e attrezzature (settore automotive, strumentazione da laboratorio).

## 2.2 Stampa 3D

Quindi con stampa 3D intendiamo il procedimento che permette di realizzare un oggetto fisico tridimensionale utilizzando una particolare stampante comandata da un computer.

Per stampare in tre dimensioni servono principalmente due elementi: un modello digitale 3D e l'individuare di quale tipologia di stampa e di quali materiali siano più adatti alla realizzazione finale. Quest'ultimo elemento è il fattore più importante, poiché, nella maggior parte dei casi, bisogna far fronte ad un determinato budget disponibile o imposto.

Esistono varie tipologie di stampanti 3D e tutte lavorano in maniera additiva.

### 2.2.1 Categorie

Le tecnologie additive sono suddivise in tre macroaree, distinte in base alle caratteristiche della consistenza della materia prima:

- Solidi: tecniche che prevedono l'estrusione del materiale, solido o semisolido, o l'incollaggio di fogli;



- Polveri: tecniche basate sulla sintetizzazione o fusione delle polveri o sulla deposizione di un legante chimico su un letto di polvere omogeneo;
- Liquido: tecniche di fotopolimerizzazione utilizzando lampade UV o di stampaggio a getto. Il materiale subisce una reazione chimica creando legami tra molecole separate.

La tecnologia da scegliere dipende da una serie di parametri:

- materiali;
- resistenza meccanica e finitura superficiale del pezzo;
- velocità di produzione;
- investimento necessario e costo finale.

Ad oggi vengono riconosciute sette categorie di stampa 3D differenti [2]:

- vat polymerization, processo mediante il quale un fotopolimero liquido, contenuto all'interno di un contenitore, viene selettivamente solidificato da una sorgente luminosa. Un fotopolimero (conosciuto anche come resina fotoattiva) è un polimero che cambia le sue proprietà quando è esposto alla luce, spesso nell'ultravioletto o nella regione visibile dello spettro magnetico, causando un collegamento e formando una catena di molecole. La maggior parte delle stampanti 3D che utilizzano la vat polymerization mantengono il fotopolimero liquido in un contenitore o in una vasca, con la piattaforma di costruzione parzialmente sommersa nella superficie del liquido. La stampante dirige una sorgente di luce per polimerizzare il fotopolimero liquido in uno strato solido utilizzando le informazioni date dal rispettivo file CAD. Poi la piattaforma viene immersa nuovamente nella resina rimanente; quindi, il procedimento viene ripetuto più volte per tutti gli strati successivi fino a raggiungere il prodotto finito. Le fonti di luce che possono essere utilizzate sono diverse in base al tipo di stampa, come un laser (SLA – Stereolithography), la luce di un proiettore (DLP – Direct Light Processing) o un sistema di luce a LED (CDLP – Continuous Direct Light Processing). Tra i vantaggi di questa tecnologia troviamo la possibilità di ottenere dei pezzi con una risoluzione molto elevata e con una finitura superficiale molto liscia. Gli svantaggi, invece, sono: costi di impianto elevati, la poca applicabilità dei materiali

fotosensibilità e la totale assenza di elementi solidi all'interno della vasca, che presuppone la stampa di supporti specifici. Inoltre, per questa tipologia di stampaggio, è obbligatoriamente necessario l'utilizzo di trattamenti post lavorazione, tra cui il passaggio del pezzo realizzato sotto una fonte luminosa in modo da aumentarne e proprietà, quali la durezza e la consolidazione della struttura.

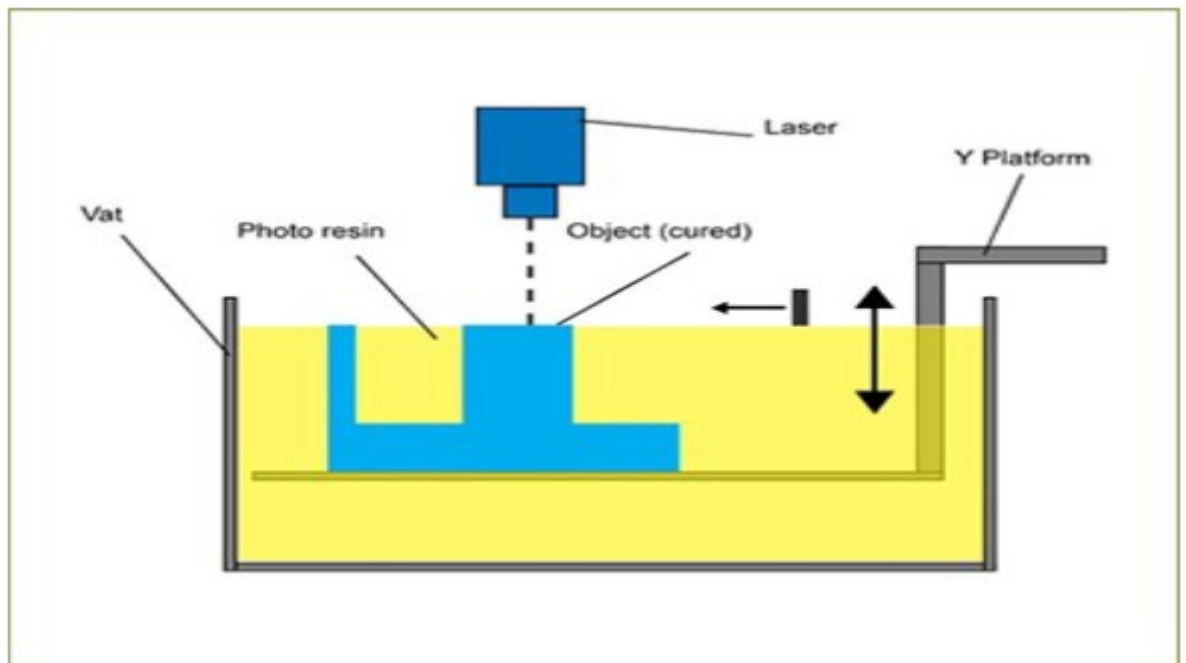


Figura 1: Schematizzazione Vat Polymerization

- Powder bed fusion, consiste nel creare un pezzo strato su strato in un letto di polvere (PBF). La polvere utilizzata può essere di polimeri o di metalli. Il principio di funzionamento di queste stampanti si basa sulla fusione e, successivamente, solidificazione di un letto tramite una sorgente di energia termica. Dopo aver completato uno strato, la piattaforma di base trasla verso il basso per permettere il posizionamento di un nuovo strato di polvere metallica. Il materiale non processato viene poi raccolto per permetterne il riutilizzo. Le sorgenti termiche possono essere di varie origini come un laser (SLS – Selective Laser Sintering; DMLS – Direct Metal Laser Sintering; SLM – Selective Laser Melting), una luce

all'infrarosso (MJF – Multi Jet Fusion) o un fascio di elettroni (EBM – Electron Beam Melting).

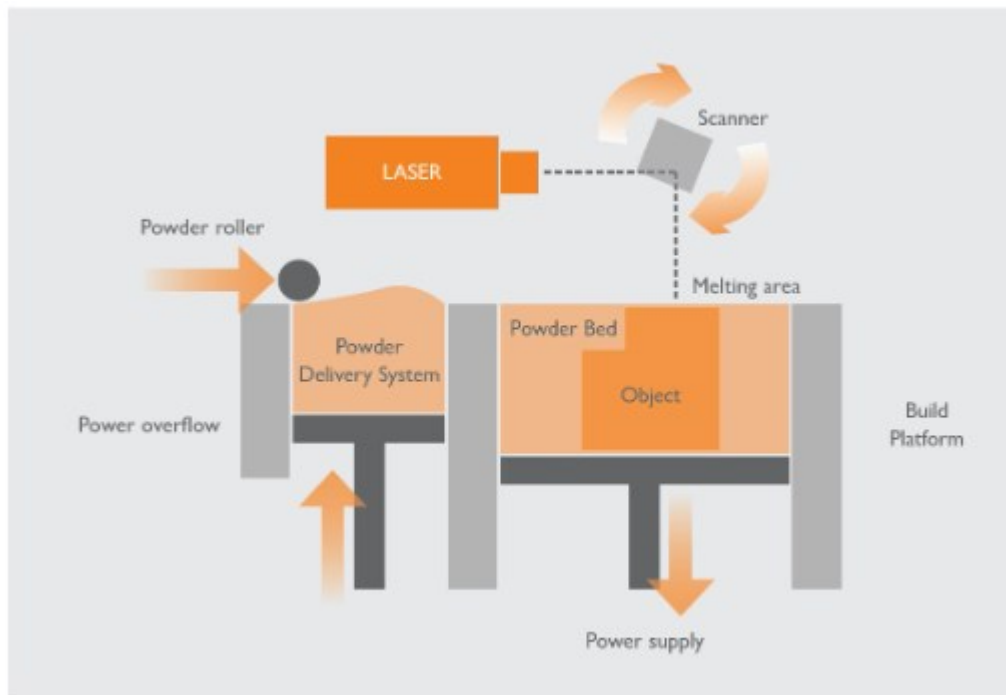


Figura 2:schematizzazione Powder Bed Fusion

- Material extrusion, è una stampante che utilizza una bobina di filamento di materiale che alimenta l'estrusore attraverso un ugello riscaldato. La testa dell'estrusore riscalda e ammorbidisce il materiale e lo depone in posizione prestabilite nel piano. L'ugello è in grado di traslare lungo gli assi paralleli alla piattaforma, la quale si muove nella direzione perpendicolare dopo la deposizione di materiale in ogni strato. Questa tecnologia risulta essere la più utilizzata tra le varianti di stampa 3D grazie al suo costo contenuto. Grazie alle proprietà dei pezzi ottenuti, tra cui l'elevata resistenza a trazione e alla grande stabilità termica dei materiali, è possibile costruire prodotti per il settore medico, automobilistico, aerospaziale e alimentare. Questo processo ha tempi di consegna brevi, ma ha una bassa finitura superficiale dei pezzi realizzati, per questo motivo, i pezzi successivamente devono essere sottoposti a levigatura mediante processi di sabbatura, abrasione chimica o verniciatura, allo scopo di migliorarne la finitura. Un'altra problematica che sorge in questa tecnica è il

mantenimento dei parametri di processo di stampa; difatti, si procede con una stampa molto lenta andando ad esercitare una continua pressione sul materiale da depositare.

Principalmente i processi più comunemente utilizzati sono: la Fuse Deposition Modelling (FDM) e la Fuse Filament Fabrication (FFF). Essi rappresentano l'evoluzione della tecnologia AM negli ultimi anni.

La FDM è una tecnica di proprietà della Stratasys, Ltd. Brevettata nel 1989, la quale prevede l'utilizzo di un estrusore che lavora a temperature di circa 320° e deposita il filamento all'interno di una camera isolata alla temperatura di 90°, andando così da ridurre il salto termico, così da avere prodotti con una migliore finitura superficiale. Alla fine della scadenza del brevetto nel 2009 si sono sviluppati dei movimenti tra cui il RepRap Project, che puntava a sviluppare una tecnologia ad uso domestico. Con questo obiettivo nacque la FFF, una tecnica simile alla precedente, ma che si differenziava dalla prima in quanto non necessitava di una camera riscaldata e isolata dall'ambiente esterno. Le qualità del pezzo stampato ovviamente non presentavano le stesse proprietà e finitura di uno stampato tramite FDM e pertanto esso sarà soggetto a delle deformazioni dovute al salto termico. Questo processo però risultò talmente economico da portare una diffusione in grande scala delle stampanti ad estrusione. La loro richiesta ha generato nel mercato un abbassamento dei costi, rendendo la tecnologia usufruibile ad un quantitativo maggiore di persone possibile. L'elevata diffusione è stata possibile anche grazie al fatto che la stampante ideata fosse open-design ed in grado di auto replicarsi, generando essa stessa delle copie dei pezzi che la costituiscono [3]

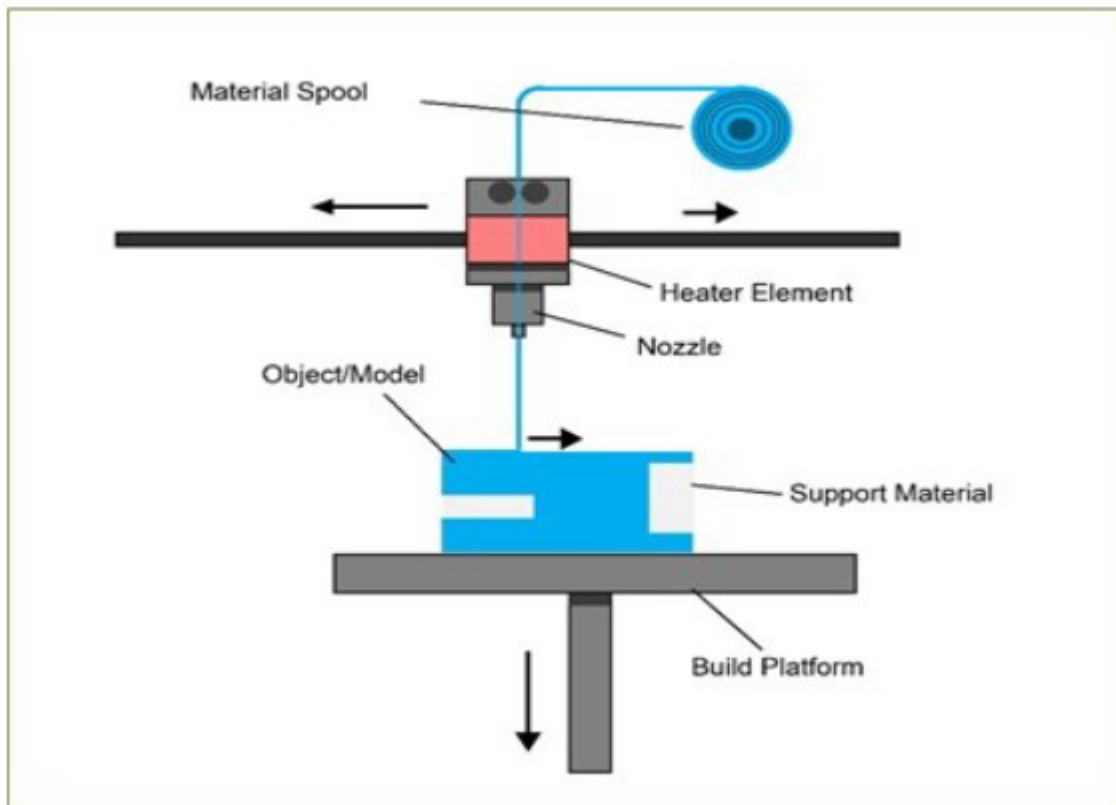


Figura 3:schematizzazione Material Extrusion

- Material jetting, nota anche come PolyJet o ColorJet, è un processo in cui gocce di materiale (cera, fotopolimeri, metalli) vengono depositate selettivamente a strati sovrapposti e solidificate tramite lampade UV o sorgenti di calore; il file CAD viene quindi tagliato in numerose immagini digitali, dove ciascuna rappresenta uno strato dell'oggetto, grazie ad un apposito software chiamato slicer e il file viene poi inviato alla stampante 3D per la stampa. Il principale vantaggio di questo processo è la capacità di stampare pezzi multimateriali e multicolore. Con le sue testine di stampa multiple, i materiali possono essere immagazzinati in una testina separata, consentendo un'elaborazione più elaborata tra colori e materiale rispetto alle altre stampanti. Il composito ottenuto è chiamato "materiale digitale" ed è adatto alla creazione di prototipi dettagliati vicini al modello finale. Il volume di stampa però è limitato e il processo richiede una fase di post-elaborazione in quanto i supporti e i residui devono essere rimossi grazie ad una soluzione speciale e il pezzo deve essere successivamente

polimerizzato in una camera agli UV. Inoltre, i pezzi creati, se esposti alla luce, possono modificare le loro proprietà nel tempo essendone sensibili.

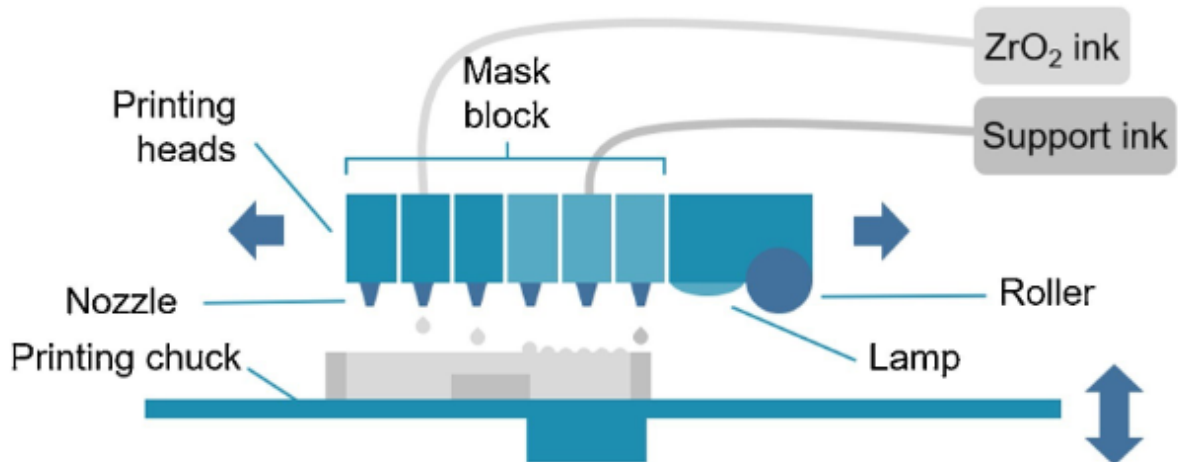


Figura 4:schematizzazione Material Jetting

- binder jetting, è un processo in cui un legante liquido viene selettivamente rilasciato su strati di polvere di gesso o di metallo; questo metodo offre come principale vantaggio la sua elevata produzione volumetrica. È anche la più simile alla stampa su carta tradizionale per semplicità e velocità. Funziona come una stampante a inchiostro che muovendosi deposita strati di polvere sulla carta formando il prodotto. Rispetto agli altri processi di stampa 3D, però, richiedono molto più materiale e tempo per estrarre ogni parte con un singolo punto, strato dopo strato.

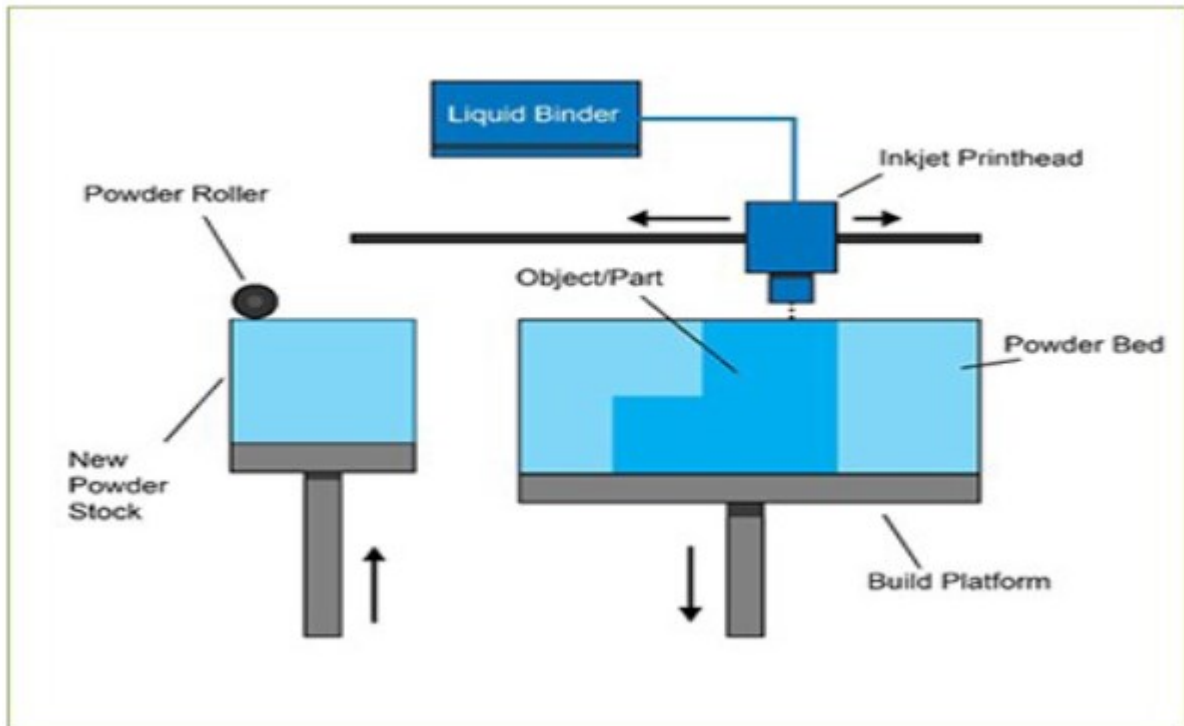


Figura 5: schematizzazione Binder Jetting

- direct energy deposition, processo in cui l'energia termica viene utilizzata per fondere e unire strati di metallo in polvere; a ciascun passaggio della testa di deposizione, tramite un ugello, si crea una traccia di materiale rapidamente solidificata; le linee adiacenti di materiale compongono gli strati. Questo processo è tipicamente usato per riparare, per aggiungere materiale a componente esistente creando un rivestimento o per crearne di nuovi stampando anche materiali diversi in sequenza, cosa che non è consentita dalle tecnologie a letto di polvere. Questa tecnologia può essere utilizzata come processo di fabbricazione additiva per creare parti 3D con elevata flessibilità progettuale, dove i singoli strati sono depositati uno sopra l'altro, per creare un nuovo prodotto a forma libera.

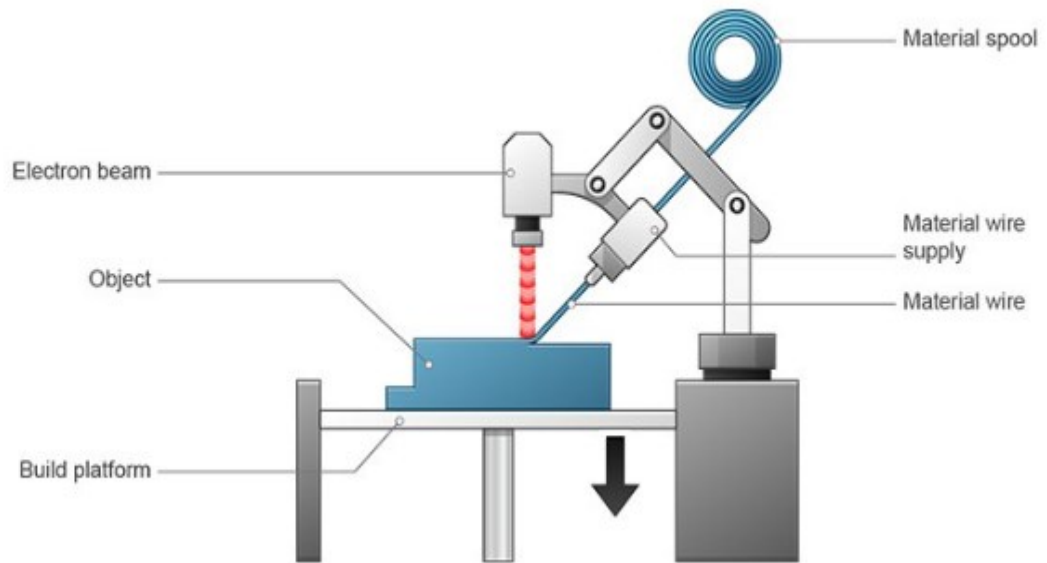


Figura 6:schematizzazione Direct Energy Deposition

- sheet lamination, che include: l'Ultrasonico Additive Manufacturing (UAM) e la Laminated Object Manufacturing (LOM). La prima usa lamine o nastri di metalli legati tra loro mediante una saldatura ad ultrasuoni. Tale tecnologia richiede delle successive lavorazioni alle macchine a controllo numerico e la rimozione del materiale non legato. I metalli utilizzati nella UAM includono: alluminio, rame, acciaio inossidabile e titanio. I parametri di stampa includono l'utilizzo di basse temperature che permettono la creazione di particolari geometrie interne. Il processo viene spesso effettuato contemporaneamente alla saldatura. Invece, il processo in cui fogli di carta o di altro materiale composito vengono sovrapposti, ritagliati e uniti è il LOM che, come procedimento, è molto simile come procedimento al precedente, ma si differenzia sia per il diverso materiale utilizzato e per il fatto che al posto della saldatura, vengono utilizzati degli agenti adesivi. Il vantaggio principale è l'uso di carta A4, la quale è disponibile economicamente rispetto le altre.



Gli oggetti ottenuti hanno per la maggior parte scopo visivo ed estetico; quindi, viene utilizzata per la realizzazione di modelli, non destinati ad uso strutturale.

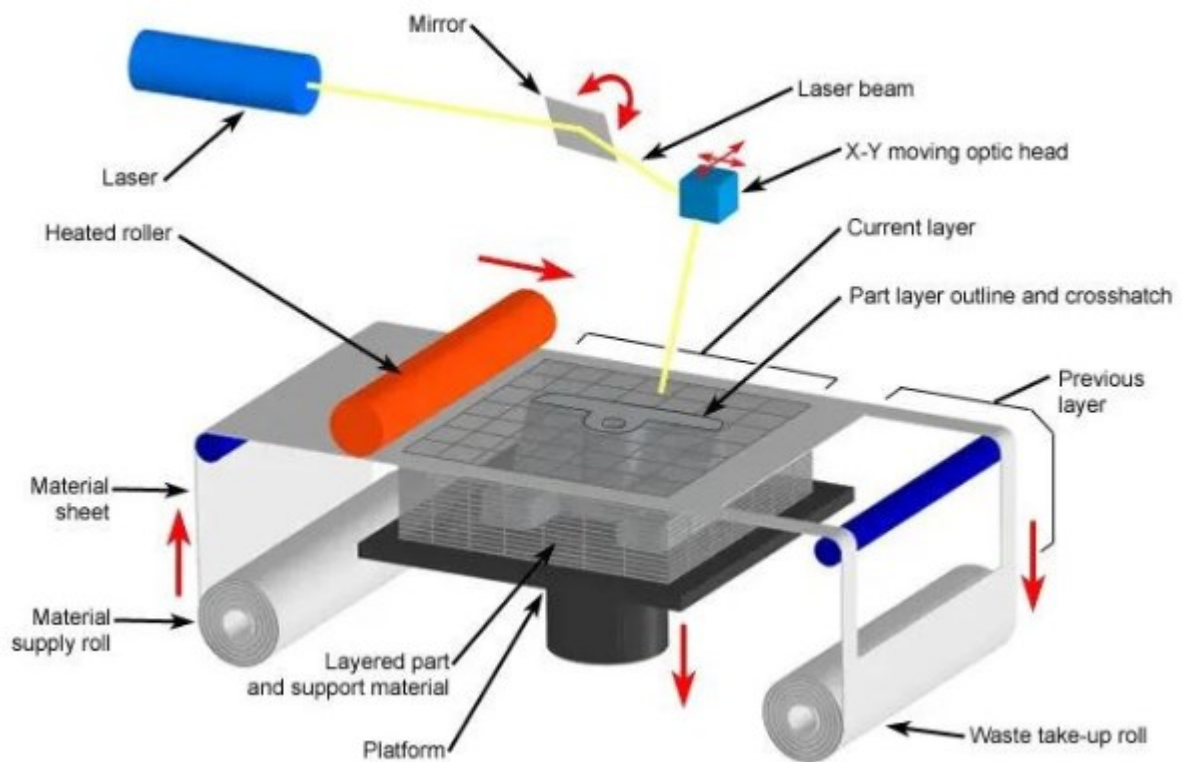


Figura 7: schematizzazione Sheet Lamination

## 2.3 Materiali

Così come le tecnologie di stampa 3D, anche i materiali disponibili possono essere suddivisi in categorie e sono principalmente tre: polimeri, metalli e altri materiali.

Di polimeri ne esistono molti con proprietà e caratteristiche diverse tra loro, permettono una scelta maggiore dei processi di stampa. Hanno costi ridotti e possono essere utilizzati in ambiti differenti, dal meccanico al medico. Essi sono disponibili in tre forme diverse: filamento, resina liquida e polvere; inoltre, possono essere suddivisi in ulteriori due categorie: termoplastici e

termoindurenti. I materiali termoplastici possono essere sciolti o solidificati più volte, senza perdere, per la maggior parte delle volte, le proprie qualità; Invece, quelli termoindurenti sono già allo stato liquido e vengono solidificati attraverso l'esposizione alla luce o mescolati tramite l'utilizzo di un catalizzatore; in questa categoria rientrano le resine.

I materiali polimerici più utilizzati per processi di stampa sono:

- Acido polilattico: noto come PLA, è uno dei materiali più utilizzati grazie alla sua versatilità. È termoplastico e derivante da fonti rinnovabili come l'amido di mais, le radici di tapioca o la canna di zucchero. Le sue applicazioni sono soprattutto mediche e alimentari, grazie alle loro derivazione ecologica.

Il PLA è stato sviluppato per la prima volta negli anni '30 dal chimico americano Wallace Carothers, ma solo negli anni 80' il PLA è stato finalmente prodotto dall'azienda americana Cargill con il fine di essere utilizzato.

Per produrre questo polimero si fermenta una fonte di carboidrati, il prodotto successivamente viene macinato separando l'amido e poi mischiandolo con monomeri acidi o lattici. Così facendo l'amido si trasforma in destrosio (D-glucosio). Infine, la fermentazione del glucosio produce acido L-lattico, il componente base del PLA. Il materiale è considerato un fluido pseudoplastico, cioè che la sua viscosità cambierà in base allo stress subito, precisamente, si ridurrà man mano che verrà aumentata la pressione.

È considerato un polimero semi-cristallino, ha una temperatura di fusione di 180°C, difatti, quando si stampa con PLA, non è necessario riscaldare il piano di stampa. Questo materiale è semplice da utilizzare poiché non servono post-elaborazioni complesse, come sabbiatura o il trattamento con acetone. Potrebbero esserci delle imperfezioni nella realizzazione del piano di stampa con questo materiale; quindi, è consigliato aggiungere nastro adesivo per evitare difficoltà nel distacco del pezzo una volta completato.

- ABS (acrilonitrile-butadiene-stirene): è uno dei materiali più sfruttati per creare filamenti plastici funzionali alla stampa a iniezione. È un materiale termoplastico amorfo molto comune ed ogni monomero conferisce ad esso proprietà differenti: l'acrilonitrile conferisce durezza, resistenza chimica e termica; lo stirene conferisce lavorabilità, brillantezza e resistenza; il butadiene conferisce robustezza e resilienza. L'ABS è un materiale versatile, a qualità diverse e in base alle esigenze si ha una vasta gamma di caratteristiche tra le quali scegliere. La resilienza cambia il suo valore attraverso la quantità di polibutadiene, oltre a presentare una buona resistenza chimica agli acidi cloridrici, agli alcali ed agli oli lubrificanti. Essi sono dei materiali infiammabili che, durante la combustione, rilasciano gas tossici. Essendo un materiale igroscopico, cioè è in grado di assorbire l'acqua presente in ambiente esterno, necessita di un trattamento di essiccazione prima della lavorazione; inoltre, è un materiale amorfo che non presenta una precisa temperatura di fusione. L'ABS è utilizzato soprattutto nel settore dell'automotive, grazie alle sue proprietà meccaniche. [4]
- HDPE (polietilene ad alta densità): è un polimero termoplastico appartenente alla famiglia delle poliolefine, ricavato dal petrolio. Si ottiene tramite la polimerizzazione dell'etilene. È caratterizzato da forze intermolecolari e da una resistenza alla trazione maggiori rispetto alle varietà di polietilene meno dense, grazie al fatto che presenta scarse ramificazioni. Resiste anche temperature più elevate (120°C per brevi periodi, 110°C per un periodo costante) oltre a risultare più duro e opaco. A questo si aggiunge un'elevata resistenza agli agenti chimici, come molti acidi, alcool e benzina. Rispetto al polipropilene, non è utilizzabile per le lavorazioni in autoclave, in quanto non risponde alle condizioni normalmente richieste.
- Nylon: è una plastica sintetica che appartiene ad una famiglia di polimeri sintetici, chiamata poliammide, dotata di notevoli proprietà meccaniche ed infatti è noto per: elevata durezza, alto rapporto resistenza/peso, flessibilità, basso attrito, resistenza alla corrosione e capacità di resistere a grandi stress meccanici. È un materiale ottimo per la realizzazione di

prodotti in stampa 3D, in quanto si ottiene, grazie alla sua proprietà auto-saldante, una migliore finitura superficiale. Tra gli svantaggi troviamo: dei problemi applicativi per le elevate temperature di stampa, comprese tra i 220°C e i 250°C, e la possibilità da parte del materiale di assorbire liquidi, quindi, per evitarne il contatto, si eseguono degli accorgimenti per la conservazione. Grazie alla igroscopia è possibile immergere il filamento in tinture tessili liquidi per fargli acquisire la colorazione desiderata.

- PVA (alcol polivinilico): è un composto chimico ottenuto per idrolisi. E' un materiale solubile in acqua ed è usato per la creazione di supporti da eliminare tramite essa. Il PVA ha una temperatura di stampaggio compresa tra i 180° e i 210°, è difficile quindi da estrarre e, inoltre, se troppo alta la temperatura, favorisce l'intasamento dell'ugello. Va conservato poiché essendo idrofilo assorbe l'umidità; per evitare ciò la bobina di materiale viene conservata in un contenitore essiccante.

Le principali applicazioni sono: Polivinili acetali, emulsioni e carta. Il PVA viene usato anche per la realizzazione adesivi, film idrosolubile, nel settore tessile e farmacologico.

I metalli garantiscono rispetto ai polimeri delle proprietà meccaniche maggiori ma, necessitano delle tecniche complesse e quindi più costose, contando anche il costo più elevato del materiale. Per la stampante in 3D, essi sono disponibili solo in polvere, e sono:

- Acciaio: è uno dei materiali più utilizzati al mondo grazie alle sue proprietà, tra le più importanti vi è una grande deformabilità e durezza, una buona resistenza a trazione e a snervamento, una buona conducibilità termica e una resistenza a corrosione, quest'ultima per gli acciai inossidabili, detti inox. I componenti della lega e il trattamento utilizzato nella produzione di acciai comportano valori differenti di proprietà e resistenza meccaniche, e devono essere eseguiti dei test in laboratorio per determinare le proprietà finali del materiale. La misurazione di snervamento, duttilità e rigidità sono determinati da prove di trazione, la tenacità è misurata tramite prove di impatto, la durezza, invece, è determinata dalla misura di penetrazione

della superficie da arte di un oggetto duro. Le proprietà fisiche sono legate alla fisica dei materiali, tra cui densità, conducibilità termica, modulo elastico e coefficiente di Poisson. Questo materiale, nell'ambito delle tecniche AM, viene utilizzato nel settore industriale e ingegneristico.

- Alluminio: Si differenzia dagli altri materiali per l'aspetto, la facilità di fabbricazione, la buona resistenza a corrosione, la bassa densità, ma soprattutto, per l'alto rapporto resistenza-peso e 'alta tenacità alla frattura. Grazie a queste caratteristiche è uno dei materiali economici e strutturalmente efficaci nel mercato. Se esposto all'aria, si forma uno strato di ossido sulla superficie del materiale, il quale offre un'ottima resistenza a corrosione. L'alluminio, se non aggiunti elementi leganti come manganese, silicio, rame e magnesio, non garantisce un'elevata resistenza a trazione. Esso garantisce una conduttività termica elevata, circa tre volte superiore a quella dell'acciaio. La malleabilità dell'alluminio permette che le parti stampate con quest'ultimo siano alla pari a quelle prodotte con la Macchina a Controllo Numerico (CNC).
- Nichel: è un metallo bianco argenteo che subisce un'alta lucidatura. Appartiene al gruppo del ferro ed è duro, malleabile e duttile. Il nichel è un conduttore abbastanza buono di calore e di elettricità. La sua caratteristica principale è la sua resistenza a temperature elevatissime (utilizzabile fino a 1200°). Nei suoi composti più comuni il nichel è bivalente, anche se presuppone altre valenze. Viene impiegato principalmente nel settore aerospaziale ed energetico.
- Titanio: è un materiale che combina di alta resistenza, tenacità, rigidità, bassa densità e buona resistenza alla corrosione fornite da varie leghe di titanio a bassissime temperature o elevate temperature, che permettono un risparmio di peso nelle strutture aerospaziali. Il punto di fusione è di 1725°, il quale rappresenta una delle proprietà più utili del titanio. Esso non è un buon conduttore di elettricità, quindi, ne consegue, una elevata resistenza elettrica. Il titanio inoltre è ideale per applicazioni biomediche, come la realizzazione di protesi.

- Superlega di cobalto-cromo: caratterizzato dal suo alto rapporto resistenza-peso, per dall'elevata resistenza alla corrosione e allo scorrimento, e per la possibilità di ottenere lucidature estremamente lisce. Queste proprietà meccanica vanno a migliorarsi al crescere della temperatura mediante alcuni trattamenti termici eseguiti ad un massimo di 500-600°C; oltrepassando tale soglia, però, le proprietà crollano e al seguito del trattamento la lega risulterà inutilizzabile.

Esistono, infine, altri materiali particolari, come la ceramica, le resine contenenti ceramica in polvere e filamenti che contengono polveri di vari materiali (metallo, marmo, legno, ecc....).

#### 2.4 autoclave

Lo stampaggio in autoclave è una variazione dello stampaggio in sacco da vuoto; questa tipologia di processo realizza compositi a densità più elevata e privi di vuoti grazie all'utilizzo di temperatura e pressioni elevate durante tale procedura. [5]



*Figura 8: Autoclave per la realizzazione di compositi*

L'autoclave è un serbatoio ad alta pressione, riscaldato e solitamente dotato di sistemi di vuoto, in cui viene inserito il laminato per il ciclo di cura. Le pressioni utilizzate durante il ciclo sono generalmente di 50/100 psi e la durata del processo può essere diverse ore. È utilizzata per processare matrici a elevata temperatura di esercizio e la sua dimensione limita il volume del pezzo da realizzare. I prodotti realizzati tramite autoclave sono caratterizzati da una elevata quantità, a discapito di una quantità di tempo ed energia considerevole.

I vantaggi dell'autoclave sono:

- la possibilità di trattare una vasta gamma di materiali; infatti, ciascuno di essi può essere lavorato finché il processo rientra tra i limiti di temperatura e pressione previsti dal serbatoio;
- che si tratta di un metodo molto flessibile, infatti, i prodotti realizzati sono costituiti da strutture con frazioni volumetriche di fibre molto alte, avendo quindi un incremento delle prestazioni meccaniche.

Tra gli svantaggi invece ci sono:

- l'aumento inerziale della temperatura e della pressione
- il controllo della temperatura non preciso;

I problemi descritti sono causati dal grande volume dell'autoclave e dalla modalità di riscaldamento e pressurizzazione. Inoltre, il tempo del ciclo di cura, come già detto, è lungo, quindi, il costo dell'investimento è collegato direttamente al costo energetico del processo, dato che l'intera autoclave deve essere riscaldato ad una determinata temperatura.

Come detto precedentemente, l'autoclave è un'evoluzione dello stampaggio con sacco da vuoto, il quale utilizza il vuoto per eliminare l'aria intrappolata nel laminato e la resina in eccesso. La realizzazione avviene su uno stampo formato da strati di tessuto e resina; un film antiaderente di alcool polivinilico o nylon che

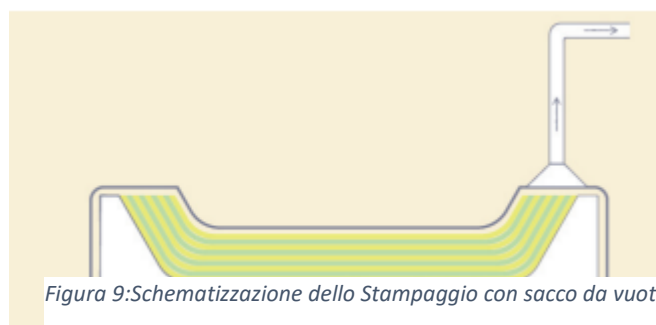


Figura 9: Schematizzazione dello Stampaggio con sacco da vuoto

viene collocato sopra il laminato e sigillato in corrispondenza della flangia dello stampo.

Questo processo è talvolta un'evoluzione della laminazione manuale; rappresenta il metodo di fabbricazione di base dei compositi termoindurenti, la quale consiste generalmente nella deposizione manuale di strati di tessuto secco su un attrezzo per realizzare un laminato stratificato. Questo metodo rappresenta vari limiti, tra cui principalmente il fatto che lo stampo è dotata di un'unica superficie liscia. Inoltre, l'assenza di controllo diretto sullo spessore finale del componente, sul contenuto di fibre, sulla frazione di vuoti e sulla qualità superficiale della superficie della superficie libera, suggerisce l'utilizzo dei prodotti realizzati dove gli sforzi in gioco sono bassi e la precisione dimensionale non è un fattore rilevante. I costi della laminazione sono ridotti, ma richiede un'elevata quantità di lavoro; in aggiunta, i controlli della qualità dei prodotti realizzati è difficile, e dipende molto dalla perizia dell'operatore. Altri limiti riguardanti questa tecnica sono:

- la deposizione del materiale ridotta,
- la quantità elevata di materiale di scarto,
- una difficile realizzazione di componenti privi di bordo.
- La qualità del componente non è garantita a causa della mancanza di controllo della compattazione e della presenza di bolle durante il processo;
- L'evaporazione di stirene, che comporta un grande problema a livello ambientale.

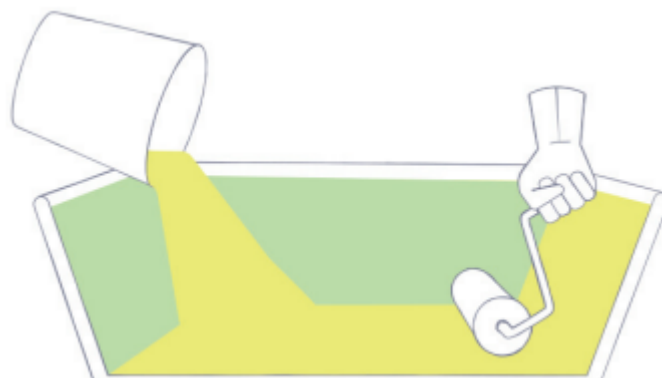


Figura 10:schematizzazione della Laminazione Manuale



## 2.5 Caso studio

Nel caso studio si porrà principalmente attenzione sull'aspetto termico, approfondendo le deformazioni meccaniche, dovute al serraggio dei due stampi, deformazioni termiche, dovute al trattamento in forno. In questo caso di studio si propone attenzione nell'analizzare il comportamento deformativo di due stampi in CarbonPA realizzati con la tecnologia di stampa 3D FFF, i quali, dopo la realizzazione in stampa, sono soggetti a un ciclo termico in forno per simularne il comportamento dato dopo una fase di produzione del pezzo in autoclave. Si andranno quindi ad acquisire le dimensioni degli stampi prima e dopo il ciclo termico grazie alla macchina di misura delle coordinate. Prendendo in considerazione dei punti specifici dello stampo, sono state misurate le loro coordinate al fine di confrontare le misurazioni dei punti presi prima e dopo il ciclo termico, il quale ha permesso di simulare il comportamento deformativo dello stampo in un processo in autoclave e che andrà ad evidenziare la discrepanza della posizione dei punti. Principalmente si andrà ad eseguire diversi tipi di misurazione:

1. Pre-trattamento termico:
  - 1.1. Stampi serrati;
  - 1.2. Stampi aperti;
  - 1.3. Stampi ri-serrati.
2. Post-trattamento termico (1° ciclo termico):
  - 2.1. Stampi serrati;
  - 2.2. Stampi aperti;
  - 2.3. Stampi ri-serrati.
3. Post-trattamento termico (2° ciclo termico):
  - 3.1. Stampi serrati;
  - 3.2. Stampi aperti;
  - 3.3. Stampi ri-serrati.



## 3 Macchinari e metodi

### 3.1 Sabbiatrice

La sabbiatura si basa sulla pulizia di una superficie tramite un abrasivo adeguato. Possiamo distinguerne due tipologie: sabbiatura a umido e sabbiatura a secco. Questo processo non rovina le superfici e, in base al tipo di materiale, è possibile eseguire un tipo di trattamento diverso; quando le parti da trattare sono delicate allora si esegue una sabbiatura con una pressione leggera, per quelle più solide, invece, si svolge un lavoro più “aggressivo”.

#### 3.1.1 Componenti

I quattro componenti di una sabbiatrice sono il serbatoio, il compressore, l'ugello e la sabbiatrice vera e propria. Il serbatoio, indicato anche con il nome di tramoggia, rappresenta l'elemento in cui la sabbia viene caricata. Il compressore serve, invece, a comprimere l'aria dentro al serbatoio. C'è poi l'ugello, mediante il quale la sabbia fuoriesce; questo elemento, inoltre, è regolabile e si può modificare l'intensità, la direzione e la forza del getto. La sabbiatrice vera e propria fa in modo che la sabbia possa essere miscelata con il getto di aria; inoltre, vengono regolate le proporzioni a seconda dell'oggetto su cui si sta intervenendo. La sabbiatrice, in pratica, non fa altro che lanciare del materiale abrasivo per mezzo dell'aria compressa; materiale che può essere rappresentato da graniglia in metallo o da sabbia in silicio.

### 3.2 Fresatrice

#### 3.2.1 Fresatura

La fresatura consiste nell'asportazione, grazie ad opportuni moti relativi utensile-pezzo, di uno strato superficiale di materiale del pezzo, trasformato in truciolo, con generazione di una superficie caratterizzata dai livelli di precisione e finitura desiderati. I principali vantaggi di questa tecnica sono:

- l'ottenimento di tolleranze strette e finiture superficiali molto spinte;

- la realizzazione di profili esterni e interni, spigoli vivi, planarità non conseguibili con altri processi;
- la possibilità di eseguire lavorazioni su parti trattate termicamente al fine di migliorare la durezza e la resistenza all'usura ed una convenienza economica, soprattutto per volumi di produzione relativamente bassi.

Tra gli svantaggi invece si può osservare:

- lo spreco di materiale (trasformato in truciolo);
- l'elevato consumi di energia causati dai tempi di ciclo lunghi;
- la richiesta di una manodopera specializzata.



*Figura 11: interno di una fresatrice*

L'unità di misura della fresatura è la MRR data dalla velocità di asportazione del materiale MRR (Material Removal Rate) che rappresenta il volume di materiale asportato nell'unità di tempo ( $\text{mm}^3/\text{min}$ ). [6]

### 3.2.2 Caratteristiche utensile

Le caratteristiche geometriche e di forma degli utensili monotaglienti utilizzati nella fresatura sono:

- Portautensile: parte dell'utensile che sostiene l'inserto e ne consente l'afferraggio;

- Inserto: parte dell'utensile che stabilisce il contatto diretto con il pezzo e sul quale si trovano superfici attive e taglienti;
- Petto o faccia: superficie attiva sulla quale si forma e scorre il truciolo -  
Dorso o fianco: superficie laterale adiacente al petto;
- Dorso principale: superficie rivolta verso la superficie in lavorazione;
- Dorso secondario: superficie rivolta verso la superficie lavorata;
- Tagliente principale: spigolo di intersezione petto-dorso principale;
- Tagliente secondario: spigolo di intersezione petto-dorso secondario;
- Arco di raccordo: arco che raccorda i taglienti il cui raggio è indicato come raggio di punta.

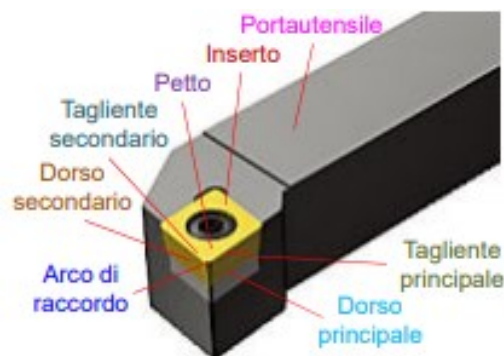


Figura 12: componenti di un utensile

La fresatura consente di ottenere una vasta gamma di superfici (piane, scanalate, spallamenti, ...) mediante l'azione di un utensile pluritagliente a geometria definita. Il moto di taglio è eseguito dall'utensile (rotatorio continuo), quello di avanzamento dal pezzo (traslatorio). Il moto di lavoro è cicloidale.

La fresatura può essere di due tipi: periferica o frontale. (prendere le foto da slide 24) Nella prima i taglienti sono disposti lungo la periferia esterna del disco o cilindro e può essere eseguita in discordanza, componente di  $v_t$  lungo la direzione del moto di avanzamento durante il contatto tra tagliente e pezzo con stesso verso di  $v_a$  o in concordanza, componente di  $v_t$  lungo la direzione del moto di avanzamento durante il contatto tra tagliente e pezzo con verso opposto a quello di  $v_a$ . Nella fresatura eseguita in concordanza i taglienti sono disposti in modo

tale che la loro parte attiva sia in corrispondenza della base del corpo cilindrico della fresa.

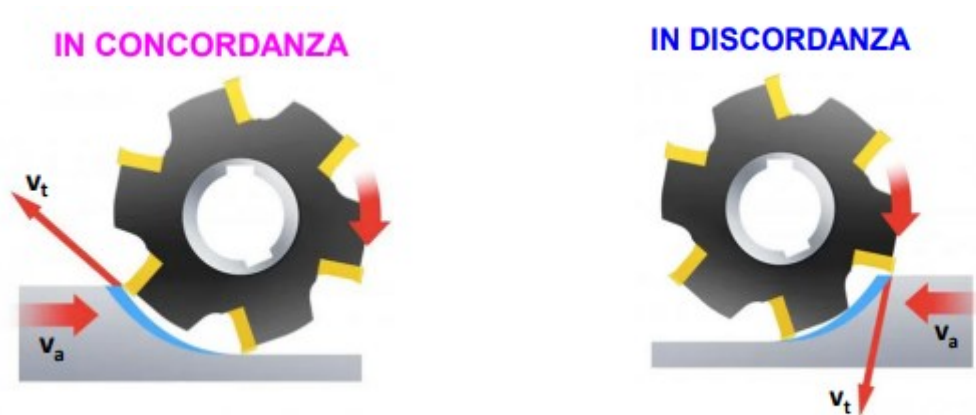


Figura 13: funzionamento fresatura periferica in concordanza e in discordanza

### 3.3 Alesatrice

Foratura: lavorazione per asportazione di truciolo che consente di ottenere fori con livello di precisione grossolano. I moti di taglio (rotatorio continuo) e quello di avanzamento (traslatorio continuo) sono entrambi eseguiti dall'utensile; il moto di lavoro è di tipo elicoidale. I fori possono essere di vari tipi:

- A) cilindrico passante;
- B) cilindrico cieco;
- C) svasato;
- D) con lamatura;
- E) conico;
- F) a profili multipli.

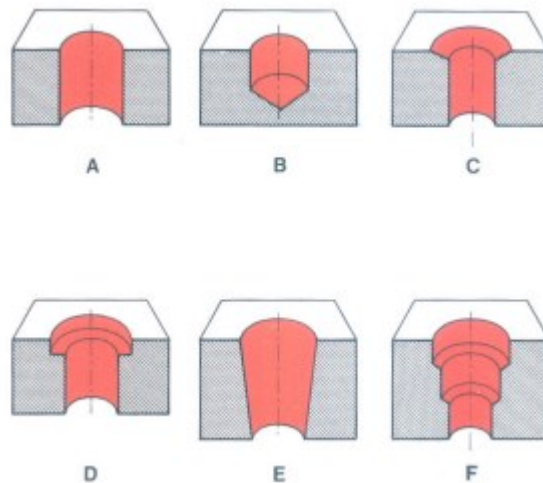


Figura 14:tipologie di fori

### 3.3.1 Alesatura

Avvenuta la foratura, per allargare e migliorare la qualità di un foro preesistente vengono eseguite delle lavorazioni di precisione chiamate alesatura e barenatura. Il moto di taglio (rotatorio continuo) è eseguito dall'utensile, il moto di avanzamento (traslatorio continuo) sempre dall'utensile o dal pezzo e il moto di lavoro è di tipo elicoidale.

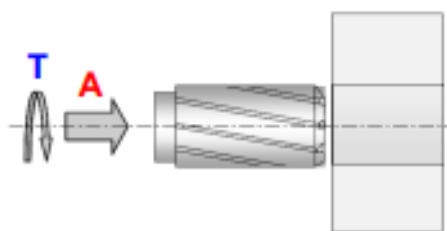


Figura 15:schematizzazione dei moti in una alesatura

### 3.4 Macchina di misura a coordinate (CMM)

Questa tipologia di macchine viene usata per testare una parte o un assemblaggio al fine di determinare un eventuale conformità con il progetto originale. Prima di

eseguire la misurazione vera e propria sul pezzo, si effettua un controllo facendo misurare al tastatore una sfera (fatta di un materiale con basso coefficiente d'attrito). Questa tecnologia di ispezione comporta un incremento di velocità ed efficienza della misurazione; le CMM dotate di tastatori, sono lente e non adatte alla misurazione di forme complesse. La macchina usata è la Zeiss – Contura 7/10/6, costituita da una piattaforma che assicura un'alta qualità. L'ultima generazione è più precisa ed offre un'ampia gamma di sensori ottici oltre ad avere un campo di misura più ampio. Il software di riferimento CALYPSO di ZEISS ed un concept generale di elevata qualità consentono a CONTURA di consolidare il suo ruolo di soluzione standard nella sua classe.

Specifiche tecniche:

- Campo di misura (X, Y, Z),
- errore misura lunghezze (ISO 10360-2),
- Errore misura scansione (ISO 10360-4),
- Grandezza macchinario: 700x1000x600 mm,
- E0 =  $(1.7 + L/350) \mu\text{m}$ ,
- MPE\_THP =  $2.7 \mu\text{m}$  in 50 s.





Figura 16: Zeiss – Contura 7/10/6

### 3.5 Stampante 3D

Il macchinario utilizzato è il Roboze – ONE +400: il sistema utilizza come materia prima un filamento di materiale composito che viene stampato grazie ad un estrusore che, riscaldandolo, può raggiungere i 450° C. Trasmissione meccanica

diretta degli assi X e Y grazie all'inserimento di cremagliere elicoidali a contatto con pignone. Il moto del corpo estrusore è uniforme e lo costringe in un punto arbitrario scelto con precisione. Per garantire la perfetta adesione tra le parti e il piano di stampa, la macchina è equipaggiata con un sistema di vuoto del piano che semplifica e accelera il processo di stampa 3D, offrendo allo stesso tempo una maggiore stabilità anche per le stampe di grandi volumi.

Specifiche tecniche:

- Volume di lavoro: 300x200x200 mm;
- Velocità di costruzione: 3000 mm/min;
- Spessore del layer: 0.10 - 0.33 mm;
- Temperatura estrusione (mac): 450° C;
- Temperatura piano d stampa (max): 130° C.

La tecnologia usata da questa stampante è Fused Filament Fabrication (FFF), la quale mostra un grande potenziale nello stampaggio di compositi a fibra corta. Recentemente, questa tecnica ha ricevuto un maggiore interesse da parte della comunità di ricerca a causa del suo basso spreco di materiale, della sua facilità di manipolazione e del suo costo relativamente basso rispetto ad altre tecniche. Il processo FFF è caratterizzato dall'uso di un filamento di materiale polimerico come materiale, che consente la produzione di parti da vari filamenti termoplastici, tra cui acido polilattico (PLA), poliammide (PA) acrilonitrile butadiene stirene (ABS), policarbonati, nylon ed altri vari. Nonostante ciò, il processo FFF presenta alcune limitazioni, ad esempio le parti termoplastiche presentano delle proprietà meccaniche minori rispetto ai metodi di produzione tradizionali, come, ad esempio, lo stampaggio a iniezione. Per aumentare le prestazioni meccaniche dei prodotti per la fabbricazione di filamenti polimerici, sono stati utilizzati diversi tipi di materiali di rinforzo come fibre polimeriche, nanotubi di carbonio, fibre di vetro e nerofumo. In particolare, i filamenti rinforzati con fibra di carbonio continue e corte sono uno sviluppo promettente nei materiali FFF. La tecnologia di modellazione della deposizione fusa consente di stampare il materiale sotto forma di filamento che viene precedentemente riscaldato

all'interno di un ugello prima di essere depositato su una piattaforma utilizzando l'approccio strato per strato. Dagli studi condotti da Nekoda sulla risposta termomeccanica e sulla meccanica di guasto dei compositi stampati in 3D, si è giunti alla conclusione che la forza dei campioni stampati in 3D dipenda notevolmente dal modello di riempimento e dalla geometria della parte. Inoltre, andando ad analizzare le prestazioni degli elementi FFF rinforzati con fibra di carbonio costituiti da PLA e PA si nota che il pezzo stampato in PA, rispetto a quello in PLA, aveva una migliore resistenza alla flessione e alla torsione, come verificato dagli studi di Arunkumar. Infine, si è anche dimostrato che il tasso di riempimento è uno dei principali parametri di input che influenzano i risultati meccanici finali. [7]

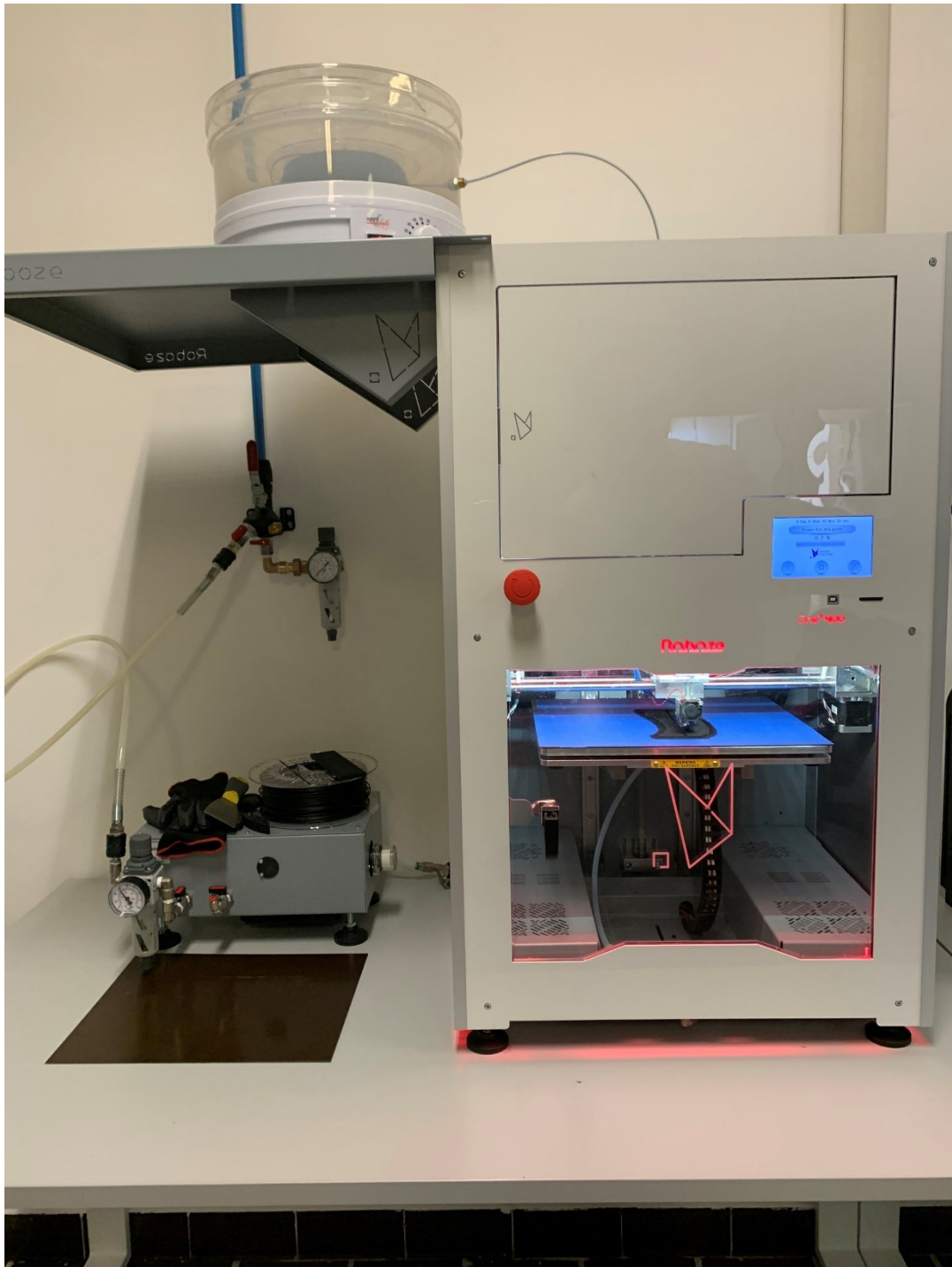


Figura 17:Roboze – ONE +400

### 3.6 CarbonPA

Il carbonPA È un materiale polimerico ultraleggero a base di nylon rinforzato al 20% di fibra di carbonio che conferisce al materiale proprietà meccaniche di

resistenza a trazione e rigidità tali da poter sostituire le leghe metalliche in alluminio. La matrice della Carbon PA è un composto poliammidico in grado di resistere alle alte temperature, per questo motivo è utilizzato principalmente nel settore dell'automotive, in cui resistenza termica e meccanica costituiscono delle condizioni necessarie per l'efficienza dei veicoli, nel campo aerospaziale, aeronautico, ferroviario, nautico e sportivo. Nell'ambito dei materiali compositi, i polimeri rinforzati con la fibra di carbonio vengono sempre più utilizzati, grazie alle loro notevoli proprietà rispetto ai materiali tradizionali. Per ottenere i compositi CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) vengono utilizzati diversi processi di produzione, ma la maggior parte di essi richiede investimenti elevati e lunghi tempi di consegna; inoltre, sono associati a una rilevante produzione di materiale di scarto, con conseguente aumento dei costi.

Il CarbonPA uno dei materiali polimerici per la stampa 3D più performanti poiché è un materiale composito costituito da una matrice polimerica rinforzata con fibre di carbonio corte. Nello specifico, la matrice PA 6.10 garantisce una minore igroscopicità e una maggiore stabilità nel tempo. Il polimero rinforzato con fibra di carbonio ha un'eccellente resistenza all'abrasione e agli agenti chimici, creando, insieme alle eccellenti proprietà meccaniche citate in precedenza, un perfetto sostituto per applicazioni di sostituzione dei metalli. Di conseguenza, è considerato un candidato per la sostituzione del metallo in applicazioni ad alto carico grazie alla sua elevata resistenza alla trazione che lo rende paragonabile all'alluminio.



*Figura 18: bobina di CarbonPA*

### 3.7 Chiave torsionometrica

La chiave torsionometrica viene utilizzata per regolare la coppia di serraggio tra bulloni, viti e dadi. È costituita da un corpo, più o meno lungo per aumentare il braccio di leva, e una testa, nella quale è contenuta il meccanismo del cricchetto e dalla quale sporge un nottolino. Nel nottolino si possono calettare le bussole manualmente, che possono essere sostituite per adattarsi alle differenti forme e diametri delle teste delle viti o dei dadi. Sull'impugnatura è riportata una scala graduata che indica la coppia di serraggio, misurata in Nm. La forza che si va ad applicare si controlla grazie ad una molla presente all'interno del corpo della chiave, tenuta in posizione da un registro con un ingranaggio e, andando ad impostare la coppia desiderata con la scala graduata, si manda in tensione la molla. Quando la forza applicata raggiunge la stessa tensione della molla interna, l'ingranaggio non ha più nessuna opposizione, per cui viene liberato e "scatta"; si capisce dal "click" tipico di queste chiavi.



Figura 19:chiave torsionometrica

### 3.8 Trattamento termico (Forno)

Il trattamento termico è un insieme di procedimenti industriali che vanno a modificare le proprietà fisiche o chimiche dei materiali. Le parti (principalmente acciai e leghe metalliche) vengono poste in un forno per un determinato periodo di tempo ad un'alta temperatura controllata in base alle proprietà da conferire ad

esempio durezza superficiale, duttilità, resistenza all'usura, aspetto estetico, ecc. Il trattamento termico termina con un raffreddamento controllato delle parti per portarle a temperatura ambiente. L'obiettivo è quello di ottenere prodotti con proprietà diverse da quelle iniziali, prima dell'ingresso del forno.

I trattamenti termici possono essere di due tipi:

- trattamento fino al nucleo, che ha l'obiettivo di aumentare la duttilità del materiale per poterlo lavorare successivamente;
- trattamenti su pezzi finiti, per andare a modificare parametri come ad esempio la finitura superficiale, resistenza meccanica, durezza, resistenza alla corrosione e all'usura.
- Trattamenti termici di indurimento a bassa temperatura tramite azoto liquido in celle criogene dove la temperatura può raggiungere i  $-150^{\circ}\text{C}$ . Utilizzati prevalentemente nell'industria aeronautica e spaziale poiché i pezzi da integrare in, ad esempio, in aerei e satelliti, devono garantire la completa trasformazione dell'austenite in martensite, caratterizzata da una maggiore durezza.



*Figura 20: forno utilizzato per il trattamento termico*





## 4 Procedimento

### 4.1 Stampaggio del pezzo

Innanzitutto, dopo aver realizzato il file CAD del pezzo da effettuare, si verificano i parametri per la stampa.

Il preriscaldamento del piano è selezionato a 110° C.

Il piano di stampa, tenuto fermo con un sistema a vuoto costituito da una pompa, è rivestito con un nastro (blue tape) per far sì che il materiale si depositi correttamente e che non si stacchi dal piano di stampa. Tra il piano e la pompa si può sentire una fuoriuscita d'aria la quale è causata dal blue tape che non permette la piena aderenza tra le due parti e non garantisce il vuoto totale; questa fuoriuscita d'aria non è comunque un problema, basta verificare che il piano stia fermo per lo stampaggio. Poi si controlla l'estrusore, costituito da riscaldatore, ventola, sistema di raffreddamento e ugello; quest'ultima parte dell'estrusore è rimovibile e, in base alle esigenze, l'ugello può essere sostituito con un altro di differente diametro. Di solito viene utilizzato un ugello con diametro di 0.4 mm. L'ugello che andremo ad utilizzare si usurerà molto velocemente, in quanto il materiale che fuoriesce è costituito da resina plastica e fibre molto aggressive che, passando continuamente su materiale già depositato, subisce uno sgretolamento.

Prima di caricare il materiale, va fatto un livellamento, il quale trasferisce al piano l'informazione relativa all'altezza giusta da tenere, andando a portare il piano al livello corretto di altezza, così da non depositare il primo strato né troppo schiacciato o né troppo distante.

L'altezza tra ugello e piano che si utilizza è di 0.15 mm e si verifica con uno spessore: dopo che la macchina esegue l'azzeramento degli assi e avvicina l'ugello al piano, si passa lo spessore tra lo spazio creatosi e se lo attraversa con una discreta fatica allora la distanza è corretta, altrimenti vado a modificarla tramite delle viti, richiamandola o allentandola. Questa operazione va fatta per

tutti i 4 punti del piano e, se viene modificata una di questa distante, si devono andare a verificare nuovamente anche gli altri punti, poiché la modifica di una distanza può influenzare anche gli altri punti del piano.

Successivamente si va a prendere il filamento, posto precedentemente nel forno, e si va ad inserire nell'essiccatore della stampante. Per caricarlo è presente una piccola leva, che serve per allentare il contro ingranaggio, poiché ci sono ingranaggi che, ruotando, tirano il filo. L'operazione è eseguita manualmente. Il verso in cui andremo a inserire il filamento non è importante, la cosa a cui va posta maggiore attenzione è verificare che il filamento scorra in modo regolare e continuo. L'essiccatore è posto ad una temperatura di 70° C, in modo da non far acquisire l'umidità persa grazie al riscaldamento in forno. Si pone poi la temperatura di riscaldamento dell'estrusore a 260° C. Bisogna notare che il tempo di quest'ultima operazione è molto breve mentre quella del preriscaldamento del piano ha tempi abbastanza considerevoli. La fuoriuscita del materiale dall'estrusore non inizia fino a quando non si è raggiunta la temperatura di 240/250° C.

Dopo aver controllato che tutti i parametri, si va a immettere la scheda, scegliere il progetto di stampa e ad avviarlo. La stampante prima dell'avvio vero e proprio farà dei controlli su tutte le impostazioni immesse, come ad esempio le temperature, rispettivamente di estrusore e piano, e il materiale se è caricato; quindi, la stampante, dopo il controllo, avvia la procedura di stampa.

La stampa inizierà con la realizzazione del raft, il supporto creato per evitare difetti nello stampaggio, per poi realizzare il pezzo vero e proprio.

La stampa si esegue con il 30/40% della velocità normale, depositando più materiale. Il tempo di stampaggio è di circa 19 ore. Si può anche interrompere la stampa per intervenire, che però deve essere veloce poiché potremo andare incontro a problemi dato che la fase più delicata dello stampaggio è l'inizio della fuoriuscita del materiale dall'estrusore.

Finita la stampa il raft va tolto. In questa non è necessario l'uso di macchine utensile specifiche.

#### 4.2 Alesatura dei fori

Nella fase successivamente si allargano i fori e, siccome i due semi stampi devono essere serrati, andremo a usare una alesatrice.

Nel caso studiato si usano delle viti M8 di una lunghezza tale da essere completamente passanti tra i semi stampi. Verificare poi se il passaggio delle viti sia corretto, in caso contrario prendere una punta con diametro più grande e ripetere l'operazione. Tra le viti e i fori degli stampi il gioco deve essere minimo, il passaggio deve essere un po' forzato.

Va poi tolto il supporto rimanente con la carta vetrata. La superficie di appoggio degli stampi non risulterà completamente piatta; quindi, per prima cosa si va ad immettere lo stampo dentro la sabbiatrice, poi vanno presi i due stampi per serrarli esercitando una coppia di serraggio tra le viti e lo stampo di 10 Nm grazie all'uso della chiave torsionometrica. Successivamente il pezzo lo si andrà a lavorare nella fresatrice. Così facendo avremo una superficie uniforme per poi poter eseguire una misurazione più corretta ottenendo dei dati più precisi. Nella fase di fresatura bisogna essere particolarmente precisi in quanto bisogna fare attenzione a "disegnare" il percorso in modo tale che la punta della fresatrice non vada ad intaccare e "mangiare" le viti o i bulloni di serraggio.

#### 4.3 Misurazioni pretrattamento termico

Una volta conclusa la fase precedente, si procede a posizionare lo stampo nella CMM, la quale costituita da un'apposita "morsa" dove collocare il pezzo, e avviare la misurazione. In questo primo utilizzo della CMM (e nelle prossime volte) si ricaveranno tre tipologie diverse di dati:

- lo stampo serrato;
- lo stampo aperto;
- lo stampo dopo il serraggio.

#### 4.4 Riscaldamento dello stampo nel forno

Dopo aver eseguito la misurazione, viene preparato il forno per il trattamento termico riscaldandolo per il primo pezzo ad una temperatura di 80°C e per il secondo pezzo ad una temperatura di 100° C. La temperatura può essere verificata grazie ad una termocoppia presente nel forno, oppure, per avere una maggiore precisione, utilizzando una termocoppia esterna immettendo il sensore nell'apposito foro presente nel forno. L'utilizzo della termocoppia esterna è migliore perché ci permette di verificare la temperatura nel punto dove si andrà a posizionare il pezzo, mentre la termocoppia del forno è posizionata in un angolo vicino alle pareti del forno.

Nel caso studiato si è osservato che la temperatura misurata dai due sensori differiscono di circa 5° C, una differenza abbastanza rilevante.

Dopo che il forno ha raggiunto la temperatura corretta, viene inserito lo stampo e si attende che il trattamento termico si concluda. La durata del trattamento è di 2 ore.

#### 4.5 Misurazione post trattamento termico

Finito il trattamento termico, i due semistampi vengono estratti; quindi, utilizzando nuovamente la CMM, viene analizzato nuovamente il pezzo per avere poi le misurazioni, con le quali si andrà a fare il confronto con quelle eseguite precedentemente.

#### 4.6 2° ciclo termico

Nei giorni successivi si riandranno ad eseguire le stesse operazioni citate precedentemente per eseguire un altro ciclo. Quindi il forno va riscaldato alle stesse temperature con le quali si è eseguiti il primo ciclo e, una volta estratti dal forno e fatti raffreddare, si procede alla misurazione dei punti tramite la CMM.



## 4.7 Caso studio

In questo progetto abbiamo riscontrato vari problemi e notato varie accortezze da fare in fase di sviluppo:

- Fase di stampa:
  1. una volta, avviata la fase di stampa, che come descritta, ha una lunga durata di esecuzione, la stampante si è arrestata in quanto c'è stata un'interruzione di corrente; quindi, il pezzo, purtroppo non ancora terminato, è stato scartato, con conseguente spreco del materiale usato fino a quel momento;
  2. il filamento di materiale non è stato estruso correttamente non garantendo il riempimento del pezzo in modo adeguato.
  3. Dopo aver realizzato il primo pezzo, abbiamo notato che purtroppo si manifestava in modo eccessivo l'effetto del "warping", diventando curvo essendosi esercitata una forte flessione. Visto ciò si è intervenuto nel progetto CAD, andando a modificare il numero di strati di raft da effettuare, aggiungendone uno e modificandone il suo riempimento. Effettuando la seconda e la terza stampa, abbiamo realizzato dei pezzi ottimali con le proprietà desiderate.

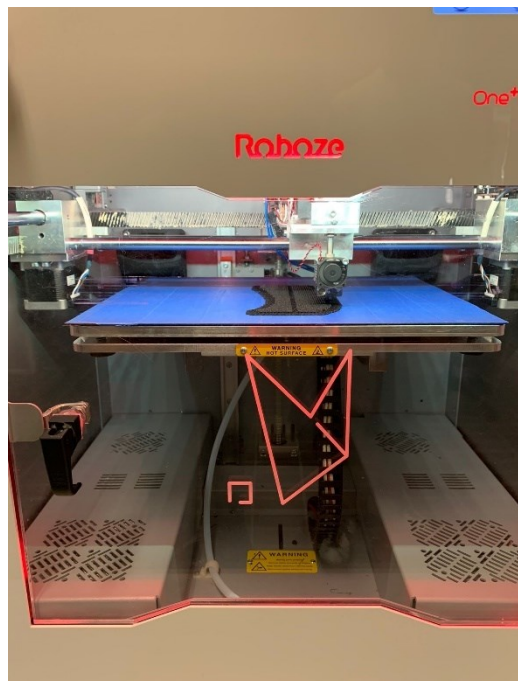
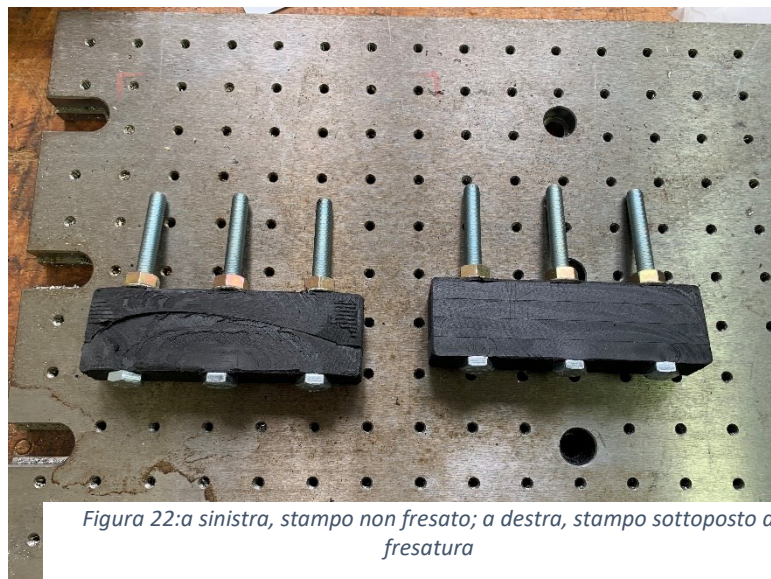


Figura 21:Fase di stampaggio del raft

- Fase delle post lavorazioni:
  1. è stato necessario togliere, in prima parte anche superficialmente, il raft; questa operazione può essere fatta manualmente senza l'utilizzo di attrezzi o macchine utensili. Bisogna essere però cauti e precisi, così da poter essere in seguito più semplice la rimozione del raft residuo tramite l'utilizzo di sabbiatrice e fresatrice;
  2. abbiamo riscontrato un po' di difficoltà per la selezione delle viti; infatti, è stato necessario l'utilizzo dell'alesatrice, in modo da poter allargare i fori. Importante anche la decisione di applicare una coppia di 10 Nm, con una coppia esercitata eccessiva il pezzo avrebbe potuto riportare cricche, e quindi gli stampi inutilizzabili ed eliminati;
  3. nella fase di fresatura vanno immettere correttamente le coordinate nella macchina, poiché può capitare, come è successo in questo caso, che nel passaggio della punta vengano intaccate delle parti di bulloni. Fortunatamente si è stati precisi e non si è adatto ad intaccare in modo grave le viti così da avere dei danni permanenti nel pezzo o nella punta della fresatrice; in caso contrario bisognerebbe cambiare quest'ultima. Un'altra cosa da controllare è la quantità di materiale da asportare, portare particolare attenzione alla profondità da selezionare, non andando a fare ciò la punta



*Figura 22: a sinistra, stampo non fresato; a destra, stampo sottoposto a fresatura*

potrebbe passare dove è presente la vite, buttando lo stampo poiché non più utilizzabile.

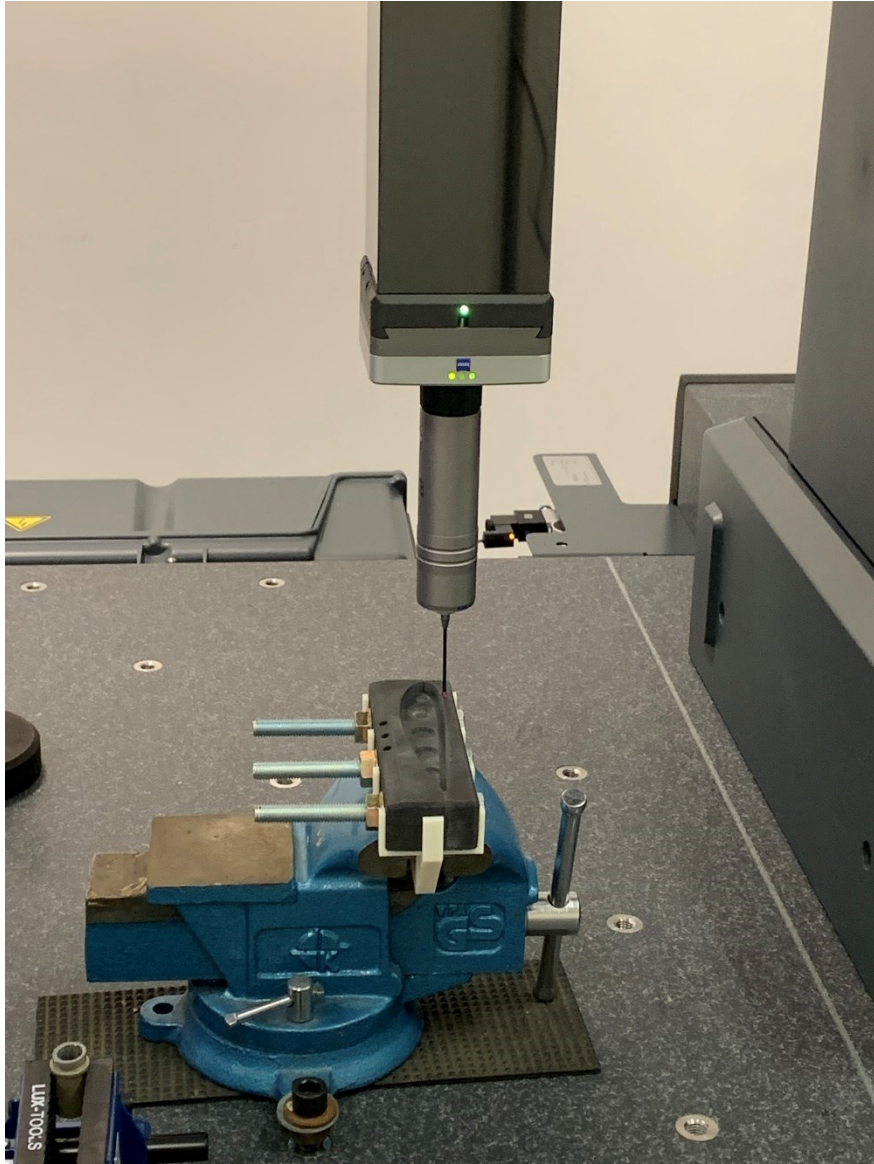
- Fase del trattamento termico:

Quando si è andati ad effettuare il trattamento termico, oltre ad utilizzare la termocoppia già installata nel forno, si è utilizzato un'altra esterna da mettere in mezzo al forno per controllare con più precisione la temperatura interna. Difatti, come si è notato, la differenza tra la termocoppia esterna e quella del forno, posizionato in un angolo, è di circa 5° C, una differenza abbastanza considerevole pensando alle temperature dei trattamenti da effettuare.

- Fase dell'acquisizione delle coordinate:

La cosa che è stata più difficile da vedere e controllare è stato il posizionamento corretto del pezzo nella CMM. Abbiamo notato che le misurazioni differivano tra loro, non solo per le deformazioni meccaniche o per i trattamenti termici subiti, ma anche per il posizionamento del pezzo nella morsa. Andando ad analizzare i dati acquisiti dalla prima misurazione si è notato che il pezzo non era appoggiato in modo corretto, più precisamente in una delle estremità della morsa, così facendo i dati acquisiti avevano un sistema di riferimento diverso dalle altre due misurazioni, dove invece lo stampo era appoggiato al centro della morsa. Per correggere l'errore fatto, si sono simulate varie ipotesi, tra cui quella precedentemente descritta, e quindi, per confermare ciò, abbiamo trasferito i punti presi su Solid Edge (SE), ricostruito le curve delle misurazioni pre e post trattamento termico e, infine, traslare ruotare la curva interessata per vedere se l'andamento fosse simile. Avendo verificato ciò, con esito positivo, si è successivamente fatto il confronto tra i risultati ottenuti.

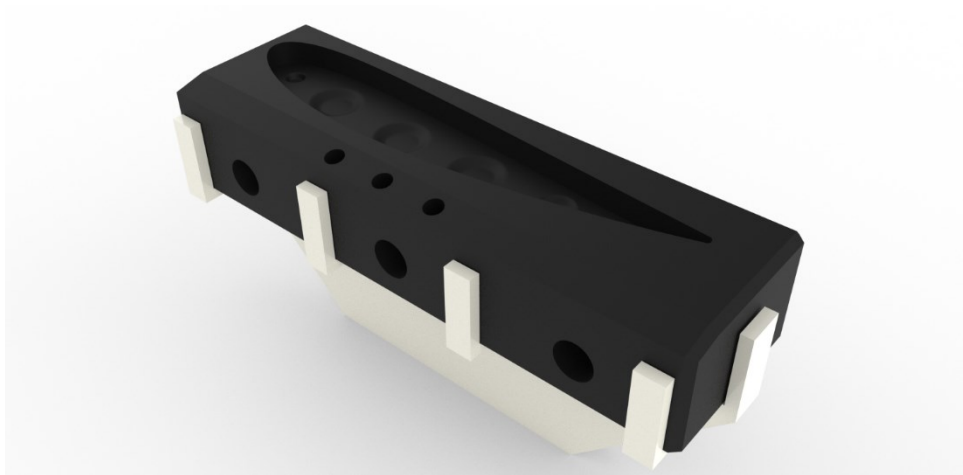




*Figura 23:stampo sottoposto alla misurazione delle coordinate*

## 5 Risultati

Nel presente capitolo si andranno a esporre ed analizzare i dati ottenuti e sviluppati dalla misurazione delle coordinate in CMM sugli stampi in CarbonPA. Come evidenziato nel capitolo precedente, i risultati possono, in alcuni casi, essere influenzati dal posizionamento dello stampo all'interno del supporto, in quanto le curve di entrambi gli stampi rappresentanti il pretrattamento termico, in specifico la voce serr (che indica il serraggio), sono calcolate con un posizionamento errato dello stampo; comunque, i risultati possono considerarsi veritieri in quanto si è verificato che la curva relativa al serraggio, grazie alla sua rototraslazione citata nel capitolo precedente, ha un andamento simile alle altre. Qui sotto è rappresentato il CAD del pezzo realizzato e posizionato nella morsa.



*Figura 24: Progetto CAD del pezzo realizzato*

Sullo stampo verranno indicati dei punti che considereremo la nostra configurazione; i punti designati saranno un totale di 20 e saranno divisi in 3 piani diversi denominati, nel caso studiato:

- superiore, rappresentato dai punti 1,2,3,4,5,6;
- intermedio, rappresentato dai punti 7,9,10,12,14,16,17,19,20;
- inferiore, rappresentato dai punti 8,11,13,15,18.

Il piano di riferimento preso è quello indicato sotto in figura, che corrisponde all'altezza massima della morsa.



Figura 25: piano di riferimento e configurazione dei punti presi. In verde i punti del piano superiore; in giallo i punti del piano intermedio; in rosso i punti del piano inferiore

Il pezzo, come già detto, è stato sottoposto a delle sollecitazioni, meccaniche e termiche, le quali hanno determinato delle differenze di configurazione rispetto a quella nominale.



Figura 26: altezze dei piani superiore e intermedio rispetto al piano di riferimento

Infine, i grafici per analizzare gli stampi avranno come ascisse i punti presi come configurazione, come ordinate l'altezza relativa ai vari punti.

## 5.1: Analisi dello stampo a 80° C

Qui di seguito si analizza lo stampo che ha subito i trattamenti termici a temperatura di 80°C.

### 5.1.1: Pezzo non trattato termicamente

In questo paragrafo si riportano dati conseguiti in CMM prima di mettere il pezzo in forno. Come già detto in precedenza, abbiamo 3 configurazioni differenti tra i due semi stampi: serrato, aperto e ri-serrato.

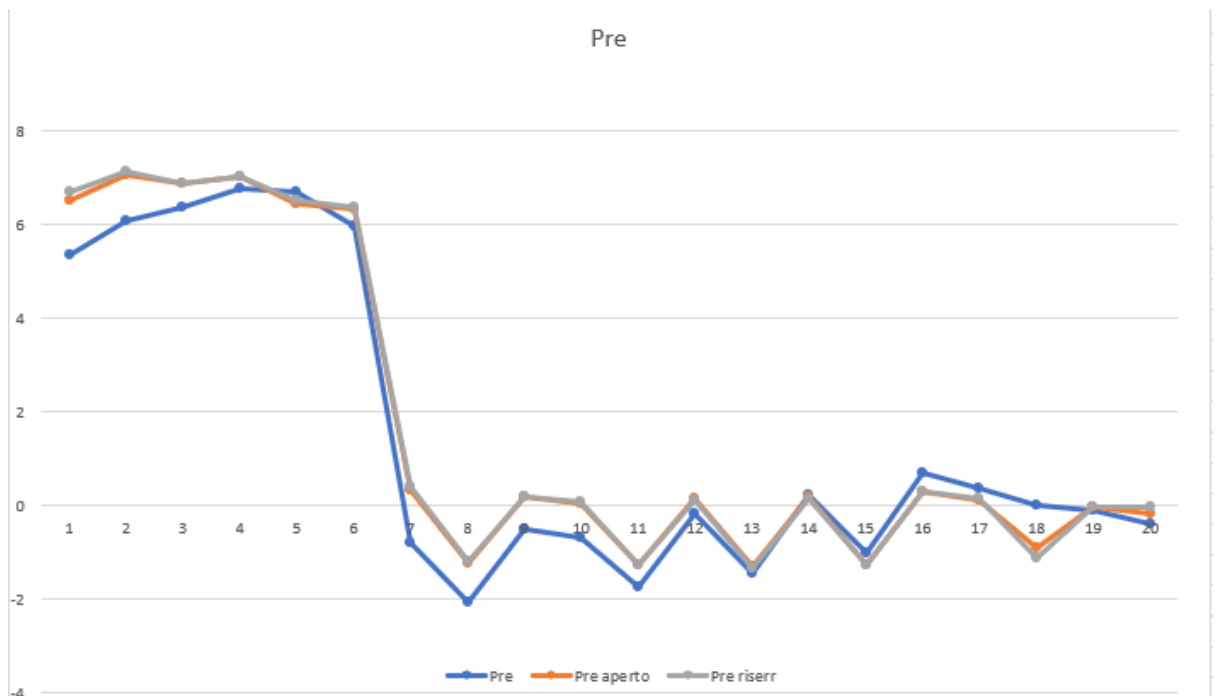


Figura 27: altezze dei punti pretrattamento termico

In questa fase abbiamo analizzato unicamente le deformazioni meccaniche e tensioni dovute al serraggio, in quanto il trattamento termico non era ancora stato eseguito; abbiamo potuto notare come le deformazioni apportate da una coppia di 10 Nm siano ininfluenti e che le curve siano pressoché identiche. Qui sotto sono riportati i tre grafici, ognuno rappresentante i punti del piano indicato.

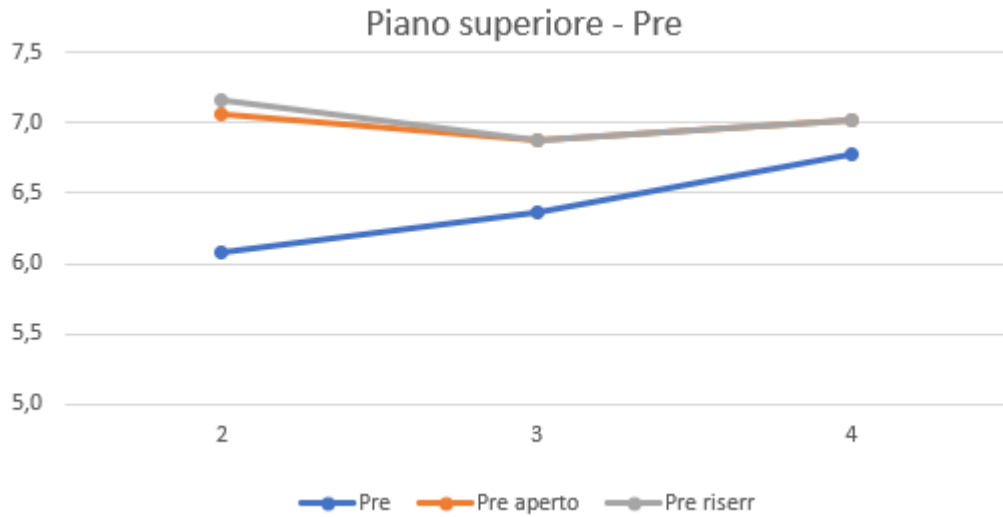


Figura 28: punti piano superiore pretrattamento

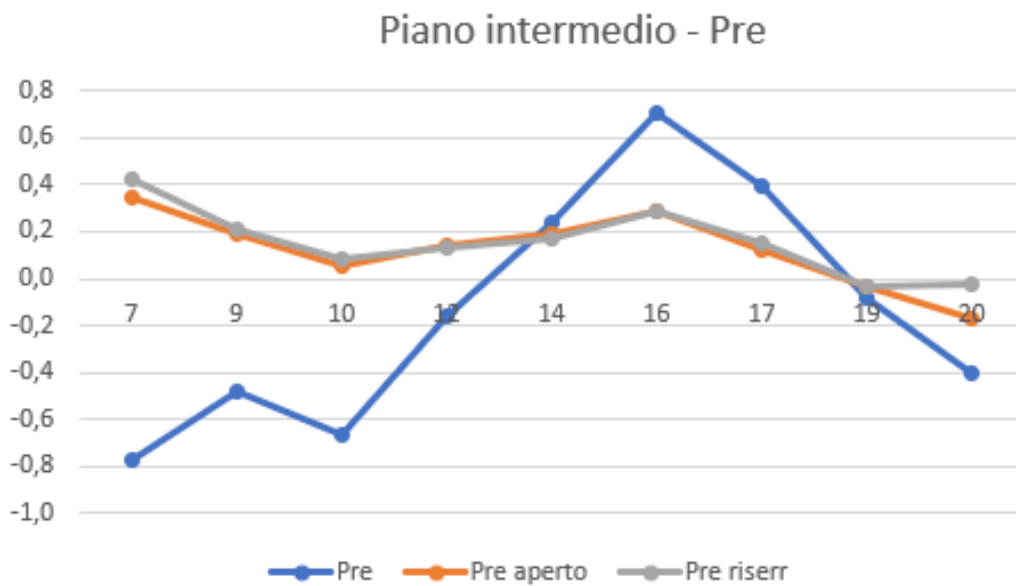


Figura 29: punti piano intermedio pretrattamento

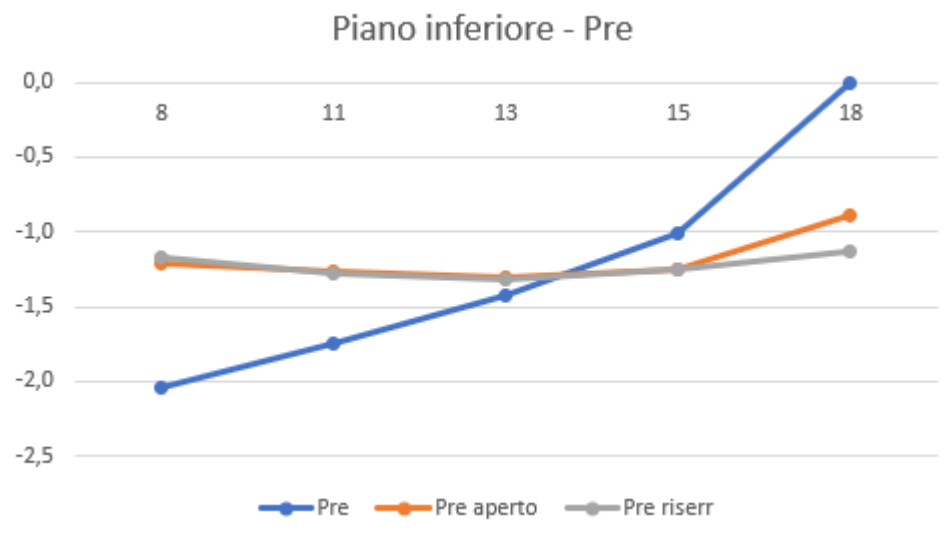


Figura 30:punti piano inferiore pretrattamento

Dalla rappresentazione di tali seguenti grafici, possiamo concludere che il serraggio non provoca in alcun punto nessun spostamento rilevante, in quanto i punti equivalenti nelle tre curve sono pressoché sovrapposte. Si può evidenziare al massimo una variazione di circa 0,2 mm, precisamente nel punto 18 e 20.

#### 5.1.2 1° ciclo termico

Dopo aver effettuato il 1° ciclo termico, si è andato nuovamente a posizionare il pezzo nella CMM, e, come in precedenza, sono state acquisite le coordinate dei punti nelle tre differenti configurazioni.

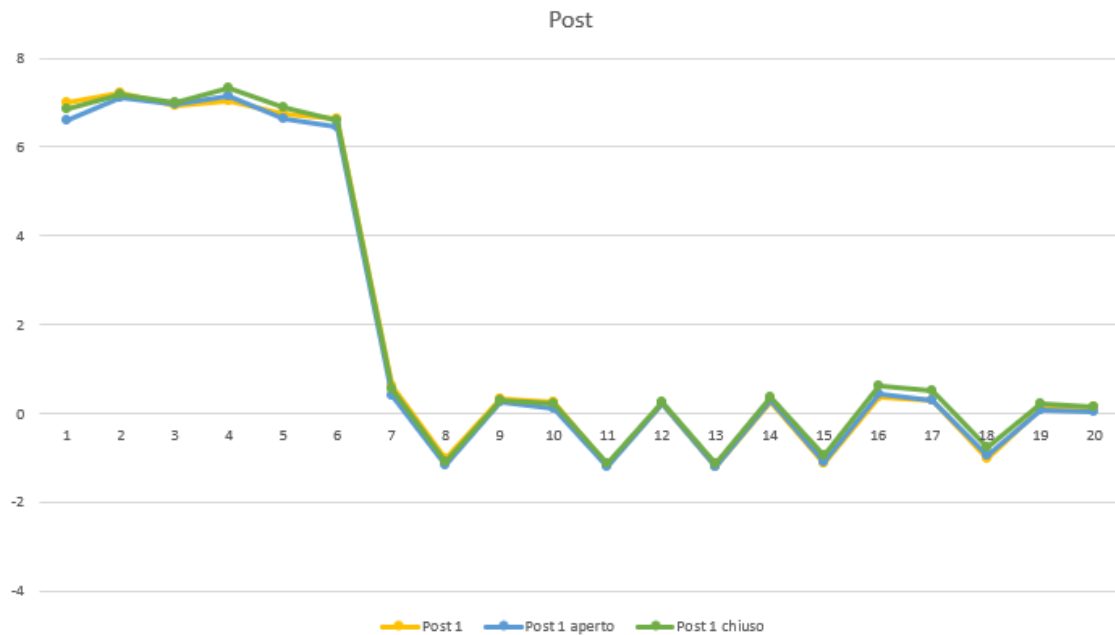


Figura 31: altezze dei punti dopo il primo trattamento termico

Si è proceduto poi a commentare sia il confronto tra le misurazioni prima e dopo il trattamento termico, sia gli spostamenti dovuti al togliere e mettere la coppia esercitata.

Qui, nell'immagine sottostante, viene rappresentato l'effetto del trattamento termico, mettendo a confronto l'ultima misurazione presa prima del trattamento e la prima dopo il trattamento subito.

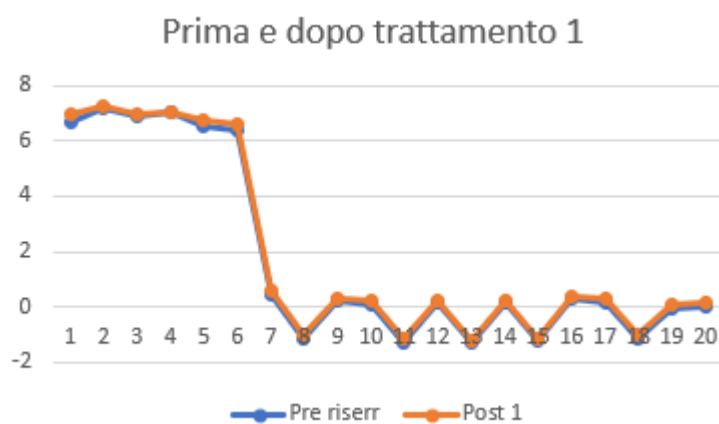


Figura 32: confronto prima e dopo il trattamento termico

Il trattamento termico determina una deformazione maggiore rispetto alle deformazioni, trascurabili anche stavolta, dovute al serraggio la deformazione maggiore la troviamo nei punti presenti sulle estremità:

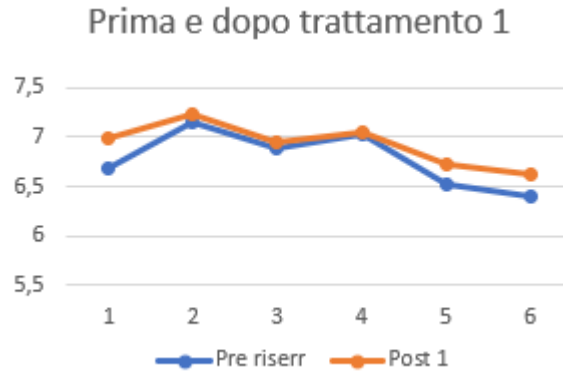


Figura 33: confronto curve del piano superiore

Nel piano superiore notiamo che i punti centrali non subiscono effetti dovuti al trattamento, mentre i punti alle estremità subiscono degli spostamenti di 0.2/0.3 mm.

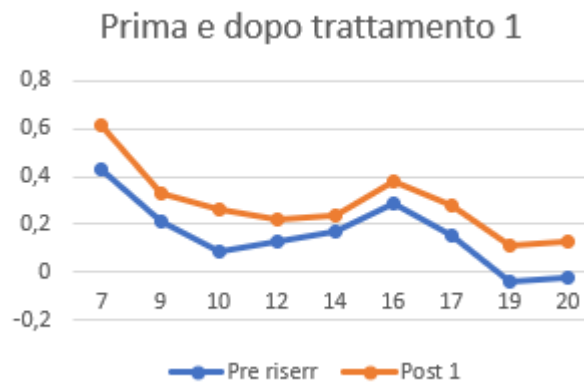


Figura 34: confronto punti del piano intermedio

Nell'immagine sopra vediamo come i punti intermedi subiscano uno spostamento più evidente rispetto al piano superiore; molto probabilmente potrebbe essere spiegato con un errato posizionamento dello stampo, infatti, facendo una traslazione di 0.2 mm, i punti vanno più o meno a combaciare, confermando anche che gli spostamenti sono uguali a quelli subiti dal piano superiore.



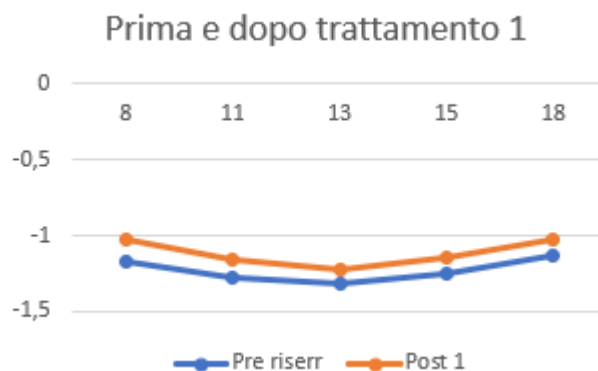


Figura 35: confronto punti del piano inferiore

Stesse considerazioni, infine, vanno fatte per i punti acquisiti nel piano inferiore.

La coppia, come visto nei punti presi nelle misurazioni pretrattamento, non implica nessuno spostamento da evidenziare.

#### 5.1.3 2° ciclo termico

Come fatto per il 1° ciclo abbiamo osservato i grafici; in questo caso, relativi al confronto tra il primo e il secondo ciclo e alla coppia esercitata.

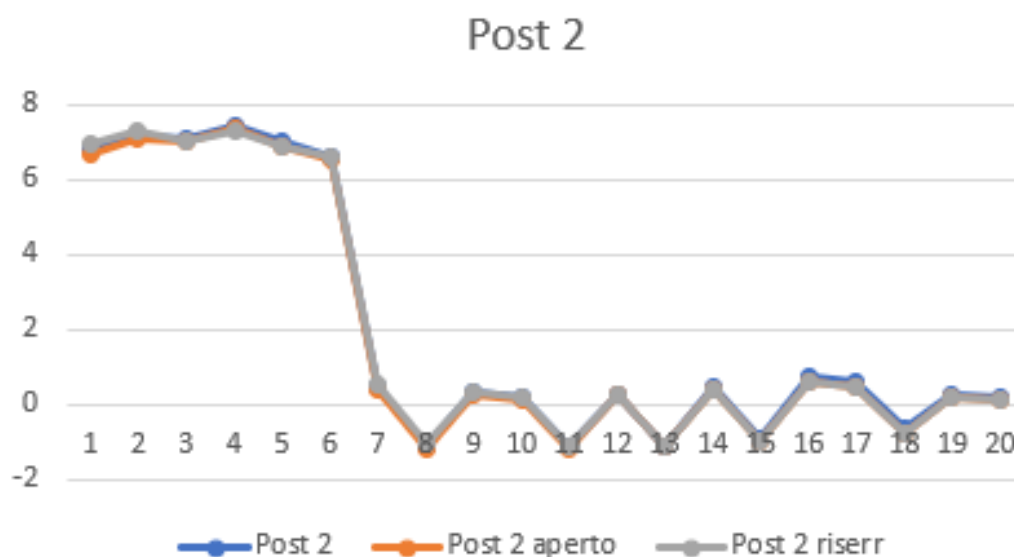


Figura 36: altezze dei punti dopo il secondo trattamento termico

Il grafico sotto riportato rappresentante il secondo trattamento termico

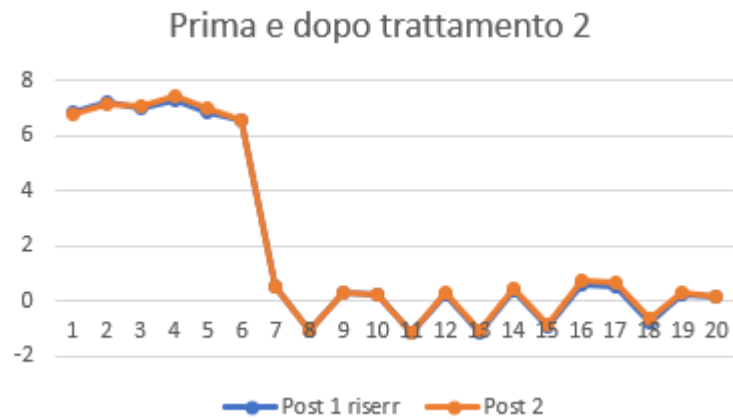


Figura 37: confronto prima e dopo secondo del trattamento termico

Analizzando anche questa immagine si evince che i punti tendono a avere altezze molto simili, dimostrando di non avere problemi ad affrontare anche questo trattamento termico. Per rafforzare tale affermazione, si riportano i grafici rappresentanti i piani singolarmente, per avere un ingrandimento sugli spostamenti.

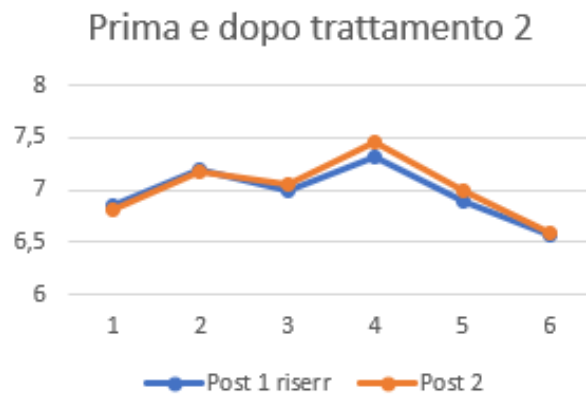


Figura 38: confronto punti del piano superiore

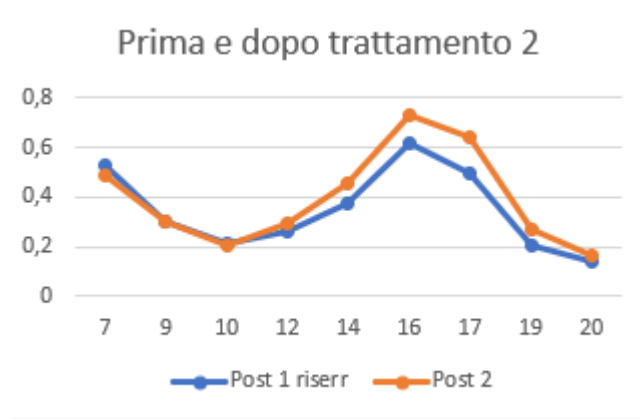


Figura 39: confronto punti del piano intermedio

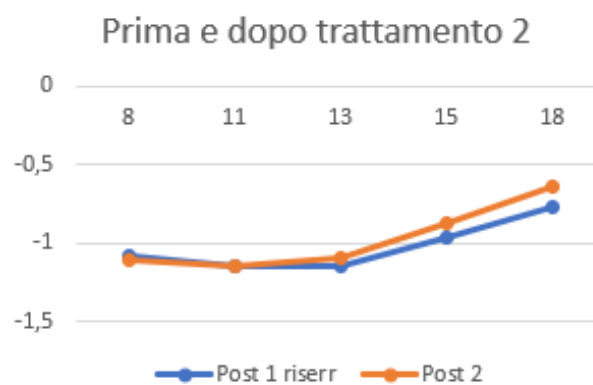


Figura 40: confronto punti del piano inferiore

## 5.2: Analisi stampo a 100°

Si è poi proceduto ad analizzare lo stampo che ha subito i due trattamenti termici a temperatura di 100°. E' necessario premettere che, rispetto allo stampo utilizzato per il trattamento a 80°, questo presenta varie imperfezioni, come la superficie di appoggio, molto importante per acquisire dati precisi.

### 5.2.1: pezzo non trattato termicamente

Prima di eseguire il trattamento sono state eseguite le stesse eseguite nello stampo precedentemente descritto. Qui sotto si riportano le varie configurazioni.

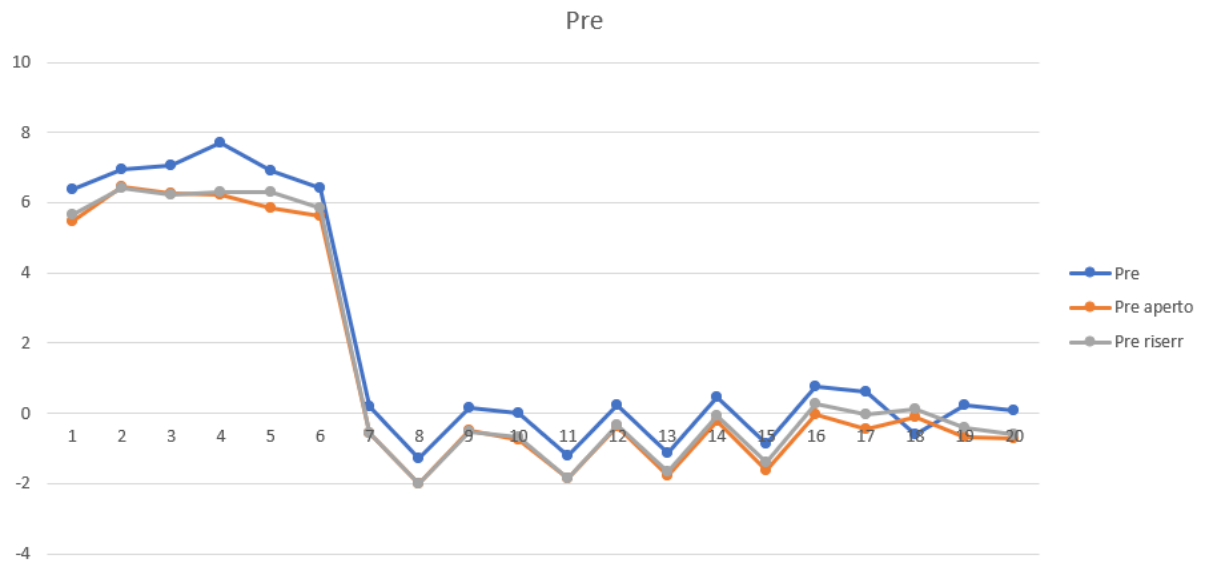


Figura 41: altezze dei punti pretrattamento termico

Si può notare che lo spostamento maggiore avviene dalla misurazione “pre” alla “pre aperto”. Si nota anche che, dopo aver esercitato la coppia, i punti non tendono a discostarsi tra loro. Quindi, lo stampo non ritorna alla sua configurazione iniziale dopo avergli tolto la coppia esercitata.

### 5.2.2: 1° ciclo termico

Dopo averlo messo in forno e successivamente raffreddato, viene posizionato lo stampo nella morsa della CMM. Nel grafico sotto riportato sono stati evidenziati i punti post primo trattamento termico

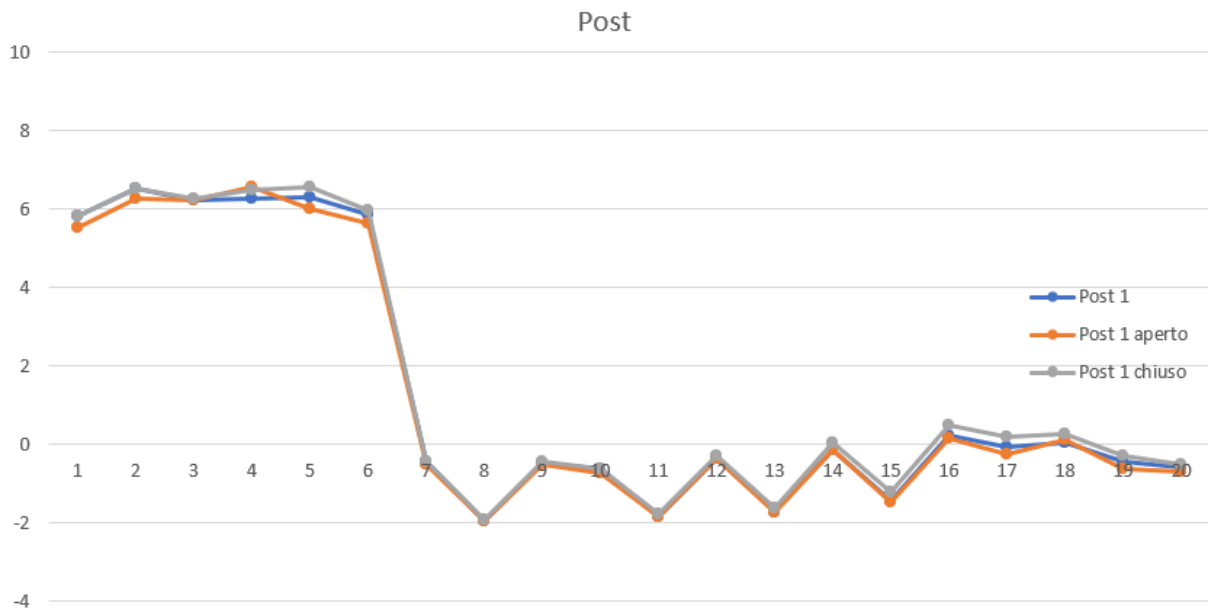


Figura 42:altezze dei punti pretrattamento termico

Si nota in prima stesura che i punti nel piano intermedio e inferiore, non subiscono variazioni notevoli. Se invece si esegue un ingrandimento, prendendo i punti della parte superiore, si nota che l'apertura dello stampo sposta i punti di circa 0.3 mm verso il basso e poi, riserrandolo, ritorna nelle coordinate della prima configurazione.

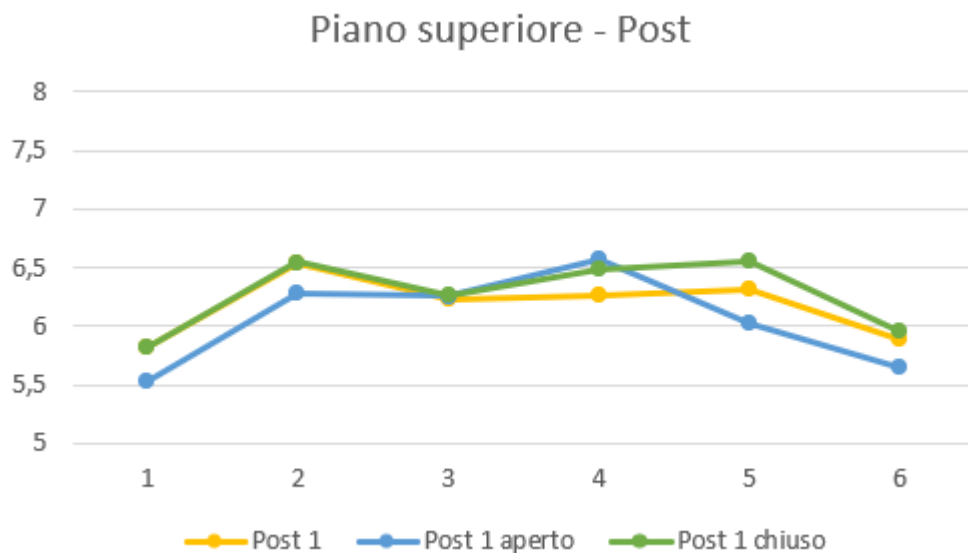


Figura 43:punti piano superiore dopo il primo trattamento

Invece, per analizzare il trattamento termico si deve osservare il seguente grafico

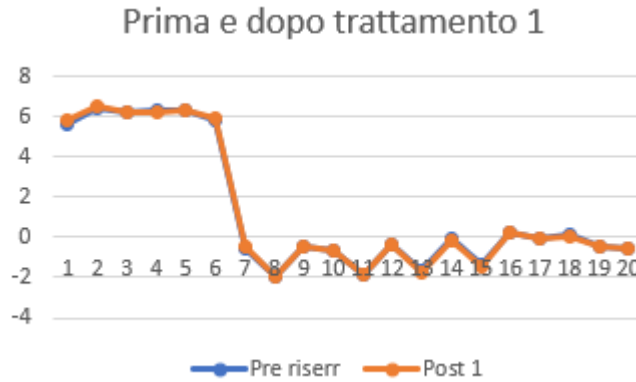


Figura 44: confronto delle altezze dei punti prima e dopo il primo trattamento termico

Da questo grafico non denotiamo comportamenti diversi tra i punti , tutte le misurazioni postano sempre alla stessa configurazione, facendo un ingrandimento, come riportato nei grafici successivi, notiamo che gli spostamenti sono minimi e avvengono solamente presso il piano intermedio.

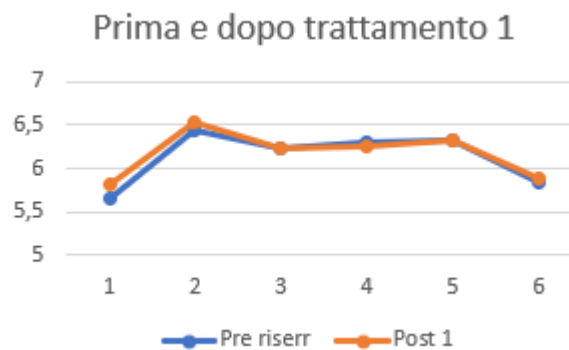


Figura 45: confronto punti piano superiore

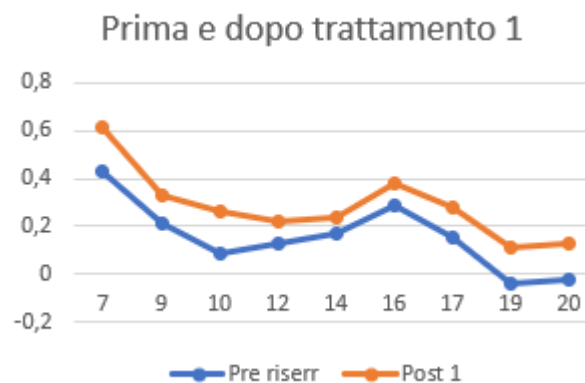


Figura 46: confronto punti piano intermedio

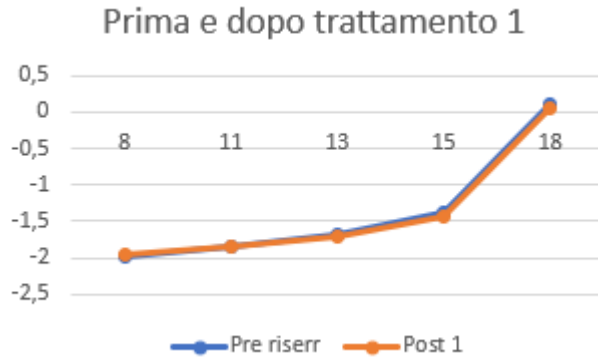


Figura 47: confronto punti piano inferiore

### 5.2.3: 2° ciclo termico

Infine, dopo aver eseguito anche il secondo trattamento termico sono rilevati i seguenti dati:

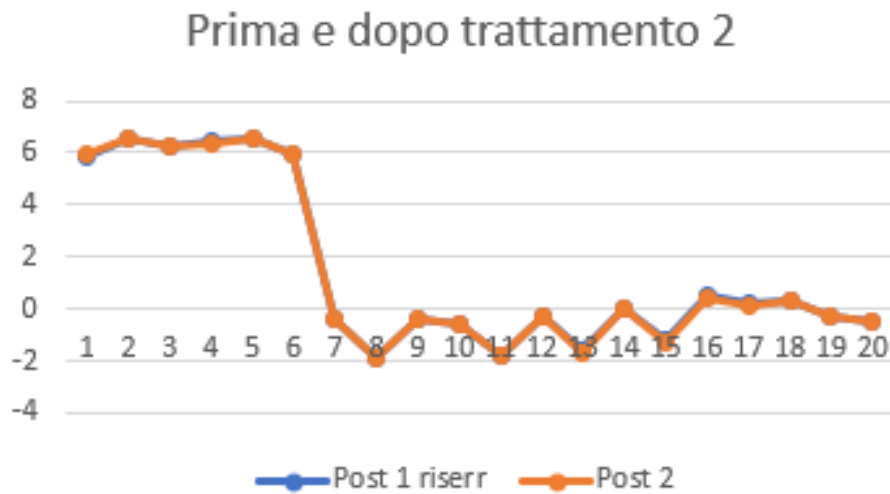


Figura 48: confronto delle altezze dei punti prima e dopo il secondo trattamento termico

Andando ad analizzare i singoli piani:

-nel piano superiore è presente uno spostamento per i punti negli estremi (1,3,4);

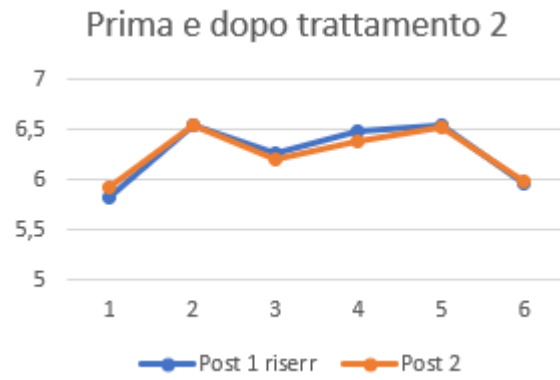


Figura 49: confronto punti piano superiore

-nel piano intermedio i punti non subiscono alcun spostamento notevole;

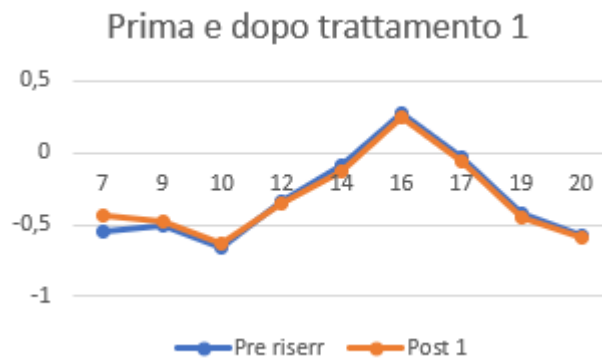


Figura 50: confronto punti piano intermedio

-nel piano inferiore i punti hanno la stessa configurazione.

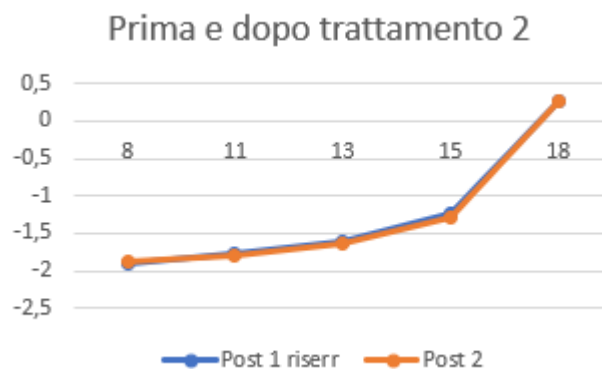


Figura 51: confronto punti piano inferiore





## 6 Conclusione

Lo studio sopra presentato si è basato sulla valutazione del comportamento dovuto dagli effetti del trattamento termico in forno, simulandone un processo in autoclave, di uno stampo in CarbonPA ottenuto mediante una tecnica di stampa additiva denominata FFF.

Lo scopo dello studio è stato quello di andare a prendere le misurazioni nella CMM dello stampo in diverse configurazioni per verificare le deformazioni e gli spostamenti dovuti al trattamento termico e al serraggio subito.

Infatti, oggi le lavorazioni additive tramite stampa 3D sono incrementate in quanto, nella maggior parte dei casi, i manufatti in composito a livello di proprietà, risparmio energetico e di materiale, sono migliori rispetto a quelli realizzati con tecniche tradizionali.

Sintetizzando i principali risultati ottenuti dall'analisi per quanto riguarda il pezzo in CarbonPA con un trattamento termico in forno a 80°/100°C si è evidenziato che:

- Gli spostamenti dovuti al serraggio risultano trascurabili;
- Il primo trattamento, per entrambi gli stampi, ha causato lo spostamento più significativo non andando però a modificare in modo eccessivo la forma dello stampo;
- Il secondo trattamento, per lo stampo riscaldato a 80° C, ha comportato leggere modifiche di configurazione, mentre, per lo stampo trattato a 100° C, la configurazione è stata alterata meno rispetto all'altro stampo, molto probabilmente per un fenomeno di "rilassamento" dovuto dal raffreddamento maggiore.

Da quanto si evince dai risultati, uno stampo in CarbonPA, trattato termicamente, sia alla temperatura di 80° C che alla temperatura di 100° C, può essere utilizzato almeno per 2 cicli termici. Possiamo inoltre aggiungere quindi che, anche in questo caso, i materiali compositi riescono a sostituire i materiali e le tecniche

tradizionali, specificamente gli stampi in CarbonPA possono sostituire gli stampi tradizionali in un processo in autoclave.

I dati raccolti nel caso studiato sono positivi in quanto si è dimostrato che gli stampi, dopo aver subito 2 cicli termici, risultano riutilizzabili in quanto non subiscono deformazioni notevoli. In futuro si potranno ad esempio eseguire più cicli termici per analizzare se il comportamento degli stampi varierà maggiormente rispetto ai primi trattamenti termici eseguiti in questo studio. Oppure un'ulteriore analisi potrebbe essere fatta mantenendo lo stampo in forno per una durata differente e analizzare poi come si modificano le sue caratteristiche.

## 7 Bibliografia

[1] Archimede Forcellese, professore di ruolo presso UNIVPM, Dispense del corso tecnologia meccanica A.A. 2020/21. PRINCIPI DI FABBRICAZIONE ADDITIVA (ADDITIVE MANUFACTURING)

[2] Dr Daniel Engstrøm et al. Loughborough Universities Additive Manufacturing Research Group (AMRG): The 7 Categories of Additive Manufacturing

[3] Jones, R., Haufe, P., Sells, E., Iravani, P., Olliver, V., Palmer, C., & Bowyer, A. (2011). RepRap –the replicating rapid prototyper

[4] <https://www.plasticfinder.it/abs/acrilonitrile-butadiene-stirene>

[5] Technological District on Engineering of polymeric and composite Materials and Structures. [www.ismast.it](http://www.ismast.it)

[6] Archimede Forcellese, professore di ruolo presso UNIVPM, Dispense del corso tecnologia meccanica A.A. 2020/21. LAVORAZIONI PER ASPORTAZIONE DI TRUCIOLO

[7] Iacopo Bianchi, Serena Gentili, Luciano Greco, Tommaso Mancina, Michela Simoncini, Alessio Vita. 3D printer

## 8 Ringraziamenti

Prima di tutto vorrei ringraziare il prof. Forcellese e la Prof.essa Simoncini per avermi dato la possibilità di sviluppare un progetto così interessante, siccome la stampante 3D sarà sempre più utilizzata diventando una realtà più radicata nel futuro prossimo. Ringrazio poi Tommaso Mancia e Iacopo Bianchi, i quali mi sono sempre stati vicini per l'intera durata del tirocinio; sono sempre stati disponibili e pronti a rispondere a qualsiasi dubbio o domanda avessi in mente. Ma soprattutto vorrei dire grazie a coloro che mi sono stati vicini in questi 3 duri e bellissimi anni accademici: la mia famiglia, che mi ha supportato sempre e non mi hanno dato alcun tipo di pressione, e i miei compagni di studio, Giacomo e Tommaso, con i quali ci siamo sempre supportati e aiutati a vicenda nei momenti più difficili di questo percorso.