Università degli studi di Modena e Reggio Emilia

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA "ENZO FERRARI"
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

ROBOTIC ADDITIVE MANUFACTURING: ANALISI SPERIMENTALE E MODELLAZIONE DI PROCESSO PER IL MIGLIORAMENTO DELL'ACCURATEZZA DIMENSIONALE E DELLA QUALITA' SUPERFICIALE

Relatore:
Dott. Ing. Enrico Dalpadulo

Candidato:
Christian De Falco

Correlatore:
Prof. Ing. Fabio Pini

Anno Accademico 2024/2025

"Quando ero ragazzo, mi alzavo la mattina presto per portare le pecore in montagna. Solo il nostro fratello maggiore, zio Pietro, ha avuto la possibilità di proseguire gli studi e prendere il diploma al Liceo. A 46 anni, nel 1972, ho preso la licenzia media, lo stesso anno in cui l'ha presa tua madre. E ora mi ritrovo dei nipoti Ingegneri..."

Nonno Costanzo

Indice

Abstract 7

1 Stato dell'arte **9**
1.1 Robotic Additive Manufacturing 9
1.2 Tecnologie DED 15
1.3 Generazione delle traiettorie 21
1.4 Tipologie di slicing 23

2 Metodo e strumenti **27**
2.1 Design for Robotic Additive Manufacturing 27
2.2 Validazione del metodo 31
2.3 Design Of Experiments 34
2.4 Caso di studio 38
2.4.1 Confronto preliminare RAM - stampante cartesiana FDM 38
2.4.2 Implementazione del metodo 40
2.4.3 Strumenti e setup 42

3 Risultati **47**
3.1 Stampa dei provini e risultati del primo DOE 47
3.2 Modello di regressione 67
3.3 Risultati del secondo DOE e relativo modello di regressione . . . 71
3.4 Simulazione del processo 80
3.4.1 Discussione 83
3.5 Conclusioni 85
Ringraziamenti 88

Bibliografia e sitografia **88**

Abstract

Negli ultimi decenni le tecnologie di costruzione additiva AM (Additive Manufacturing) hanno portato un profondo e sostanziale cambiamento nel modo di concepire, progettare, disegnare e realizzare gli oggetti in una grande varietà di settori: dalla prototipazione rapida di componenti meccanici alla realizzazione di componenti funzionali da impiegare nei settori automotive, aerospace e biomedicale.
Per sfruttare appieno le potenzialità di questa tecnologia, si registra un crescente interesse verso i processi di Robotic Additive Manufacturing (RAM), integrando robot seriali nella movimentazione degli estrusori necessari al processo di costruzione additiva. L'introduzione dei robot, solitamente di tipo antropomorfo con 6 gradi di libertà per l'organo terminale, permette di superare alcuni limiti imposti dalle tradizionali macchine a tre assi, fra i quali si citano i seguenti:

- dimensioni ridotte del volume di lavoro;
- caratteristico aspetto "a gradini" per le superfici dei componenti non parallele (o perpendicolari) al piano di costruzione;
- necessità di strutture di supporto per sorreggere le parti sporgenti;
- anisotropia dei componenti, i quali presentano caratteristiche meccaniche molto diverse nelle tre direzioni spaziali.

Sebbene la tecnologia RAM sia in grado di ovviare a tali inconvenienti, al contrario delle lavorazioni convenzionali di costruzione additiva e di quelle per asportazione di truciolo, evidenzia scarsa accuratezza dimensionale e finitura superficiale, spesso inaccettabili in ambito ingegneristico.
Il presente lavoro di tesi propone una metodologia di analisi e ottimizzazione per il processo di Robotic Additive Manufacturing mediante la tecnologia Fused Deposition Modeling (FDM). La metodologia proposta mira a identificare i parametri che incidono sulla qualità del prodotto per anticiparne la valutazione durante le fasi di progettazione. Sono stati previste le fasi riportate di seguito.
In un primo momento si è proceduto allo studio del materiale presente in letteratura. L'analisi critica dello stato dell'arte di tale tecnologia ha permesso di identificarne i punti forza e le problematiche ancora irrisolte, e i parametri di processo che maggiormente influenzano la finitura superficiale e l'accuratezza dimensionale dei manufatti.
Per l'identificazione dei valori ottimali dei parametri, si prevede l'utilizzo di un Design Of Experiments (DOE) a tre fattori e tre livelli. I fattori individuati sono stati:

- temperatura di estrusione del materiale;
- quantità di materiale che viene estruso nell'unità di tempo;
- distanza tra le linee adiacenti nella realizzazione delle pareti del contorno dei provini.

Dopo aver stampato i provini si è proceduto a confrontarli con la geometria nominale valutando i seguenti parametri:

- scostamento massimo (in valore assoluto) rispetto alle dimensioni nominali;
- percentuale di punti della superficie che si trovano ad una distanza maggiore di 0,1 mm rispetto alla superficie del provino nominale.

Per condurre la fase di ottimizzazione è stata impiegata la tecnica RSM (Response Surface Modeling). Dalla raccolta dei dati acquisiti si definisce un modello di regressione per ciascuna delle due uscite del problema e, successivamente, si procede con un'ottimizzazione multiobiettivo, in grado di fornire una condizione di "ottimo" del processo.
Successivamente è stata svolta la simulazione del processo nella piattaforma integrata 3DExperience, verificando la capacità di anticipare la valutazione della qualità del componente durante la fase di progettazione (progettazione integrata).
Nell'ultima parte del lavoro vengono discussi i risultati ottenuti e messi in luce le problematiche ancora da risolvere e alcuni spunti per lavori futuri.

Capitolo 1

Stato dell'arte

1.1 Robotic Additive Manufacturing

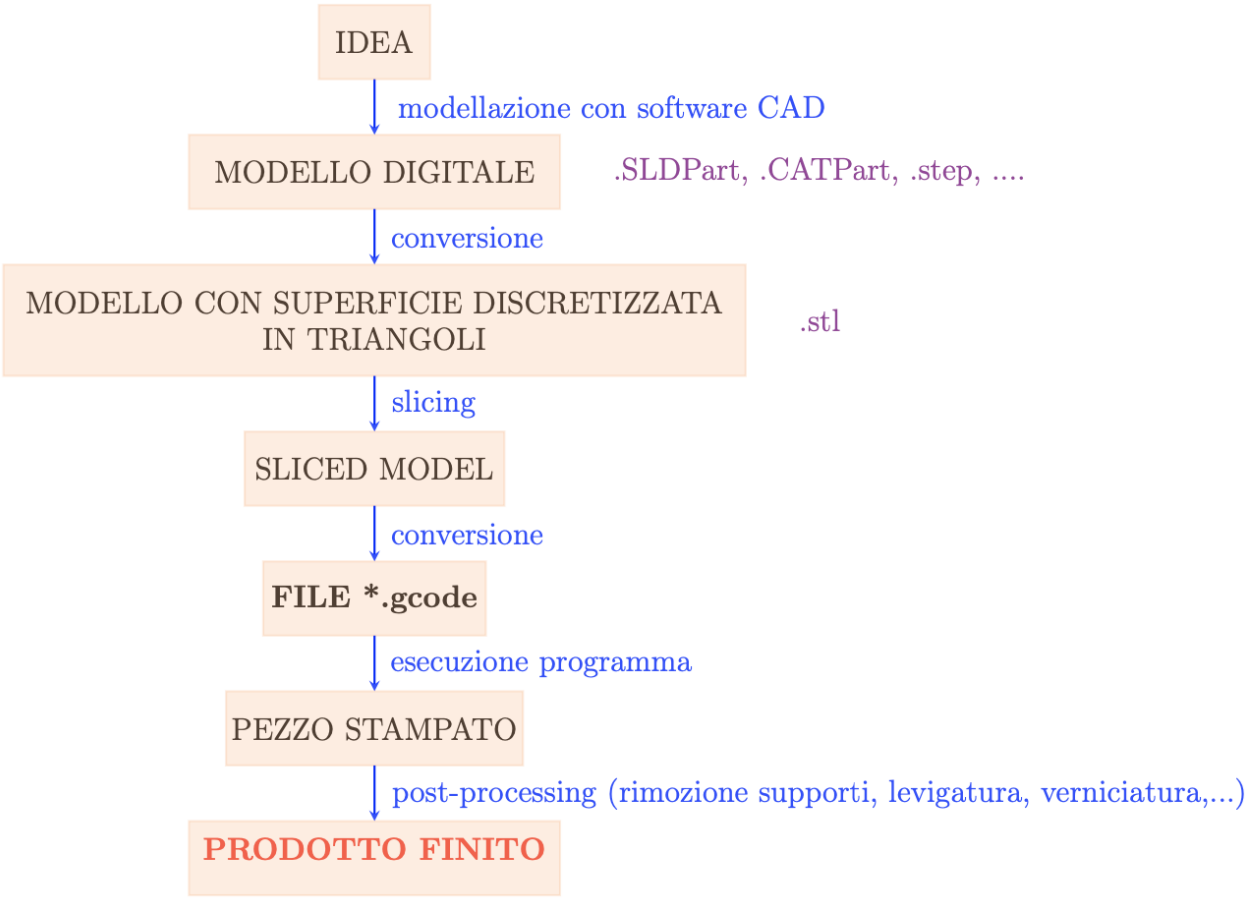


Figura 1: flusso di lavoro in un processo di AM

Le tecnologie di costruzione additiva (*Additive Manufacturing* - AM) hanno acquisito, negli ultimi anni, una crescente importanza nell'ambito della produzione industriale e non solo. Nel 2015 George Q. Zhang et al. [1], dopo aver analizzato lo sviluppo delle tecnologie AM nel ventennio precedente, hanno delineato un loro trend di crescita pressochè esponenziale negli anni a venire e messo in luce il fatto che, combinando opportunamente queste tecnologie con quelle tradizionali, nei prossimi anni si potrebbe assistere ad una vera e propria quarta rivoluzione

industriale.
Nel suo report annuale del 2012 Terry Wohler [2] ha evidenziato che, al contrario di quanto avveniva nei primi anni di sviluppo delle tecnologie AM (anni '90), nel ventennio successivo lo sviluppo di queste ultime non sarà orientato esclusivamente alla prototipazione rapida, ma acquisirà importanza via via crescente nella realizzazione di micro componenti (nano manufacturing), nel settore delle costruzioni (architecture) e in quello medico-biomedicale.
Nei processi tradizionali di AM il modello digitale dell'oggetto da realizzare può essere creato direttamente grazie ad un software CAD (*Computer Aided Design*, come SolidWorks, Catia V5, Inventor,...) e, successivamente, esportato in formato *.stl* (*Standard Tessellation Language*) all'interno di un software di slicing (*slicer*): quest'ultimo suddivide la geometria in un numero finito di *layers* paralleli al piatto di costruzione ed aventi, ciascuno, spessore assegnato dall'utente (*layer thickness*). Il file viene infine convertito in formato *.gcode* e caricato sulla macchina la quale, sfruttando una tecnologia di controllo CNC (*Computer Numerical Control*), permette alla testina di stampa di depositare il materiale strato per strato seguendo percorsi assegnati, in modo da realizzare l'oggetto finale (Figura 1).
A differenza delle lavorazioni convenzionali per asportazione di truciolo, le tecnologie di costruzione additiva non asportano materiale dal grezzo di partenza, ma lo "aggiungono" strato per strato, consentendo in questo modo di

- ridurre gli scarti di lavorazione;
- ottenere geometrie anche molto complesse (*net shape*), non ottenibili diversamente.

In aggiunta a queste considerazioni, è bene tenere presente ulteriori aspetti, tra i quali [3]:

- possibilità di realizzare componenti multimateriale e componenti in materiale termoplastico caricato con fibre di carbonio e/o di vetro (*materiali compositi*);
- la complessità delle forme ottenibili permette di effettuare un processo di ottimizzazione topologica direttamente in fase di progettazione;
- si tratta di una tecnologia idonea alla realizzazione di *piccoli lotti*.

La RAM (*Robotic Additive Manufacturing*) consiste nella realizzazione delle tecnologie di costruzione additiva per mezzo di un robot antropomorfo a 5 o 6 assi: la presenza di un robot seriale permette di descrivere traiettorie complesse nello spazio e sfruttare a pieno le potenzialità dei processi di AM [4] che diventano, in questo modo, estremamente flessibili; per questo motivo la RAM sta riscontrando, negli ultimi anni, un crescente successo

- nel mondo dell'edilizia e delle costruzioni;
- nel settore della modifica e della riparazione di stampi e componenti complessi già esistenti;
- nel settore biomedicale per la realizzazione/riparazione di protesi e, addirittura, per alcuni interventi di riparazione di organi in loco (surgical).

E' possibile realizzare il processo di stampa 3D FDM robotizzata vincolando l'estrusore all'*end effector* di un robot seriale a 6 assi. Il nozzle dell'hotend, accoppiato con la flangia estremale del robot, rappresenta il *Tool Center Point* (TCP) del meccanismo spaziale. Come noto dallo studio della cinematica, detti (Figura 2)

- $Oxyz \rightarrow$ sistema di riferimento assoluto;
- $O_1x_1y_1z_1 \rightarrow$ sistema di riferimento solidale con il corpo rigido;

la configurazione del corpo rigido nello spazio è univocamente determinata

- dalla sua *posizione* rispetto al sistema di riferimento assoluto, ovvero dalle coordinate x, y e z dell'origine O_1;
- dal suo *orientamento* rispetto al sistema di riferimento assoluto, individuato dagli angoli di rotazione ϕ, θ e ψ del sistema di riferimento $O_1x_1y_1z_1$ intorno agli assi x, y e z del sistema di riferimento assoluto.

Per posizionare ed orientare correttamente il nozzle in corrispondenza di un punto della superficie del manufatto occorrerebbero dunque, a rigore, 6 gradi di libertà (GDL): tuttavia, poichè il filamento estruso è simmetrico rispetto all'asse del nozzle (6° asse del robot), sono sufficienti unicamente 5 GDL (ovvero 5 assi del robot). Il 6° asse risulta comunque utile per ruotare la testa di stampa ed evitare, in questo modo, possibili collisioni tra pezzo ed estrusore.

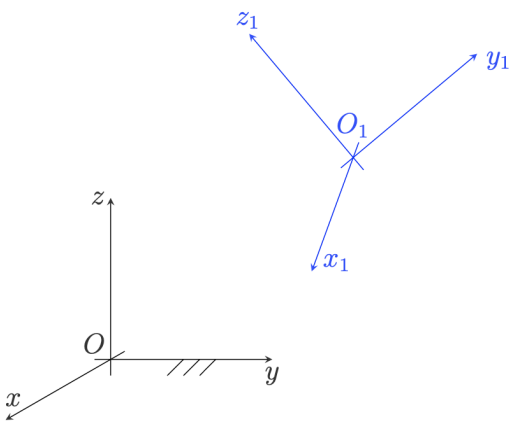


Figura 2: SDR fisso $Oxyz$ e solidale con il TCP $O_1x_1y_1z_1$

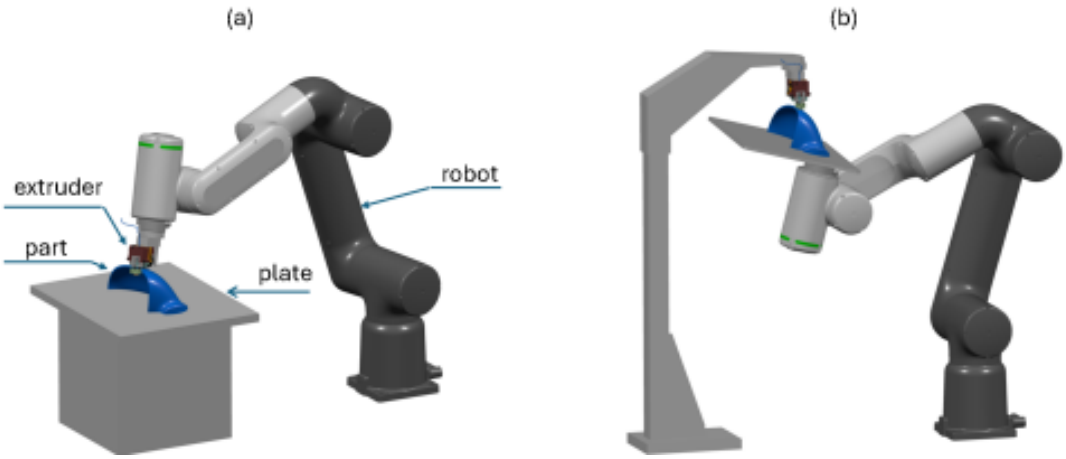


Figura 3: strategie RAM a piatto fisso (a) e ad estrusore fisso (b) [5]

La RAM può essere realizzata ricorrendo a 3 strategie [5]:

- estrusore movimentato dal braccio robotico e piatto di costruzione fisso (Figura 3a);
- estrusore fisso e piatto movimentato dal robot (Figura 3b);
- estrusore e piatto di costruzione movimentati entrambi da due robot indipendenti.

I processi di stampa 3D FDM risultano ancora fortemente limitati dalla presenza di alcuni effetti negativi, di seguito brevemente elencati [3].

1. ***Dimensioni del manufatto***: queste ultime, infatti, sono vincolate alle dimensioni del piatto di stampa. Le stampanti in commercio presentano un piatto di costruzione quadrato avente, solitamente, lato di $20 \div 30$ cm e una corsa dell'asse z circa della stessa dimensione, per un costo che può ammontare a qualche centinaio di euro (per le stampanti ad uso hobbystico) fino a poche migliaia (uso professionale). Per l'acquisto di stampanti professionali aventi un volume di costruzione maggiore il costo di acquisto cresce notevolmente, arrivando anche a superare le decine di migliaia di euro. Per questo motivo, una delle grandi limitazioni all'impiego di una stampante 3D FDM tradizionale è proprio la dimensioni dei manufatti che si possono ottenere.
2. ***Staircase effect***: le stampanti 3D a FDM depositano il materiale layer by layer lungo l'asse z: ciò significa che le superfici non parallele (o perpendicolari) al piano di stampa non risultano perfettamente lisce, ma presentano una caratteristica struttura "a gradini" (*staircase effect*, Figura 4). Tale effetto è altamente indesiderato e si traduce in un peggioramento della rugosità superficiale, delle tolleranze geometriche e dimensionali e dell'estetica del manufatto.

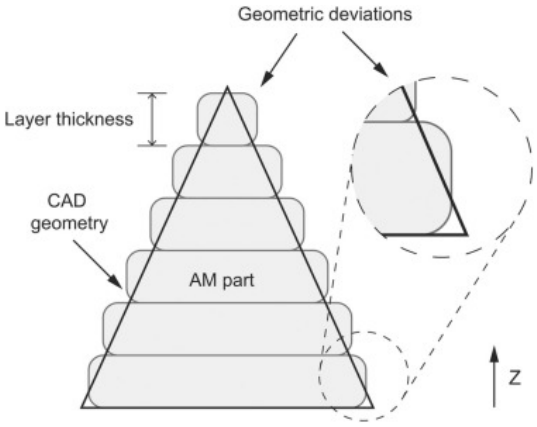


Figura 4: staircase effect [6]

3. ***Strutture di supporto***: per sorreggere le parti sporgenti del manufatto (*overhangs*) è necessaria la costruzione di apposite strutture (*supporti*, Figura 5) in grado di supportare queste ultime. Ciò spesso comporta un maggior consumo di materiale e un aumento del tempo richiesto per ultimare la stampa (maggior consumo di energia) e per effettuare le operazioni di post processing (rimozione supporti, levigatura,...).

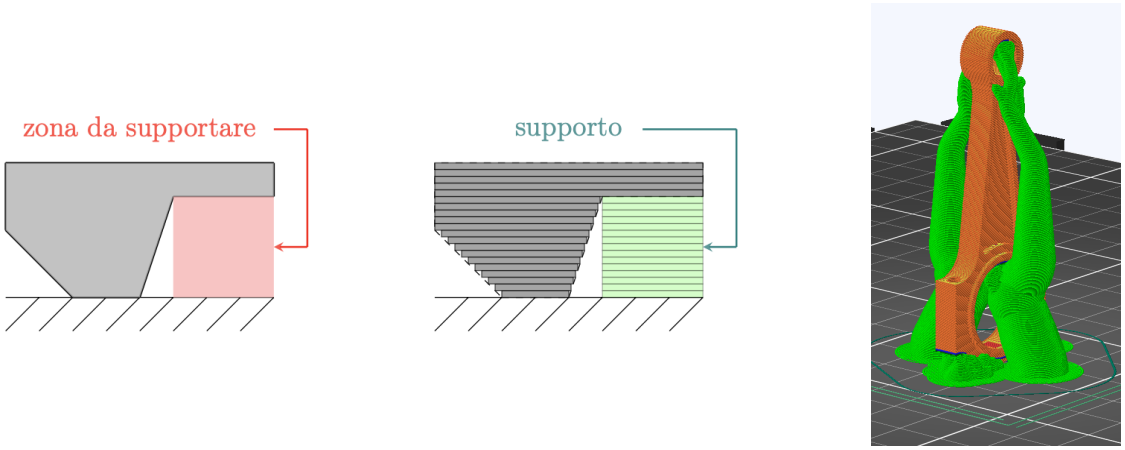


Figura 5: generazione dei supporti

4. ***Anisotropia delle parti stampate***: diversi studi [3,7] hanno mostrato che, sottoponendo provini stampati in 3D con la tecnologia FDM a prove di trazione (secondo normativa DIN EN ISO 527-2), il comportamento di questi ultimi è diverso a seconda della direzione di applicazione del carico: in particolare, se il carico viene applicato in direzione parallela all'asse z di stampa (*crosswise* in Figura 6), il provino mostra una resistenza a trazione circa 1,5 volte inferiore rispetto al caso in cui il carico venga applicato ortogonalmente a z (*lenghtwise*). Anche la percentuale e la strategia di riempimento (zig-zag, lines, grid,...) giocano un ruolo importante sulle proprietà meccaniche della parte stampata: esse, infatti, influiscono sia sulla resistenza a trazione che sul modulo di Young.

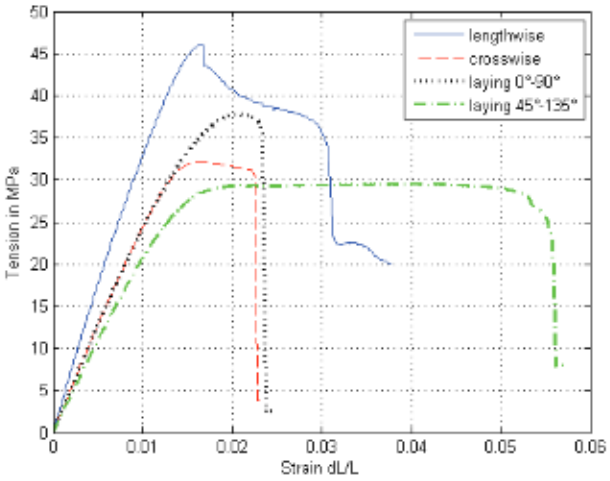


Figura 6: prove di trazione effettuate su provini stampati con tecnologia FDM con diversa orientazione delle fibre [3]

L'impiego di un robot per la stampa 3D FDM permette di ovviare ad alcune problematiche sopra descritte; in particolare:

- si possono realizzare gli overhangs senza la necessità di costruire supporti;
- è possibile muovere l'estrusore nello spazio orientando le fibre del manufatto secondo traiettorie predefinite: in questo modo è possibile ottimizzare le proprietà meccaniche disponendo queste ultime, ad esempio, lungo la direzione delle tensioni principali;
- orientando l'asse del nozzle ortogonalmente alla superficie da realizzare è possibile ridurre efficacemente lo staircase effect ed ottenere un'apprezzabile finitura superficiale. In letteratura [8] è stata proposta una soluzione a doppio robot per ottimizzare la qualità superficiale di grandi parti stampate minimizzando il tempo di stampa:
  - uno dei due robot presenta all'estremità un nozzle con diametro dell'ugello molto ridotto e, grazie a quest'ultimo, è possibile realizzare la parte esterna del manufatto, in modo da conferirgli un'ottima finitura superficiale;
  - il secondo robot presenta all'estremità un nozzle con diametro maggiore rispetto al precedente che, impiegando un *flow rate* maggiore, permette di realizzare velocemente la parte interna;
- le dimensioni del manufatto non sono più vincolate alle dimensioni del piatto di costruzione della macchina, ma dipendono unicamente dallo spazio di lavoro del robot: ciò significa che, impiegando robot di dimensioni maggiori, è possibile ottenere manufatti più grandi.

Le parti stampate con un robot seriale in 3D con tecnologia FDM sono tuttavia caratterizzate da una finitura superficiale ed un livello di *accuratezza dimensionale* molto scarsi, difficilmente accettabili in ambito ingegneristico nella realizzazione di componenti meccanici funzionali. Il presente lavoro di tesi ha lo scopo di indagare l'accuratezza dimensionale di provini stampati in 3D con tale tecnologia ed ottimizzarne i parametri di processo impiegando una piattaforma che permette l'integrazione tra prodotto e processo.

1.2 Tecnologie DED

L'impiego di un robot seriale a 6 GDL per la costruzione additiva trova impiego da anni nelle tecnologie DED (*Direct Energy Deposition*, Figura 7): l'idea che sta alla base di queste ultime consiste nel depositare il materiale metallico (sotto forma di polvere o di filo) attraverso un nozzle montato su un braccio robotico. La normativa ISO/ASTM 52900 definisce DED ("Direct Energy Deposition") quei processi di costruzione additiva in cui una sorgente di energia concentrata

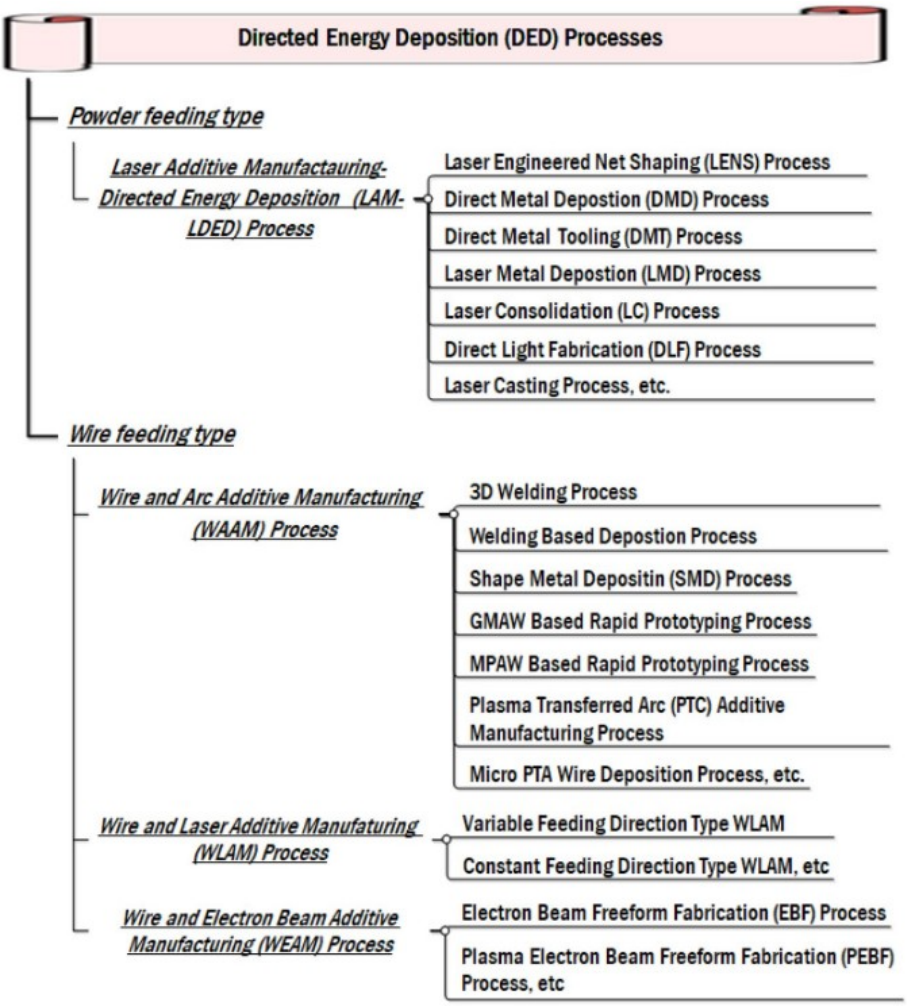


Figura 7: classificazione delle tecnologie DED

viene impiegata per portare a fusione ed unire il materiale metallico mentre quest'ultimo viene depositato [9].
A seconda dello stato grezzo del materiale, si realizza contemporaneamente

- *fusione* dello stesso se sotto forma di filamento;
- *sinterizzazione* se il materiale metallico si trova allo stato di polvere

apportando calore grazie a tecnologie ad energia concentrata (*laser beam, electron beam, plasm arc*). Sebbene l'impiego delle polveri metalliche consenta di ottenere un'eccezionale finitura superficiale (dell'ordine dei 50 μm), il loro impiego è limitato da alcuni fattori quali ad esempio [10]:

- fenomeni di sferoidizzazione del fuso in fase di sinterizzazione quali, ad esempio, l'instabilità capillare di Rayleigh e il flusso di Marangoni;
- le polveri metalliche non possono essere gestite come il corrispondente materiale massivo, infatti
  - esiste un intervallo di valori dell'umidità per cui l'adesione delle particelle diventa massima;
  - è sconsigliabile conservarle all'interno di contenitori polimerici poichè vi è il rischio di innesco di una reazione dovuta alla presenza di cariche elettrostatiche: per questo motivo occorre impiegare dei contenitori metallici dotati di opportuna messa a terra;
  - il costo delle polveri metalliche è circa 20 volte superiore rispetto al costo del materiale massivo.

Nella Tabella in Figura 7 [11] è riportata una classificazione dei principali processi DED; questi si possono classificare in quattro macro-famiglie.

1. **Laser Additive Manufacturing - Directed Energy Deposition (LAM-LDED) Process**: il materiale impiegato è polvere metallica, mentre la sorgente energetica è costituita da un laser che può essere a diodi o a fibra. La qualità nella formazione dei substrati, il grado di coesione tra strati adiacenti, la porosità, la microstruttura e l'entità degli stress residui sono influenzati principalmente dalla potenza del laser, dalla sua velocità di scansione e dalla velocità con cui la polvere metallica viene estrusa attraverso il nozzle. Le traiettorie secondo cui quest'ultimo deposita il materiale, inoltre, determinano in maniera significativa la distribuzione degli stress residui, le proprietà meccaniche del manufatto e la sua microstruttura.
   Il diametro medio dei grani delle polveri solitamente impiegate è dell'ordine di $0 \div 200$ μm.

I processi LAM-DED vengono impiegati non solo per realizzare parti metalliche di forma complessa (net shape), ma anche nei settori di *repairing, restoring*, *remanufacturing* e nella costruzione di stampi.
Di seguito vengono citate, a titolo di esempio, alcune applicazioni trovate in letteratura della *Laser Direct Deposition* come soluzione di *repairing*:

- repairing di una paletta di turbina realizzata in acciaio inossidabile 316L tramite *laser direct deposition* ([12], Figura 8);
- repairing del bruciatore di una turbina a gas realizzato in Inconel 718 tramite *laser deposition* ([13], Figura 9);
- repairing della girante di un compressore centrifugo realizzata in una lega FeCrNiCu tramite *laser cladding* ([14], Figura 10).

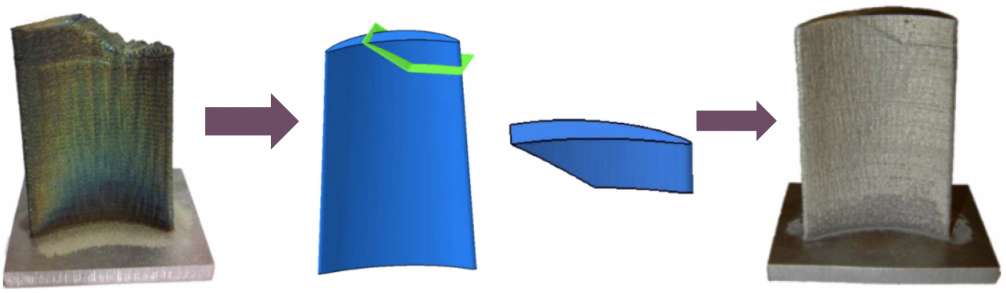


Figura 8: repairing della paletta di una turbina tramite laser direct deposition [12]

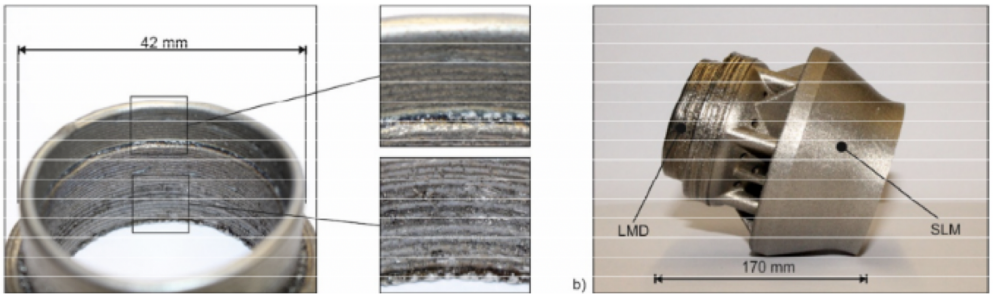


Figura 9: repairing del bruciatore di una turbina a gas tramite laser direct deposition [13]

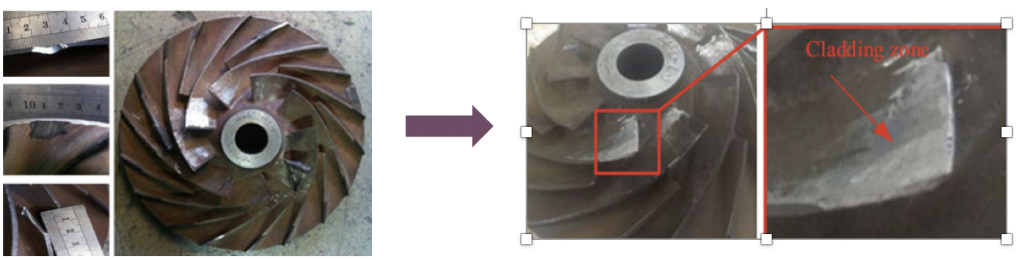


Figura 10: repairing della girante di un compressore tramite laser cladding [14]

2. **Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process**: impiegando un materiale metallico sotto forma di "filamento" allo stato grezzo è possibile aumentare la portata volumetrica di materiale estruso nell'unità di tempo e, pertanto, realizzare parti di grandi dimensioni. Essendo poi il materiale grezzo depositato sotto forma di filamento (e non di polvere), questi processi permettono di ridurre enormemente gli sprechi di materiale. I processi WAAM possono essere classificati a loro volta, in analogia con le saldature, in tre famiglie:

   (a) **Gas Metal Arc Welding (GMAW)**;

   (b) **Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)**;

   (c) **Plasma Arc Welding (PAW)**.

   Nei processi GMAW il filo di materiale fuoriesce da un nozzle coassiale con la torcia, mentre negli altri due processi il nozzle non è in generale coassiale con quest'ultima.
   I processi GMAW, pur risultando economicamente meno onerosi rispetto ai GTAW e ai PAW, presentano alcuni inconvenienti quali, ad esempio, la creazione di elevati stress residui e deformazioni nei manufatti. Le tensioni residue sono principalmente imputabili ai forti gradienti di temperatura durante la lavorazione, che possono portare a deformazioni indesiderate e punti di innesco per la creazione di cricche, con conseguenti rotture dovute ad elevati stress termo-meccanici o a stress corrosion cracking. Per questo motivo, al termine del processo, è opportuno effettuare dei post trattamenti termici (e.g. ricottura, normalizzazione,...) o meccanici di distensione delle tensioni residue (*stress relief*).
   La rugosità superficiale media dei manufatti ottenuti è dell'ordine dei 200 μm, mentre la portata oraria di materiale depositato varia a seconda della tecnologia impiegata: si va dai $3 \div 4$ kg/h per la GMAW agli $1 \div 2$ kg/h per la PAW.
   I processi WAAM basati sulla GTAW consentono di ottenere parti metalliche caratterizzate da una finitura superficiale apprezzabile e da elevata resistenza e, se paragonati a quelli basati sulla GMAW, permettono di ridurre efficacemente fenomeni indesiderati quali la presenza di porosità nei pezzi realizzati.
   Nei processi basati sulla PAW la sorgente energetica è costituita da un arco al plasma altamente concentrato, pertanto la zona termicamente alterata risulta ridotta rispetto a quella dei processi GTAW: per questo motivo il cordone di materiale depositato è più sottile.
   Per mantenere costante la direzione di deposizione del materiale nei processi GTAW e PAW è necessario ruotare continuamente la torcia, pertanto richie-



Figura 11: elica realizzata con tecnologia WAAM [16]



Figura 12: ponte realizzato con tecnologia WAAM [17]

dono la programmazione di traiettorie complesse: l'impiego di un robot a 6 assi consente di superare efficacemente questo ostacolo. I parametri caratteristici delle lavorazioni WAAM sono la corrente e la tensione dell'arco elettrico, la distanza della torcia dal pezzo in lavorazione e la sua velocità di avanzamento, la quantità di gas di assistenza convogliata sulla zona lavorata e il diametro del filo del materiale.
Studi recenti [15] hanno dimostrato che l'altezza del cordone di materiale depositato dipende fortemente dalla velocità di avanzamento del filo la quale, però, non ha effetti apprezzabili sulla profondità della zona di materiale fuso e sulla rugosità superficiale dei manufatti.
Le tecnologie WAAM vengono impiegate solitamente per la costruzione di grandi parti, quali ad esempio le eliche per la propulsione navale [16] (Figura 11) e le parti speciali di elementi architettonici come colonne a struttura reticolare (*lattice structures*) e piccoli ponti per il transito pedonale ([17], progetto realizzato dalla MX3D in collaborazione con l'Università di Bologna, Figura 12).

3. **Wire and Laser Additive Manufacturing (WLAM) Process**: nei processi WLAM il materiale grezzo, sotto forma di filo metallico, viene portato a fusione sfruttando una sorgente laser che può essere a diodi, a CO_2 oppure a Nd:YAG (granato di alluminio e ittirio drogato con neodimio). Si tratta di processi largamente impiegati per la protezione e il trattamento delle superfici e per il *repairing* di componenti esistenti, che presentano diversi vantaggi tra cui:

   (a) possibilità di realizzare parti metalliche pressochè prive di porosità all'interno;

   (b) spreco di materiale ridotto;

   (c) possibilità di depositare una grande quantità di materiale nell'unità di tempo (da 1,5 a 48,0 g/min);

(d) rugosità superficiale apprezzabile, dell'ordine $40 \div 60$ μm [18].

Lo spessore del cordone di materiale depositato dipende fortemente dal diametro del filo impiegato: in letteratura [19] si trovano valori dello spessore compresi tra 5 e 15 volte il diametro del filo.
La qualità superficiale e le proprietà meccaniche delle parti realizzate con le tecnologie WLAM dipendono dalla potenza del laser, dal suo diametro e dalla sua velocità di avanzamento, dalla direzione e dall'inclinazione (che solitamente varia nel range $20° - 60°$, [18]) con cui viene depositato il materiale metallico. In Figura 13 [11] sono riportati due esempi di componenti fabbricati con tecnologia WLAM: a sinistra l'elica di un trasportatore a coclea (a vite) e a destra le pale di un'elica.

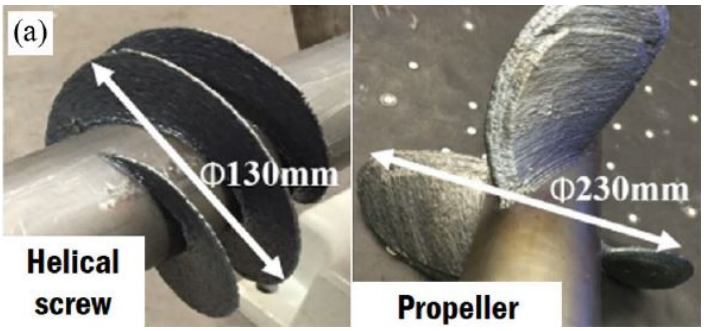


Figura 13: coclea ed elica realizzate con tecnologia WLAM [11]

4. **Wire and Electron Beam Additive Manufacturing (WEAM) Process**: a differenza di quanto visto finora, la sorgente energetica impiegata in questa categoria di processi è un *fascio di elettroni* (che può essere *termoionico* o *al plasma*): questi ultimi vengono accelerati fino a raggiungere velocità prossime a quella della luce; successivamente, andando a collidere il materiale metallico, fanno sì che la loro energia cinetica si converta istantaneamente in un'elevata quantità di calore. Per permettere agli elettroni di raggiungere tali velocità è necessario che la lavorazione avvenga in un ambiente in cui le condizioni operative siano prossime a quelle del *vuoto*; ciò è possibile impiegando, ad esempio, una *pompa a diffusione*, in grado di generare pressioni dell'ordine dei $10^{-5} \div 10^{-6}$ mbar: in tali condizioni il processo non necessita di gas di assistenza, e le impurità introdotte sono ridotte al minimo.
Si tratta di una tecnologia idonea quando il materiale da depositare è conduttivo e altamente riflettente, come ad esempio il rame e l'alluminio.
La qualità dei manufatti che si possono ottenere con questi processi dipende dalla tensione con cui vengono accelerati gli elettroni, dal diametro e dalla corrente del fascio e dalla direzione e dall'inclinazione con cui viene depositato il materiale metallico.

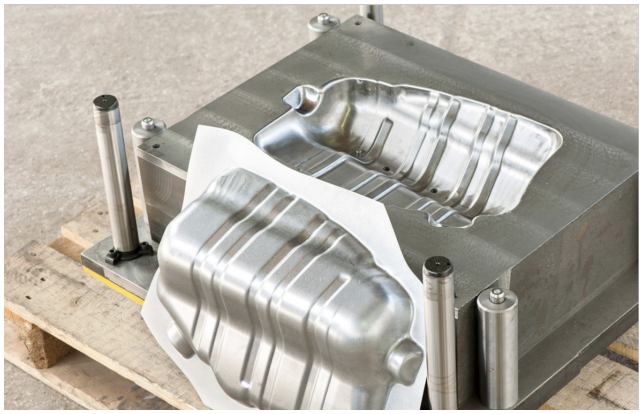


Figura 14: stampo realizzato con tecnologia WEAM

1.3 Generazione delle traiettorie

Per la generazione delle traiettorie da parte dell'end effector occorre conoscere, istante per istante, la posizione angolare θ_i (con $i = 1, ..., 6$) da imporre ai giunti del robot. A tal proposito esistono due possibilità:

1. inversione dello Jacobiano ed integrazione sul dominio;
2. analisi cinematica inversa (IKA - *Inverse Kinematics Analysis*).

Inversione dello Jacobiano

Si consideri una generica traiettoria nello spazio su cui vengono campionati n punti. Per il generico punto i-esimo è possibile esprimere la velocità $\dot{\boldsymbol{P}}_i$ rispetto ad un sistema di riferimento assoluto come

$$\dot{\boldsymbol{P}}_i = [\dot{x}_i \;\; \dot{y}_i \;\; \dot{z}_i \;\; \dot{R}_{xi} \;\; \dot{R}_{yi} \;\; \dot{R}_{zi}]^T \tag{1.1}$$

dove

- $\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i$ denotano le componenti cartesiane della velocità dell'end effector;
- $\dot{R}_{xi}, \dot{R}_{yi}, \dot{R}_{zi}$ denotano le componenti della velocità angolare dell'end effector.

Per un dato $\dot{\boldsymbol{P}}_i$, le velocità angolari dei giunti del robot possono essere espresse come

$$\dot{\boldsymbol{Q}}_i = [\dot{\theta}_{1i} \;\; \dot{\theta}_{2i} \;\; \dot{\theta}_{3i} \;\; \dot{\theta}_{4i} \;\; \dot{\theta}_{5i} \;\; \dot{\theta}_{6i}]^T \tag{1.2}$$

Il problema viene allora formulato in termini di velocità

$$\dot{\boldsymbol{P}}_i = J(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{Q}}_i \tag{1.3}$$

dove $J(\boldsymbol{\theta})$ è una matrice 6×6 nota come *Jacobiano*: i vettori $\boldsymbol{\theta}$ tali per cui tale matrice diventa singolare [ovvero $\det J(\boldsymbol{\theta}) = 0$] corrispondono alle *configurazioni*

di singolarità del robot. Qualora $J(\boldsymbol{\theta})$ risulti invertibile, è possibile risalire al vettore $\dot{\boldsymbol{Q}}_i$

$$\dot{\boldsymbol{Q}}_i = J(\boldsymbol{\theta})^{-1}\dot{\boldsymbol{P}}_i \tag{1.4}$$

ed ottenere, per integrazione sul dominio, gli angoli θ_i dei 6 giunti del robot per ogni punto di campionamento della traiettoria.

Analisi cinematica inversa

Scelti gli n punti di campionamento sulla traiettoria che si vuole percorrere, per ciascuno di essi viene determinata una *matrice di trasformazione* $T_6^0(\boldsymbol{\theta})$: quest'ultima è una matrice 4×4 espressa in quaternioni che definisce la *posizione* (vettore $\boldsymbol{p}$) e l'*orientamento* (terna di versori $\hat{\boldsymbol{n}}$, $\hat{\boldsymbol{s}}$ e $\hat{\boldsymbol{a}}$) in funzione delle posizioni angolari dei giunti θ_i (Figura 15).
Effettuando l'*analisi di posizione inversa* (IK) è possibile ottenere, per ciascun punto di campionamento, diverse sestuple di valori $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)$ possibili, corrispondenti ai valori degli angoli di rotazione dei 6 giunti.
Tra le sestuple di valori θ_i vengono scartate sia quelle corrispondenti alle posizioni non fisicamente raggiungibili (ovvero al di fuori dello spazio di lavoro) che quelle corrispondenti alle configurazioni singolari del robot.
Fra tutte le soluzioni ammissibili è possibile scegliere, ad esempio, quella che minimizza le rotazioni dei giunti [20]: in tal caso, detta

$$\boldsymbol{\theta}_c = [\theta_{1c}\ \ \theta_{2c}\ \ \theta_{3c}\ \ \theta_{4c}\ \ \theta_{5c}\ \ \theta_{6c}]^T \tag{1.5}$$

la soluzione selezionata dall'IK per il punto P_i, la soluzione per il punto P_{i+1}

$$\boldsymbol{\theta}^* = [\theta_1^*\ \ \theta_2^*\ \ \theta_3^*\ \ \theta_4^*\ \ \theta_5^*\ \ \theta_6^*]^T \tag{1.6}$$

dovrà essere scelta in modo da minimizzare la norma $||\boldsymbol{\theta}^* - \boldsymbol{\theta}_c||$, ovvero:

$$\boldsymbol{\theta}^* = \min_{\boldsymbol{\theta}^*} \left(\sum_{j=1}^{6} ||\theta_j^* - \theta_{jc}|| \right) \tag{1.7}$$

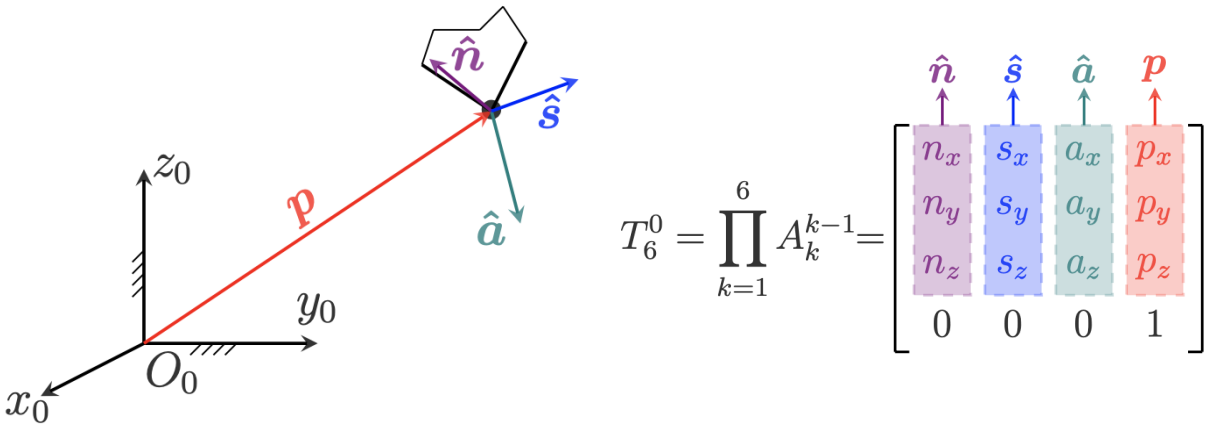


Figura 15: versori $\hat{\boldsymbol{a}}$, $\hat{\boldsymbol{s}}$ e $\hat{\boldsymbol{n}}$ e vettore $\boldsymbol{p}$ che definiscono la posizione e l'orientamento del TCP rispetto al SDR fisso e matrice di trasformazione delle coordinate T_6^0

Il criterio di ottimalità con cui viene selezionata una soluzione piuttosto che un'altra dipende, comunque, dalle scelte progettuali effettuate dalla casa costruttrice del robot.

1.4 Tipologie di slicing

L'operazione di *slicing* effettuata dai software commerciali (*slicer*) per le stampanti 3D FDM cartesiane consente di effettuare unicamente una stampa planare del manufatto (*"planar printing"*): lo slicing del pezzo avviene con piani paralleli ed equidistanti, e la loro distanza viene gestita dall'utente impostando l'altezza del layer (*layer height*) direttamente dal software. Avere lo spessore del layer rigorosamente costante può comportare seri problemi in termini di accuratezza dimensionale e di rugosità della superficie del manufatto, soprattutto se curva: quando infatti la pendenza della tangente alla superficie esterna diminuisce oltre un certo angolo, l'approssimazione che viene introdotta dallo slicer "affettando" il pezzo con piani equidistanti potrebbe diventare inaccettabile. La superficie del manufatto non risulta liscia, ma assume una caratteristica forma "a gradini" (*staicase effect*). Negli ultimi anni si è cercato di ovviare a tale problematica introducendo il concetto di slicing *adattivo* (*adaptive slicing*, Figura 16): l'idea che sta alla base consiste nel diminuire lo spessore del layer quando la pendenza della tangente alla superficie del manufatto diminuisce oltre uno o più valori limite. In questo modo è possibile ridurre l'errore che si commette nella realizzazione del pezzo. Poichè lo spessore del layer è limitato inferiormente dalle caratteristiche costruttive e dalla precisione della macchina appare evidente che, effettuando uno slicing di tipo planare, *non è possibile eliminare del tutto tale errore.*
Effettuando un planar slicing, inoltre, occorre prevedere la presenza di *strutture di supporto* in grado di sorreggere le parti del manufatto sporgenti: a tal proposito, gli slicer di più comune impiego provvedono automaticamente alla realizzazione e al posizionamento dei supporti noto l'angolo massimo di inclinazione della tangente alla superficie al di sotto della quale si rende necessaria la loro presenza. L'utente, oltre ad impostare manualmente il valore di tale angolo (che solitamente

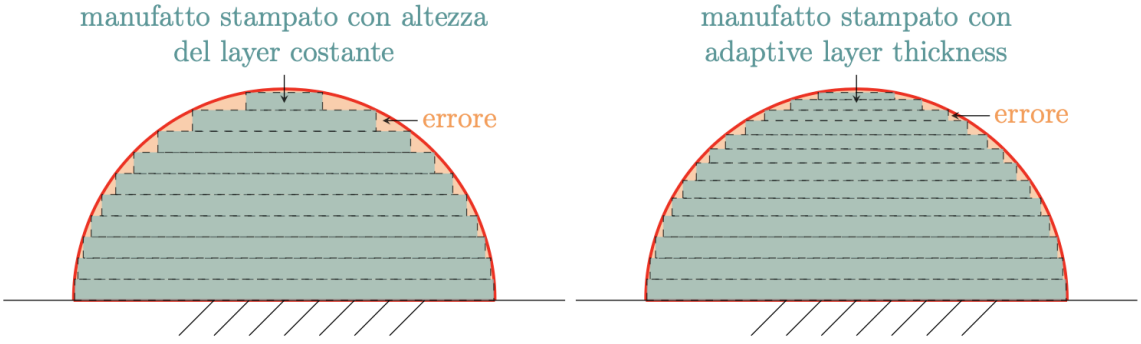


Figura 16: manufatto stampato con altezza del layer costante e con altezza del layer adattiva

si aggira nell'intorno di 45°), ha la possibilità di scegliere la tipologia di supporto; a titolo di esempio si citano i seguenti:

- *supporti a griglia*: estremamente stabili ma, in alcuni casi, di difficile rimozione in fase di post processing;
- *supporti ad albero*: estremamente facili da rimuovere, ma più instabili dei precedenti.

In ogni caso la presenza dei supporti, a prescindere dalla loro tipologia, introduce effetti dannosi quali ad esempio:

- la zona di interfaccia pezzo-supporto, una volta che quest'ultimo viene rimosso, presenta un'accuratezza dimensionale e una rugosità spesso inaccettabili e un'estetica poco gradevole;
- in alcuni casi, soprattutto dove sono presenti overhangs molto marcati di parti sottili, è possibile addirittura che il pezzo si rompa durante la fase di rimozione dei supporti;
- considerevole aumento dei tempi e dei costi di stampa.

L'avvento della RAM ha permesso di eliminare del tutto le tre problematiche sopra citate grazie alla possibilità di impiegare strategie di stampa differenti da quella planare, come ad esempio:

1. **multi-planar printing**: si suddivide il pezzo da stampare in diversi sotto-volumi e, per ciascuno di questi, si crea una geometria a parte (*part decomposition*); infine si uniscono questi ultimi a formare la parte desiderata. Per ciascun sotto-volume si realizza quindi una stampa di tipo planare, ma l'inclinazione dei piani è in generale diversa per ciascuno di essi (Figura 17);
2. **continuous printing**: la deposizione del materiale non avviene layer by layer, ma l'orientamento dell'asse del nozzle varia con continuità per formare *shell* (tubi e profilati cavi, Figura 18);
3. **curved layer slicing (CLS)** (Figura 19, [21]): le traiettorie seguite dal nozzle sono, in generale, curve nello spazio $\mathbb{R}^3$. Per supportare il manufatto occorre impiegare una matrice la cui superficie ricalchi il "negativo" della superficie esterna del pezzo da stampare. E' possibile, ad esempio, realizzare tale matrice con una tradizionale stampa 3D FDM e, successivamente, stampare la parte di interesse impiegando il robot. L'unico inconveniente derivante da questa strategia di stampa riguarda il fatto che, in presenza di superfici che presentano una curvatura molto marcata in zone ridotte, vi è il pericolo che l'estrusore possa collidere con la matrice e/o con la parte già stampata;

4. **spherical slicing** [22]: strategia simile alla CLS in cui, però, le traiettorie seguite dal nozzle sono degli archi di circonferenza. La matrice su cui si va a depositare il materiale, in questo caso, deve essere una sfera o una calotta sferica realizzata con uno slicing di tipo planare: è possibile in questo modo eliminare del tutto lo staircase effect.

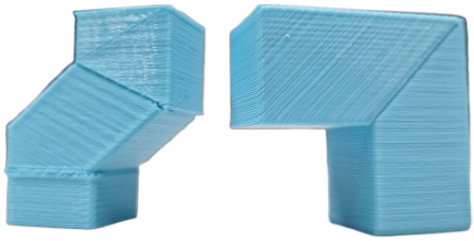


Figura 17: multi-planar printing



Figura 18: continuous printing

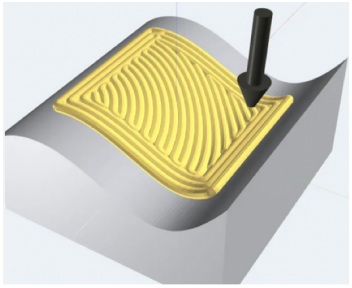


Figura 19: curved layer slicing [21]

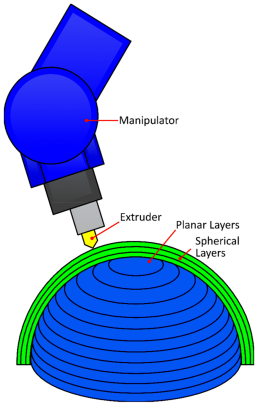


Figura 20: spherical slicing [22]

Come detto in precedenza, il presente lavoro di tesi mira a migliorare l'accuratezza dimensionale e la qualità superficiale di provini stampati con la tecnologia RAM FDM. Per fare ciò si è proceduto come segue:

1. *studio dello stato dell'arte*, che ha permesso di delineare vantaggi e svantaggi della tecnologia RAM unitamente ai parametri di processo rilevanti;
2. *parte sperimentale*:
   (a) implementazione del problema, creazione di un DOE per la realizzazione sistematica dei provini e generazione dei codici di stampa sulla piattaforma integrata 3DExperience;
   (b) scansione dei provini e confronto con il modello disegnato al CAD;
   (c) raccolta dei dati e creazione di un modello di regressione per ciascuna delle uscite del problema in grado di fornire una condizione di ottimo;
3. *simulazione numerica* del processo, a conferma del fatto che l'impiego della piattaforma integrata permette la creazione di un modello predittivo del processo

Capitolo 2

Metodo e strumenti

Nel presente capitolo vengono presentati il metodo di indagine e gli strumenti impiegati per la realizzazione dei provini. Nella prima parte si introduce l'approccio integrato DRAM e si svolge un confronto tra un cubetto di prova stampato con una stampante 3D cartesiana e un provino stampato in 3D con il robot. Successivamente si passa all'identificazione dei parametri di processo scelti e alla metodologia impiegata per condurre le prove sperimentali: queste ultime verranno effettuate implementando un DOE (*Design of Experiments*), brevemente richiamato e discusso nel seguito.

2.1 Design for Robotic Additive Manufacturing

Con il termine DRAM (*Design for Robot Additive Manufacturing*) si intende un approccio che, grazie all'impiego di una piattaforma CAD-based (3DExperience, della Dessault Systemes), permette l'integrazione tra prodotto e processo: in questo modo è possibile snellire le fasi di design del prodotto e di pianificazione del processo, ottimizzando i parametri di quest'ultimo [5] (Figura 21).
La prima fase del DRAM si focalizza sul *prodotto*: dopo averne definito la funzionalità, i requisiti e le specifiche, è possibile procedere alla modellazione del componente da realizzare (grazie alle funzioni di *part modeling* incluse nella piattaforma CAD). Successivamente è possibile procedere con la fase di *ottimizzazione topologica* del componente per migliorarne la forma e l'estetica, imponendo dei vincoli, ad esempio, sull'impiego dello stesso oppure sull'orientamento del materiale da depositare che, come visto in precedenza, in un processo di costruzione additiva risulta anisotropo.
Il componente così modellato costituisce l'*input* per la fase successiva, ovvero quella di *pianificazione del processo*. Come accennato in precedenza, l'impiego della RAM permette di realizzare strategie di deposizione del materiale diverse rispetto a quelle di una comune stampante 3D ad assi cartesiani: i 6 assi del robot

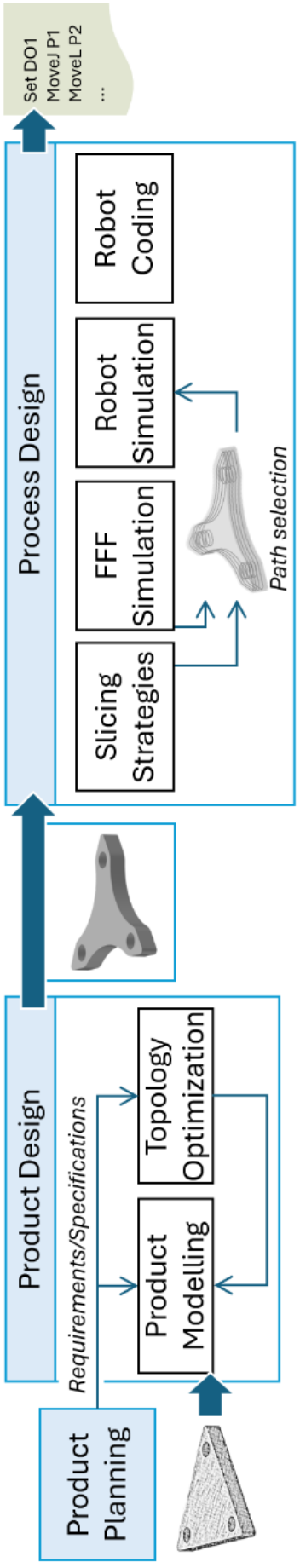


Figura 21 [5]: DRAM approach

infatti consentono all'estrusore di ruotare lungo la traiettoria descritta nello spazio, con indubbi benefici in termini qualità superficiale e proprietà meccaniche del manufatto. Il primo step della seconda fase riguarda proprio la scelta delle strategie di *slicing*, ovvero la definizione delle traiettorie descritte dall'estrusore per la deposizione del materiale. Per ciascuna delle strategie di deposizione proposte è poi possibile confrontare la quantità di materiale richiesto.

Lo step successivo consiste nelle *FFF (Fused Filament Fabrication) simulations*: si passa quindi alla valutazione degli effetti fisici delle strategie selezionate nello step precedente grazie ad un'analisi termo-meccanica (FEA) che permette di valutare deformazioni e stress residui della parte stampata. Valutando attentamente i risultati dei due step appena citati è possibile, dunque, individuare la strategia ottimale di deposizione del materiale, e procedere alla simulazione del robot.

Successivamente si passa alla simulazione dei movimenti del robot (*Robot Simulation*): prima, però, occorre creare una copia digitale dell'ambiente di lavoro (che includa il robot, l'estrusore e il piatto di costruzione) e scegliere la configurazione di stampa ottimale (piatto/estrusore fisso e piatto/estrusore mobile, Figure 3a e 3b).

E' possibile infine generare il codice e, grazie ad un apposito convertitore, convertire quest'ultimo in un formato che impiega la sintassi specifica per il modello di robot selezionato.

Come detto in precedenza, grazie alla piattaforma *3DExperience (Dessault Systemes)* è possibile generare direttamente il codice partendo dal componente precedentemente disegnato dall'utente (*part design*). Nella Tabella 1 a pagina seguente è riportato di diagramma di flusso che descrive la procedura da seguire per tale scopo e i relativi moduli specifici impiegati. Il progetto e l'assemblaggio del robot si rendono necessari solo qualora si volesse impiegare un robot personalizzato: in tal caso occorrerebbe

Task	Application
Design the Robot	Part Design
Assemble the Robot	Assembly Design
Affect a robotic machanism/behaviour	Robotic Programming
Design the Part	Part Design
Design the Tool	Material Deposition Fabrication
Design the Environment	Part Design
Create global assembly in manufacturing cell	Material Deposition Fabrication
Create the printing strategy	Material Deposition Fabrication
Simulate the print	Material Deposition Fabrication
Generate the code	Material Deposition Fabrication
FEA simulation	Additive Manufacturing Scenario Creation

Tabella 1: ambienti di 3DExperience in cui sono state effettuate le varie fasi di lavoro

modellare ogni singola parte (*Part Design*) e unirla con le altre mediante coppie prismatiche e rotoidali, in modo da creare i giunti necessari (*Assembly*).
Lo studio del comportamento del Robot (inteso come meccanismo spaziale) è un passo cruciale del processo poichè rappresenta la fase in cui il Robot, prima inteso come assieme di parti, diventa un dispositivo in grado di muoversi rispondendo a dei comandi: a tal proposito si impiega il modulo *Robot Programming*, che permette di definirne i giunti, il telaio, i limiti fisici di movimento, le velocità ed il Tool Center Point.
Durante la fase di *Part Design* è possibile modellare l'oggetto che si vuole stampare in ottica DRAM; durante questa fase occorre anche pensare alla strategia di stampa da impiegare poichè quest'ultima influenza direttamente il design dell'oggetto stesso. Per la stampa *multi-planar*, ad esempio, ciascun sotto-volume in cui viene suddivisa la geometria va disegnato separatamente e, successivamente, unito con quelli adiacenti. Successivamente si procede con la creazione del *tool* (nozzle) da accoppiare al modello digitale del Robot per la simulazione.
L'*Environment Design* è una fase preliminare del *Global Assembly*, e consiste nel realizzare una copia digitale dell'ambiente di lavoro del robot. Durante la fase di *Global Assembly* si procede all'assemblaggio di tutte le parti: si inizia importando l'*Environment*, il Robot, il nozzle ed, infine, la parte da stampare.
Dopo aver deciso i parametri la strategia di slicing, è possibile scegliere l'orientamento della testa di stampa: quest'ultima, infatti, può depositare il materiale in direzione parallela, ortogonale o inclinata rispetto al piatto di stampa o, addirittura, in direzione variabile con continuità durante il processo.
Trattandosi di una *piattaforma integrata*, 3DExperience permette di ottenere un

Type	Parameters
Robot	TCP definition Workobject definition Distance between nozzle and printing plate Robot speed Robot acceleration
Printing strategies	Tool axis Slicing strategies
Extruder	Feed Rate Amount of extruding per loop

Tabella 2: definizione dei parametri per il robot, le strategie di stampa e l'estrusore

modello predittivo del processo-prodotto. Nell'ambiente *Material Deposition Fabrication* è possibile simulare il processo di stampa, in modo da:

- avere un riscontro visivo del comportamento del robot e delle traiettorie descritte dal TCP;
- poter valutare eventuali movimenti al di fuori dello spazio di lavoro o collisioni con la parte da stampare;
- studiare e ottimizzare i percorsi.

Successivamente è possibile generare il codice ed esportarlo nell'ambiente *Additive Manufacturing Scenario Creation*: qui è possibile, una volta assegnate le proprietà termiche e meccaniche del materiale (modulo di Young, modulo di Poisson, coefficiente di dilatazione lineare, coefficiente convettivo per il raffreddamento con la ventola,...), eseguire la simulazione termo-meccanica agli elementi finiti del processo. Quest'ultima fornisce come risultati i campi di temperatura, degli spostamenti e degli sforzi che si vengono a generare nella parte durante il processo di stampa e, dunque, permette di

- prevedere eventuali difetti di stampa/deformazioni indesiderati come ad esempio la tendenza del materiale a sollevarsi o meno dal piatto di stampa (*warping*);
- correggere/ottimizzare i parametri di processo quali, ad esempio, la velocità di stampa e di raffreddamento del materiale depositato o le strategie di riempimento.

L'ambiente di simulazione permette altresì di effettuare un'*ottimizzazione parametrica*: una volta definiti i parametri di processo e i loro range di variabilità la piattaforma, grazie al tool integrato, permette di valutare le soluzioni possibili e tra queste, grazie ad un processo di ottimizzazione multiobiettivo, scegliere quella

ottima. L'ottimizzazione oggetto del presente lavoro riguarderà proprio questa seconda fase, ovvero quella di simulazione legata al *Process Design*.
Una volta validata la simulazione, è possibile generarne il codice e, grazie ad un apposito convertitore integrato, tradurlo nel linguaggio di programmazione del Robot impiegato (ABB, KUKA, Fanuc, Yaskawa, ecc..).

2.2 Validazione del metodo

Lo studio del materiale riportato in letteratura ha evidenziato come il processo di stampa 3D sia influenzato da numerosi fattori, tra cui il materiale impiegato, la geometria da realizzare, la velocità di stampa, lo spessore del layer e la temperatura di estrusione.
Tascioglu et al. [23] evidenziano come lo spessore dei layer di materiale depositato influenzi direttamente:

- il *costo* del processo, poichè l'impiego di layer più sottili richiede tempi di costruzione maggiori;
- la *rugosità* del manufatto: in letteratura è stata trovata la seguente formula approssimata [24] che permette di stimare la rugosità superficiale media Ra in funzione dello spessore del layer hc:

$$Ra = \frac{1}{\sqrt{2}hc}\left(0,316hc\right)^2 \tag{2.1}$$

I fattori individuati per lo studio in esame sono elencati di seguito.

1. **Temperatura di estrusione (temperature)**: come riportato in diversi studi presenti in letteratura [25], la temperatura alla quale viene estruso il materiale gioca un ruolo importante sull'accuratezza dimensionale dei manufatti ottenuti tramite stampa 3D FDM. In particolare, aumentando la temperatura di estrusione l'accuratezza peggiora: ciò è imputabile all'aumento della fluidità del filamento il quale, allo stato fuso, tenderà ad espandersi maggiormente con conseguenti scostamenti dimensionali marcati. La deviazione tra la dimensione nominale e quella della parte stampata varia linearmente (con buona approssimazione) all'aumentare della temperatura fino ad una temperatura limite oltre il quale non si registrano ulteriori variazioni significative. D'altra parte è bene tenere conto che una temperatura di estrusione eccessivamente bassa comporta un aumento della viscosità del materiale, con conseguente difficoltà nella deposizione dello stesso.
   L'intervallo di temperature di estrusione che maggiormente ricorre in letteratura è

$$T_{ext} = 190°C \div 220°C \tag{2.2}$$

2. **Quantità di materiale depositata nell'unità di tempo rapportata alla quantità di materiale in ingresso (flow rate)**: nei processi di stampa 3D FDM rappresenta il rapporto

$$\frac{\text{portata di materiale in ingresso all'hotend nell'unità di tempo}}{\text{portata di materiale depositata da nozzle nell'unità di tempo}} \tag{2.3}$$

Si parla di *flow rate nominale*, e.g. 100%, quando la portata in volume di filamento trascinata all'interno dell'estrusore coincide con quella depositata dal nozzle: è questa la condizione operativa di funzionamento più largamente diffusa. Regolando la velocità di trascinamento, ovvero la velocità periferica delle due ruote dell'ingranaggio presente nell'estrusore, è possibile far variare il flow rate nell'intorno del valore nominale; in particolare si parla di

- *sovraestrusione* (flow rate $> 100\%$) quando la portata volumetrica di filamento in ingresso all'estrusore è maggiore di quella depositata dal nozzle. In questo caso la quantità di materiale depositata può essere eccessiva e causare rigonfiamenti e sbavature indesiderate, con conseguente peggioramento dell'accuratezza dimensionale del manufatto;

- *sottoestrusione* (flow rate $< 100\%$) quando la quantità di materiale in ingresso all'estrusore è minore di quella effettivamente depositata dal nozzle. Ciò si traduce nel fatto che quest'ultimo deposita meno materiale del previsto, con la possibile creazione di porosità e di crateri sulle pareti della parte stampata.

Fenomeni di sovra/sottoestrusione non desiderati, quando presenti, sono spesso imputabili a

(a) *temperatura di estrusione troppo elevata*, che comporta un'eccessiva fluidità del materiale alla stato fuso che letteralmente "gocciola" dal nozzle e si accumula in quantità eccessiva;

(b) *umidità*: l'umidità infatti è generalmente un fattore esterno molto temuto dai materiali termoplastici per la costruzione additiva i quali, se esposti a quest'ultima, tendono ad irrigidirsi e infragilirsi. Ciò potrebbe avere come conseguenza un aumento della difficoltà da parte dell'ingranaggio dell'estrusore nel trascinare il materiale all'interno dell'hotend (soprattutto per gli estrusori *bowden* in cui l'ingranaggio non si trova all'interno dell'hotend, ma a monte di quest'ultimo).

Figura 22: Diametri e velocità del materiale all'ingresso e all'uscita dall'hotend

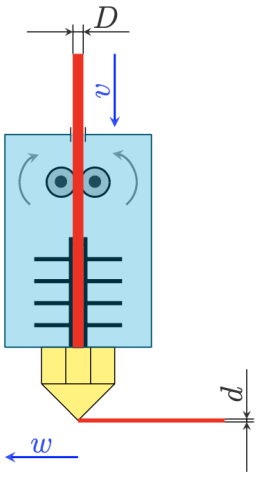
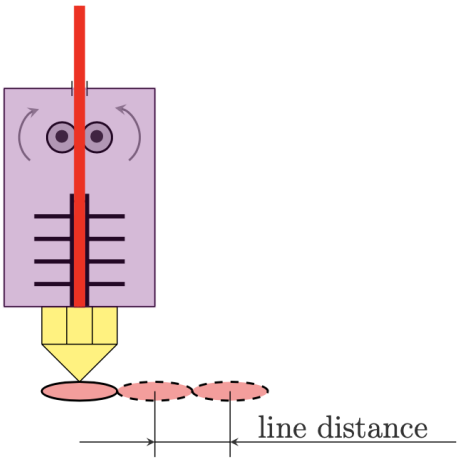


Figura 23: definizione line distance



E' possibile calcolare la velocità v^* di trascinamento del filamento all'interno dell'estrusore a cui corrisponde il flow rate nominale (100%) imponendo la costanza della portata in volume all'interno dell'hotend; detti (Figura 22)

- w la velocità con cui la testa del nozzle deposita il materiale (10 mm/s);
- v la velocità lineare periferica dell'ingranaggio dell'estrusore che trascina il filamento all'interno dell'hotend;
- D il diametro del filamento in ingresso, pari a 1,75 mm;
- d il diametro della sezione di uscita del materiale allo stato fuso (0,6 mm)

si avrà

$$\pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot v = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot w \qquad \Longrightarrow \qquad v^* = w \left(\frac{d}{D}\right)^2 \tag{2.4}$$

Detta v la velocità periferica dell'ingranaggio, il *flow rate* f_r può allora essere definito come

$$f_r = \frac{v}{v^*} \tag{2.5}$$

3. **Distanza tra le linee (line distance)**: rappresenta la distanza tra gli assi dei nozzle quando quest'ultimo deposita due linee adiacenti della superficie esterna (*walls*). In condizioni nominali il suo valore è pari al diametro del nozzle (0,6 mm), ma può essere fatto variare in tale intorno (Figura 23).
Per ciascuna combinazione di fattori (*run*) verranno realizzati tre provini e, per ciascuna run, si procederà a calcolare il valore medio e la varianza per

ciascuna delle due uscite del problema, in modo da valutarne lo scostamento dal valore centrale atteso. Per garantire la corretta realizzazione dei provini, ovvero l'assenza di difetti al loro interno, si è proceduto infine alla misura della loro *massa*. Una volta calcolata la media delle masse dei tre provini di ciascuna run, si è impiegato l'*errore percentuale* come parametro di verifica: è stato scelto come valore soglia per valutare la bontà delle misurazioni l'1%: un errore percentuale superiore a tale limite indica il fatto che la stampa di almeno uno dei tre provini della run in esame non è avvenuta correttamente. Di seguito viene riportato il diagramma di flusso (Figura 24) del processo.

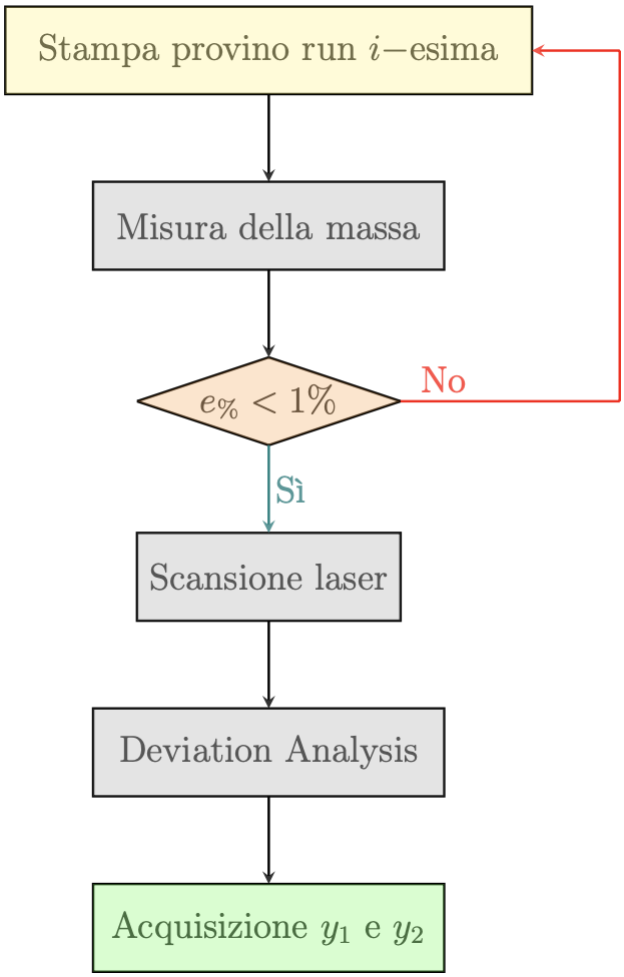


Figura 24: diagramma di flusso del processo

2.3 Design Of Experiments

Per condurre le prove è necessario impiegare un approccio efficace e al contempo scientificamente valido. Per fare ciò è necessario pianificare queste ultime in maniera sistematica, in modo da poter raccogliere ed analizzare i dati per via statistica: solo così facendo è possibile giungere a delle conclusioni valide ed oggettive. In tal senso l'approccio *Design Of Experiments* è quello che meglio si

presta al caso in esame, le cui fasi salienti sono nel seguito brevemente delineate [26].

1. *Identificazione e formulazione del problema*: è necessario innanzitutto identificare il problema nella sua interezza e definire l'obiettivo degli esperimenti che verranno effettuati. Una formulazione chiara e mirata spesso può aiutare a comprendere meglio i fenomeni fisici alla base del problema e la sua soluzione finale. L'impiego di un DOE trova largo impiego in contesti quali:

   (a) *caratterizzazione e screening di determinati fenomeni*: gli esperimenti mirati allo screening e alla caratterizzazione sono di fondamentale importanza quando si ha a che fare con sistemi e/o tecnologie di cui non si ha una conoscenza ad ampio spettro;

   (b) *ottimizzazione*: una volta che il sistema è stato caratterizzato e che ne sono stati individuati i fattori più importanti, si può procedere l'identificazione dei livelli di questi ultimi. Gli esperimenti mirati all'ottimizzazione di un processo hanno come obiettivo la ricerca di uno o più set di livelli dei fattori che ottimizzano la risposta in esame, e solitamente vengono condotti dopo aver concluso la fase preliminare di caratterizzazione. Il presente caso di tesi mira appunto all'*ottimizzazione* dei parametri del processo di RAM;

   (c) *conferma (validazione)*: gli esperimenti condotti per la validazione vengono effettuati per verificare che il comportamento di un determinato sistema sia coerente con la teoria. Con gli esperimenti di *scoperta* si cerca invece di determinare cosa accade modificando, ad esempio, i materiali, i fattori ed i loro range di variabilità;

   (d) *robustezza*: esperimenti mirati a determinare le condizioni alle quali la risposta del sistema cambia in maniera significativa, ovvero entro quale range di variabilità dei fattori la risposta del sistema rimane stabile;

2. *scelta delle variabili di uscita del problema*: tale scelta deve essere mirata all'ottenimento di informazioni realmente utili ai fini dello studio del processo. Nel caso in cui vengano effettuate più misurazioni delle variabili di uscita, si considera solitamente il loro valore medio; nel presente caso di studio ad esempio per ciascuna *run* vengono stampati tre provini e le variabili di uscita per ciascuna run sono ottenute mediando i valori delle tre prove;

3. *scelta dei fattori, dei loro livelli e dei range di variabilità*: una volta individuati i fattori che influenzano il processo, è opportuno distinguere

   (a) *disturbi*: fattori esterni, che non possono essere controllati dall'uomo;

(b) *fattori del DOE*: fattori che l'operatore può gestire e controllare durante l'esperimento.

E' necessario poi stabile l'intervallo di valori che si ha interesse ad indagare per ciascuna variabile, ovvero il range all'interno del quale far variare ciascun fattore.
Successivamente si passa alla definizione del numero di livelli in cui suddividere il range di variabilità di ciascun fattore. Quando gli esperimenti hanno finalità di screening, mancando la conoscenza completa del processo, solitamente tale range è molto ampio mentre, nel caso di ottimizzazione, tale range è limitato ad intervalli abbastanza ristretti;

4. *scelta della tipologia di design da effettuare*: durante questa fase si deve decidere in che modo combinare tra di loro i livelli dei diversi fattori. Detto f il numero dei fattori ed l il numero di livelli di ciascun fattore (nell'ipotesi che ciascun fattore abbia un ugual numero di livelli), si possono scegliere due categorie di design:

   (a) *full factorial design*: si considerano tutte le combinazioni possibili fra i vari livelli; in questo caso occorreranno un numero di run n pari a

   $$n = l^f \tag{2.6}$$

   (b) *fractional factorial design*: permettono di ridurre il numero di run richieste rispetto al full factorial design e valutare l'influenza dei vari fattori e delle interazioni tra essi esistenti impiegando, ad esempio, i *Taguchi Orthogonal Array*. Per un design a 3 fattori questi ultimi solitamente vengono indicati con la notazione

   $$OA_{3^r}(3^m) \tag{2.7}$$

   Un design di questo tipo richiede unicamente

   $$\left(\frac{1}{3}\right)^{m-r} \tag{2.8}$$

   di tutte le combinazioni possibili tra i vari livelli. Per un Taguchi a tre fattori e tre livelli $OA_9(3^3)$, ad esempio, sono richieste ($r = 2$, $m = 3$, $f = 3$, $l = 3$)

   $$\left(\frac{1}{3}\right)^{3-2} = \frac{1}{3} \tag{2.9}$$

   di tutte le combinazioni possibili, ovvero

   $$\frac{1}{3} \cdot l^f = \frac{1}{3} \cdot 3^3 = 9 \text{ run} \tag{2.10}$$

La selezione della tipologia di design richiede anche la scelta di un *modello empirico* che sia in grado di descrivere i risultati ottenuti. Solitamente vengono impiegati modelli polinomiali del primo o del secondo ordine. A titolo di esempio, si possono avere:

- *modelli del primo ordine semplici*: detta y la variabile di uscita, x_i i fattori ed ε l'errore commesso, un modello di regressione polinomiale del primo ordine semplice può riscriversi nella forma

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + ... + \beta_n x_n + \varepsilon = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i + \varepsilon \qquad (2.11)$$

  dove i termini β_i rappresentano i coefficienti della combinazione lineare degli n fattori.;

- *modelli del primo ordine che tengono conto delle interazioni tra i fattori presi due a due*: in questo caso l'espressione del modello diventa

$$\begin{aligned} y &= \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + ... + \beta_n x_n + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + ... + \varepsilon \\ &= \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \qquad , \qquad i \neq j \end{aligned} \qquad (2.12)$$

  dove i prodotti misti $x_i x_j$ indicano la presenza di un'interazione tra i fattori x_i e x_j;

- *modelli del secondo ordine che tengono conto delle interazioni tra i fattori presi due a due*: la formulazione del modello diventa

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{n} \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad , \quad i \neq j \qquad (2.13)$$

5. *svolgimento delle prove sperimentali*;

6. *analisi statistica dei dati*: l'impiego di un approccio statistico al problema garantisce il raggiungimento di conclusioni obiettive e oggettive. E' possibile ricorrere all'ausilio di grafici per determinare

   - *effetti principali*, ovvero l'influenza che hanno i singoli fattori sulle uscite del problema;

   - possibili *interazioni* tra i vari fattori.

   La fase successiva in un design di ottimizzazione consiste nella realizzazione del *modello di regressione*: grazie a quest'ultimo è possibile rappresentare la risposta del problema $\hat{y}$ come funzione degli n fattori $x_1, x_2, ..., x_n$

$$\hat{y} = \hat{y}(x_1, x_2, ..., x_n) \qquad (2.14)$$

e procedere alla ricerca del valore minimo/massimo cercato. Qualora l'uscita del problema non fosse unica, si avranno k modelli di regressione associati alle uscite nella forma

$$\begin{aligned} \hat{y}_1 &= \hat{y}_1(x_1, x_2, ..., x_n) \\ \hat{y}_2 &= \hat{y}_2(x_1, x_2, ..., x_n) \\ &\vdots \\ \hat{y}_k &= \hat{y}_k(x_1, x_2, ..., x_n) \end{aligned} \tag{2.15}$$

e il problema di ottimizzazione si riconduce ad un problema di *ottimizzazione multiobiettivo* del tipo

$$\begin{aligned} \min \quad & \hat{y}_1(x_1, x_2, ..., x_n) \\ & \hat{y}_2(x_1, x_2, ..., x_n) \\ & \vdots \\ & \hat{y}_k(x_1, x_2, ..., x_n) \\ \text{s.t.} \quad & \overline{x}_1 \leq x_1 \leq \hat{x}_1 \\ & \overline{x}_2 \leq x_2 \leq \hat{x}_2 \\ & \vdots \\ & \overline{x}_n \leq x_n \leq \hat{x}_n \end{aligned} \tag{2.16}$$

che può essere risolto con diversi metodi, come ad esempio il *metodo di Pareto*;

7. *conclusioni*: il passo finale della procedura consiste nell'interpretazione e nella deduzione di conclusioni coerenti e fisicamente accettabili per il processo oggetto di indagine.

Come si vedrà nel seguito, in alcuni casi può tornare utile seguire in maniera *iterativa* tale procedura: si può ad esempio sviluppare un primo DOE in cui i fattori presentano determinati range di variabilità e, successivamente, sviluppare un secondo DOE in cui si "restringono" o si "traslano" tali range.

2.4 Caso di studio

2.4.1 Confronto preliminare RAM - stampante cartesiana FDM

Si è proceduto innanzitutto a stampare due provini (Figura 25): uno con la stampante 3D cartesiana tradizionale (modello *ZeroPro* della *Kentstrapper*) e uno con il Cobot ABB Gofa 15000. Per il primo di questi è stato impiegato lo slicer fornito dalla casa costruttrice della macchina per generare il *.gcode*, mentre per il secondo è stata impiegata la piattaforma 3DExperience.

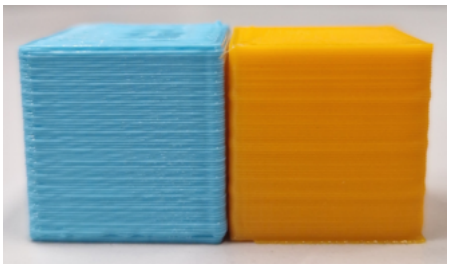


Figura 25: provino cubico realizzato con la stampante 3D cartesiana (giallo, a destra) e con il Cobot ABB GoFa 15000 (azzurro, a sinistra)

Da un primo riscontro visivo di osserva che la finitura superficiale del provino stampato con il robot è peggiore: la sua superficie infatti appare più "ruvida" e sono evidenti le linee orizzontali di separazione tra i singoli layer. Anche nel provino stampato con la stampante 3D sono visibili tali linee sulle pareti verticali, ma queste appaiono di entità decisamente più modesta.
Successivamente si è proceduto a pesare e misurare le dimensioni di entrambi i provini con un calibro ventesimale, trovando i risultati di Tabella 3.
Si è proceduto poi ad acquisire le nuvole dei punti dei due provini con lo scanner laser, a generare i corrispondenti file tessellati (formato *.stl*) e ad importarli su 3DExperience nell'ambiente *Digitized Shape Preparation* per sovrapporli al modello nominale ed effettuarne una *deviation analysis*. Osservando i risultati emerge che (Figure 26 e 27):

- lo scostamento massimo (in valore assoluto) dei punti della superficie del provino ottenuto con la stampante 3D dalla superficie nominale del modello è minore (0,727 mm) rispetto a quello del provino stampato con il robot (0,73 mm);

- solo il 20,24% dei punti della superficie del provino ottenuto con la RAM si trova ad una distanza inferiore a 0,1 mm dalla superficie nominale del cubetto, mentre per il secondo provino tale percentuale sale considerevolmente (79,15%);

	Kentstrapper 3D printer	**Cobot ABB GoFa 15000**
Massa [g]	5	6
Dimensioni $x \times y \times z$ [mm]	19,8×20,1×20,1	20,35×20,5×20,85

Tabella 3: dimensioni e massa dei due provini

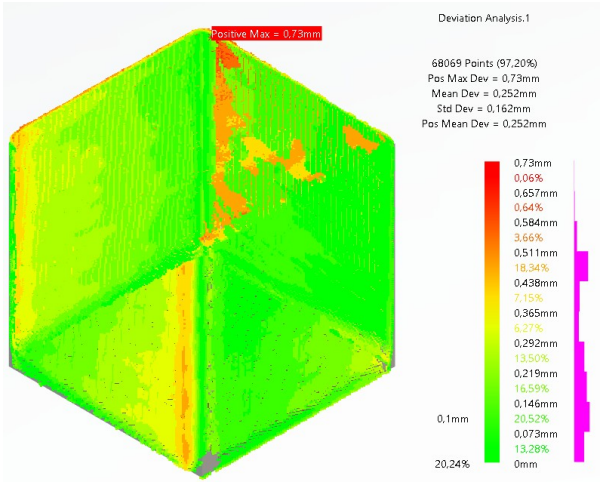


Figura 26: deviation analysis provino ottenuto con il robot

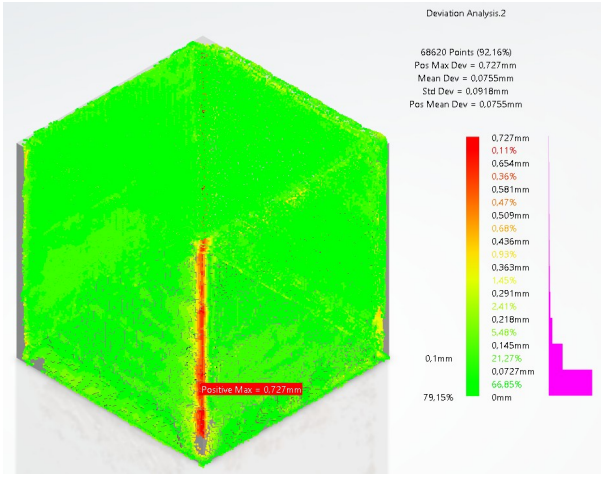


Figura 27: deviation analysis provino ottenuto con la stampante 3D

- lo scostamento medio dei punti dalla superficie nominale è maggiore nel provino stampato con il robot (0,252 mm vs 0,0755 mm).

Dai risultati appena discussi si evince che l'accuratezza dimensionale del provino stampato con il Cobot ABB GoFa 15000 è peggiore rispetto a quella del provino ottenuto con la stampante 3D cartesiana.
Nel seguito si vogliono ottimizzare i parametri di processo che incidono sull'accuratezza dimensionale dei provini ottenuti con la RAM.

2.4.2 Implementazione del metodo

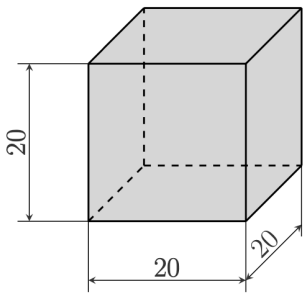


Figura 28: geometria del provino in esame

Per semplicità di esecuzione, tale indagine è stata condotta su dei provini cubici aventi spigolo $l = 20$ mm (Figura 28), il cui modello è stato realizzato nell'ambiente *Part Design* della piattaforma 3DExperience.
Vista la notevole massa degli organi del Robot in moto durante il processo di stampa, per evitare che gli effetti inerziali diventino non trascurabili e che possano in qualche modo influire negativamente sull'accuratezza dimensionale dei provini, si è deciso di impiegare una velocità di stampa costante e pari a 10 mm/s.

Per la stampa dei provini si è deciso di impiegare un'altezza del layer (*layer thickness*) costante e pari a metà del diametro del nozzle impiegato ($\Phi 0,6$), ovvero $hc = 0,3$ mm e, in accordo con il materiale trovato in letteratura, temperature scelte sono $200°C$, $210°C$ e $220°C$. I valori della line distance ℓ_d scelti sono pari a 0,5 mm, 0,6 mm e 0,7 mm.
Le stampa dei provini è stata effettuata prendendo in considerazione sia la condizione di flow rate nominale che quelle di sottoestrusione (80%) e sovraestrusione (120%); le velocità di estrusione implementate nella macro dell'estrusore sono pertanto:

$$\begin{aligned} f_r = 100\% &\implies v = v^* = 71 \text{ mm/min} \\ f_r = 80\% &\implies v = 0.8 \cdot v^* = 56 \text{ mm/min} \\ f_r = 120\% &\implies v = 1.2 \cdot v^* = 85 \text{ mm/min} \end{aligned} \tag{2.17}$$

Per definire la strategia di deposizione del materiale, nell'ambiente Material Deposition Fabrication occorre impostare (Figura 29):

- altezza del singolo layer (*slicing step* o *layer height*), impostata a 0,3 mm;
- numero di passate sul bordo che delimita il singolo layer (*contouring*). E' stato realizzato prima il bordo interno e poi quello esterno;
- tipologia di riempimento (*infill*), che può essere realizzato con delle linee parallele ed equidistanziate oppure con una trama esagonale. Si è scelto un riempimento con linee parallele e distanti 4 mm l'una dalle altre;
- numero di layer inferiori *downskin* e superiori (*upskin*) da realizzare con riempimento al 100%;
- line distance ℓ_d;
- *offset*, ovvero la distanza tra la superficie nominale del pezzo e l'asse del nozzle quando questo sta depositando il contorno più esterno. E' stato considerato un valore pari a $\ell_d/2$.

I riempimenti sono stati realizzati mantenendo una distanza dalle linee del contorno pari a $\ell_d/2$.



Figura 29

	n° passate	line distance	offset
Contouring	2	ℓ_d	$\ell_d/2$
Filling		ℓ_d	
Contouring	2	ℓ_d	$\ell_d/2$
Filling		4 mm	
Contouring	2	ℓ_d	$\ell_d/2$
Filling		ℓ_d	

Tabella 4: parametri impiegati per la definizione delle strategie di deposizione del materiale

2.4.3 Strumenti e setup

Il Robot impiegato è un ABB GoFa CRB 15000, nella versione da 5 kg, controllato da un controllore OmniCORE C30: si tratta di un robot collaborativo (*Cobot*) a 6 GDL avente un raggio d'azione pari a 0,95 m e di cui sono riportati gli ingombri e lo schema cinematico (Figure 30 e 31).
E' stato installato un estrusore della KENTSTRAPPER con sistema di estrusione magnetico (S.E.M.): quest'ultimo presenta un hotend UHF Rapido, un nozzle di diametro 0,6 mm ed è controllato da un controllore BTT SKR Mini E3 v3.0 accoppiato con un RASPBERRY 4 (modello B). I comandi vengono inviati, attraverso un CANBUS, direttamente all'estrusore posizionato sulla testa di stampa del Robot. Per accoppiare la testa di stampa dell'estrusore con l'elemento terminale del Robot si è proceduto a progettare, modellare, stampare in 3D ed installare un supporto flangiato (giallo in Figura 30).
La piattaforma 3DExperience genera il codice che contiene, oltre alle istruzioni per movimento del Robot, quelle relative al comando dell'estrusore: l'estrusione del materiale è regolata dal comando `MELTING|ON` oppure `MELTING|OFF`. Tali istruzioni vengono quindi trasmesse sotto forma di segnale digitale al controllore del robot: quando è richiesta l'estrusione di materiale si avrà in uscita un segnale elettrico (24V DC). Per trasmettere tale segnale all'estrusore, occorre interporre tra controllore del Robot e il pin di input della scheda madre un *optoisolatore* poichè quest'ultima lavora con segnali caratterizzati da tensione differente (3,3V DC).
E' importante includere il collegamento con una massa dotata di resistenza pull-down per evitare che il pin della scheda madre dell'estrusore vada in stato di *floating*. Successivamente, per trasformare il segnale in ingresso alla scheda madre in movimenti dell'estrusore, è stata realizzata una *macro* del tipo

- `WHILE signal HIGH` $\Longrightarrow$ `extrude`, con `HIGH value`$= \{1\}$

- `WHILE signal LOW` $\Longrightarrow$ `do not extrude` con `LOW value`$= \{0\}$

L'estrusione del materiale è stata impostata in *loop*: ad ogni loop corrisponde un intervallo di 0,5 s, durante il quale viene estruso 1 mm di materiale con una velocità v che può essere assegnata per mezzo di un'apposita *macro* (Figura 31).

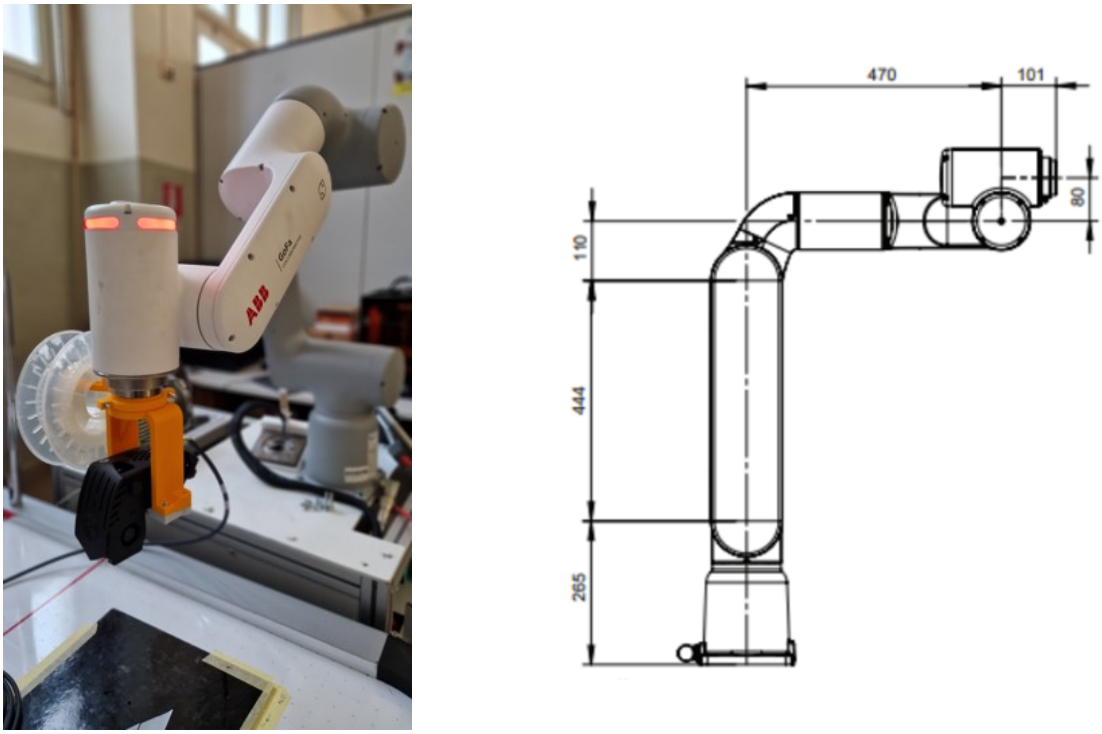


Figura 30: ABB GoFa 15000 presente presso l'IdeaLab del DIEF (sinistra) e ingombri del robot [27] (destra) nella configurazione di riferimento

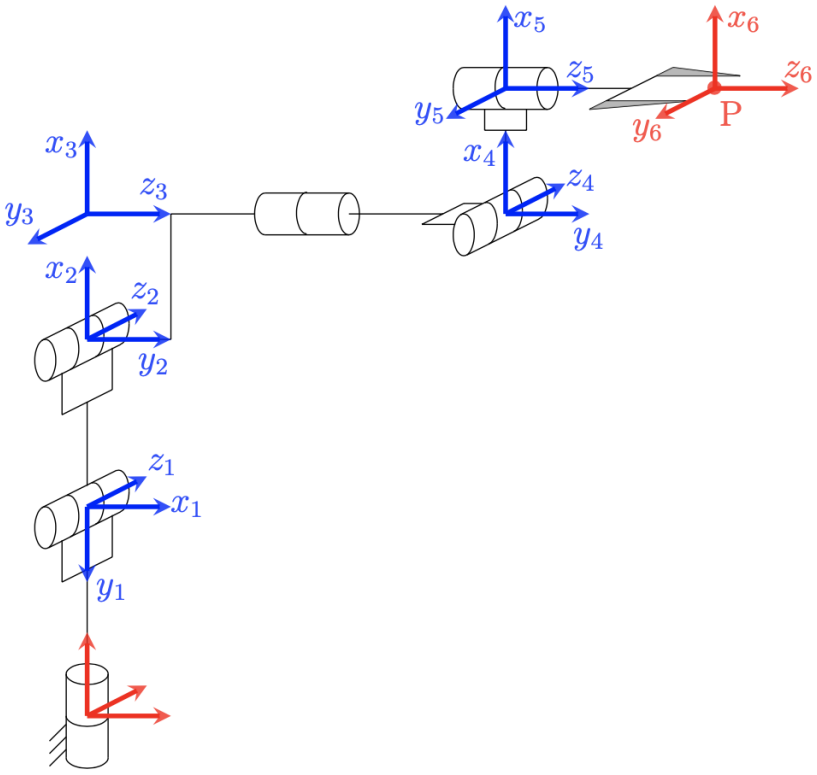


Figura 31: schema cinematico dell'ABB GoFa 15000: in dettaglio i sistemi di riferimento riferiti ai singoli giunti

Giunto k-esimo	α_k [°]	θ_k [°]	a_k [m]	d_k [m]
1	-90	θ_1	0	0,265
2	0	$\theta_2 - 90$	0,44	0
3	-90	θ_3	0,11	0
4	90	θ_4	0	0,47
5	-90	θ_5	0,08	0
6	0	θ_6	0	0,101

Tabella 5: parametri di Denavit-Hartenber del'ABB CRB GoFa 15000 [28]

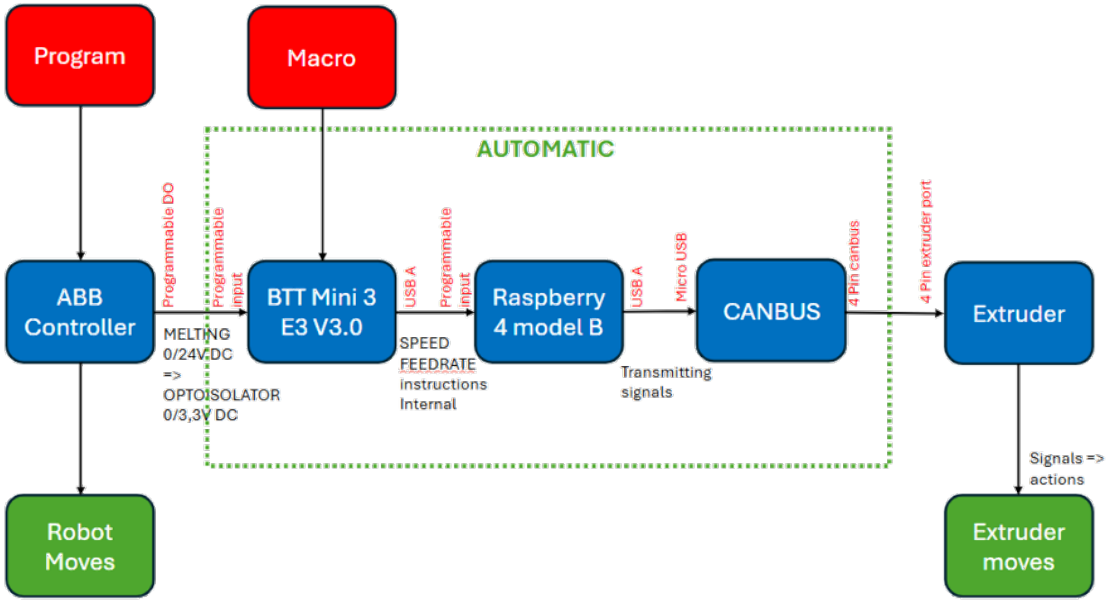


Figura 32: schema di controllo dell'estrusore

Per la scansione dei provini è stato impiegato lo *scanner laser Range 7* della *Konica Minolta* (Figura 32), caratterizzato da un'accuratezza di scansione di $\pm 40\ \mu m$ e in grado di effettuare acquisizioni precise ed affidabili grazie ad una funzione a *focalizzazione multipla*.



Figura 33: scanner 3D Range 7 Konica Minolta [immagine reperita dal catalogo sul sito della casa costruttrice]

Per la realizzazione dei provini è stato impiegata una bobina di PLA comune della *Form Futura*, di colore giallo opaco per evitare fenomeni indesiderati di riflessione in fase di scansione con lo scanner laser. Le proprietà termo-meccaniche del materiale [29] inserite all'interno dell'ambiente *Additive Manufacturing Scenario Creation* di 3DExperience per le simulazioni FEA sono di seguito riportate.

Densità	1073 kg/m^3
Coefficiente di espansione lineare	$7 \times 10^{-5}\ K^{-1}$
Conduttività termica	0,111 @ 321,15 K 0,197 @ 382,15 K 0,195 @ 463,15 K
Coefficiente di Poisson	0,36
Modulo di Young	3 GPa @ 293,15 K 2,7 GPa @ 313,15 800 MPa @ 333,15 K 50 MPa @ 353,15 K
Calore specifico	1,59 kJ/(kg·K) @ 328,15 K 1,955 kJ/(kg·K) @ 373,15 K 2,06 kJ/(kg·K) @ 463,15 K

Tabella 6: proprietà del PLA impiegate per l'analisi FEA

Capitolo 3

Risultati

3.1 Stampa dei provini e risultati del primo DOE

Dopo aver realizzato il provino cubico nell'ambiente *Part Design* di 3DExperience, si è proceduto ad importarlo nell'ambiente *Material Deposition Fabrication*, in cui è stato precedentemente importato l'assembly costituito da Robot e piatto di stampa. Prima di impostare i parametri di slicing, sono stati definiti il sistema di riferimento fisso e quello solidale al TCP ed è stato creato il *tool* (nozzle) con le seguenti caratteristiche (Figura 34):

- altezza della linea di materiale depositato 0,3 mm;
- larghezza della linea di materiale depositato 0,6 mm (pari al diametro del nozzle);
- velocità di deposizione del materiale pari a 10 mm/s.

Successivamente, per ciascuna delle 27 run eseguite, sono stati impostati i parametri di *slicing* come da Tabella a pagina 42 ed è stata lanciata la simulazione (Figura 35) per verificare le traiettorie descritte dal TCP e l'assenza di collisioni del Robot con il piatto di stampa. Si è proceduto infine a generare il codice tramite il comando dedicato presente nell'ambiente di lavoro (Figura 36).

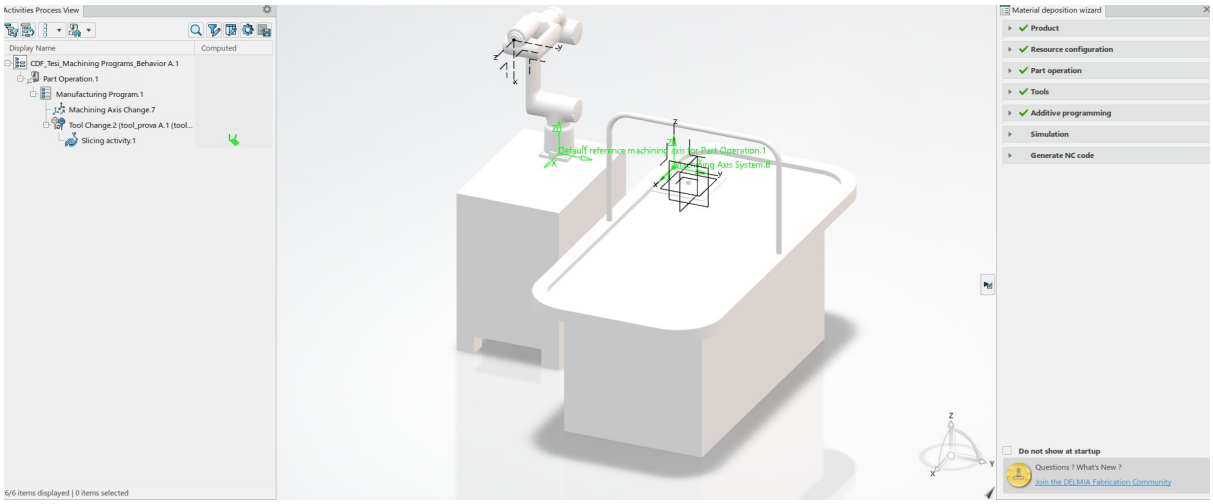


Figura 34: ambiente Material Deposition Fabrication

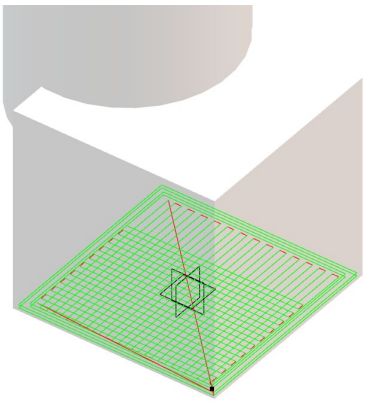


Figura 35: simulazione del processo

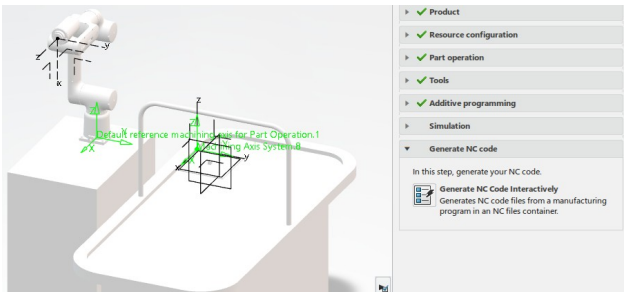


Figura 36: generazione del codice

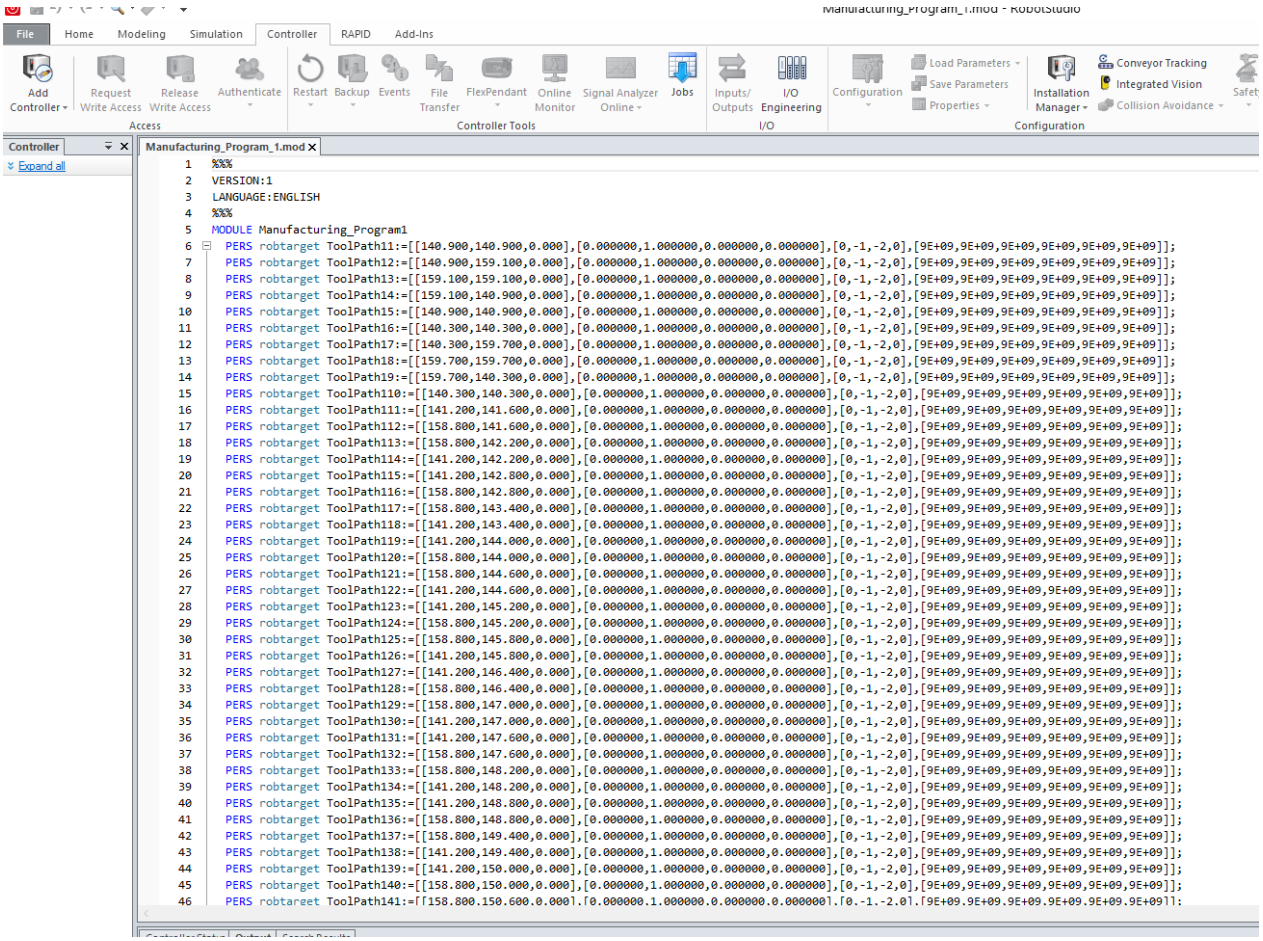


Figura 37: listato del codice in RobotStudio

Una volta importato il codice in *RobotStudio* (Figura 37) si è proceduto a caricare quest'ultimo sul *flex pendant* del Robot, in attesa di lanciare la stampa. Prima di poter avviare la stampa dei provini, infatti, è stato necessario impostare sul controllore dell'estrusore

- la *temperatura* di estrusione;
- il *feed rate*, ovvero la velocità v (equazione 2.5) con cui il materiale viene trascinato all'interno dell'hotend.

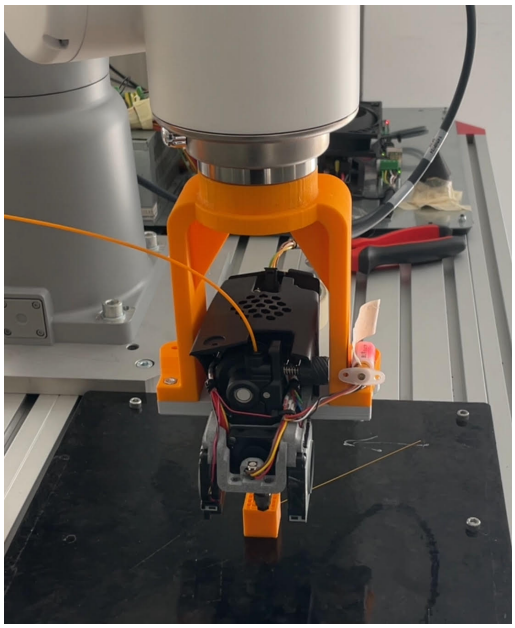


Figura 38: stampa di un provino

Una volta settati con attenzione i valori relativi a ciascuna run, è stato possibile avviare il programma di stampa dei provini (Figura 38).
Durante la fase successiva si è proceduto all'acquisizione delle nuvole dei punti con lo scanner laser: per ciascun provino di ciascuna run sono state acquisite quattro nuvole di punti (Figura 39) che, successivamente, sono state unite (operazione di *merging*, Figura 40) a formare il file in formato *.stl*.
Il file *.stl* così ottenuto è stato importato nell'ambiente *Digitized Shape Preparation* di 3DExperience per essere confrontato con il modello nominale del cubetto. In un primo momento il file tesselato è stato movimentato manualmente per portarlo a coincidere con il modello e in un secondo momento, con il comando *best fit* (Figura 41), il programma ha provveduto a sovrapporre le due geometrie in maniera tale da minimizzare gli scostamenti tra le rispettive superfici.
Una volta realizzata la sovrapposizione delle due geometrie è stato eseguito il comando di *Deviation Analysis*. In Figura 42 è riportato il risultato dell'analisi di un provino, da cui si possono estrapolare:

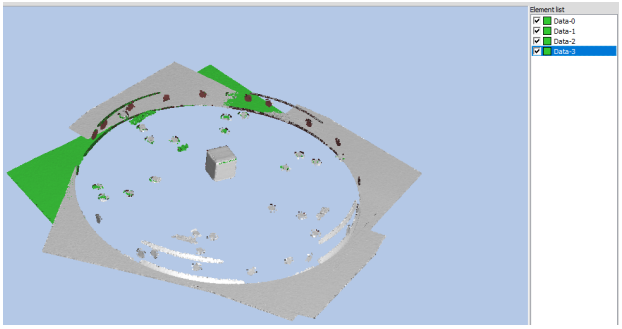


Figura 39: acquisizione delle 4 nuvole di punti

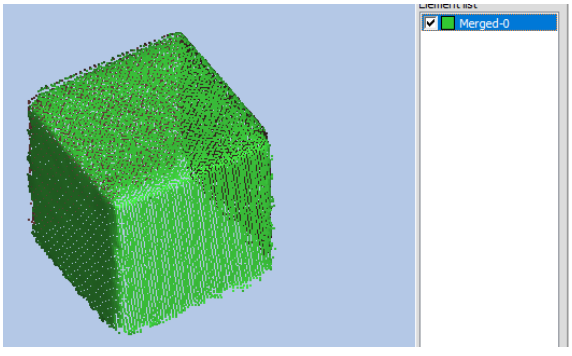


Figura 40: file .stl ottenuto in seguito all'operazione di merging



Figura 41: sovrapposizione del modello e del file tessellato in seguito all'operazione di merging

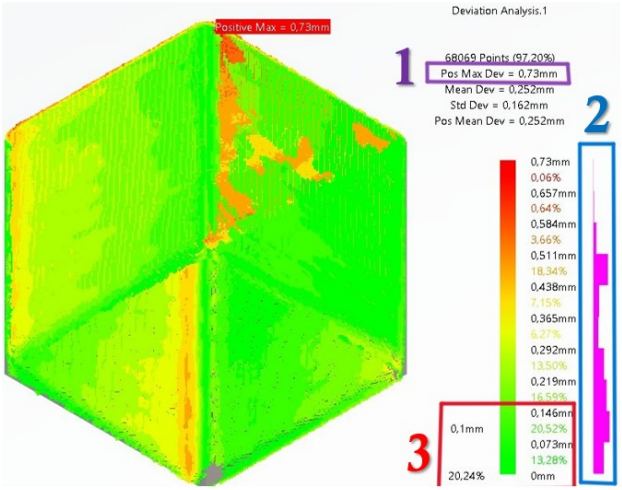


Figura 42: risultato della deviation analysis

1. scostamento massimo, in valore assoluto, dei punti della superficie del provino rispetto alla superficie del modello nominale;

2. la distribuzione degli scostamenti tra il valore minimo e il valore massimo;

3. percentuale dei punti del provino la cui distanza dalla superficie nominale non eccede la soglia di 0,1 mm.

Per la valutazione dell'accuratezza dimensionale dei provini si è deciso di effettuare il campionamento delle seguenti uscite (*minimizzazione multiobiettivo*):

1. $y_1 \implies$ scostamento massimo (espresso in millimetri) dei punti della superficie del provino dalla superficie nominale del cubetto;

2. $y_2 \implies$ percentuale di punti del provino che si trovano ad una distanza maggiore di 0,1 mm dalla superficie nominale del cubetto. Infatti la misura dello scostamento massimo dei punti dalla superficie nominale dipende unicamente dalla distanza di un singolo punto dalla superficie nominale: se durante l'operazione di "pulizia" della nuvola di punti dal piatto dovesse sfuggire anche un solo punto, si otterrebbe un risultato non veritiero, viziato dalla presenza di un punto che, in verità, non appartiene al provino. Per questo motivo è necessario considerare ache una misura *globale* degli scostamenti dalla superficie nominale.

Nelle pagine seguenti sono riportati i risultati ottenuti.

Run	Scostamento max medio [mm]	Deviazione standard [mm]	% punti media oltre 0,1 mm	Deviazione standard	Massa media [g]	Deviazione standard [g]	Errore % max
a	0,854	0,065	77,19%	3,22%	4.763	0,012	0,31%
b	0,784	0,047	76,01%	0,62%	4.837	0,012	0,31%
c	0,764	0,078	42,72%	5,08%	4.637	0,012	0,32%
d	1,177	0,058	82,73%	3,10%	6,340	0,016	0,32%
e	1,117	0,063	84,67%	3,34%	6,033	0,021	0,41%
f	0,974	0,100	76,23%	1,51%	5,830	0,022	0,43%
g	1,076	0,100	86,31%	0,55%	7,590	0,024	0,40%
h	1,290	0,059	85,27%	1,07%	7,210	0,008	0,14%
i	1,090	0,045	90,46%	0,43%	6,997	0,033	0,50%
j	0,838	0,021	78,36%	0,48%	5,057	0,033	0,79%
k	0,773	0,092	76,67%	4,37%	4,767	0,005	0,10%
l	0,774	0,022	37,91%	0,14%	4,647	0,031	0,75%
m	1,170	0,029	81,32%	1,32%	6,363	0,009	0,16%
n	1,103	0,074	78,27%	0,50%	6,107	0,005	0,08%
o	0,858	0,032	84,23%	0,55%	5,863	0,009	0,17%
p	1,153	0,026	91,14%	0,41%	7,543	0,017	0,27%
q	1,293	0,053	84,98%	0,52%	7,207	0,009	0,14%
r	1,340	0,054	77,38%	1,40%	6,940	0,051	0,86%
s	0,910	0,011	80,52%	1,95%	5,043	0,012	0,30%
t	0,794	0,036	49,00%	4,00%	4,807	0,031	0,73%

Tabella 7: risultati del primo DOE mediati

Run			Acquisizioni				
			Scostamento max [mm]	Scostamento medio [mm]	% punti oltre 0,1 mm	Deviazione standard [mm]	Massa [g]
	a	$a1$	0,843	0,182	72,70%	0,114	4,76
		$a2$	0,938	0,246	78,76%	0,144	4,75
		$a3$	0,781	0,230	80,10%	0,132	4,78
	b	$b1$	0,841	0,196	76,89%	0,121	4,84
		$b2$	0,784	0,199	75,57%	0,120	4,85
		$b3$	0,726	0,184	75,57%	0,114	4,82
	c	$c1$	0,842	0,111	45,29%	0,085	4,64
		$c2$	0,657	0,115	47,24%	0,094	4,62
		$c3$	0,793	0,101	35,63%	0,097	4,65
	d	$d1$	1,100	0,284	81,16%	0,165	6,34
		$d2$	1,240	0,285	87,06%	0,142	6,36
		$d3$	1,190	0,270	79,98%	0,159	6,32
	e	$e1$	1,030	0,378	86,57%	0,200	6,01
		$e2$	1,140	0,293	79,98%	0,172	6,03
		$e3$	1,180	0,395	87,47%	0,206	6,06
	f	$f1$	0,832	0,184	77,98%	0,103	5,80
		$f2$	1,040	0,173	74,30%	0,109	5,85
		$f3$	1,050	0,180	76,42%	0,110	5,84
	g	$g1$	1,050	0,357	85,96%	0,202	7,56
		$g2$	1,210	0,367	85,88%	0,206	7,59
		$g3$	0,968	0,376	87,08%	0,210	7,62
	h	$h1$	1,370	0,303	86,16%	0,168	7,20
		$h2$	1,230	0,283	85,88%	0,155	7,21
		$h3$	1,270	0,281	83,77%	0,163	7,22
	i	$i1$	1,040	0,377	90,95%	0,193	6,95
		$i2$	1,080	0,380	90,53%	0,193	7,02
		$i3$	1,150	0,359	89,90%	0,187	7,02
	j	$j1$	0,866	0,264	79,01%	0,160	5,10
		$j2$	0,832	0,264	77,86%	0,156	5,02
		$j3$	0,815	0,252	78,20%	0,148	5,05
	k	$k1$	0,854	0,227	78,19%	0,137	4,76
		$k2$	0,645	0,164	70,72%	0,105	4,77
		$k3$	0,820	0,232	81,09%	0,133	4,77

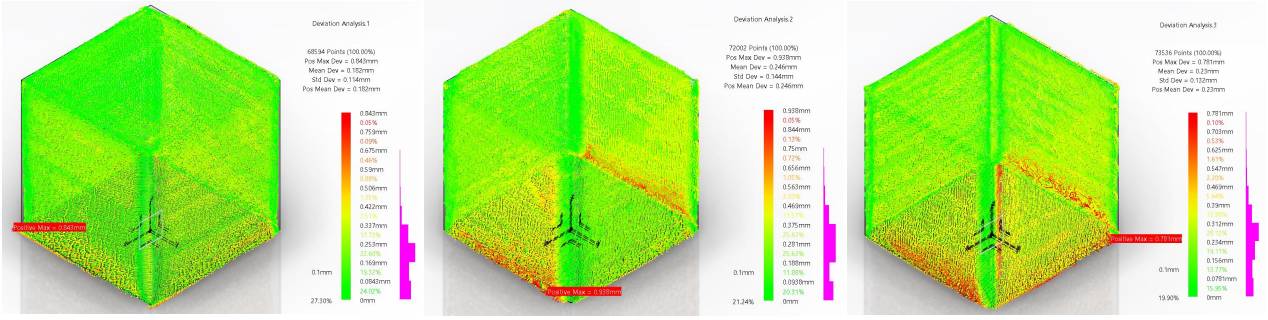
Tabella 8: risultati del primo DOE (parte 1)

Run			Acquisizioni				
			Scostamento max [mm]	Scostamento medio [mm]	% punti oltre 0,1 mm	Deviazione standard [mm]	Massa [g]
	l	$l1$	0,802	0,108	37,90%	0,097	4,62
		$l2$	0,774	0,103	37,74%	0,094	4,63
		$l3$	0,747	0,104	38,08%	0,092	4,69
	m	$m1$	1,140	0,293	83,09%	0,165	6,37
		$m2$	1,210	0,268	79,94%	0,156	6,35
		$m3$	1,160	0,271	80,93%	0,148	6,37
	n	$n1$	1,190	0,253	77,90%	0,149	6,10
		$n2$	1,010	0,247	77,94%	0,145	6,11
		$n3$	1,110	0,244	78,98%	0,140	6,11
	o	$o1$	0,869	0,336	83,84%	0,177	5,87
		$o2$	0,815	0,325	83,85%	0,171	5,87
		$o3$	0,890	0,310	85,01%	0,160	5,85
	p	$p1$	1,190	0,481	90,58%	0,243	7,56
		$p2$	1,140	0,507	91,53%	0,246	7,55
		$p3$	1,130	0,503	91,31%	0,238	7,52
	q	$q1$	1,290	0,281	85,04%	0,160	7,22
		$q2$	1,360	0,289	85,59%	0,161	7,20
		$q3$	1,230	0,282	84,31%	0,162	7,20
	r	$r1$	1,410	0,221	77,15%	0,155	7,01
		$r2$	1,330	0,233	79,19%	0,156	6,89
		$r3$	1,280	0,218	75,79%	0,151	6,92
	s	$s1$	0,925	0,303	83,24%	0,163	5,06
		$s2$	0,904	0,259	79,51%	0,150	5,04
		$s3$	0,900	0,275	78,80%	0,160	5,03
	t	$t1$	0,808	0,126	54,22%	0,087	4,78
		$t2$	0,830	0,118	48,30%	0,095	4,85
		$t3$	0,744	0,114	44,49%	0,092	4,79
	u	$u1$	0,625	0,137	66,72%	0,085	4,66
		$u2$	0,645	0,132	61,08%	0,090	4,64
		$u3$	0,590	0,137	62,88%	0,088	4,65
	v	$v1$	1,110	0,425	82,23%	0,242	6,32
		$v2$	1,040	0,451	83,98%	0,245	6,32
		$v3$	1,020	0,455	83,49%	0,249	6,32

Tabella 9: risultati del primo DOE (parte 2)

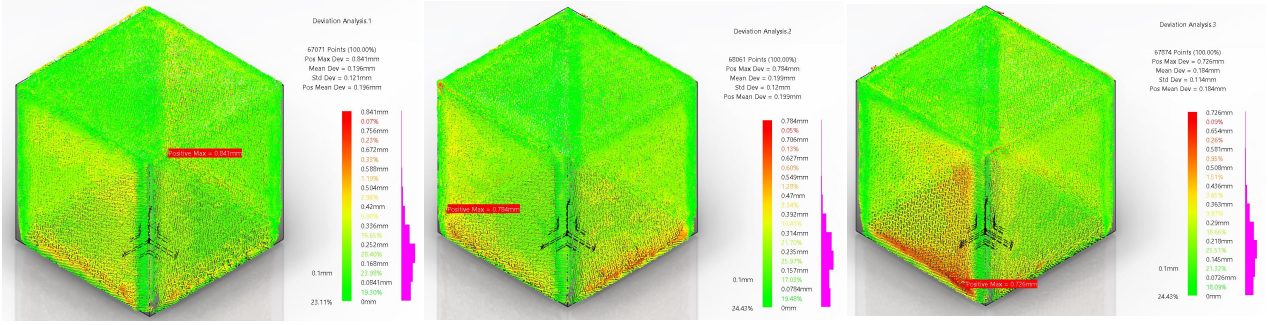
Run			Acquisizioni				
			Scostamento max [mm]	Scostamento medio [mm]	% punti oltre 0,1 mm	Deviazione standard [mm]	Massa [g]
Run	w	$w1$	1,270	0,254	80,18%	0,143	6,10
		$w2$	1,290	0,243	78,12%	0,142	6,07
		$w3$	1,100	0,248	80,01%	0,143	6,04
	x	$x1$	0,947	0,181	76,76%	0,102	5,87
		$x2$	1,030	0,214	79,89%	0,120	5,90
		$x3$	1,050	0,190	77,82%	0,105	5,88
	y	$y1$	1,150	0,339	86,16%	0,192	7,64
		$y2$	1,230	0,331	85,57%	0,190	7,62
		$y3$	1,130	0,322	86,04%	0,183	7,57
	z	$z1$	1,200	0,345	87,59%	0,182	7,18
		$z2$	1,090	0,397	88,16%	0,212	7,16
		$z3$	1,220	0,393	89,47%	0,204	7,19
	α	$\alpha1$	1,460	0,242	81,08%	0,158	6,96
		$\alpha2$	1,360	0,252	81,90%	0,160	6,96
		$\alpha3$	1,340	0,238	80,52%	0,161	6,99

Tabella 10: risultati del primo DOE (parte 3)



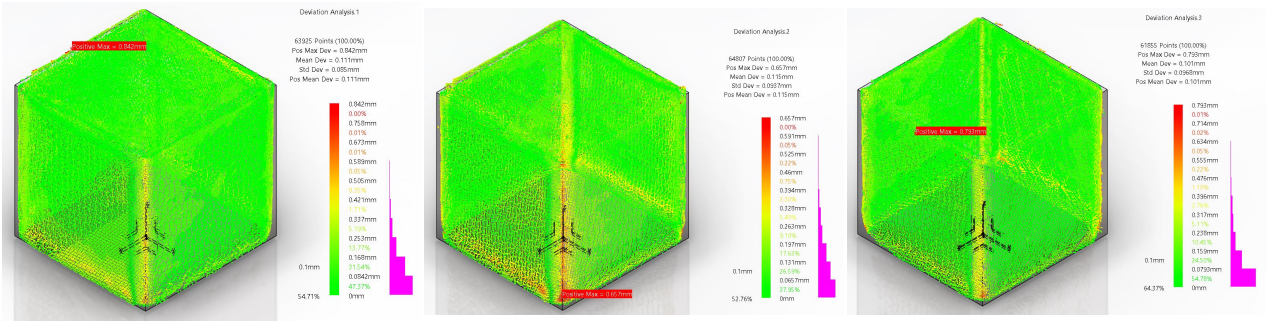
a1 *a2* *a3*

Run a)



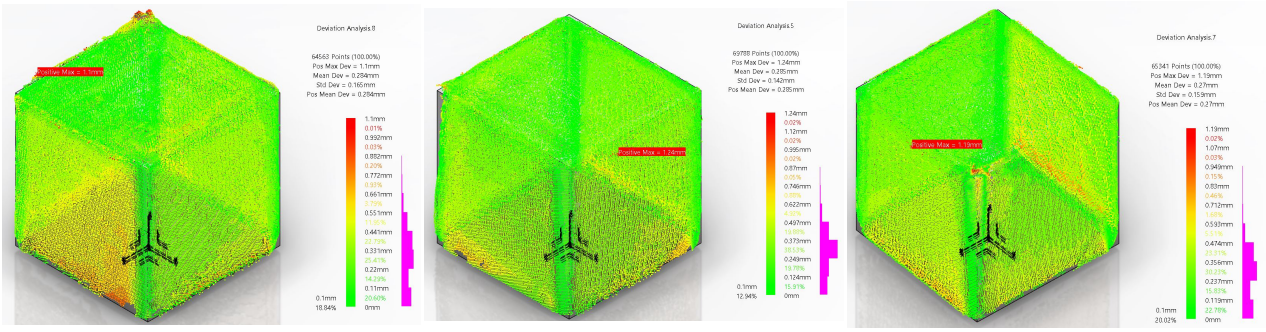
b1 *b2* *b3*

Run b)



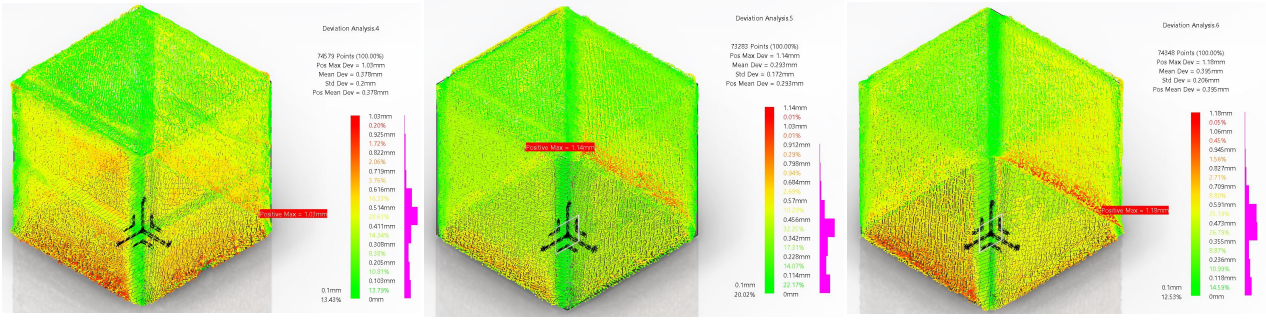
c1 *c2* *c3*

Run c)



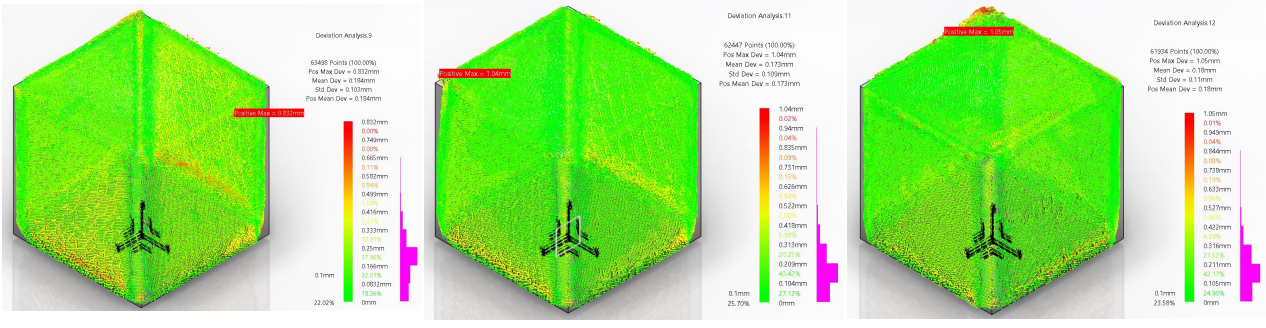
d1 *d2* *d3*

Run d)



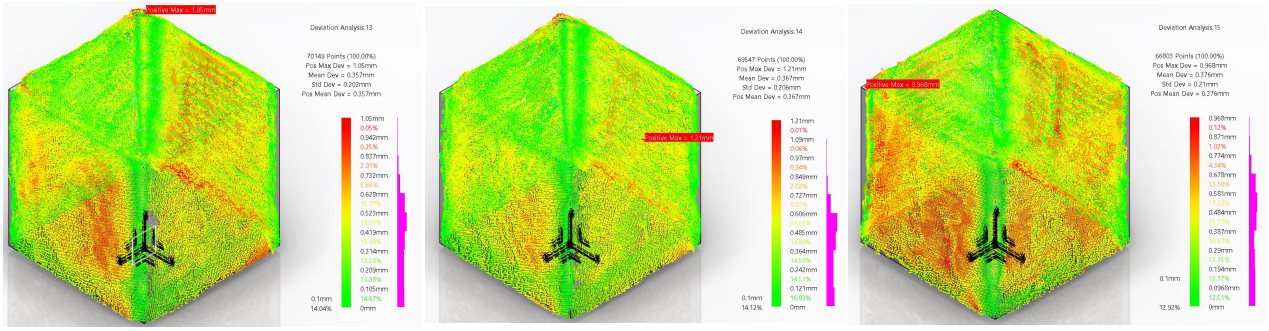
e1 *e2* *e3*

Run e)



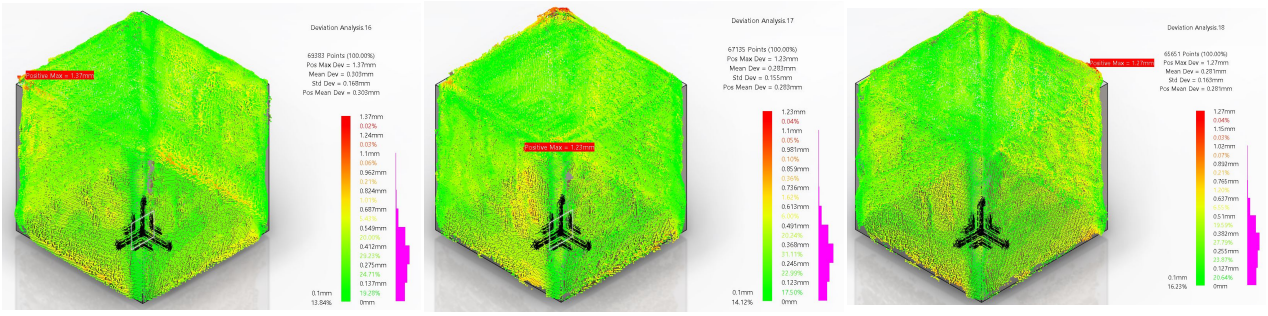
f1 *f2* *f3*

Run f)



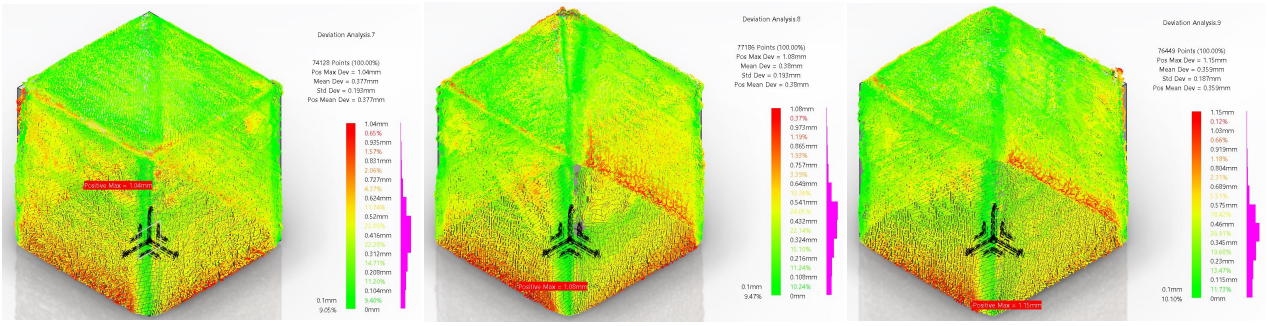
g1 *g2* *g3*

Run g)



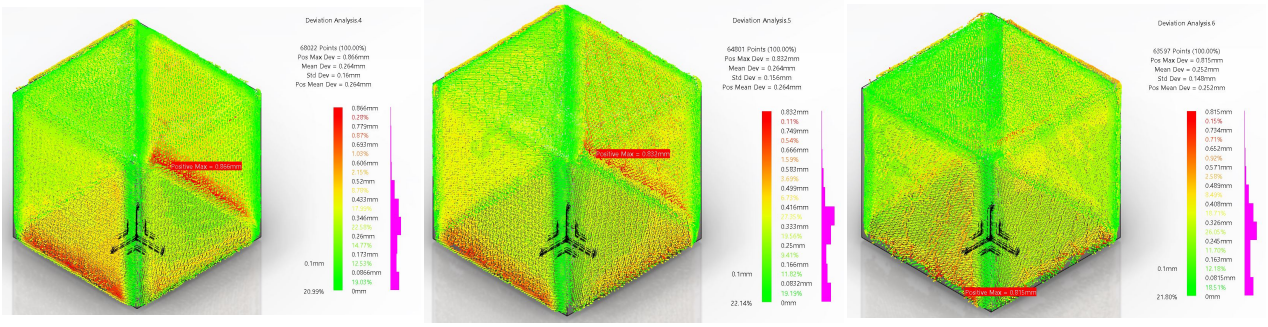
h1 *h2* *h3*

Run h)



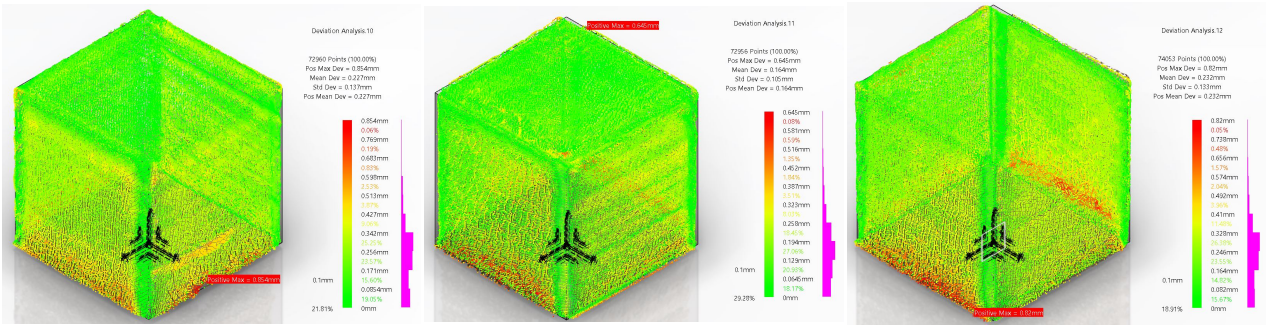
i1 *i2* *i3*

Run i)



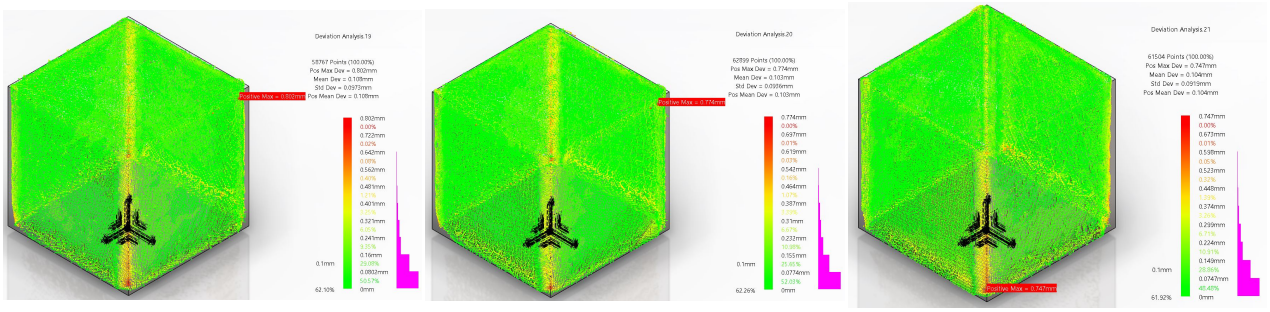
j1 *j2* *j3*

Run j)



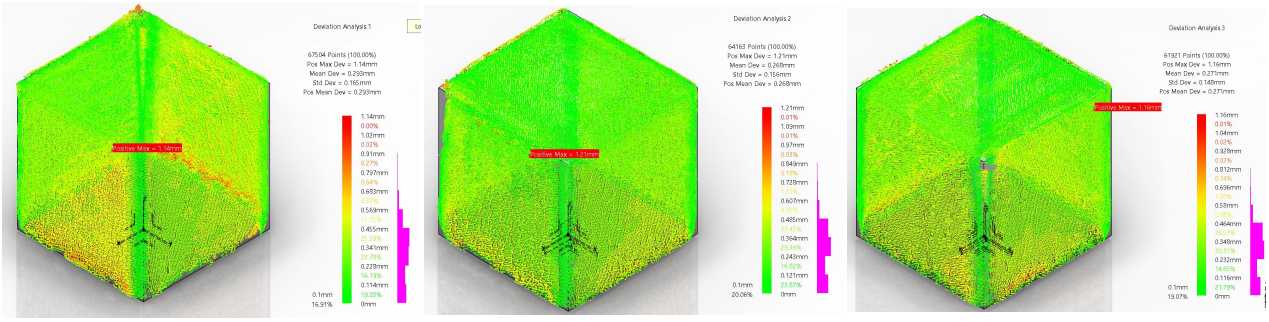
k1 *k2* *k3*

Run k)



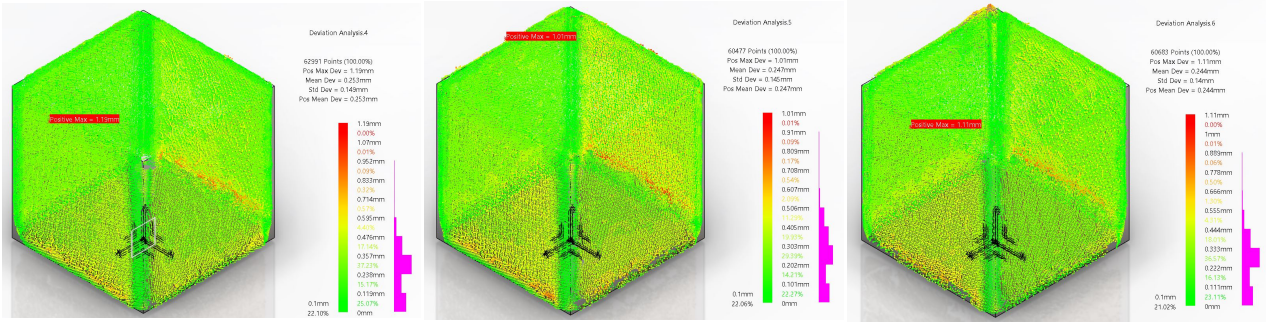
l1 *l2* *l3*

Run l)



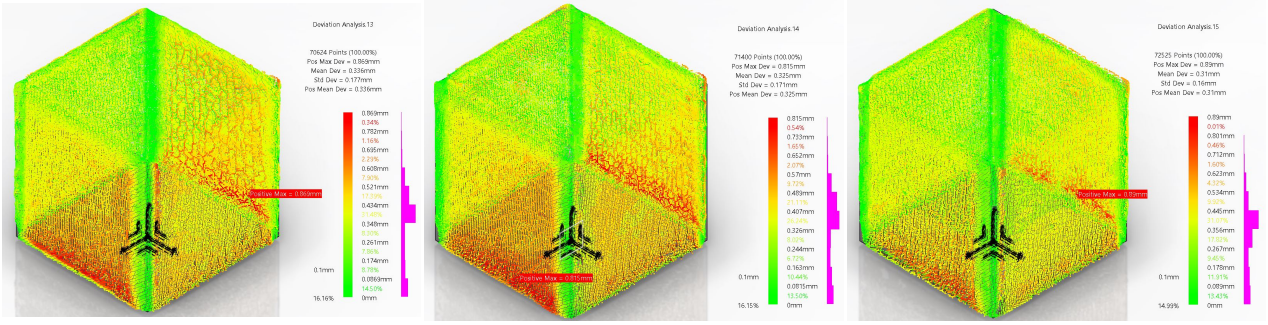
m1 *m2* *m3*

Run m)



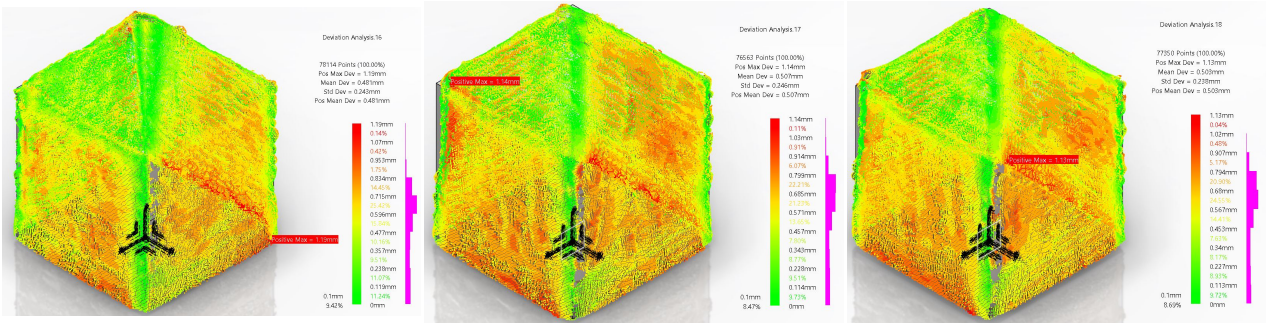
n1 *n2* *n3*

Run n)



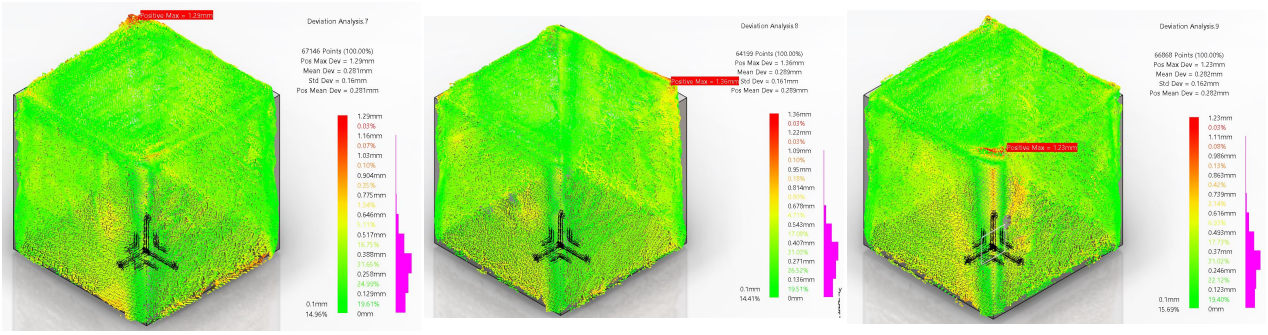
o1 *o2* *o3*

Run o)



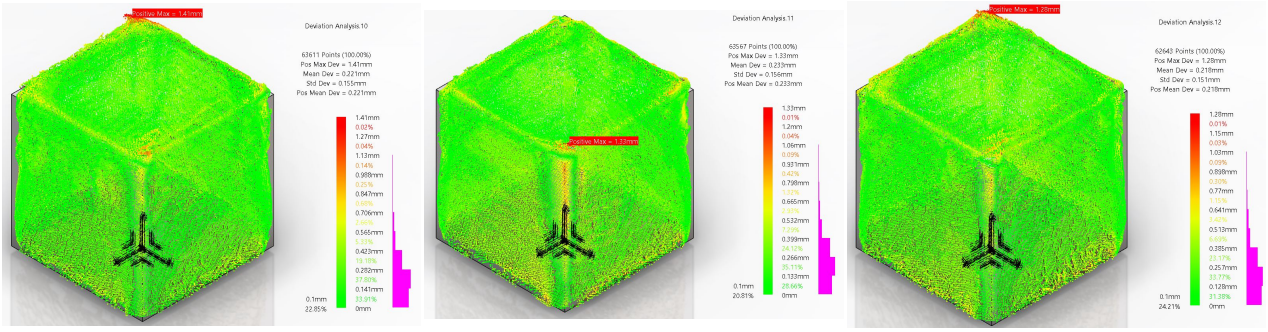
p1 *p2* *p3*

Run p)



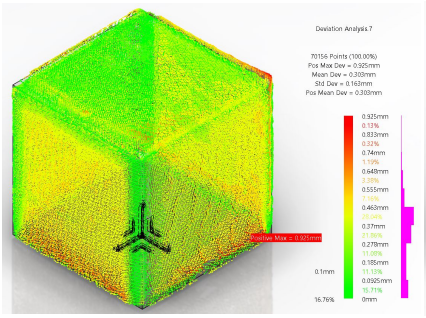
q1 *q2* *q3*

Run q)

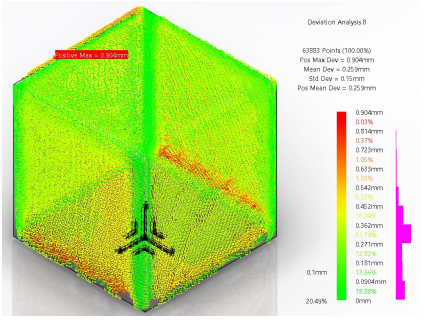


r1 *r2* *r3*

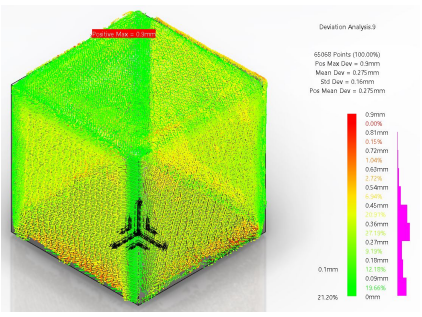
Run r)



s1

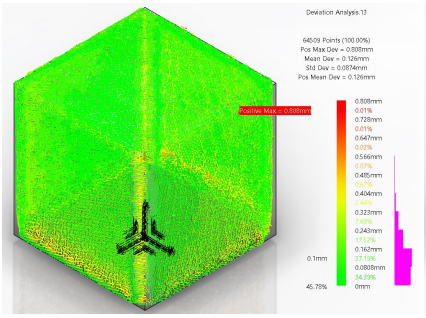


s2

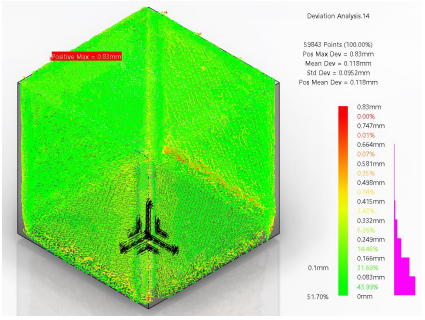


s3

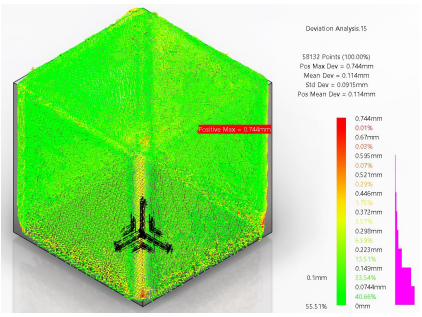
Run s)



t1

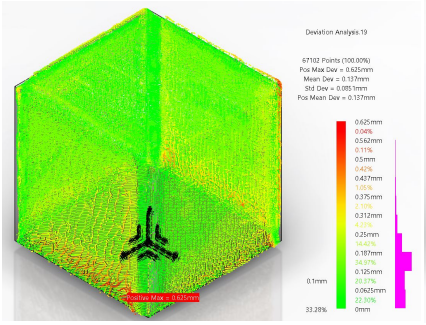


t2

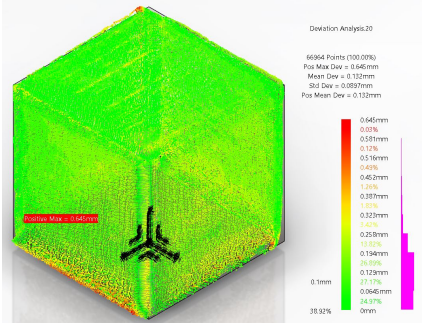


t3

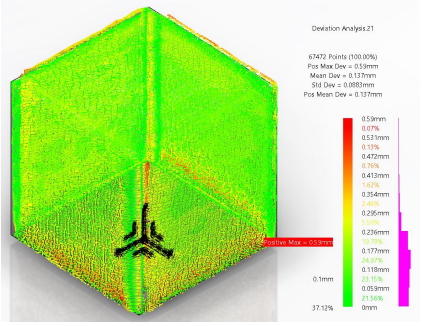
Run t)



u1

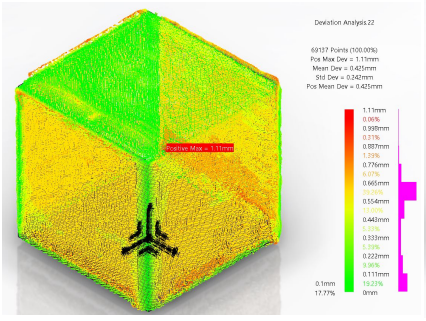


u2

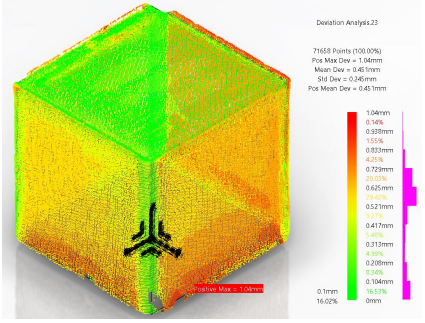


u3

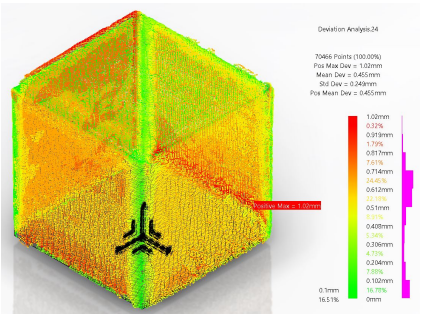
Run u)



v1

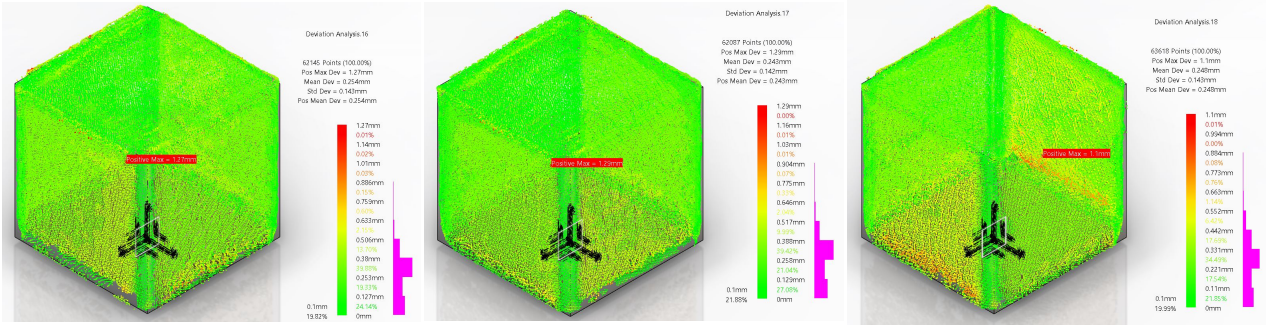


v2



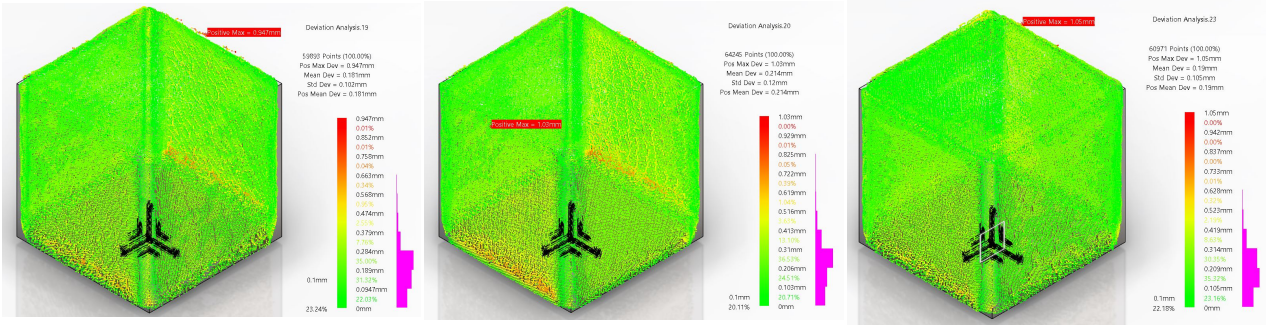
v3

Run v)



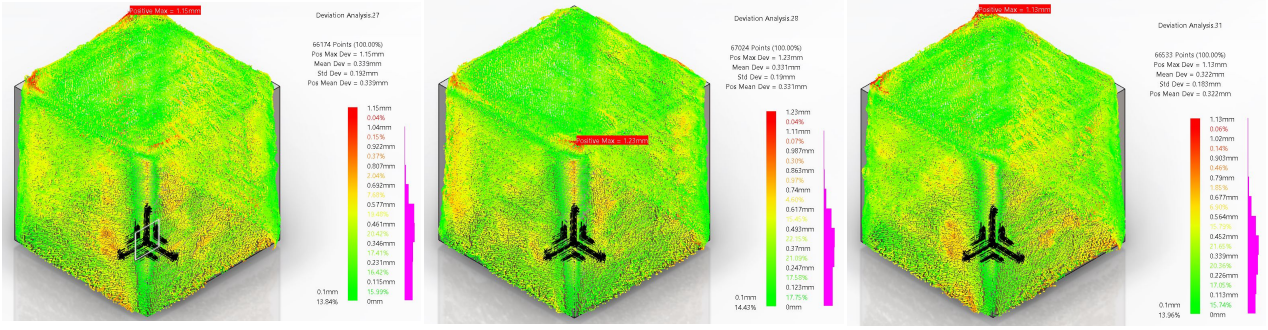
w1 *w2* *w3*

Run w)



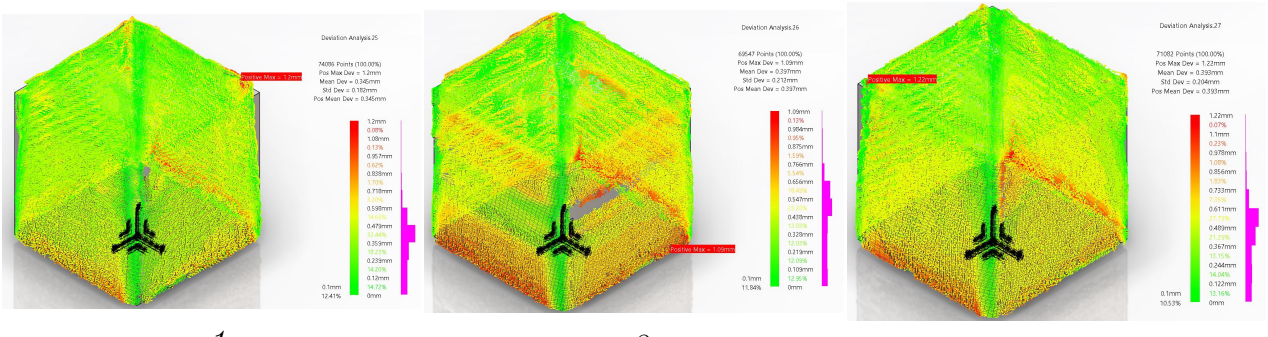
x1 *x2* *x3*

Run x)



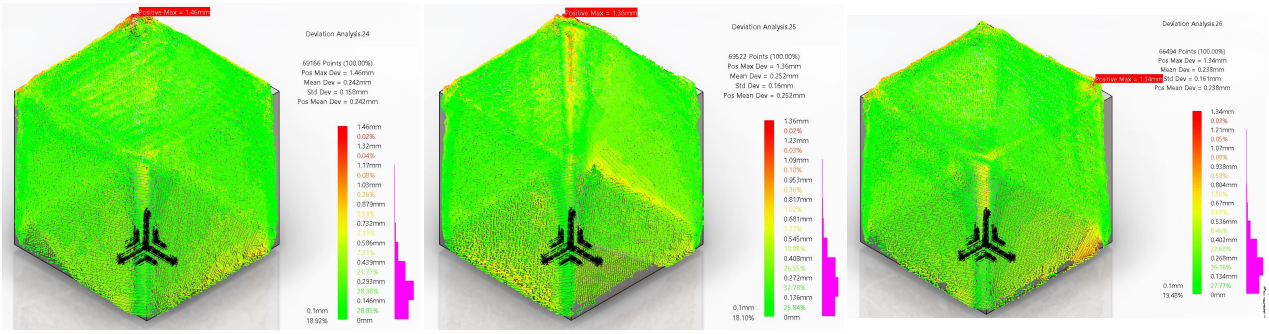
y1 *y2* *y3*

Run y)



z1 *z2* *z3*

Run z)



$\alpha 1$ $\alpha 2$ $\alpha 3$

Run α)

Si procede ora con la determinazione degli *effetti principali* Y dei singoli fattori sulle due risposte. Detta y_k la risposta in esame, ed i il livello del generico fattore j, si definisce *effetto principale* Y_k del fattore i al livello i-esimo sulla risposta y_k:

$$Y_k(i,j) = \frac{y_{k,a} + y_{k,b} + y_{k,c} + \dots}{n} \tag{3.1}$$

in cui

- $y_{k,u}$ indicano le risposte $k-$esime relative alle run $u-$esime in cui il fattore j si trova al livello i;
- n indica il numero di run in cui il fattore j si trova al livello i.

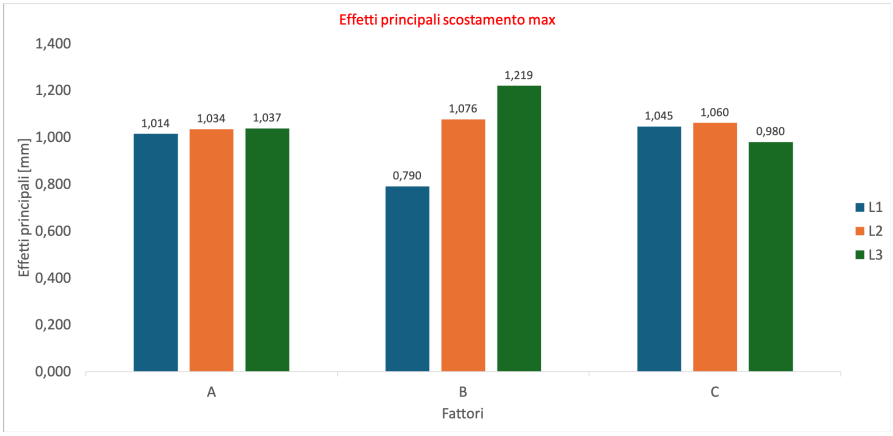
A titolo di esempio, l'effetto principale sullo scostamento massimo (uscita 1 del problema) della temperatura (che indicheremo come fattore A) al livello -1 si calcola come:

$$\begin{aligned} Y_1(-1,A) &= \frac{y_{1,a} + y_{1,b} + y_{1,c} + y_{1,d} + y_{1,e} + y_{1,f} + y_{1,g} + y_{1,h} + y_{1,i}}{9} \\ &= \frac{0,854 + 0,784 + 0,764 + 1,117 + 1,117 + 0,974 + 1,076 + 1,290 + 1,090}{9} \\ &= 1,014\text{mm} \end{aligned} \tag{3.2}$$

In Tabella sono riportati i valori relativi agli effetti principali sullo scostamento massimo (Y_1) e sulla percentuale di punti la cui distanza dalla superficie del modello nominale eccede 0,1 mm (Y_2).

$Y_1(-1,A)$	1,014 mm	$Y_2(-1,A)$	77,95%
$Y_1(-1,B)$	0,790 mm	$Y_2(-1,B)$	64,66%
$Y_1(-1,C)$	1,045 mm	$Y_2(-1,C)$	82,97%
$Y_1(0,A)$	1,034 mm	$Y_2(0,A)$	76,69%
$Y_1(0,B)$	1,076 mm	$Y_2(0,B)$	80,92%
$Y_1(0,C)$	1,060 mm	$Y_2(0,C)$	78,08%
$Y_1(1,A)$	1,037 mm	$Y_2(1,A)$	76,60%
$Y_1(1,B)$	1,219 mm	$Y_2(1,B)$	85,67%
$Y_1(1,C)$	0,980 mm	$Y_2(1,C)$	70,20%

Tabella 11: effetti principali sullo scostamento massimo (rosso) e sulla percentuale dei punti (blu)



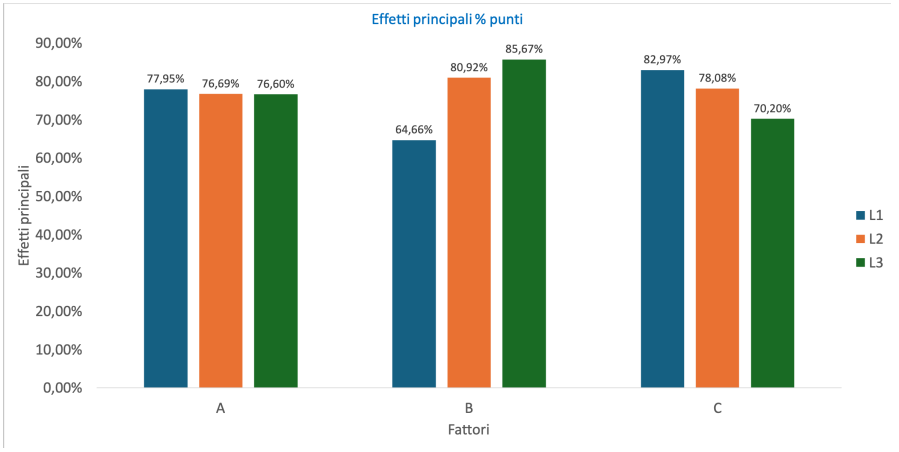
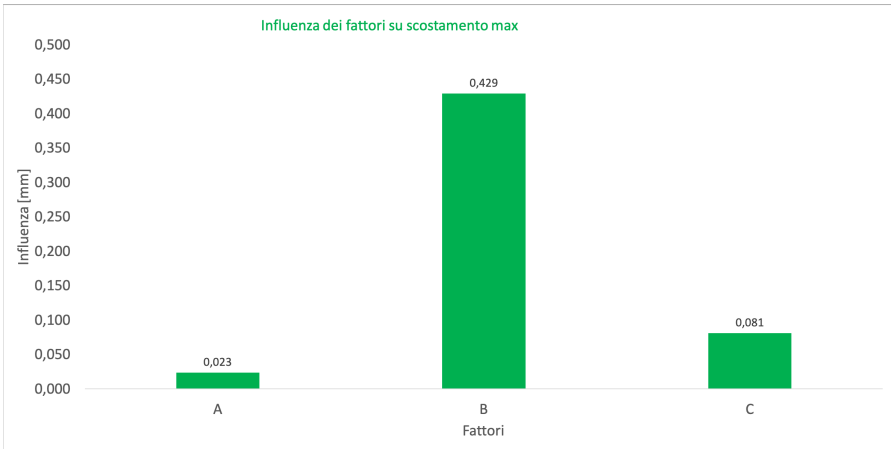


Figura 43: istogrammi relativi agli effetti principali



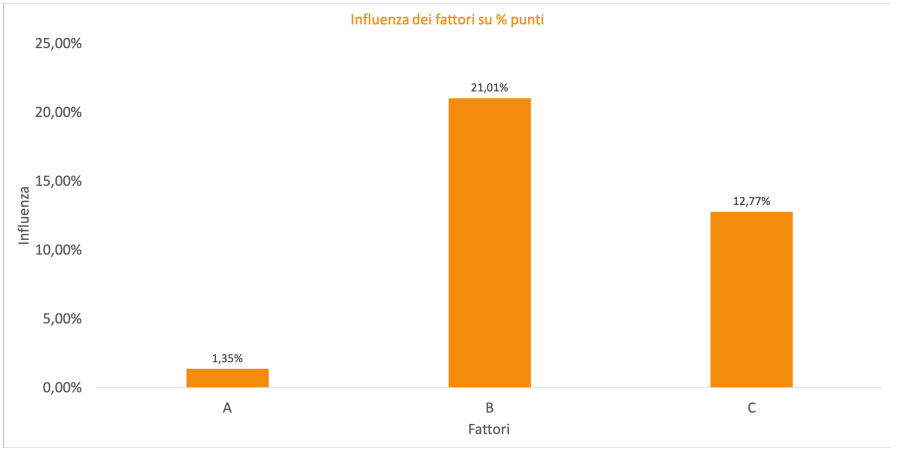


Figura 44: istogrammi relativi all'influenza dei vari fattori

I dati raccolti sono stati successivamente raccolti negli istogrammi di Figura 42. Per stabilire l'effettiva influenza che il singolo fattore j ha sull'uscita $k-$esima si impiega il *parametro di influenza* Δj: quest'ultimo è definito come la differenza tra l'effetto massimo e quello minimo del fattore j sull'uscita k:

$$\Delta j_k = Y_k(i,j)|_{max} - Y_k(i,j)|_{min} \tag{3.3}$$

In Figura 44 sono rappresentati gli istogrammi che riportano l'influenza dei tre fattori sulle due uscite del problema.

	scostamento max	% punti
ΔA	0,023 mm	1,31%
ΔB	0,429 mm	21,01%
ΔC	0,081 mm	12,77%

Tabella 12: influenza dei fattori sullo scostamento massimo (rosso) e sulla percentuale dei punti (blu)

Negli istogrammi riportati nelle Figure 43 e 44 sono stati indicati con A, B e C, rispettivamente, la temperatura di estrusione, il flow rate e la line distance. Come si evince il fattore che esercita l'influenza maggiore su entrambe le uscite del processo è indubbiamente il *flow rate*, mentre la temperatura sembrerebbe non avere quasi alcun tipo di influenza.
Nel seguito si vuole determinare se tra i vari fattori sono presenti delle *interazioni* apprezzabili: per fare ciò è necessario valutare il comportamento delle uscite studiando come variano i fattori presi due a due.
Per la combinazione di fattori *temperatura 200°C - flow rate 80%*, ad esempio, il valore dell'uscita deve essere preso come media tra i valori corrispondenti a tutte le run in cui $T = 200°C$ e $f_r = 0,8$ (run a, b e c):

$$\begin{aligned} y_1|_{T=200°C,\, f_r=0,8} &= \frac{y_1|_{run\,a} + y_1|_{run\,b} + y_1|_{run\,c}}{3} = \frac{0,854 + 0,784 + 0,764}{3} \\ &= 0,801 \text{ mm} \\ y_2|_{T=200°C,\, f_r=0,8} &= \frac{y_2|_{run\,a} + y_2|_{run\,b} + y_2|_{run\,c}}{3} = \frac{77,19\% + 76,01\% + 42,72\%}{3} \\ &= 65,31\% \end{aligned} \tag{3.4}$$

Di seguito sono riportati i valori in tabelle a doppia entrata per ogni coppia di fattori: i valori in rosso sono riferiti allo scostamento massimo (espresso in millimetri), mentre quelli in blu alla percentuale dei punti della superficie dei provini. La raccolta di dati è accompagnata, per ciascuna coppia di fattori, da grafici a linee (Figure 45, 46 e 47).

Interazione temperatura - flow rate

Temperatura \ Flow rate	80%	100%	120%
$200°C$	$0,801$ mm	$1,089$ mm	$1,152$ mm
$210°C$	$0,795$ mm	$1,044$ mm	$1,262$ mm
$220°C$	$0,775$ mm	$1,095$ mm	$1,242$ mm

Temperatura \ Flow rate	80%	100%	120%
$200°C$	$65,31\%$	$81,21\%$	$87,35\%$
$210°C$	$64,31\%$	$81,28\%$	$84,50\%$
$220°C$	$64,36\%$	$80,28\%$	$85,17\%$

Tabelle 13 e 14: Interazione temperatura - flow rate per lo scostamento massimo (rosso) e per la percentuale dei punti (blu)

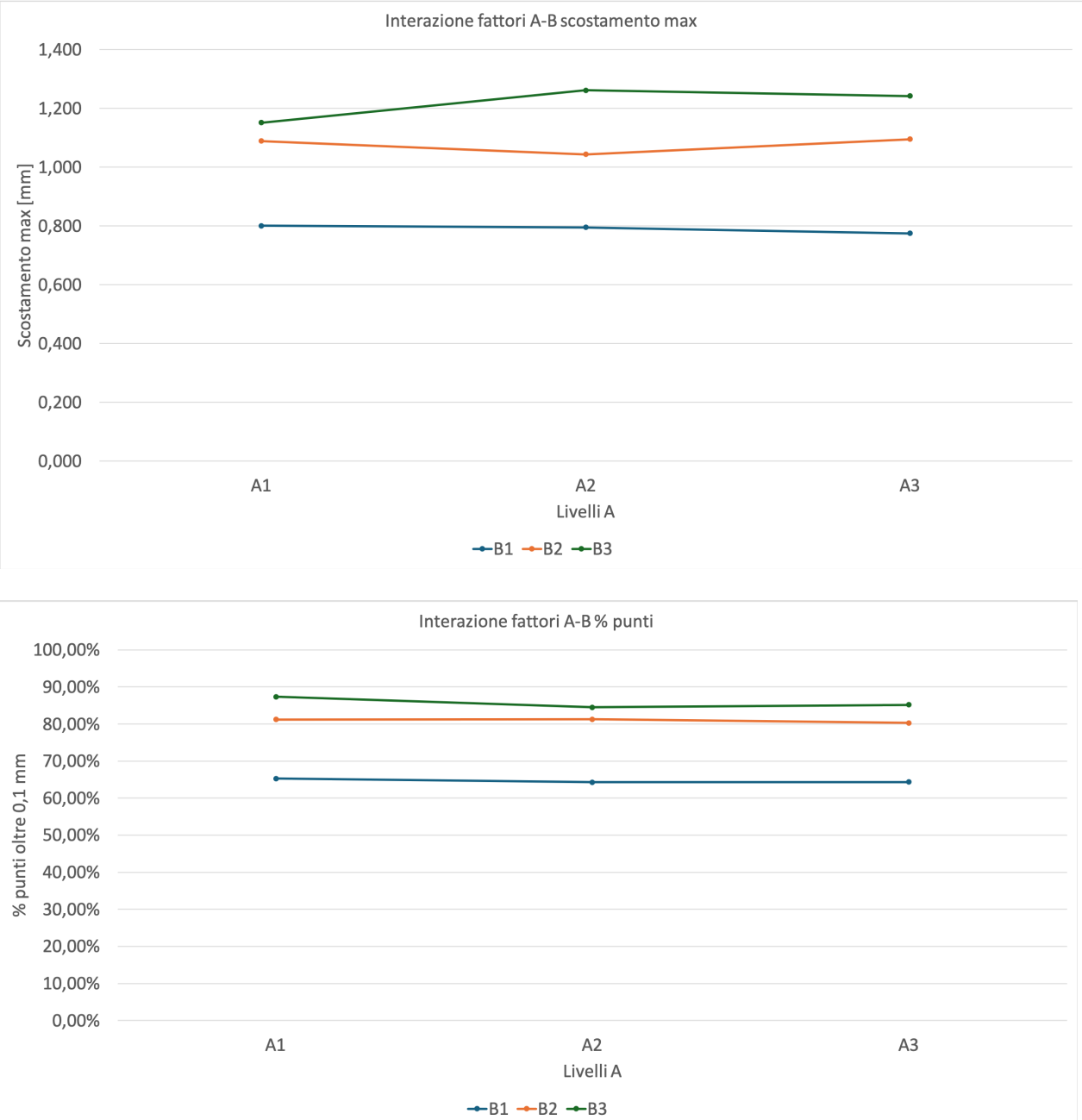


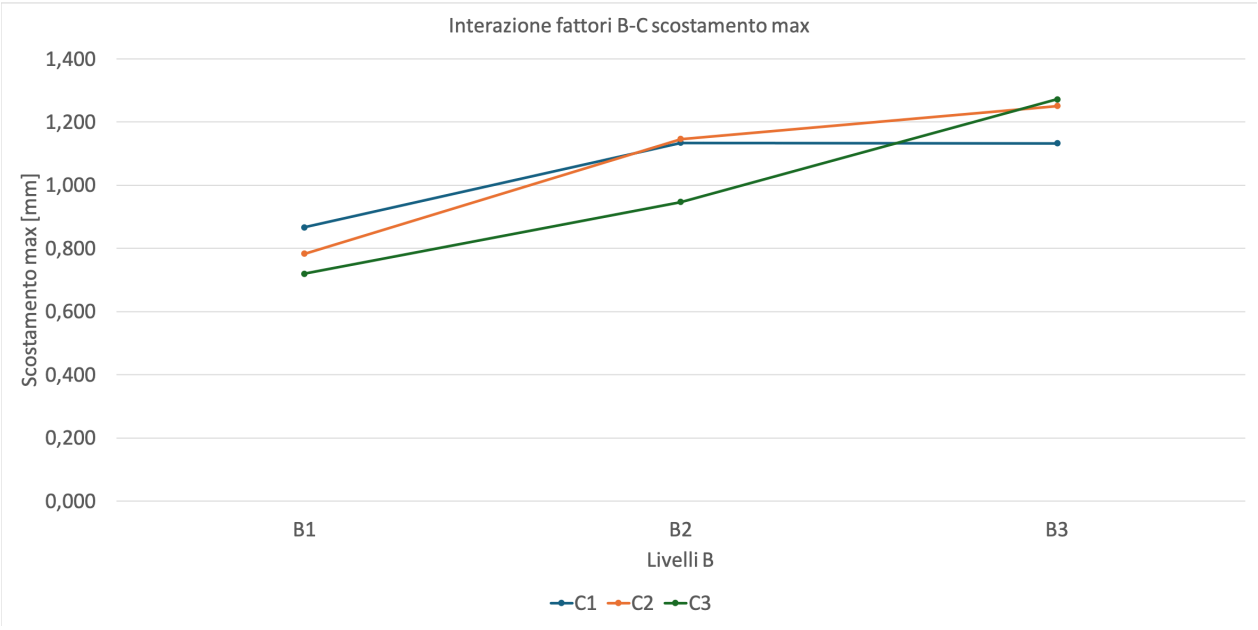
Figura 45: diagramma a linee che riporta le interazioni tra i fattori A e B

Interazione flow rate - line distance

Flow rate \ Line distance	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm
80%	0,867 mm	0,784 mm	0,719 mm
100%	1,134 mm	1,147 mm	0,947 mm
120%	1,133 mm	1,251 mm	1,272 mm

Flow rate \ Line distance	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm
80%	78,69%	67,23%	48,06%
100%	82,43%	80,79%	79,54%
120%	87,79%	86,22%	83,00%

Tabelle 15 e 16: Interazione flow rate - line distance per lo scostamento massimo (rosso) e per la percentuale dei punti (blu)



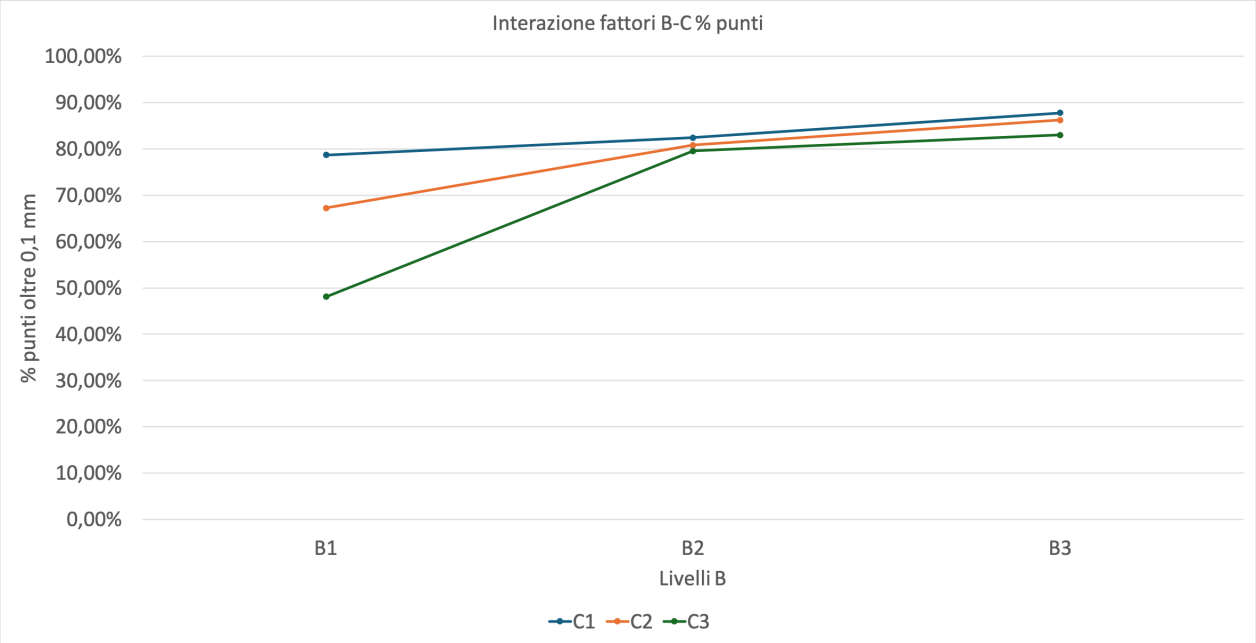


Figura 46: diagramma a linee che riporta le interazioni tra i fattori B e C

Interazione temperatura - line distance

Temperatura \ Line distance	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm
200°C	1,036 mm	1,063 mm	0,943 mm
210°C	1,054 mm	1,057 mm	0,991 mm
220°C	1,045 mm	1,061 mm	1,005 mm

Temperatura \ Line distance	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm
200°C	82,08%	81,98%	69,80%
210°C	83,61%	79,97%	66,51%
220°C	83,22%	72,28%	74,29%

Tabelle 17 e 18: Interazione temperatura - line distance per lo scostamento massimo (rosso) e per la percentuale dei punti (blu)

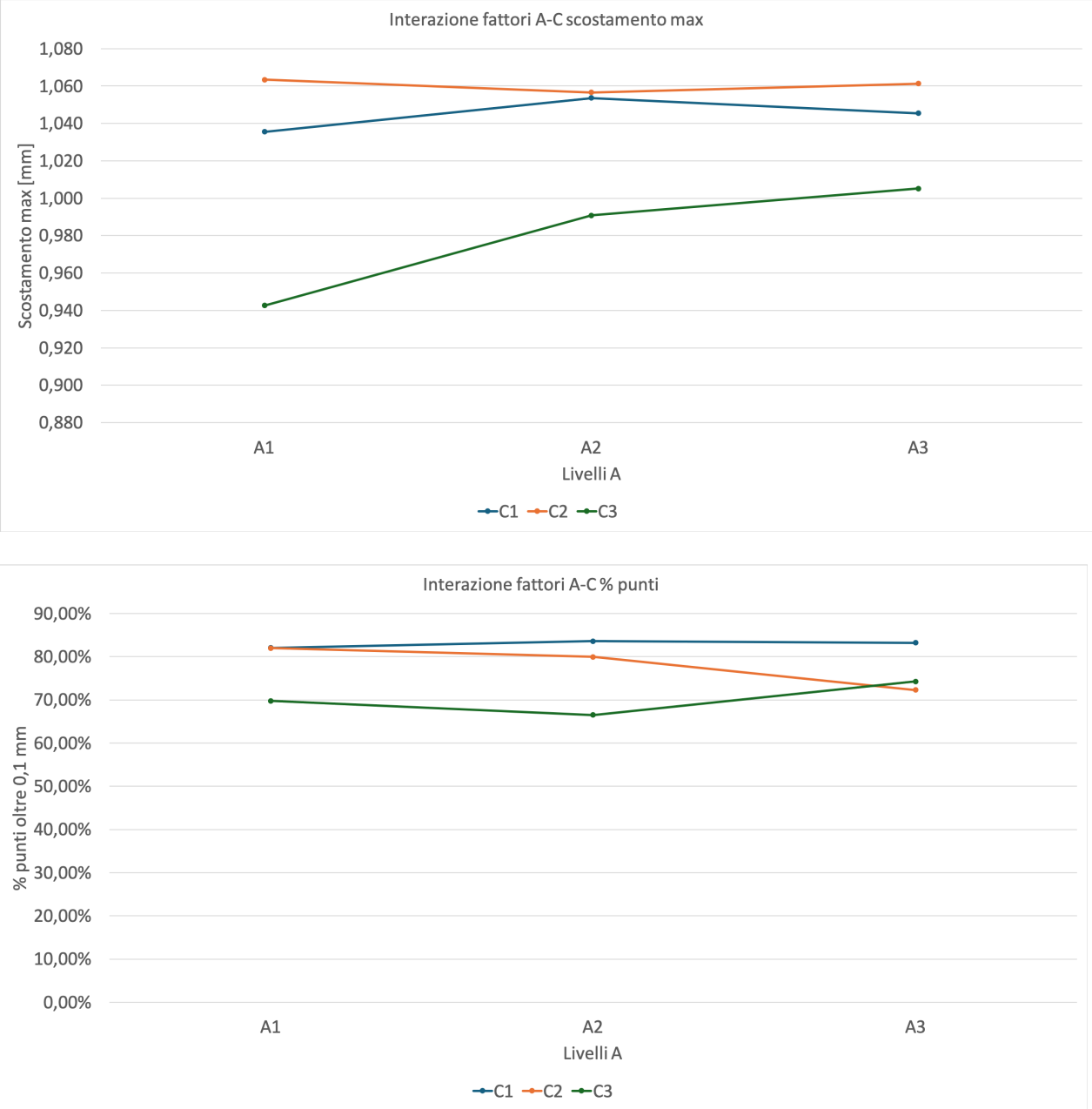


Figura 47: diagramma a linee che riporta le interazioni tra i fattori A e C

Dai grafici sopra riportati si evince che:

- tra i fattori A e B non vi è alcun tipo di interazione: le linee dei grafici, infatti, sono praticamente parallele tra di loro;
- tra i fattori B e C vi è un'interazione marcata: osservando il grafico relativo allo scostamento massimo, infatti, è evidente che
  - lavorando con bassi valori del flow rate (B1) conviene impiegare una line distance elevata (C3) per minimizzare lo scostamento massimo;
  - lavorando invece con elevati valori del flow rate (B3), per minimizzare lo scostamento massimo occorre depositare il materiale con un valore della line distance corrispondente al livello più basso (C1);
- tra i fattori A e C potrebbe esserci un'interazione: nel grafico che riporta lo scostamento massimo, infatti, la retta verde e quella arancione si intersecano. Tuttavia, considerando la scala di misura sull'asse delle ordinate e la pendenza poco marcata di tali rette, si può concludere che l'interazione tra i fattori A e C non comporta effetti apprezzabili sulle uscite y_1 e y_2.

3.2 Modello di regressione

Come detto in precedenza, lo step successivo consiste nella creazione di un *modello di regressione*. Si è deciso di impiegare un modello del secondo ordine che tenga conto delle interazioni tra i fattori presi due a due. Detti

$$\begin{aligned} x_1 &\implies \text{temperatura} \\ x_2 &\implies \text{flow rate} \\ x_1 &\implies \text{line distance} \end{aligned} \tag{3.5}$$

i modelli di regressione relativi alle due uscite del problema saranno del tipo

$$\hat{y}_1 = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_4 x_1^2 + \alpha_5 x_2^2 + \alpha_6 x_3^2 + \alpha_7 x_1 x_2 + \alpha_8 x_2 x_3 + \alpha_9 x_1 x_3$$

$$\hat{y}_2 = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_1^2 + \beta_5 x_2^2 + \beta_6 x_3^2 + \beta_7 x_1 x_2 + \beta_8 x_2 x_3 + \beta_9 x_1 x_3$$

dove i coefficienti α e β sono i *coefficienti di regressione* da determinare. Un metodo frequentemente impiegato per la determinazione di tali coefficienti è il *metodo dei minimi quadrati.*
Ciascuna uscita y_i del problema può essere scritta come

$$\begin{aligned} y_i &= \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + ... + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \\ &= \beta_0 + \sum_{j=1}^{k} \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i \qquad , \qquad i = 1, ..., n \end{aligned} \tag{3.6}$$

Il metodo dei minimi quadrati consiste nel scegliere i coefficienti β_j che compaiono nella precedente equazione in maniera tale da minimizzare la somma dei quadrati degli errori ε_i; a tal proposito si introduce la funzione

$$L = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^{k} \beta_j x_{ij} \right)^2 \tag{3.7}$$

Il metodo dei minimi quadrati consiste nel minimizzare la funzione L rispetto ai coefficienti $\beta_0, \beta_1, ..., \beta_k$. Il vettore

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 & \hat{\beta}_1 & \dots & \hat{\beta}_k \end{bmatrix}^T \tag{3.8}$$

contiene i coefficienti β_i $(i = 0, 1, ..., k)$ che minimizzano L se e soltanto se

$$\begin{cases} \left. \dfrac{\partial L}{\partial \beta_0} \right|_{(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, ..., \hat{\beta}_k)} &= -2 \displaystyle\sum_{i=1}^{n} \left(y_i - \hat{\beta}_0 - \sum_{j=1}^{k} \hat{\beta}_j x_{ij} \right) = 0 \\ \left. \dfrac{\partial L}{\partial \beta_0} \right|_{(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, ..., \hat{\beta}_k)} &= -2 \displaystyle\sum_{i=1}^{n} \left(y_i - \hat{\beta}_0 - \sum_{j=1}^{k} \hat{\beta}_j x_{ij} \right) x_{ij} = 0 \end{cases} \tag{3.9}$$

per $j = 1, 2, ..., k$. Semplificando:

$$\begin{aligned} n\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^{n} x_{i1} + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^{n} x_{i2} + \cdots + \hat{\beta}_k \sum_{i=1}^{n} x_{ik} &= \sum_{i=1}^{n} y_i \\ \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^{n} x_{i1} + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^{n} x_{i1}^2 + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^{n} x_{i1}x_{i2} + \cdots + \hat{\beta}_k \sum_{i=1}^{n} x_{i1}x_{ik} &= \sum_{i=1}^{n} x_{i1} y_i \\ &\vdots \\ \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^{n} x_{ik} + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^{n} x_{ik}x_{i1} + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^{n} x_{ik}x_{i2} + \cdots + \hat{\beta}_k \sum_{i=1}^{n} x_{ik}^2 &= \sum_{i=1}^{n} x_{ik} y_i \end{aligned} \tag{3.10}$$

La (3.10) è nota come *equazione ai minimi quadrati in forma normale*: la soluzione di tale equazione contiene gli stimatori dei coefficienti $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, ..., \hat{\beta}_k$. Indicando con

$$\boldsymbol{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \; X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}, \; \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}, \; \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

è possibile riscrivere la (3.6) in forma vettoriale:

$$\boldsymbol{y} = X\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \tag{3.11}$$

La funzione L allora può riscriversi

$$\begin{aligned} L &= \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{\varepsilon}_i^2 = \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\varepsilon} = (\boldsymbol{y} - X\boldsymbol{\beta})^T (\boldsymbol{y} - X\boldsymbol{\beta}) \\ &= \boldsymbol{y}^T\boldsymbol{y} - \boldsymbol{\beta}^T X^T \boldsymbol{y} - \boldsymbol{y}^T X\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\beta}^T X^T X\boldsymbol{\beta} = \boldsymbol{y}^T\boldsymbol{y} - 2\boldsymbol{\beta}^T X^T \boldsymbol{y} + \boldsymbol{\beta}^T X^T X\boldsymbol{\beta} \end{aligned}$$

Poichè il termine $\boldsymbol{\beta}^T X^T \boldsymbol{y}$ è una quantità scalare, questa coinciderà con la sua trasposta $(\boldsymbol{\beta}^T X^T \boldsymbol{y})^T = \boldsymbol{y}^T X\boldsymbol{\beta}$, pertanto gli stimatori dei minimi quadrati $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, ..., \hat{\beta}_k$ devono soddisfare la relazione

$$-2X^T\boldsymbol{y} + 2X^T X\hat{\boldsymbol{\beta}} = \boldsymbol{0} \quad \Longrightarrow \quad X^T X\hat{\boldsymbol{\beta}} = X^T\boldsymbol{y} \tag{3.12}$$

Moltiplicando infine entrambi i membri per l'inversa $\left(X^T X\right)^{-1}$ si trova il vettore $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ avente per componenti i coefficienti di regressione :

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (X^T X)^{-1} X^T \boldsymbol{y} \tag{3.13}$$

Il modello di regressione relativo al presente caso di studio diventa allora

$$\hat{\boldsymbol{y}} = X\hat{\boldsymbol{\beta}} \tag{3.14}$$

Indicando con $\hat{y_1}$ il modello di regressione relativo allo scostamento massimo e con $\hat{y_2}$ quello relativo alla percentuale di punti, si è proceduto ad mplementare il problema in Matlab, trovando i seguenti coefficienti:

$$\boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \\ \alpha_7 \\ \alpha_8 \\ \alpha_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,120472222937205 \\ 0,011630555563225 \\ -0,553749999974821 \\ -0,903888888886093 \\ -0.000078333333363 \\ -1,791666666669054 \\ -4,816666666656561 \\ 0,014541666666601 \\ 3,591666666666513 \\ 0,013166666666628 \end{bmatrix} \tag{3.15}$$

$$\boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \\ \beta_6 \\ \beta_7 \\ \beta_8 \\ \beta_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 407,4542591225838 \\ -2,8608333320374 \\ 178,8250000070471 \\ -383,1999999821881 \\ 0,0058222222184 \\ 143,8611111115495 \\ -149,4444444488634 \\ -0,1541666666915 \\ 322,9999999992192 \\ 0,8366666666131 \end{bmatrix} \tag{3.16}$$

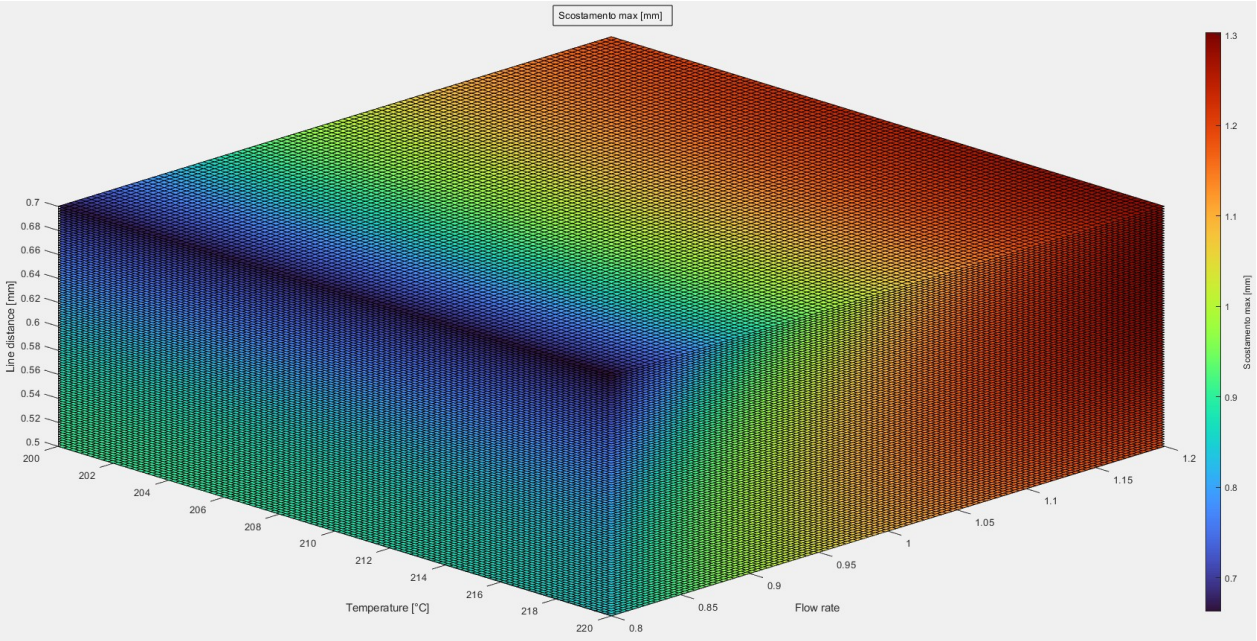


Figura 48: modello di regressione relativo all'uscita y_1

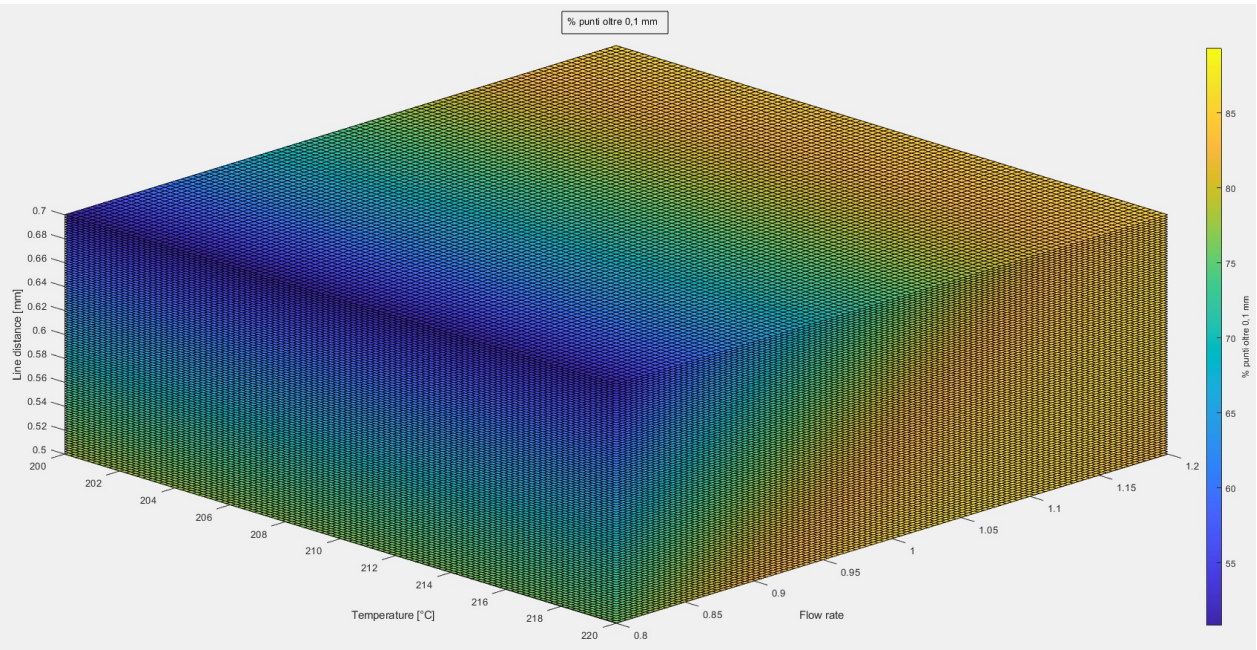


Figura 49: modello di regressione relativo all'uscita y_2

Si osservi che, per entrambi i modelli, il coefficiente relativo al termine x_{23} è molto maggiore dei coefficienti relativi ai termini x_{12} e x_{13}: ciò conferma il fatto che tra i fattori B e C esiste un'interazione forte, mentre le interazioni tra i fattori A-B e A-C sono praticamente trascurabili.
In alto (Figure 48 e 49) sono riportati graficamente i due modelli di regressione appena trovati.
Analizzando attentamente i grafici si evince che per entrambe le uscite del problema la soluzione ottima si ottiene per

- bassi valori del flow rate;

- alti valori della line distance;

a prescindere dalla temperatura di estrusione scelta all'interno dell'intervallo $T_{ext} = 200 \div 220°C$.
Si è deciso di approfondire l'indagine con un secondo DOE, i cui risultati verranno mostrati e discussi nel paragrafo successivo.

3.3 Risultati del secondo DOE e relativo modello di regressione

Il secondo DOE è stato condotto unicamente su due fattori: come visto in precedenza, infatti, l'influenza della temperatura sembra essere trascurabile nell'intorno $T_{ext} = 200 \div 220°C$. Si è scelto allora un valore fisso della temperatura (ovvero il valore centrale dell'intervallo considerato in precedenza, $T_{ext} = 210°C$) e si sono fatti variare unicamente flow rate e line distance; il secondo DOE oggetto di indagine è quindi un *full factorial* 3^2 *a 2 fattori e 3 livelli*, schematizzati nella Tabella 19. Nelle pagine seguenti vengono riportate le deviation analysis e le Tabelle contenenti i risultati.

		Fattori	
		Flow rate [%]	Line distance [mm]
Livelli	-1	70%	0,65
	0	75%	0,7
	1	80%	0,75

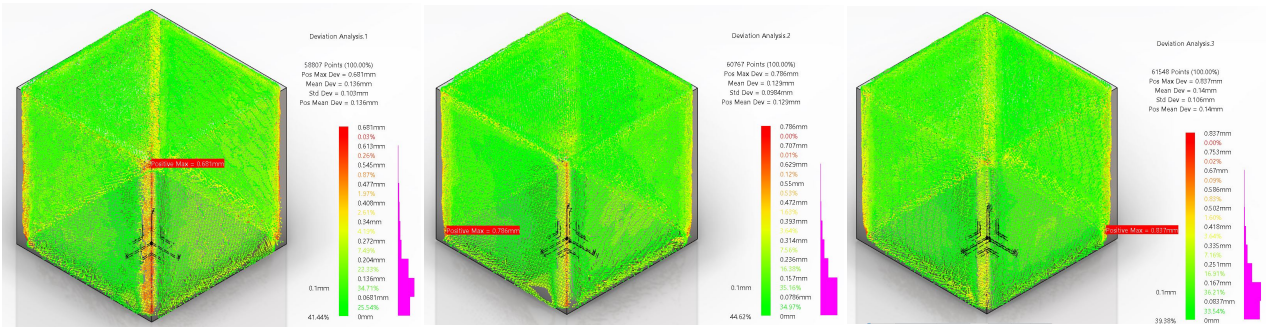
Tabella 19: fattori e corrispondenti livelli del secondo DOE

Run	Scostamento max medio [mm]	Deviazione standard [mm]	% punti media oltre 0,1 mm	Deviazione standard	Massa media [g]	Deviazione standard [g]	Errore % max
β	0,768	0,065	58,19%	2,16%	4,120	0,014	0,36%
γ	0,848	0,063	71,08%	5,12%	4,067	0,017	0,49%
δ	0,813	0,034	78,36%	1,02%	3,997	0,012	0,38%
ε	0,729	0,035	38,15%	1,44%	4,453	0,039	0,67%
φ	0,800	0,039	63,60%	3,70%	4,313	0,012	0,35%
η	0,776	0,056	70,57%	3,56%	4,280	0,016	0,47%
θ	0,683	0,043	35,52%	1,43%	4,657	0,041	0,75%
τ	0,774	0,022	37,91%	0,14%	4,647	0,031	0,75%
ρ	0,741	0,011	61,05%	2,16%	4,533	0,021	0,55%

Tabella 20: risultati del secondo DOE mediati

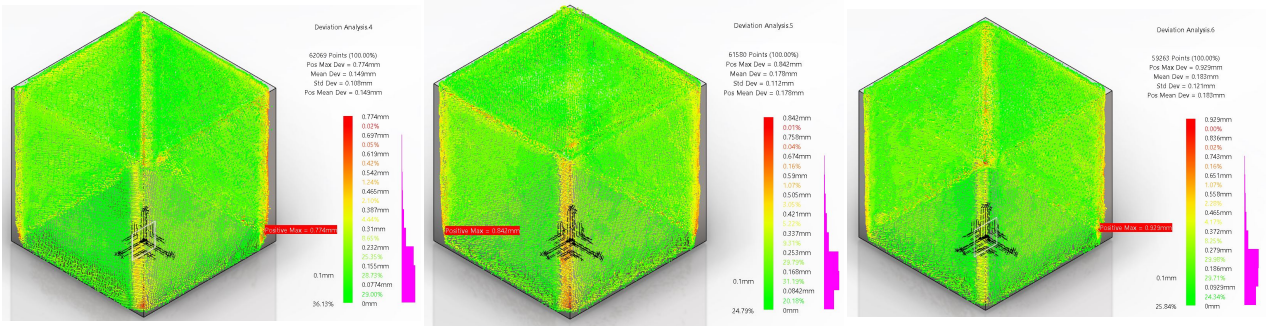
Run			Acquisizioni				
			Scostamento max [mm]	Scostamento medio [mm]	% punti oltre 0,1 mm	Deviazione standard [mm]	Massa [g]
	β	$\beta 1$	0,681	0,136	58,56%	0,103	4,11
		$\beta 2$	0,786	0,129	55,38%	0,098	4,14
		$\beta 3$	0,837	0,140	60,62%	0,106	4,11
	γ	$\gamma 1$	0,774	0,149	63,87%	0,108	4,05
		$\gamma 2$	0,842	0,178	75,21%	0,112	4,09
		$\gamma 3$	0,929	0,183	74,16%	0,121	4,06
	δ	$\delta 1$	0,776	0,205	77,76%	0,123	3,98
		$\delta 2$	0,804	0,207	79,80%	0,121	4,00
		$\delta 3$	0,859	0,206	77,53%	0,130	4,01
	ε	$\varepsilon 1$	0,741	0,105	36,44%	0,098	4,48
		$\varepsilon 2$	0,682	0,106	38,04%	0,098	4,46
		$\varepsilon 3$	0,765	0,112	39,97%	0,103	4,42
	φ	$\varphi 1$	0,756	0,144	61,22%	0,106	4,33
		$\varphi 2$	0,851	0,163	68,83%	0,115	4,30
		$\varphi 3$	0,792	0,143	60,75%	0,106	4,31
	η	$\eta 1$	0,822	0,180	74,30%	0,110	4,28
		$\eta 2$	0,809	0,168	71,63%	0,108	4,26
		$\eta 3$	0,698	0,153	65,77%	0,103	4,30
	θ	$\theta 1$	0,732	0,097	33,71%	0,094	4,62
		$\theta 2$	0,688	0,095	37,21%	0,086	4,66
		$\theta 3$	0,628	0,096	35,65%	0,088	4,69
	τ	$\tau 1$	0,802	0,108	37,90%	0,097	4,62
		$\tau 2$	0,774	0,103	37,74%	0,094	4,63
		$\tau 3$	0,747	0,104	38,08%	0,092	4,69
	ρ	$\rho 1$	0,750	0,143	62,63%	0,104	4,51
		$\rho 2$	0,726	0,139	58,00%	0,103	4,56
		$\rho 3$	0,748	0,145	62,53%	0,105	4,53

Tabella 21: risultati del secondo DOE



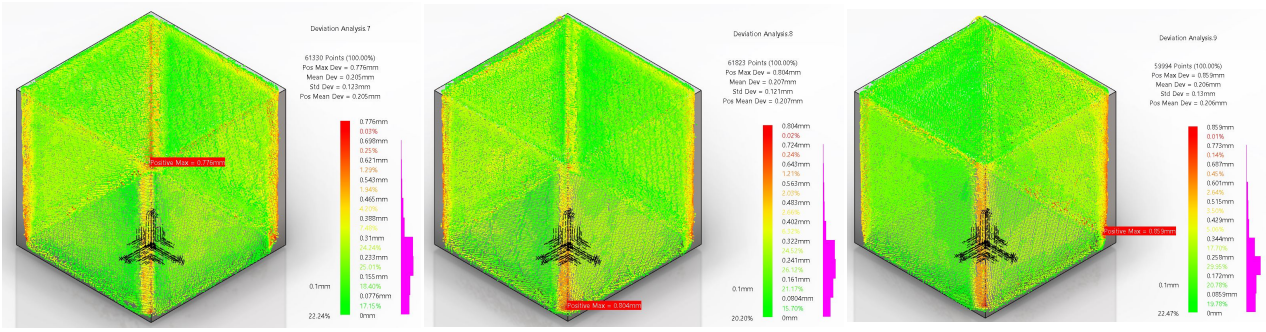
β_1 β_2 β_3

Run β)



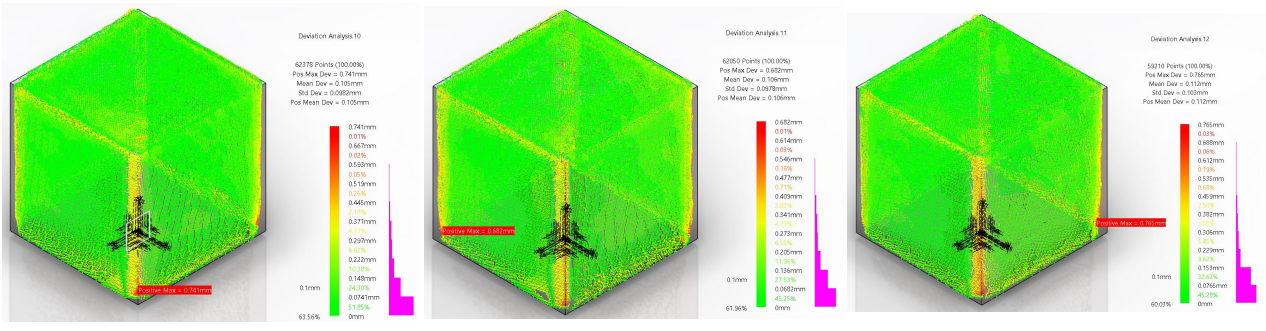
γ_1 γ_2 γ_3

Run γ)



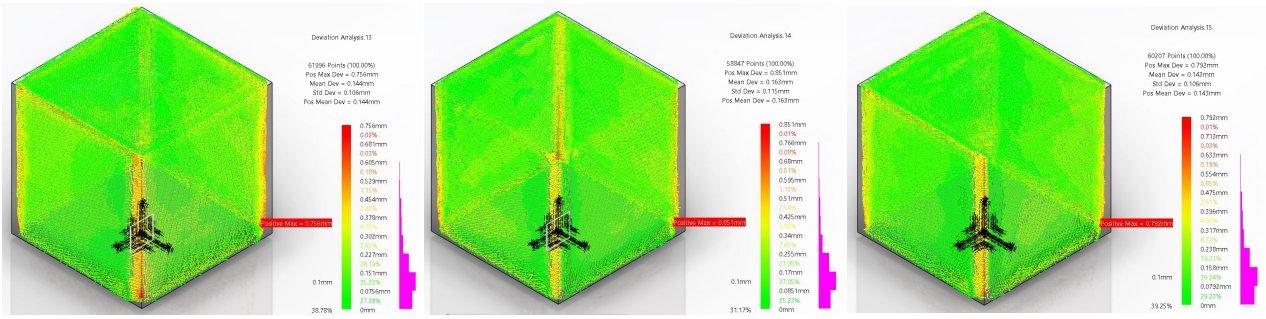
δ_1 δ_2 δ_3

Run δ)



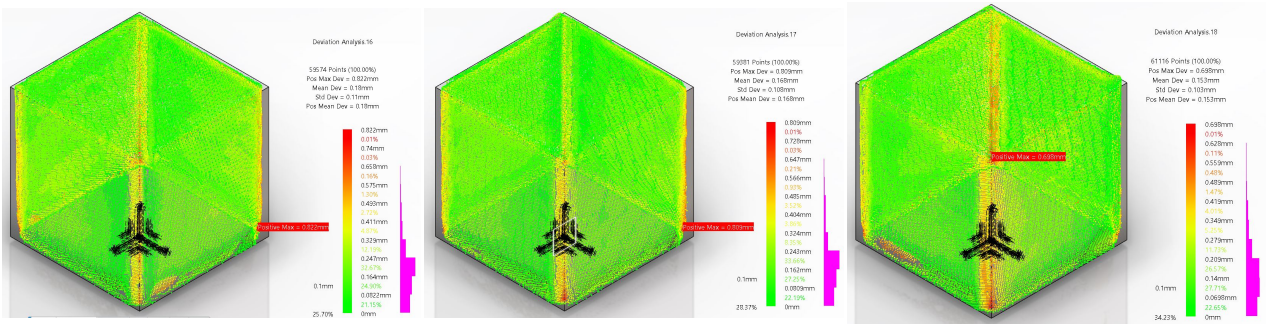
ε_1 ε_2 ε_3

Run ε)



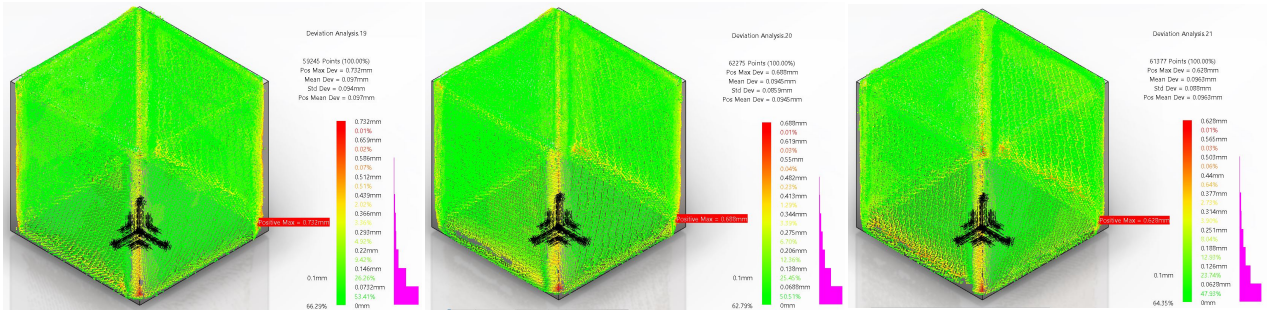
φ_1 φ_2 φ_3

Run φ)



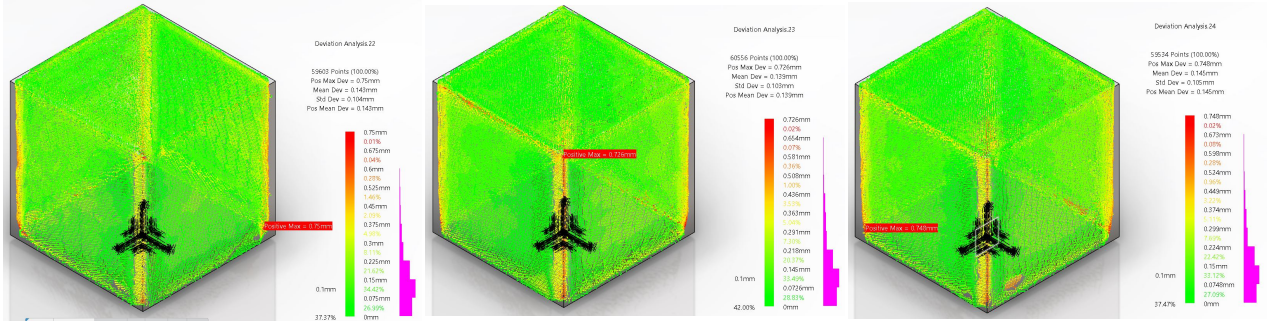
η_1 η_2 η_3

Run η)



θ_1 θ_2 θ_3

Run θ)



ρ_1 ρ_2 ρ_3

Run ρ)

$Y_1(-1, A)$	0,810 mm	$Y_2(-1, A)$	69,21%
$Y_1(-1, B)$	0,727 mm	$Y_2(-1, B)$	43,95%
$Y_1(0, A)$	0,768 mm	$Y_2(0, A)$	57,44%
$Y_1(0, B)$	0,807 mm	$Y_2(0, B)$	57,53%
$Y_1(1, A)$	0,733 mm	$Y_2(1, A)$	44,83%
$Y_1(1, B)$	0,777 mm	$Y_2(1, B)$	69,99%

	scostamento max	% punti
ΔA	0,077 mm	24,38%
ΔB	0,081 mm	26,04%

Tabelle 22 e 23: effetti principali e influenza sullo scostamento massimo (rosso) e sulla percentuale di punti (blu) del secondo DOE

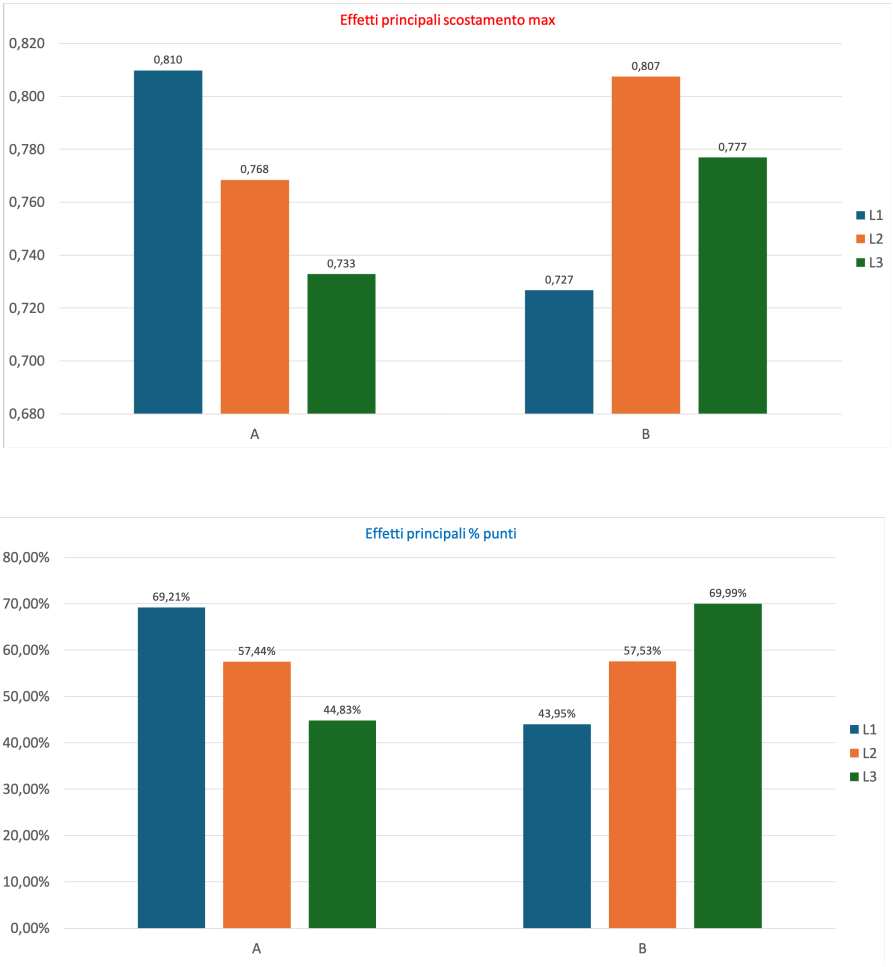
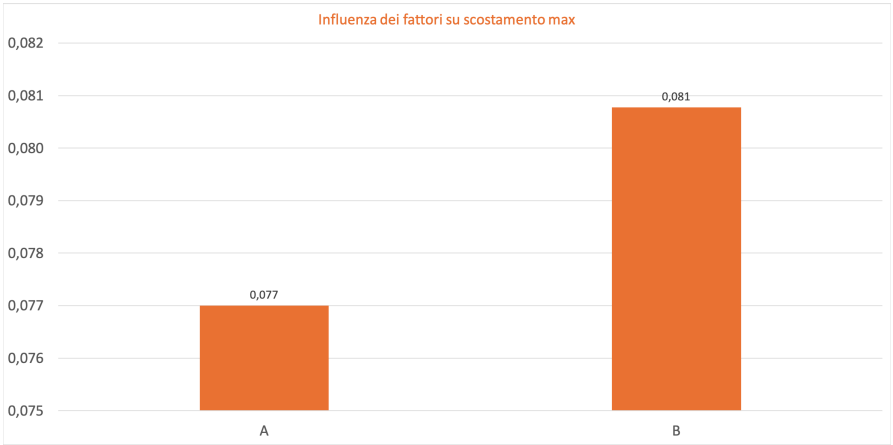


Figura 50: istogrammi relativi agli effetti principali del secondo DOE



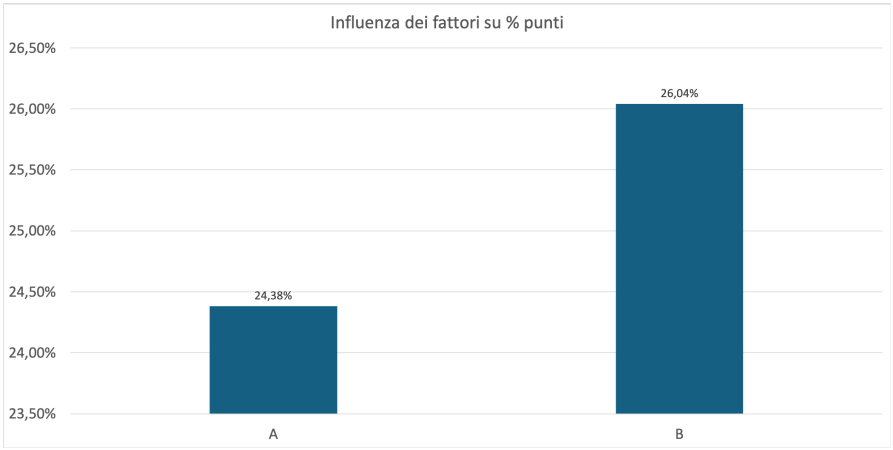


Figura 51: istogrammi relativi all'influenza dei vari fattori del secondo DOE

Interazione flow rate - line distance

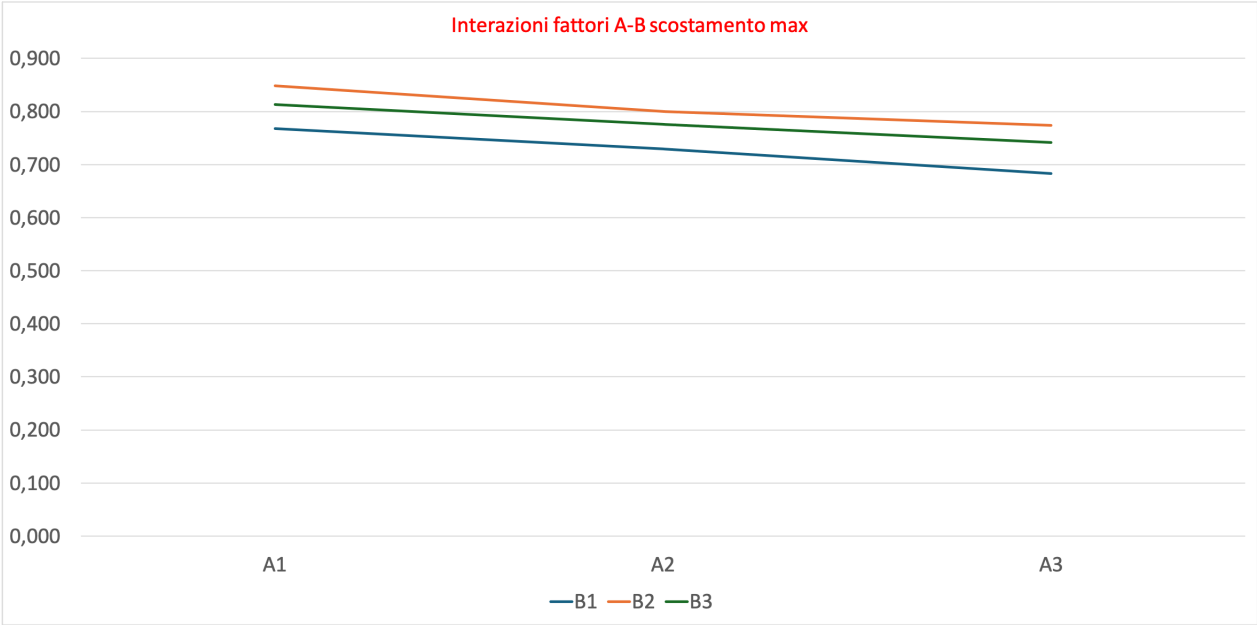
Line distance

Flow rate	0,65 mm	0,70 mm	0,75 mm
70%	0,768 mm	0,848 mm	0,813 mm
75%	0,729 mm	0,800 mm	0,776 mm
80%	0,683 mm	0,774 mm	0,741 mm

Line distance

Flow rate	0,65 mm	0,70 mm	0,75 mm
70%	58,19%	71,08%	78,36%
75%	38,15%	63,60%	70,57%
80%	35,53%	37,91%	61,05%

Tabelle 24 e 25: Interazione flow rate - line distance per lo scostamento massimo (rosso) e per la percentuale dei punti (blu) del secondo DOE



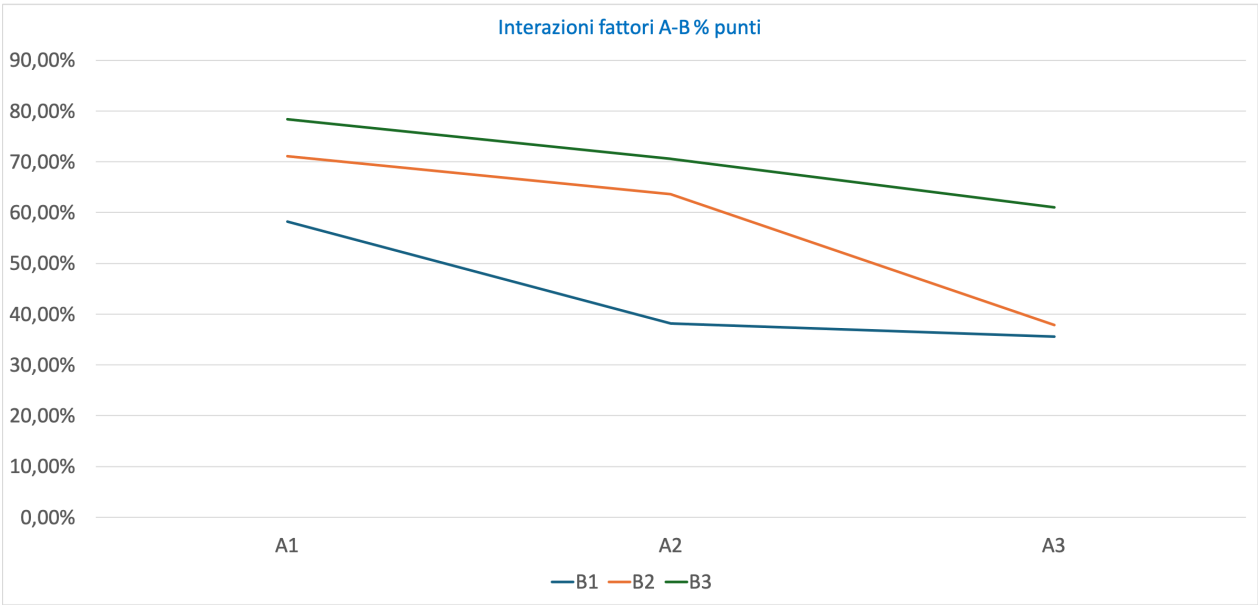


Figura 52: diagramma a linee che riporta le interazioni tra il flow rate e la line distance del secondo DOE

I modelli di regressione relativi alle due uscite del problema sono ora:

$$\begin{aligned} \hat{y}_1 &= \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 x^2 + \alpha_4 y^2 + \alpha_5 xy \\ \hat{y}_2 &= \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y + \beta_3 x^2 + \beta_4 y^2 + \beta_5 xy \end{aligned} \tag{3.17}$$

e i rispettivi coefficienti di regressione restituiti da Matlab valgono:

$$\boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -9,827045047336583 \\ -0,000153153110816 \\ 30,733873877392142 \\ -0,000222222222541 \\ -22,266666668726735 \\ 0,017837837825699 \end{bmatrix} \tag{3.18}$$

$$\boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -217,7409309596487 \\ 9,2167792800092 \\ 103,4711712091958 \\ -0,1802777777853 \\ -222,6666666986462 \\ 8,8986486487657 \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

Nelle Figure 53 e 54 sono riportati gli andamenti di $\hat{y}_1$ e $\hat{y}_2$ a temperatura costante ($210°C$).

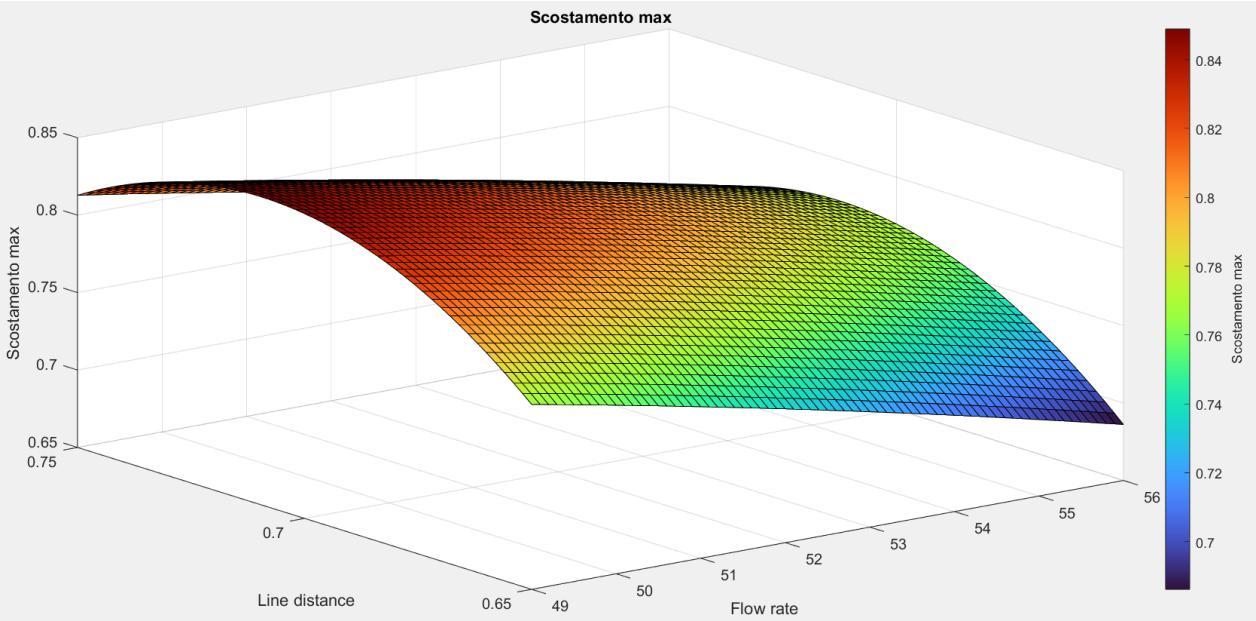


Figura 53: modello di regressione relativo all'uscita y_1 del secondo DOE

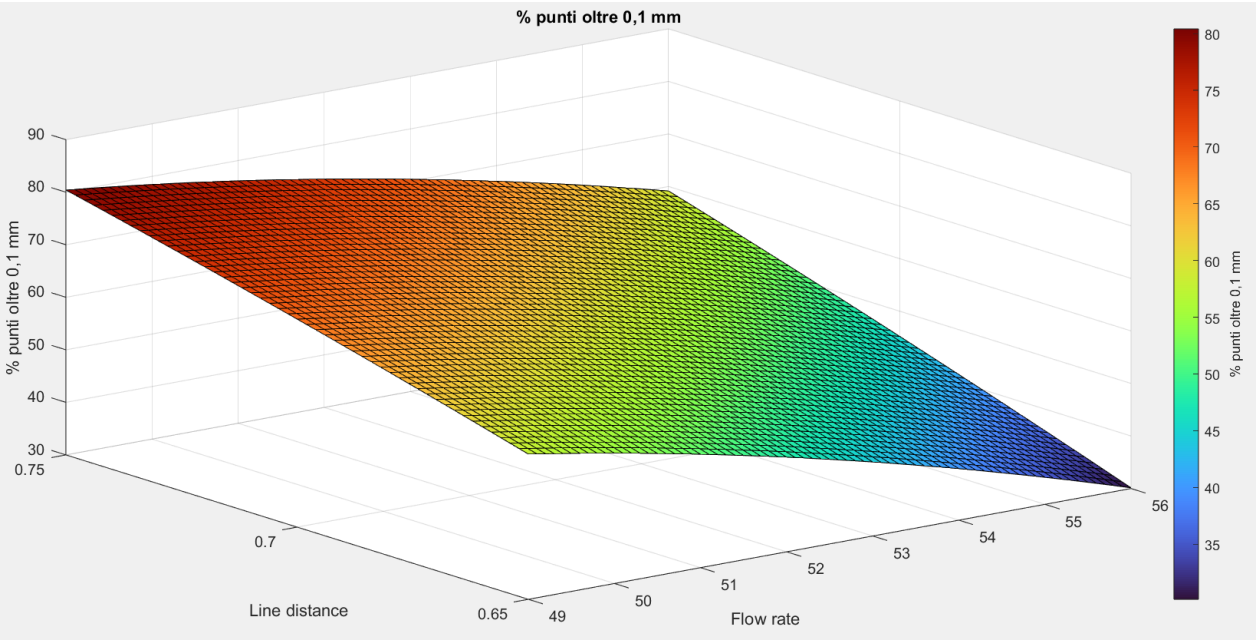


Figura 54: modello di regressione relativo all'uscita y_2 del secondo DOE

E' facile rendersi conto, in questo caso, che per entrambe le uscite il punto di ottimo si trova per

$$\begin{aligned} f_r &= 80\% \text{ (velocità periferica ingranaggi 56 mm/min)} \\ \ell_d &= 0,65 \text{ mm} \end{aligned} \tag{3.20}$$

a cui corrispondono

$$\begin{aligned} \text{scostamento massimo}|_{ott} &= 0,683 \text{ mm} \\ \text{percentuale di punti oltre 0,1 mm}|_{ott} &= 35,52\% \end{aligned} \tag{3.21}$$

La condizione operativa più favorevole è dunque la *run* θ, caratterizzata da:

- *sottoestrusione* di materiale all'80%
- *line distance poco maggiore del diametro del nozzle.*

Ciò è probabilmente imputabile al fatto che, depositandosi meno materiale ed essendo presente più spazio tra le linee adiacenti delle wall, questo non si accumuli creando dei rigonfiamenti.

3.4 Simulazione del processo

Una volta ultimata l'analisi dei risultati si è proceduto ad effettuare la *simulazione termo-meccanica* agli elementi finiti del processo ottimale (run θ) nell'ambiente *Additive Manufacturing Scenario Creation*.
La prima operazione da effettuare consiste nella *creazione della mesh* **1**: a tal proposito è stata scelta una mesh esaedrica regolare in cui ogni singolo elemento presenta lo spigolo di base pari a 0,6 mm (stessa misura del diametro del nozzle). Una volta generata la mesh è stato assegnato il materiale (PLA) con le proprietà dipendenti dalla temperatura (Tabella 6, pag. 45).
Successivamente è stata impostata la *starting temperature* **2**, ovvero la temperatura a cui viene depositato il materiale, ad un valore pari a 483,15 K.

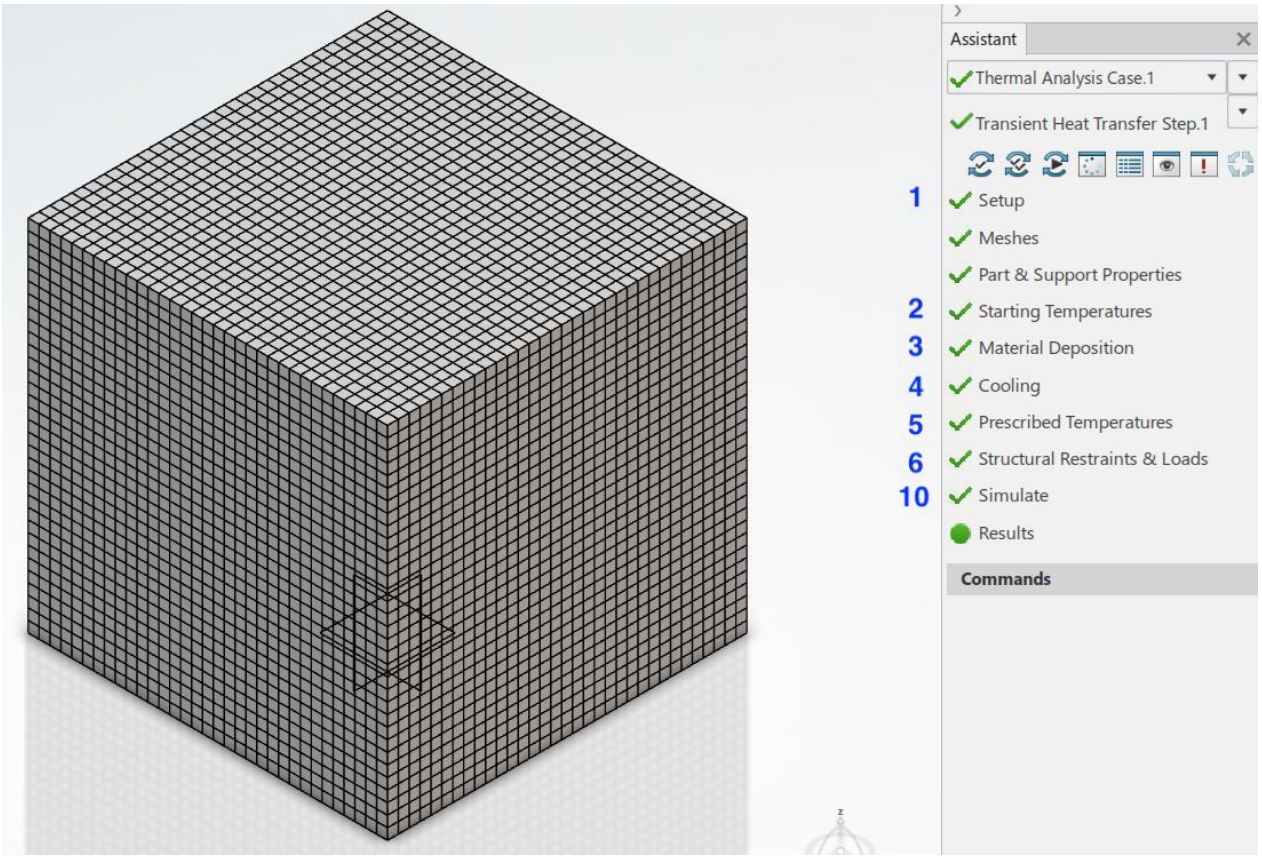


Figura 55: mesh del provino e procedura seguita per la creazione della simulazione FEA

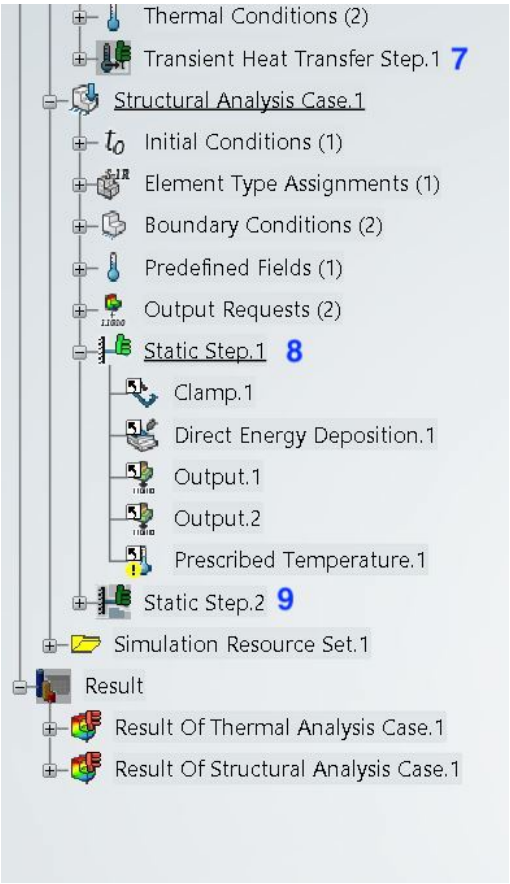


Figura 56: creazione degli step per la simulazione

Nella sezione *material deposition* **3** sono poi stati impostati i seguenti parametri:

- posizione del piatto di costruzione (*below*);
- *follow deformation*, così facendo gli elementi della mesh non attivati durante la simulazione seguono la deformazione degli elementi adiacenti attivati;
- *partial activation*, permette l'attivazione parziale degli elementi.

Nella sezione *cooling* **4** sono stati inseriti i seguenti parametri:

- *temperatura ambiente* pari a 295,15 K;
- *emissività* del materiale che, per i materiali termoplastici, assume di solito un valore prossimo a 0,95;
- *coefficiente convettivo* pari a 75 W/(m^2·K), per tenere conto del fatto che durante il processo la presenza della ventola di raffreddamento porta ad avere convezione forzata,

La *prescribed temperature* **5** permette di fissare la temperatura del piatto di costruzione: non avendo impiegato un piano riscaldato, in questo caso è stata scelta la temperatura ambiente 295,15 K.
Alla faccia del provino a contatto con il piatto di costruzione è stato imposto,

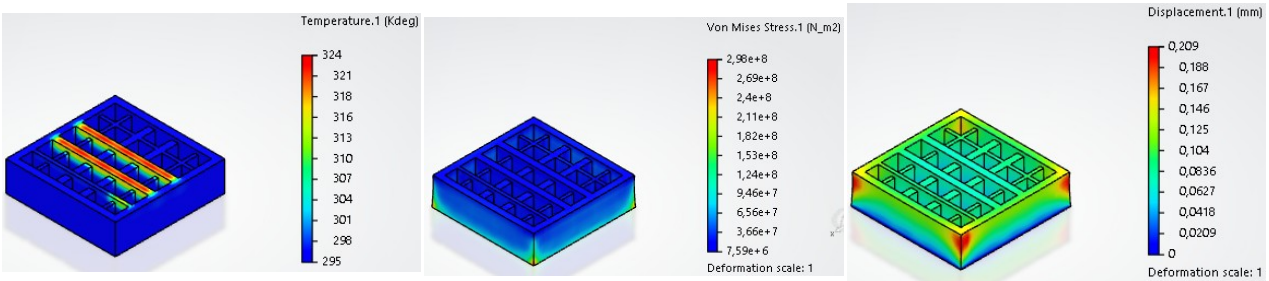
infine, un vincolo di incastro (*clamping*) nella sezione *structural restrains loads* **6**.
Successivamente sono stati creati 3 step per la simulazione:

- *Transient Heat Transfer Step 1* **7** per la simulazione termica, con una discretizzazione temporale di 15 secondi e di durata complessiva pari alla durata dell'intero processo di stampa;

- *Static Step 1* **8** per la simulazione termica, avente discretizzazione temporale e durata complessiva pari a quelle della simulazione termica;

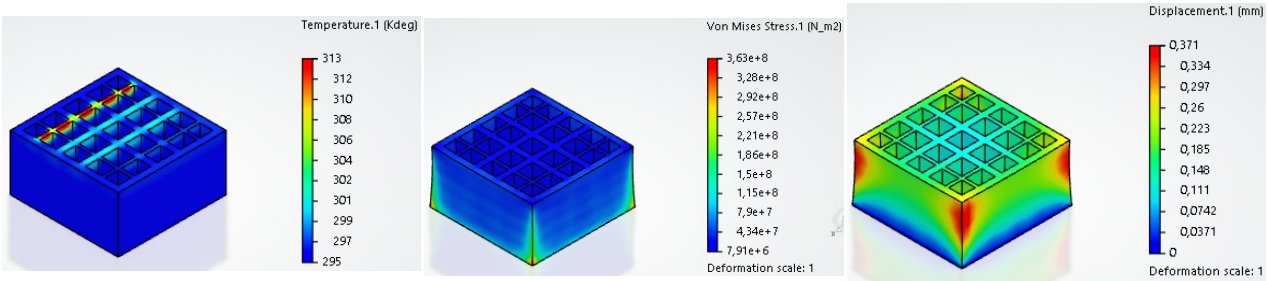
- *Static Step 2* **9**: durante questo step viene "rimosso" il vincolo di incastro ed il provino è libero di deformarsi lateralmente. La durata è stata fissata ad 1 secondo, e il passo di discretizzazione temporale è stato assunto pari a 0,25 secondi.

E' stato possibile, infine, lanciare la simulazione con il comando *simulate* **10**.
Nel seguito vengono riportati gli andamenti della temperatura, degli sforzi alla Von Mises e delle deformazioni al 25% (Figura 57), al 50% (Figura 58), al 75% (Figura 59) e al 100% (Figura 60) della durata complessiva della simulazione.



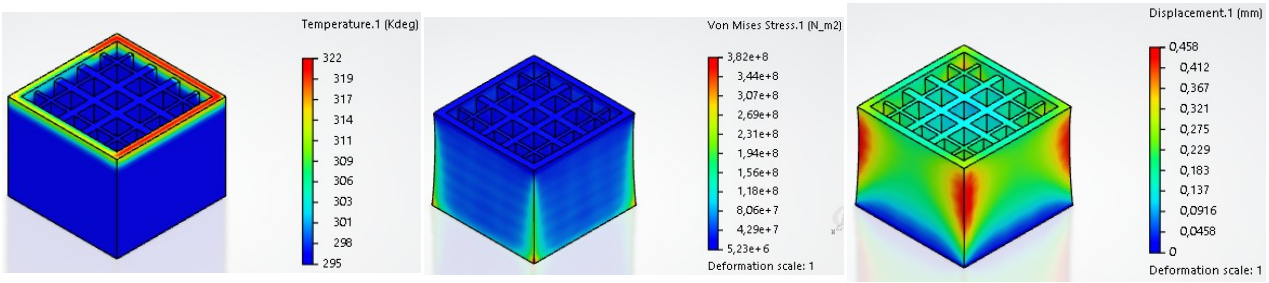
Temperatura *Von Mises* *Deformazioni*

Figura 57: 25% del processo



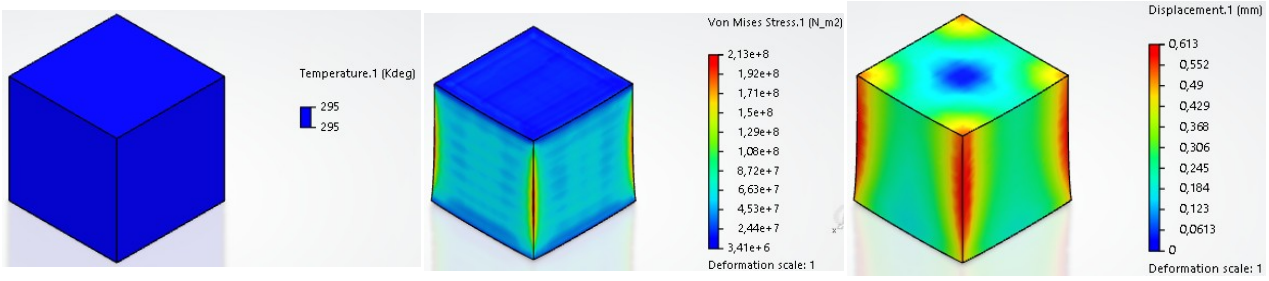
Temperatura *Von Mises* *Deformazioni*

Figura 58: 50% del processo



Temperatura *Von Mises* *Deformazioni*

Figura 59: 75% *del processo*

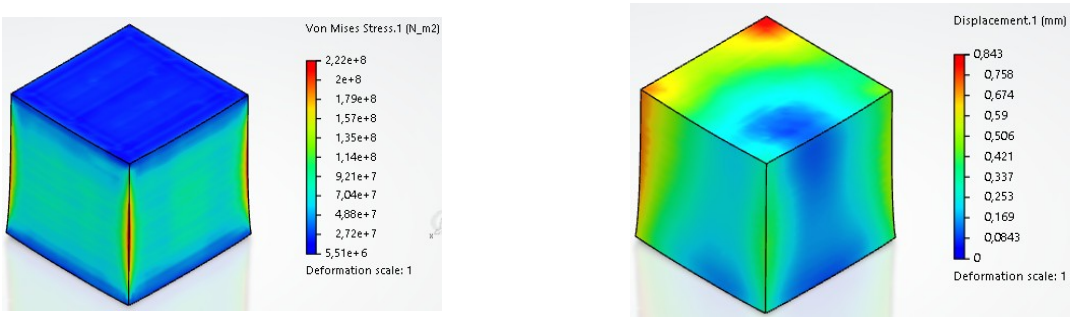


Temperatura *Von Mises* *Deformazioni*

Figura 60: 100% *del processo*

3.4.1 Discussione

Si osservi il valore massimo della deformazione $0,613$ mm ottenuto con la simulazione: rispetto al valore medio ottenuto nella *run* θ l'errore percentuale è pari al $5,4\%$; se poi si considera in particolare il provino $\theta 3$ l'errore scende all'$1,2\%$. Si può concludere pertanto che il modello implementato nella simulazione è un *modello predittivo* del processo di RAM: ciò permette di eseguire una progettazione *integrata*. In altre parole è possibile simulare la stampa di un dato componente a monte del processo, con diverse combinazioni di parametri, quali ad esempio la tipologia e la percentuale di riempimento e il numero di walls, e determinare la strategia di stampa ottimale per la parte che si vuole realizzare.
A dimostrazione del fatto che l'impiego di pattern di riempimento differenti porta ad avere deformazioni diverse da quella del caso di studio, è stata eseguita una seconda simulazione del processo impostando un riempimento di tipo *esagonale*; i risultati al termine di tale simulazione sono riportati in Figura 61.



Von Mises *Deformazioni*

Figura 61: simulazione del processo con infill esagonale

A completamento del lavoro, viene riportato un confronto tra

- provino inizialmente realizzato con la stampante 3D cartesiana (Figura 62);
- provino inizialmente realizzato con il robot, impiegando dei parametri di primo tentativo (Figura 63);
- provino $\theta 3$ (Figura 64) del secondo DOE, che risulta essere il migliore di tutti in termini di accuratezza dimensionale.

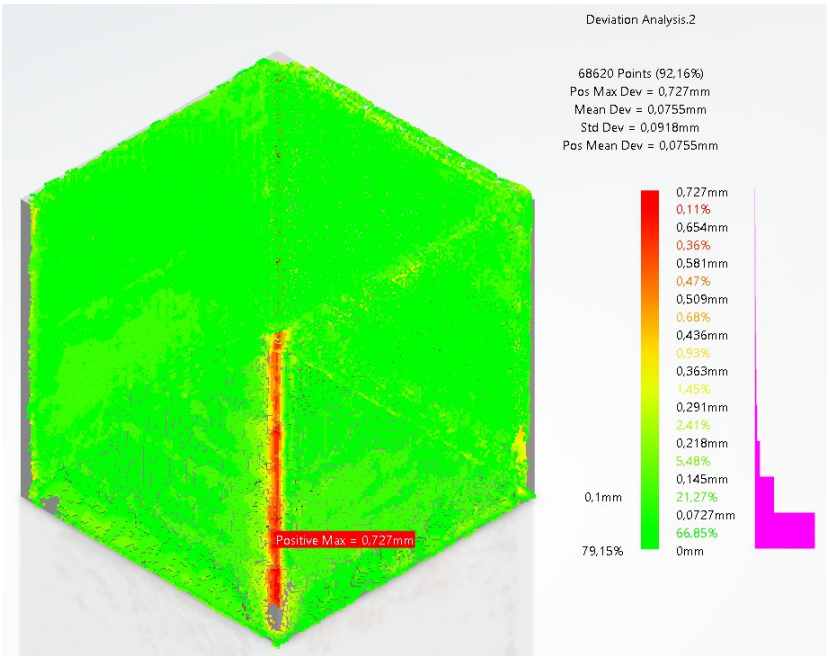


Figura 62: provino realizzato inizialmente con la stampante 3D cartesiana

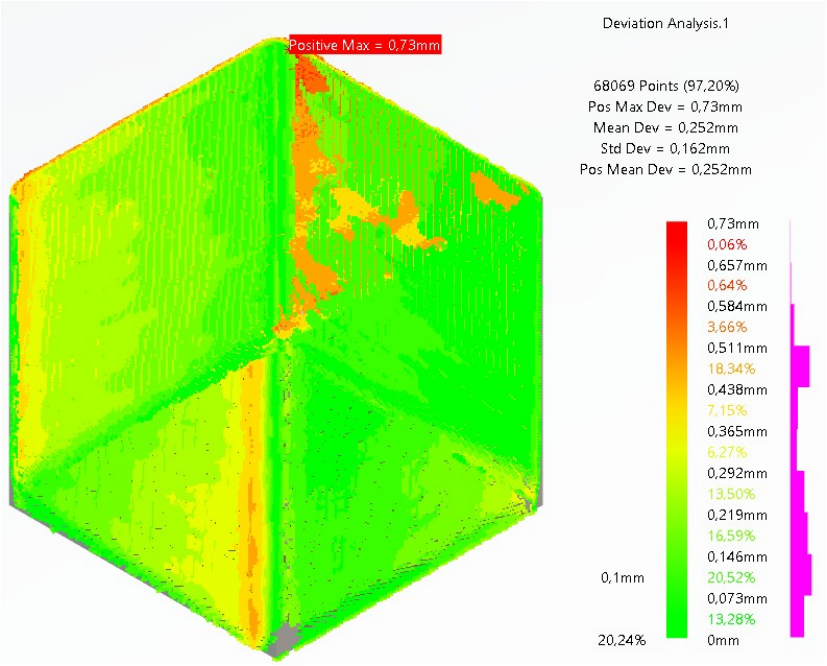


Figura 63: provino realizzato inizialmente con il robot impiegando parametri di stampa di primo tentativo

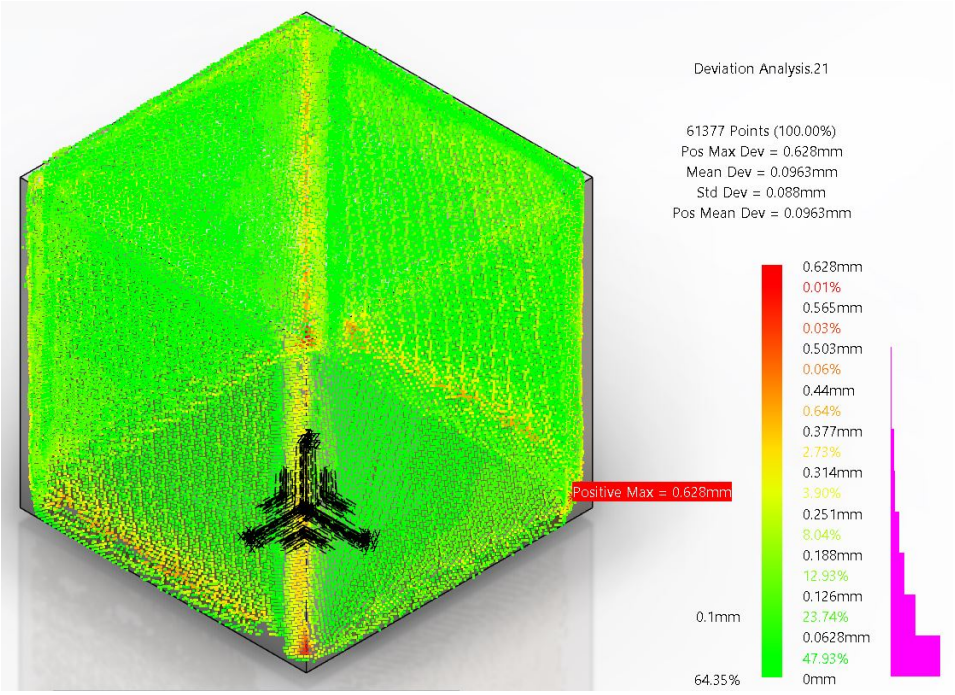


Figura 64: provino θ3

3.5 Conclusioni

Nel presente lavoro è stata svolta un'analisi sperimentale volta al miglioramento dell'accuratezza dimensione e della qualità superficiale di provini stampati in 3D con la tecnologia FDM grazie all'impiego di un robot collaborativo a 6 assi (RAM). Per fare ciò è stato impiegato il tool integrato 3DExperience, grazie a cui è stato possibile seguire il workflow dell'intero processo dalla fase di *Part Design*

del provino alle fasi finali di analisi dei risultati e simulazione numerica.
La stampa dei provini è stata realizzata impiegando dapprima un DOE 3^3 full factorial a 3 fattori e 3 livelli e, successivamente, riducendo a 2 il numero di fattori ed il loro range di variabilità. Le uscite del problema prese in esame sono state

- scostamento massimo dei punti della superficie dei provini dalla superficie del modello disegnato al CAD;
- percentuale di punti della superficie dei provini la cui distanza dalla superficie del modello, presa in valore assoluto, eccede il valore soglia 0,1 mm.

Dopo aver raccolto ed analizzato i dati è stato possibile determinare i modelli di regressione delle uscite e determinare, in questo modo, una combinazione ottimale dei parametri di processo, in grado quindi di minimizzare le uscite del problema. Nella seconda parte del lavoro è stata svolta la simulazione numerica FEA del processo corrispondente alla condizione di ottimalità e si è trovato un valore di deformazione massima molto prossimo a quello ottenuto durante la stampa dei provini. Da ciò se ne deduce che il modello realizzato è *predittivo* dell'intero processo, e può essere sfruttato direttamente in fase di design per ottimizzare l'accuratezza dimensionale delle parti stampate.
Alcuni spunti per lavori futuri di indagine ed approfondimento sono elencati nel seguito.

1. Studio di un modello a parametri concentrati in grado di prevedere gli errori dovuti alla dinamica del robot o a disturbi quali le vibrazioni e la cedevolezza dei giunti del robot stesso. In questo modo si riuscirebbe a ridurre l'errore di posizione assoluto del tool center point dichiarato dalla casa costruttrice (sul sito si legge un valore pari a 0,1 mm).

2. Nel presente lavoro la realizzazione dei provini è stata effettuata unicamente con il piatto di costruzione fisso e la testa di stampa mobile poichè 3DExperience non è ancora in grado di generare il codice per il caso di piattaforma mobile ed estrusore fisso. La possibilità di movimento simultaneo *piatto - testa di stampa* potrebbe essere la chiave per minimizzare ulteriormente le uscite y_1 e y_2 sopra discusse e per risolvere quasi completamente alcuni problemi tra cui l'ingombro e il pericolo di collisione tra pezzo ed estrusore.

3. Un'ulteriore direzione per i lavori futuri è rappresentata dai *materiali compositi*. Questi trovano già largo impiego nella stampa 3D tradizionale a 3 assi ma, essendo le possibilità di movimento della testa di stampa limitate alle direzioni x e y, la deposizione delle fibre può avvenire unicamente lungo un piano, vanificando il più delle volte il vantaggio concreto in termini di proprietà meccaniche che deriverebbe dal loro impiego convenzionale. Impiegando l'approccio integrato per la RAM è possibile dapprima effettuare

l'analisi FEM del componente e studiare la distribuzione delle tensioni e, successivamente, andare a depositare le fibre lunghe seguendo le traiettorie di interesse, con indubbi vantaggi in termini di resistenza meccanica.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare in primis il Dott. Ing. Enrico Dalpadulo per la proposta di tesi, per l'enorme pazienza avuta nei miei confronti durante questi mesi e per avermi guidato nella realizzazione del presente elaborato. Con altrettanta gratitudine vorrei ringraziare il Prof. Ing. Fabio Pini e l'Ing. Matteo Tagliavini per avermi insegnato le basi della robotica collaborativa, senza le quali non sarei stato in grado di condurre le prove sperimentali con l'ABB GoFa 15000.
Una dedica a parte penso che sia doverosa nei confronti del Prof. Ing. Francesco Gherardini, la cui grande esperienza mi ha aiutato nell'analisi e nell'interpretazione dei risultati delle prove sperimentali. Un sentito ringraziamento va anche all'Ing. Alessandro Di Mauro, il cui prezioso aiuto mi ha permesso di iniziare ed ultimare il lavoro.
Un ultimo ringraziamento (ma non per importanza) va tutte quelle persone che, come in un concerto, "stanno dietro alle quinte", ma senza le quali lo spettacolo non potrebbe nemmeno iniziare: la mia famiglia. Grazie per aver creduto in me e per avermi supportato/sopportato in questi anni. Questo traguardo importante non è solo mio, ma è *nostro*.
Ah, stavo per dimenticare...grazie Elia!

Bibliografia

[1] George Q. Zhang, Wiener Mondesir, Carlos Martinez, Xiongzi Li, Thomas A. Fuhlbrigge, Hemant Bheda, *"Robotic Additive Manufacturing along curved surface - a step towards free-form fabrication", Proceedings of the 2015 IEEE Conference on Robotics and Biomimetics Zhuhai, China, December 6-9 2015, pp. 721-726*

[2] Terry Wohler, *"Wohler's 2012 report on Additive Manufacturing and 3D printing"*, Wohler Associate, Inc., Fort Collins, CO, USA, 2012

[3] Frederik Wulle, Daniel Coupek, Florian Schaffner, Alexander Verl, Felix Oberhofer, Thomas Maier, *"Workpiece and machine design in Additive Manufacturing for multi-axis Fused Deposition Modeling"*, 27th CIRP Design 2017, CIRP 60 (2017), pp. 229-234

[4] Shembekar Aniruddha, Yoon Yeo Jung, Kanyuck Alec, Gupta Satyandra, 2018, *"Trajectory planning for conformal 3D printing using non-planar layers"*, V01AT02A026.10.1115/DETC2028-85975

[5] Pini Fabio, Dalpadulo Enrico, Leali Francesco, 2025, *"Integrated product and process design for Robotic Additive Manufacturing"*, 10.1115/IMECE2024-141818

[6] Lucas C. B. Carolo, Robert E. Cooper O., *"A review on the influence of process variables on the surface roughness of Ti-6Al-4V by electron beam powder bed fusion"*, Additive Manufacturing, Volume 59, Part A, 2022, 103103, ISSN 2214-8604

[7] Frederik Wulle, Martin Wolf, Oliver Riedel, Alexander Verl, *"Method for load-capable path planning in multi-axis Fused Deposition Modeling"*, Procedia CIRP, Volume 84, 2019, pp. 335-340, ISSN 2212-8271

[8] Bhatt Prahar, Kabir Ariyan, Malhan Rishi, Shah Brual, Shembekar Aniruddha, Yoon Yeo Jung, Gupta Satyandra, 2019, *"A robotic cell for multi-resolution Additive Manufacturing"*, 2800-2807, 10.1109/ICRA.2019.8793730

[9] International Organization for Standardization (2018). Additive manufacturing - General Principles - Terminology. ISO/ASTM 52900, https://www.iso.org/obp/ui/iso:std:iso-astm:52900:dis:ed-2:v1:en

[10] Gatto A., Bassoli E., Denti L., Iuliano L., *"Produrre"*, Pitagora Editrice Bologna, ISBN 88-371-1926-7

[11] Ahn, D.G., "*Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art*", Int. J. of Precis. Eng. And Manuf., Green Tech.8, 703-742 (2021), https://doi.org/10.1007/

[12] J. Michael Wilson, Cecil Piya, Yung C. Shin, Fu Zhao, Karthik Ramani, *"Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis"*, Journal of Cleaner Production, Volume 80, 2014, pp. 170-178, ISSN 0959-6526

[13] Torsten Petrat, Benjamin Graf, Andrey Gumenyuk, Michael Rethmeier, *"Laser metal deposition as repair technology for a gas turbine burner made of Inconel 718"*, Physics Procedia, Volume 83, 2016, pp. 761-768, ISSN 1875-3892

[14] Lei Xu, Huajun Cao, Hailong Liu, Yubo Zhang, 2017, *"Study on laser cladding remanufacturing process with FeCrNiCu alloy powder for thin-wall impeller blade"*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 90, 10.1007/S00170-016-9445-Z

[15] Dinovitzer M., Chen X., Laliberte J., Huang X., Frei H., 2019, *"Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstucture"*, Additive Manufacturing, 26, 138-146

[16] https://www.industriaitaliana.it/waam-stampa-3d-caracol-am/

[17] https://www.3dnatives.com/it/universitabologna-primo-laboratorio-stampa-3d-waam-costruzioni-200420239/

[18] Syed W. U. H. , Pinkerton A. J. , Li L., 2005, *"A comparative study of wire feeding and powder feeding in direct diode laser deposition for rapid prototyping"*, Applied Surface Science, 247, 268-276

[19] Demir A.G., 2018, *"Micro laser metal wire deposition for additive manufacturing of thin walled structures"*, Optics and Lasers in Engineering, 100, 9-17

[20] Fubao Xie, Lufeng Chen, Zhaoyu Li, Kai Tang, 2020, *"Path smoothing and feed rate planning for robotic curved layer additive manufacturing"*, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Volume 65, 101967, ISSN 0736-5845

[21] https://5-axis-slicer.com

[22] Yigit Ismail, Lazoglu Ismail, 2020, *"Spherical slicing method and its application on robotic additive manufacturing"*, Progress in Additive Manufacturing, 5.10.1007/s40964-020-00135-5

[23] Tascioglu Emre, Kitay Ozhan, Keskin Ali, Kaynak Yusuf, 2022, *"Effect of printing parameters and post-process on surface roughness and dimensional deviation of PLA parts fabricated by extrusion-based 3D Printing"*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 44.10.1007/s40430-022-03429-7

[24] Pérez CL, Calvet JV, Pérez MS, 2001, *"Geometric roughness analysis in solid free-form manufacturing processes"*, J Mater Process Technol 119 (1-3):52-57, https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00897-4

[25] Beibit Zharylkassyn, Asma Perveen, Didier Talamona, "*Effect of process parameters and materials on the dimensional accuracy of FDM parts*", Materials Today: Proceedings, Volume 44, Part 1, 2021, pp. 1307-1311, ISSN 2214-7853, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.332

[26] Douglas C. Montgomery, Arizona State University, *"Design and Analysis of Experiments"*, 8th edition, John Wiley Sons, Inc., ISBN 978-1-118-14692-7

[27] https://library.e.abb.com/public/6afac6eb34804cb7b5f8a4794a364295/GoFa%20CRB%2015000%20Datasheet.pdf

[28] Fracassi Giovanni, Rocco Paolo, Zanchettin Andrea Maria, Zappa Isacco, 2023, *"Parameterization of robotic welding trajectories from a demonstration"*, Tesi di Laurea Magistrale

[29] Shady Farah, Daniel G. Anderson, Robert Langer, *"Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications - A comprehensive review"*, Advanced Drug Delivery Reviews, Volume 107, 2016, pp. 367-392, ISSN 0169-409-X, https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012