Politecnico di Torino



Corso di laurea magistrale in Ingegneria Meccanica Specializzazione in Fabbricazione Additiva (LM-33)

Tesi di Laurea Magistrale

Caratterizzazione dimensionale di provini in Alumide[®] prodotti con la tecnica di Selective Laser Sintering (SLS)

Relatrice: Prof.ssa Flaviana Calignano **Correlatrice:** Ing. Manuela Galati

Candidato: Francesco Chimirri

Anno Accademico 2020/2021

Sommario

Abstract		5
CAPITOLO 1: INTRODUZIONE	ALL'ADDITIVE MANUFACTURING	6
1.1 STATO DELL'ARTE		6
1.2 CENNI AL CICLO PRODUTTIV	O DEL PROCESSO DI ADDITIVE MANUFACTURING	8
CAPITOLO 2: LA TECNICA DI SELECTIVE LASER SINTERING (SLS)		12
2.1 CARATTERISTICHE DEL PROC	CESSO	12
2.1.1 Schema della macchina	per la sinterizzazione laser	12
2.1.2 Processo di produzione		14
2.1.3 Principio di funzioname	nto della sorgente laser	16
2.1.4 Meccanismo di sinterizz	azione	17
2.2 PARAMETRI DI PROCESSO N	IELLA TECNICA DI SELECTIVE LASER SINTERING	18
2.2.1 Hatch Distance		20
2.2.2 Spessore dello strato		21
2.2.3 Strategia di scansione		21
2.2.4 Potenza Laser		
2.2.5 Dimensione dello spot		
2.2.6 Velocità di scansione		
2.2.7 Scan Size		
2.2.8 Densità di energia		
2.3 EFFETTI TERMICI SULLA COS	TRUZIONE DEI COMPONENTI	28
2.3.1 Gradiente di temperatu	ra superficiale nel letto di polvere	
2.3.2 Gradiente di temperatu	ra all'interno del volume di polvere sinterizzata	
2.3.3 Shrinkage e Curling		
2.4 MATERIALI UTILIZZATI PER I	A TECNICA DI SELECTIVE LASER SINTERING	35
2.5 VANTAGGI E SVANTAGGI DE	ELLA TECNICA DI SELECTIVE LASER SINTERING	41
2.5.1 Vantaggi della tecnica		41
2.5.2 Svantaggi della tecnica		41
CAPITOLO 3: REALIZZAZIONE	DEI PROVINI PER LA CARATTERIZZAZIONE DIMENSIONALE	42
3.1 DESCRIZIONE DELLA NORM	4TIVA	42
3.2 REALIZZAZIONE DEI COMPO	NENTI	48
3.3 ANALISI DEI CAMPIONI PRO	DOTTI	51
3.4 OPERAZIONI DI POST PROCE	ESSING	59
CAPITOLO 4: CARATTERIZZAZ	ZIONE DIMENSIONALE DEI PROVINI	60
4.1 STRUMENTAZIONE UTILIZZA	λта	60
4.2 CREAZIONE DEI PART PROG	RAM PER LE MISURAZIONI DEI COMPONENTI	62
4.3 ANALISI DELLE MISURE		63
4.3.1 ANALISI MISURAZIONI C	OMPONENTE LINEAR ARTIFACT (LA)	63
4.3.2 ANALISI MISURAZIONI C	OMPONENTE RESOLUTION RIBS (RR_C)	68
4.3.3 ANALISI MISURAZIONI C	OMPONENTE RESOLUTION ROUND RIBS (RRR_C)	70

Bibliografia		
CAPITOLO 5: CONCLUSIONI	95	
4.3.9 ANALISI MISURAZIONI COMPONENTE RESOLUTION SLOT A (RSA_C)	91	
4.3.8 ANALISI MISURAZIONI COMPONENTE RESOLUTION SLOT (RS_C)	85	
4.3.7 ANALISI MISURAZIONI COMPONENTE RESOLUTION HOLES (RH_C)		
4.3.6 ANALISI MISURAZIONI COMPONENTE RESOLUTION PINS (RP_C_LD4)	81	
4.3.5 ANALISI MISURAZIONI COMPONENTE CIRCULAR ARTIFACT (CA_M)	77	
4.3.4 ANALISI MISURAZIONI COMPONENTE SURFACE TEXTURE (ST_M)	73	

Abstract

L'additive manufacturing (AM) è una tecnica di produzione innovativa che, per applicazioni particolari, consente di superare i limiti delle tecniche di fabbricazione tradizionali. Molti nuovi materiali e compositi vengono sviluppati e proposti sul mercato al fine di sfruttare al meglio i vantaggi delle tecnologie additive.

Con questa tesi si è eseguita una caratterizzazione dimensionale di componenti prodotti in materiale composito sviluppato dalla EOS GmbH, denominato Alumide®, formato da una matrice polimerica (PA12) e particelle di alluminio.

Partendo dallo studio dei fenomeni fisici che caratterizzano il processo additivo di sinterizzazione laser di polvere polimerica (selective laser sintering SLS), si sono analizzati gli effetti su provini realizzati secondo normativa ISO / ASTM52902 – 19. Le misurazioni e le osservazioni descritte in questo documento possono essere utilizzate per valutare le prestazioni di un sistema AM con una data configurazione e parametri di processo, in combinazione con una specifica materia prima.

Lo studio in questione fornisce quindi delle indicazioni iniziali che permettono di valutare le capacità e la calibrazione del sistema SLS per realizzare componenti in Alumide aventi non solo ottime caratteristiche meccaniche ma anche elevata accuratezza geometrica, caratteristica necessaria in alcuni ambiti industriali nei quali questo materiale composito può trovare ampie applicazioni.

CAPITOLO 1: INTRODUZIONE ALL'ADDITIVE MANUFACTURING

1.1 STATO DELL'ARTE

La produzione industriale di componenti meccanici è basata su varie tecniche, una delle principali è quella che prevede la realizzazione della parte a partire da uno stampo corrispondente al "negativo" dell'elemento da replicare. Quest'ultimo viene riempito con un bagno di materiale (metallico o polimerico) fuso che solidifica in seguito al raffreddamento dello stampo. Questi pezzi una volta solidificati e rimossi dallo stampo devono essere rifiniti mediante trattamenti termici e operazioni di finitura, inoltre se presentano delle geometrie particolari o necessitano di fori devono essere utilizzati altri utensili. È possibile realizzare delle parti anche con tecniche che partendo da una geometria basilare (cilindri, cubi, ecc.) vengono modellati con macchinari come torni e frese.

Queste tecniche nonostante siano ancora le più valide per la produzione in serie e a grandi lotti, in quanto sono semplici da attuare e le caratteristiche sono pienamente acquisite dagli ingegneri, i tecnici e gli operai, presentano degli svantaggi in particolare: se è necessario fare un componente meccanico con una geometria particolare, bisogna "suddividerlo" in più parti con una semplice geometria realizzabili con le tecniche viste prima; ciò comporta la necessità di fare più processi per la realizzazione andando inoltre a considerare le problematiche derivanti dall'accoppiamento delle varie parti per ottenere il componente finale.

L'additive manufacturing è una tecnica innovativa che permette la creazione di una parte, caratterizzata da una geometria estremamente complessa con tolleranze dimensionali, rugosità e caratteristiche meccaniche specifiche in un'unica lavorazione senza l'utilizzo di utensili; il manufatto infatti viene creato con l'ausilio di macchine particolari che, mediante dei software specifici, suddividono il componente in un numero di sezioni trasversali perpendicolari all'asse Z, definita come asse di costruzione verticale, realizzate una alla volta, andando a "solidificare" il materiale di cui è composta la parte.

Ad oggi l'additive manufacturing viene sfruttata principalmente per la creazione di prototipi ma anche per applicazioni in ambito aeronautico, sfruttando la capacità di ridurre il peso del componente previa un'ottimizzazione topologica, applicazioni in ambito medico, dove è possibile realizzare parti di dimensioni estremamente ridotte e con geometrie complesse che si sostituiscono in maniera eccellente alle "parti umane" e soprattutto nel settore racing; in particolare in Formula 1 dove è necessario minimizzare il peso di ogni singolo componente della vettura. (n.d.r. la AMG Mercedes Petronas è riuscita in quest'era turbo ibrida a creare un GAP con le altre scuderie, grazie anche agli investimenti fatti prima rispetto alle altre scuderie nell'ambito della fabbricazione additiva).

Il brevetto della tecnica venne depositato nel 1984, questa iniziò a diventare una realtà commerciale già nel 1987 per ridurre i tempi per la realizzazione dei prototipi in quanto, il materiale polimerico causava un forte rallentamento nella produzione, specialmente per il settore automobilistico americano, il problema non era sui metalli perché i componenti realizzati con questo materiale avevano tempi di permanenza sul mercato molto lunghi. I componenti in materiale plastico, invece, necessitavano di continui aggiornamenti. Visto il compito assunto da questa tecnologia per molti anni assunse il nome di "Prototipazione Rapida" [1,2]

Nel nuovo millennio grazie anche allo sviluppo tecnologico e ad una maggiore padronanza dei materiali, delle fonti di energia e delle tecniche in generale, l'additive manufacturing iniziò ad essere una realtà industriale anche per le applicazioni in materiale metallico.



FIGURA 1: EVOLUZIONE DELLA TECNOLOGIA DI ADDITIVE MANUFACTURING [1]

1.2 CENNI AL CICLO PRODUTTIVO DEL PROCESSO DI ADDITIVE MANUFACTURING

il ciclo tradizionale di un processo di additive manufacturing, può essere sintetizzato come illustrato in Figura 2:



FIGURA 2: CICLO PRODUTTIVO DEL PROCESSO DI ADDITIVE MANUFACTURING

Il prerequisito principale, su cui si basa questa tecnica è la disponibilità del modello matematico del componente da realizzare, ottenuto mediante un qualsiasi software CAD tridimensionale (3D).

Questo modello tridimensionale (3D Solid) viene convertito in un formato "shell" (Figure 3 e 4), leggibile dalla macchina; questo formato è caratterizzato dal fatto che la superficie esterna è modellata attraverso triangoli tutti uguali ma che hanno una dimensione specifica, a seconda dell'accuratezza dimensionale richiesta e/o della complessità del pezzo, in modo da seguire il più fedelmente possibile il profilo del pezzo.

Di ogni triangolo vengono fornite le coordinate dei vertici e i coseni direttori della normale che permettono di individuarne la posizione nello spazio.



FIGURA 3: CONVERSIONE DEL MODELLO CAD IN MODELLO STL [1]



FIGURA 4: ESEMPIO DI TRIANGOLAZIONE DELLA SUPERFICIE DI UN COMPONENTE [1]

Con software adatti la parte da realizzare viene orientata in macchina e vengono aggiunti i supporti.



FIGURA 5: SCHEMATIZZAZIONE DELL'UTILIZZO DEI SUPPORTI [1]

Successivamente, con il software specifico della macchina, fornito dal produttore della macchina stessa, viene eseguito lo *slicing* che consiste nella suddivisione del file STL con piani paralleli fra loro e aventi la normale parallela all'asse Z del pezzo rivolta verso l'alto. Si ottengono in questo moto i vari strati che devono essere realizzati dalla macchina.



FIGURA 6: ESECUZIONE DELLO SLICING [1]

Gli strati sono realizzati con una distanza fra loro indicata con ΔS che varia a seconda del materiale con cui è composto il pezzo infatti:

- Per i polimeri: $\Delta S = 0.05 0.5 mm$ con un valore tipico di 0.1 mm;
- Per i metalli: $\Delta S = 0.02 0.05 \ mm$ giustificato da problemi di ritiro e non dalla rugosità.

Il valore ΔS , però, non è sempre costante; infatti, questa fase è caratterizzata dall'errore di *staircase*, in quanto una volta che la macchina realizza il pezzo sezione per sezione, quest'ultimo avrà una struttura "a scalini" (Figura 7) con del materiale in eccesso che dovrà essere rimosso successivamente nelle fasi di post-processing. Risulta essere chiaro quindi che il componente è realizzato in "eccesso di materiale", perché la tecnica di FA permette l'asportazione di materiale una volta finita la produzione, ma non prevede l'apporto di materiale una volta realizzato il componente.



FIGURA 7: EFFETTO SCALINO "STAIRCASE"[1]

La fase successiva, la principale, prevedere la costruzione delle varie sezioni del pezzo con la macchina.

Una volta realizzata la parte con la macchina, quest'ultimo viene prelevato, vengono rimossi i supporti, pulito e rifinito per ottenere le tolleranze dimensionali volute. Queste operazioni finali sono fatte manualmente.

CAPITOLO 2: LA TECNICA DI SELECTIVE LASER SINTERING (SLS)

2.1 CARATTERISTICHE DEL PROCESSO

La tecnica di fabbricazione additiva su cui si sviluppa questa tesi è la tecnica di Selective Laser Sintering (SLS) ovvero la sinterizzazione laser selettiva, per materiali polimerici sottoforma di polvere. Questa tecnica fu sviluppata all'interno dell'università del Texas in Austin nel 1980. Il principio di funzionamento sfrutta un fascio laser che selettivamente irradia e sinterizza gli strati sottostanti di polvere in modo da ottenere il componente finale.

Le macchine per il SLS, furono commercializzate inizialmente dalla casa produttrice DTM Corporation nel 1992, ma nel nuovo millennio le case come 3DSystems ed EOS in particolare hanno sviluppato il processo e creato macchinari che risultano essere, ad oggi, il top di gamma per la tecnologia. [1]



2.1.1 Schema della macchina per la sinterizzazione laser

FIGURA 8: SCHEMA MACCHINA SLS



FIGURA 9: SCHEMA TRIDIMENSIONALE DEL LETTO DI POLVERE E DELLA PIATTAFORMA DI STAMPA [3]

La macchina di SLS, come mostrato nelle Figure 8 e 9 è composta dalle seguenti parti [2]:

- Sistema Hardware/Software: controlla il funzionamento della macchina, la gestione dei parametri di processo e del file in formato STL inserito in input;
- Sorgente laser: genera il fascio laser che sinterizza la polvere presente nel letto di polvere;
- Sistema di specchi: è un sistema composto da specchi che permettono la movimentazione del fascio laser sul letto di polvere;
- Riscaldatori: hanno lo scopo di preriscaldare il letto di polvere e di mantenere costante la temperatura all'interno della camera di lavoro;
- Recoater: ha il compito di depositare una quantità determinata di polvere sul letto e di stenderla in modo preciso creando lo strato di polvere che deve essere sinterizzato per creare la sezione del pezzo;
- Serbatoi di polvere: hanno al loro interno la polvere che serve per creare il componente, nel loro fondo vi è un elevatore che, salendo, permette al roller di prelevare la giusta quantità di polvere da stendere sul letto;
- Piattaforma di costruzione: la parte più importante della macchina, viene riempita con strati successivi di polvere che vengono poi sinterizzati, scende di una quantità pari allo strato sinterizzato.

2.1.2 Processo di produzione

Una volta creato dal CAD il file STL, corretto dagli eventuali errori, quest'ultimo viene inserito in un software, fornito dalla casa produttrice e dedicato alla specifica macchina, per la corretta disposizione del pezzo nella camera di lavoro e per il settaggio dei parametri di processo che, come verrà spiegato in seguito, determinano la corretta realizzazione del pezzo con le caratteristiche e le prestazioni volute.

Una volta inseriti nel software della macchina il file della parte e i parametri impostati, inizia il processo produttivo del pezzo: degli strati successivi di polvere vengono depositati e compattati dal roller in modo da ottenere una superficie compatta e omogenea, questi strati iniziali vengono preriscaldati mediante dei riscaldatori presenti all'interno della macchina per evitare problemi di porosità e distorsione termica.

Successivamente inizia il vero e proprio processo di produzione della parte: viene depositato uno strato di polvere pari al Δ S dello *slicing* che viene rapidamente preriscaldato con i riscaldatori. A questo punto il laser viene movimentato attraverso il sistema di lenti e specchi sull'area da sinterizzare del letto di polvere in modo da creare la sezione trasversale del componente. Una volta terminata la "scansione" dello strato, la piattaforma di lavoro di sposta lungo l'asse verticale, scendendo di una quantità pari allo strato di polvere appena depositato e sinterizzato. Questo processo viene quindi ripetuto per lo strato successivo, controllando con cautela l'energia del laser in modo da fondere il nuovo strato con quello precedente.

Durante la costruzione del pezzo la camera di lavoro è mantenuta a una temperatura costante e prossima a quella di fusione della polvere per minimizzare i ritiri di solidificazione.

Una volta realizzati tutti gli strati e terminata quindi la costruzione del pezzo, quest'ultimo si trova all'interno di un blocco di compatto di polvere. Questo blocco di polvere contenente il pezzo viene rimosso dalla macchina e fatto raffreddare in aria prima di estrarre il pezzo stesso.

Una volta fatto ciò il pezzo viene estratto mediante pallinatura e la polvere non trattata viene raccolta in quanto può essere riutilizzata in combinazione con della polvere vergine per l'esecuzione di un altro job.







FIGURA 11: BLOCCO DI POLVERE ALLA FINE DEL PROCESSO
[1]



FIGURA 12: FASE DI PULIZIA ED ESTRAZIONE DEI PEZZI DAL BLOCCO DI POLVERE [1]

2.1.3 Principio di funzionamento della sorgente laser

Come spiegato in precedenza la sinterizzazione della polvere avviene grazie all'energia apportata dal laser; è possibile affermare quindi che uno degli elementi principali all'interno del macchinario è proprio il fascio laser. [4]

La potenza del fascio laser è caratterizzata da:

- Coerenza del fascio: ovvero la fase dei fotoni si mantiene costante;
- Monocromaticità della banda di emissione;
- Alta direzionalità: ovvero il fascio emette la radiazione in un'unica direzione, che si traduce in una fornitura di energia in un punto ben preciso del letto di polvere.

Gli elementi necessari per la creazione di un fascio laser, che quindi costituiscono la sorgente del laser sono:

- Un mezzo attivo;
- Un meccanismo di eccitazione: che fornisce l'energia necessaria alla stimolazione del mezzo attivo;
- Una cavità ottica: dove avviene la generazione dei fotoni che formeranno il fascio laser;
- Un sistema di specchi: uno perfettamente riflettente e uno semi-trasmettente.

Se si considera un atomo eccitato che viene colpito da un fotone, questo perde energia (scende di livello energetico) ed emette un fotone identico a quello che lo ha colpito.

Ponendo all'interno di una cavità ottica il mezzo attivo tra due specchi, uno dei quali parzialmente trasmissivo e colpendo con un fotone un atomo del mezzo attivo mediante il meccanismo di eccitazione, questo emetterà un fotone uguale a quello colpito. I due fotoni presenti, quindi, andranno a impattare lo specchio che, per le proprietà riflessive, li farà tornare indietro andando a colpire altri due atomi che a loro volta formeranno altri due fotoni e così via. L'insieme di fotoni generati è proprio il fascio laser che attraversando lo specchio semi trasmettente esce dalla sorgente laser.

Esistono varie tipologie di fasci laser, caratterizzate dalla natura del mezzo attivo. Nelle macchine di selective laser sintering vengono utilizzati laser dove il mezzo attivo è allo stato gassoso, in particolare nella EOS GmbH FORMIGA P110 Velocis, macchina utilizzata in questo studio, il laser è a CO2.

2.1.4 Meccanismo di sinterizzazione

Il meccanismo di sinterizzazione è un insieme di fenomeni chimico-fisici che avviene grazie alle alte temperature che si sviluppano in seguito all'energia fornita dal laser, consiste nella fusione parziale dei granelli di polvere che si "addensano" tra loro in modo da formare un componente solido.

Le particelle di materiale accostandosi e compattandosi formano tra loro dei legami solidi senza però raggiungere la loro temperatura di fusione. Il processo avviene infatti in un range di temperature compreso tra $\frac{T_m}{2}$ e T_m , dove T_m è la temperatura di fusione del polimero, influenzato dalla natura del materiale di partenza da cui viene ottenuta la polvere e dalla granulometria della stessa. Affinché la sinterizzazione delle particelle abbia luogo è necessario compattare il più possibile i granelli di polvere gli uni con gli altri in modo da aumentare l'area di contatto che si viene a creare e minimizzare la porosità del componente finito.

Ipotizzando due granelli di polvere di forma perfettamente sferica è possibile descrivere il fenomeno: quando le particelle, messe a contatto, sono portate alle alte temperature i loro atomi tendono a diffondere nella zona di contatto andando a formare un collo o *neck region* che si ingrandisce al proseguire della diffusione atomica fino a quando le due particelle non formano un unico elemento.

Il processo può essere schematizzato in Figura 13 [4]:



FIGURA 13: FASI DEL PROCESSO DI SINTERIZZAZIONE TRA DUE PARTICELLE DI POLVERE POLIMERICA [4]

2.2 PARAMETRI DI PROCESSO NELLA TECNICA DI SELECTIVE LASER SINTERING

Il principio di funzionamento della tecnica di sinterizzazione selettiva mediante laser è concettualmente semplice da capire, nonostante ciò, per ottenere un risultato ottimale il settaggio della macchina mediante i parametri di processo non è semplice; infatti, un numero elevatissimo di parametri è coinvolto e influenza (in maniera e quantità diversa) la produzione della parte.

I fenomeni fisici coinvolti nel processo produttivo spaziano dai fenomeni ottici della radiazione laser, ai fenomeni relativi al trasferimento del calore, passando per i meccanismi fisico-chimici che interessano il materiale.

Per tenere conto quindi di tutto questo è necessario avere una conoscenza tecnica valida dei parametri di processo che risultano quindi essere le variabili di processo.

L'influenza di questi parametri viene studiata valutando le caratteristiche meccaniche e dimensionali delle parti prodotte.

Per il loro studio si usa il metodo del *trial and error*, basato sulla produzione di provini detti *Design of Experiments* (DoE): scelta una combinazione di parametri da analizzare e dei valori di ogni parametro, si producono un numero di provini dove ogni provino è una combinazione di valori dei parametri. Una volta prodotti, i provini saranno differenti l'uno dall'altro in termini qualitativi perché la loro produzione è stata influenzata dai valori impostati dei parametri scelti. In questo modo è possibile andare a valutare la combinazione migliore dei valori dei parametri per ottimizzare la produzione del pezzo finale.

I parametri di processo possono essere classificati nel seguente modo [2]:

- Parametri geometrici:
 - Hatch distance;
 - Spessore dello strato;
 - Strategia di scansione.
- Parametri relativi al materiale:
 - Densità apparente;
 - Conducibilità termica effettiva;
 - Capacità termica.
- Parametri relativi al laser:
 - Potenza laser;
 - Dimensione dello spot;
 - Scan size;
 - Velocità di scansione.

Si analizzano nel dettaglio alcuni dei parametri appena elencati [5,6]:

2.2.1 Hatch Distance

Lo schema di scansione è composto da linee di scansione parallele fra loro, la distanza tra due linee parallele è chiamata *hatch distance*. Questa distanza deve essere tale da permettere di avere una sinterizzazione omogenea dello strato, infatti, se è troppo grande, tra le due linee sinterizzate si ha del materiale non sinterizzato, ottenendo quindi una sezione non perfettamente compatta.

La *hatch distance* è solitamente minore della dimensione dello spot del fascio laser, in modo da avere un accavallamento, chiamato tecnicamente *overlapping* tra le due linee scansionate. Ciò permette di avere che le zone sinterizzate siano tutte "collegate" fra loro, ottenendo quindi l'omogeneità di sinterizzazione voluta. È possibile notare che all'aumentare della *hatch distance* la densità tende a diminuire, perché si hanno delle zone non sinterizzate di materiale che, una volta rimossa la polvere in eccesso, risulteranno essere dei vuoti. Bisogna dire che una *hatch distance* troppo piccola, esaspera il fenomeno di *overlapping*, si ha quindi che la polvere in quel punto verrebbe "scansionata" due volte dal laser, ricevendo quindi una quantità di calore che è superiore alla quantità necessaria alla sinterizzazione, ciò causerebbe la fusione totale della polvere che comporterebbe una disomogeneità della superficie.

Nella seguente immagine (Figura 14 [6]) è possibile vedere in dettaglio l'hatch distance:



FIGURA 14: SCHEMATIZZAZIONE DELL'HATCH DISTANCE [6]

2.2.2 Spessore dello strato

Lo spessore dello strato è il parametro che indica l'altezza dello strato di polvere depositato dal roller, corrisponde allo *slicing* fatto dal software nel file STL; quindi, tutte le considerazioni fatte sullo *slicing* valgono anche per questo parametro [7].

Lo spessore è limitato dalla capacità di sinterizzare del laser; infatti, quest'ultimo deve sinterizzare lo strato di polvere depositato per tutta la sua altezza e in più deve unire lo strato che sta sinterizzando con quello precedente.

Si può quindi affermare che lo spessore dello strato influenza l'errore di *staircase*, risulta quindi essere un parametro fondamentale nella caratterizzazione dimensionale del pezzo, infatti, uno spessore minimo garantisce una migliore accuratezza dimensionale e una rugosità più bassa.

2.2.3 Strategia di scansione

La strategia di scansione indica la traiettoria seguita dal laser durante la sinterizzazione della polvere, questo parametro influisce nel tempo necessario alla produzione della parte ma in particolar modo caratterizza la distribuzione del calore sulla superficie [6,7].

Tutti questi aspetti confluiscono nella caratterizzazione dimensionale del pezzo in particolar modo sulla rugosità.

È possibile attuare varie strategie di scansione che prevedono ad esempio prima la sinterizzazione del contorno e poi la sinterizzazione della zona interna della sezione che può essere fatta seguendo delle linee parallele oppure facendo un offset del contorno come è possibile vedere in Figura 15 [7]:



FIGURA 15: STRATEGIE DI SCANSIONE [7]

È possibile anche impostare per ogni strato una determinata strategia di scansione; nel caso di studio di questa tesi è stata impostata l'alternanza strato per strato della traiettoria di scansione, come mostrato nella terza immagine della Figura 16 [6]:



FIGURA 16: STRATEGIE DI SCANSIONE, È POSSIBILE NOTARE NELLA FIGURA (C) SI HA UN'ALTERNANZA DELLA DIREZIONE DI SCANSIONE STRATO PER STRATO [6]

2.2.4 Potenza Laser

La potenza laser può essere definita in due modi: come l'energia del fascio laser per unità di tempo oppure come la distribuzione della densità di potenza del fascio laser. In entrambi i casi si riferisce all'energia fornita dal laser. Si definisce come densità di potenza perché può essere associata all'irradianza [5].

La densità di energia, elemento caratteristico del processo, è basata infatti sulla potenza laser e l'area irradiata dal laser stesso, quest'ultima risulta quindi essere uno dei parametri più importanti da considerare; infatti, determina la qualità di sinterizzazione e quindi la porosità finale del pezzo. Sperimentalmente si è formulata un'equazione che permette di valutare la potenza del laser in funzione degli altri parametri di processo:

$$P = \frac{BS \cdot \rho \cdot D_b \cdot h \cdot \left[C \cdot (T_m - T_b) + l_f\right]}{(1 - R)}$$

EQUAZIONE 1: EQUAZIONE CHE ESPRIME LA POTENZA DEL LASER [5]

Dove:

- BS è lo scan size;
- ρ è la densità della polvere;
- D_b è il diametro del fascio laser, cioè la dimensione dello spot;
- h è l'altezza dello strato;
- C è il calore specifico;
- T_m è la temperatura di fusione del materiale;
- T_b è la temperatura del letto di polvere;
- l_f è il calore latente di fusione;
- *R* è la frazione della luce laser riflessa dalla polvere.

Nella Figura 17 [6] vengono invece mostrati gli effetti della potenza laser in relazione allo strato sinterizzato. Come è possibile vedere una potenza "bassa" non permette la completa sinterizzazione del *layer*, d'altro canto una potenza eccessiva oltre a sinterizzare il *layer* appena depositato, va ad agire sullo strato precedentemente realizzato andando a ri-sinterizzare lo strato precedente.

Nonostante ciò, sia necessario per permettere l'adesione tra strati adiacenti, questa ri-sinterizzazione non deve essere esasperata in quanto vengono a crearsi degli effetti termici che compromettono la qualità del pezzo.



FIGURA 17: INTERAZIONE DEL FASCIO LASER CON LO STRATO DI POLVERE [6]

2.2.5 Dimensione dello spot

La dimensione dello spot (*beam laser*) è definita come il diametro del fascio laser. Questo parametro è collegato come detto prima alla *hatch distance*, e come per quest'ultima ha effetti sull'accuratezza dimensionale finale della parte prodotta [6,7].







FIGURA 19: DIMENSIONE DELLO SPOT MAGGIORE DEL DIAMETRO DEL FASCIO LASER [6]



FIGURA 20: DIMENSIONE DELLO SPOT UGUALE AL DIAMETRO DEL FASCIO LASER [6]

Come è possibile vedere nelle Figure 18, 19 e 20 [6] la dimensione dello spot e del fascio laser sono collegate fra loro e questa relazione influenza la sinterizzazione dello strato di polvere depositato. Uno spot maggiore del diametro genera dei "vuoti" di sinterizzazione che ovviamente generano una sinterizzazione non ottimale; invece, uno spot troppo piccolo genera dei problemi di ri-sinterizzazione che può causare problematiche analoghe a quelle che si hanno con una potenza laser eccessiva.

2.2.6 Velocità di scansione

La velocità di scansione è la velocità con cui si muove il laser all'interno del letto di polvere, questo è un parametro fondamentale in quanto: una velocità eccessiva causa una sinterizzazione non di qualità (è possibile ottenere zone non sinterizzate), una velocità bassa di contro potrebbe causare un apporto di calore eccessivo nella zona che potrebbe portare alla fusione della polvere termoplastica [5].

Quindi, sulla parte, la velocità di scansione influisce in termini di densità e porosità del pezzo.

2.2.7 Scan Size

Lo *Scan Size* esprime la risoluzione del laser, ovvero in uno step di tempo, il movimento minimo che riesce a eseguire il laser, permette di calcolare la velocità di scansione [5].

2.2.8 Densità di energia

Come detto molti parametri definiscono la grandezza fondamentale per il processo, ovvero la densità di energia [5].

Sperimentalmente si è formulata, come per la potenza laser, una formulazione che esprime la densità di energia, cioè:

Densità di Energia =
$$\frac{P}{v \cdot h}$$

EQUAZIONE 2 : EQUAZIONE CHE ESPRIME LA DENSITÀ DI ENERGIA [5]

Dove:

- *P* è la potenza del laser;
- *v* è la velocità di scansione;
- *h* è la *hatch distance*.

Come è possibile vedere quindi vi è una diretta proporzionalità della densità di energia con la potenza laser e proporzionalità inversa con la velocità di scansione e la *hatch distance*: all'aumentare dell'*hatch distance* è noto che non si ha una buona sinterizzazione, perché come detto precedentemente non si ha un quantitativo di energia tale da innescare il fenomeno [5].

2.3 EFFETTI TERMICI SULLA COSTRUZIONE DEI COMPONENTI

Il processo di selective laser sintering prevede la sinterizzazione della polvere grazie alla quantità di calore apportata dal fascio laser, si evince quindi che gli aspetti termici ricoprono un ruolo fondamentale all'interno del processo in quanto influenzano: le proprietà meccaniche, l'accuratezza dimensionale e la finitura superficiale dei componenti realizzati.

Quando il laser è in funzione si hanno degli scambi termici di tipo conduttivo e convettivo che coinvolgono: il primo la superficie del letto di polvere e gli strati sottostanti al letto di polvere dove è già stata sinterizzata la sezione del pezzo, mentre il secondo l'ambiente della camera di lavoro [8].

La proprietà che sta alla base di questi scambi termici è la diffusività termica α esprimibile come:

$$\alpha = \frac{k_{th}}{\rho c}$$

EQUAZIONE 3: EQUAZIONE DELLA DIFFUSIVITÀ TERMICA

con:

- k_{th} è la conducibilità termica;
- ρ è la densità del materiale;
- c è la capacità termica.

La conducibilità termica e la capacità termica del materiale sono dei parametri che quindi vanno a influenzare direttamente gli scambi termici, questi però risultano essere estremamente complessi da valutare, per questo motivo vengono valutati sperimentalmente utilizzando dei modelli fisico matematici come, ad esempio, quello di Yagui e Kunni per la valutazione della conducibilità termica [9]:

$$k_{th} = \frac{\mu k_s}{1 + \phi \frac{k_s}{k_g}}$$

EQUAZIONE 4: MODELLO DI YAGUI E KUNNI

dove:

- Ks è la conducibilità del materiale solido
- Kg è la conducibilità dell'aria
- ϕ è un coefficiente empirico
- μ è la frazione solida

Numerosi studi hanno affrontato l'aspetto relativo agli effetti termici, partendo dalla creazione di modelli termici computazionali, confrontati sperimentalmente con quelli all'interno della macchina.

Quello che si ottiene è un modello termico, dove gli elementi che hanno maggiore influenza sia sul processo che sulla qualità dei pezzi risultano essere [9]:

- Un gradiente di temperatura superficiale nel letto di polvere;
- Un gradiente di temperatura all'interno del volume di polvere sinterizzata.

2.3.1 Gradiente di temperatura superficiale nel letto di polvere

Il gradiente di temperatura superficiale nel letto di polvere è influenzato da due aspetti: il primo dovuto principalmente all'azione del laser; infatti, si ha un picco di temperatura in corrispondenza dello spot e valori di temperatura più bassa nel suo intorno.

È possibile vedere tridimensionalmente il gradiente di temperatura dovuto allo spot del laser in Figura 21 [10]:



FIGURA 21: DISTRIBUZIONE DEL CALORE SUL LETTO DI POLVERE [10]

Il secondo aspetto che influenza il gradiente di temperatura che si ha sul letto di polvere è dovuto alle caratteristiche strutturali stesse della macchina [8]: i macchinari che eseguono la sinterizzazione laser sono equipaggiati da dei riscaldatori che funzionando come delle resistenze elettriche permettono la fornitura di calore al letto di polvere, mediante scambi termici convettivi, al fine: di mantenere costante la temperatura nella camera di lavoro e di preriscaldare il letto di polvere che strato per strato viene depositato dal roller.

Nell'analisi presa come riferimento [10] la posizione di questi riscaldatori è sopra, ma ai lati della piattaforma di stampa, quindi, come è possibile vedere in Figura 22, si ha una distribuzione non uniforme del calore che genera il gradiente termico superficiale:



FIGURA 22: DISTRIBUZIONE NON UNIFORME DEL CALORE [8]

Per ovviare a questo problema la EOS ha progettato la Formiga P110 Velocis ponendo i riscaldatori al centro sopra il letto di polvere ai lati del sistema di specchi del laser, nonostante si abbia una diminuzione della non uniformità della distribuzione del calore, si ha comunque che al centro della piattaforma di stampa si raggiungono valori di temperatura più elevati rispetto ai valori nel perimetro [35].

Inoltre, durante il passaggio del laser per eseguire la sinterizzazione locale, si hanno dei picchi di temperatura nelle zone interessate, ciò crea un ulteriore gradiente termico. In maniera analoga quando viene depositato un nuovo strato di polvere, si ha un abbattimento della temperatura come è possibile valutare nel grafico della Figura 23 [8]:



FIGURA 23: ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA SULLA PIATTAFORMA DI STAMPA [8]

2.3.2 Gradiente di temperatura all'interno del volume di polvere sinterizzata

Il secondo gradiente termico, ovvero quello che si manifesta all'interno del blocco di polvere è dovuto al progressivo raffreddamento che si ha procedendo con la deposizione degli strati di polvere.

Ogni strato di polvere depositato contribuisce al progressivo raffreddamento degli strati sottostanti raffreddamento che risulta inoltre essere diverso tra il centro della piattaforma di stampa e l'estremità come mostrato nei grafici in Figura 24:



FIGURA 24: ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA ALL'INTERNO DEL BLOCCO DI POLVERE

A causa di questo gradiente si ha che il componente subisce un raffreddamento non omogeneo, ciò influisce in sull'anisotropia delle proprietà, risulta quindi evidente come questo effetto termico sia correlato al posizionamento del pezzo all'interno del volume di lavoro [12].

2.3.3 Shrinkage e Curling

I due gradienti termici appena descritti determinano una condizione di non omogeneità della distribuzione della temperatura, in particolar modo nel letto di polvere. Questo causa due fenomeni: lo *shrinkage* e il *curling*, che sono i principali responsabili della non accuratezza dimensionale delle parti prodotte con la tecnica di selective laser sintering [13].

Lo *shrinkage* è il fenomeno di ritiro della polvere sinterizzata a causa della temperatura di costruzione, oltre ad essere influenzato da due parametri di processo fondamentali come la densità di energia e lo spessore dello strato di polvere, è dovuto principalmente all'aumento della densità nel momento in cui la polvere viene sinterizzata e quindi solidificata.

Come detto in precedenza la temperatura nella camera di costruzione viene portata appena sotto il punto di fusione della polvere mediante i riscaldatori, ma, a causa della loro posizione si genera una non omogeneità della distribuzione di temperatura che si traduce in una disomogeneità del tasso di ritiro in relazione alla posizione in cui viene costruito il componente sulla piattaforma [14].

Lo *shrinkage* avviene durante la fase di cristallizzazione del polimero è quindi necessario che la temperatura di fusione sia considerevolmente più alta di quella di ricristallizzazione in modo da ritardare la ricristallizzazione stessa e permettere agli strati di legarsi uniformemente tra loro [15].

Dall'evidenza sperimentale è noto che lo *shrinkage* tende a manifestarsi in maniera maggiore nelle zone ad alta temperatura rispetto alle zone a temperature basse, dove il ritiro è minore; inoltre, geometrie caratteristiche come pareti o sezioni spesse favoriscono lo *shrinkage*, per questo motivo risulta ancora una volta essere determinate il posizionamento del pezzo all'interno della macchina. [16].

Per limitare l'effetto di restringimento è opportuno agire sul fattore di scala in ogni direzione del file STL [17].

La calibrazione dell'effetto di scala è basata sull'ipotesi semplificativa di restringimento uniforme in tutte le direzioni del pezzo.

Indicando con s il tasso di *shrinkage*, si definisce *near-zero shrinkage* una polvere che presenta il minimo fenomeno di restringimento ovvero:

- s = 0 *near-zero shrinkage*: il pezzo non altera le sue dimensioni rispetto al modello CAD;
- s < 0: il pezzo è soggetto al fenomeno di restringimento;
- s > 0: il pezzo è soggetto a una dilatazione.

A questo punto è possibile definire il fattore di scala *k* come:

$$k = \frac{1}{1+s}$$

EQUAZIONE 5: FATTORE DI SCALA

Questo parametro deve essere impostato in fase di preparazione del job insieme ai parametri di processo scelti. La EOS GmbH fornisce per tutti i materiali che realizza un valore preciso di fattore di scala da impostare per minimizzare lo *shrinkage*.

Il secondo fenomeno è il fenomeno di *curling*: una volta dopo aver sinterizzato uno strato di polvere, ne viene depositato uno successivo. ripetendo questi passaggi, si verifica la distorsione (incurvatura o arricciamento) a causa dei diversi tassi di restringimento delle zone superiore e inferiore dello strato sinterizzato dove esistono temperature diverse tra un'area sinterizzata e un'area non sinterizzata, o tra uno strato sinterizzato e uno strato di polvere appena posato [14].

Il fenomeno del curling può verificarsi anche in fase di post-costruzione, per limitarlo risulta essere quindi di fondamentale importanza il controllo della velocità di raffreddamento [18].

2.4 MATERIALI UTILIZZATI PER LA TECNICA DI SELECTIVE LASER SINTERING

La tecnica di selective laser sintering è basata sulla sinterizzazione del materiale sottoforma di polvere.

La realizzazione di questo stato fisico del materiale presenta un costo non indifferente e richiede delle tecnologie e un personale estremamente qualificato, nonostante sia un processo più semplice ed economico rispetto alle polveri metalliche. Questi aspetti sono dovuti al fatto che alle polveri è richiesta una forma il più sferica possibile per favorire il processo di sinterizzazione ma anche per evitare disomogeneità durante la fase di stesura sul letto di polvere.

Ad oggi molte case produttrici delle macchine, si occupano anche della fornitura del materiale, "creando" materiali che presentano delle caratteristiche che permettono di sfruttare al meglio le performance delle macchine e quindi di ottenere dei pezzi qualitativamente migliori. Ovviamente, il materiale della casa produttrice della macchina ha un costo superiore rispetto a un materiale prodotto da terzi [4].

La tecnica di selective laser sintering consente l'utilizzo sia di materiali polimerici che di materiali compositi, la cui matrice è sempre in materiale polimerico.

A livello atomico le strutture polimeriche sono strutturate come ripetizione di "unità fondamentali" come il Polietilene (PE), il Polivinilcloruro (PVC) o il Polipropilene (PP), dalla cui complessità derivano le proprietà fisiche del polimero stesso.

In Figura 25 si mostrano le principali unità fondamentali dei polimeri [4]:



FIGURA 25: UNITÀ FONDAMENTALI DI POLIETILENE (A), POLIVINILCLORULO (B) E POLIPROPILENE (C) [4]

Il materiale polimerico è di tipo termoplastico e la sua proprietà principale è la Temperatura di Transizione Vetrosa T_g che è la temperatura oltre il quale il materiale presenta un calo repentino del suo valore di modulo elastico, inoltre si ha una variazione delle altre proprietà come la conducibilità termica, il calore specifico e la densità [5].

Il polimero più utilizzato nell'ambito della fabbricazione additiva è sicuramente il Nylon (poliammide 12) in quanto le sue caratteristiche permettono di ottenere dei pezzi con una buona rigidezza resistenza meccanica.

Il PA2200, ovvero il poliammide12 di colore bianco prodotto dalla EOS, è un materiale estremamente versatile in quanto può essere arricchito con dei materiali che permettono di ottenere delle proprietà specifiche. Le sue proprietà sono le seguenti [19]:

- Modulo di Young (E): 1650 MPa;
- Resistenza a trazione (TS): 48 MPa;
- Elongazione: 18%;
- Densità (ρ): 930 kg/m^3.

Per questa tesi si è deciso però di considerare come materiale l'Alumide®, ovvero un materiale composito prodotto dalla casa EOS GmbH composto dalla matrice in PA2200 arricchito da particelle di alluminio. Questo materiale può essere utilizzato in diversi modelli di macchine della EOS.

Quando la polvere di Alumide viene processata all'interno del processo di sinterizzazione laser, le particelle di poliammide vengono fuse insieme dal laser creando la matrice del composito, dove le particelle di alluminio vengono intrappolate [20].

L'Alumide è stato originariamente introdotto come materiale di prototipazione alternativo più rigido alla poliammide pura, poiché ha un modulo di flessione più che doppio. Tuttavia, l'alta rigidità, l'aspetto semi-metallico e le buone possibilità di post-elaborazione del materiale lo hanno presto portato ad essere utilizzato in altre applicazioni, tra cui parti metalliche simulate, modelli di gallerie del vento e inserti per stampi ad iniezione sino alla gioielleria dove viene utilizzato per la realizzazione di collane, braccialetti, orecchini e anelli [20].
Nell'ingrandimento al microscopio elettronico mostrato in Figura 26 è possibile vedere come si presenta la polvere di Alumide prima della sinterizzazione, qui è possibile notare le particelle di poliammide (PA) e le particelle di Alluminio (Al) [21]:



FIGURA 26: MICROGRAFIA ELETTRONICA DELL'ALUMIDE [21]

Risulta essere interessante mostrare le micrografie di due campioni sinterizzati con la tecnica di SLS: il primo Figura 27 (a) è un campione realizzato in pura poliammide (Nylon) mentre il secondo Figura 27 (b) è realizzato in Alumide [22]:



FIGURA 27: MICROGRAFIA DI CAMPIONI REALIZZATI IN PA2200(A) E ALUMIDE (B)

Come si può osservare ciò che differenzia i due provini è la presenza delle particelle di alluminio che rinforzano la matrice polimerica, permettendo quindi di avere delle performance non ottenibili con il materiale polimerico.

L'Alumide presenta le seguenti proprietà meccaniche [19]:

- Modulo di Young (E): 3800 MPa;
- Resistenza a trazione (TS): 48 MPa;
- Elongazione: 4%;
- Densità (ρ): 1360 kg/m^3.

Rispetto al PA12 si hanno dei valori di modulo di Young (E) e densità (ρ) superiori che permettono di ottenere delle rigidezze superiori. L'Alumide ha anche una buona resistenza alle alte temperature; quindi, può essere usato per applicazioni a elevate temperature [19].

Vari studi hanno permesso di caratterizzare l'Alumide, mediante la realizzazione di campioni per la valutazione delle proprietà meccaniche e dimensionali (anche in relazione all'orientamento dei provini).

Eseguendo dei test termo-gravimetrici, è stato possibile verificare, come mostrato dal grafico in Figura 28 che l'Alumide, in comparazione alla poliammide pura e alla poliammide legata con una lega di alluminio (Al₂O₃) presenta una perdita di massa pari al 48% oltre una certa temperatura, ma che risulta essere molto inferiore rispetto agli altri due materiali [21].



FIGURA 28: ANDAMENTO DELLA % DI PERDITA DELLA MASSA ALL'AUMENTARE DELLA TEMPERATURA

Ciò spiega l'ottima resistenza alle alte temperature che questo materiale composito offre.

Confrontando l'Alumide con la semplice Poliammide è anche possibile notare come l'Alumide risenta meno dell'effetto dell'orientamento del campione in macchina in termini di tensione-deformazione rispetto il PA12 [21].



FIGURA 29: PROVE DI TRAZIONE DI CAMPIONI IN PA12 E ALUMIDE

A dimostrazione di ciò, come mostrato in Figura 29, producendo i provini con inclinazioni tra loro diverse sul piano di lavoro e confrontando le prove di trazione ottenute per ogni inclinazione, si può chiaramente vedere come l'Alumide presenti un andamento praticamente uguale delle curve σ - ϵ al variare del posizionamento, cosa che non accade per la poliammide in particolare per la curva relativa alla posizione lungo l'asse Z.

L'utilizzo del Alumide come materiale per la produzione consente infine di ottenere un processo più stabile, in quanto le sue proprietà elastiche, considerando varie inclinazioni dei campioni, presentino una bassa variabilità rispetto al PA2200 [23].

Un aspetto interessante l'Alumide è quello mostrato nel caso di studio presentato da: J. Combrinck, G.J. Booysen, J.G. van der Walt e D.J. de Beer [24] dove viene valutato l'Alumide come materiale per la realizzazione di inserti per utensili al posto di componenti realizzati in metallo con la tecnica di directal metal laser sintering.

Analizzando le proprietà meccaniche e l'accuratezza dimensionale dei provini realizzati, dallo studio è emerso che i campioni presentano delle proprietà meccaniche discrete e una accuratezza dimensionale che rientra nelle tolleranze previste (considerando che questi aspetti sono influenzati dall'orientamento, peculiarità della tecnica di SLS), ma soprattutto si ha un vantaggio in termini economici e in termini di *time saving* [24].

2.5 VANTAGGI E SVANTAGGI DELLA TECNICA DI SELECTIVE LASER SINTERING

2.5.1 Vantaggi della tecnica

I vantaggi della tecnica di selective laser sintering sono [1]:

- Tolleranze dimensionali e rugosità superficiali buone;
- Possibilità di saturare completamente il volume di lavoro: infatti non essendo teoricamente necessari i supporti, essendo i pezzi molto più leggeri rispetto a quelli realizzati in materiale metallico e soprattutto grazie al fatto che la polvere viene compattata strato per strato è possibile mettere i pezzi uno sopra l'alto, andando quindi a saturare l'asse z della macchina;
- Possibilità di inserire nuovi pezzi anche a Job avviato;
- Assenza di supporti;
- Assenza di post-trattamento: è il vantaggio caratteristico della fabbricazione additiva perché il materiale è definitivo, l'unica cosa che è necessaria fare è la pulizia del pezzo dalla polvere residua
- Pochi vincoli di installazione: a differenza delle tecniche che operano con polveri metalliche che sono nocive per il corpo umano e quindi richiedono di essere installati in ambienti adatti con il personale tecnico costretto a usare strumenti protettivi;
- Possibilità di usare polveri riciclate combinate con polveri vergini.

2.5.2 Svantaggi della tecnica

Gli svantaggi della tecnica di selective laser sintering sono [1]:

- Limitata disponibilità di materiali;
- Tempi lunghi per il cambio di materiale in macchina: infatti nel caso bisogni cambiare il materiale in macchina bisogna pulire alla perfezione i serbatoi, la piastra di costruzione e il roller per evitare di contaminare il Job con la polvere del Job precedente;
- Tempi di raffreddamento del blocco di polvere al termine del Job.

CAPITOLO 3: REALIZZAZIONE DEI PROVINI PER LA CARATTERIZZAZIONE DIMENSIONALE

3.1 DESCRIZIONE DELLA NORMATIVA

Il seguente lavoro di tesi è focalizzato sulla caratterizzazione dimensionale dei provini stampati con la tecnica di fabbricazione additiva ampiamente descritta in precedenza.

Per le tecniche di fabbricazione additiva, la normativa che regola la caratterizzazione dimensionale è la normativa ISO/ASTM 52902:2019(E) [25].

La normativa non fornisce alcuna indicazione specifica sulla tecnica di produzione e sul metodo di valutazione delle caratteristiche dimensionali, ma consiglia di eseguire almeno tre repliche per ogni componente.

La normativa fornisce e descrive i componenti da realizzare e la loro funzione. Mediante questa tecnica è possibile caratterizzare il sistema di AM in esame valutando:

- Accuratezza dimensionale;
- Finitura superficiale;
- Feature of size (FOS) dei provini.

I componenti vengono forniti ognuno in tre varianti, differenti fra loro per dimensione: "F" le più piccola, "M" la media ed "C" la più grande.

Il formato con cui vengono forniti è il formato. STEP che è stato convertito in formato STL mediante il software Solidworks[©].

I componenti sono stati realizzati con la tecnica di SLS, con materiale l'Alumide® e sono:

• Linear Artifact (LA): il seguente componente permette la valutazione dell'accuratezza lineare con cui viene realizzato il pezzo, si valuta: la perpendicolarità tra le superfici delle parti sporgenti e l'accuratezza nel riprodurre la corretta distanza tra quest'ultime;



FIGURA 30: DIMENSIONI DEL LINEAR ARTIFACT [25]

• **Circular Artifact (CA):** il seguente componente permette di valutare l'accuratezza con cui vengono prodotte superfici circolari, viene quindi valutata la tolleranza geometrica di circolarità. La dimensione scelta è la dimensione media (M);



FIGURA 31: DIMENSIONI DEL CIRCULAR ARTIFACT [25]

• Resolution Pins (RP_C_LD4): il seguente componente permette di valutare l'accuratezza nel riprodurre superfici cilindriche e sezioni fini, si valutano quindi la tolleranza geometrica di cilindricità e l'accuratezza nel riprodurre l'altezza e il diametro dei vari cilindri. La dimensione scelta è la dimensione massima (C) con il set di altezze dei cilindri più basse;



FIGURA 32: RESOLUTION PINS [25]

• **Resolution Holes (RH_C):** il seguente componente permette di valutare la minima feature cilindrica riproducibile intesa come l'abilità nel riprodurre il foro con il diametro più piccolo possibile; quindi, anche per questo componente viene valutata la tolleranza geometrica di cilindricità applicata però al foro. La dimensione scelta è la dimensione massima (C);



FIGURA 33: RESOLUTION HOLES [25]

Resolution Ribs (RR_C_10mm): il seguente componente permette la valutazione della capacità di riprodurre sezioni sottili da parte della macchina di FA, vengono quindi valutati lo spessore la lunghezza e l'altezza del *rib*. La dimensione scelta è la dimensione massima (C) con l'altezza del *rib* pari a 10 mm (valore più basso);



FIGURA 34: RESOLUTION RIBS [25]

Resolution Rib Round (RRR_C_10mm): il seguente componente è una versione alternativa al *Resolution Ribs* che permette la valutazione anche della capacità di creare superfici curve e raccordi. La dimensione scelta è la dimensione massima (C) con l'altezza del *rib* pari a 10 mm (valore più basso);



FIGURA 35: DIMENSIONI DEL RESOLUTION ROUND RIBS [25]

• Resolution Slot (RS_C_10mm): il seguente componente permette la valutazione della capacità di riprodurre con la macchina di FA spessori decrescenti, si valuta inoltre la tolleranza di parallelismo tra le superfici dei denti. La dimensione scelta è la dimensione massima (C) con l'altezza della dentatura pari a 10 mm (valore più basso);



FIGURA 36: RESOLUTION SLOT [25]

• **Resolution Slot A (RSA_C_10mm):** il seguente componente è una versione alternativa al *Resolution Slot*, dove i denti presentano un'inclinazione, che permette la valutazione della capacità da parte della macchina di FA di riprodurre superfici inclinate rispetto al piano. La dimensione scelta è la dimensione massima (C) con l'altezza della base della dentatura pari a 10 mm (valore più basso);





FIGURA 37: RESOLUTION SLOT A [25]

FIGURA 38: VALORI DI INCLINAZIONE DEI DENTI DEL RESOLUTION SLOT A [25]

• Surface Texture (ST_M): il seguente componente permette la valutazione della finitura superficiale al variare dell'inclinazione della superficie analizzata rispetto al piano orizzontale. La dimensione scelta è la dimensione media (M).



FIGURA 39: SURFACE TEXTURE [25]



FIGURA 40: VALORI DI INCLINAZIONE DELLE SUPERFICI DEL SURFACE TEXTURE [25]

3.2 REALIZZAZIONE DEI COMPONENTI

Una volta scaricati i file in formato STEP dei campioni dal sito ufficiale della ASTM, si è proceduto alla conversione di questi in file con formato STL. Questi ultimi sono stati inseriti all'interno del software Magics[©] che permette di disporre i provini all'interno del volume di lavoro della macchina usata.

Definito quindi il posizionamento e l'orientamento dei campioni all'interno del volume di lavoro con software appositi è stato eseguito lo *slicing* ottenendo dei *layer* dallo spessore costante pari a 0.1 mm.

Prima di avviare il processo di stampa dei componenti sono stati inseriti i parametri di processo scelti per eseguire la caratterizzazione dimensionale ovvero:

I parametri di *hatching*:

- Hatch distance: 0.3 mm;
- Velocità di scansione: 2500 mm/s;
- Potenza: 25 W.

I parametri di *contour*:

- Velocità di scansione 1500 mm/s;
- Potenza 16 W.

Il tempo di preriscaldamento del letto di polvere è stato settato a 10 s.

La produzione è stata suddivisa principalmente in due Job: il primo, dove sono state riprodotte due repliche di tutti i componenti ad esclusione del *Linear Artifact* (LA) e del *Resolution Rib Round* (RRR) Nella seconda fase sono invece state realizzate le terze repliche di tutti i componenti e le repliche dei componenti *Linear Artifact* (LA) e *Resolution Rib Round* (RRR).

Nel primo job i campioni sono stati orientati con una inclinazione di 10° in senso antiorario attorno l'asse Z per minimizzare la zona di contatto tra la racla e il *contour* della sezione sinterizzata; si è infatti visto che in presenza di una zona di contatto estesa, la lama del *recoater*, durante la fase di stesura del successivo strato di polvere, tende a trascinare con sé la sezione appena sinterizzata.

Per il primo job si è utilizzata una polvere non vergine.

La disposizione dei provini all'interno del volume di lavoro della macchina è mostrata in Figura 41:



FIGURA 41: DISPOSIZIONE DEI COMPONENTI DEL JOB SU MAGICS

Nel secondo job si è deciso di orientare i provini non più con l'inclinazione uguale per tutti e pari a 10° come fatto nel primo job, ma, ogni pezzo è stato inclinato con una determinata inclinazione (fino a 45°) in base alla sua posizione all' interno della piattaforma di stampa.

Si è deciso di adottare questa configurazione in quanto si è visto che con l'inclinazione di 10° i problemi di trascinamento delle sezioni da parte della racla erano ancora presenti; ogni pezzo, quindi, è stato inclinato in base alle sue dimensioni e alla sua geometria in modo da minimizzare l'area di contatto.

Inoltre, assegnando ai campioni varie inclinazioni è stato possibile posizionare più centralmente i provini rispetto alla piattaforma di stampa, minimizzando quindi gli effetti dei gradienti termici in termini di *curling*.

Per il secondo job si è infine scelto di caricare in macchina una polvere vergine.

La disposizione dei campioni all'interno del volume di lavoro della macchina è mostrata in Figura 42:



FIGURA 42: DISPOSIZIONE DEI COMPONENTI DEL JOB SU MAGICS

3.3 ANALISI DEI CAMPIONI PRODOTTI

Una volta completati i job i blocchi di polvere sono stati lasciati raffreddare e successivamente alle operazioni di pulizia e pallinatura si sono analizzati visivamente i campioni che hanno evidenziato i seguenti difetti superficiali:

• CA_M_INF: primo strato non perfettamente aderente;



FIGURA 43: SCARSA ADESIONE DEL LAYER SUL COMPONENTE CIRCULAR ARTIFACT

• **RSA_C_10mm_INF:** base rovinata;



FIGURA 44: DIFETTO SUPERFICIALE SUL COMPONENTE RESOLUTION SLOT A

• **RS_C_10mm_INF:** difetti di sinterizzazione della polvere circostante alla sezione del pezzo;



FIGURA 45: DIFETTO SUPERFICIALE SUL COMPONENTE RESOLUTION SLOT

• **RR_C_10mm_SUP:** scarsa adesione di vari strati e conseguente deformazione della base del pezzo;



FIGURA 46: SCARSA ADESIONE TRA I LAYERS SUL COMPONENTE RESOLUTION RIBS

• **ST_M_INF:** *label* rovinata;



FIGURA 47: DIFETTI DOVUTI ALLA PRESENZA DELLE LABEL SUL COMPONENTE SURFACE TEXTURE

• **ST_M_SUP:** strati poco aderenti tra loro e difetti di sinterizzazione;



FIGURA 48: DIFETTI SUPERFICIALI SUL COMPONENTE SURFACE TEXTURE



FIGURA 49: DIFETTI SUPERFICIALI SUL COMPONENTE SURFACE TEXTURE

• **RH_C_SUP:** foro con diametro minimo cieco;



FIGURA 50: FORO MANCANTE NEL COMPONENTE RESOLUTION HOLES

• **RP_C_LD4_INF:** albero 5 (diametro minimo) mancante e albero 4 non aderente alla base;



FIGURA 51: DIFETTI SULLA REALIZZAZIONE DEGLI ALBERI NEL COMPONENTE RESOLUTION PINS

• **RP_C_LD4_SUP:** albero 5 (diametro minimo) mancante.



FIGURA 52: ASSENZA DELL'ALBERO NEL COMPONENTE RESOLUTION PIN

Questi difetti presenti sui campioni sono strettamente collegati alle problematiche che caratterizzano il processo produttivo; inoltre, più volte è stato necessario interrompere la stampa a causa di distaccamento parziale o totale delle sezioni appena sinterizzate. Queste sezioni sono state trascinate dalla racla, andandosi spesso a sovrapporsi sulle altre sezioni realizzate andando quindi a contaminare irreversibilmente il job e conseguentemente la qualità superficiale dei campioni.

È possibile vedere questo fenomeno nelle Figure da 53 a 56:





FIGURA 54: DISTACCAMENTO DELLA SEZIONE E TRASCINAMENTO CON LA RACLA

FIGURA 53: DISTACCAMENTO DELLA SEZIONE E TRASCINAMENTO DELLA PARTE CON LA RACLA



FIGURA 55: DIFETTI SUPERFICIALI SUL LETTO DI POLVERE



FIGURA 56: DISTACCAMENTO E TRASCINAMENTO DELLA SEZIONE

Le problematiche sopracitate sono da attribuire a molteplici fattori, in particolare per la fase produttiva, è necessario porre l'attenzione sulla qualità della polvere in termini di percentuale di riutilizzo di quest'ultima e sull'orientamento e il posizionamento dei componenti all'interno della macchina.

Una delle peculiarità della tecnica di SLS è la possibilità di riutilizzare la polvere che non è stata sinterizzata durante un job; infatti, non tutta la polvere caricata in macchina e depositata sulla piattaforma di stampa viene utilizzata. Quella non coinvolta nel processo di sinterizzazione viene quindi recuperata, setacciata e riutilizzata come polvere non vergine [26].

Solitamente nei processi produttivi si tende a utilizzare un mix formato dal 50% di polvere vergine e 50% di polvere riciclata, ma è possibile aumentare la percentuale di polvere non vergine per un maggiore risparmio economico. D'altro canto, un maggiore utilizzo di polvere non vergine comporta degli svantaggi che influiscono negativamente sul processo.

Già dalla fase di deposizione dello strato di polvere è stato possibile notare una stesura non ottimale della polvere come mostrato in Figura 57:



FIGURA 57: DIFETTO DI STESURA DELLA POLVERE

Come è possibile vedere il letto di polvere disteso dalla racla non è uniforme, ma presenta, soprattutto negli estremi della piattaforma di stampa, delle striature.

Si è pensato che questo aspetto potesse essere dettato dalla non uniforme distribuzione del calore che, come detto, a causa delle caratteristiche costruttive della macchina risulta essere minore nelle estremità della piattaforma. Per ovviare quindi al problema di è deciso di agire sul tempo di preriscaldamento del letto di polvere ottenendo in effetti dei miglioramenti per quanto riguarda la stesura della polvere. È dimostrato in letteratura, infatti, che i complessi gradienti di temperatura coinvolti nel processo modificano e deteriorano irreversibilmente la natura strutturale e morfologica del materiale di partenza da cui si è ottenuta polvere, oltre a comprometterne la *flowability* e che causa quindi difficoltà nella fase di stesura [27].

Quindi più una polvere è stata riciclata, più è stata sottoposta a gradienti termici che ne hanno alterato le proprietà.

Sono stati eseguiti molti studi riguardanti gli effetti in termini dimensionali dovuti all'utilizzo di una polvere non vergine o comunque di un mix composto ad esempio da: 30% di polvere vergine e 70% di polvere non vergine [26,27] ottenendo come risultato che la polvere non vergine influisce soprattutto nelle caratteristiche del pezzo come le proprietà meccaniche ma anche in termini dimensionali ottenendo: deviazioni notevoli dalla geometria CAD e difetti superficiali analoghi a quelli ottenuti nei campioni che sono stati riprodotti per lo studio in questione.

L'altro fattore da analizzare per comprendere i difetti che hanno caratterizzato i campioni riprodotti è quello relativo all'orientamento e il posizionamento dei pezzi all'interno del volume di lavoro della macchina.

L'orientamento risulta essere determinante anche per l'accuratezza dimensionale, in particolare una determinata orientazione del pezzo può amplificare o ridurre l'effetto di *staircase*, migliorando o peggiorando la qualità superficiale del campione, oltre a determinarne l'anisotropia delle proprietà meccaniche del pezzo [28,29].

Inoltre, bisogna ricordare che l'orientamento influisce anche sul tempo di costruzione e quindi sull'esposizione dei provini ai gradienti termici caratterizzanti il processo produttivo [30].

Dalla letteratura si è visto che con determinate inclinazioni del pezzo e una determinata posizione sul piano XY (tendenzialmente agli estremi della piattaforma), all'aumentare della percentuale di riciclo della polvere si ha un netto peggioramento dell'accuratezza dimensionale dei provini, una riduzione fino al 50% della resistenza a trazione ma soprattutto un peggioramento dell'indice di cristallizzazione del polimero a causa dell'aumento del peso molecolare e della viscosità [27,29,31].

Si può quindi affermare che alcuni dei difetti superficiali ottenuti nei campioni realizzati siano dovuti all' orientamento e al posizionamento all'interno del volume di lavoro non ottimali.

3.4 OPERAZIONI DI POST PROCESSING

Dal blocco sono stati estratti i pezzi che sono stati pallinati con microsfere di vetro per rimuovere la polvere parzialmente sinterizzata in superficie ed etichettati per la successiva caratterizzazione dimensionale [32].

CAPITOLO 4: CARATTERIZZAZIONE DIMENSIONALE DEI PROVINI

4.1 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Lo scopo di questa tesi è quello di valutare l'accuratezza dimensionale dei provini forniti dalla normativa in modo da verificare la qualità con cui una macchina, in questo caso la EOS GmbH FORMIGA P110 Velocis, produce dei componenti con geometrie particolari.

Per la caratterizzazione dimensionale si è scelto di utilizzare la macchina di misura a coordinate (CMM) DEA 0101 presente nella sala metrologica dell'IAM@Polito.

La macchina di misura a coordinate (CMM) permette la misurazione di un componente sfruttando gli spostamenti angolari e/o lineari eseguiti dagli elementi costruttivi della macchina stessa [33].

In commercio esistono varie tipologie di macchine CMM, quella usata è una macchina che presenta la struttura "a portale" come schematizzato in Figura 58 [34]:



FIGURA 58: SCHEMA MACCHINA DI MISURA A COORDINATE

La macchina è munita del corpo tastatore PH10M fornito dalla Renishaw® ed equipaggiato con i seguenti elementi di tastatura:

- Stelo con elemento di tastatura sferico in rubino dal diametro $\phi=1$ mm;
- Stelo con elemento di tastatura sferico in rubino dal diametro ϕ =2mm.

Il software di interfaccia è PC-DMIS R1®.

In Figura 59 la macchina CMM dell'Iam@Polito e in Figura 60 il Tastatore equipaggiato nel macchinario:



FIGURA 59: MACCHINA DI MISURA A COORDINATE DELL'IAM@POLITO UTILIZZATA PER LE MISURAZIONI



FIGURA 60: TASTATORE RENISHAW PH10M E STELO CON ELEMENTO DI TASTATURA DI DIAMETRO 1MM.

4.2 CREAZIONE DEI PART PROGRAM PER LE MISURAZIONI DEI COMPONENTI

Per caratterizzare dimensionalmente il provino è necessario fare delle misurazioni nel componente ottenute dall' acquisizione di punti rilevati con il tastatore.

Per ogni componente è necessario prendere un numero elevato di punti, si capisce quindi che fare questa operazione comandando manualmente il tastatore mediante l'utilizzo del controller è impossibile.

È stato quindi necessario, per ogni componente, scrivere un *part program*, mediante il software PC-DMIS-R1, che permette di eseguire in maniera automatica le acquisizioni di tutti i punti necessari alle misurazioni.

Con il software citato è stato possibile ricevere in output le tolleranze geometriche e le misure di spessori, inclinazioni, ecc.

4.3 ANALISI DELLE MISURE

4.3.1 ANALISI MISURAZIONI COMPONENTE LINEAR ARTIFACT (LA)

Per il componente Linear Artifact (LA) sono state riprodotte tre repliche, per ogni replica sono state eseguite tre misurazioni utilizzando il tastatore equipaggiato con lo stelo con l'elemento di tastatura con diametro $\phi=1$ mm.

Ogni replica è stata realizzata a una quota Z diversa per valutarne l'effetto della quota stessa in termini di accuratezza dimensionale in relazione al gradiente termico generatosi lungo l'asse Z.

Come detto, il componente permette la valutazione dell'accuratezza lineare in termini di tolleranze di parallelismo e di perpendicolarità di componenti dalle dimensioni ridotte come i denti presenti nel campione.

Essendo state fatte tre misurazioni per ogni replica, si è calcolato un valore medio di deviazione relativo alle tolleranze di interesse.

In dettaglio si è valutata la deviazione relativa a:

- Spessore dei denti;
- Spessore dei vani;
- Parallelismo tra i denti;
- Parallelismo tra i vani;
- Perpendicolarità tra i piani.

In ordine si mostrano le repliche INF SUP e 3REP nella Figura 61:





FIGURA 61: REPLICHE INF (A), SUP (B) E 3REP (C)

Spessore dei denti



GRAFICO 1: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI ALLO SPESSORE DEI DENTI

Come è possibile vedere nel grafico 1, la replica 3REP è quella con il valore di deviazione media più alto a dimostrazione che una quota Z maggiore influisce negativamente in termini dimensionali.

Analizzando i valori delle misure tabellati è possibile riscontrare che: i denti sono stati riprodotti con una dimensione inferiore rispetto a quella del CAD visti i valori di deviazione negativi; inoltre, si nota che nel caso del dente con lo spessore più piccolo da 2.5 mm si hanno i valori in modulo di deviazione più alti.

I provini appartengono a un job dove è stata utilizzata una polvere non vergine; a causa dell'essiccamento non corretto della polvere, la sinterizzazione non è stata ottimale generando una deviazione delle dimensioni indicate dal modello CAD.

<u>Spessore dei vani</u>



GRAFICO 2: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI ALLA DIMENSIONE DEI VANI

Ovviamente i vani hanno misure maggiori rispetto a quelle del CAD visto che i denti sono stati riprodotti con dimensioni inferiori.

La discordanza tra le misure per le repliche INF e 3REP può essere riconducibile alla non accurata misurazione con la macchina CMM anche a causa della superficie irregolare dei provini.

In tutte le misurazioni il vano da 12.5 mm è quello che presenta il valore di deviazione maggiore.

Parallelismo tra i denti



GRAFICO 3: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI ALLA CONDIZIONE DI PARALLELISMO TRA I DENTI

In maniera analoga agli spessori, anche per la condizione di parallelismo la deviazione dal perfetto parallelismo aumenta all'aumentare della quota Z visto che la replica 3REP (a quota Z maggiore) è quella con i valori più alti.

<u>Parallelismo tra i vani</u>





Anche per i vani vale il discorso fatto per il parallelismo dei denti, ovvero la condizione di parallelismo la deviazione dal perfetto parallelismo aumenta all'aumentare della quota Z visto che la replica 3REP (a quota z maggiore) è quella con i valori più alti.



<u>Perpendicolarità tra i piani</u>

GRAFICO 5: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI ALLA CONDIZIONE DI PERPENDICOLARITÀ TRA I PIANI

Come per il parallelismo anche la perpendicolarità presenta valori di deviazione media più alti nei provini riprodotti alla quota z maggiore.

Inoltre, è possibile notare che la deviazione media è minore nella condizione di perpendicolarità che in quella di parallelismo.

È quindi possibile in definitiva affermare che per il campione Linear Artifact gli aspetti che hanno influito sull'accuratezza dimensionale sono: sicuramente il non qualitativo essiccamento della polvere riciclata e in parte anche il posizionamento rispetto l'asse Z della macchina.

4.3.2 ANALISI MISURAZIONI COMPONENTE RESOLUTION RIBS (RR_C)

Per il componente Resolution Ribs (RR_C) sono state riprodotte due repliche, per ogni replica sono state eseguite tre misurazioni in modo da calcolare la media tra i valori di deviazione.

Per questo componente si è utilizzato il tastatore munito di stelo con elemento di tastatura sferico dal diametro ϕ =2mm.

Anche in questo caso le repliche sono state fabbricate a quote Z diverse fra loro.

Come detto il componente permette la valutazione della capacità della macchina di riprodurre spessori dalle varie dimensioni, in questo componente infatti vi sono sei *ribs* con spessori di: 6 mm, 5 mm, 4 mm, 3 mm, 2 mm e 1 mm.

In ordine si mostrano le repliche INF SUP nella Figura 62:





FIGURA 62: REPLICHE INF (A) E SUP (B)

Spessore dei ribs



GRAFICO 6: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI ALLO SPESSORE DEI RIBS

I valori di deviazione media sono negativi, questo significa che la macchina ha riprodotto i *ribs* con uno spessore inferiore rispetto a quello del modello CAD.

I *ribs* con lo spessore minore hanno un valore in modulo di deviazione maggiore, in particolare quelli da 1 mm che sono sinterizzati solo con un passaggio di *contour*; infatti, il *ribs* da 6 mm ha il valore in modulo più basso di deviazione.

In questo caso si ha che i provini INF hanno una finitura superficiale peggiore.

I valori di deviazione sono in generale alti per entrambi i provini a causa del loro posizionamento sulla piattaforma di stampa; infatti, risultano essere collocati non nella zona centrale dove il gradiente termico influisce in maniera minore su *shrinkage* e *curling*, ma all'estremo inferiore, dove si ha una distorsione maggiore.

4.3.3 ANALISI MISURAZIONI COMPONENTE RESOLUTION ROUND RIBS (RRR_C)

Il componente Resolution Round Ribs (RRR_C) è una variante del componente Resolution Ribs (RR_C) in quanto anch'esso serve alla valutazione degli spessori, ma è caratterizzato anche dalla presenza di raccordi cilindrici nei *ribs* che permettono la valutazione della riproduzione di questi elementi da parte della macchina di additive manufacturing.

Per il componente sono state riprodotte due repliche, per ogni replica sono state eseguite tre misurazioni.

Ogni replica è stata realizzata a una quota Z diversa per valutarne l'effetto della quota stessa in termini di accuratezza dimensionale in relazione al gradiente termico generatosi lungo l'asse Z.

Anche per questo componente si sono eseguite utilizzando lo stelo con elemento di tastatura in rubino dal diametro ϕ =2mm in modo da riuscire a misurare la cilindricità dei raccordi, cosa che non si è riuscito a fare con il tastatore munito di stelo con elemento di tastatura di diametro ϕ =1mm.

In dettaglio si è valutata la deviazione relativa a:

- Spessore dei ribs;
- Cilindricità dei raccordi.

In ordine si mostrano le repliche INF SUP nella Figura 63:





FIGURA 63: REPLICHE INF (A) E SUP (B)

Spessore dei ribs



GRAFICO 7: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI ALLO SPESSORE DEI RIBS

I valori di deviazione media sono negativi, questo significa che la macchina ha riprodotto i *ribs* con uno spessore inferiore rispetto a quello del modello CAD.

Per gli spessori più piccoli (a SX del campione nella Figura 63) si nota che più è sottile il *ribs* maggiore è la deviazione, cioè la macchina riproduce gli spessori più "sottili" rispetto al modello CAD, in particolare quello da 0.5 mm che viene sinterizzato solo con il *contour*.

La replica SUP presenta una deviazione dal CAD maggiore (in modulo) in quanto non risulta essere posizionata al centro della piattaforma come lo è invece la replica INF; inoltre, la replica SUP si trova a una quota Z molto maggiore rispetto alla replica INF ciò significa che all'aumentare della quota Z in cui è disposto il provino si ha un aumento dei fenomeni che influenzano negativamente l'accuratezza dimensionale.

In questo benchmark si possono notare dei valori di deviazione minori in modulo rispetto al provino RR_C.

Cilindricità dei raccordi



GRAFICO 8: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI ALLA CONDIZIONE DI CILINDRICITÀ DEI RACCORDI

Il software della CMM ha approssimato grossolanamente il raccordo.

I cilindri risultano essere più grandi rispetto al CAD e in generale la replica SUP, creata a una quota Z maggiore, ha una accuratezza dimensionale peggiore per lo stesso motivo spiegato in precedenza.
4.3.4 ANALISI MISURAZIONI COMPONENTE SURFACE TEXTURE (ST_M)

Il provino Surface Texture permette di valutare l'abilità della macchina di riprodurre delle superfici con varie inclinazioni.

Per questo tipo di componente sono state realizzate tre repliche a quote, lungo l'asse Z, diverse.

In due componenti sono state stampate anche le *label* indicanti l'angolo di inclinazione della superficie, però quest'ultime hanno creato dei problemi (come è possibile vedere in Figura 64 (c)), si è quindi scelto di riprodurre la terza replica senza *label*.

In ordine si mostrano le repliche INF SUP e 3REP nelle Figura 64:





FIGURA 64: REPLICHE INF (A), 3REP (B) E SUP (C)

Già dall'analisi visiva è possibile vedere come la terza replica sia qualitativamente migliore, ciò è dovuto sicuramente al posizionamento ottimale, ma anche perché realizzata con una polvere vergine rispetto a quella utilizzata per gli altri componenti.

Nel dettaglio sono state analizzati:

- I valori di deviazione del profilo superficiale;
- I valori di deviazione dell'inclinazione del profilo.



Valori di deviazione del profilo superficiale

GRAFICO 9: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI AL PROFILO SUPERFICIALE

Come detto i provini SUP e INF sono quelli con la finitura superficiale peggiore perché realizzati con la *label* che ha causato dei problemi in fase di stampa.

La replica 3REP è stata realizzata senza problemi; infatti, ha valori di deviazione minore come è possibile vedere sia dall'analisi visiva che dalle misurazioni mediante CMM.

Per la replica SUP la deviazione maggiore è nella superficie inclinata di 60° rispetto l'orizzontale.

Per la replica INF la deviazione maggiore è nella superficie inclinata di 90° rispetto l'orizzontale.

Per la replica 3REP la deviazione maggiore è nella superficie inclinata di 75° rispetto l'orizzontale.

Valori di deviazione dell'inclinazione del profilo

Vengono valutati nel dettaglio i provini come segue:

- Replica SUP:
 - Misura 1: in questa misura la superficie con l'angolo da 45° è quello con la deviazione peggiore; invece, il piano inclinato di 90° è quello che presenta la deviazione minore.
 - Misura 2: per la seconda misurazione i piani inclinati di 45° e 60° rispetto l'orizzontale presentano i valori di deviazione peggiori, rispettivamente: 0.596 e 0.597, valutando però l'inclinazione del piano orizzontale rispetto i piani inclinati di 45 e 60°, come per la prima misurazione, la deviazione peggiore si ha nell'inclinazione a 45°.
 - Misura 3: nella terza misurazione si hanno risultati analoghi alla seconda misurazione.
- Replica INF:
 - Misura 1: è la misurazione dove si sono ottenuti i valori peggiori di deviazione tra tutte le repliche. In particolare, la deviazione del piano inclinato di 45° con un valore di 1.309 (e 1.509 per quanto riguarda la misura considerando il piano orizzontale rispetto al piano inclinato). Allo stesso modo della replica SUP il piano con inclinazione di 90° è quello con una deviazione minima rispetto al modello CAD.
 - Misura 2: si hanno risultati analoghi alla prima misurazione.
 - Misura 3: si hanno risultati analoghi alla prima misurazione.

• Replica 3REP

- Misura 1: nella seguente misurazione si sono ottenuti i valori di deviazione peggiore per le superfici inclinate rispetto l'orizzontale di 30° e 45°. Anche in questo caso il piano inclinato di 90° rispetto l'orizzontale è quello che presenta la deviazione minore.
- Misura 2: si hanno risultati analoghi alla prima misurazione.
- Misura 3: si hanno risultati analoghi alla prima misurazione.

Analizzando i dati è possibile quindi affermare che il piano inclinato da 45° è quello con l'accuratezza dimensionale peggiore.

I valori peggiori si hanno nella replica INF come è anche possibile vedere dall'analisi visiva rispetto al componente 3REP.

I valori di deviazione molto più alti delle repliche INF e SUP, rispetto la replica 3REP, sono da attribuire esclusivamente alla posizione dei pezzi nella piattaforma di stampa. Le repliche INF e SUP sono state posizionate all'estremo destro della piattaforma di stampa a differenza del provino 3REP che è stato posto al centro della piattaforma.

In definitiva è quindi possibile affermare che il posizionamento, in questo caso, ha rivestito un ruolo fondamentale in termini di qualità dimensionale.

4.3.5 ANALISI MISURAZIONI COMPONENTE CIRCULAR ARTIFACT (CA_M)

Il componente Circular Artifact è stato riprodotto in tre repliche, a quote Z diverse, dove la terza replica è stata realizzata in un job diverso dalle altre due. La replica presenta dei difetti evidenti a causa dei problemi che si sono manifestati durante il job.

Il componente permette di valutare i valori di deviazione relativi alla:

- Cilindricità;
- Coassialità;
- Concentricità.

Dei cilindri che costituiscono il pezzo, ma viene anche valutato il parallelismo tra i piani dei cilindri rispetto a un piano di riferimento.

In ordine si mostrano le repliche INF SUP e 3REP nella Figura 65:



FIGURA 65: REPLICHE INF (A), SUP (B) E 3REP (C)

<u>Cilindricità</u>



GRAFICO 10: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI ALLA CONDIZIONE DI CILINDRICITÀ DEI CILINDRI

Le repliche SUP e INF sono state realizzate con una polvere con una percentuale di riciclo molto più bassa rispetto a quella utilizzata per la replica 3REP si notano infatti valori di deviazione dalla condizione ideale molto più alti.

La deviazione è anche motivata dal posizionamento dei tre campioni che non è centrale ma agli estremi della piattaforma, amplificando così lo *shrinkage* e il *curling* dovuti ai gradienti termici.

È interessante vedere che i valori della replica 3REP sono molto più alti, cosa che si può notare anche dall'analisi visiva vedendo i difetti di fabbricazione del componente.

<u>Coassialità</u>



GRAFICO 11: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI ALLA CONDIZIONE DI COASSIALITÀ DEI CILINDRI

L'analisi è analoga a quella della cilindricità ma si nota che la condizione di coassialità è rispettata a fatica, problema da attribuire al fatto che i cilindri sono "deformati" a causa degli effetti termici.

<u>Concentricità</u>



GRAFICO 12: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI ALLA CONDIZIONE DI CONCENTRICITÀ DEI CILINDRI

Si nota come la concentricità ha valori di deviazione simile per tutte le repliche; si ha però che la concentricità tra i cilindri più grandi, in una misurazione, risulta essere molto deviata rispetto alla perfetta condizione. Ovviamente questo si manifesta come detto nella replica 3REP ottenuta da un job dove si sono manifestati vari problemi.

Parallelismo tra i piani



GRAFICO 13: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI ALLA CONDIZIONE DI PARALLELISMO ESISTENTE TRA I VARI PIANI E IL PIANO 1 DI RIFERIMENTO

La condizione di parallelismo è più o meno simile per tutte le misurazioni delle varie repliche.

4.3.6 ANALISI MISURAZIONI COMPONENTE RESOLUTION PINS (RP_C_LD4)

Per il componente Resolution Pins (RP_C_LD4) sono state riprodotte tre repliche, per ogni replica sono state eseguite tre misurazioni utilizzando il tastatore con stelo con elemento di tastatura di diametro $\phi=1$ mm.

Anche per questo provino ogni replica è stata realizzata a una quota Z diversa per valutarne l'effetto della quota stessa in termini di accuratezza dimensionale in relazione al gradiente termico generatosi lungo l'asse Z.

Come detto il componente permette di valutare la capacità da parte della macchina di riprodurre alberi dai vari diametri. Nel provino in questione sono previsti cinque alberi (*pins*) con diametri rispettivamente di: 4 mm, 3 mm, 2 mm,1 mm e 0.5 mm.

Vista l'impossibilità di riprodurre l'albero con diametro di 0.5 mm e l'impossibilità di misurarlo (come quello da 1 mm) questi ultimi non sono stati riprodotti.

In ordine si mostrano le repliche INF SUP e 3REP in Figura 66:





FIGURA 66: REPLICHE INF (A), SUP (B) E 3REP (C)

Cilindricità degli alberi



GRAFICO 14: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI ALLA CONDIZIONE DI CILINDRICITÀ DEI PIN

La terza replica (3REP) è quella che si discosta di meno dalla perfetta cilindricità del modello CAD rispetto le repliche INF e SUP perché è stata riprodotta con una polvere che, come per il benchmark LA, ha subito problemi di essiccamento.

La macchina ha realizzato gli alberi con un diametro maggiore rispetto al CAD.

Tendenzialmente, tranne nel caso della replica INF si è notato che più il cilindro è grande più la deviazione è alta.

La Misura 3 è la peggiore perché, anche visto dall'analisi visiva, il provino presenta dei difetti.

4.3.7 ANALISI MISURAZIONI COMPONENTE RESOLUTION HOLES (RH_C)

Per il componente Resolution Pins (RP_C_LD4) sono state riprodotte tre repliche, per ogni replica sono state eseguite tre misurazioni.

Come detto il componente permette di valutare la capacità da parte della macchina di riprodurre fori di vari diametri. Nel provino in questione sono previsti cinque fori con diametri rispettivamente di: 4 mm, 3 mm, 2 mm,1 mm e 0.5 mm.

Come visto in precedenza il foro da 0.5 mm è stato riprodotto solo in una replica, nelle altre non si è riuscito a riprodurlo a causa delle dimensioni eccessivamente ridotte e i limiti di risoluzione della macchina.

Per questo tipo di componente si è usato lo stelo con elemento di tastatura sferico in rubino dal diametro ϕ =1mm; quindi, le misure dei fori da 1 mm e 0.5 mm non sono stare eseguite.

Eseguendo le varie misurazioni si è ottenuto un valore di deviazione dalla condizione di "perfezione" del modello CAD.

Essendo state fatte tre misurazioni per ogni replica, si è calcolato un valore medio di deviazione relativo alle tolleranze di interesse.

In ordine si mostrano le repliche INF SUP e 3REP nella Figura 67:



FIGURA 67: REPLICHE INF (A), SUP (B) E 3REP (C)

Cilindricità dei fori



GRAFICO 15: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI ALLA CONDIZIONE DI CILINDRICITÀ DEI FORI

La macchina ha riprodotto i fori con un diametro maggiore rispetto al modello CAD.

I valori di deviazione più alti della replica 3REP sono dovuti al posizionamento di quest'ultima non al centro della piattaforma ma bensì all'estremo sinistro di quest'ultima accentuando quindi l'effetto negativo dovuto ai gradienti termici.

Tendenzialmente, tranne nel caso della replica INF, si è notato che più il foro è grande più la deviazione è alta.

4.3.8 ANALISI MISURAZIONI COMPONENTE RESOLUTION SLOT (RS_C)

Il componente resolution slot è stato realizzato in tre repliche come tutti i componenti.

Inoltre, per le misurazioni di questo provino sono stati utilizzati due tastatori, nel dettaglio:

- Per i componenti INF e SUP è stato utilizzato il tastatore con stelo con elemento di tastatura sferico in rubino dal diametro φ=1mm;
- Per il componente 3REP è stato utilizzato il tastatore con stelo con elemento di tastatura sferico in rubino dal diametro φ=2mm.

Il componente come detto permette di valutare la capacità della macchina di riprodurre componenti muniti di denti con vani dalle misure variabili.

In particolare, si sono misurati:

- Spessore dei denti;
- Dimensione dei vani;
- Parallelismo tra i piani dei denti;
- Parallelismo tra i piani dei vani.

In ordine si mostrano le repliche INF SUP e 3REP nella Figura 68:



```
FIGURA 68: REPLICHE INF (A), SUP (B) E 3REP (C)
```

Spessore dei denti



GRAFICO 16: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI ALLO SPESSORE DEI DENTI

Si ottengono valori negativi di deviazione, ciò significa che la macchina ha riprodotto i denti con uno spessore inferiore a quello del CAD.

La terza replica (3REP) è quella misurata con un tastatore diverso meno preciso rispetto a quello da 1 mm per questo motivo è auspicabile aspettarsi dei risultati peggiori ma il motivo principale è dovuto al posizionamento estremamente decentrato del campione all'interno della piattaforma di stampa, questo ha estremizzato lo *shrinkage* causando quindi una distorsione notevole del pezzo.

<u>Dimensione dei vani</u>



GRAFICO 17: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI ALLA DIMENSIONE DEI VANI

Essendo i denti più sottili i vani risultano essere più grandi rispetto al CAD.

Nella terza replica si hanno valori più alti perché non sono stati misurati:

- i vani da 1 mm (cosa che non era stata comunque fatta per le altre repliche);
- il vano da 2 mm.

Parallelismo dei piani dei denti



GRAFICO 18: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI ALLA CONDIZIONE DI PARALLELISMO DEI DENTI

Anche per la verifica di questa condizione valgono le considerazioni fatte all'inizio.

Facendo un confronto con il componente LA, munito anch'esso di denti, è possibile notare dei valori di deviazione.

Parallelismo dei piani dei vani



GRAFICO 19: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI ALLA CONDIZIONE DI PARALLELISMO TRA I VANI

Anche per questa misurazione valgono le considerazioni fatte precedentemente.

4.3.9 ANALISI MISURAZIONI COMPONENTE RESOLUTION SLOT A (RSA_C)

il componente Resolution Slot A è una variante del componente Resolution Slot, in quanto presenta per ogni dente un'inclinazione.

A differenza del componente Resolution Slot però le tre misurazioni per le tre repliche riprodotte sono state eseguite con il tastatore con stelo con la sfera di tastatura da 1 mm di diametro.

Si è valutato in dettaglio:

- spessore dei denti;
- dimensione dei vani;
- inclinazione dei denti.

In ordine si mostrano le repliche INF SUP e 3REP nella Figura 69:







FIGURA 69: REPLICHE INF (A), SUP (B) E 3REP (C)

Nella terza replica 3REP è possibile notare delle striature nella dentatura dovuti ai problemi avuti durante il job.



Spessore dei denti

GRAFICO 20: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI ALLO SPESSORE DEI DENTI

I valori di deviazione sono negativi, ciò significa che i denti sono stati fatti con le dimensioni ridotte rispetto a quelle del CAD.

Si hanno valori molto vicini allo zero per quanto riguarda le repliche SUP e INF invece per la terza replica (3REP) si ha una deviazione molto maggiore dovuta a tutte le problematiche che ha avuto il job con cui è stato prodotto il provino.

L'orientamento dei componenti (posizionati in verticale) ha sicuramente influito negativamente in termini di ritiro; in più il posizionamento estremamente decentrato all'interno della piattaforma di stampa contribuisce al peggioramento dell'accuratezza dimensionale.

<u>Dimensione dei vani</u>



GRAFICO 21: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI ALLA DIMENSIONE DEI VANI

Ovviamente i vani hanno misure maggiori rispetto a quelle del CAD visto che i denti sono stati riprodotti più piccoli.

Inclinazione dei denti



GRAFICO 22: VALORI DI DEVIAZIONE MEDIA RELATIVI ALL'INCLINAZIONE DELLE SUPERFICI DEI DENTI

Il grafico 22 è ottenuto dalla media dei valori medi di deviazione dei piani inclinati rispetto al piano orizzontale e dal piano orizzontale rispetto i piani inclinati questo perché si è deciso di fare questi due set di misure che effettivamente hanno fornito risultati diversi.

Si può notare come in tutti i casi gli angoli hanno un valore maggiore rispetto a quello del CAD ed in particolare l'angolo da 30° che è quello maggiore presenta il più grande discostamento dalla perfetta inclinazione riducendo l'angolazione si riduce, nella maggior parte dei casi, la deviazione.

La terza replica 3REP come nei casi precedenti è quella che presenta i valori peggiori di deviazione, perché come detto è stata ottenuta da un job che ha avuto problemi.

CAPITOLO 5: CONCLUSIONI

Dal seguente studio è possibile trarre delle considerazioni che permettono una iniziale caratterizzazione del processo di sinterizzazione laser di componenti in Alumide®.

Il primo aspetto che è sicuramente quello più caratterizzante e quello relativo alla distribuzione del calore all'interno della camera di processo della macchina. I gradienti termici, come visto, rivestono un ruolo fondamentale durante la fase di produzione, essendo la causa dei fenomeni di *shrinkage* e *curling*.

Dalle misurazioni mediante la macchina di misura a coordinate (CMM) si è evidenziato come questi fenomeni influiscono sulla geometria finale dei componenti, in particolar modo per quanto riguarda le verifiche di parallelismo/perpendicolarità e inclinazione. Ciò significa che, i parametri di processo rivestono un ruolo fondamentale all'interno della fase di produzione, in quanto sono lo strumento principale per far fronte ai fattori che possono peggiorare la qualità, in questo studio puramente geometrica, del pezzo.

Un ulteriore aspetto che è di fondamentale importanza è il posizionamento e l'orientamento dei pezzi in macchina. Risulta essere determinante, in primo luogo, per evitare problemi di impatto tra racla e la sezione del pezzo; infatti, si è visto che con determinate inclinazioni attorno l'asse z si sono avuti problemi di trascinamento della sezione appena sinterizzata con la racla.

Inoltre la disposizione dei componenti all'interno del volume di influisce sulla distribuzione del calore; infatti analizzando l'area sinterizzata (sul piano XY al variare della quota Z) si è appurato che: se si hanno dei valori molto diversi tra uno strato e l'altro (ad esempio in uno strato si hanno 10cm^2 e in quello dopo 2 cm^2) si hanno dei problemi di adesione fra gli strati sinterizzati con conseguente trascinamento dell'ultimo strato realizzato; inoltre avendo una distribuzione non uniforme del calore sulla piattaforma di stampa in alcune zone (quelle a temperatura più alta) i campioni sono stati soggetti al fenomeno dello *shrinkage* con valori di deviazione notevoli dalla geometria del modello CAD evidenziati dall'analisi dimensionale.

Come spiegato e validato dalla ricerca bibliografica l'orientamento del pezzo è influente in termini dimensionali si è visto infatti come l'orientamento causa un aumento dell'effetto *staircase* (effetto scalino) che determina un peggioramento della finitura superficiale.

Un esempio lampante di come l'orientamento del pezzo in macchina influisca in termini di deviazione sulla geometria come è quello relativo ai componenti RS e RSA orientati con, il primo (RS) con la dentatura parallela al piano di lavoro XY e il secondo (RSA) con la dentatura perpendicolare al piano di lavoro XY.

Come è possibile vedere dai dati essi, nonostante abbiano una geometria estremamente simile, presentano valori di deviazione molto diversi tra loro.

Infine, un elemento che ha caratterizzato il processo di produzione è la relazione esistente tra il tempo di preriscaldamento del letto e la percentuale di riciclo. Questi fattori sono collegati fra loro e risultano essere determinanti in quanto: la polvere con una percentuale alta di riciclo quando viene depositata nel letto di polvere presenta delle crepe e in generale si manifesta una stesura pessima, che, se non adeguatamente preriscaldata subisce un essiccamento non corretto che causa una cattiva sinterizzazione della sezione della parte. D'altra parte, un eccessivo preriscaldamento del letto di polvere innesca una pre-sinterizzazione, che, ovviamente è da evitare e accentua la disomogeneità relativa alla distribuzione della temperatura sul letto di polvere.

Con questa tesi si è svolta la caratterizzazione dimensionale di provini realizzati in Alumide mediante la tecnica di Selective Laser Sintering (SLS).

Lo studio si è suddiviso in due fasi principali: la prima fase di produzione dei componenti forniti dalla normativa; la seconda fase riguardante la misurazione dei componenti mediante la macchina di misura a coordinate.

Dall'analisi dei dati è emerso come i parametri di processo come, ad esempio, la potenza del laser e la velocità di scansione siano il fattore determinante, per ottenere dei pezzi qualitativamente validi in termini dimensionali e far fronte ai fenomeni innescati dagli effetti termici caratteristici del processo.

Rivestono un ruolo altrettanto importante anche: la disposizione del pezzo all'interno della piattaforma di stampa e il suo orientamento nello spazio, come evidenziato dalle problematiche manifestatesi durante la fase di produzione, visti i valori di deviazione dalla condizione ideale del modello CAD.

In conclusione, è possibile affermare che la produzione di parti mediante la tecnica di SLS consente di ottenere dei pezzi dimensionalmente validi caratterizzati anche da geometrie particolari non riproducibili con le tecniche manufatturiere classiche.

L'utilizzo dell'Alumide presenta dei vantaggi non indifferenti grazie alle sue proprietà e visto l'impiego sempre più frequente di materiali compositi nel mondo odierno della meccanica.

Risulta però necessaria una configurazione adeguata dei fattori caratterizzanti il Job come i parametri di processo e il fattore di scala k al fine di ottenere parti che rispettino le specifiche di progetto; ciò implica la necessità di ulteriori studi sui parametri di processo per il materiale in questione e dei fattori che caratterizzano il processo di sinterizzazione laser.

Bibliografia

[1] Slides Corso "Tecniche di Fabbricazione Additiva" - a.a. 2019/20 - Prof. Luca Iuliano.

[2] "Selective Laser Sintering" - Jordi Delgado, Lidia Serenò, Karla Monroy and Joaquim Ciurana.

[3] "Surface roughness of polyamide 12 parts manufactured using selective laser sintering" - Sean Petzold, James Klett, Andrew Schauer and Tim A. Osswald.

[4] Slides Corso "Materiali per la Fabbricazione Additiva" - a.a. 2019/20 - Prof. Fino Paolo.

[5] "Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process" - Ian Gibson and Dongping Shi.

[6] "Mathematical Model for the Selection of Processing Parameters in Selective Laser Sintering of Polymer Products" - Ana Pilipović, Mladen Šercer and Drstvensek Igor.

[7] "Infrared monitoring of modified hatching strategies for laser sintering of polymers" - Sandra Greiner and Dietmar Drummer.

[8] "Thermal model and measurements of polymer laser sintering" - Timothy T. Diller, Mengqi Yuan, David L. Bourell and Joseph J. Beaman.

[9] "Numerical prediction of temperature and density distributions in selective laser sintering processes" - Gabriel Bugeda Miguel Cerveraand and Guillermo Lombera.

[10] "3D modeling and testing of transient temperature in selective laser sintering (SLS) process" -Jian Xinga, Weimin Suna and R.S. Ranab.

[11] https://www.eos.info/03_system-related-assets/system-related-contents/_pdf_system-datasheets/eos_system_data_sheet_formigavelocis_en.pdf

[12] "Part deposition orientation studies in layered manufacturing" - P.M. Pandey 1, N. Venkata Reddy and S.G. Dhande.

[13] "Compensation of Non-Linear Shrinkage of Polymer Materials in Selective Laser Sintering" -K. Manetsberger, J. Shen and J. Muellers.

[14] "A study on shrinkage compensation of the SLS process by using the Taguchi method" - H.-J.Yang, P.-J. Hwang and S.-H. Lee.

[15] "Effects of processing on microstructure and properties of SLS Nylon 12" - H. Zarringhalam, N.Hopkinson, N.F. Kamperman and J.J. de Vlieger.

[16] "Investigation of dimensional accuracy/mechanical properties of part produced by selective laser sintering" - Sharanjit Singh and Sachdeva Anish.

[17] "Calibration of shrinkage and beam offset in SLS process" - Xiangwei Wang.

[18] "IMPROVEMENTS IN SLS PART ACCURACY" - Christian Nelson, Kevin McAlea and Damien Gray.

[19] https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-plastic/sls-polymer - materials/polyamide-pa-12-alumide

[20] "Additive Manufacturing of Alumide Jewellery" - de Beer, D.J., L. Becker, P. van der Walt, D.Mauchline, R.I. Campbell and L.T. Dean.

[21] "Joining mechanisms and mechanical properties of PA composites obtained by selective laser sintering" - E. Bassoli, A. Gatto and L. Iuliano.

[22] "Mode I Fracture Toughness of Polyamide and Alumide Samples obtained by Selective Laser Sintering Additive Process" - Dan Ioan Stoia, Liviu Marsavina and Emanoil Linul.

[23] "Flexural properties of selectively sintered polyamide and Alumide" - Liviu Marsavina and Dan Ioan Stoia. [24] "LIMITED RUN PRODUCTION USING ALUMIDE® TOOLING FOR THE PLASTIC INJECTION MOULDING PROCESS" - J. Combrinek, G.J. Booysen, J.G. van der Walt and D.J. de Beer.

[25] Normativa ISO/ASTM 52902:2019(E) - "Additive manufacturing Test artifacts Geometric capability assessment of additive manufacturing systems".

[26] "SLS POWDER LIFE STUDY" - J. Choren, V. Gervasi, T. Herman, S. Kamara, and J. Mitchell.

[27] "Prediction of SLS parts properties using reprocessing powder" - Ana C. Lopes, Álvaro M. Sampaio, Catia S. Silva and Antonio J. Pontes.

[28] "Part orientation and build cost determination in layered manufacturing" - Paul Alexander, Seth Allen and Debasish Dutta.

[29] "Investigation on selective laser sintering of PA12: dimensional accuracy and mechanical performance" - Achille Gazzerro, Wilma Polini and Luca Sorrentino.

[30] "Optimized build orientation of additive manufactured parts for improved surface quality and build time" - P. Delfs, M. "Tows and H.-J. Schmid.

[31] "Effect of PA12 powder reuse on coalescence behaviour and microstructure of SLS parts" -Sasan Dadbakhsha, Leander Verbelenb, Olivier Verkinderenc, Dieter Strobbea, Peter Van Puyveldeb and Jean-Pierre Krutha.

[32] Slides "il Collaudo Dimensionale" - a.a. 2019/20 - Prof.ssa Flaviana Calignano.

[33] "Computer-Aided Metrology-CAM" - Ammar Grous.

[34] Slides Corso "Sistemi Integrati di Produzione" - a.a. 2018/19 - Prof. Luca Iuliano.