

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Parametri di rugosità
superficiale nelle tecnologie
additive**



**Politecnico
di Torino**

Relatore

prof. Flavia Calignano

Laureando

Alessia D'Elia

matricola: 278905

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Parametri di rugosità superficiale nelle tecnologie additive
Tesi di Laurea Magistrale. Politecnico di Torino, Torino.

Indice

1	Introduzione	7
2	La rugosità superficiale	8
2.1	La natura delle superfici	8
2.2	Imperfezioni superficiali	9
2.3	Cos'è la rugosità superficiale?	9
2.4	Motivi per cui viene verificata la rugosità superficiale	9
2.5	Applicazioni	10
2.5.1	Il controllo della rugosità in ambito industriale	11
3	Metodi di misura della rugosità superficiale	12
3.1	Misurazione	12
3.2	Valutazione delle misure di rugosità in riferimento alla norma EN ISO 4288	13
3.2.1	Regola del massimo	13
3.2.2	Regola del 16%	13
3.3	Metodi di misurazione della rugosità superficiale	14
3.3.1	Metodi indiretti o di confronto	14
3.3.2	Metodi diretti	15
4	Normative per la valutazione della rugosità	17
4.1	Termini generali	17
4.2	Termini relativi ai parametri geometrici	19
4.3	Definizioni dei parametri del profilo della superficie	21
4.3.1	Parametri di ampiezza (picco e valle)	22
4.3.2	Parametri di ampiezza (media delle ordinate)	23
4.3.3	Parametri di spazio	25
4.3.4	Parametri ibridi	25
4.4	Introduzione dei parametri relativi alla texture superficiale	26

4.4.1	Parametri di altezza	27
4.4.2	Parametri spaziali	29
4.4.3	Parametri ibridi	29
4.4.4	Parametri funzionali	30
4.5	Ha senso paragonare Sa e Ra?	35
5	Additive Manufacturing	37
5.1	La definizione di Additive	37
5.2	Laser Powder Bed Fusion	38
5.2.1	Processo L-PBF	38
5.2.2	Caratteristiche della tecnica L-PBF	40
5.2.3	Materiali	41
5.3	La rugosità nell'Additive	41
5.4	Post-processing	42
5.4.1	Pallinatura	42
6	La Reverse Engineering	46
6.1	Definizione di Reverse Engineering	46
6.2	Il processo della Reverse Engineering	47
6.2.1	Acquisizione dei dati	48
6.2.2	Pre-elaborazione dei dati	50
6.2.3	Segmentazione e creazione delle superfici	51
6.2.4	Creazione del modello matematico	51
6.3	Sistema di rilevamento dei punti	51
6.3.1	Sistemi con contatto	52
6.3.2	Sistemi senza contatto	56
7	Analisi sperimentale	61
7.1	Le fasi dell'analisi sperimentale	61
7.2	Strumentazione e software utilizzati per l'analisi	63
7.2.1	Rugosimetro RTP 80	63
7.2.2	Pallinatrice Norblast SD9	64
7.2.3	Sistemi ottici a luce strutturata GOM	65
7.2.4	Gom Inspect	66
7.2.5	Mountains	66
7.3	Estrazione ed elaborazione dei dati	66
7.4	Definizione dei componenti	67
7.4.1	Componenti in Superlega di Nickel CM247LC	67
7.4.2	Componenti in Ti6Al4V	68

7.4.3	Componenti in AlSi10Mg	69
7.5	Valutazioni su i campioni analizzati	71
8	Conclusione	85

Capitolo 1

Introduzione

Le tecniche additive sono processi molto promettenti che consentono di realizzare componenti con strutture complesse e permettono di liberare la fase di progettazione dai vincoli imposti dalle tecnologie convenzionali.

In ambito industriale, tra i processi AM che lavorano a letto di polvere con materiale metallico, tra le tecniche più diffuse e in via di sviluppo c'è la L-PBF (Laser Powder Bed Fusion).

Questa tecnologia deve garantire determinate caratteristiche e pertanto è fondamentale approfondire lo studio della rugosità dei componenti realizzati con questo processo.

In fase di sviluppo di questa tesi sono state analizzate le diverse normative legate alla rugosità lineare e superficiale e i diversi metodi di analisi della texture superficiale.

Tramite l'uso dell'apposita strumentazione, presso l'Integrated Additive Manufacturing Center (IAM) del Politecnico di Torino, sono stati rilevati i parametri di rugosità di molteplici componenti realizzati, con diversi materiali, in L-PBF.

In questo modo si è potuto pertanto procedere con un'analisi dei dati raccolti per arrivare ad ottenere una panoramica sulla rugosità superficiale nelle tecnologie additive.

Capitolo 2

La rugosità superficiale

2.1 La natura delle superfici

La superficie di un solido ha una struttura complessa e prevede delle proprietà che dipendono dalla natura del materiale, dal metodo di preparazione della superficie e dall'interazione tra la superficie e l'ambiente [1].

Le superfici che delimitano gli oggetti possono essere pensate come perfettamente lisce, ma in realtà presentano delle irregolarità che le rendono più o meno scabre. Quindi nessun metodo di produzione, anche se preciso, può generare una superficie molecularmente piatta e infatti, anche la struttura più regolare contiene irregolarità.

Occorre quindi creare una distinzione tra le superfici reali e le superfici ideali [2]:

- Superficie ideale: è la superficie teorica rappresentata sul disegno ed è delimitata dalle dimensioni nominali del pezzo
- Superficie reale: è la superficie effettivamente ottenuta con la lavorazione ed è delimitata dalle dimensioni e dalla forma reale del pezzo

Un primo controllo della superficie può essere fatto semplicemente a vista, in modo da verificare che non vi siano difetti tali da pregiudicare la funzionalità della superficie stessa. Qualora si individuino possibili criticità, o si vogliano indicazioni più precise e valutazioni quantitative, si eseguono misurazioni.

2.2 Imperfezioni superficiali

Segue una classificazione delle imperfezioni superficiali:

- errore di forma: è una forma di irregolarità macrogeometrica ed è derivante da problematiche che si verificano durante il processo di lavorazione (ad esempio errori nelle modalità di utilizzo delle macchine utensili, guide, mandrini, bloccaggio insufficiente, allineamento impreciso, usura irregolare delle attrezzature). Gli errori di forma corrispondono alle deviazioni della superficie misurata dalla superficie media, depurata dagli errori microgeometrici.
- rugosità (struttura primaria): è una forma di irregolarità microgeometrica ed è definita come il complesso delle deviazioni della superficie reale dalla superficie tecnica.
- ondulazione (struttura secondaria): è una forma di irregolarità microgeometrica e può essere causata da vibrazioni, trattamenti termici o deformazioni.
- difetti: sono problemi indesiderati rinvenibili su una superficie. Tali imperfezioni sono graffi, buchi, crepe, cavità, porosità ecc. Questi possono essere osservati direttamente o con l'ausilio di liquidi penetranti.

2.3 Cos'è la rugosità superficiale?

La rugosità è l'insieme delle irregolarità superficiali lasciate dal processo di lavorazione e/o da altri fattori, come ad esempio la forma dell'utensile, la disomogeneità del materiale e la eventuale presenza di vibrazioni [2].

Essa si presenta come un insieme di scalfiture e solchi, variabili per forma, profondità e direzione.

La rugosità ha notevole influenza sulla durata, sulla resistenza a fatica e alla corrosione, nonché sulle condizioni di lubrificazione presenti tra due superfici in contatto e in moto relativo tra loro.

2.4 Motivi per cui viene verificata la rugosità superficiale

La forma e le dimensioni delle irregolarità risultanti da una superficie lavorata hanno un notevole impatto sulla qualità e sulle prestazioni del prodotto finale.

È importante quindi gestire la rugosità superficiale in modo che sia adatta al componente in termini di qualità e prestazioni.

Una rugosità superficiale errata può causare le seguenti problematiche:

- Usura precoce dei componenti: maggiore è la rugosità superficiale, minore è l'area di contatto effettiva tra le superfici accoppiate.
- Resistenza alla tensione/sollecitazione dei componenti: la formazione di rugosità come angoli acuti, spazi vuoti e piccole crepe sono molto sensibili alle sollecitazioni/tensioni, influenzando così la resistenza dei componenti.
- Resistenza alla corrosione delle parti: una superficie eccessivamente ruvida può facilmente far penetrare gas corrosivi o liquidi che si depositano nelle valli di rugosità causando l'erosione del materiale.
- Tenuta dei componenti: scarsa adesione tra componenti, nelle zone nelle quali transitano gas o liquidi.

2.5 Applicazioni

Per migliorare qualitativamente i prodotti fabbricati, è necessario intervenire proprio sul grado di finitura delle superfici lavorate. Non è sufficiente infatti cercare un miglioramento della qualità dei prodotti attraverso il solo impiego di materiali con migliori caratteristiche meccaniche, o attraverso l'adozione di tolleranze dimensionali spinte, se non la si accompagna da un buon livello di finitura superficiale. Appare evidente come il grado di finitura superficiale sia fondamentale per il buon funzionamento di componenti meccanici destinati all'accoppiamento, e quanto questo influisca sulla resistenza all'usura e a fatica.

E' inoltre noto che superfici con elevato grado di finitura superficiale presentano migliore resistenza alla corrosione rispetto alle superfici con elevata rugosità.

Non è detto tuttavia che raggiungere il più basso valore possibile di rugosità sia sempre la soluzione migliore, innanzi tutto perché implica solitamente elevati costi di lavorazione. In alcune circostanze inoltre un minimo di rugosità risulta indispensabile. Un esempio sono i componenti che necessitano di lubrificazione: in questi casi se la dimensione delle asperità presenti sulla superficie è troppo piccola l'olio non ha la possibilità di ancorarsi alla superficie stessa e di conseguenza scivola via senza poter assolvere il suo compito.

Va ricordato inoltre che l'influenza della rugosità si estende a vari campi ingegneristici come quelli riguardanti il controllo del rumore e delle vibrazioni, le tolleranze dimensionali, i processi abrasivi e la geomorfologia.

2.5.1 Il controllo della rugosità in ambito industriale

Dal momento che la rugosità è uno dei valori principali che influisce sul comportamento meccanico, elettrico o chimico di un pezzo, è importante effettuare delle misure. Molte industrie possono beneficiare di tale controllo:

- Nell'ambito della tecnologia medica, occorre preparare i prodotti adottando trattamenti superficiali che permettano di ottenere i migliori risultati (es. contatto diretto protesi con il tessuto circostante)
- Nell'industria automobilistica è richiesta una bassa rugosità superficiale delle catene cinematiche per ridurre l'attrito. Nei motori elettrici inoltre la rugosità superficiale è importante anche per quel che riguarda la riduzione del livello di rumore.
- Nel campo dell'elettronica e dei semiconduttori, dal momento che i microchip tendono a diventare sempre più piccoli, più rapidi e più potenti, è richiesto il rispetto di tolleranze geometriche sui singoli componenti, come complanarità, distanza, nonché parametri di rugosità che necessitano di una risoluzione molto alta.

Capitolo 3

Metodi di misura della rugosità superficiale

3.1 Misurazione

Nel momento in cui si parla di superfici o profili reali, si deve notare, che si effettua lo studio su una superficie od un profilo che differiscono dagli effettivi elementi reali.

La misura di rugosità viene effettuata rilevando il profilo che si ottiene sezionando l'oggetto con un piano normale alla superficie e con direzione perpendicolare all'orientamento principale dei solchi presenti sulla superficie.

La normativa prevede che la lunghezza di valutazione sia divisa in 5 lunghezze più piccole chiamate lunghezze di base. La scelta del valore della lunghezza di base serve ad evitare che un'irregolarità venga "spalmata" su tutto il profilo alterando la misura. La lunghezza viene scelta in modo da non essere influenzata da irregolarità di tipo macrogeometrico, ed è dell'ordine di qualche mm. In corrispondenza della lunghezza di base l_r si può definire una linea parallela al profilo teorico, posizionata rispetto al profilo reale, in modo che la somma dei picchi rispetto ad essa sia uguale a quella delle valli: sarà quindi definita come linea centrale. La linea media è definita come la linea per la quale si ha il minimo valore della somma dei quadrati delle distanze da essa dei punti del profilo reale. Se la linea media viene assunta come asse delle ascisse in un riferimento ortogonale in cui i punti del profilo divengono ordinate, la condizione precedente può essere espressa come quella per cui la somma algebrica delle ordinate nel tratto di misura ha valore nullo [2].

3.2 Valutazione delle misure di rugosità in riferimento alla norma EN ISO 4288

Solitamente i valori di misurazione della rugosità variano in un intervallo compreso tra -20% e + 30%. Pertanto, una singola misurazione può non fornire un quadro completo della conformità con i parametri tollerati. Nell'allegato A della norma DIN EN ISO 4288 [3] è prevista la descrizione di due procedure diverse:

- Regola del massimo
- Regola del 16%

3.2.1 Regola del massimo

Tutti i parametri di rugosità con il suffisso "max" rappresentano il valore medio massimo misurato all'interno delle cinque lunghezze di campionamento. La misurazione dovrebbe essere effettuata in almeno tre posizioni sulla superficie in cui si possono prevedere i valori massimi; in nessuna posizione deve superare il valore specificato nella tolleranza.

3.2.2 Regola del 16%

Tutti i parametri di rugosità senza il suffisso "max" rappresentano il valore medio misurato all'interno delle cinque lunghezze di campionamento: il 16% dei valori misurati possono essere superiori al valore specificato sui disegni o sulla documentazione tecnica del prodotto.

Metodo di valutazione progressivo:

1. Se il primo valore misurato è inferiore al 70% del limite, questo è considerato conforme.
2. In caso contrario, occorre effettuare altre due misurazioni in altri due punti della superficie; se tutti e tre i valori misurati sono inferiori al limite, questo è considerato conforme.
3. In caso contrario, occorre effettuare nove misurazioni aggiuntive in altri punti sulla superficie; se in totale non più di due valori misurati sono superiori al limite, questo è considerato conforme.

3.3 Metodi di misurazione della rugosità superficiale

Per definire in maniera appropriata la rugosità superficiale, vengono utilizzati un insieme di parametri che caratterizzano la superficie. I metodi utilizzati per misurare questi parametri, e quindi la rugosità delle parti lavorate, possono essere classificati in due tipologie [4]:

- Metodi indiretti o di confronto: la rugosità superficiale viene confrontata con una superficie di riferimento, come ad esempio i comparatori di rugosità visivi o tattili.
- Metodi diretti: la rugosità superficiale viene misurata con strumenti a contatto/ottici come ad esempio i rugosimetri con stilo.

3.3.1 Metodi indiretti o di confronto

Utilizzando i metodi di confronto per stabilire il grado di rugosità si effettua una valutazione mediante l'osservazione e la prova tattile della superficie ispezionata con uno standard di riferimento.

Nonostante il fatto che l'operatore addetto all'analisi sia dotato di una certa esperienza, questi metodi sono caratterizzati da un elevato margine di errore. I metodi indiretti sono di seguito elencati:

- ispezione tattile: il dito passa lungo la superficie ad una velocità di 25-30 mm al secondo e la stessa operazione è successivamente effettuata su blocchi di rugosità nota. I vantaggi principale di questo metodo sono l'economicità e la semplicità. Gli svantaggi sono invece molteplici: è difficile valutare il grado di rugosità e rilevare i piccoli difetti, i risultati spesso sono soggettivi ed è necessario che l'operatore sia esperto.
- ispezione visiva: è effettuata ad occhio nudo e prevede il confronto con blocchi di rugosità di riferimento. Questo è un metodo semplice ed economico che però richiede un operatore esperto e prevede risultati spesso soggettivi.
- ispezione dei graffi: è un processo che prevede che del materiale come gomma o plastica venga strofinato sulla superficie per ottenere un'immagine riversa del profilo. Questo è un metodo semplice ed economico che potrebbe però danneggiare la superficie.

- riflesso di luce: la luce riflessa dalla superficie viene misurata da una fotocellula e confrontata con le letture già registrate. Questo è un metodo semplice ed economico che però potrebbe richiedere un'analisi lunga.
- metodo di sezionamento: una porzione del campione viene tagliata ed esaminata al microscopio ottico. Questo è un metodo molto accurato, ma che risulta essere distruttivo e costoso.
- misurazione della brillantezza: è una soluzione semplice, il cui risultato però può essere fuorviante. Inoltre, la strumentazione per la misura della brillantezza risulta essere costosa.
- replica della rugosità: se la superficie non è accessibile alla sonda dello strumento viene creata una replica della superficie usata poi per il confronto. Purtroppo, spesso, per fattori tecnici, la replica è fedele all'originale solo in misura dell'80%.

3.3.2 Metodi diretti

I metodi diretti per la misurazione della rugosità superficiale sfruttano solitamente strumenti chiamati rugosimetri.

I modelli di rugosimetri più utilizzati nelle lavorazioni industriali sono prevalentemente di due tipologie: i rugosimetri portatili con tastatore stilo a scorrimento, oppure rugosimetri a singolo punto.

- Il rugosimetro a scorrimento è composto da un tastatore che può essere di tipo induttivo o di tipo ottico.

Il tastatore ottico sfrutta un sensore per verificare la rugosità lungo la linea di valutazione della porzione di campione presa in esame analizzando le variazioni di posizione del raggio riflesso sulla superficie. In questo caso, dato che non si opera meccanicamente, c'è la possibilità di penetrare con molta più efficienza nelle valli di rugosità ed individuare con maggior precisione le dimensioni della punta del picco.

Il tastatore induttivo è dotato invece di uno stilo che, scorrendo, esamina la rugosità lungo la linea di valutazione della porzione di campione presa in esame.

I rugosimetri con tastatore sono dotati di un'unità di traslazione che ha il compito di muovere il tastatore e di un'unità centrale che gestisce la movimentazione del tastatore e la conversione da segnale analogico a digitale. L'unità centrale del rugosimetro inoltre si occupa anche di calcolare i parametri di rugosità, importanti poiché da essi si può verificare

il buon esito di un lavoro.

La misura della rugosità normalmente si esegue rilevando il profilo lungo un certo numero di lunghezze di base. La somma delle lunghezze di base rilevate rappresenta la lunghezza di valutazione, che solitamente è pari a cinque volte la lunghezza di base.

- I rugosimetri a singolo punto esaminano la massima profondità di rugosità raggiunta grazie alla pressione esercitata da una punta acuminata che penetra all'interno della valle di rugosità calcolando su un singolo punto l'altezza della cresta. Dal momento che la superficie viene analizzata in un solo punto del campione questi strumenti sono privi di unità di calcolo dei parametri di rugosità standard. Il dato rilevato è quindi una misura di altezza di rugosità equiparabile alla rilevazione effettuata utilizzando un calibro di profondità.

Capitolo 4

Normative per la valutazione della rugosità

4.1 Termini generali

Termini generali utili alla definizione della rugosità superficiale di un componente [5]:

- cut off: è un filtro che analizza solo le lunghezze d'onda di interesse e separa i profili in componenti a lunghezza d'onda bassa e componenti ad alta lunghezza d'onda
- filtro di profilo λ_s : filtro che definisce l'intersezione tra la rugosità e le componenti di lunghezza d'onda più basse presenti sulla superficie [figura 4.1]
- filtro di profilo λ_c : filtro che definisce l'intersezione tra le componenti di rugosità e di ondulazione [figura 4.1]
- filtro di profilo λ_f : filtro che definisce l'intersezione tra l'ondulazione e le componenti di lunghezza d'onda più alte presenti sulla superficie [figura 4.1]
- sistema di coordinate: è il sistema nel quale sono definiti i parametri della texture superficiale
- superficie reale: è la superficie che delimita il corpo e lo separa dal mezzo circostante

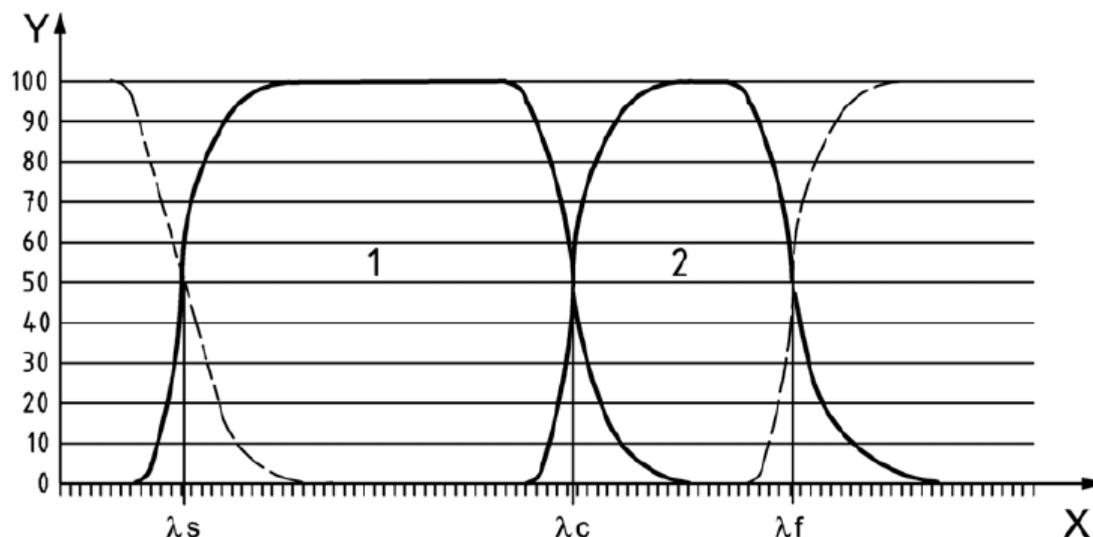


Figura 4.1: Caratteristiche della trasmissione dei profili di rugosità

- profilo superficiale: è il profilo che si ottiene intersecando la superficie reale con un piano [figura 4.2]
- profilo primario: profilo misurato ottenuto applicando il filtro λ_s a meno del profilo nominale [6]
- profilo di rugosità: si riferisce a una curva derivata dal profilo primario sopprimendo le componenti ad alta frequenza del profilo utilizzando il filtro cut-off λ_c [figura 4.1]
- profilo di ondulazione: indica una curva in cui il filtro cut-off λ_f e λ_c è applicato al profilo primario. λ_f viene utilizzato per sopprimere le componenti ad alta frequenza, mentre λ_c viene utilizzato per sopprimere le componenti a bassa frequenza.
- linea media del profilo di rugosità: corrisponde alla componente del profilo a onde lunghe soppressa dal filtro λ_c
- linea media del profilo di ondulazione: corrisponde alla componente del profilo a onde lunghe soppressa dal filtro λ_f
- linea media del profilo primario: linea determinata inserendo una profilo ai minimi quadrati attraverso il profilo primario

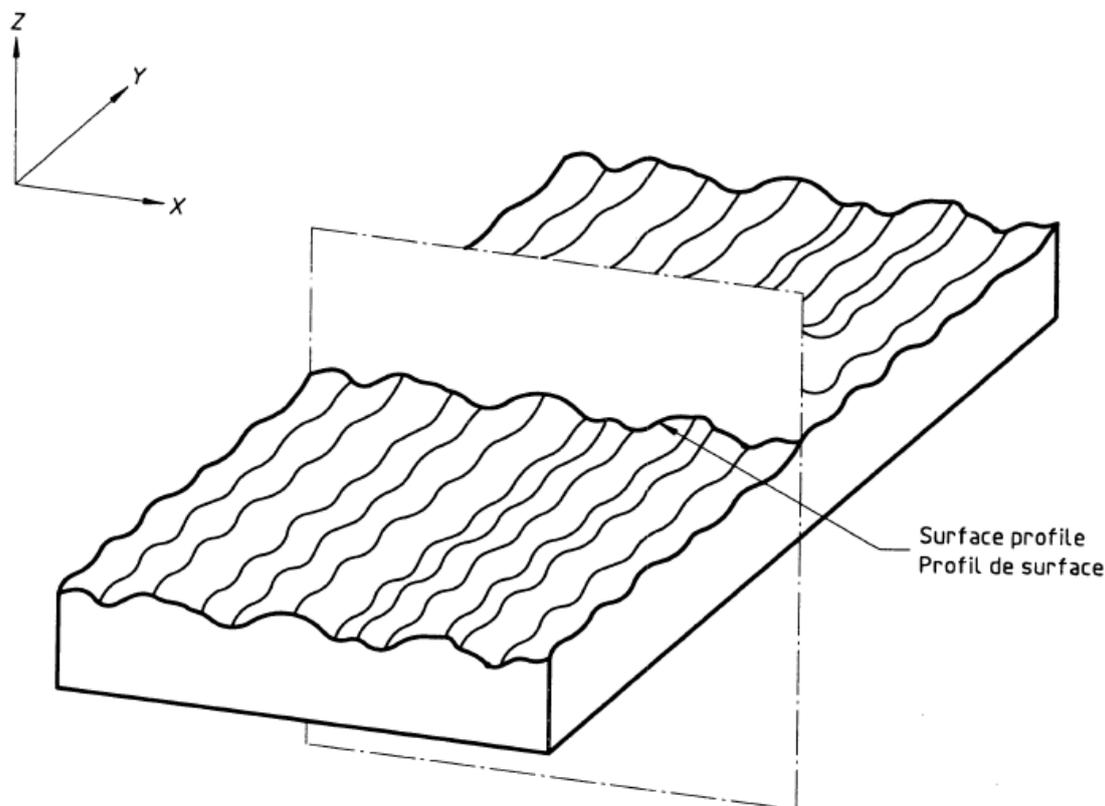


Figura 4.2: Profilo superficiale

- lunghezza di campionamento l_p , l_r , l_w : è la lunghezza in direzione dell'asse x, usata per identificare le irregolarità che caratterizzano il profilo che si sta valutando. La lunghezza di campionamento è lunga a sufficienza per includere un quantitativo di dati sufficiente a comporre un'analisi.
- lunghezza di valutazione: si riferisce alla parte di una data lunghezza estratta dal profilo lungo la direzione dell'asse X, al fine di valutare il profilo in analisi. La lunghezza di valutazione contiene una o più lunghezze di campionamento.

4.2 Termini relativi ai parametri geometrici

- Parametro P: parametro calcolato dal profilo primario

- Parametro R: parametro calcolato dal profilo di rugosità
- Parametro W: parametro calcolato dal profilo di ondulazione
- Picco di profilo: è una porzione del profilo che si trova al di sopra della linea media e congiunge due punti adiacenti dell'intersezione del profilo con l'asse x.
- Valle del profilo: è una porzione del profilo che si trova al di sotto della linea media e congiunge due punti adiacenti dell'intersezione del profilo con l'asse x.
- Discriminazione di altezza e/o spaziatura: minima altezza e minima spaziatura dei picchi del profilo e delle valli del profilo
- Elemento del profilo: picco del profilo e adiacente valle del profilo [figura 4.3]

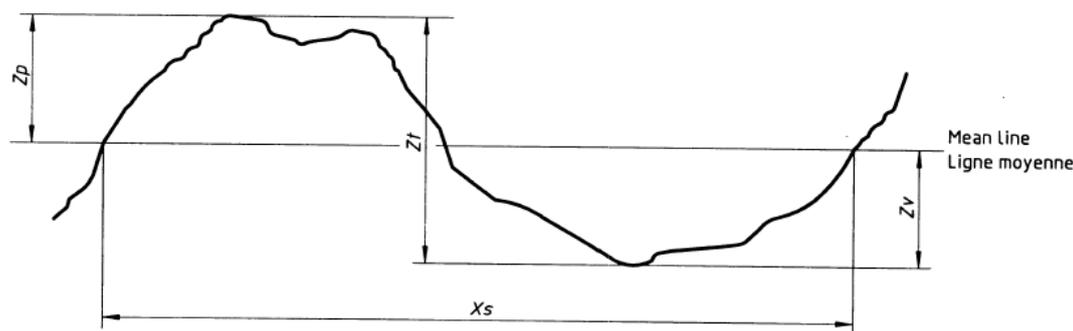


Figura 4.3: Elemento del profilo

- Valore dell'ordinata $Z(x)$: altezza del profilo selezionato, in qualunque posizione x
- Pendenza locale $\frac{dZ}{dX}$: pendenza del profilo selezionato, in una certa posizione x_i [figura 4.4]
- Altezza del picco del profilo Z_p : distanza tra l'asse x e il punto più alto del picco del profilo [figura 4.3]
- Profondità della valle del profilo Z_v : distanza tra l'asse x e il punto più profondo del picco del profilo [figura 4.3]

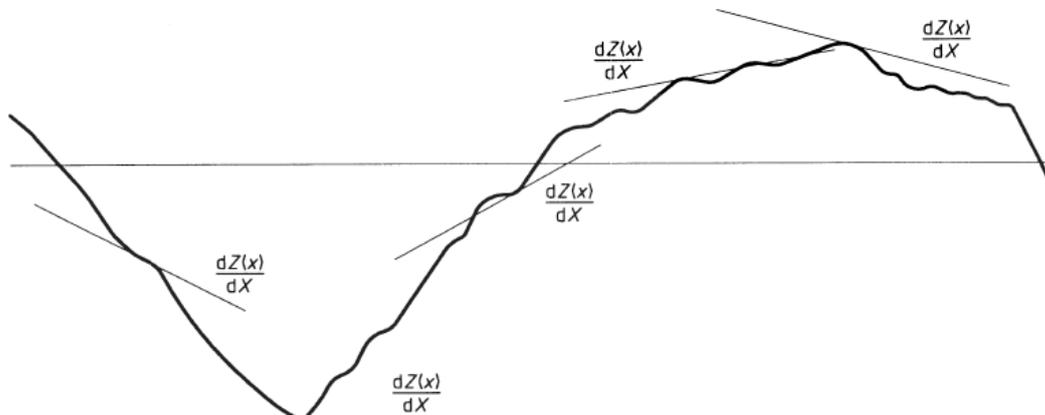


Figura 4.4: Pendenza locale

- Altezza dell'elemento del profilo Z_t : somma dell'altezza e del picco e della profondità della valle di un elemento del profilo [figura 4.3]
- Larghezza dell'elemento del profilo X_s : larghezza del segmento dell'asse x che interseca l'elemento del profilo [figura 4.3]
- Lunghezza di materiale del profilo al livello c $Ml(c)$: somma delle lunghezze della sezione ottenuta intersecando l'elemento del profilo con una linea parallela all'asse x , a un certo livello c [figura 4.5]

4.3 Definizioni dei parametri del profilo della superficie

I parametri di rugosità possono essere distinti in tre tipologie:

- I parametri di ampiezza sono misure di caratteristiche verticali delle deviazioni della superficie sulla linea di valutazione.
- I parametri di spaziatura sono misure di caratteristiche orizzontali delle deviazioni della superficie sulla linea di valutazione.
- I parametri ibridi sono misure in combinazione sia su parametri spaziali che su parametri di ampiezza sulla linea di valutazione.

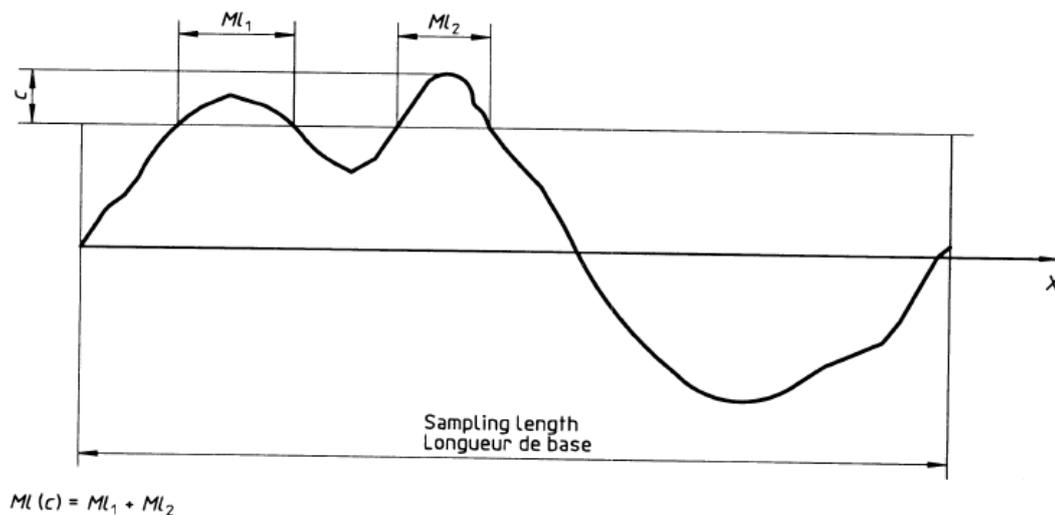


Figura 4.5: Lunghezza del materiale

4.3.1 Parametri di ampiezza (picco e valle)

- Altezza del picco massimo del profilo P_p, R_p, W_p : massima altezza di picco Z_p del profilo nella la lunghezza di campionamento [figura 4.6]

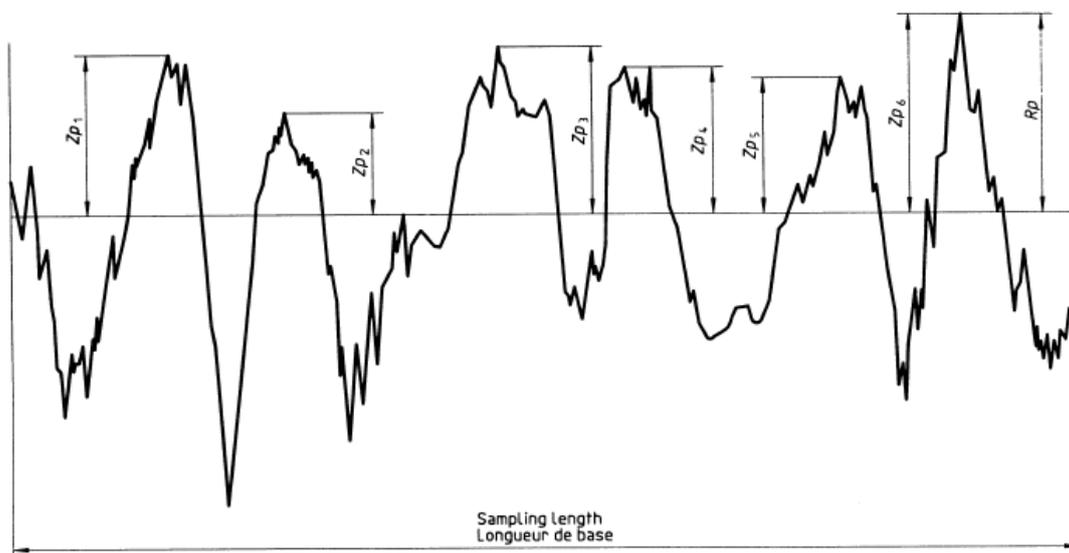


Figura 4.6: Altezza del picco massimo del profilo

- Profondità della massima valle del profilo P_v, R_v, W_v : massima profondità della valle Z_v del profilo nella la lunghezza di campionamento [figura 4.7]

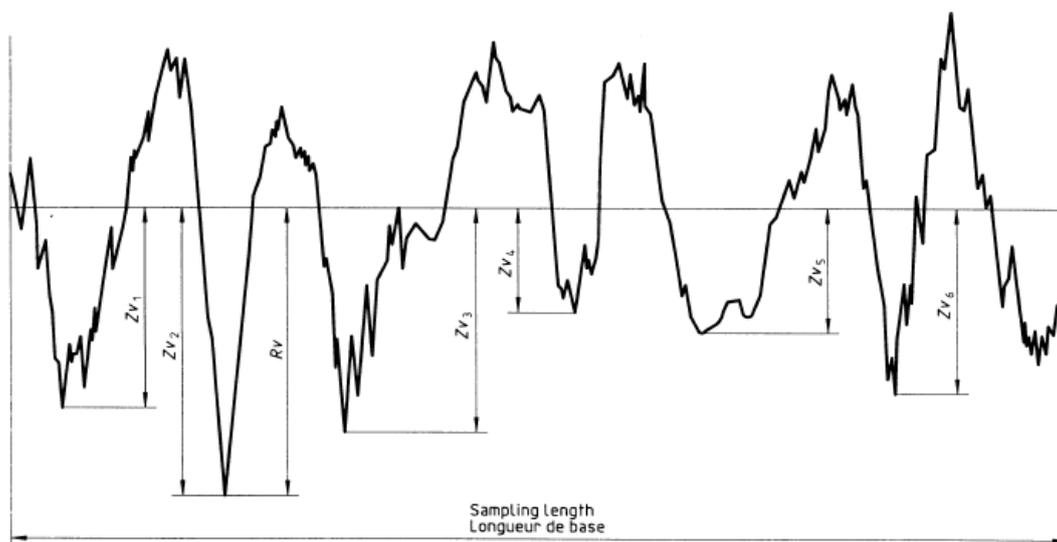


Figura 4.7: Profondità della massima valle del profilo

- Massima altezza del profilo P_z, R_z, W_z : è data dalla somma della massima altezza di picco del profilo Z_p e della massima altezza di valle Z_v in una certa lunghezza di campionamento [figura 4.8]
- Altezza media degli elementi del profilo: valore medio delle altezze Z_t degli elementi del profilo $P_c, R_c, W_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{t_i}$ [figura 4.9]
- Altezza totale del profilo P_t, R_t, W_t : è data dalla somma della massima altezza di picco del profilo Z_p e della massima altezza di valle Z_v in una certa lunghezza di campionamento

4.3.2 Parametri di ampiezza (media delle ordinate)

- Scostamento medio aritmetico del profilo: media aritmetica dei valori assoluti delle ordinate $Z(x)$ in una certa lunghezza di campionamento $P_a, R_a, W_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx$ con $l = l_p, l_r$ o l_w in funzione del caso

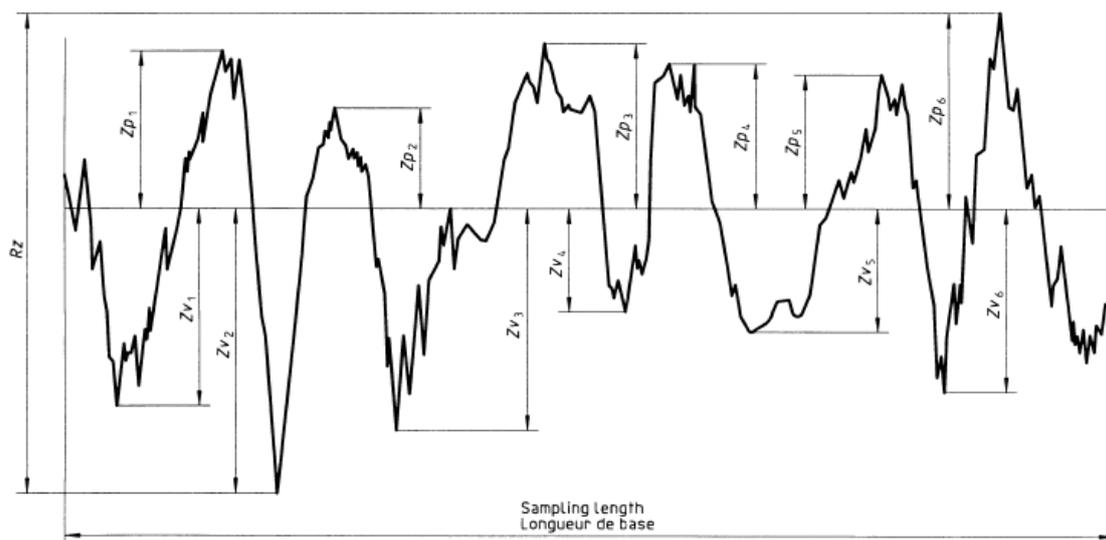


Figura 4.8: Massima altezza del profilo

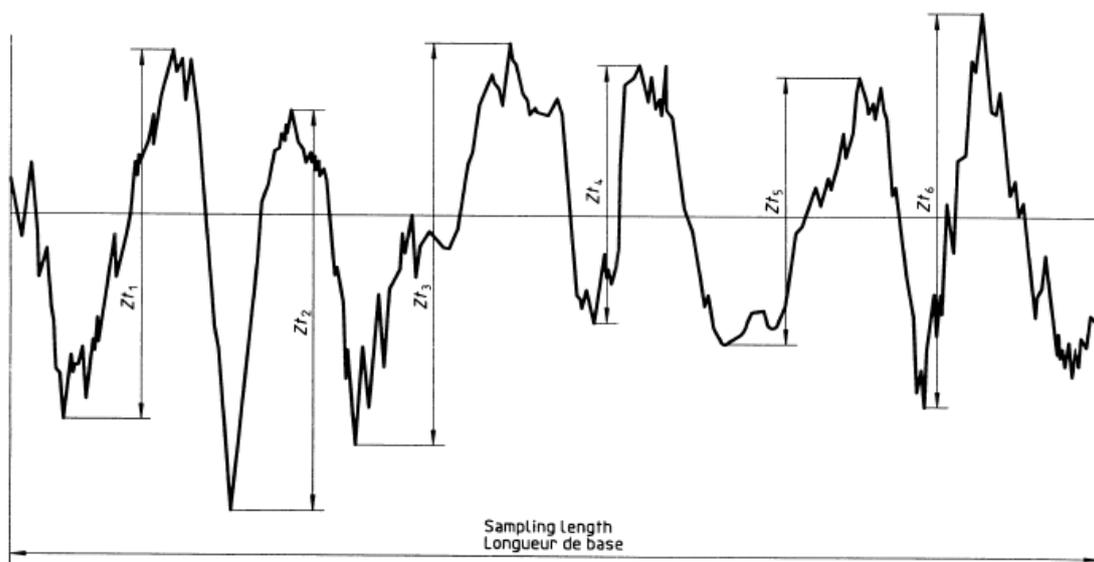


Figura 4.9: Altezza media degli elementi del profilo

- Scostamento quadratico medio del profilo: scostamento quadratico medio dei valori delle ordinate $Z(x)$ in una certa lunghezza di campionamento $P_q, R_q, W_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx}$ con $l = l_p, l_r$ o l_w in funzione del caso

- Asimmetria Psk , Rsk , Wsk : quoziente del valore medio del cubo del valore dell'ordinata Z e del cubo di P_q, R_q, W_q

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[\int_r^l Z^3(x) dx \right]$$

- Appiattimento Pku , Rku , Wku : quoziente del valore medio della quarta potenza del valore dell'ordinata Z e della quarta potenza di P_q, R_q, W_q

$$Rsk = \frac{1}{Rq^4} \left[\int_r^l Z^4(x) dx \right]$$

4.3.3 Parametri di spazio

- Lunghezza media degli elementi del profilo: valore medio delle larghezze degli elementi del profilo X_s in una lunghezza di campionamento $Psm, Rsm, Wsm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i$ [figura 4.10]

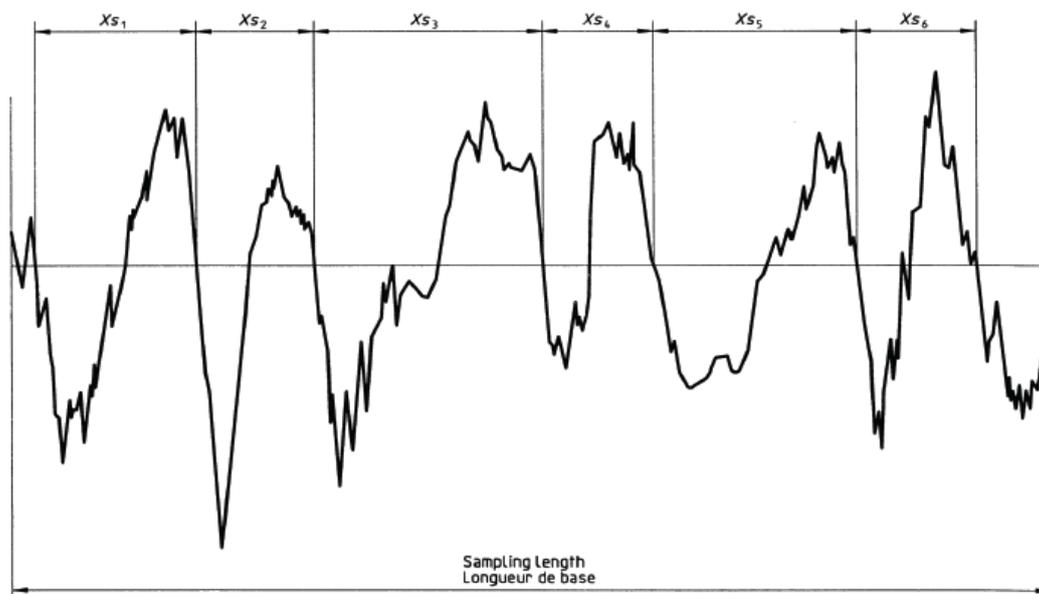


Figura 4.10: Larghezza degli elementi del profilo

- Numero di conteggio dei picchi: numero delle larghezze medie degli elementi del profilo in una lunghezza di riferimento L

$$PPc = \frac{L}{Psm}, \quad RPs = \frac{L}{Rsm}, \quad WPs = \frac{L}{Wsm}$$

4.3.4 Parametri ibridi

- Pendenza quadratica media del profilo: radice quadrata media delle pendenze $\frac{dZ}{dX}$ in una certa lunghezza di campionamento $P\Delta q, R\Delta q, W\Delta q$

4.4 Introduzione dei parametri relativi alla texture superficiale

La ISO 25178 è un nuovo standard internazionale dedicato alle specifiche e alla misurazione della trama superficiale 3D.

Sono state quindi introdotte delle nuove definizioni ed è stato imposto un nuovo vocabolario [figura 4.11]:

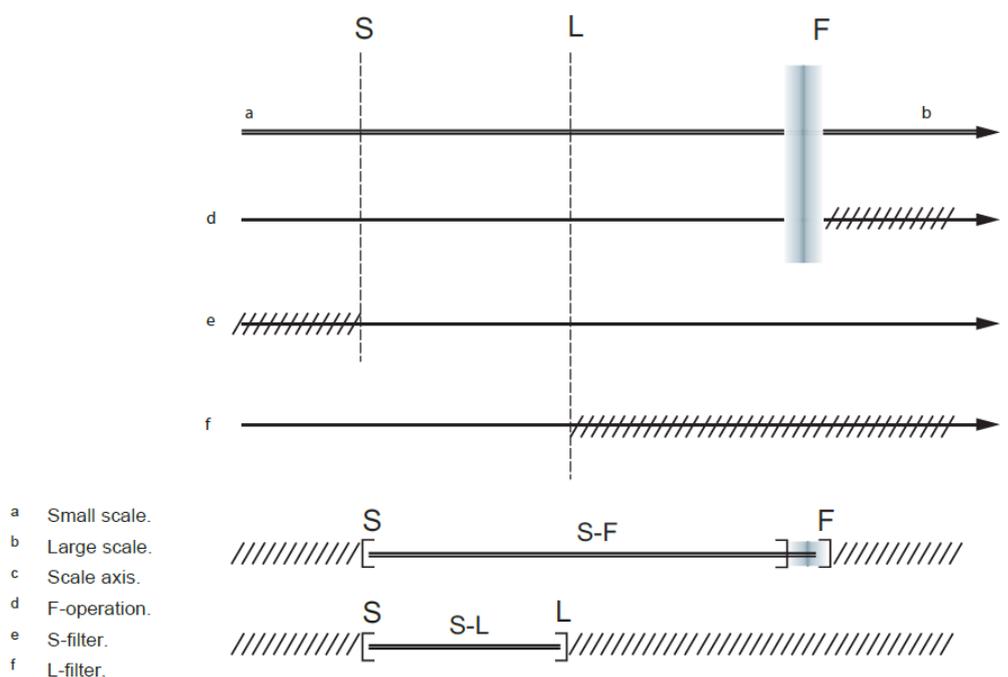


Figura 4.11: Relazione tra filtro S, filtro L, operazione F, superficie S-F e superficie S-L

- Filtro S: filtro che elimina gli elementi di scala più piccoli dalla superficie risultando così nella superficie primaria
- Filtro L: filtro che elimina gli elementi di scala più grandi dalla superficie primaria o superficie S-F
- Operatore F: operatore che rimuove la forma nominale dalla superficie primaria
- Superficie primaria: superficie ottenuta dopo il filtraggio a S

- Superficie S-F: superficie ottenuta dopo l'applicazione di un operatore F sulla superficie primaria
- Superficie S-L: superficie ottenuta dopo l'applicazione di un filtro L sulla superficie S-F

I principali parametri utili alla definizione della texture superficiale, descritti nella norma ISO 25178 [7], sono divisi in:

- parametri di altezza
- parametri spaziali
- parametri ibridi
- parametri funzionali

4.4.1 Parametri di altezza

I parametri di altezze sono determinati unicamente dalla distribuzione delle informazioni relative alle altezze. Di conseguenza, le caratteristiche degli elementi orizzontali non sono considerate in questi parametri.

- altezza quadratica media Sq: radice quadrata dei valori delle ordinate

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy}$$
- asimmetria Ssk: quoziente del valore medio del cubo dei valori delle ordinate e del cubo di Sq [figura 4.12]

$$Ssk = \frac{1}{ASq^3} \iint_A z^3(x, y) dx dy$$
 - Ssk<0 : la distribuzione dell'altezza è slittata sopra rispetto al piano medio
 - Ssk=0 : la distribuzione dell'altezza è simmetrica rispetto al piano medio
 - Ssk>0 : la distribuzione dell'altezza è slittata sotto rispetto al piano medio
- appiattimento Sku: quoziente del valore medio della quarta potenza dei valori delle ordinate e della quarta potenza di Sq [figura 4.13]

$$Sku = \frac{1}{ASq^4} \iint_A z^4(x, y) dx dy$$
 - Sku<0 : la distribuzione dell'altezza è slittata sopra rispetto al piano medio

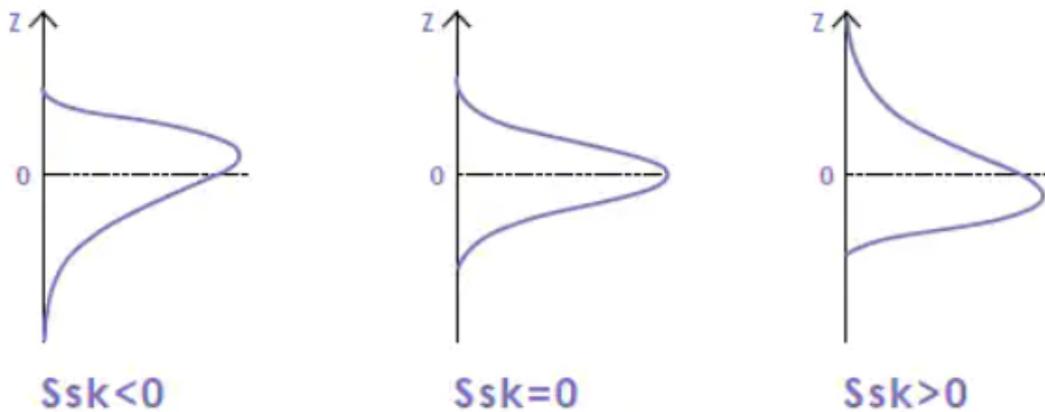


Figura 4.12: Asimmetria S_{sk}

- $S_{ku}=0$: la distribuzione dell'altezza è normale
- $S_{ku}>0$: la distribuzione dell'altezza è a spillo

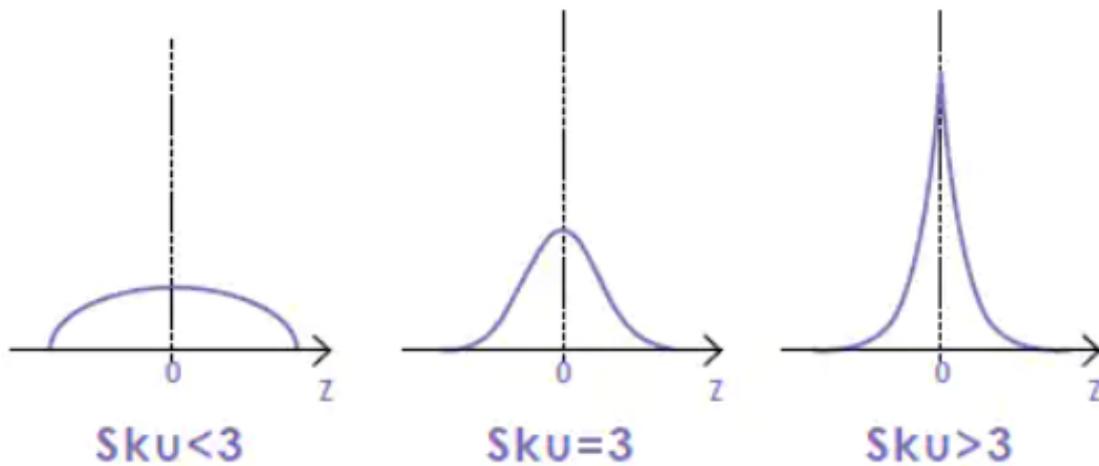


Figura 4.13: Appiattimento S_{ku}

- altezza massima del picco S_p
- profondità massima della valle S_v
- altezza massima S_z : corrisponde alla somma dell'altezza del picco massimo e della profondità della valle massima
 $S_z = S_p + S_v$

- media aritmetica delle altezze Sa : è l'estensione di Ra a una superficie. Corrisponde alla differenza media delle altezze dal piano medio. Questo parametro viene generalmente utilizzato per valutare la rugosità superficiale.

$$Sa = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy$$

4.4.2 Parametri spaziali

La valutazione di questi parametri viene effettuata in direzione orizzontale.

- funzione di autocorrelazione: nell'elaborazione delle immagini, corrisponde a una misura del rapporto di corrispondenza tra un'immagine resa in coordinate diverse e l'immagine originale. Quindi, quando la differenza è piccola, l'area di sovrapposizione è grande, così come il valore di autocorrelazione.
- lunghezza di autocorrelazione Sal : rappresenta la distanza orizzontale nella direzione in cui la funzione di autocorrelazione decade al valore $[s]$ più velocemente. Sal determina la distanza alla quale l'autocorrelazione diminuisce più velocemente e quindi può essere utilizzato per determinare se esiste un punto in cui l'altezza della superficie cambia bruscamente.
- rapporto di aspetto della texture superficiale Str : rappresentazione numerica dell'intensità di orientazione. Str è quindi una misura dell'uniformità della struttura della superficie. Str determina il rapporto delle distanze a cui l'autocorrelazione diminuisce più velocemente e più lentamente e quindi può essere utilizzato per determinare la presenza di residui.

$$Str = \frac{\min_{(tx,ty) \in R} \sqrt{tx^2 + ty^2}}{\min_{(tx,ty) \in Q} \sqrt{tx^2 + ty^2}}$$

- direzione della texture della superficie limitata in scala Std : angolo, valutato rispetto a una specifica direzione ϑ , della valore massimo dello spettro angolare

4.4.3 Parametri ibridi

I parametri ibridi utilizzano sia l'altezza che le informazioni laterali.

- gradiente della radice quadratica media della superficie limitata della scala Sdq : rappresenta il valore medio dei gradienti locali presenti sulla

superficie

$$Sdq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A \left[\left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy}$$

- rapporto sviluppato dell'area interfacciale della superficie limitata della scala Sdr: rappresenta un parametro che esprime l'indice di crescita nell'area superficiale

$$Sdr = \frac{1}{A} \iint_A \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2} - 1 \right) dx dy$$

4.4.4 Parametri funzionali

I parametri funzionali descrivono le proprietà di supporto, lubrificazione, attrito e usura della superficie da misurare.

- rapporto materiale areale della scala limitata della superficie $Smr(c)$ [figura 4.14]. La curva del rapporto materiale areale di un'area è una curva che rappresenta le altezze in corrispondenza delle quali il rapporto materiale areale cambia da 0% a 100%. Un rapporto materiale areale rappresenta l'area con un'altezza specifica c o superiore.

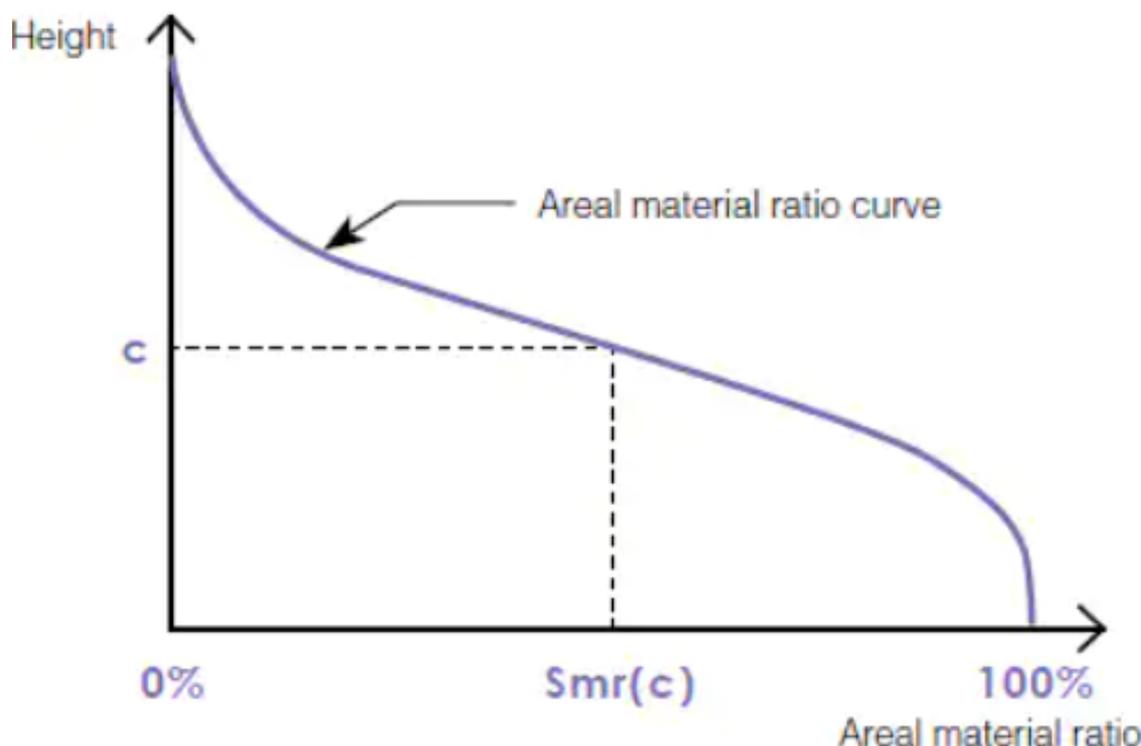


Figura 4.14: Rapporto materiale

- rapporto materiale areale inverso $S_{mc}(p)$: altezza c in corrispondenza della quale un dato rapporto materiale areale p è soddisfatto.
- differenza di altezza del rapporto materiale S_{dc} : differenza in altezza tra i rapporti materiali p e q .
 $S_{dc} = S_{mc}(p) - S_{mc}(q)$ con $p < q$
- rapporto materiale areale inverso della scala limitata della superficie $S_{mc}(mr)$: è l'altezza $[c]$ che dà il rapporto materiale areale $p\%$.
- altezza del nucleo S_k : distanza tra il più alto e il più basso livello della superficie del nucleo [figura 4.15].

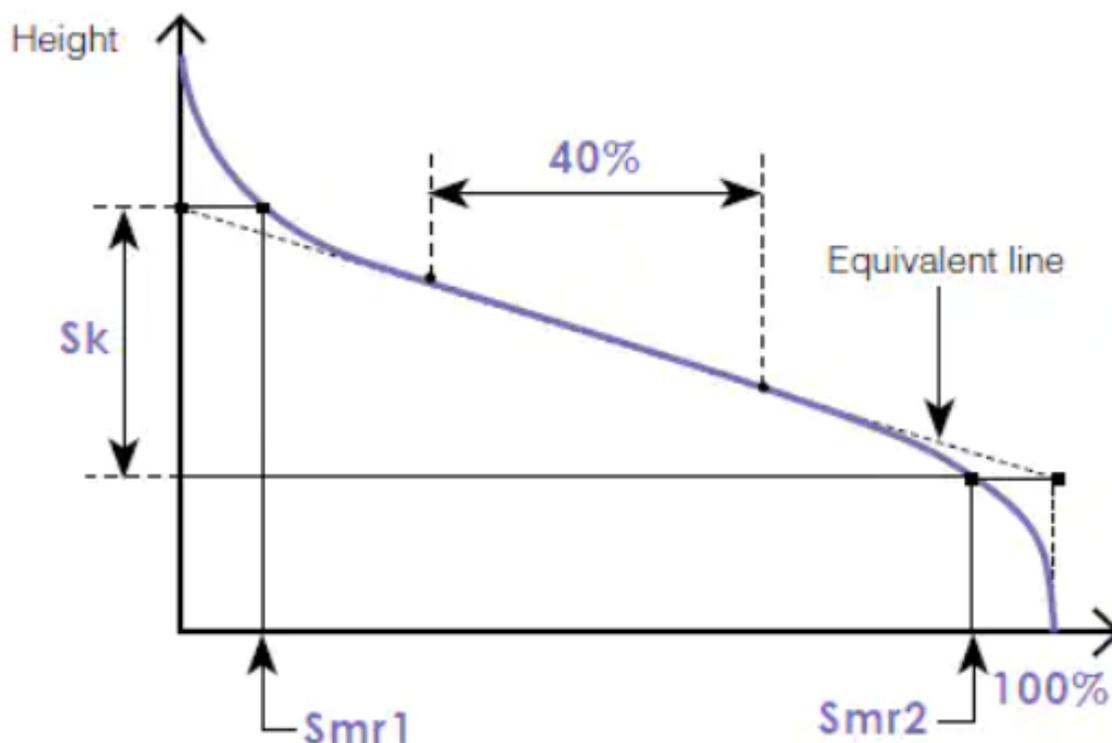


Figura 4.15: Rapporto materiale

nota: S_k rappresenta l'altezza della superficie del nucleo, S_{mr1} rappresenta il rapporto di materiale areale che divide i picchi ridotti dalla superficie del nucleo e S_{mr2} rappresenta il rapporto di materiale areale che divide le valli ridotte dalla superficie del nucleo. I picchi ridotti

sono le aree che vengono rimosse dall'abrasione iniziale. S_{pk} rappresenta l'altezza media dei picchi ridotti. Le valli ridotte sono le aree che trattengono il liquido applicato sulla superficie al fine di migliorarne la lubrificazione. S_{vk} rappresenta la profondità media delle valli ridotte.

- altezza di picco ridotta S_{pk} : altezza media dei picchi sporgenti sopra la superficie del nucleo [figura 4.16]

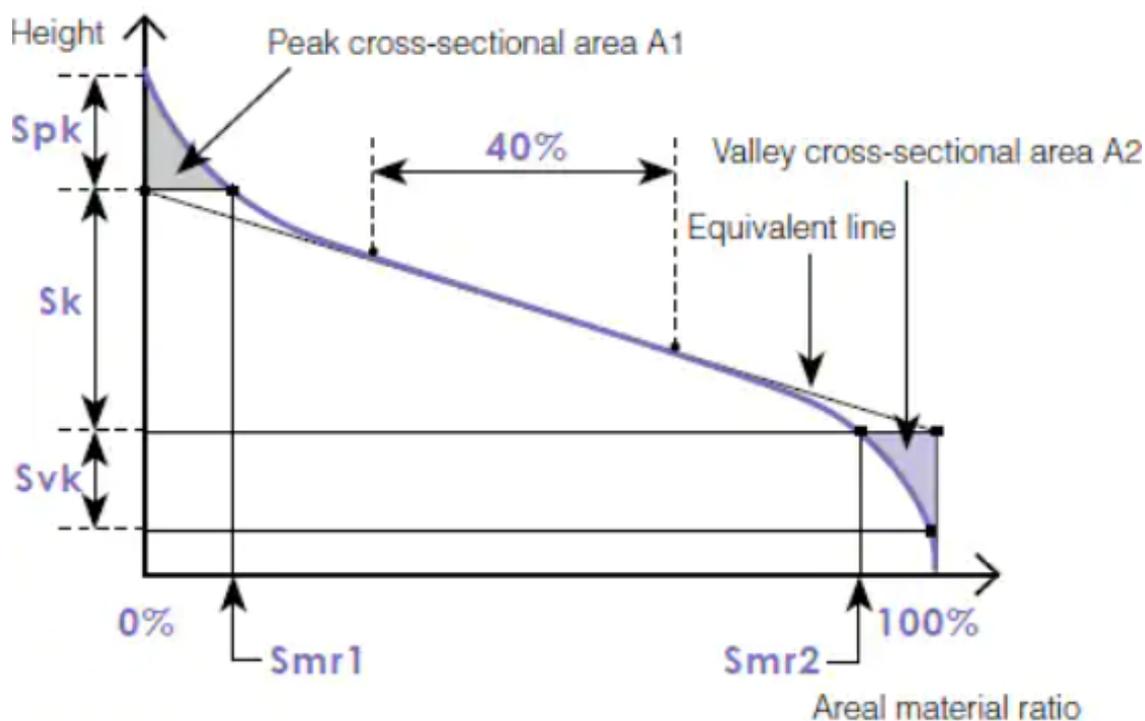


Figura 4.16: altezza di picco ridotta S_{pk}

- altezza della valle ridotta S_{vk} : altezza media delle valli sporgenti sotto la superficie del nucleo. Indica la profondità dell'area in cui si accumula il fluido applicato sulla superficie, che è un'informazione che può essere utilizzata per migliorare le proprietà lubrificanti della superficie.
- altezza del picco massimo S_{pkx} : altezza dei picchi sporgenti sulla superficie del nucleo, prima del processo di riduzione
- altezza del picco massimo S_{vix} : profondità delle valli sporgenti sulla superficie del nucleo, prima del processo di riduzione

- rapporto materiale Smr1: rapporto tra l'area del materiale in corrispondenza della linea di intersezione che separa le colline sporgenti dalla superficie del nucleo all'area di valutazione. Smr è la percentuale di materiale che comprende le strutture di picco associate a Spk. [figura 4.15]
- rapporto materiale Smr2: rapporto tra l'area del materiale in corrispondenza della linea di intersezione che separa le valli sporgenti dalla superficie del nucleo all'area di valutazione. Smr2 è la percentuale dell'area di misurazione che comprende le strutture di valle più profonde associate a Svk. [figura 4.15]
- altezza massima di picco Sxp: differenza in altezza tra il rapporto materiale p e q. Sxp rappresenta la differenza di altezza tra il piano medio e i picchi sulla superficie dopo che i picchi particolarmente alti sulla superficie sono stati rimossi. [figura 4.17]
 $S_{xp} = S_{mc}(p) - S_{mc}(q)$

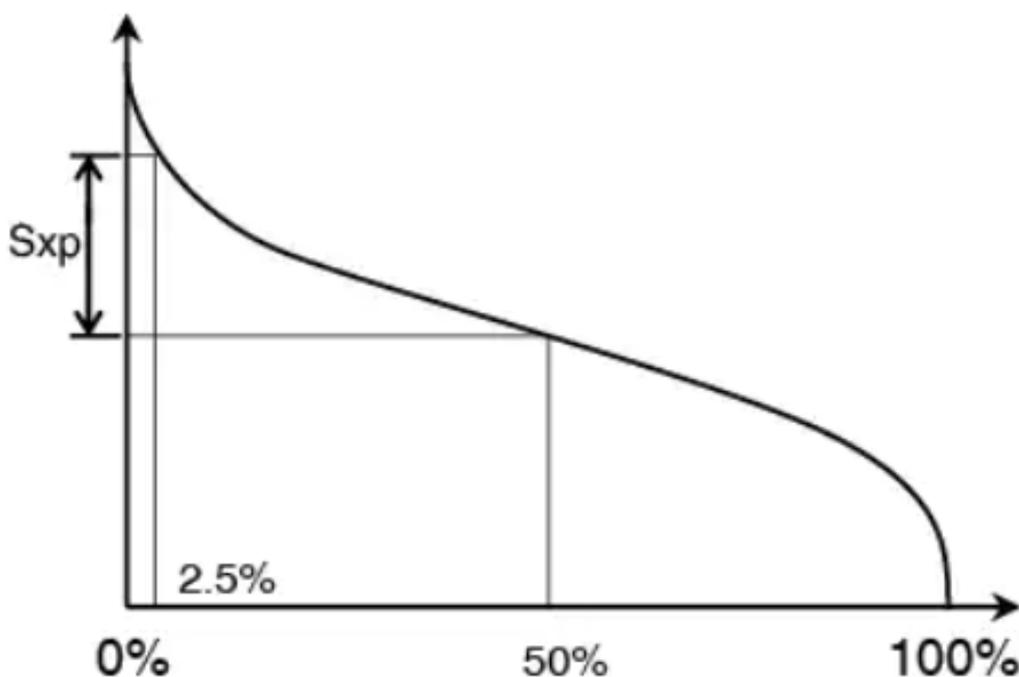


Figura 4.17: altezza massima di picco Sxp

- volume vuoto $V_v(p)$: volume dei vuoti per unità di area di un dato rapporto materiale calcolato dalla curva del rapporto materiale areale.

$$V_v(p) = \frac{K}{100\%} \int^{100\%}_p [S_{mc}(p) - S_{mc}(q)] dq$$

- volume vuoto della valle della superficie in scala limitata V_{vv} : volume della valle al rapporto materiale p .

$$V_{vv} = V_v(p)$$

- volume vuoto del nucleo della superficie in scala limitata V_{vc} : differenza in volume vuoto tra il rapporto materiale p e q .

$$V_{vc} = V_v(p) - V_v(q)$$

- volume materiale $V_m(p)$: volume del materiale per unità di area ad un dato rapporto materiale calcolato dalla curva del rapporto materiale areale.

$$V_m(p) = \frac{K}{100\%} \int^p_0 [S_{mc}(q) - S_{dc}(p)] dq$$

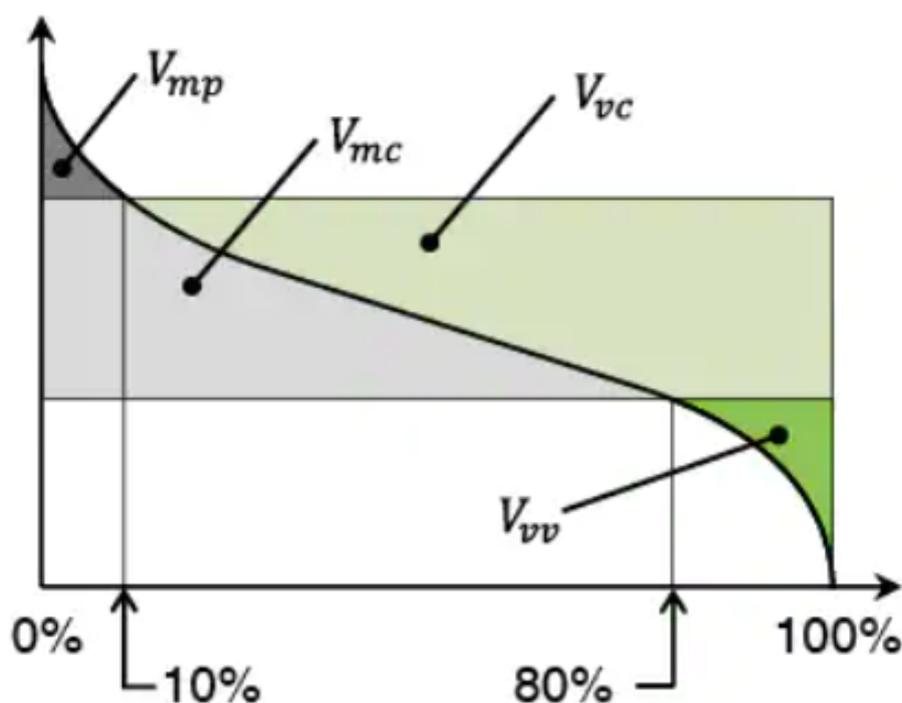


Figura 4.18: volume vuoto e parametri materiali di volume

- volume del materiale del picco della superficie della scala limitata V_{mp} : volume del materiale a p

- volume del materiale del nucleo della superficie della scala limitata V_{mc} :
differenza in volume materiale tra il rapporto materiale p e q
 $V_{mc} = V_m(q) - V_m(p)$

4.5 Ha senso paragonare S_a e R_a ?

S_a , utilizzato per valutare la rugosità superficiale, può essere considerato come l'estensione di R_a a una superficie ed esprime la differenza di altezza di ogni punto rispetto alla media aritmetica della superficie [8].

Dal momento che i valori di profilo della rugosità differiscono dai valori di superficie della rugosità, questi non possono essere direttamente confrontati. Pertanto, quando un disegno tecnico contiene una specifica della struttura della superficie che utilizza R_a , non è possibile confrontare direttamente i valori di S_a con il valore di tolleranza fornito per R_a . È necessario fissare un nuovo valore di tolleranza per le misurazioni dell'area e definire nuove specifiche, adattate a S_a .

La prima ragione per la quale è impossibile procedere con un confronto diretto riguarda la di banda di analisi. I parametri di profilo utilizzano filtri unidimensionali, mentre i parametri di rugosità areale utilizzano filtri bidimensionali [9]. A causa della differenza degli algoritmi di questi due filtri, i parametri di profilo e di rugosità areale non possono quindi essere confrontati direttamente. R_a , infatti, è calcolato su un profilo di rugosità, basato su un filtro di profilo che filtra le frequenze spaziali lungo l'asse X e viene valutato su più lunghezze di campionamento e mediato. S_a è invece calcolato su una superficie S-L o S-F in base a un filtro 3D che tiene conto delle lunghezze d'onda in tutte le direzioni e quindi genera un effetto diverso dal filtro di profilo.

La seconda ragione per la quale sono necessarie specifiche distinte per S_a ha a che fare con la dimensione e la risoluzione della superficie misurata.

Quando si misura un profilo su un componente, una misura tipica è di 5,6 mm di lunghezza con una risoluzione laterale di 0,5 μm .

Una misurazione dell'area effettuata con un profilatore ottico è solitamente più piccola nella dimensione laterale. La sua risoluzione laterale cambia ordine a seconda della lente dello strumento. Uno strumento di scansione laterale, come un profilometro a stilo 3D, consente di scansionare un'area più ampia e generare una superficie di diversi millimetri.

Queste differenze nella risoluzione laterale e nella dimensione della scansione

portano a differenze nei valori dei parametri che quindi non possono essere direttamente confrontati [10].

Capitolo 5

Additive Manufacturing

5.1 La definizione di Additive

Additive vuole dire aggiungere materiale per creare la geometria di componenti che, a differenza delle tecniche tradizionali, non sono realizzati con processi di produzione sottrattivi [11].

E' ancora presto per considerare l'AM come parte di una terza rivoluzione industriale, ma sicuramente l'Additive sta introducendo notevoli vantaggi rispetto alle lavorazioni convenzionali [12]. Nei campi nei quali la complessità e la personalizzazione del prodotto sono i vantaggi chiave, l'AM infatti comincia a essere usato per la realizzazione dei prodotti finali [13].

Il vantaggio principale dell'Additive è quindi legato alla possibilità di creare geometrie complesse che non sarebbe possibile produrre sfruttando semplicemente le tecniche sottrattive, a causa delle restrizioni del percorso utensile insite nelle lavorazioni convenzionali.

Un altro vantaggio significativo dell'AM è la potenziale riduzione del time to market, ottenuta sfruttando alcuni fattori come il ridotto tempo di preparazione e di attrezzaggio delle macchine, la potenziale riduzione del conto delle parti e un'associata riduzione del tempo di assemblaggio.

E' importante inoltre tenere conto del fatto che con l'Additive si ha la possibilità di realizzare oggetti multi-pezzo, come se si trattasse di un solo componente. In questo modo le aziende hanno la possibilità di abbattere i costi di produzione [14].

Tuttavia, c'è ancora una forte incertezza riguardo le caratteristiche superficiali incontro alle quali si va producendo con l'additive dal momento che è difficile ottenere un ottimo controllo dimensionale e una perfetta integrità superficiale.

Nonostante ciò la tecnologia dell'Additive Manufacturing sta passando rapidamente dall'essere una tecnica efficace per produrre prototipi partendo da modelli CAD al diventare un vero e proprio processo di fabbricazione per lo sviluppo di prodotti [15].

Al giorno d'oggi tra le più diffuse tecnologie AM che lavorano a letto di polvere in materiale metallico, c'è la fusione selettiva mediante fascio laser (Laser Powder Bed Fusion - L-PBF) [16].

5.2 Laser Powder Bed Fusion

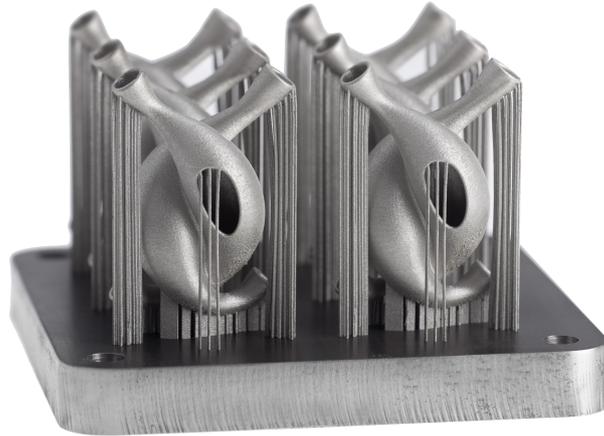


Figura 5.1: Esempio di componente realizzato con la tecnica L-PBF [17]

La Laser Powder Bed Fusion è una tecnica AM per metalli basata sull'uso di una sorgente laser che porta a fusione le particelle di metallo di un letto di polvere [18].

Ad oggi, con questa tecnica, se il processo è adeguatamente controllato, si ha la possibilità di eliminare le porosità e di ottenere una densità prossima al 100%. Attualmente le principali applicazioni della L-PBF si trovano nel campo biomedicale, aerospaziale, dentale, degli stampi e della gioielleria.

5.2.1 Processo L-PBF

Il processo prevede inizialmente la deposizione e il livellamento di uno strato di polvere sulla piattaforma, tramite l'uso di una lama.

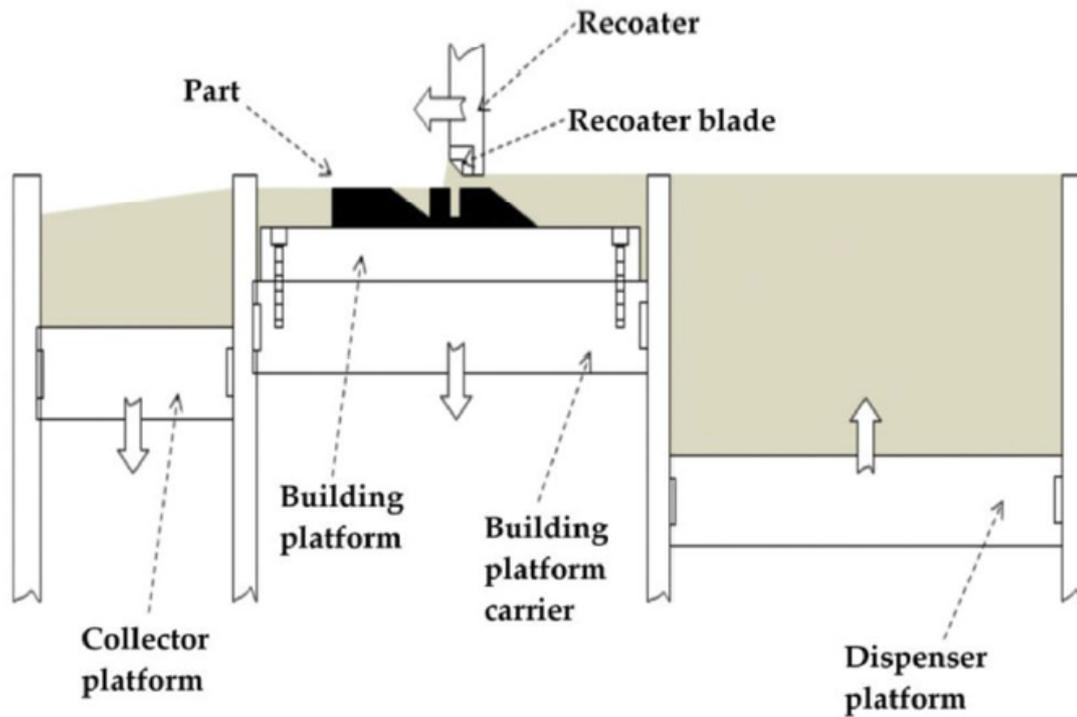


Figura 5.2: Schema L-PBF [19]

In seguito una sorgente laser genera un fascio che viene messo in movimento da una testa di scansione che garantisce una velocità di movimentazione di qualche metro al secondo. Attualmente, le sorgenti laser più diffuse emettono radiazioni laser nel vicino infrarosso e sfruttano come mezzo laser attivo un cristallo d'ittrio e alluminio drogato (Nd-Yag). Le potenze installate variano da 100W a 500W e i fasci laser sono di dimensioni comprese tra i 50 e i 200 μm .

Il fascio laser, orientato perpendicolarmente rispetto al piano di lavoro tramite un sistema di specchi, incide sul letto di polvere e fonde le particelle esclusivamente dove il materiale deve essere costruito, come indicato dal disegno CAD.

Il piano di lavoro è costituito da una piattaforma, movimentata lungo l'asse verticale da un elevatore, che può essere riscaldata fino a 200°C per facilitare l'adesione dello strato iniziale.

Ottenuto il primo strato, il cui spessore dipende dallo slicing del disegno 3D, la piastra di costruzione viene fatta scendere di una distanza circa pari a quella dello strato di polvere. A questo punto la sequenza si ripete con la

deposizione di un successivo strato di polvere e con la sua fusione localizzata. Una volta completato il processo produttivo, la piastra di costruzione salirà nella posizione iniziale. Dal blocco di polvere prodotto viene quindi allontanata la polvere non reagita, in modo da poter procedere con l'estrazione del pezzo finale. Dal momento che con questa tecnica si lavora con percentuali di ossigeno in percentuale inferiore al 0.10%, la polvere non reagita può essere riutilizzata per lavori successivi.

5.2.2 Caratteristiche della tecnica L-PBF

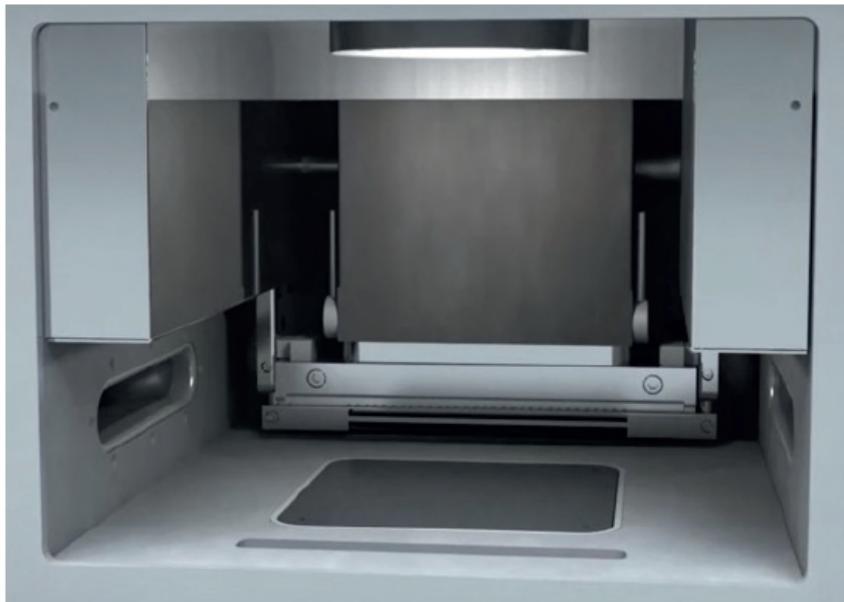


Figura 5.3: Camera di costruzione L-PBF

L'intero processo viene effettuato lavorando a temperatura ambiente e, oltre a questo, occorre tener conto della necessità di insufflare Argon per rendere l'atmosfera più inerte, soprattutto nel momento in cui si lavora con materiali molto reattivi come il Titanio. E' fondamentale mantenere nella camera livelli di ossigeno inferiori al 0.10% per evitare conseguenti ossidazioni.

Un limite notevole di questa tecnica è dato dal fatto che, come per i processi di fonderia, sono richiesti dei trattamenti termici per l'eliminazione delle tensioni residue, causate dalle deformazioni plastiche accumulate, che potrebbero portare alla rottura delle pareti più sottili del componente.

Nella L-PBF sono necessari i supporti non solo per sostenere il pezzo, ma anche per evitare il distacco del componente dalla piattaforma, che potrebbe nascere a causa del ritiro di solidificazione. I supporti, al termine del processo, come accade anche per le tecniche di fonderia, devono essere rimossi meccanicamente.

E' stato dimostrato che il processo L-PBF può fornire proprietà meccaniche almeno buone quanto i materiali convenzionali forgiati o fusi [20]. Un vantaggio è infatti dato dal fatto che grazie alla fusione e successiva rapidissima solidificazione le caratteristiche meccaniche/metallurgiche di queste leghe si dimostrano essere migliori di quelle ottenute con metodi tradizionali. E' possibile infatti ottenere grani fini e elevate prestazioni meccaniche.

5.2.3 Materiali

I materiali principalmente utilizzati per la realizzazione di componenti con la L-PBF sono i seguenti:

- Lega di alluminio
- Cobalto Cromo, per applicazioni in campo biomedicale, motorsport e aerospazio
- Acciaio per stampi
- Acciaio inox
- Lega di Titanio Ti6Al4V
- Inconel IN625
- Inconel 718
- Leghe Au

5.3 La rugosità nell'Additive

Spesso, per descrivere una superficie, il parametro più comunemente usato è la rugosità aritmetica R_a , che però non fornisce un'adeguata rappresentazione della topografia di una superficie per parti AM [21].

Recentemente ci si è quindi spostati sull'uso di parametri areali, in 3 dimensioni [22]. Parametri di rugosità superficiale possono infatti meglio descrivere

le superfici, soprattutto quando la zona da valutare presenta caratteristiche non uniformemente distribuite e quindi risulta essere anisotropa [23].

L'uso di parametri superficiali porta a distinti vantaggi rispetto ai parametri di profilo, per la caratterizzazione delle superfici: la topografia superficiale è tridimensionale in natura, quindi qualunque analisi bidimensionale dà una ambigua o incompleta descrizione della superficie reale [12].

Il problema principale è dato dal fatto che i tradizionali parametri di rugosità superficiale sono stati definiti prima dell'avvento dell'AM e quindi prima che sorgesse la necessità di indagare sull'applicabilità di questi parametri alle superfici insolite create attraverso varie tecnologie AM.

La rugosità superficiale spesso è quindi usata come un indicatore dei processi di AM, ma non è possibile confrontare direttamente i valori delle misure di rugosità superficiale e di profilo a causa delle fondamentali differenze che si incontrano nelle tecniche di misurazione.

Nonostante ciò molti ricercatori vorrebbero effettuare dei confronti tra le misure che ottengono in laboratorio con diversi strumenti o con i valori incontrati in letteratura. Spesso, nel caso di superfici semplici e abbastanza regolari, una media di 3-5 valori di Ra può ben approssimare Sa; ma invece per superfici complesse la discrepanza tra Ra e Sa tende a essere notevole.

5.4 Post-processing

Negli ultimi anni, la produzione di componenti in materiale metallico è stata rivoluzionata dallo sviluppo delle tecnologie additive (vedi paragrafo 5.1). Tuttavia la produzione di componenti di qualità in materiale metallico in AM richiede un certo numero di operazioni di finitura.

La scelta del processo di finitura più adeguato incide sul miglioramento della rugosità superficiale, sulle tolleranze, sull'integrità dei componenti e sui costi.

5.4.1 Pallinatura

Vari processi di produzione utilizzati nei settori aerospaziale, aeronautico, automobilistico, energetico e delle attrezzature pesanti possono produrre sollecitazioni di trazione sulla superficie dei componenti. La pallinatura è una tecnica utilizzata per rifinire superficialmente i componenti metallici e per migliorare la resistenza a fatica di componenti soggetti a carichi alternati elevati [24].

E' una tipologia di lavorazione a freddo che consiste nel martellamento della superficie mediante un violento getto di pallini sferici, oppure cilindretti

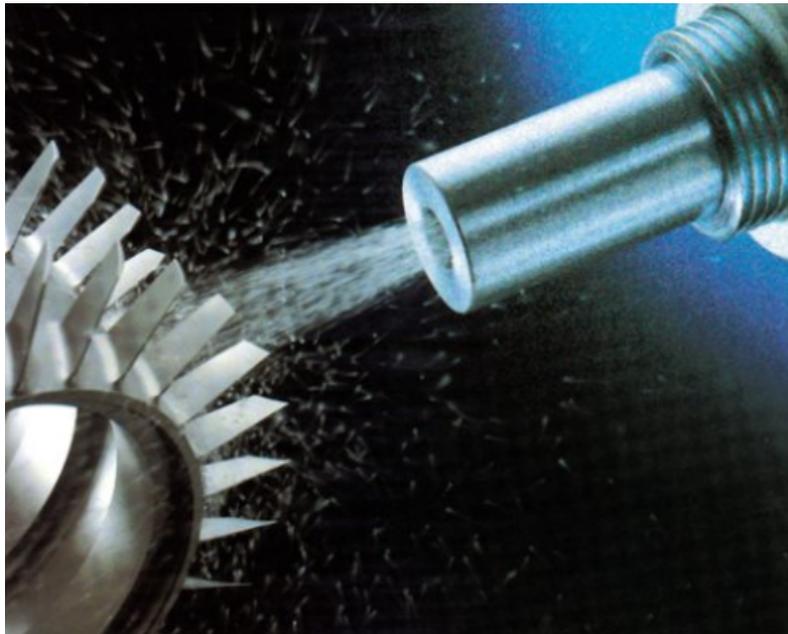


Figura 5.4: Vista in dettaglio del getto

ottenuti tagliando un filo (cut-wire). Gli ugelli “sparano” il getto verso i componenti da lavorare tramite una o più giranti centrifughe in rapida rotazione, oppure tramite aria compressa.

L’effetto finale dipende da una serie di parametri: durezza e dimensione dei pallini, portata, intensità, velocità e angolo di impatto del getto e dalla distanza a cui è posto il pezzo da trattare.

Per il getto possono essere utilizzati materiali come ghisa, acciaio, vetro o ceramica. I manufatti lavorabili con pallinatura possono essere in ferro, acciaio o acciaio inossidabile, ma anche in bronzo, ottone, titanio, alluminio e varie leghe. Per questo processo quindi la bontà del risultato è fortemente dipendente dalla scelta corretta del materiale e della granulometria dell’abrasivo che viene adoperato.

Occorre infatti prestare attenzione a scegliere accuratamente le dimensioni della grana dal momento che si rischia di portare il materiale a una erosione eccessiva, se viene scelta una grana troppo grossa, o di andare incontro a un processo troppo lento, se viene scelta una grana troppo fine.

La lavorazione crea dei piccoli crateri, dette anche indentature, nello strato superficiale e quindi provoca una compressione superficiale del metallo. Il getto, infatti, induce una deformazione plastica che si propaga fino ad alcuni decimi di millimetro nel materiale.

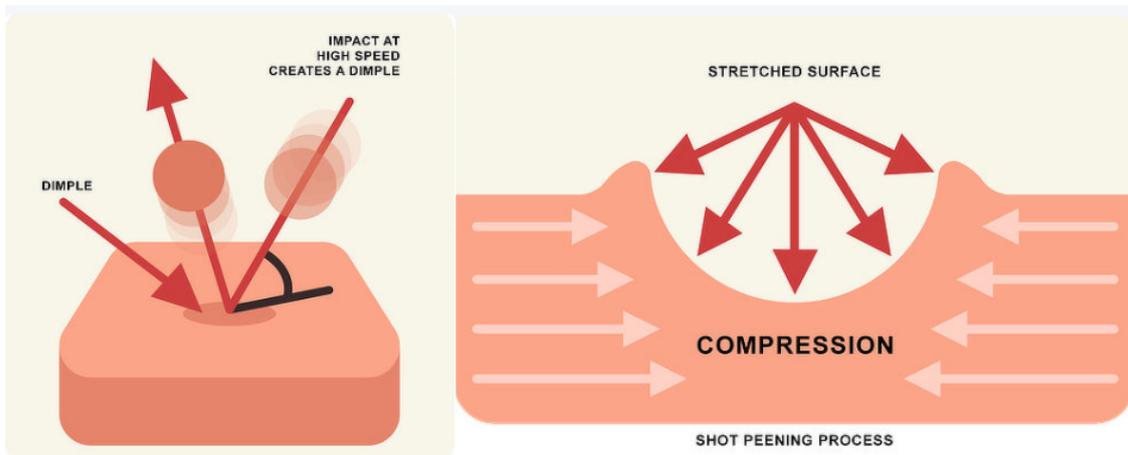


Figura 5.5: Processo di azione del getto

Sfruttando questa tecnica vengono modificate le proprietà meccaniche del pezzo in lavorazione, migliora la distribuzione delle tensioni superficiali del materiale e aumenta la resistenza a fatica del pezzo trattato. Inoltre questa tecnica viene utilizzata con l'intento di eliminare sbavature, segni di lavorazioni meccaniche e rendere omogenee le superfici da trattare. Occorre però prestare attenzione al fatto che la deformazione plastica e la rugosità superficiale sono diverse quando la velocità di deformazione della pallinatura cambia [25].

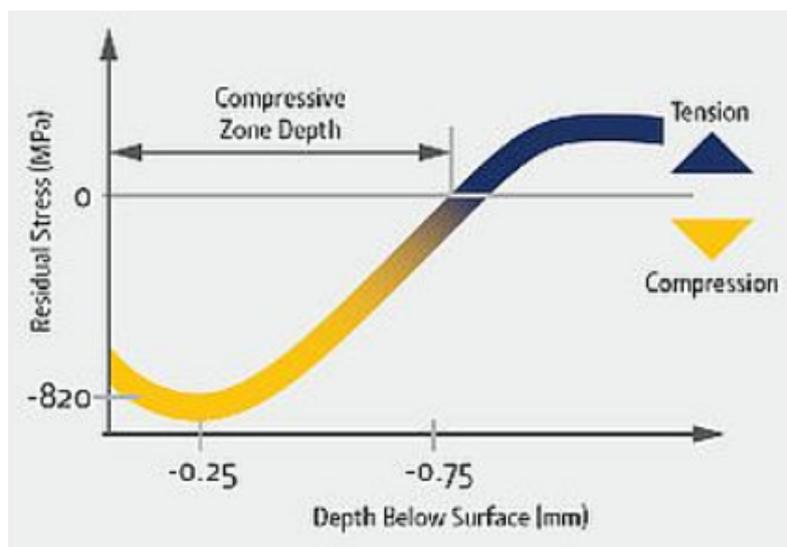


Figura 5.6: Andamento tensionale

Dopo il trattamento, a causa delle microcavità che si generano e che si sovrappongono l'una all'altra, si ha una riduzione della quantità di luce riflessa dal metallo, e quindi una riflessione diffusa.

Gli obiettivi della pallinatura sono di seguito riassunti:

- ottenere una finitura superficiale omogenea
- eliminazione delle microbave che potrebbero formarsi a seguito dei processi di lavorazione meccanica
- aumentare il ciclo di vita di componenti meccanici soggetti a sollecitazioni
- rifinire le superfici di oggetti creati con l'AM
- prevenire la propagazione di cricche attraverso il materiale
- alterare la rugosità superficiale

Capitolo 6

La Reverse Engineering

6.1 Definizione di Reverse Engineering

Al giorno d'oggi, data l'esistenza di un mercato globale altamente competitivo, le aziende sono costantemente alla ricerca di nuovi metodi per accorciare i tempi di sviluppo dei prodotti. La Reverse Engineering è infatti considerata una tecnologia nata e sviluppatasi proprio con questo intento [26].

La Reverse Engineering, al contrario del tradizionale processo che parte da alti livelli di astrazione e conduce a una implementazione fisica del sistema, è un metodo sfruttato per ricostruire virtualmente, e quindi digitalizzare, oggetti "reali", per ottenere un modello matematico [27].

Si tratta quindi di una tecnica che ha come fine quello di recuperare i dati utilizzati durante il processo di sviluppo di un prodotto, per trasferirli in un modello virtuale tridimensionale.

Attualmente, la Reverse Engineering viene sfruttata in molteplici campi di applicazione:

- design industriale;
- design di gioielli;
- modelli per animazioni in giochi o film;
- modelli per la riproduzione di opere d'arte;
- scene del crimine;
- settore biomedicale;

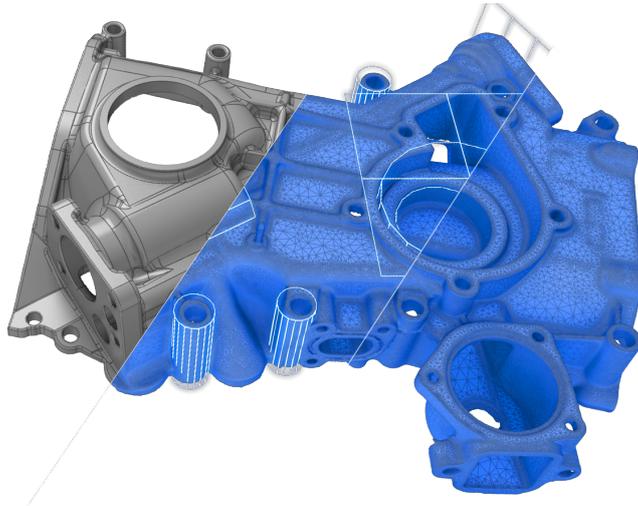


Figura 6.1: esempio di componente trattato con la Reverse Engineering [28]

- settore aerospaziale;
- settore automobilistico;

I motivi per i quali si sfrutta la RE sono di seguito riportati:

- un cliente può aver bisogno di un componente il cui produttore originale non esiste più;
- la documentazione del design originale del prodotto potrebbe non esistere più;
- creare dei dati per un componente per il quale non si ha a disposizione il CAD o per il quale i dettagli sono diventati obsoleti o sono stati persi;
- creare un archivio digitale delle parti;
- eliminare dei dettagli negativi dal componente;
- rafforzare le buone caratteristiche di un prodotto;
- analizzare le caratteristiche dei prodotti dei competitors;

6.2 Il processo della Reverse Engineering

Per ottenere da un modello fisico la sua ricostruzione virtuale, si procede con quattro fasi:

1. acquisizione dati
2. pre-elaborazione dei dati
3. segmentazione e creazione di superfici
4. creazione del modello CAD

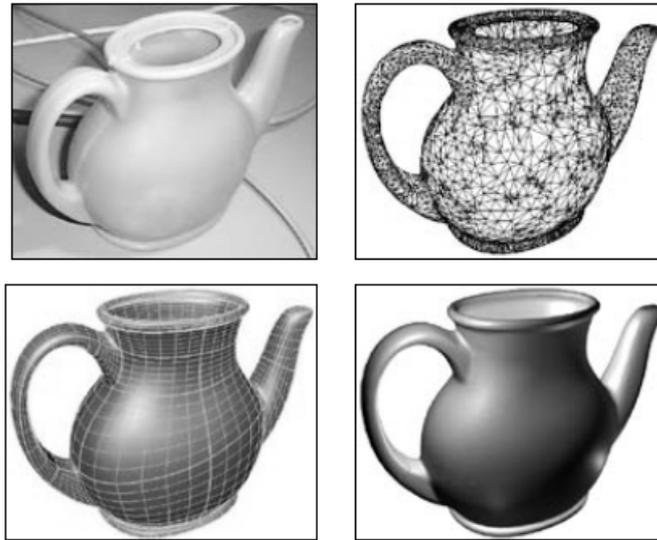


Figura 6.2: Le fasi della Reverse Engineering applicate a un componente

6.2.1 Acquisizione dei dati

Il risultato a cui si giunge al termine di questa fase è un insieme di punti definito come "nuvola di punti".

Prima di procedere con l'acquisizione dei dati occorre preparare il componente:

- pulizia delle superfici, per non acquisire lo sporco.
- fissare il pezzo su un supporto, per evitare che si muova. E' importante che durante l'acquisizione il pezzo rimanga fermo, poiché spostamenti minimi potrebbero portare a errori durante la fase di allineamento ed unione delle diverse viste dell'oggetto.
- studiare il pezzo per minimizzare il numero di acquisizioni.



Figura 6.3: esempio di preparazione del componente [29]

- trattare le superfici riflettenti, quando necessario, con gli spray opacizzanti.
- posizionare i marcatori, utili ad assemblare le acquisizioni. Nel momento in cui diventa necessario effettuare più rilevamenti, è fondamentale infatti che viste adiacenti abbiano almeno 3 marker comuni affinché l'assemblaggio possa poi essere completato correttamente.

L'acquisizione può avvenire secondo un processo continuo (scansione) o discreto (digitalizzazione).

Digitalizzazione

Viene definita una griglia di passo Δx e Δy , non necessariamente equispaziati, sul modello.

Il tastatore scende e acquisisce un numero di punti definito a priori, in corrispondenza delle coordinate z , nelle intersezioni della griglia.

Scansione

Il tastatore, portato a contatto con il pezzo manualmente dall'operatore, viene fatto scorrere lungo il componente.

In questo caso il numero di punti da acquisire non è definito a priori, ma si cerca di rilevare un numero di punti sufficienti ad approssimare nel modo migliore la superficie in esame.

Spesso è necessario ricorrere a più rilevamenti, da punti di vista diversi, per ottenere una rappresentazione completa della superficie; pertanto molti sistemi sono dotati di tavole rotanti.

Quando vengono effettuate più acquisizioni può capitare che uno stesso punto venga rilevato più di una volta, quindi in questa fase occorre procedere anche con la cosiddetta "registrazione" che permette appunto di correlare due sistemi di coordinate.

6.2.2 Pre-elaborazione dei dati

In questa fase è prevista l'importazione della nuvola di punti, la riduzione dei "noise" e la riduzione del numero di punti.

I noise sono dei punti estranei all'oggetto in esame e quindi non realmente appartenenti alla superficie da analizzare, che sono stati rilevati a causa di fenomeni di riflessione, vibrazioni o causa della presenza di luce troppo intensa.

Pertanto, in questa fase, l'obiettivo è quello di mantenere unicamente i punti necessari a caratterizzare la superficie del componente. Si procede quindi a eliminare i noise tramite dei comandi manuali gestiti dall'operatore o tramite l'uso del filtro più opportuno. In questo modo si ottiene una notevole riduzione delle dimensioni del file del componente in esame.

Nel caso dei sistemi di scansione, occorre tenere conto del fatto che la densità di punti rilevati è indipendente dalla geometria del componente che si sta considerando; quindi in alcune zone la densità di punti sarà adeguata, mentre in altre sarà eccessiva o insufficiente.

Si procede quindi con l'operazione di "sampling", per eliminare i punti ridondanti della superficie, e con ulteriori scansioni, per analizzare meglio zone nelle quali il numero di punti rilevati non è sufficiente.

La fase di pre-processing, che ha alterato solo il numero e la densità dei punti, si conclude con l'allineamento e l'unione delle varie viste acquisite. Le viste adiacenti, affinché possano essere unite correttamente, devono prevedere una zona di sovrapposizione e un sistema di riferimento unico.

L'output di questa fase è quindi una nuvola di punti che rappresenta digitalmente il modello fisico.

6.2.3 Segmentazione e creazione delle superfici

Per elaborare le nuvole di punti ottenute nella pre-elaborazione dei dati è necessario un software adatto, in modo tale da poter poi passare a delle superfici. Le fasi per passare alla creazione delle superfici sono le seguenti:

1. definizione del riferimento: occorre in primo luogo importare la nuvola di punti e successivamente, in funzione della geometria del componente, identificare una terna di riferimento;
2. definizione della rete di curve: l'operatore seleziona tutti i punti di bordo dell'oggetto e individua le curve di bordo. In seguito, partendo dal bordo esterno, vengono create delle linee parallele all'asse x e all'asse y in modo da creare una rete di curve.
3. creazione delle superfici: intersecando le curve, è possibile individuare delle regioni rettangolari all'interno delle quali si trovano un certo numero di punti. Si parte quindi cercando di approssimare i punti nei patch, minimizzando l'errore, per generare delle superfici. E' fondamentale che ogni nurb creata sia tangente alle adiacenti per scongiurare la presenza di spigoli.

6.2.4 Creazione del modello matematico

Nel momento in cui viene completata la fase di segmentazione, si passa alla creazione del modello matematico che non è altro che la rappresentazione della forma geometrica del modello fisico. Vengono importate le superfici e, tramite software opportuni, viene generato il modello CAD.

6.3 Sistema di rilevamento dei punti

I sistemi di rilevamento dei punti sono generalmente costituiti da:

1. dispositivo di acquisizione: può essere a contatto o senza contatto. Si tratta di sonde o sensori che permettono di rilevare i punti.
2. apparato di trasporto e supporto: permette di disporre accuratamente il trasduttore, il cui compito è quello di fornire le informazioni sulla posizione e sull'orientamento del sistema e di consentire il rilievo degli oggetti.

3. attrezzatura ausiliaria: è il sostegno del pezzo. E' costituita da una tavola rotante sulla quale viene fissato l'oggetto in analisi.

In passato si preferivano i sistemi con contatto dal momento che garantivano molta precisione; oggi si è passati invece ai sistemi senza contatto per favorire la rapidità.

6.3.1 Sistemi con contatto

Questi dispositivi sfruttano delle sonde che seguono automaticamente i contorni della superficie fisica del componente in analisi.

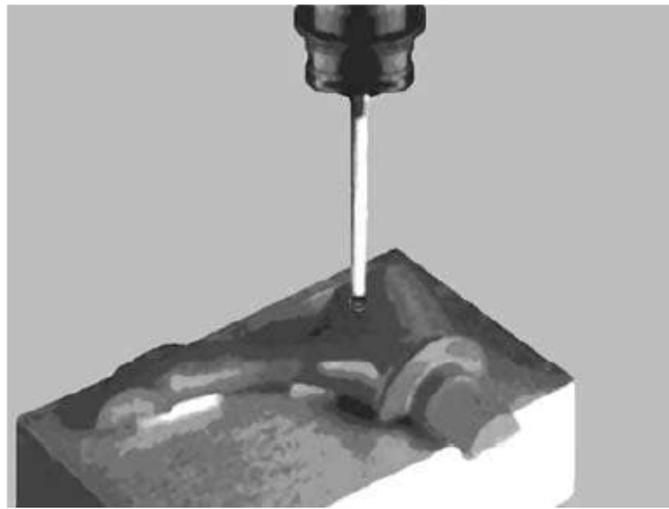


Figura 6.4: Sistema con contatto

I limiti dei sistemi di digitalizzazione e di scansione a contatto sono i seguenti:

- c'è il rischio che la forza applicata sulla superficie, in fase di registrazione dei punti, possa rovinare l'oggetto o falsare la rilevazione di superfici realizzate con materiali deformabili (gomma).
- le dimensioni della tavola sono ridotte e pertanto possono essere rilevati solo oggetti di misura limitata.
- in alcuni modelli, non è possibile ruotare la testa e quindi, per acquisire pareti verticali e sotto squadri è necessario realizzare viste multiple.
- questi metodi, in alcune situazioni, possono essere lenti. Questo è dovuto al fatto che ogni punto è generato dal contatto con la punta della sonda.



Figura 6.5: esempio di componente analizzato manualmente dall'operatore

I vantaggi dei metodi con contatto sono:

- alta accuratezza
- bassi costi
- semplicità di utilizzo

Macchine di misure a coordinate (CMM)

Queste macchine, introdotte nei primi anni 60, sono costituite da una piattaforma, sulla quale viene posizionato l'oggetto, e da una struttura rigida sulla quale è montata una testa con un dispositivo di misura.

L'oggetto, di dimensioni stabilite in funzione della macchina da utilizzare, viene bloccato sul piano di lavoro per tutta la durata dell'acquisizione in modo da far rimanere costante il sistema di riferimento. In seguito si imposta la macchina in modo che il dispositivo di misura segua la griglia predefinita e rilevi le coordinate dei punti sull'oggetto di studio. In alternativa, in alcune situazioni, l'operatore può effettuare la rilevazione manualmente, muovendo la sonda sull'oggetto in analisi.

Dal momento che questo è tipicamente un sistema meccanico, l'accuratezza delle CMM è direttamente basato sul controllo meccanico della sonda.

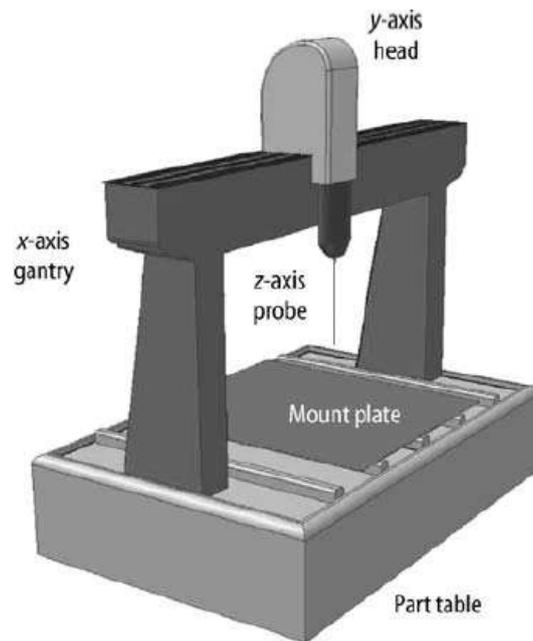


Figura 6.6: Struttura CMM



Figura 6.7: esempio di componente analizzato con una sonda [30]

I vantaggi principali di questo metodo sono la semplicità di utilizzo e l'accuratezza. I limiti, invece, sono di seguito elencati:

- potrebbe verificarsi il danneggiamento della superficie e della sonda stessa. Potrebbe quindi esserci la presenza di graffi sul componente qualora

l'operatore facesse degli errori in fase di movimentazione della sonda. Inoltre occorre tenere conto del fatto che se la superficie fosse a una temperatura troppo alta o troppo bassa, il trasferimento di calore potrebbe danneggiare la sonda

- lentezza in fase di acquisizione
- necessità di compiere numerose operazioni sulla macchina prima di poterla utilizzare
- il volume di lavoro è limitato dalle dimensioni della tavola e di conseguenza le tolleranze ottenibili sono le stesse che la macchina fornirebbe se venisse usata come strumento di misura
- è importante avere a disposizione operatori addestrati
- alcuni punti del componente in analisi potrebbero non essere raggiunti e quindi rilevati dalla sonda
- è necessario definire accuratamente un percorso di misura che copra le superfici dell'oggetto, ma che eviti di incastrare la sonda in spazi ristretti

Recentemente stanno cominciando a diffondersi delle sonde di rilevamento senza contatto che sostituiscono i canonici tastatori e che garantiscono una notevole riduzione dei tempi, ma a fronte di un peggioramento nell'accuratezza.

Bracci articolati

Si tratta di sistemi non motorizzati che vengono mossi manualmente dall'operatore.

I bracci antropomorfi sono costituiti da una struttura a 5 gradi di libertà sulla cui testa è montata una sonda a contatto. La struttura è montata su una piattaforma di sostegno sulla quale si trova l'elettronica necessaria alla comunicazione con il PC che elabora i dati.

L'operatore porta il braccio vicino al pezzo in modo da poter rilevare i punti, ma non viene seguita una griglia predefinita. Tramite l'uso degli encoders, vengono registrate le coordinate dei punti acquisiti.

Esistono due possibilità di misura:

- point and click: ogni acquisizione viene controllata

- semiautomatica: il sensore viene fatto scorrere in maniera continuativa dall'operatore mentre un timer gestisce i rilevamenti

Il limiti principali di questa procedura sono dati dall'estrema lentezza e dalla necessità di intervento umano.

Scanner piezoelettrici

Questi sistemi di scansione con contatto prevedono il rilievo di punti tramite una sonda analogica che tocca l'oggetto e memorizza le coordinate del punto, ricavate sulla base della deflessione della superficie, attraverso dei sensori piezoelettrici. La sonda avanza lungo un asse per step successivi, prestabiliti dall'operatore, e a seguito di ogni movimento l'ago, posizionato lungo l'asse z, registra le coordinate. Terminato il processo lungo l'asse x, la sonda procede allo stesso modo anche lungo l'asse y.

Questa è una procedura molto lenta, idonea quindi unicamente a pezzi di dimensioni contenute e presenta un volume di lavoro limitato dalle dimensioni della macchina.

I vantaggi principali di questi sistemi sono legati alla grande precisione e reperibilità.

6.3.2 Sistemi senza contatto

I sistemi senza contatto permettono la registrazione dei dati senza che ci sia alcun contatto con la superficie del componente.

Queste nuove tecnologie sfruttano i laser e l'ottica per registrare i dati. Anche in questo caso, come per i sistemi con contatto, si avrà in output una nuvola di punti.

I vantaggi principali sono:

- velocità di acquisizione di grandi quantità di dati
- maneggevolezza
- assenza di contatto
- capacità di rilevare i colori
- possibilità di rilevare punti in zone non raggiungibili dai sistemi con contatto

I limiti di queste tipologie di sistemi sono invece di seguito elencati:

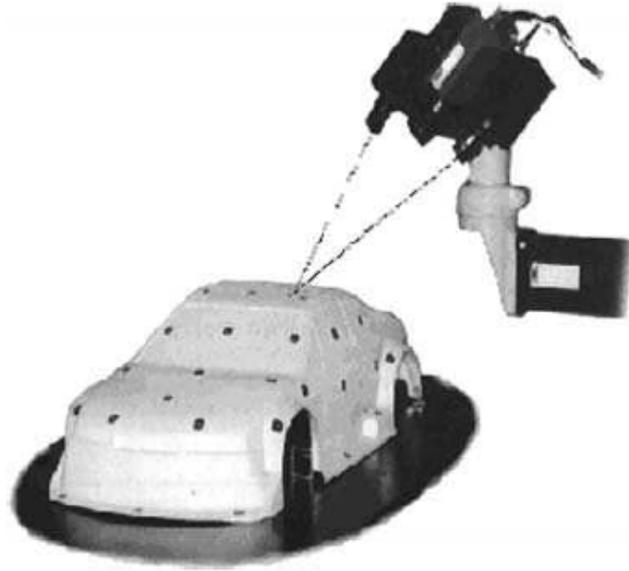


Figura 6.8: Sistema senza contatto

- alcuni di questi sistemi hanno dei problemi a effettuare delle rilevazioni di superfici parallele all'asse del laser.
- la limitata accuratezza. Questo è un limite che si aveva soprattutto in passato, ma che è stato superato dalle tecnologie più moderne.
- in alcuni casi è necessario preparare le superfici in analisi con un rivestimento temporaneo di polvere fine per evitare i problemi che sorgono quando la luce incide su superfici lucide.

I più diffusi metodi senza contatto sono la Luce Strutturata e la Triangolazione Laser.

Luce strutturata

Questi sistemi prevedono la presenza di diversi elementi:

- proiettore: una sorgente di luce che illumina l'oggetto
- telecamera: un sensore ottico che registra le informazioni necessarie per il rilevamento dei punti

- sistema di posizionamento: tramite esso il sistema riceve informazioni riguardo la posizione degli elementi rispetto a un sistema di riferimento assoluto

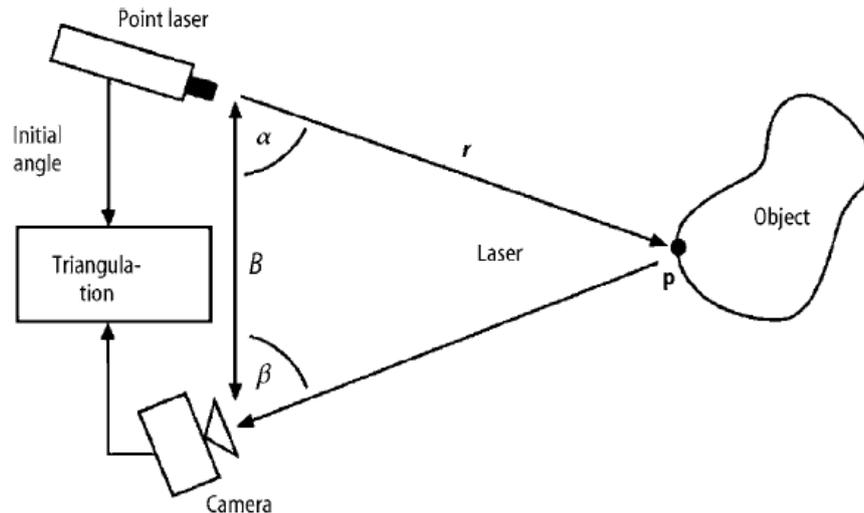


Figura 6.9: Schema di funzionamento dei sistemi a luce strutturata

Questa tecnica prevede quindi la presenza di una sorgente luminosa che proietta dei codici (patterns) sulla superficie da misurare, mentre un'unità separata si occupa dell'acquisizione dei dati. Solitamente il pattern di luce è costituito da una griglia.

La curvatura superficiale dell'oggetto o la posizione del dispositivo rispetto all'oggetto deformano il reticolo e pertanto occorre inizialmente calibrare accuratamente il sistema e successivamente confrontare i patterns di riferimento, proiettati su superfici piane, e i patterns deformati, tenendo conto della distanza dell'oggetto dalla telecamera. L'estrazione dell'immagine 3D da quella della griglia deformata quindi avviene attraverso la misura della fase del reticolo.

L'accuratezza di questo metodo dipende primariamente dalla risoluzione della telecamera, ma occorre tenere conto anche delle dimensioni geometriche e della precisione del proiettore.

Il problema principale di questo metodo è proprio l'accuratezza; i livelli raggiunti non sono paragonabili a quelli ottenibili nelle CMM, ma risultano comunque in fase di miglioramento.

I vantaggi principali offerti da questo sistema sono i seguenti:



Figura 6.10: esempio di componente trattato con la luce strutturata

- non essendoci il contatto viene evitato il danneggiamento della superficie e della sonda stessa
- l'acquisizione dei dati è molto veloce
- viene semplificata la pianificazione del percorso. Non è necessario infatti che vengano controllati i vincoli fisici, come nel caso delle CMM.

Sistemi ottici a triangolazione laser

In questi sistemi, un diodo genera una lama di luce monocromatica che colpisce la superficie dell'oggetto in analisi. La luce laser proiettata viene riflessa in varie direzioni e parte dei raggi riflessi vengono rilevati da una telecamera CCD. A questo punto sfruttando la trigonometria è semplice ricavare il valore della distanza tra il dispositivo di scansione e la superficie analizzata.

Il principale vantaggio portato dall'utilizzo di questa tecnica consiste nella possibilità di ottenere un angolo di divergenza quasi nullo. In questo modo è possibile generare lame di spessore ridotto e costante su profondità di proiezione elevate.

Dal momento che la luce laser è monocromatica, è possibile montare davanti alla telecamera CCD un filtro passa-banda centrato sulla frequenza di emissione del laser in modo da rendere il sensore meno sensibile alle sorgenti di luce parassite.

E' fondamentale inoltre orientare correttamente l'obiettivo rispetto al piano

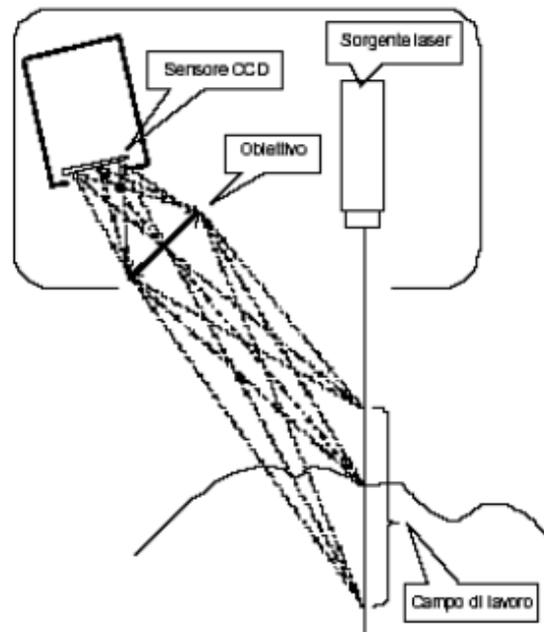


Figura 6.11: Schema di funzionamento dei sistemi ottici a triangolazione laser

del CCD, per fare in modo che il piano individuato dalla lama laser sia perfettamente a fuoco.

Questi sistemi vengono utilizzati soprattutto per lavorare con oggetti piccoli e con distanze limitate, ma presentano una buona accuratezza.

Capitolo 7

Analisi sperimentale

7.1 Le fasi dell'analisi sperimentale

In questa fase si è proceduto con delle analisi sviluppate presso l'Integrated Additive Manufacturing Center (IAM) del Politecnico di Torino.

E' stata analizzata la rugosità di cinque componenti prodotti in L-PBF che si differenziano tra loro per il materiale e per la tecnica di finitura.

Inizialmente per ogni pezzo, tramite l'uso di un rugosimetro (7.2.1), sono stati misurati i valori dei principali parametri di rugosità lineare.

In questa fase è stato necessario bloccare il componente tramite l'uso di una morsa, in modo da posizionare la superficie interessata perpendicolarmente allo stilo del rugosimetro.



Figura 7.1: Componente bloccato tramite l'uso di una morsa

Per ogni area analizzata, sono state fatte sette rilevazioni: tre in direzione verticale, due in direzione orizzontale e due in diagonale. In questo modo si è cercato di ottenere una valutazione il più affidabile possibile.

Successivamente si è passati all'uso di uno scanner (7.2.3) per poter rilevare i parametri di rugosità superficiale, nelle stesse aree già analizzate con il rugosimetro. Però, prima di procedere alle analisi senza contatto, è stato applicato uno strato di antiriflesso sulle zone sotto esame dei componenti. In questa fase è stato necessario prestare attenzione allo strato del rivestimento dal momento che questo avrebbe potuto introdurre degli errori nei dati di scansione.

Il sistema è stato riscaldato per circa 15 minuti per passare alle condizioni operative. Successivamente il componente è stato bloccato sulla base di una tavola rotante tramite l'uso di un materiale plastico modellabile. Infatti qualsiasi movimento del pezzo in fase di utilizzo dello scanner avrebbe reso totalmente inutilizzabili i dati rilevati.

Ogni rilevazione è stata effettuata dallo scanner in pochi secondi e appena questa veniva completata si procedeva con la rotazione della tavola, in modo da ultimare l'ottenimento della nuvola di punti dell'oggetto.

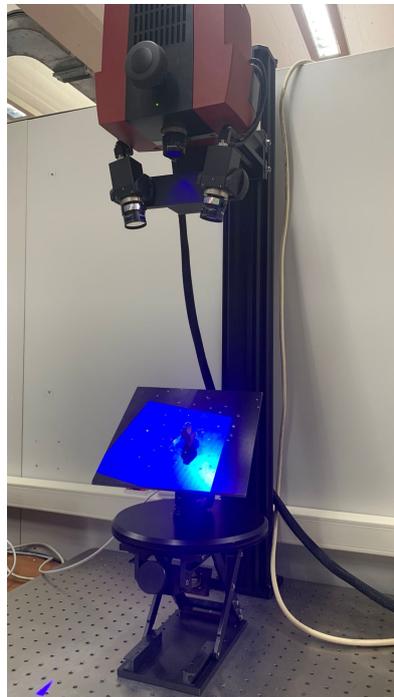


Figura 7.2: Rilevazione del componente bloccato sulla tavola rotante

Tramite l'uso di un software opportuno (7.2.4), che si occupa del post trattamento dei dati è stato possibile osservare in tempo reale, ciò che veniva rilevato in modo da poter capire se tutto procedeva correttamente.

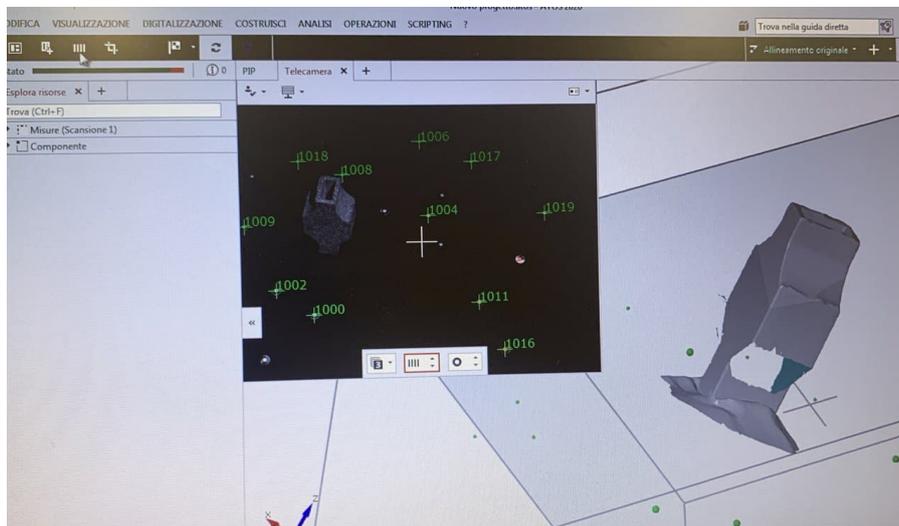


Figura 7.3: Visualizzazione software in fase di rilevazione

7.2 Strumentazione e software utilizzati per l'analisi

7.2.1 Rugosimetro RTP 80

Il rugosimetro RTP80, prodotto dalla SM Metrology System, è stato utilizzato in laboratorio per valutare la rugosità lineare dei componenti in analisi [31].

Questo strumento, molto maneggevole e semplice da utilizzare, permette di eseguire la caratterizzazione delle superfici anche più complesse in maniera facile ed intuitiva.

E' dotato di un display touchscreen con un'interfaccia ad icone che consente all'operatore di impostare in maniera rapida i parametri di misura, posizionarsi sul pezzo ed eseguire l'analisi. Lo strumento consente di misurare 48 parametri di rugosità previsti dalle principali normative, come la ISO 4287. I risultati ottenuti con le relative tolleranze sono subito pronti per essere stampati attraverso la stampante termica integrata nello strumento. I grafici ed i parametri sono tutti interattivi e permettono all'operatore di personalizzare la presentazione dei risultati.



Figura 7.4: Rugosimetro RTP80

7.2.2 Pallinatrice Norblast SD9

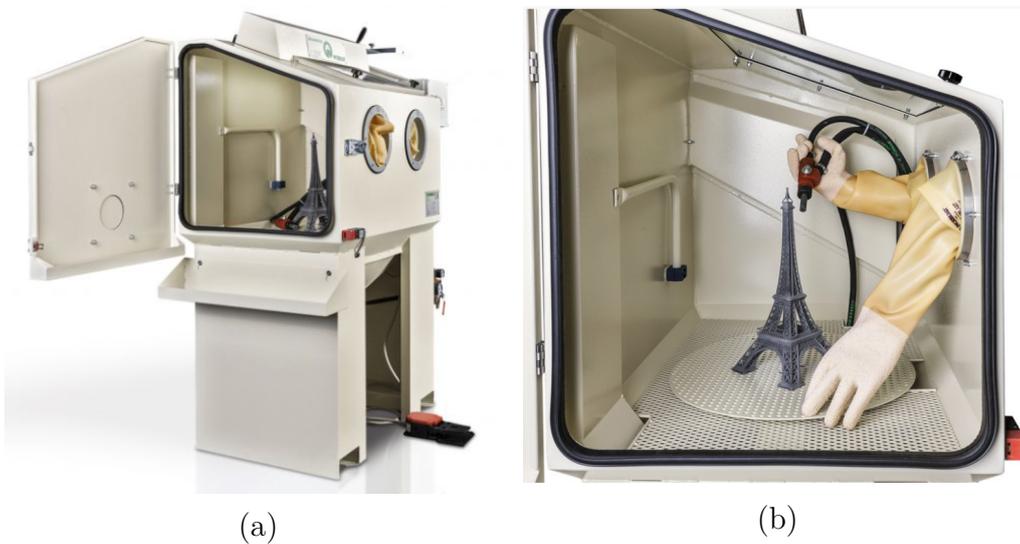


Figura 7.5: (a): Pallinatrice Norblast SD9 (b): Camera di lavoro della pallinatrice

La Norblast SD9 è una pallinatrice manuale, di medie dimensioni, dotata di un sistema di ripresa sottovuoto [32]. Questo strumento è stato utilizzato in laboratorio per completare la fase di

finitura dei componenti analizzati in questa tesi.

E' una macchina molto compatta, adatta a spazi estremamente ridotti, semplice e veloce da installare.

Integra un dispositivo di separazione e recupero della graniglia e un filtro a cartuccia autopulente. Presenta una camera di lavoro di dimensioni: 900 x 610 x 620 [mm].

L'SD9 supporta grane di diverso materiale tra cui microsferi di vetro, microsferi di ceramica, ossido di alluminio e plastica.

7.2.3 Sistemi ottici a luce strutturata GOM

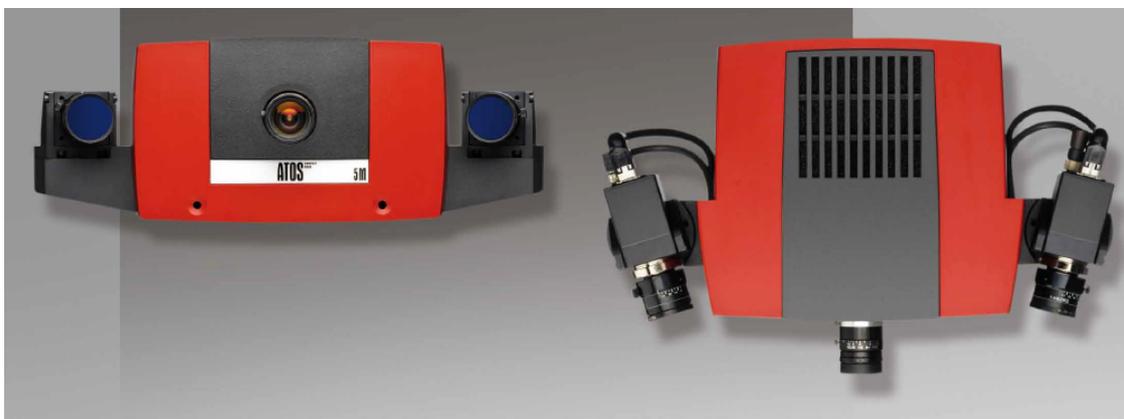


Figura 7.6: ATOS Compact Scan

ATOS Compact Scan 2M è uno scanner 3D per metrologia industriale di GOM, un produttore globale che opera in Germania [33]. E' uno strumento che sfrutta la tecnologia della luce strutturata e che presenta una spaziatura tra i punti di 0.021-0.615 mm.

Questo sistema, leggero, portatile, compatto e maneggevole, permette di scansionare oggetti di diverse dimensioni, con una risoluzione dettagliata, e garantisce lo svolgimento della digitalizzazione e dell'analisi dei componenti in tempi brevi. Inoltre, questi apparati sono velocissimi e facili da usare per operatori dotati di qualsiasi livello di competenza.

Quindi, un qualunque oggetto, viene completamente digitalizzato combinando automaticamente più riprese 3D, tramite l'uso di marker posizionati sulla superficie in analisi.

Questo strumento permette di ispezionare utensili e componenti e viene sfruttato per la Reverse Engineering e quindi per creare copie digitali degli oggetti.

7.2.4 Gom Inspect

Gom Inspect è un software che permette di visualizzare i risultati, elaborare le mesh e ispezionare i dati ATOS o nuvole di punti 3D.

Oltre a ciò, questo programma sfrutta una serie di strumenti utili a elaborare la mesh e a valutarla.

7.2.5 Mountains

Mountains è un software, sviluppato dalla società Digital Surf, utile per l'analisi delle immagini e della metrologia di superficie.

Tramite questo sistema è stato approfondito lo studio della struttura e la forma della superficie in 3D su scala microscopica. Inoltre, le ultime versioni di questo software, consentono all'operatore di lavorare facilmente con superfici di forma libera.

Mountains è conforme allo standard ISO 25178 sulla valutazione della struttura della superficie 3D e offre i filtri di profilo e area definiti nella norma ISO 16610.

7.3 Estrazione ed elaborazione dei dati

Come già descritto in precedenza, in fase di utilizzo dello scanner (7.2.3) è stato utilizzato un software utile a tenere sotto controllo i dati raccolti. L'applicativo in questione è Gom Inspect (7.2.4).

Dalla nuvola di punti ottenuta per ogni componente sono state selezionate e salvate unicamente le aree di interesse dalle quali si era intenzionati quindi ad estrarre i dati. In questo modo è stato possibile evitare un costo computazionale eccessivo e inutile ai fini dell'analisi.

A questo punto è stato necessario tenere conto del fatto che il componente di partenza, e di conseguenza la zona in analisi, erano casualmente orientati nello spazio. Selezionata la superficie, si è passati quindi all'utilizzo di uno strumento chiamato "Piano Fitting", utile ad interpolare l'area di interesse con un piano. Il passo successivo è stato quello di effettuare delle operazioni di allineamento in modo da porre il nuovo piano, in posizione il più possibile parallela al piano x-y, identificato sul software tramite una griglia.

Si è proceduto quindi con l'importazione della superficie nel software Mountains, al fine di completare l'analisi della rugosità superficiale (7.2.5).

Dall'area selezionata è stato generato uno "studiabile" che non è altro che una mappa che riporta una scala di colori in funzione della rugosità.

Tramite l'opzione "Parameters Table" è stato possibile selezionare la normativa di interesse, in questo caso la ISO 25178, e i parametri da estrarre dalla superficie.

Sempre nella stessa sezione sono state effettuati degli interventi di pre-processing. E' stata applicata un'operazione di livellamento utilizzando il metodo del piano ai minimi quadrati ed è stato imposto un filtro di Gauss con un valore di cut-off di 0.8mm per separare il contributo di rugosità da quello di ondulazione. Tutto ciò che si trova al di sotto di questo valore è stato considerato come rugosità, mentre tutto ciò che si trova oltre questo valore è stato considerato come contributo di ondulazione.

7.4 Definizione dei componenti

Come già precedentemente definito, in fase di sviluppo di questa tesi sono stati analizzati cinque componenti differenti, prodotti con la tecnologia L-PBF, ma realizzati con materiali diversi.

Quattro dei cinque pezzi misurati sono stati sottoposti al post trattamento della pallinatura. In tutti e quattro i casi la pratica dello shot-peening è stata eseguita utilizzando come abrasivo una miscela con il 50% di microsfere di vetro e il 50% di microsfere di zirconia. La pressione dell'aria utilizzata è pari a 6 bar.

I componenti analizzati e i materiali sfruttati sono di seguito descritti.

7.4.1 Componenti in Superlega di Nickel CM247LC

Resistenza a trazione	Allungamento	Densità	Resistenza a snervamento	Durezza
900 MPa	35%	8 g/cm ³	700 MPa	290 HB

Tabella 7.1: Superlega di Nickel

Le superleghe di Nickel sono caratterizzate da elevati valori di resistenza statica, a fatica ed allo scorrimento, con temperature operative tra -196°C e 982°C.

Quando queste leghe vengono utilizzate per la realizzazione di componenti in AM, possono mostrare caratteristiche metallurgiche differenti in base alla diversa direzione di crescita degli strati. Occorre pertanto fare attenzione, per evitare la formazione di fasi indesiderate, che renderebbero debole il materiale [34], o la nascita di tensioni residue.

Le superleghe di Nickel sono ampiamente diffuse in campo aeronautico soprattutto grazie alle loro proprietà meccaniche, alla loro stabilità strutturale ad alte temperature e alla loro buona resistenza all'ossidazione [35].

In particolare, CM 247 LC è una superlega a base di Nickel [36]. I principali vantaggi offerti da questa lega sono la colabilità, la duttilità e un ridotto tasso di crescita delle crepe.

E' soprattutto grazie all'eccezionale colabilità, che la lega CM247LC viene scelta per costruire palette, ugelli e componenti strutturali di turbine a gas in campo aerospaziale e industriale.

Mostra un'eccezionale resistenza alla fessurazione del bordo del grano, fornisce una buona microstruttura di carburo e possiede anche un punto di fusione elevato.

componente 1

tecnologia: L-PBF

materiale: superlega di Nickel CM247LC

post-trattamento: pallinatura con
microsfere di vetro e zirconia



Figura 7.7: componente 1

componente 2

tecnologia: L-PBF

materiale: superlega di Nickel CM247LC

post-trattamento: pallinatura con
microsfere di vetro e zirconia



Figura 7.8: componente 2

7.4.2 Componenti in Ti6Al4V

Resistenza a trazione	Allungamento	Densità	Resistenza a snervamento	Durezza
900 MPa	5%	4,4 g/cm ³	880-920 MPa	320 HB

Tabella 7.2: Ti6Al4V

Tra i materiali più studiati per le applicazioni AM, c'è il Ti6Al4V. Questo è dovuto al fatto che con questo materiale possono essere realizzati componenti complessi e a basso volume di produzione [37].

La lega Ti6Al4V è una lega di Titanio con eccellenti proprietà meccaniche con elevata resistenza a fatica, bassa densità, elevata tenacità alla frattura, basso peso specifico, buona duttilità e eccellente resistenza alla corrosione [38].

Il materiale trova uso in componenti in cui la resistenza a frattura è un fattore critico, nonché in parti e strutture esposte a significativi cicli termici.

Le applicazioni più rilevanti riguardano ad esempio componenti delle turbine a gas, rotor e statori, elementi di fissaggio, dischi e mozzi distanziali. Il Titanio Ti6Al4V è ideale per i settori aerospace e motorsport, e trova ampia applicazione in ambito biomedicale per la produzione di protesi.

componente 3

tecnologia: L-PBF

materiale: Ti6Al4V

post-trattamento: pallinatura con
microsfere di vetro e zirconia



Figura 7.9: componente 3

7.4.3 Componenti in AlSi10Mg

Resistenza a trazione	Allungamento	Densità	Resistenza a snervamento	Durezza
460 MPa	6%	2,67 g/cm ³	240 MPa	120 HB

Tabella 7.3: AlSi10Mg

La lega di alluminio AlSi10Mg è utilizzata nell'AM per realizzare componenti con buone proprietà di scambio termico e con peso contenuto. Questa lega offre elevata resistenza, durezza e buone proprietà dinamiche e quindi viene spesso utilizzata per realizzare componenti soggetti ad elevati carichi

operativi.

La polvere a base di AlSi10Mg è comunemente utilizzata nella produzione additiva, a causa dell'elevata resistenza alla corrosione, della bassa densità, della buona lavorabilità e dell'elevata resistenza meccanica dei componenti finali.

Quando questa lega di Alluminio viene utilizzata in fonderia, viene richiesto solitamente un trattamento termico per migliorarne le proprietà meccaniche, come ad esempio un ciclo T6 di solubilizzazione ed invecchiamento. Se utilizzata con il Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), invece, questo trattamento non è necessario poiché, grazie ai rapidi e ripetuti cicli di fusione e solidificazione, si ottengono una microstruttura e delle proprietà meccaniche simili a quella ottenibili con trattamento T6.

AlSi10Mg è una delle leghe di Al più usate proprio per realizzare componenti in L-PBF, grazie al basso coefficiente di espansione termica che porta, infatti, a una maggiore accuratezza dimensionale e a migliori proprietà meccaniche [39].

Grazie all'elevato rapporto tra resistenza e massa, l'AlSi10Mg trova uso nei settori motorsport, automotive, aerospace e nella automazione industriale.

componente 4

tecnologia: L-PBF

materiale: AlSi10Mg

post-trattamento: nessuno (as-built)

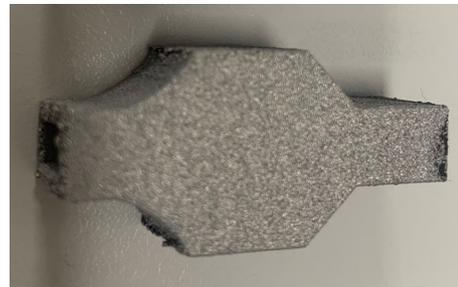


Figura 7.10: componente 4

componente 5

tecnologia: L-PBF

materiale: AlSi10Mg

post-trattamento: pallinatura con microsfere di vetro e zirconia

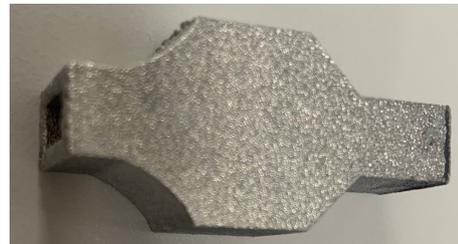


Figura 7.11: componente 5

7.5 Valutazioni su i campioni analizzati

Parametri valutati

Tramite l'uso del rugosimetro sono stati rilevati i valori Ra e Rz. Viene tenuto parzialmente in considerazione il parametro Ra perché non sufficientemente rappresentativo della texture superficiale di un oggetto tridimensionale.

Rz si riferisce unicamente alle valli e ai picchi locali e pertanto non è considerato come metro di paragone fondamentale in fase di confronto tra i diversi componenti.

Per entrambi i parametri di rugosità lineare, è stata calcolata anche la deviazione standard. Quest'ultima ci permette di avere un'idea di come siano distribuiti i dati nel campione rispetto alla media e ci permette quindi di capire quanto possa essere affidabile la media.

La deviazione standard viene calcolata con la seguente formula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \mu)^2}{N}}$$

dove N indica la dimensione della popolazione, x_i indica ogni valore della popolazione e μ indica la media dei valori della popolazione.

Il parametro maggiore tenuto in considerazione risulta essere Sa. Questo rappresenta la differenza media delle altezze dal piano medio e garantisce un'accurata caratterizzazione di una superficie reale 3D.

Il parametro Skewness (Ssk) viene tenuto in considerazione per descrivere l'asimmetria della distribuzione dell'altezza dalla linea media. Un valore positivo indica una superficie composta principalmente da picchi e poche valli, mentre un valore negativo indica una superficie prevalentemente composta da striature profonde. Se la superficie è composta da tanti picchi quante valli, il valore del parametro tende a zero.

Componenti in Superlega di Nickel realizzati in L-PBF

I componenti in superlega di Nickel, realizzati in L-PBF, sono il componente 1 (figura 7.7) e il componente 2 (figura 7.8). L'analisi è stata sviluppata su una sola area per il componente 1 e su due superfici per il componente 2, una superiore e una inferiore.

I dati ricavati tramite rugosimetro sono di seguito riportati.

	Ra[μm]	Rz[μm]
1	12,015	58,451
2	17,545	85,766
3	16,407	84,593
4	6,642	29,784
5	8,138	38,927
6	18,365	77,903
7	18,341	94,948
media	13,922	67,196
dev.st.	4,978	25,191

Tabella 7.4: campione 1

	Ra[μm]	Rz[μm]
1	12,573	66,627
2	14,819	78,522
3	11,028	54,871
4	10,987	55,491
5	12,768	68,172
6	11,845	57,327
7	14,244	71,688
media	12,609	64,671
dev.st.	1,489	9,050

Tabella 7.5: campione 2, superficie 1

	Ra[μm]	Rz[μm]
1	11,019	66,176
2	10,57	61,875
3	13,07	59,388
4	10,853	58,216
5	12,91	60,502
6	11,442	58,665
7	8,858	51,41
media	11,246	59,462
dev.st.	1,443	4,454

Tabella 7.6: campione 2, superficie 2

Relativamente ai due componenti in analisi, sono di seguito riportati i dati e le mappe estratte tramite il software Mountains.

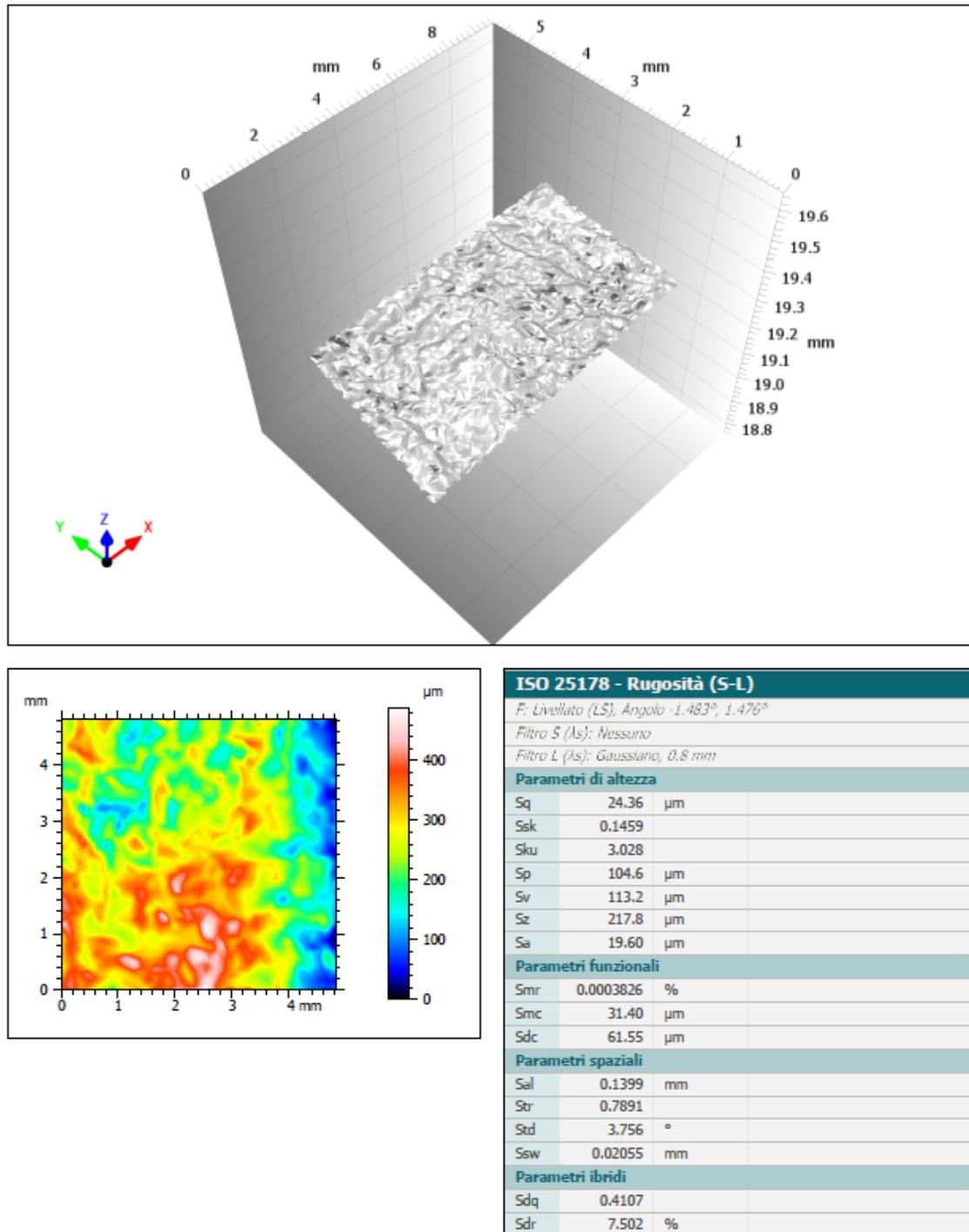
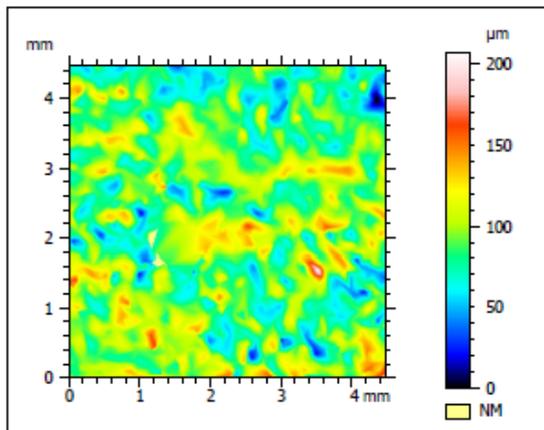
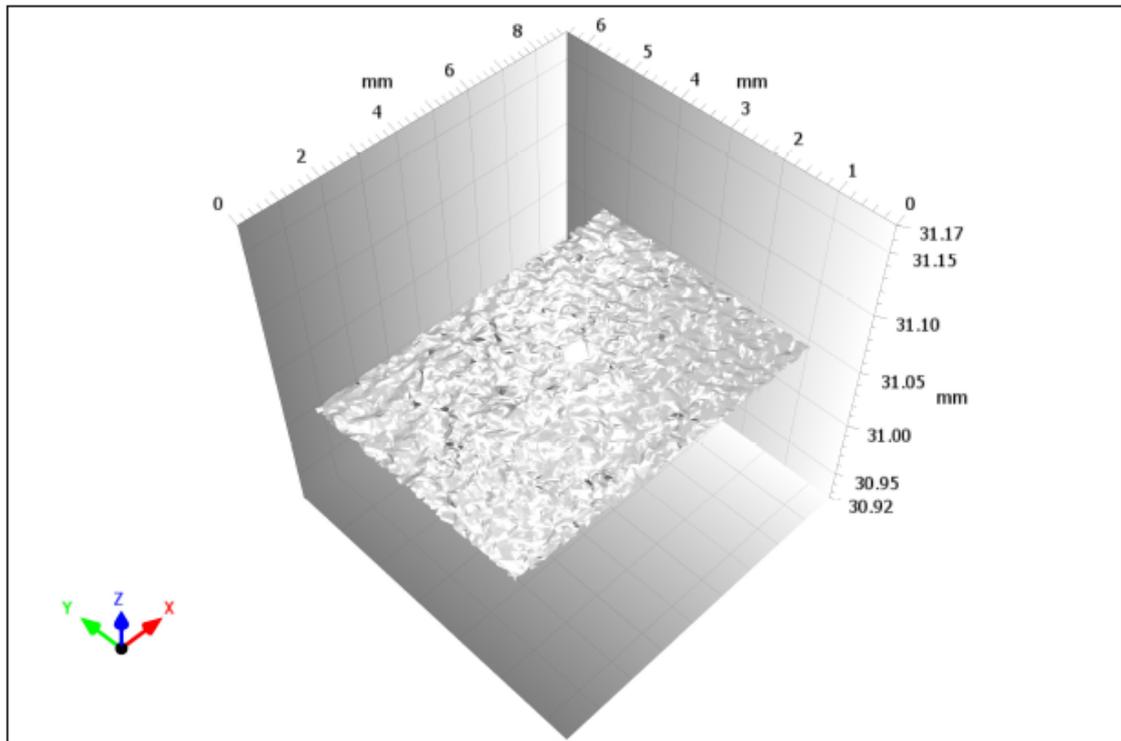


Figura 7.12: Estrazione componente 1



ISO 25178 - Rugosità (S-L)		
<i>F: Livellato (LS), Angolo 0.05366°, 0.1974°</i>		
<i>Filtro S (As): Nessuno</i>		
<i>Filtro L (As): Gaussiano, 0.8 mm</i>		
Parametri di altezza		
Sq	13.76	µm
Ssk	0.1029	
Sku	3.868	
Sp	88.25	µm
Sv	67.00	µm
Sz	155.3	µm
Sa	10.67	µm
Parametri funzionali		
Smr	0.0003821	%
Smc	17.18	µm
Sdc	33.79	µm
Parametri spaziali		
Ssl	0.1126	mm
Str	0.7580	
Std	120.3	°
Ssw	0.01902	mm
Parametri ibridi		
Sdq	0.3101	
Sdr	4.152	%

Figura 7.13: Estrazione componente 2 - esterno

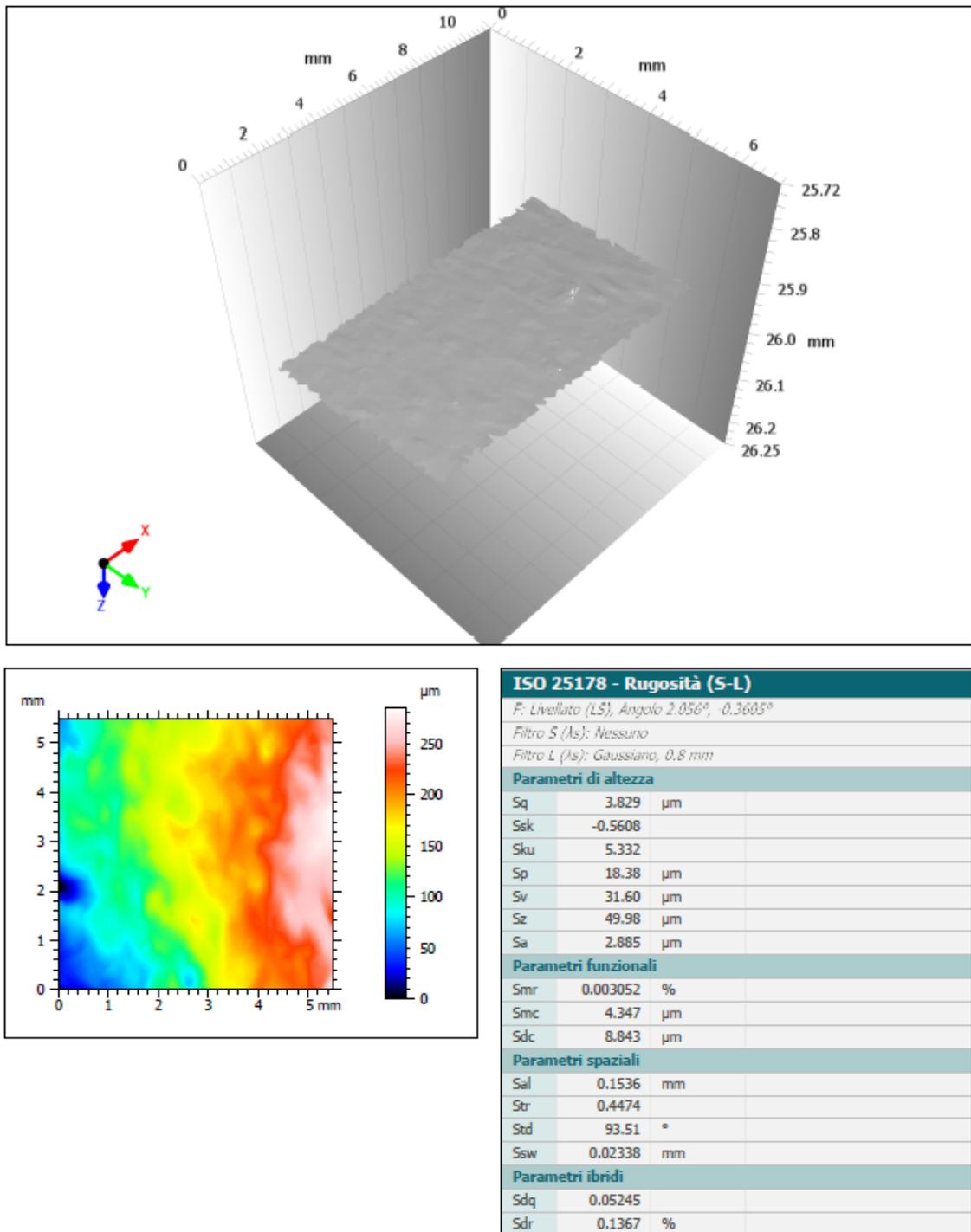


Figura 7.14: Estrazione componente 2 - interno

I due componenti in analisi non sono propriamente confrontabili perché presentano strutture differenti e poiché sono stati realizzati con macchine diverse.

In particolar modo, occorre tenere conto della differente lama utilizzata per la realizzazione del componente 1 e del componente 2. Nel caso del componente 1 è stata utilizzata una lama in Silicone, che quindi tende a deteriorarsi rapidamente. Nel caso del componente 2 è stata invece utilizzata una lama in Acciaio che, essendo molto meno tendente a consumarsi nelle passate successive, quindi garantisce un miglior livellamento della superficie.

Per quanto riguarda i valori di rugosità superficiale, il componente 1 riporta $S_a=19.6 \mu\text{m}$, la superficie esterna del componente 2 riporta $S_a=10.67 \mu\text{m}$, mentre la superficie interna del componente 2 riporta $S_a=2.89 \mu\text{m}$.

L'evidente differenza tra i valori di S_a individuati tra il componente 1 e il componente 2 è imputabile all'utilizzo di macchine diverse, appena descritto. Si può notare inoltre una differenza di circa un ordine di grandezza tra il valore di S_a valutato sulla superficie superiore e sulla superficie inferiore del componente 2. La presenza di questa discrepanza può essere imputabile a una differente direzione di costruzione o una diversa inclinazione delle superfici.

I valori di R_a delle tre aree analizzate non si distaccano molto tra loro, ma in questo caso occorre tenere conto anche della deviazione standard. Nel componente 1 si evidenzia infatti un valore molto più elevato dello scarto quadratico medio, che comporta quindi una scarsa affidabilità del valore medio ottenuto.

Questo ci permette di appurare il fatto che una valutazione effettuata affidandosi unicamente su R_a , non garantisce un risultato attendibile.

I valori di S_{sk} sono prossimi a 0.1 sia per il componente 1 che per la superficie superiore del componente 2. S_{sk} per la superficie inferiore del componente 2 risulta essere invece pari a -0.56 e quindi prevede una discrepanza tra picchi e valli leggermente superiore rispetto alla superficie superiore dello stesso componente. Questa differenza è chiaramente visibile anche attraverso le mappe colorate riportate in figura 7.13 e in figura 7.14.

Componenti in Ti6Al4V realizzati in L-PBF

Durante lo sviluppo di questa tesi sono state analizzate due superfici di un solo componente (figura 7.9) realizzato in Ti6Al4V, con la tecnica L-PBF e post trattato tramite pallinatura.

I dati ricavati tramite rugosimetro sono di seguito definiti.

	Ra[μm]	Rz[μm]
1	5,206	28,286
2	4,815	25,055
3	5,655	30,622
4	4,598	28,952
5	5,961	57,352
6	4,523	25,969
7	4,528	29,377
media	5,041	32,230
dev.st.	0,582	11,246

Tabella 7.7: campione 3, superficie 1

	Ra[μm]	Rz[μm]
1	4,097	24,434
2	5,093	29,106
3	5,399	27,259
4	3,647	20,568
5	3,76	21,249
6	3,166	14,93
7	4,956	28,756
media	4,303	23,757
dev.st.	0,848	5,175

Tabella 7.8: campione 3, superficie 2

Sono di seguito riportati i dati e le mappe estratte tramite il software Mountains.

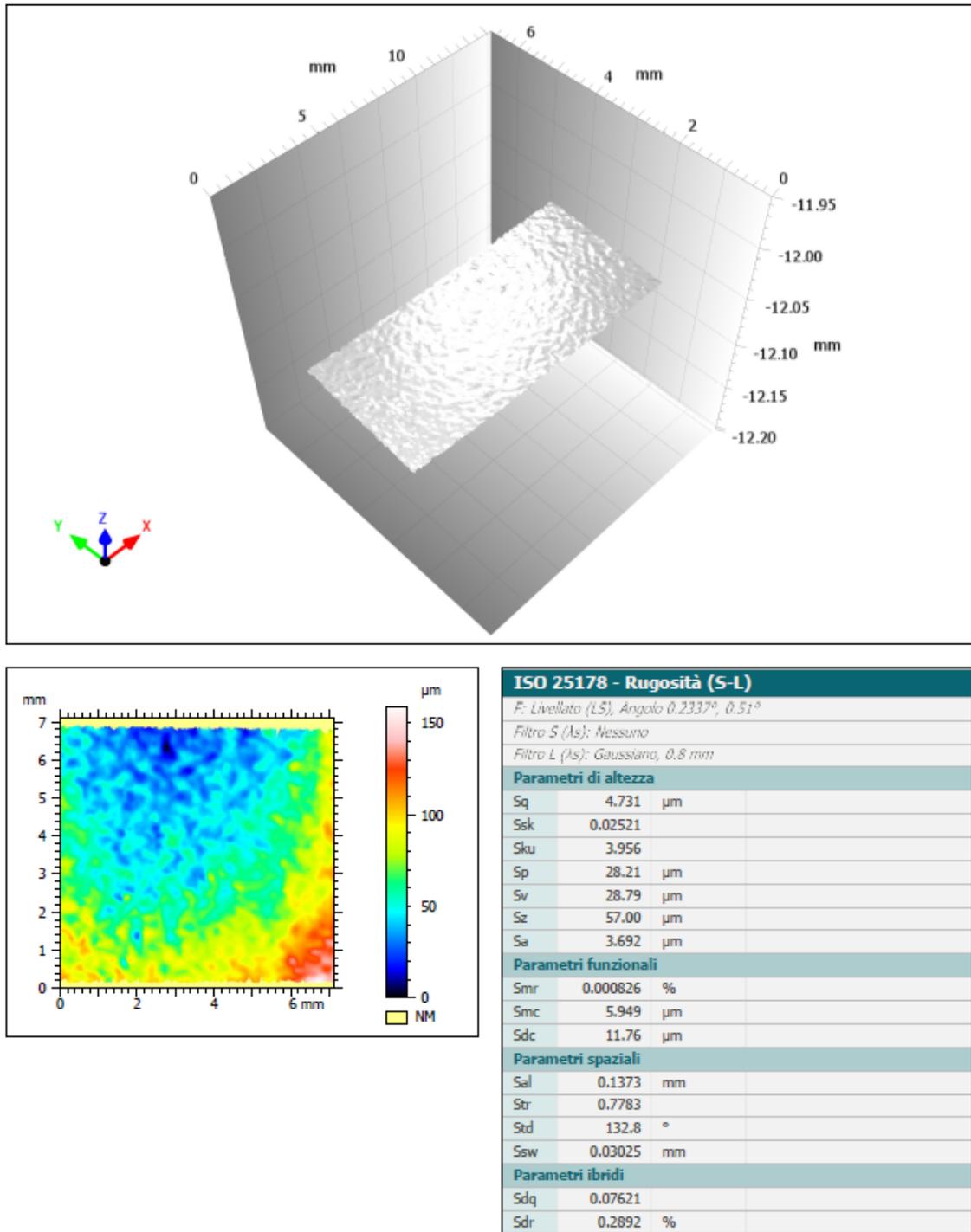


Figura 7.15: Estrazione componente 3 - superiore

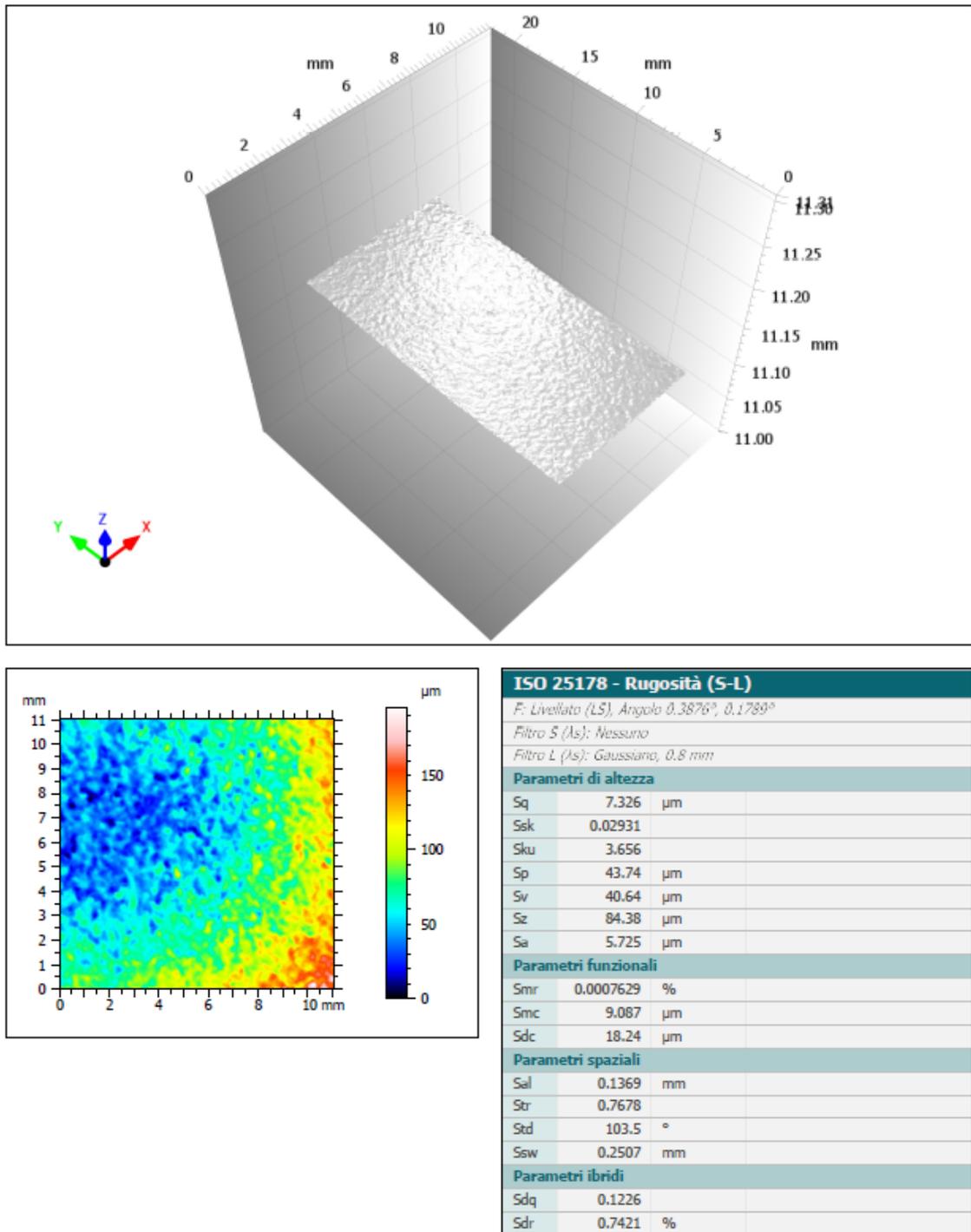


Figura 7.16: Estrazione componente 3 - inferiore

Dalla letteratura si evince che i componenti in Ti6Al4V prodotti in L-PBF, presentano un Ra di circa 20 μm nel caso as-built [40]. Nel caso in analisi è però plausibile ottenere valori più bassi rispetto a quelli trovati in letteratura dal momento che il componente 3 è stato sottoposto a un post trattamento.

I valori di Ra rilevati non sono molto distanti tra loro e sono rispettivamente 5.04 μm e 4.3 μm .

Per quanto riguarda i valori di rugosità Sa, la prima superficie in analisi riporta Sa=5.73 μm , mentre la seconda riporta Sa=3.69 μm .

Queste leggere differenze sono plausibili e possono essere dovute al fatto che l'inclinazione delle due superfici non è la stessa e potrebbe anche dipendere dal fatto che la pallinatura potrebbe non essere stata effettuata in maniera omogenea su tutto il componente.

Il valore di Ssk invece non cambia passando dalla prima alla seconda superficie e si mantiene leggermente positivo, ma prossimo allo 0 in entrambi i casi.

Componenti in AlSi10Mg realizzati con L-PBF

I componenti 4 (figura 7.10) e 5 (figura 7.11), entrambi realizzati in AlSi10Mg con la tecnica L-PBF, sono diversificati unicamente perché il componente 4 non ha subito alcun tipo di trattamento mentre il componente 5 è stato sottoposto a pallinatura. Entrambi i componenti presentano la stessa struttura e per entrambi è stata analizzata la stessa superficie.

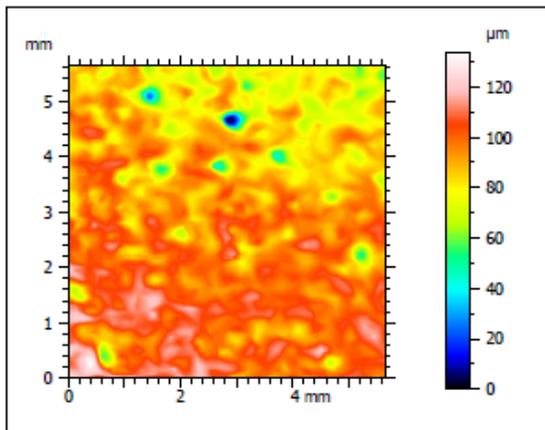
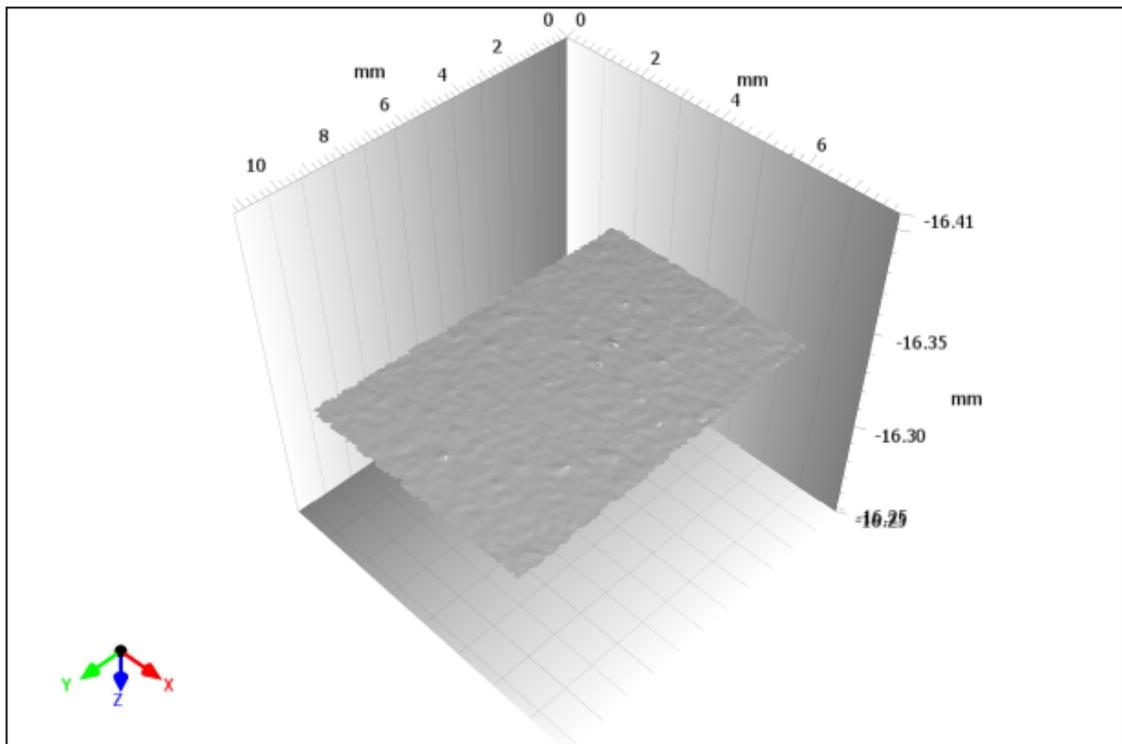
	Ra[μm]	Rz[μm]
1	9,974	52,31
2	7,922	42,788
3	11,409	61,214
4	5,865	32,757
5	7,879	40,705
6	10,684	57,844
7	8,36	44,813
media	8,870	47,490
dev.st.	1,920	10,093

Tabella 7.9: campione 4

	Ra[μm]	Rz[μm]
1	7,254	40,116
2	7,258	45,181
3	5,665	28,926
4	6,097	34,37
5	5,622	29,048
6	6,156	29,203
7	6,142	35,94
media	6,313	34,683
dev.st.	0,680	6,276

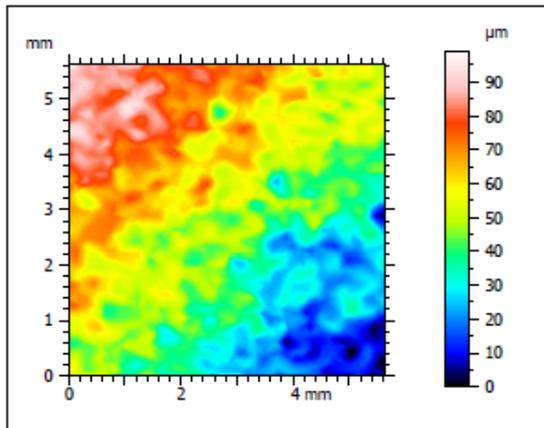
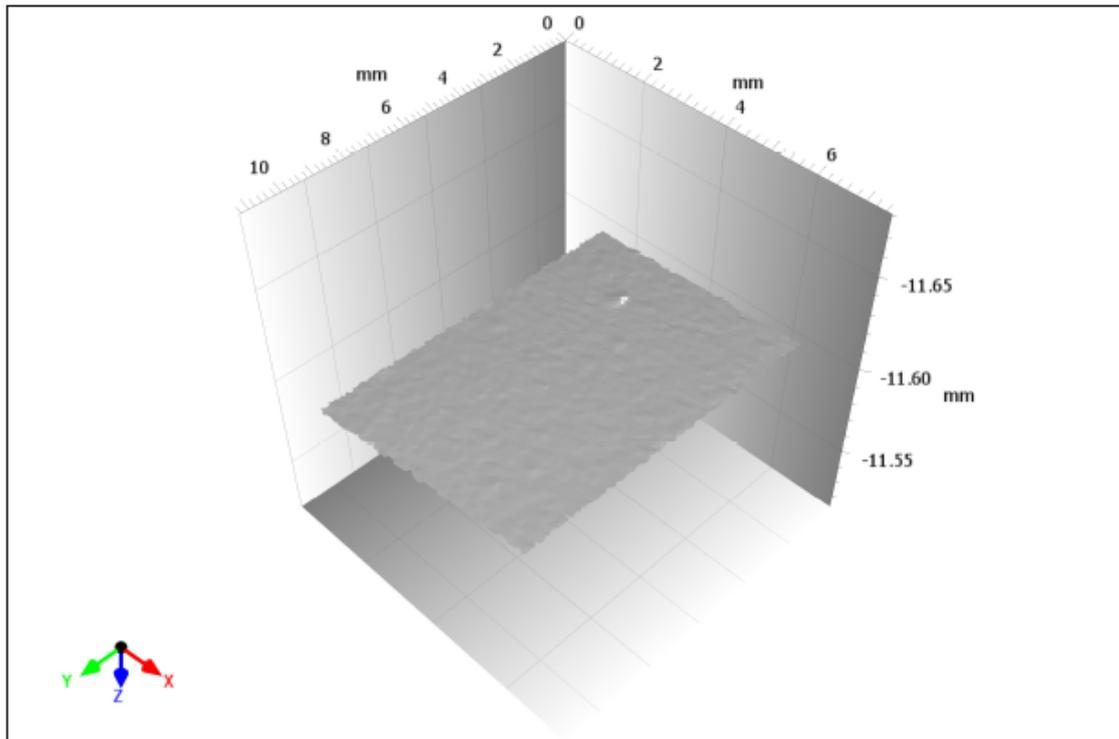
Tabella 7.10: campione 5

Sono di seguito riportati i dati e le mappe estratte tramite il software Mountains.



ISO 25178 - Rugosità (S-L)	
<i>F: Livellato (LS), Angolo -0.07453°, 0.2964°</i>	
<i>Filtro S (As): Nessuno</i>	
<i>Filtro L (As): Gaussiano, 0.8 mm</i>	
Parametri di altezza	
Sq	5.404 µm
Ssk	-1.40
Sku	10.44
Sp	19.70 µm
Sv	53.89 µm
Sz	73.58 µm
Sa	3.933 µm
Parametri funzionali	
Smr	0.004959 %
Smc	5.942 µm
Sdc	12.02 µm
Parametri spaziali	
Sal	0.1420 mm
Str	0.7440
Std	169.5 °
Ssw	0.02403 mm
Parametri ibridi	
Sdq	0.08545
Sdr	0.3605 %

Figura 7.17: Estrazione componente 4



ISO 25178 - Rugosità (S-L)		
<i>F: Livellato (LS), Angolo 0.4457°, -0.4906°</i>		
<i>Filtro S (As): Nessuno</i>		
<i>Filtro L (As): Gaussiano, 0.8 mm</i>		
Parametri di altezza		
Sq	3.090	µm
Ssk	-0.2419	
Sku	3.651	
Sp	13.11	µm
Sv	16.72	µm
Sz	29.83	µm
Sa	2.434	µm
Parametri funzionali		
Smr	0.009537	%
Smc	3.823	µm
Sdc	7.678	µm
Parametri spaziali		
Sel	0.1486	mm
Str	0.7838	
Std	20.99	°
Ssw	0.02394	mm
Parametri ibridi		
Sdq	0.04897	
Sdr	0.1196	%

Figura 7.18: Estrazione componente 5

Tramite l'analisi della letteratura si evince che la rugosità superficiale di componenti in AlSi10Mg realizzati con la tecnica L-PBF, viene notevolmente ridotta mediante pallinatura [41].

La diminuzione della rugosità dopo pallinatura è correlata allo spostamento del picco superficiale dovuto all'intensità esercitata dai colpi. La pratica dello shot peening quindi, in prodotti L-PBF in AlSi10Mg, può portare fino a una riduzione del 50% della rugosità superficiale [42].

Questo viene anche confermato dai risultati ottenuti. Si evidenzia infatti un miglioramento sia del parametro Ra, che passa da 8.87 μm nel componente 4 a 6.31 μm nel componente 5, sia del parametro Sa, che viene ridotto da 3.93 μm nel componente 4 a 2.43 μm nel componente 5.

Quanto dimostrato numericamente tramite i valori appena riportati, può essere evidenziato anche analizzando le mappe riportate in figura 7.17 e in figura 7.18. E' evidente infatti, passando dal componente 4 al componente 5, una riduzione della presenza dei picchi più elevati, esplicitato proprio da una riduzione dei valori limite della scala e da una inferiore distribuzione di zone colorate in rosso.

Inoltre si può notare come il valore di Ssk viene ridotto da -1.4 a -0.24, passando dal componente non trattato al componente pallinato. Questo quindi dimostra ulteriormente l'efficacia della pratica dello SP, infatti, nel componente 5 si individua una distribuzione molto più uniforme di picchi e valli sulla superficie analizzata.

Capitolo 8

Conclusione

Le analisi sviluppate nel corso di questa tesi sono state trattate con il fine di approfondire lo studio della texture superficiale di componenti fabbricati con polvere metallica tramite tecniche additive.

In particolar modo sono stati tenuti in considerazione pezzi realizzati tramite la tecnica L-PBF (Laser Powder Bed Fusion), che prevede la fusione delle particelle metalliche attraverso l'uso di una sorgente laser.

In letteratura ci si è spesso affidati all'uso dei parametri di rugosità lineare per la descrizione della texture dei componenti, recentemente però ci si è approcciati ai parametri di rugosità superficiale. Pertanto, per i diversi componenti misurati, sono stati analizzati sia i parametri di rugosità lineare che i parametri di rugosità superficiale, con il fine di sviluppare una completa valutazione di quale sia il modo più corretto per esaminare una superficie.

Con il fine di approfondire in modo esaustivo l'analisi, sono state tenute in considerazione le normative ISO. Ci si è affidati alla ISO 4287 per valutare lo studio della rugosità lineare e alla ISO 25178 per valutare lo studio della rugosità superficiale. E' stato quindi possibile capire quali siano gli elementi alla base delle differenze tra le due tipologie di analisi ed è stato possibile individuare i parametri più importanti dei quali tenere conto proprio nel corso dell'analisi sperimentale.

Sono stati studiati due componenti in superlega di Nickel CM247LC pallinati con microsfere di vetro e zirconia, un componente in lega di Titanio Ti6Al4V pallinato con microsfere di vetro e zirconia e infine due componenti in lega di Alluminio AlSi10Mg, con la medesima struttura, ma con post trattamento differente dal momento che uno è stato pallinato con microsfere di vetro e zirconia, mentre l'altro non è stato post trattato.

Lo studio dei componenti è stato effettuato affidandosi all'uso di uno rugosimetro, per estrapolare i parametri di rugosità lineare, e di uno scanner a luce strutturata, per individuare i principali parametri di rugosità superficiale.

Tramite l'uso dello scanner è quindi stato possibile comprendere l'importanza dell'uso della Reverse Engineering, utile in questo caso proprio per ricostruire digitalmente i componenti reali dei quali si volevano esaminare le superfici.

In particolare, con il rugosimetro, per le superfici di interesse sono state effettuate sette misurazioni del parametro Ra, come anche del parametro Rv, poi mediate, e delle quali è stata calcolata la deviazione standard.

Tramite lo scanner e attraverso l'uso di un software opportuno è stato invece possibile estrapolare molti parametri di rugosità superficiale, riferiti alle aree in analisi, ma di questi sono stati tenuti in considerazione principalmente il parametro Sa e il parametro Ssk.

Per tutti i pezzi analizzati è stato visibile fin da subito una disparità tra i valori di rugosità lineare e superficiale ottenuti, proprio quindi a conferma del fatto che questi parametri non possono essere considerati uguali e non possono essere direttamente confrontati.

Nel caso delle superfici più irregolari sono stati notati inoltre dei valori piuttosto elevati di deviazione standard calcolata sulle misure di Ra. Anche questo prova quindi una scarsa affidabilità del valore del parametro Ra ottenuto dalla media di sette misurazioni.

E' stata individuata inoltre, in tutti i casi, una notevole differenza tra i valori di Rv e di Sv che quindi, ancor meno, possono essere considerati come oggetto di paragone.

Ancora, dalle analisi dei componenti, è stato possibile capire l'incidenza che ha anche il tipo di macchina, e in particolar modo il tipo di lama utilizzata, sulla texture superficiale dei pezzi realizzati in L-PBF.

Per di più, valutando aree diverse degli stessi componenti è stato possibile notare una diversificazione dei valori dei parametri, che ha portato quindi a capire l'influenza che può avere anche l'inclinazione delle superfici.

In fase di sviluppo dell'analisi sperimentale è stato possibile inoltre approfondire l'importanza dei post trattamenti e in particolar modo della pallinatura. E' stato studiato come le superfici rispondono al getto e ne sono stati constatati i risultati proprio analizzando i dati raccolti. Nello specifico, nei componenti in lega di Alluminio, aventi la medesima struttura, è stato possibile osservare la risposta di una superficie alla pallinatura. I valori dei parametri di Ra, Rv, Sa e Sv sono stati ridotti passando dal componente non trattato al componente pallinato e la distribuzione di picchi e delle valli dell'area analizzata è diventata molto più uniforme.

Complessivamente, quindi, quanto analizzato nella fase sperimentale di questa tesi è stato di notevole importanza proprio per capire il miglior modo di intervenire nello studio della rugosità superficiale dei componenti realizzati in Additive. E' stata pertanto fondamentale la possibilità di approfondire il significato dei parametri e la modalità corretta di interpretazione dei valori ottenuti sperimentalmente.

Bibliografia

- [1] B. Bhushan. *Modern Tribology Handbook, Two Volume Set*. Mechanics & Materials Science. CRC Press, 2000. ISBN: 9780849377877.
- [2] E. Chirone e S. Tornincasa. *Disegno tecnico industriale*. Disegno tecnico industriale. Per le Scuole superiori. Il Capitello, 2007. ISBN: 9788842670094.
- [3] ISO. *Geometrical product specification (GPS)-Surface texture:Profile method-Rules and procedures for the assessment of surface texture*. ISO 4288. International Organization for Standardization, 1996.
- [4] ASTM. *Standard test methods for file measurement of surface profile of blast cleaned steel*. ASTM 4471†. ASTM International, 2021.
- [5] ISO. *Geometrical product specification (GPS)-Surface texture:Profile method-Terms, definitions and surface texture parameters*. ISO 4287+A1:2000. International Organization for Standardization, 1998.
- [6] ISO. *Geometrical product specification (GPS)-Surface texture:Profile method-Nominal characteristics of contact (stylus) instruments*. ISO 3274. International Organization for Standardization, 1998.
- [7] ISO. *Geometrical product specification (GPS)-Surface texture: Areal*. ISO 25178:2-. International Organization for Standardization, 2012.
- [8] *Area roughness parameters*. URL: <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/parameters.jsp>.
- [9] Baofeng He, Siyuan Ding e Zhaoyao Shi. «A comparison between profile and areal surface roughness parameters». In: *Metrology and Measurement Systems* (2021), pp. 413–438.
- [10] *Does it make sense to compare Ra and Sa values?* URL: <https://www.digitalsurf.com/blog/does-it-make-sense-to-compare-ra-and-sa-values/>.

-
- [11] Andrew Triantaphyllou, Claudiu L Giusca, Gavin D Macaulay, Felix Roerig, Matthias Hoebel, Richard K Leach, Ben Tomita e Katherine A Milne. «Surface texture measurement for additive manufacturing». In: 3.2 (mag. 2015), p. 024002. DOI: 10.1088/2051-672x/3/2/024002. URL: <https://doi.org/10.1088/2051-672x/3/2/024002>.
- [12] A Townsend, N Senin, L Blunt, R.K Leach e J.S Taylor. «Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review». eng. In: *Precision engineering* 46 (2016), pp. 34–47. ISSN: 0141-6359.
- [13] Joy Gockel, Luke Sheridan, Brittanie Koerper e Bo Whip. «The influence of additive manufacturing processing parameters on surface roughness and fatigue life». In: *International Journal of Fatigue* 124 (2019), pp. 380–388. ISSN: 0142-1123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.03.025>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112319301021>.
- [14] Joe Hiemenz. «Electron Beam Melting: Electron Beam Melting is a unique prototyping and manufacturing process that can simultaneously reduce costs, weight, and time». In: *Advanced Materials & Processes* 165.3 (2007), pp. 45–47.
- [15] A Barari, H A Kishawy e M A Kaji F Elbestawi. «On the surface quality of additive manufactured parts». eng. In: *Int J Adv Manuf Technol* 89 (2017), pp. 1969–1974.
- [16] Carlo A Biffi e Ausonio Tuissi. «Stato dell’arte sulle tecniche di produzione additiva per metalli». In: *Metallurgia Italiana* 109.1 (2017), pp. 5–10.
- [17] *Laser melting component*. URL: [https://resources.renishaw.com/gen/details/Laser%20melting%20component\(36449\)](https://resources.renishaw.com/gen/details/Laser%20melting%20component(36449)).
- [18] Luca Iuliano. *Tecniche di Additive Manufacturing per metalli*. Dispense del corso di Produzione assistita al calcolatore. Politecnico di Torino, 2020-2021.
- [19] Francesco Trevisan, Flaviana Calignano, Alberta Aversa, Giulio Marchese, Mariangela Lombardi, Sara Biamino, Daniele Ugues e Diego Manfredi. «Additive manufacturing of titanium alloys in the biomedical field: processes, properties and applications». In: *Journal of applied biomaterials & functional materials* 16.2 (2018), pp. 57–67.

- [20] Tanja Trosch, Johannes Strößner, Rainer Völkl e Uwe Glatzel. «Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718 compared to forging and casting». In: *Materials letters* 164 (2016), pp. 428–431.
- [21] Samantha Taylor, Samantha Taylor, Samantha Taylor, Samantha Taylor, Bradley Howell Jared, Bradley Howell Jared, Eric Christopher Forrest, Eric Christopher Forrest, Joshua Robert Koepke, Joshua Robert Koepke, Joseph Beaman e Joseph Beaman. «Investigating Applicability of Surface Roughness Parameters in Describing the Metallic AM Process.» In: (ago. 2019). URL: <https://www.osti.gov/biblio/1641815>.
- [22] Henry T. Lancashire. *A simulated comparison between profile and areal surface parameters: R_a as an estimate of S_a* . 2017. arXiv: 1708.02284 [physics.geo-ph].
- [23] *Surface Texture on Freeform Surfaces*. URL: <https://guide.digitalsurf.com/en/guide-freeform.html>.
- [24] *La pallinatura delle superfici metalliche, una particolare finitura superficiale*. URL: <https://www.teknoring.com/news/materiali-da-costruzione/la-pallinatura-delle-superfici-metalliche-una-particolare-finitura-superficiale/>.
- [25] S Kanou, O Takakuwa, SR Mannava, D Qian, VK Vasudevan e H Soyama. «Effect of the impact energy of various peening techniques on the induced plastic deformation region». In: *Journal of Materials Processing Technology* 212.10 (2012), pp. 1998–2006.
- [26] V. Raja e K.J. Fernandes. *Reverse Engineering: An Industrial Perspective*. Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer London, 2007. ISBN: 9781846288562. URL: <https://books.google.ga/books?id=K4sXDWGuatcC>.
- [27] Luca Iuliano. *Reverse Engineering*. Dispense del corso di Produzione assistita al calcolatore. Politecnico di Torino, 2020-2021.
- [28] *Dalla scansione al CAD: una parte essenziale dello sviluppo dei prodotti*. URL: https://www.creaform3d.com/blog/pun5th75ef_wp/wp-content/uploads/reverseengineering.png.
- [29] *Cos'è il reverse engineering?* URL: <https://www.artec3d.com/it/learning-center/what-reverse-engineering>.

-
- [30] *Cos'è il reverse engineering?* URL: <https://www.creaform3d.com/blog/it/cose-il-reverse-engineering/>.
- [31] *RTP80*. URL: <http://www.sm-instruments.com/it/prodotti/rugosimetri/rtp-80.html>.
- [32] *Sandblasting Machine SD9*. URL: <https://norblast.it/en/machines-2/manual-line/sandblasting-machine-sd9/>.
- [33] *Atos Compact Scan*. URL: <https://www.gom.com/it/sistemi-di-metrologia/atos/atos-compact-scan.html>.
- [34] *Manifattura additiva delle superleghe di Nichel*. URL: <https://www.tav-vacuumfurnaces.com/blog/39/it/manifattura-additiva-superleghe-nichel>.
- [35] Tom Sanviemvongsak, Daniel Monceau e Bruno Macquaire. «High temperature oxidation of IN 718 manufactured by laser beam melting and electron beam melting: Effect of surface topography». In: *Corrosion Science* 141 (2018), pp. 127–145.
- [36] G L Erickson, K Harris e R E Schwer. «DS CM 247 LC - enhanced mechanical properties response through optimized solutioning technique». In: *TMS (The Metallurgical Society) Paper Selection; (USA)* 56 (). ISSN: 0197-1689. URL: <https://www.osti.gov/biblio/5366665>.
- [37] William E Frazier. «Metal additive manufacturing: a review». In: *Journal of Materials Engineering and performance* 23.6 (2014), pp. 1917–1928.
- [38] Shunyu Liu e Yung C Shin. «Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review». In: *Materials & Design* 164 (2019), p. 107552.
- [39] Benjamin A Fulcher, David K Leigh e Trevor J Watt. «Comparison of AlSi10Mg and Al 6061 processed through DMLS». In: *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium, Austin, TX, USA*. Vol. 46. 2014.
- [40] Ben Vandenbroucke e Jean-Pierre Kruth. «Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts». In: *Rapid Prototyping Journal* (2007).
- [41] Flaviana Calignano, D Manfredi, EP Ambrosio, Luca Iuliano e Paolo Fino. «Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS». In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67.9-12 (2013), pp. 2743–2751.

- [42] Ahmed H Maamoun, Mohamed A Elbestawi e Stephen C Veldhuis. «Influence of shot peening on AlSi10Mg parts fabricated by additive manufacturing». In: *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2.3 (2018), p. 40.