POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Benchmark destinato ad analisi dimensionali e di rugosità per il processo EBM per prodotti in Ti6Al4V

POLITECNICO



Relatori

Candidato

Giovanni Rizza

Prof. Luca Iuliano Prof. Paolo Minetola Ing. Manuela Galati

A.A. 2017/2018

Alla mia famiglia e

a Roberta

INDICE

1.	Intro	duzione	1
2.	Addi	tive manufacturing ed Electron Beam Melting	3
	2.1	Introduzione all'additive manufacturing	3
	2.2	Storia dell'additive manufacturing e introduzione all'additive manufacturing metallico	4
	2.3	La tecnica Electron Beam Melting	10
3.	La ru	gosità superficiale e la rugosità nei pezzi prodotti tramite EBM	19
	3.1	La rugosità	19
	3.2	La rugosità nei pezzi prodotti tramite EBM	27
	3.3	Analisi della letteratura	29
4.	Benc	hmark per analisi di rugosità	39
	4.1	Operazioni preliminari alla valutazione.	39
	4.2	Progettazione della parte di riferimento	43
	4.3	Produzione	44
	4.4	Acquisizione delle misure di rugosità	49
5.	mod	ello empirico della rugosita' superficiale	51
	5.1	Strumenti di statistica descrittiva e inferenziale	51
	5.1.1	Analisi preliminari sui dati sperimentali	51
	5.1.2	l principi di esclusione	54
	5.1.3	Verifica della normalità della distribuzione sperimentale	55
	5.1.4	Il test di ipotesi	58
	5.1.5	Analisi della varianza	59
	5.1.6	La regressione lineare	64
	5.2	Analisi di influenza della posizione sulle repliche	66
	5.3	Analisi di influenza dell'angolo di inclinazione delle superfici interne al provino	76
	5.4	Analisi della rugosità in relazione alla direzione della superficie	81
	5.5	Modello di regressione per studio di superfici positive e negative	89

6.	Valutazione dell'accuratezza dimensionale	99
7.	Conclusioni	109
Ring	raziamenti	112
Appendice		114
Bibliografia		120

1. INTRODUZIONE

La fabbricazione additiva è una delle tecniche più innovative nell'ambito della produzione industriale.

L'idea di realizzare delle parti, che possono essere dei prototipi o delle parti definitive impiegate come componenti finali, aggiungendo uno strato di materiale sull'altro, ha rivoluzionato il mondo della produzione, dando sempre maggiore libertà ai progettisti e consentendo di ottenere risultati sempre più ambiziosi sia dal punto di vista funzionale che del design.

Sarà presentato il processo evolutivo che dalla nascita della fabbricazione additiva ha condotto alle attuali tecniche produttive, sia in ambito polimerico che metallico. In particolare, saranno analizzate le tecniche metalliche e condotta un'analisi approfondita della tecnica Electron Beam Melting (EBM), una delle tecniche di fabbricazione additiva attualmente più impiegate nella produzione di parti in metallo e quella impiegata per portare avanti questo lavoro.

Nonostante l'evoluzione dei processi di fabbricazione additiva uno dei problemi che ancora affligge queste tecniche è la scarsa finitura superficiale. I pezzi prodotti dalle macchine, infatti, presentano da un lato un'elevata rugosità superficiale e dall'altro potrebbero presentare una scarsa accuratezza dimensionale, con una deviazione dalle dimensioni nominali pensate dal progettista.

Sarà condotta, quindi, un'analisi approfondita del processo Electron Beam Melting in cui particolare attenzione è stata posta alle caratteristiche superficiali e dimensionali dei pezzi prodotti.

Nella prima parte del lavoro si riporta un'analisi generale della letteratura mirata ad individuare lo stato dell'arte nel campo della caratterizzazione generale dei componenti prodotti mediante le tecniche di fabbricazione additive.

A partire dalla letteratura, si è messo a punto una parte di riferimento per l'analisi e la caratterizzazione del processo di Electron Beam Melting. In particolare, l'analisi è stata mirata ad individuare l'effetto dell'angolo di costruzione sulla rugosità finale. Le misure di rugosità sono state analizzate mediante strumenti di statistica descrittiva e inferenziale.

Successivamente, è stato prodotto un parte di riferimento per le valutazioni dimensionali. La geometria del competente reale è stata ricostruita mediante reverse engineering mediante

uno scanner a luce strutturata. La digitalizzazione della superficie acquisita è stata usata per effettuare un confronto con le dimensioni nominali del componente, usando direttamente il disegno 3D CAD del componente, ed effettuare valutazioni in merito all'accuratezza dimensionale del processo produttivo.

2. ADDITIVE MANUFACTURING ED ELECTRON BEAM MELTING

In questo capitolo ci si occuperà di capire da dove nasce l'idea di realizzare componenti definitivi direttamente a partire dal modello tridimensionale digitale e come è stata sviluppata questa idea. Verrà poi analizzata più nel dettaglio la tecnica Electron Beam Melting, oggetto di studio in questo lavoro.

2.1 Introduzione all'additive manufacturing

Con i termini fabbricazione additiva o "additive manufacturing" in inglese, ci si riferisce a quelle tecnologie, precedentemente note come prototipazione rapida, che consentono la realizzazione di componenti finiti direttamente a partire da un modello tridimensionale digitale del pezzo.

Storicamente questo tipo di tecnologie venivano adottate nella realizzazione di prototipi che consentissero valutazioni concettuali e funzionali nella fase di sviluppo di un prodotto. Per questa ragione tali tecnologie venivano identificate sotto il termine di prototipazione rapida. Lo sviluppo naturale di queste tecnologie, tuttavia, ha portato al loro impiego per realizzare componenti definitivi, che non fossero più dei semplici prototipi [1].

Continuare a riferirsi, quindi, a queste come tecniche di prototipazione rapida non sembra più opportuno. Per promuovere la conoscenza, stimolare la ricerca e l'implementazione delle tecnologie tramite lo sviluppo di standard per l'additive manufacturing si è formato un comitato (ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies) che ha stabilito, tra i tanti provvedimenti presi, che il nome corretto con cui riferirsi a queste tecniche produttive fosse proprio "additive manufacturing" [2].

Il principio alla base di queste tecniche di produzione è che un modello digitale tridimensionale, creato tramite un software "Computer-Aided Design" (CAD), venga direttamente prodotto, ponendo uno strato di materiale sull'altro, da cui il nome di fabbricazione additiva.

Nonostante la realtà non sia poi così semplice come sembra, la fabbricazione additiva offre notevoli possibilità, semplificando notevolmente il processo produttivo, rispetto alle tradizionali tecniche di produzione. Gli altri processi produttivi, infatti, oltre che del modello del pezzo, necessitano anche di una sua dettagliata analisi al fine di identificare quali che siano le lavorazioni che consentono di produrre le geometrie desiderate, quali utensili impiegare, quali processi adottare e quali parti aggiuntive possono essere necessarie per portare a termine la produzione [3]. Con l'additive manufacturing, questi problemi non si pongono, in quanto consente di ottenere parti di qualunque complessità, senza alcun tipo di complicazione, non essendo infatti necessaria alcun tipo di attrezzatura di produzione; è necessario solamente avere una buona conoscenza del processo produttivo adottato e del materiale impiegato nella produzione.

2.2 Storia dell'additive manufacturing e introduzione all'additive manufacturing metallico

L'idea di realizzare componenti aggiungendo uno strato sull'altro non è molto recente. Già nella seconda metà dell'ottocento si concepì la possibilità di fare ricorso ad una tecnica che consentisse la realizzazione di componenti aggiungendo del materiale e non sottraendolo. In particolare, i campi in cui furono originariamente pensate ed applicate queste tecniche furono quello topografico e della scultura[4].

Nel 1890, Blanther [5] aveva concepito la possibilità di realizzare gli stampi per produrre mappe topografiche in rilievo tramite tecniche "additive". Le sagome erano infatti impresse su una serie di pannelli in cera e successivamente venivano tagliate e sovrapposte le une sulle altre. Alla fine, le sagome sovrapposte e lavorate costituivano il negativo sul quale realizzare lo stampo. Una tecnica simile, ideata da Perera [6], prevedeva di ritagliare le linee di contorno delle mappe su fogli di carta che poi andavano incollati l'uno sull'altro a formare il modello tridimensionale. A queste tecniche ne seguirono delle altre che prevedevano sostanzialmente procedimenti analoghi, anche se realizzate con materiali differenti.

Parallelamente all'applicazione nel campo della topografia, l'idea di realizzare componenti in maniera "additiva" venne sviluppata anche nel campo artistico delle fotosculture. L'idea alla base di queste tecnica era quella di realizzare l'esatta replica di un oggetto tridimensionale già esistente. La prima tecnica realmente efficace venne sviluppata da François Willème, che prevedeva di posizionare il componente o il soggetto da replicare al centro di una base cilindrica divisa in 24 porzioni. Dopo di che venivano scattate contemporaneamente ventiquattro fotografie, che venivano impiegate successivamente da un artigiano per intagliare delle porzioni cilindriche del pezzo. Al fine di semplificare il processo produttivo, Baese [7] introdusse l'uso di gelatine fotosensibili che si espandevano in maniera proporzionale alla quantità di luce ricevuta quando trattate con acqua.

La fabbricazione additiva, così come la conosciamo oggi, poggia le sue basi sul sistema introdotto nel 1951 da Munz [8] molto simile alla moderna tecnica della stereolitografia. Egli scoprì il modo di esporre in maniera selettiva una emulsione trasparente che si solidificava quando veniva illuminata.

Nel 1968 Swainson [9] propose una tecnica che prevedeva l'utilizzo di un fascio laser per attivare la reticolazione di una resina fotosensibile, realizzando direttamente il solido tridimensionale.

Nel 1971 Ciraud [10] presentò un processo che consentiva la realizzazione di parti tridimensionali a partire da polvere, che veniva parzialmente fusa da un fascio laser. Nel 1981 Housholder [11] propose la prima tecnica di sinterizzazione su letto di polvere, senza però arrivare a un prototipo commerciale della macchina. Nello stesso periodo Kodama [12] pensò il primo processo di prototipazione rapida che consentisse di impiegare un fotopolimero funzionale, mentre, ancora nello stesso periodo, Herbert [13] sviluppo il primo prototipo di stereolitografo che prevedeva l'uso di un computer per comandare la luce ultravioletta che andava a solidificare il polimero.

A partire da questo momento le aziende hanno cominciato ad interessarsi sempre di più a queste tecniche di prototipazione rapida, tanto che negli ultimi trenta anni si è assistito ad un'esplosione di tecniche e materiali nuovi, con la nascita di nuove aziende, cha hanno concentrato la loro attenzione su queste tecnologie, sviluppandole e trasformandole anche in tecniche di produzione vera e propria.

Sebbene, come evidente da quanto fin qui detto, la fabbricazione additiva sia nata come tecnica per la realizzazione di prototipi in materiale polimerico, ha trovato il perfetto campo di applicazione nella realizzazione di componenti metallici, soddisfacendo quei requisiti di performance, migliore efficienza produttiva, sostenibilità e risparmio energetico, rispetto alle tecniche di produzione tradizionalmente impiegate nella lavorazione dei metalli. Molte di queste tecniche sono state sviluppate appositamente per lavorare i metalli, mentre altre sono derivate dalle corrispettive tecniche per i polimeri [4].

Poiché in questo lavoro il materiale trattato è Ti6Al4V processato tramite Electron Beam Melting, si ritiene utile approfondire maggiormente le tecniche destinate alla lavorazione del metallo, operandone una classificazione in funzione della sorgente energetica e della forma di partenza del materiale. Queste tecniche infatti possono essere distinte in fusione a letto di polvere e deposizione diretta. Le prime sfruttano la sorgente energetica per fondere in maniera selettiva un letto di polvere metallica, mentre le seconde adottano un sistema per depositare il materiale direttamente nel punto in cui deve essere solidificato. Quest'ultima può essere ulteriormente distinta in due ulteriori tecniche, a seconda che il materiale grezzo di partenza impiegato sia sotto forma di polvere o di filo.

Se il materiale è sotto forma di polvere, allora si adotta un ugello[4], di cui è riportata una rappresentazione schematica in Figura 2.1. Le due tecniche principali, nel caso di materiale sotto forma di polvere, sono la tecnologia LENS, sviluppata ai "Sandia National Laborato-ries" nel 1990 e concessa in licenza alla Optomec nel 1997 (ad oggi è l'unica azienda a svi-luppare e vendere macchine LENS) e la tecnologia Direct Energy Deposition (DED) fornita da "POM group"[4]. Le sostanziali differenze tra queste due tecniche consistono nelle strategie di deposizione e di controllo della testa di deposizione. L'ugello di deposizione è molto particolare, perché è cavo per lasciare passare il fascio energetico, mentre ai lati della testa di deposizione sono presenti i condotti che consentono il passaggio della polvere. Il fascio energetico viene focalizzato su un substrato, posizionato su una piattaforma, a formare una pozza di fusione. In questa viene spruzzata la polvere metallica che fonde e forma un deposito. Tipicamente la testa di deposizione si muove sul piano x-y parallelo alla piattaforma di costruzione, andando a solidificare un primo strato, dopo di che la testa si muove lungo z,



Figura 2.1 Schema testa di deposizione; fonte: [4]

alzandosi e andando a depositare un nuovo strato. Esiste anche la versione di macchina in cui la testa di deposizione è fissa, mentre a muoversi è la piattaforma. La polvere viene veicolata e distribuita impiegando un gas inerte che oltre a veicolare la polvere è utile a creare uno strato inerte attorno alla zona di fusione ed a prevenire l'ossidazione del deposito. Se, invece, il materiale grezzo è in forma di filo, allora si fa ricorso sempre ad una tecnica di deposizione diretta, ma che funziona in maniera leggermente diversa. L'unica tecnica in grado di processare materiale grezzo sotto forma di filo è la tecnica Electron Beam Free Form Fabbrication (EBFFF). Questa è stata ampiamente studiata dalla NASA, perché potenzialmente l'unica in grado di funzionare in assenza di gravità[14].

Un'altra tecnica, che impiega come materiale grezzo da costruzione un filo metallico, è la tecnica EBAM® ideata dall'azienda "Sciaky inc." La costruzione del pezzo, in questo caso, avviene all'interno di una camera di costruzione in cui viene realizzato il vuoto. In questo modo si previene l'eventuale ossidazione del pezzo. Entrambe le tecniche, tuttavia, funzionano in maniera analoga al sistema che impiega il materiale da costruzione sotto forma di polvere e in Figura 2.2 è rappresentato in maniera schematica il funzionamento del sistema.



Figura 2.2: Schema sistema Electron Beam Additive Manufacturing; fonte: keywordsuggest.org

Infatti, è ancora presente un ugello, posto in questo caso lateralmente, dal quale viene fornito il materiale grezzo da costruzione. L'energia necessaria alla fusione del metallo, in questo caso, è fornita da un fascio di elettroni generato da un cannone elettronico posto nella parte superiore. Il fascio di elettroni viene focalizzato sulla superficie di costruzione del pezzo, in modo da fondere il materiale proprio nella zona i cui è necessario depositare il materiale.

Sebbene le tecniche di deposizione diretta siano abbastanza impiegate, ad oggi le tecniche maggiormente adottate sono le tecniche di fusione a letto di polvere [15]. Queste sono nate come sviluppo della tecnica di sinterizzazione laser polimerica.

In origine, infatti, la potenza dei laser disponibili non era sufficiente a portare a fusione direttamente la polvere metallica. Si faceva quindi ricorso a delle polveri speciali, realizzate con un nucleo di materiale metallico e ricoperte da materiale polimerico. La macchina stendeva quindi un sottile strato di polvere e un laser provvedeva a riscaldare il materiale polimerico facendo aderire tra loro le particelle di polvere. In questo modo, strato dopo strato, avveniva la realizzazione di un componente tridimensionale. Il componente prodotto in questo modo, ovviamente, non possedeva caratteristiche strutturali e il materiale utilizzato per la produzione inoltre non era quello definitivo. Occorreva dunque effettuare delle operazioni di postprocessing al fine di aumentare la resistenza del pezzo così realizzato. Questo veniva messo in un forno assieme ad un metallo bassofondente (rame o bronzo), all'interno del quale l'elevata temperatura eliminava per pirolisi la parte polimerica lasciando dei vuoti che venivano riempiti dal metallo bassofondente. Quello che si otteneva da questo processo, ovviamente, non era una lega metallica, ma semplicemente un agglomerato.

Man mano che la potenza disponibile dei laser crebbe, allora le macchine cominciarono a impiegare direttamente una miscela di polveri altofondenti e bassofondenti. In questo modo non era più necessario, alla fine del processo di sinterizzazione tramite la macchina additiva, il passaggio in forno.

Solo a partire dal 2000 l'evoluzione della tecnologia ha consentito di avere laser abbastanza potenti da poter fondere direttamente la polvere metallica del materiale finale. Quando si lavora il materiale definitivo non si parla più di sinterizzazione selettiva laser (SLS) ma si parla di fusione selettiva laser (SLM), anche se oggi si fa ricorso ad entrambi i termini non facendo più distinzione tra i due, per via del fatto che alla fine del processo produttivo il risultato è un pezzo con piena densità e con caratteristiche strutturali ottime, che trova impiego non più come semplice prototipo funzionale, ma come componente definitivo. Tutte le macchine a letto di polvere prevedono un apparato di produzione simile tra le diverse tecnologie, a prescindere dal tipo di sorgente energetica utilizzata. In Figura 2.3 è rappresentato il tipico apparato di produzione di una macchina a letto di polvere.

Come evidente da Figura 2.3, l'apparato di produzione è costituito sostanzialmente da due compartimenti per la polvere, un rullo e la sorgente energetica. Nel compartimento laterale viene messa la polvere necessaria alla costruzione del pezzo, mentre nel compartimento centrale avviene la realizzazione vera e propria. La camera laterale e la camera centrale presenta alla base un pistone che fa salire o scendere la polvere: in particolare nella camera laterale il

8

pistone sale, cedendo la polvere necessaria alla costruzione, mentre nella camera centrale il pistone scende.



Figura 2.3 Schema macchina a letto di polvere con sorgente energetica di tipo laser; Fonte: Fraunhofer IWU

L'ampiezza di spostamento del pistone della camera centrale, di fatto, determina lo spessore dello strato di materiale. La polvere viene spostata dal contenitore laterale alla zona di costruzione tramite un rullo o una lama, che ha il compito di distribuire in maniera omogenea uno strato di polvere e di compattarla leggermente. Nella parte superiore della macchina sarà poi presente la sorgente energetica che opera di fatto la fusione della polvere. Il fascio energetico viene deviato tramite opportuni strumenti e focalizzato proprio sullo strato di polvere appena deposto. La costruzione del pezzo avviene depositando e solidificando uno strato sull'altro, in modo che lo strato appena depositato, quando viene fuso, riesca ad aderire al metallo solido sottostante. L'energia fornita dalla sorgente, infatti, non deve essere quella strettamente sufficiente alla fusione dello strato di polvere, ma deve essere più alta, in modo da rifondere parzialmente anche il materiale solido sottostante.

2.3 La tecnica Electron Beam Melting

Tra le varie tecniche a letto di polvere, una tecnica molto impiegata, che sarà anche utilizzata per portare avanti il lavoro oggetto di questa tesi è la tecnica Electron Beam Melting (EBM). La tecnica EBM, come riportato in [3], è una delle poche in grado di realizzare componenti funzionali che presentano piena densità del materiale, che hanno delle forme anche molto complesse e che consente di lavorare diverse classi di metalli. Possono, infatti, essere processati: Acciai inossidabili (17-4), acciaio da utensili (H13), Super-leghe a base Ni (625 e 718), super-leghe a base Co (Stellite 21), leghe a basso coefficiente di espansione termica (invar), metalli duri (NiWC), composti intermetallici (Ti-Al), alluminio, rame, berillio e niobio [16]. Nonostante la possibilità di trattare così tanti materiali, ad oggi si lavora prevalentemente con il titanio e le sue leghe, perché a causa dell'elevata temperatura di fusione, della scarsa fluidità e della forte affinità con gli elementi presenti in atmosfera (ossigeno e azoto) [3][16], i processi tradizionalmente adottati per lavorare queste leghe, quali forgiatura, estrusione o colata sono molto complessi, dovendo superare innumerevoli difficolta. La tecnica EBM, invece, che lavora in vuoto e che sfrutta una sorgente energetica molto potente riesce a superare queste difficoltà trovando spazio in molte applicazioni industriali. Ad oggi, le principali applicazioni della tecnica EBM si ritrovano in campo biomedicale e in campo aerospaziale.

In campo biomedicale questa tecnica viene impiegata per la realizzazione di protesi ortopediche, che, oltre ad essere realizzate in titanio, materiale altamente biocompatibile, presentano una rugosità superficiale tale da favorire l'osteointegrazione e quindi un recupero molto più rapido per il paziente. In campo aerospaziale, invece, le leghe di TiAl processate tramite EBM trovano una grossa applicazione nella realizzazione di pale di turbine ad elevate prestazioni per motori aeronautici, in particolare pale per turbine di bassa pressione, che siano al tempo stesso più leggere di quelle realizzate in superleghe a base Ni e in grado di resistere alle sollecitazioni che si generano a questo stadio. Oltre a queste applicazioni, questa tecnologia trova impiego anche in campo automotive, in particolare nella realizzazione di valvole e di turbine per turbocompressori [17]. Le ragioni per cui l'additive manufacturing trova grande impiego in questi settori e in particolare in campo aeronautico, sono una considerevole riduzione del time-to-market e del buy-to-fly grazie ad una notevole riduzione dei passaggi produttivi. Ulteriori notevoli vantaggi, derivanti dall'applicazione di questa tecnica sono di natura ambientale: infatti, questa tecnica impiega esattamente la quantità di polvere strettamente necessaria alla produzione. Il resto della polvere, può tranquillamente essere riciclata, senza cambiamenti apprezzabili nella composizione chimica della polvere già utilizzata,

ma non fusa[16]. Altri vantaggi sono relativi alla complessità delle forme che è possibile realizzare. Utilizzando tecniche di ottimizzazione topologica, infatti, è possibile adottare il materiale solo dove realmente necessario, realizzando di fatto componenti più leggeri. Quello che ne deriva, in campo aeronautico, è la possibilità di aumentare il carico pagante, o a parità di carico pagante risparmiare in carburante, per via del fatto che si riduce il peso dell'aeromobile. Inoltre, non dovendo più fare ricorso a stampi il progettista può liberare la sua immaginazione, realizzando componenti che con le tradizionali tecniche di produzione erano impensabili.

La macchina EBM, dal punto di vista funzionale è del tutto analoga ad un microscopio elettronico a scansione, mentre il processo costruttivo è simile a quanto si realizza in una saldatura. In Figura 2.4 e riportata una rappresentazione schematica della macchina EBM.



Figura 2.4 Schema macchina EBM; Fonte ARCAM

La macchina è costituita sostanzialmente da due parti: nella parte superiore è presente il cannone elettronico, mentre nella parte sottostante si ha la camera di lavoro.

Il cannone elettronico presenta, nella parte alta un filamento di tungsteno scaldato a temperatura di 2500°C, che emette gli elettroni. L'azienda "Arcam", unico produttore di macchine EBM, nelle macchine più recenti ha sostituito il filamento di tungsteno con un monocristallo in esaboruro di lantanio (LaB₆) per generare gli elettroni. Questo ha il vantaggio di consumarsi molto meno che il filamento di tungsteno (infatti man mano che vengono emessi elettroni e quindi si procede con la produzione si ha la riduzione in peso del materiale emettitore di elettroni) e quindi richiedere meno manutenzione. Gli elettroni emessi dal filamento o dal monocristallo, vengono collimati ed accelerati fino ad ottenere un'energia cinetica di circa 60 keV e a raggiungere velocità che vanno da 0.1 a 0.4 volte la velocità della luce. Il fascio di elettroni così generato attraversa la parte sottostante del cannone elettronico, nella quale viene regolata la forma e la dimensione del fascio tramite delle bobine, che si comportano di fatto come delle vere e proprie lenti magnetiche. Una prima bobina (lente astigmatica) è impiegata per controllare la forma del fascio, una seconda bobina (lente di fuoco) è impiegata per controllare la dimensione del fascio mentre l'ultima bobina (lente di deviazione) è impiegata per posizionare il fascio sulla piattaforma di costruzione [3]. Il cannone elettronico non presenta nessun tipo di elementi meccanici in movimento, in quanto la deviazione del fascio avviene semplicemente agendo sulle bobine. La corrente del fascio è controllata in un range che va da 1 a 50 mA di corrente e il diametro del fascio può essere ridotto fino a circa 0.1 mm. Le polveri impiegate nel processo EBM, sono polveri metalliche fatte da particelle sferiche con un diametro che va da 45 μm a 150 μm [18].

Nella parte sottostante della macchina avviene la vera e propria costruzione del pezzo. La polvere metallica viene distribuita in strati tramite l'uso di una racla, che preleva la polvere dai contenitori presenti su entrambi i lati della piattaforma di costruzione. La racla controlla che lo strato depositato sia di spessore uniforme, perché disomogeneità nello spessore dello strato di polvere potrebbero portare a zone che non vengono fuse correttamente.

Lo spessore tipico di uno strato di polvere va da 0.05 mm a 0.2 mm e viene controllato abbassando la piattaforma di costruzione della quantità pari allo strato che si vuole realizzare. Lo spessore dello strato dipende sostanzialmente dalla polvere che si sta adottando nella costruzione.

Il processo di costruzione avviene in un ambiente in cui è creato il vuoto spinto, tramite una pompa turbomolecolare e compressori rotativi. La pressione del gas residuo nelle macchine EBM della Arcam è di circa 10⁻³ Pa per la camera di lavoro e 10⁻⁵ Pa per il cannone di elettroni [16]. Il vuoto realizzato in macchina ha molte funzioni. La principale è che le molecole di gas potrebbero operare una deviazione del fascio di elettroni, che non andrebbero più a colpire

12

lo strato di polvere nel punto desiderato, limitando di fatto la precisione della macchina [3]. Un ulteriore vantaggio derivante dal fatto che l'intero processo viene realizzato il sottovuoto spinto è che durante le fasi di fusione o sinterizzazione delle polveri si evita la formazione di ossidi. Questo, di fatti, consente di riutilizzare la polvere già impiegata in altri lavori di produzione, poiché questa non perde le sue caratteristiche [16].

Durante il processo di costruzione, nella camera di lavoro, viene insufflato Elio alla pressione di 10⁻¹ Pa. L'insufflaggio di Elio nella fase di produzione ha il compito di prevenire la formazione di cariche elettrostatiche nella polvere e garantire la stabilità termica del processo [19].

In Figura 2.5 è riportato uno schema che rappresenta le varie fasi del processo produttivo.



Figura 2.5 Schema processo di produzione; fonte [3]

Questo comincia con un preriscaldamento della piattaforma di costruzione. Questo preriscaldamento, oltre che a far salire la temperatura della camera di lavoro, è necessario a sinterizzare la polvere che circonda la piattaforma di costruzione. A differenza di altre tecniche, nelle quali la piattaforma di costruzione viene fissata tramite viti o sistemi di blocco appositi, nella macchina EBM la piattaforma di costruzione viene semplicemente appoggiata su un letto di polvere. La fase di preriscaldamento, quindi, oltre che a riscaldare l'ambiente di costruzione, è necessaria per fissare in maniera opportuna la piattaforma di costruzione e darle stabilità, in modo da evitare eventuali spostamenti della stessa che possono realizzarsi quando la racla passa sulla piattaforma distribuendo i successivi strati di polvere [15]. La temperatura alla quale deve essere portata la piattaforma di costruzione, prima che il primo strato di polvere venga depositato, viene stabilità in funzione del materiale da produzione che verrà impiegato [20]. I primi strati depositati vanno a formare la base del pezzo. Questi possono essere realizzati sotto forma di una solida base o come struttura reticolare che funge da vera e propria base di supporto per la costruzione del pezzo vero e proprio.

Dopo il preriscaldamento della piattaforma di costruzione, avviene la deposizione del primo strato di polvere, ma prima di avviare la fusione vera e propria viene effettuata una fase di preriscaldamento dello strato di polvere appena depositato, portando la polvere allo stato sinterizzato. Questa fase di preriscaldamento della polvere si realizza tramite una serie di passaggi del fascio defocalizzato ad alta velocità e potenza (circa 15000 mm/s e 30 mA di corrente) [18].

Dopo la fase di preriscaldamento avviene la vera e propria fusione della sezione del pezzo. Il fascio di elettroni, guidato da un computer che segue il CAD del pezzo, fonde solamente quella porzione dello strato di polvere necessaria alla realizzazione del pezzo. La potenza e la velocità del fascio di elettroni vengono ridotte nella fase di fusione del pezzo [3]. Inoltre, la macchina è in grado di mantenere attive contemporaneamente più pozze di fusione, grazie al fatto che il fascio di elettroni è in grado di muoversi alla velocità di 8000 m/s sulla tavola di costruzione [21]. Tale strategia di fusione viene identificata come MultiBeam[®].

Avvenuta la fusione della porzione desiderata, nuovamente la macchina effettua una serie di passaggi del fascio di elettroni defocalizzato sulla sezione appena solidificata. Questa costituisce la fase di post riscaldamento. Le fasi di preriscaldamento e di post riscaldamento della zona di fusione sono necessarie per ridurre il gradiente di temperatura nelle zone circostanti la pozza di fusione. Sono inoltre necessarie per ridurre le tensioni dovute al ritiro dimensionale, distorsioni nella fase di raffreddamento del pezzo, tensioni residue e formazione di fasi di non equilibrio che potrebbero condurre alla formazione di cricche in materiali sensibili [21].

Il fatto che la polvere che circonda la sezione solida venga leggermente sinterizzata con i trattamenti di preriscaldamento e post riscaldamento consente un impiego di supporti ridotto rispetto alle altre tecniche a letto di polvere (SLM).

Conclusa la fase di produzione del componente, questo viene lasciato in macchina a raffreddare, con tempi variabili che vanno da alcune ore a decine di ore, insufflando in camera di lavoro Elio ad una pressione leggermente superiore a quella adottata durante la produzione. Questo viene insufflato per consentire il raffreddamento del pezzo. Il tempo di raffreddamento varia in funzione della dimensione del pezzo. L'impiego di tempi di raffreddamento maggiori si sceglie sia per consentire una maggiore crescita del grano cristallino da un lato, sia per rilassare eventuali tensioni interne al pezzo ma anche per evitare distorsioni del pezzo a causa di eventuali ritiri dimensionali [21].

Alla fine della produzione si estrae dalla macchina un blocco compatto di polvere sinterizzata che contiene al suo interno i pezzi prodotti. La polvere che circonda questi pezzi è semplice da rimuovere; infatti basta effettuare una semplice operazione di sabbiatura. La sabbiatura si effettua in un'apposita macchina, utilizzando la polvere stessa impiegata per la produzione, denominata "Arcam Powder Recovery System" o PRS. In questo modo, tutta la polvere che si rimuove, quella che non è stata fusa ma parzialmente sinterizzata, può essere impiegata nuovamente per le successive fasi di produzione, dopo un'opportuna fase di setacciatura tramite apposite siviere. Questo è possibile, come già detto in precedenza, grazie al fatto che il contenuto di ossigeno nella polvere, e quindi il grado di ossidazione della stessa, è veramente basso [17].

Come evidente dalla descrizione del processo produttivo, la tecnica EBM coinvolge numerosi meccanismi fisici, come anche mostrato in Figura 2.6. Questi sono meccanismi estremamente complessi, a causa dell'elevata velocità di movimento del fascio di elettroni e dell'elevata velocità con la quale avvengono i cambiamenti di fase nella zona di fusione. La maggior parte di questi sono relativi all'interazione tra fascio elettronico e letto di polvere. Quando gli elettroni colpiscono lo strato di polvere, infatti, la maggior parte dell'energia cinetica posseduta da essi viene convertita in energia termica che fonde, sinterizza o fa evaporare la polvere



tronico-polvere; fonte: [3]

metallica [22]. La restante parte di energia viene trasformata in radiazioni ed elettroni secondari che lasciano la polvere [3].

L'interazione elettrone-polvere coinvolge sostanzialmente quattro fenomeni: la diffusione delle particelle metalliche, la sinterizzazione delle particelle, la fusione delle particelle e l'evaporazione di alcuni elementi della lega [3].

La diffusione delle particelle metalliche avviene come in un'esplosione. Questa diffusione di particelle può essere causata sostanzialmente da tre fenomeni [23]:

- Residui d'acqua o umidità nella polvere, che può evaporare in maniera esplosiva quando il fascio di elettroni colpisce la polvere;
- Il momento trasferito dagli elettroni, che è più grande della forza di coesione tra le particelle di polvere;
- Una carica elettrostatica negativa acquisita dal letto di polvere, che genera una forza repulsiva che è molto più grande del peso di una singola particella di polvere.

Per ognuno di questi problemi, si fa ricorso a specifici accorgimenti, utili a limitarne gli effetti negativi.

L'umidità nella polvere può essere presente per diverse ragioni: la prima è senza dubbio legata al processo tramite il quale viene prodotta la polvere stessa; producendo quindi la polvere tramite gas atomizzazione, si riesce a ridurre notevolmente la presenza di acqua presente nella polvere. Un'altra sorgente di umidità può essere legata all'umidita catturata dalla polvere stessa durante la fase di riempimento dei serbatoi di polvere della macchina. Questa viene rilevata nelle fasi inziali del processo di produzione, quando, creando il vuoto nella macchina, si nota ad un certo punto in aumento della pressione, legato all'evaporazione dell'acqua presente nella polvere. Per porre rimedio a questo problema si può preriscaldare la polvere nella camera a vuoto, in modo da eliminare totalmente tutta l'umidità presente [23].

Se il momento trasferito dagli elettroni dovesse essere tanto elevato da causare la diffusione delle particelle, quello che si può fare è utilizzare polvere dal diametro superiore [3].

Una ulteriore causa di diffusione della polvere è legata alla carica elettrostatica acquisita da questa. La carica elettrostatica è dovuta al fatto che gli elettroni emessi dal cannone irradiano le particelle di polvere, che si caricano negativamente, respingendosi a vicenda [23]. La diffusione delle particelle in camera di costruzione può essere evitata andando ad effettuare il preriscaldamento della polvere. Con il preriscaldamento, infatti, si sinterizzano parzialmente le particelle di polvere, facendo in modo che la massa globale aumenti, ed evitando dunque lo spargimento di particelle. La sinterizzazione delle particelle è il risultato del calore fornito a queste durante la fase di preriscaldamento della polvere e di fusione.

La quantità di calore trasferito alla polvere dipende da diversi parametri: la potenza del fascio, la dimensione di fuoco del fascio e la velocità di scansione, ossia con quale velocità il fascio viene fatto muovere sulla piattaforma di costruzione.

Durante la fase di preriscaldamento, in genere, il letto di polvere viene riscaldato in maniera uniforme utilizzando un fascio defocalizzato ad alta energia e ad alta velocità. Il risultato di questa fase di preriscaldamento è una parziale sinterizzazione delle particelle di polvere che riducono la distanza tra loro. Altro effetto della sinterizzazione è la formazione di ponti di collegamento tra le varie particelle di polvere [24], come mostrato in Figura 2.7. Questi ponti creano coesione tra le particelle di polvere, aiutando di fatto a prevenire la diffusione nella camera di lavoro.



Figura 2.7 Ponte fra le particelle di polvere; fonte: [24]

Un'ulteriore sinterizzazione della polvere si realizza nella zona circostante la pozza di fusione, dovuta al trasferimento di calore dalla pozza di fusione alla polvere che la circonda, ma questo fenomeno verrà meglio analizzato successivamente nel paragrafo 3.2 [3].

Incrementando la quantità di energia fornita alla polvere e, ad esempio, riducendo la velocità di scansione e la dimensione di fuoco del fascio di elettroni, si ottiene la fusione della polvere

metallica che va in questo modo a formare la così detta pozza di fusione. La presenza della fase liquida porta ad una rapida sinterizzazione della polvere, poiché il trasporto di massa si può realizzare tramite un mezzo liquido. In aggiunta, poiché il metallo fuso bagna la polvere circostante, si genera tensione superficiale, che porta ancora più polvere dentro la pozza di fusione [3]. Come conseguenza il fenomeno di fusione della polvere lungo la traiettoria del fascio di elettroni è legato soprattutto al controllo del materiale fuso, che a sua volta è legato alla bagnabilità del metallo fuso nei confronti del metallo solido.

Se l'energia fornita alla polvere è troppo alta, si assiste all'evaporazione di alcuni elementi della lega di cui è composta polvere [19]; inoltre, il fatto di lavorare nel vuoto, abbassa la tensione di vapore, causando l'evaporazione degli elementi della lega più leggeri. Per questa ragione, le parti prodotte e la polvere riciclata potrebbero presentare una quantità di elementi in lega inferiore rispetto a quelli della lega originale [17].

3. LA RUGOSITÀ SUPERFICIALE E LA RUGOSITÀ NEI PEZZI PRODOTTI TRAMITE EBM

In questo capitolo sarà descritto nel dettaglio cosa si intende per rugosità superficiale e che rugosità si ottiene nei pezzi prodotti tramite Electron Beam Melting. Sarà inoltre presentata un'analisi della letteratura esistente al fine di comprendere le cause della rugosità dei pezzi prodotti tramite EBM.

3.1 La rugosità¹

Prima di procedere con la descrizione della rugosità, è utile comprendere cosa sia la metrologia superficiale. La metrologia superficiale è quella scienza che si occupa di valutare la deviazione di un pezzo dalla forma ideale, indicata dal progettista nel disegno.

Questa quindi include, da un lato la misura di caratteristiche quali planarità, concentricità, sfericità, quindi tutte le grandezze relative alle tolleranze dimensionali, ma include anche la misura delle caratteristiche superficiali, ed essendo la rugosità una di queste caratteristiche, si capisce come questa venga analizzata in maniera approfondita dalla metrologia superficiale.

In generale, comunque, possono essere individuate fondamentalmente tre cause di irregolarità superficiale in un pezzo:

- 1) Rugosità: Irregolarità in genere legate al processo produttivo.
- Ondulazione: Onde di lunghezza d'onda notevole, dovute a lavorazioni non correttamente effettuate.
- Errori di forma: Onde con lunghezza d'onda molto ampia causate da errori nelle guide della macchina, nelle sue parti rotanti o dovute a deformazioni di tipo termico del pezzo prodotto.

La rugosità superficiale, quella che delle tre ci interessa approfondire maggiormente, come sopra menzionato, è quella parte di irregolarità sulla superficie del pezzo lasciate dalla lavorazione durante la rimozione di materiale o a valle di un processo fusorio ed include anche difetti come microfratture, difetti legati agli angoli di costruzione degli utensili e tutti gli eventuali segni lasciati dagli utensili.

¹ Per la parte sulla rugosità si fa riferimento al testo [25].

In Figura 3.1 è rappresentato un confronto tra il disegno e il pezzo realmente realizzato, dal quale risultano evidenti la rugosità e l'ondulazione.



Figura 3.1 Deviazione geometrica dal profilo ideale; fonte: [25]

Qualora la superficie del pezzo fosse caratterizzata dalla presenza di tracce lasciate dall'utensile e ripetute, la rugosità viene in genere misurata trasversalmente alla direzione del motivo superficiale predominante e si fa ricorso a metodi diversi per effettuare la misura: microscopi ottici ed elettronici per misurare la rugosità della superficie del pezzo, strumenti a contatto diretto, come i rugosimetri, adottati per analizzare la rugosità di una sezione normale alla superficie del pezzo e interferometria ottica adottata per analizzare la rugosità di una sezione obliqua alla superficie del pezzo.

La misura di rugosità superficiale copre un vasto campo, andando dalla valutazione di superfici prodotte con macchine cha hanno una corsa trasversale di 20 mm alla valutazione di superfici lavorate con la più fine delle lappature, che lasciano dei segni di alcuni micrometri.

La procedura di misura della rugosità genera una rappresentazione della superficie tramite un grafico del profilo, rappresentazione molto utile nel rappresentare molte delle caratteristiche della superficie del pezzo.

Quando, tuttavia, si analizza un grafico del profilo, occorre fare attenzione alle scale di rappresentazione utilizzate. Infatti, per rappresentare nello stesso grafico quante più informazioni possibili, si ingrandisce in genere un asse piuttosto che un altro (in particolare si ingrandisce l'asse verticale molto più di quello orizzontale), come riportato in Figura 3.2

Utilizzando una scala di ingrandimento diversa, tuttavia, occorre tenere presente il fatto che il profilo rappresentato differisce di fatto da quello reale, ricordando che quelli che possono sembrare fragili picchi o strette valli, in realtà possono rappresentare un lieve ondulamento della superficie.



Figura 3.2 Grafico del profilo con due ingrandimenti diversi (i numeri rappresentano il valore dell'ingrandimento); fonte: [25]

Poiché, di fatto, il grafico del profilo è la base sulla quale è stata costruita l'intera metrologia della superficie [25] conviene analizzarlo e definirne le caratteristiche principali, utili a effettuare le misure necessarie al proseguimento di questo lavoro.

In Figura 3.3 è riportato un tipico grafico del profilo rappresentato da una funzione del tipo: z = f(x) e che potrebbe essere stata ottenuta con qualunque tipo di strumento, ma che rappresenta sostanzialmente una forma d'onda.



Figura 3.3 Tipico esempio di profilo superficiale; fonte: [25]

La maniera più semplice di guardare a questa forma d'onda è di considerarla come fatta da caratteristiche di ampiezza e di lunghezza d'onda, entrambe indipendenti l'una dall'altra. Occorre quindi definire un numero minimo di grandezze necessarie a specificare adeguatamente entrambe le caratteristiche della forma d'onda.

Una prima grandezza importante e necessaria a definire le caratteristiche del profilo è la lunghezza di campionamento (o cut-off length). Questa è definita come la lunghezza di prova mediante la quale la misura di rugosità può essere considerata come caratteristica dell'intera superficie. Questa lunghezza, di fatto è un compromesso tra due diverse situazioni: da un lato deve essere sufficientemente lunga da ottenere una rappresentazione statisticamente buona della superficie, d'altro canto non deve essere eccessivamente lunga per non prendere in considerazione anche altri fenomeni, come ad esempio l'ondosità.

Ad oggi si adotta il termine cut-off length al posto del termine lunghezza di campionamento, perché questo termine indica anche la lunghezza depurata dai filtri per sfumare la lettura.

Alcuni strumenti nell'effettuare la misura, in genere considerano più di una lunghezza di campionamento e alcune parti della lunghezza della corsa effettuata dallo strumento vengono scartate per ragioni meccaniche o di filtro. In genere, si sceglie una lunghezza di cut-off pari a 0.8 mm, considerando una lunghezza di valutazione pari a cinque lunghezze di cut-off, anche se esiste una apposita normativa che riporta quali lunghezze adottare per effettuare la misura di rugosità.

Per chiarire le lunghezze utilizzate si riporta in Figura 3.4 una rappresentazione di lunghezza di cut-off e lunghezza di valutazione.



Una volta definite queste grandezze si può procedere all'analisi dei parametri utili alla descrizione dei parametri di ampiezza.

Il valore dell'ampiezza è quello che poi di fatto andrà a definire quanto una superficie sia rugosa e la sua misura fornisce una valutazione oggettiva della rugosità della superficie.

La prima maniera e anche la più ovvia di misurare l'ampiezza del profilo è quella di considerare, come mostrato in Figura 3.5, l'ampiezza come differenza tra l'altezza del picco più alto e la profondità della valle più bassa di tutta la lunghezza del profilo considerato. Questa grandezza è indicata come R_t .

Figura 3.5 Parametro di picco: R_t; fonte: [25]

Una grandezza simile a quella appena presentata, ma più significativa è R_z di cui in Figura 3.6 è riportata una rappresentazione

La formula per il calcolo di R_z è riportata nell'equazione (3.1)



Figura 3.6 Parametro di picco: R_z; fonte: [25]

$$R_{z} = \frac{P_{1} + P_{2} + P_{3} + P_{4} + P_{5} - (V_{1} + V_{2} + V_{3} + V_{4} + V_{5})}{\sum_{i=1}^{5} P_{i} - \sum_{i=1}^{5} V_{i}}$$
(3.1)

Di fatto il parametro R_z si calcola come la media della differenza di altezza tra i cinque picchi più elevati e le cinque valli più profonde. La ragione per la quale si considera la media è minimizzare l'effetto di picchi o valli che non rappresentano di fatto il reale profilo analizzato e che possono portare ad un'errata valutazione della rugosità.

Un altro modo di evitare errori nella valutazione della rugosità è quello di adottare il Rautiefe, del quale in Figura 3.7 è riportata una rappresentazione.



Figura 3.7 Parametro di picco Rautiefe; fonte: [25]

Questo parametro, in pratica, è la distanza tra due linee parallele che attraversano il profilo, in modo tale che la linea superiore incontri metallo per il 5% del suo percorso e l'inferiore incontri metallo per il 95% del suo percorso. Con questo parametro, di fatto si comincia a fare una certa valutazione statistica, ma questo, di fatto, soffre del problema che non è di così immediata misurazione come potrebbero invece essere i parametri R_t ed R_z precedentemente presentati. Un parametro leggermente differente da quello appena rappresentato è il parametro R_p di cui è fornita una rappresentazione in Figura 3.8



Figura 3.8 Parametro di picco R_p ; fonte: [25]

Questo parametro può essere definito come l'altezza del picco più elevato, misurata rispetto ad una linea media posizionata, secondo il principio delle aree equivalenti, sulla meta del profilo in maniera tale che l'area del profilo al di sotto della linea sia equivalente all'area al di sopra della linea.

Un ultimo parametro, in grado di descrivere, forse meglio degli altri la rugosità è indicato come R_{tm} e si definisce secondo l'equazione (3.2)

$$R_{tm} = \frac{\sum_{i=1}^{5} R_{ti}}{5} \tag{3.2}$$

 R_{tm} è quindi definito come la media degli R_t misurati in cinque intervalli adiacenti.

Per incrementare ulteriormente l'affidabilità della misura di rugosità, occorre fare ricorso non solo ai picchi o alle valli più elevati presenti all'interno della lunghezza di valutazione, come fatto nel valutare i parametri fin qui presentati, ma occorre fare ricorso all'intera lunghezza di valutazione. Il parametro che ad oggi viene più utilizzato per fornire le misure di rugosità è R_a una cui rappresentazione è fornita nella Figura 3.9.



Figura 3.9 Parametri medi: $R_a \in R_q$; fonte: [25]

Il parametro R_a è definito come la deviazione media del profilo rispetto ad una linea di riferimento, la quale costruzione verrà meglio definita successivamente nel paragrafo.

Dunque, se z = f(x) è il profilo misurato rispetto alla linea media di riferimento e L è la lunghezza del profilo testato (che può essere considerata pari alla lunghezza di valutazione), allora R_a può essere definito dalla relazione riportata nell'equazione (3.3)

$$R_a = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L |z| \, dx \tag{3.3}$$

Un altro parametro evidenziato ancora in Figura 3.9 è R_q . Questo è definito come deviazione della radice quadratica media (RMS) ancora dalla linea di riferimento. La definizione matematica è riportata nell'equazione (3.4)

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \cdot \int_0^L z^2 \, dx} \tag{3.4}$$

Nonostante R_q sia statisticamente più rappresentativo del parametro R_a , è più complicato misurarlo graficamente.

Come messo in evidenza da quanto fin qui detto, molti dei parametri sopra citati dipendono dalla definizione di una linea di riferimento. Questa linea di riferimento deve avere una ben definita posizione in altezza rispetto alla rugosità del profilo, deve avere una ben definita forma e deve avere una ben definita lunghezza.

Per quanto riguarda la lunghezza, questa può essere pari alla lunghezza di campionamento, anche se in genere è presa pari alla lunghezza di valutazione. Per decidere quanto lunga deve essere la lunghezza di campionamento si può utilizzare il criterio empirico, che nel caso di marcature periodiche sulla superficie del pezzo, consiglia di considerare una lunghezza di campionamento che includa almeno dieci marcature.

Nel caso di marcature non periodiche, invece, occorre fare ricorso ad altri metodi, o comunque ricorrere a lunghezze di campionamento standardizzate, riportate in Tabella 3.1

R _a	Lunghezza di campionamento	Lunghezza di valutazione
μm	mm	mm
0.006< <i>R</i> _a ≤0.02	0.08	0.4
$0.02 < R_a \le 0.1$	0.25	1.25
0.1< <i>R</i> _a ≤2	0.8	4
2< <i>R</i> _a ≤10	2.5	12.5
10< <i>R</i> _a ≤80	8	40

Tabella 3.1 Lunghezza di campionamento indicata per la misura di R_a e R_q nel caso di profili non periodici; fonte [25]

Una volta stabilita la lunghezza di campionamento da adottare, occorre definire la forma e la posizione rispetto al profilo della linea di riferimento.

Per quanto riguarda la forma, la scelta più semplice che si possa fare è quella di considerare una linea retta, sebbene sia possibile impiegare anche altre forme, quali ad esempio equazioni polinomiali o curve di qualunque genere.

In fine, in merito alla posizione, questa potrebbe essere posizionata, come detto in precedenza, in modo che la linea di riferimento divida in due parti l'area del profilo, come già spiegato per il calcolo del parametro R_p . Resta però il problema di determinare di fatto l'inclinazione di questa retta rispetto al profilo, perché questa può soddisfare il criterio delle aree equivalenti, occupando diverse posizioni. Occorre quindi fare ricorso ad un criterio oggettivo che consenta di definire in maniera univoca la posizione della retta di riferimento.

Il criterio comunemente adottato dice che se il valore della *z* come funzione di *x* valutata sul grafico è comparata con il valore rispetto ad una linea ideale *z*' alla stessa *x* allora il problema è minimizzare la somma S_{μ} definita secondo l'equazione (3.5)

$$S_u = \int_0^L (z - z')^2 dx$$
 (3.5)

A rigore la direzione di misura della distanza dovrebbe essere normale alla direzione della linea ideale e quindi la distanza andrebbe calcolata come $z \cdot \cos \alpha - z' \cdot \cos \alpha$, dove α rappresenta l'anglo di inclinazione della retta ideale rispetto alla direzione orizzontale. Quindi la differenza da minimizzare diventa S'_{μ} definita dall'Equazione 3.6:

$$S'_{u} = \int_{0}^{L} (z - z')^{2} \cdot \cos \alpha^{2} dx$$
 (3.6)

Sostituendo a z' l'espressione di una retta generica del tipo z' = mx + c e risolvendo si riescono ad ottenere i parametri necessari alla determinazione della linea ideale di riferimento, mostrati nella Figura 3.10.



Figura 3.10 Parametri relativi alla linea ideale di riferimento; fonte: [25]

3.2 La rugosità nei pezzi prodotti tramite EBM

I pezzi prodotti tramite la tecnica EBM sono in genere caratterizzati da una rugosità superficiale R_a che va da 20 μm a 50 μm [26]. Questo è un valore piuttosto elevato, anche se non sempre valori di rugosità così elevati sono negativi: occorre valutare di fatto il campo nel quale il componente finale verrà impiegato e le caratteristiche che si richiedono a quel componente.

In campo biomedicale si realizzano tramite EBM protesi ortopediche e dentali. Molto importante, in questo caso, è come il metallo influenza il materiale circostante e come viene influenzato dal materiale biologico che lo circonda. Le proprietà, la chimica, l'energia, la topografia e la rugosità della superficie influenzano infatti la prima risposta delle cellule all'interfaccia tra materiale biologico e metallico, influenzando di fatto la quantità e la qualità del nuovo tessuto che si andrà a formare [27]. In questo caso quindi, la rugosità non è un male, ma poiché le cellule umane sono sensibili anche a piccolissime variazioni della rugosità superficiale, occorre che questa venga ben controllata [27].

In campo aeronautico, la tecnica EBM trova impiego prevalentemente nella realizzazione di pale per turbine. In questo caso risulta di fondamentale importanza che la rugosità delle pale sia molto bassa, con valori di R_a di circa 1.5 μm [28]. La tecnica EBM non è in grado di raggiungere valori di rugosità superficiale così bassi. Occorrerà quindi pensare a un procedimento che consenta la finitura del componente a valle della realizzazione.

Dagli esempi sopra riportati, che non sono esaustivi di tutti i campi di applicazione della tecnica EBM, risulta evidente come di fatto non sia essenziale ottenere dei pezzi che presentano una bassa rugosità superficiale, quanto piuttosto comprendere a fondo quali siano i parametri e le ragioni che conducono alla rugosità superficiale dei pezzi prodotti tramite EBM. In questo modo, infatti, una volta compreso quali siano i meccanismi che governano la rugosità, si può pensare di modificare quei parametri ed operare di fatto un controllo della rugosità.

Come messo in luce dalle conclusioni del lavoro [29], numerosi sono i parametri che hanno peso sulla rugosità che si ottiene nei pezzi prodotti tramite EBM. Una delle principali cause di rugosità è senza dubbio la polvere sinterizzata e attaccata alla superficie del pezzo prodotto. Durante il processo di produzione, infatti, la polvere disponibile sullo strato è molta di più di quella che occorre di fatto per la produzione vera e propria. In genere, quindi, la pozza di fusione è circondata da polvere non solidificata che viene parzialmente sinterizza per fenomeni conduttivi. Gli altri fattori che possono essere causa della rugosità superficiale sono la dimensione e la densità energetica della pozza di fusione prodotta dal fascio di elettroni nella zona di contorno del pezzo prodotto. La densità energetica della pozza di fusione $\rho\left(\frac{Ws}{m^3}\right)$ è calcolabile in base alla relazione riportata nell'equazione (2.7), dove "*P*" rappresenta la potenza del fascio, "*S*" rappresenta la velocità di scansione, "t" rappresenta lo spessore dello strato di polvere aggiunto (espresso in mm) e "h" è l'"hatch distance", ovvero da distanza tra due tracce di fusione adiacenti (espressa in mm).

$$\rho = \frac{P}{S \cdot t \cdot h} \tag{2.7}$$

Sulla superficie del pezzo, quindi, la pozza di fusione si comporta, di fatto, come una sorgente di calore che favorisce la sinterizzazione. Il calore della pozza è sufficiente a sinterizzare anche diversi strati di metallo. Quindi più è alta l'energia della pozza, maggiore sarà la quantità di polvere che viene sinterizzata sulla superficie del pezzo e questo, ovviamente conduce ad una maggiore rugosità superficiale. Una maggiore energia della pozza di fusione, inoltre, conduce ad una struttura ondulata con picchi e valli più grandi, che contribuiscono significativamente al valore della rugosità.

Un'elevata rugosità derivante dalla produzione con un'elevata corrente di fascio, una bassa velocità di scansione e una bassa distanza di messa a fuoco, può essere tranquillamente spiegata pensando ancora al concetto di energia della pozza di fusione. Sfruttando questi parametri, infatti, non si fa altro che aumentare l'energia della pozza di fusione e quindi aumentare la quantità di polvere che sinterizza sulla superficie del pezzo.

Un altro parametro che influisce negativamente sulla rugosità del pezzo è lo spessore della sezione. Tanto più elevata è la sezione che deve essere solidificata, tanto maggiore sarà il calore accumulato dal pezzo, tanta di più sarà la polvere che rimane sinterizzata sulla super-ficie del pezzo, incrementando quindi la rugosità superficiale.

Si vede quindi come i parametri di processo adottati nella costruzione e lo spessore della sezione che si va solidificare siano grandezze di fondamentale importanza nel definire la rugosità del pezzo ottenuto alla fine del processo di produzione.

Oltre ai parametri riportati in quanto precedentemente detto, un'altra grandezza che fa aumentare i livelli di rugosità è la dimensione delle particelle di polvere. In linea generale, infatti, più piccole sono le particelle, più piccolo può essere lo spessore dello strato, minore sarà quindi l'effetto scalino che si realizza sulla superficie [30]. Ovviamente nel caso dell'EBM la dimensione delle particelle non può essere troppo piccola, altrimenti si incorrerebbe nel fenomeno della diffusione delle particelle nella camera di lavoro, secondo quanto spiegato in precedenza nel paragrafo 2.3, ma le particelle devono avere un diametro minimo ben definito. Questa è una delle ragioni per cui i pezzi prodotti tramite SLM, che è una tecnica che non presenta il problema del diametro minimo delle particelle, presentano un minore effetto scalino e una rugosità superficiale più bassa.

Un'altra caratteristica della produzione tramite EBM è che la rugosità superficiale può essere differente a seconda che la superficie analizzata sia rivolta verso l'alto o verso la piattaforma di costruzione. Questo fenomeno può essere spiegato notando il fatto che sulla superficie rivolta verso il basso si vengono a creare delle tracce, che fanno aumentare parecchio la rugosità superficiale e che sulla superficie rivolta verso l'alto non sono presenti [31].

Un ulteriore parametro che può influenzare la rugosità superficiale è il numero di contorni impiegati per la solidificazione della sezione. Quando viene solidificata una sezione del pezzo, infatti, la macchina divide quella particolare sezione in due parti: il contorno e la porzione interna. La prima parte che la macchina fonde è proprio il contorno; in genere per fondere questo si adotta una velocità di scansione inferiore rispetto alla velocità adottata per fondere la restante sezione. Successivamente la macchina procede alla fusione della parte interna del pezzo. Il contorno, quindi, costituisce l'interfaccia tra il materiale solido e la polvere. Agendo sui parametri macchina impiegati nella realizzazione del contorno sarebbe quindi possibile andare ad ottenere una superficie esterna con rugosità inferiore [29]. La macchina nel tema base, che adotta la tecnologia MultiBeam® per la fusione dei contorni ed un layer alto 70 µm, realizza tre contorni: il primo, quello più esterno, viene realizzato facendo muovere il fascio di elettroni a bassa velocità ed impiegando una corrente di fascio bassa, mentre i restanti due contorni, più interni, vengono fusi utilizzando più energia, il che accelera il processo di produzione [26].

3.3 Analisi della letteratura

Volendo comprendere effettivamente quali studi siano già stati effettuati sulla rugosità superficiale dei pezzi prodotti tramite fabbricazione additiva, quali siano i risultati ottenuti e quali siano i limiti, eventualmente presenti, si è effettuata un'analisi della letteratura attualmente esistente.

Uno studio notevole sulla rugosità superficiale dei pezzi prodotti tramite EBM è stato effettuato da Safdar et al. [29]. In questo lavoro l'attenzione è stata focalizzata prevalentemente sull'effetto che ha la variazione dello spessore della parte e la variazione dei parametri di costruzione sulla rugosità superficiale che si ottiene.

Per condurre tali analisi sono stati realizzati sulla piattaforma di costruzione dei parallelepipedi di 50mm x 55mm, ma di differente spessore. Questi parallelepipedi sono poi stati replicati variando la velocità di scansione, la corrente del fascio e il focus offset. Il materiale impiegato, in questo caso, è stato il Ti6Al4V, processato tramite una macchina Arcam S12 EBM. In Figura 3.11 è rappresentato il set di provini impiegati per effettuare l'analisi.



Figura 3.11: Benchmark impiegato da Safdar et Al. per effettuare le analisi di rugosità; Fonte [29]

L'analisi dei dati sperimentali mostra che lo spessore dei parallelepipedi, così come anche i parametri di processo adottati nella produzione, hanno un forte effetto sulla rugosità superficiale. In particolare, la rugosità superficiale aumenta al crescere dello spessore della parte e al crescere della corrente del fascio, mentre diminuisce al crescere della distanza di fuoco e della velocità di scansione [29].

Un altro studio sulla rugosità superficiale che si ottiene dal processo EBM è stato effettuato da Jamshidinia e Kovacevic [31]. In questo caso è stata posta l'attenzione sulla rugosità superficiale dovuta alla presenza di zone molto calde all'interno della sezione del pezzo. Per studiare tale fenomeno è stato impiegato, anche in questo caso, un set di parallelepipedi di dimensioni 100 mm x 100 mm x 1mm e distanziati tra loro di una distanza diversa: 5mm, 10 mm o 20 mm. Tali componenti sono stati realizzati in Ti6Al4V tramite una macchina EBM, del quale tuttavia non viene specificato il modello. Una rappresentazione schematica dell'apparato sperimentale è riportata in Figura 3.12.


Figura 3.12: Apparato sperimentale impiegato da Jamshidinia et Kovacevic; fonte: [31]

I risultati ottenuti da Jamshidinia e Kovacevic mettono in luce come, effettivamente, la rugosità superficiale sia fortemente legata alla presenza di zone di accumulo del calore, dovute non solo alla geometria del componente in lavorazione, ma anche alla distribuzione dei pezzi sulla piattaforma di costruzione. Infatti, i risultati sperimentali hanno evidenziato una correlazione inversa tra la distanza tra le superfici e la rugosità superficiale.

Lo studio condotto da Klingvall et al. [26] si concentra invece sui parametri di processo, ovvero viene condotto uno studio sulla rugosità superficiale che si genera andando a variare i principali parametri di processo impiegati nella produzione. Anche in questo caso la valutazione della rugosità è stata effettata prendendo in considerazione un semplice artefatto, ovvero un medaglione, del diametro di 29 mm e dello spessore di 2 mm. Per condurre questo studio sono stati realizzati più set di provini, ognuno dei quali realizzato da un diverso operatore e con diversi parametri macchina. In particolare, i parametri tenuti in considerazione nella costruzione di questi provini sono stati: numero di contorni, distanza tra i contorni, la combinazione di velocità e corrente nel realizzare i contorni e il "line offset" ovvero il parametro che controlla di quanto si sposta la traccia del fascio energetico rispetto al layer sottostante.

In Figura 3.13 è riportata un'immagine dei provini impiegati per compiere le valutazioni sperimentali.



Figura 3.13: Provini impiegati per compiere le valutazioni sui parametri sperimentali; fonte: [26]

Lo studio condotto mette in luce come la combinazione dei parametri di costruzione più influente sulla rugosità superficiale sia quella di distanza tra i contorni e il parametro combinazione di corrente di fascio e velocità di scansione, mentre la combinazione di distanza tra i contorni e numero i contorni è, di fatto, poco influente sulla rugosità superficiale.

Un'analisi di carattere più generale è stata portata avanti da Townsend et al. [32]. In questo caso, infatti, sono stati pensati una serie di artefatti mirati a valutare non solo le caratteristiche di rugosità del processo, ma anche le caratteristiche dimensionali e di risoluzione.

In Figura 3.14 sono riportati gli artefatti impiegati in questo studio.



Figura 3.14: manufatti utili alla valutazione delle capacità produttive della macchina: a) AMSA 1; b) AMSA 3; c) AMSA 4; Fonte [32]

Il manufatto AMSA 1 di Figura 3.14 a) include tre superfici di misura: la prima è una superficie piana e serve a valutare la rugosità che si ottiene su superfici piane; la seconda superficie ha un'inclinazione di 1:25 e serve a valutare l'effetto della transizione da un layer ad un altro; in fine sono presenti una serie di cilindretti di altezza variabile, la cui altezza varia da un cilindro all'altro di una quantità pari ad un layer. Questi cilindri sono pensati per effettuare valutazioni sulla superficie rivolta verso l'alto ed indagare anche la porosità che il processo di costruzione genera.

Il manufatto AMSA 3, rappresentato in Figura 3.14 b), invece, presenta una serie di cave la cui dimensione cresce via via che ci si allontana radialmente dal centro. Questo manufatto è pensato per effettuare valutazioni circa la risoluzione del processo produttivo. Infatti, man mano che ci si avvicina al centro del provino la dimensione diametrale della cava si riduce, diventando sempre più difficile da realizzare.

Il manufatto ASMA 4 riportato in Figura 3.14 c), in fine, contiene tre superfici sinusoidali, di ampiezza constante e lunghezza d'onda decrescente. Questo artefatto è pensato per dare una indicazione visiva della risoluzione del processo.

I manufatti vengono realizzati in Ti6Al4V tramite una Arcam Q10. La produzione avviene orientando i manufatti sia orizzontalmente che verticalmente e distribuendoli in diverse parti del volume di lavoro, come riportato in Figura 3.15. A valle della produzione si effettua una tomografia computerizzata per effettuare un'analisi di deviazione e confrontare le caratteristiche con il modello CAD del pezzo.



Figura 3.15: disposizione in macchina dei manufatti prodotti tramite EBM; Fonte [32]

I manufatti sono stati anche realizzati tramite una macchina SLM Renishaw AM 250 utilizzando ancora lo stesso materiale, ovvero Ti6Al4V. La costruzione, in questo caso, avviene disponendo orizzontalmente i provini. Viene successivamente effettuata un'analisi di deviazione delle caratteristiche tramite una tomografia computerizzata. I risultati evidenziano in questo caso, per quanto riguarda la produzione tramite macchina EBM, notevoli differenze tra i pezzi prodotti orizzontalmente e verticalmente, in particolare alcune superfici presentano lacune in alcune zone del provino. Per quanto riguarda la produzione tramite SLM i risultati ottenuti mettono in evidenza come la macchina per SLM sia in grado di generare geometrie di qualità superiore.

Un ulteriore studio analizzato è stato quello condotto da Strano et al. in [33]. Nonostante la tecnica presa in esame in questo caso, così come il materiale processato, siano differenti da quelli impiegati in questo lavoro di tesi, è interessante l'obiettivo di questo lavoro, ovvero analizzare quale sia l'influenza dell'angolo di inclinazione della superficie sulla rugosità superficiale che si ottiene per i pezzi.

Per effettuare tali analisi, viene preso in esame un "truncheon", ovvero un componente che presenta superfici a diverse inclinazioni rispetto al piano orizzontale, con angoli che vanno da 0° a 90° con intervalli di 5°.



In Figura 3.16 è riportata un'immagine di questo componente.

Figura 3.16: "truncheon" Impiegato da Strano et al. per effettuare le misure di rugosità superficiale; fonte [33]

La geometria era già stata impiegata in precedenti studi [34][35][36] ma facendo ricorso a tecniche di produzione polimeriche e non metalliche; in particolare ,il pezzo era stato originariamente pensato per essere prodotto tramite la tecnica polimerica della stereolitografia. La scelta da parte di Strano et al. di fare ricorso ad un manufatto del genere è stata dettata dalla semplicità con la quale è possibile, una volta prodotto, andare ad effettuare le misure di rugosità.

Il provino è stato realizzato in acciaio 316L tramite la macchina SLM M270 del produttore EOS con l'asse principale del pezzo orientato parallelamente alla piattaforma di costruzione. La rugosità superficiale viene successivamente analizzata facendo ricorso ad un profilometro e a delle micrografie ottenute tramite microscopio a scansione. Le analisi di rugosità effettuate sui provini realizzati hanno come obiettivo lo sviluppo di un modello matematico che consenta di effettuare ipotesi sulla rugosità superficiale per una superficie inclinata di un certo angolo, ma soprattutto che tenga in considerazione la presenza di particelle parzialmente sinterizzate sulla superficie del componente e della presenza dell'effetto di "stair stepping" ovvero della presenza di gradini dovuti al processo di produzione vero e proprio.

Un'analisi approfondita della letteratura qui presentata consente di mettere in luce le seguenti carenze:

Lo studio condotto da Safdar et al. [29] ha senza dubbio il pregio di indagare dei fattori molto influenti sulla rugosità superficiale dei provini, quali lo spessore del componente e i parametri di processo impiegati nella produzione, tuttavia, trascura un fenomeno che ha particolare rilevanza sulla rugosità superficiale che si genera sulla superficie delle parti: viene trascurato l'effetto sulla rugosità dovuto all'accumulo di calore, fenomeno che si genera quando si posizionano all'interno del volume di lavoro della macchina delle superfici così vicine le une alle altre, che viene tenuto in considerazione da Jamshidinia e Kovacevic [31]. Un altro fenomeno, che è sicuramente molto influente sulla rugosità superficiale dei pezzi prodotti [37], ma del quale non si tiene conto è l'influenza dell'angolo di inclinazione della superficie sulla rugosità superficiale del pezzo. Infatti, sia il lavoro di Safdar et al. [29] che quello proposto da Jamshidinia e Kovacevic [31] analizzano delle superfici costruite in maniera verticale.

Inoltre, a differenza del lavoro presentato da Safdar et al. [29], in cui viene spiegato esattamente in quale posizione vengono costruiti le parti utilizzate per effettuare le analisi, nel lavoro di Jamshidinia e Kovacevic [31] nulla viene detto circa la posizione in cui avviene la costruzione delle parti e la direzione nella quale sono disposte le parti, rispetto alla direzione in cui viene distribuita la polvere. Questi due fattori hanno una forte influenza sulla rugosità superficiale, ma Jamshidinia e Kovacevic non considerano questi parametri nel loro lavoro [31].

Anche il lavoro condotto da Klingvall et al. [26] ignora l'effetto sulla rugosità superficiale dell'angolo di inclinazione delle superfici, concentrando l'attenzione prevalentemente sui parametri di processo. Questo lavoro, inoltre, trascura l'effetto sulla rugosità superficiale delle zone di concentrazione di calore, che hanno un effetto importante sulla rugosità superficiale [31]. I medaglioni, infatti, come mostrato in Figura 3.13, sono costruiti molto vicini tra loro,

lasciando solo qualche millimetro di distanza. Questo metodo di disposizione dei provini ha sicuramente effetto negativo sulla rugosità superficiale che si ottiene per i provini.

Il lavoro condotto da Townsend et al. [38], invece, ha il pregio di tenere in considerazione l'effetto che ha l'orientazione nello spazio del componente sulla rugosità superficiale, poiché questi vengono costruiti sia orizzontalmente che verticalmente, ma trascura ancora una volta l'effetto sulla rugosità superficiale delle zone di accumulo di calore. I componenti, infatti, vengono costruiti in prossimità delle barre verticali, impiegate per compiere studi sull'evoluzione delle proprietà nell'altezza del volume di lavoro, ma queste fungono da zone di accumulo di calore. In questo studio, inoltre non sono evidenziate le misure dei manufatti, rendendo di fatto impossibile la replicazione degli stessi.

Lo studio condotto da Strano et al. [33] ha anch'esso il pregio di analizzare l'effetto dell'inclinazione della superficie sulla sua rugosità, andando a considerare come componente utile ad effettuare le valutazioni quello presentato in Figura 3.16. Tuttavia, tale componente non è assolutamente ottimizzato per essere prodotto tramite la tecnica SLM. Infatti, la tecnica produttiva richiede che per superfici inclinate oltre un certo angolo siano impiegati dei supporti, che sono fondamentali per poter costruire di fatto queste superfici. Nel lavoro condotto da Strano et al. non si fa alcun riferimento alle superfici supportate e non viene inoltre reso noto in che modo vengono trattate le superfici rivolte verso la piattaforma, che presentano sicuramente del materiale di supporto.

Inoltre, il modello sviluppato per descrivere la rugosità superficiale, è del tutto inadeguato, poiché i dati sperimentali sul quale si basa, come visibile in Figura 3.17 sono poco dispersi.



Al. [33]

La scarsa dispersione dei dati sperimentali è indice del fatto che i parametri costruttivi impiegati hanno scarsa influenza sulla rugosità superficiale nella produzione tramite SLM.

Tenendo quindi in considerazione le lacune evidenziate nella letteratura esistente, in questo lavoro si vuole approfondire l'effetto che ha sulla rugosità superficiale l'inclinazione delle superficie analizzata rispetto alla piattaforma, fattore che viene totalmente trascurato in [26], [31], [39]. Altro parametro che si vuole indagare meglio è l'effetto che ha sulla rugosità superficiale la presenza di zone di accumulo di calore, effetto già messo in luce nel lavoro di Jamshidinia e Kovacevic [31] ma indagato in maniera isolata, perché, come già detto in precedenza, non si tiene conto di altri fattori quali ad esempio l'angolo di inclinazione della superficie. In fine, si vuole analizzare l'influenza che il verso della superficiale. Tale aspetto non è stato preso in esame da nessuno degli studi analizzati, sebbene sia ben nota l'influenza sulla rugosità superficiale.

Si riporta in Tabella 3.2 un elenco di tutti i lavori analizzati e le principali caratteristiche di tali lavori.

Autore	Materiale	Tecnica produttiva	Carattere analizzato
Safdar et al.	Ti6Al4V	EBM	Influenza spessore sulla rugosità super- ficiale
Jamshidinia e Kovace- vic	Ti6Al4V	EBM	Influenza delle zone di accumulo di calore sulla rugosità super- ficiale
Klingvall et al.	Ti6Al4V	EBM	Influenza dei para- metri di processo sulla rugosità super- ficiale
Townsend et al.	Ti6Al4V	EBM/SLM	Analisi qualitative della tecnica produt- tiva e influenza della posizione nel volume di lavoro sulla rugo- sità superficiale
Strano et al.	Acciaio 316L	SLM	Influenza dell'angolo di inclinazione sulla rugosità superficiale

Tabella 3.2: Letteratura analizzata e principali fattori esaminati

4. BENCHMARK PER ANALISI DI RUGOSITÀ

In questo capitolo viene presentato l'iter seguito nella progettazione di un benchmark utile a compiere analisi sulla rugosità superficiale che il processo EBM è in grado di generare. Verrà inizialmente presentato l'iter seguito nella progettazione e produzione del benchmark vero e proprio, dopo di che si andrà ad approfondire prima teoricamente e poi praticamente l'analisi statistica dei dati sperimentali che si ricavano dalle misure di rugosità superficiale.

4.1 Operazioni preliminari alla valutazione.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi, come messo in luce alla fine del paragrafo 3.3 è la progettazione di un componente che consenta di effettuare valutazioni sulle caratteristiche di rugosità superficiale di pezzi prodotti tramite la tecnica EBM. Tenendo bene a mente quanto evidenziato dall'analisi della letteratura condotta nel paragrafo 3.3 occorre realizzare un componente che consenta di effettuare uno studio sulla rugosità superficiale dei pezzi, tenendo in considerazione i parametri che più di altri hanno influenza sul risultato della produzione.

Si deve quindi effettuare la produzione di un componente di riferimento che, oltre alla finitura superficiale che la macchina è un grado di produrre, consenta di operare una valutazione in termini di ripetibilità sulla piattaforma stessa. Per tale ragione, il Design Of Experiment (DOE) prevede che vengano realizzati dei benchmark dalle dimensioni ridotte, disposti in maniera uniforme su tutta la piattaforma di costruzione. Per raggiungere tale scopo, è stato necessario trovare il giusto compromesso tra la possibilità di effettuare le misure di rugosità (il rugosimetro che si va ad adottare per effettuare tali misurazioni ha un certo ingombro spaziale) e inserire in macchina quanti più provini possibili, in modo da avere dati rilevanti circa la posizione di costruzione in macchina. A valle della produzione dei benchmark, si andranno ad effettuare opportune analisi statistiche con l'obiettivo di identificare meglio le potenzialità della macchina.

La prima caratteristica importante da scegliere, per il benchmark, è stata, quindi, la geometria: è necessario un componente che consenta di effettuare valutazioni di rugosità in diverse condizioni nello spazio e al contempo in maniera semplice.

Come messo spiegato nella conclusione del paragrafo 3.3 occorre fare ricorso ad un componente che presenti, da un lato superfici con diverse inclinazioni nello spazio, che non presenti

39

una sezione troppo massiva e che consenta di effettuare analisi prendendo in considerazione il verso della superficie, ovvero se rivolta verso la piattaforma di costruzione o verso l'alto.

Si è quindi compiuta un'analisi della letteratura esistente, al fine di individuare, se presente, il componente che meglio si adattasse agli scopi del presente studio.

Numerosi sono i benchmark progettati per effettuare analisi di carattere dimensionale e di rugosità delle varie tecniche di fabbricazione additiva. Uno studio condotto da Rebaioli e Fassi [40] ha raccolto tutte le principali geometrie impiegate come benchmark per valutare le caratteristiche tecnologiche delle principali macchine di fabbricazione additiva.

In un primo momento sono sati presi in considerazione benchmark pensati esclusivamente per essere prodotti in Ti6Al4V tramite la tecnica EBM.

Il primo è quello pensato da Cooke e Soons [41] di cui è riportata una rappresentazione in Figura 4.1



Figura 4.1 Benchmark impiegato da Cooke e Soons; fonte [38]

L'artefatto presentato nasce dall'intenzione di creare un pezzo che si imponesse come standard per effettuare valutazioni in merito alle capacità del processo. In particolare, pone l'attenzione sulle caratteristiche geometriche prodotte dal processo di fabbricazione additiva e si pone l'obiettivo di effettuare un paragone con le tecniche di lavorazione tradizionale, ovvero la fresatura. Tuttavia, a differenza della fresatura, adottando l'additive manufacturing non si riesce ad identificare la sorgente di deviazione rispetto al modello CAD tale pezzo non è in grado di assolvere efficacemente alla funzione per cui è stato pensato.

Il secondo, sviluppato da Moylan et al. [42] ha come obiettivo quello di andare a realizzare un unico componente che consentisse più valutazioni contemporaneamente. In particolare, risoluzione del processo, caratteristiche dimensionali e rugosità superficiale. In Figura 4.2 è presentata un'immagine del benchmark individuato.

L'artefatto proposto presenta una notevole quantità di elementi geometrici utili ad effettuare numerose valutazioni sia geometriche da un lato, e quindi la precisione della macchina,



Figura 4.2: Benchmark proposto da Moylan et Al; fonte: [39]

ma anche di rugosità, poiché sono presenti delle superfici appositamente inclinate, utili a valutare da un lato l'effetto scalino e la rugosità propria della produzione. Questo benchmark assolve appieno alle funzioni per cui è stato pensato e si presta bene anche ad essere realizzato tramite altre tecniche costruttive.

Nonostante alcune caratteristiche dei benchmark presentati ben si prestino alle valutazioni che si vogliono compiere in questo lavoro, mancano in entrambi gli artefatti presi in considerazione delle superfici opportunamente inclinate che consentano di effettuare valutazioni della rugosità ai vari angoli di inclinazione; mancano inoltre delle superfici utili a compiere valutazioni relative alla rugosità superficiale che si ottiene quando le superfici sono rivolte verso la piattaforma di costruzione. Le dimensioni di tali componenti, inoltre, sono troppo elevate affinché sia possibile effettuare la costruzione di più parti all'interno della piattaforma di costruzione. Per cui questi artefatti non consentono valutazioni in merito all'omogeneità del processo su tutta la piattaforma di costruzione.

Gli artefatti presentati da Moylan et al. e Cooke et Soons, sebbene siano pensati per compiere valutazioni su parti prodotte in Ti6Al4V tramite EBM non sono idonei alle analisi che si vogliono effettuare. Occorre quindi analizzare dei componenti pensati per altre tecniche produttive.

Si è effettuata quindi un'altra ricerca bibliografica, ma stavolta trascurando la tecnica di produzione e considerando prevalentemente la geometria del componente. Si sono presi in considerazione, quindi, da un lato il benchmark proposto da Reeves e Cobb [34], di cui si riporta un'immagine in Figura 4.3 costituito da una serie di piani inclinati ad angoli diversi rispetto all'orizzontale, dall'altro quanto proposto da Kim e Oh [43], di cui si riporta un'immagine in Figura 4.4, che presenta, anche in questo caso, dei piani inclinati con diversi angoli, che consentono di valutare quale rugosità si genera nelle superfici così inclinate. La sostanziale differenza tra i due benchmark proposti sta nelle dimensioni, che per il primo sono leggermente inferiori del secondo.



posto da Kim e Oh; fonte: [33]

Le dimensioni delle parti di riferimento pensate sia da Reeves e Cobb che da Kim ed Oh sono, tuttavia, incompatibili con le dimensioni necessarie a compiere le valutazioni necessarie allo svolgimento di questo lavoro. La tavola sulla quale vengono costruiti i pezzi ha le dimensioni di 210x210 mm² e viene divisa in nove sotto aree quadrate di lato pari a circa 67 mm. Questa operazione è compiuta perché la gestione del fascio di elettroni generato dal cannone è effettuata, come già detto in precedenza, tramite delle lenti magnetiche. Per ottenere una corretta messa a fuoco del fascio elettronico, all'inizio di ogni job, si opera la divisione ideale della tavola di costruzione in 9 parti, con conseguente regolazione della messa a fuoco del fascio in ogni singola sotto area.

Per come avviene il processo produttivo (si ricorda che durante le fasi di preriscaldamento e post riscaldamento avviene una sinterizzazione della polvere non fusa, che rischia di collegare tra loro anche pezzi che in realtà andrebbero mantenuti separati) occorre distanziare di qualche decina di millimetri i pezzi tra loro sulla piattaforma di costruzione, si vede come l'area utile si riduce a un quadrato di lato 50 mm.

4.2 Progettazione della parte di riferimento

Prendendo dunque spunto dai benchmark presentati in Figura 4.3 e Figura 4.4 si è progettata la parte di riferimento come mostrato in Figura 4.5 e Figura 4.6.



Figura 4.5: Parte di riferimento progettata per valutazioni di rugosità superficiale. Viene riportata la numerazione progressiva delle superfici; vista frontale



Figura 4.6: Parte di riferimento progettata per valutazioni di rugosità superficiale. Viene riportata la numerazione progressiva delle superfici; vista posteriore.

L'ingombro complessivo della parte è 50x50x50 mm³. La parte di riferimento include una serie di superfici inclinate con uno specifico angolo e non ripetuto all'interno della stessa geometria. La vista frontale (Figura 4.5) mostra una serie di superfici inclinate di angoli diversi: la prima superficie è parallela alla piattaforma di costruzione, mentre le altre superfici sono inclinate via via di un angolo crescente di 10° fino ad un angolo di 60°. La parte retrostante (Figura 4.6) è diversa dai benchmark dai quali si è tratto spunto, perché sono presenti delle superfici rivolte verso la tavola di costruzione. Ogni superficie ha un'inclinazione che si riduce via via di 5°, partendo da un'inclinazione rispetto alla piattaforma di costruzione di 80°, e viene costruita senza l'impiego di supporti. In questo modo si riesce a valutare la capacità della macchina di costruire delle superfici che sono di fatto aggettanti e la qualità di queste superfici.

In Tabella 4.1 è riportata, per ragioni di chiarezza, la corrispondenza tra la superficie e l'angolo misurato rispetto alla piattaforma di costruzione.

Superficie	Angolo
1	0°
2	10°
3	20°
4	30°
5	40°
6	50°
7	60°
8	80°
9	75°
10	70°
11	65°
12	60°
13	55°
14	50°

Tabella 4.1: Angolo di inclinazione delle superfici rispetto alla piattaforma di costruzione

4.3 Produzione

La fase successiva alla progettazione del componente sopra descritto è stata quella di convertire il pezzo, progettato tramite il software SOLIDWORKS (Dassault Systemes Solidworks 2017), in un file di tipo STL che è il formato prevalentemente impiegato nella produzione additiva. La conversione è stata effettuata generando un file in formato ASCII, impiegando un errore cordale di 0.0414 mm e andando a generare un numero totale di triangoli pari a 94.

Una volta effettuata la conversione del file, si è passati alla disposizione sulla tavola della macchina dei componenti da realizzare. La preparazione della produzione è stata effettuata tramite il software Magics (R21.1, Materialise) in cui è installato il Build Processor con il set di parametri standard per il Ti6Al4V per la produzione mediante Arcam A2X con spessore del layer di 50 µm. Il file in formato STL creato in precedenza è quindi importato all'interno dell'ambiente del software Magics. Una volta importato il componente, la prima operazione da compiere è posizionare il componente sulla piattaforma di costruzione virtualmente ricostruita dal software nel suo ambiente. La parte di riferimento è appoggiata direttamente alla piattaforma di costruzione.

Il componente è stato poi replicato sulla piattaforma di costruzione. La parte di riferimento è posizionata in maniera tale da avere 9 repliche sulla piattaforma in accordo a quanto riportato al paragrafo 4.1. La posizione dei componenti sulla piattaforma non è stata scelta in maniera casuale, ma le nove repliche sono state orientati nella stessa direzione, per escludere, in questo modo l'effetto che l'orientamento dei pezzi potrebbe avere sulla rugosità ottenuta. Figura 4.7 mostra il posizionamento delle repliche sulla piattaforma di lavoro.



Figura 4.7: Distribuzione dei provini sulla piattaforma di costruzione virtuale

Tramite gli strumenti messi a disposizione dal software Magics, ogni provino è stato identificato univocamente apponendo sulla superficie verticale frontale un'indicazione relativa alla riga e alla colonna, che identifica l'esatta posizione di costruzione sulla piattaforma della parte. Le righe sono identificate da numeri che vanno da 1 a 3, mentre le colonne sono identificate tramite lettere che vanno dalla A alla C. La riga 1 è quella posizionata in prossimità della porta della macchina che dà accesso al volume di lavoro, mentre i provini della riga 3 sono quelli posizionati al fondo della macchina. Le colonne invece sono orientate parallelamente alla direzione seguita dalla lama nella distribuzione della polvere. Questa disposizione consente di eliminare l'effetto sulla rugosità superficiale generato dalla distribuzione della polvere, poiché la distribuzione della polvere avviene in maniera omogenea da destra a sinistra e viceversa, in maniera alternata per ogni layer di polvere deposta.

Avendo impostato per ciascuna parte il tema "Melted" il file è stato convertito in linguaggio macchina tramite il Build processor (file abp).

La macchina è stata precedentemente preparata: vengono caricati i serbatoi della polvere non fusa, viene posizionata la piattaforma di costruzione ed effettuato l'azzeramento dell'altezza, con il risultato riportato in Figura 4.8.

Il tempo totale di produzione dei pezzi è di 16 h, a cui sono seguite ulteriori 8 h necessarie al completo raffreddamento dell'intero volume di lavoro. Alla fine del processo costruttivo si ottiene un blocco di polvere compatta, cui è riportata un'immagine in Figura 4.9.



Figura 4.8: Piattaforma di costruzione correttamente azzerata e pronta per la produ-

zione

Successivamente all'estrazione della piattaforma dalla macchina, si è proceduto alla rimozione della polvere ancora sinterizzata sui pezzi tramite un processo di sabbiatura, impiegando la stessa polvere utilizzata nella costruzione dei pezzi, così da poter riutilizzare la polvere rimossa dai pezzi.



Figura 4.9: Piattaforma di costruzione e provini ancora posizionati in macchina e ricoperti da polvere

In Figura 4.10 è mostrata la piattaforma con i pezzi ancora attaccati mentre viene effettuata l'operazione di sabbiatura e rimozione della polvere sinterizzata



Figura 4.10: Sabbiatura dei componenti ancora attaccati alla piattaforma di costruzione

Alla fine di questa operazione si ottiene quanto mostrato in Figura 4.11

La rimozione dei pezzi dalla piattaforma non ha richiesto lavorazioni meccaniche successive o manuali. Infatti, data la limitata superficie a contatto della parte di riferimento sulla piattaforma di costruzione e la discontinuità favorita dalla presenza di due materiali diversi (parte realizzata in Ti6Al4V e piattaforma di costruzione in Acciaio), le repliche si sono stata staccate dalla piattaforma direttamente durante la fase di pulizia nel sistema di sabbiatura.



Figura 4.11: Tavola da costruzione con i pezzi posti sulla superficie, dopo che è stata rimossa tutta la polvere non fusa.

Si riporta quindi in Figura 4.12 l'immagine con tutti i pezzi staccati dalla piattaforma e pronti ad essere analizzati.



Figura 4.12: Pezzi rimossi dalla piattaforma e pronti per la misura.

A valle della realizzazione dei pezzi, si è passati alla misura della rugosità su ogni superficie dei pezzi.

4.4 Acquisizione delle misure di rugosità

Al fine di effettuare queste misure si è adottato un rugosimetro portatile (RTP-80 dell'azienda Metrology Systems, dotato di drive unit TL90) rappresentato in Figura 4.13 con il quale è stata valutata la rugosità di ogni superficie dei provini prodotti.



Figura 4.13: Rugosimetro portatile RTP 80 dell'azienda Metrology SyStem; Fonte http://www.sm-instruments.com/it/prodotti/rugosimetri/rtp-80.html

La misura della rugosità è avvenuta impiegando un cut-off di 0.8 mm e una lunghezza di campionamento paria 5 cut-off, ovvero 4 mm. Tale lunghezza, infatti, è perfettamente sufficiente a descrivere il comportamento della rugosità superficiale nel caso del processo produttivo in esame. Infatti, sebbene secondo quanto riportato in Tabella 3.1, essendo la rugosità caratteristica del processo compresa in valori che vanno da 20 µm a 50 µm [26], è consigliata una lunghezza di cut-off pari a 8 mm, si è preferito non seguire tale lunghezze consigliate, poiché queste fanno riferimento a lavorazioni tradizionali. Per la fabbricazione additiva, infatti, non è presente una normativa che indica quale sia la dimensione del cut-off da impiegare e poiché con un cut-off di 0.8 mm si riescono già a descrivere molto bene i dati sperimentali, si farà ricorso a questa dimensione per effettuare le analisi di rugosità. Per ciascuna superficie, in accordo con quanto richiesto dalla norma ISO 4288 (norma che regola la procedura da adottare nella rilevazione della rugosità superficiale), sono state effettuate più ripetizione della misura di rugosità. In particolare, sono state ripetute tre misurazioni per ogni superficie analizzata, di cui in Figura 4.14 è riportato uno schema che rappresenta la metodologia adottata



Figura 4.14: Schema relativo all'ordine di esecuzione delle misure di rugosità superficiale ed indicazione del sistema di riferimento relativo alla realizzazione in macchina

per effettuare le rilevazioni.

Le rilevazioni sono state effettuate secondo l'ordine mostrato in Figura 4.14. Prima è stata effettuata la rilevazione del profilo a, successivamente è stato rilevato il profilo b; Il profilo a e il profilo b sono stati rilevati in due posizioni diverse ma con tracce parallele. In fine è stato rilevato il profilo c, con traccia trasversale ai primi due profili.

In Figura 4.15 è invece riportata una fotografia in cui è rappresentato l'apparato sperimentale a cui si è fatto ricorso per effettuare la misura della rugosità.



Figura 4.15: Apparato sperimentale adottato per la rilevazione della rugosità superficiale

Come già messo in luce al paragrafo 4.1 il piano sperimentale prevede la realizzazione di 9 campioni, da costruire disposti in maniera omogenea. In ciascun campione è stata effettuata la rilevazione della rugosità su 14 superfici. In totale, quindi, sono state effettuate 378 rilevazioni. La Tabella A.1, che contiene tutti i dati grezzi delle rilevazioni, è riportata in Appendice.

5. MODELLO EMPIRICO DELLA RUGOSITA' SUPERFICIALE

Dopo aver raccolto i dati sperimentali della rugosità delle superfici inclinate di tutti i provini prodotti, si procede all'analisi delle misure sperimentali mediante strumenti di statistica descrittiva ed inferenziale.

Verranno dapprima descritti gli strumenti necessari a compiere queste analisi, dopo di che si procederà con uno studio sui dati sperimentali, adottando quegli strumenti messi a disposizione dalla statistica, utili ad estrapolare le informazioni dai dati sperimentali grezzi.

5.1 Strumenti di statistica descrittiva e inferenziale²

5.1.1 Analisi preliminari sui dati sperimentali

Dopo aver eseguito le misurazioni sperimentali, i dati grezzi raccolti tramite le rilevazioni effettuate sono riportati sotto forma di tabella, che rappresenta il modo più elegante di raccoglierli ed organizzarli. In Tabella 5.1, ad esempio, sono riportati i dati grezzi relativi al caso in esame. Nelle colonne sono riportate le varie repliche, mentre nelle righe sono riportati i dati relativi ad una specifica superficie, identificati da un numero e una lettera. In particolare, il numero fa riferimento alla superficie analizzata, con riferimento alle figure Figura 4.5 e Figura 4.6, mentre la lettera fa riferimento alla replica della misura, eseguita come spiegato dalla Figura 4.14.

I dati grezzi così organizzati, tuttavia, non possono essere maneggiati direttamente. Per questa ragione occorre effettuare un'elaborazione di questi dati al fine di renderli più leggibili ed interpretabili.

Per effettuare tale operazione si fa ricorso a grafici a colonna, o istogrammi.

Volendo realizzare una tale rappresentazione i dati sperimentali vengono dunque suddivisi in classi ed un'indicazione approssimativa del numero di classi da impiegare può essere data dalla relazione rappresentata dall'equazione 5.1

$$n_c = \sqrt{n} \tag{5.1}$$

Dove n_c rappresenta il numero di classi, mentre n rappresenta il numero complessivo delle rilevazioni analizzate.

² Per la scrittura di questo paragrafo si è fatto riferimento al testo [44]

Nella scelta del numero di classi, si deve comunque tenere presente il fatto che ogni classe deve contenere almeno quattro o cinque dati.

Una volta effettuata la suddivisione dei dati in classi si può procedere con la realizzazione dell'istogramma.

	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
superficie 1.a	6,959	8,547	3,725	9,098	5,05	7,612	8,942	4,161	4,708
superficie 1.b	5,103	2,998	10,563	3,763	5,456	5,952	6,009	8,806	6,512
superficie 1.c	4,173	2,854	6,89	3,909	4,485	5,468	3,641	8,591	4,044
Superficie 2.a	9,65	11,875	9,747	9,492	10,208	9,575	10,795	9,749	11,395
Superficie 2.b	11,711	10,097	10,923	11,683	10,436	10,317	9,863	13,28	14,151
Superficie 2.c	12,762	10,028	10,489	9,577	12,388	10,362	12,422	13,055	12,627
Superficie 3.a	9,287	12,645	9,587	10,664	13,051	8,622	11,906	11,816	12,283
Superficie 3.b	9,314	12,503	8,321	9,61	13,634	15,957	13,592	13,795	12,283
Superficie 3.c	7,588	8,937	8,915	10,17	12,459	13,32	10,599	12,915	9,341
Superficie 4.a	11,409	13,866	11,722	9,649	11,992	13,847	14,963	14,572	11,899
Superficie 4.b	9,65	13,637	12,244	11,938	13,453	13,936	15,147	15,868	12,854
Superficie 4.c	8,739	11,53	9,403	12,284	12,704	14,86	17,15	14,977	14,211
Superficie 5.a	14,05	18,549	16,888	19,247	21,579	23,5	18,758	23,787	14,359
Superficie 5.b	15,389	21,242	17,389	10,812	25,405	19,007	19,884	16,616	15,709
Superficie 5.c	15,009	17,033	14,865	20,934	13,874	12,137	25,556	17,628	17,585
Superficie 6.a	15,239	16,23	16,509	22,102	15,219	23,073	18,925	22,582	25,429
Superficie 6.b	20,286	15,968	19,858	22,343	18,526	25,213	24,085	23,954	26,464
superficie 6.c	21,387	21,609	22,016	18,339	18,262	22,862	20,648	24,693	23,674
Superficie 7.a	22,555	21,952	22,646	18,084	28,187	21,766	19,853	27,259	20,668
Superficie 7.b	28,322	28,735	22,646	21,453	25,967	23,867	23,302	27,266	30,643
Superficie 7.c	29,993	25,987	33,123	21,376	20,462	24,505	22,456	23,236	23,383
Superficie 8.a	26,669	23,039	22,593	19,021	17,026	24,372	15,516	14,808	18,961
Superficie 8.b	23,561	17,943	23,411	21,097	19,402	20,595	16,854	19,913	20,651
Superficie 8.c	25,895	19,73	21,268	17,575	20,278	20,414	18,097	18,632	17,546
Superficie 9.a	24,307	20,723	21,623	21,471	18,595	17,931	20,211	16,603	18,127
Superficie 9.b	22,184	18,059	18,894	13,436	15,775	17,453	17,906	15,99	15,749
Superficie 9.c	22,242	22,597	17,633	14,608	20,353	15,476	15,947	22,191	15,43
Superficie 10.a	22,237	21,311	22,323	18,024	13,855	15,332	19,89	16,442	15,826
Superficie 10.b	20,758	21,489	17,256	15,682	17,047	18,33	16,498	18,1	17,463
Superficie 10.c	20,047	14,561	20,673	14,135	16,135	19,226	21,373	16,387	14,858
Superficie 11.a	15,388	19,693	17,899	19,904	17,117	19,681	13,434	19,105	13,453
Superficie 11.b	22,097	19,203	18,269	20,8	20,553	19,295	17,962	16,276	18,004
Superficie 11.c	25,924	16,88	25,422	18,926	14,585	17,466	18,536	19,05	19,883
Superficie 12.a	15,824	22,495	16,113	30,096	16,163	17,031	15,874	17,663	16,7
Superficie 12.b	18,195	23,657	17,729	24,744	19,776	18,094	18,013	17,303	19,006
Superficie 12.c	18,772	14,673	20,799	25,512	18,942	16,642	17,467	14,304	15,094
Superficie 13.a	19,415	19,507	19,289	20,405	18,674	18,224	21,129	16,565	19,377
Superficie 13.b	20,195	19,634	20,239	16,17	21,637	20,536	18,35	16,695	15,149
Superficie 13.c	20,352	17,93	15,214	19,281	18,515	18,529	20,481	17,637	18,352
Superficie 14.a	20,188	29,298	21,072	25,818	17,411	21,808	22,439	20,514	23,934
Superficie 14.b	20,222	20,616	19,39	17,404	17,894	17,157	24,223	22,145	18,292
Superficie 14.c	28,849	21,208	17,724	24,165	17,835	18,848	24,678	15,954	16,471

Tabella 5.1: Dati sperimentali di rugosità; Misure in μm

Un diagramma a colonne è costituito da una serie di rettangoli, posti gli uni vicini agli altri, la cui base è costituita dall'ampiezza della classe considerata, mentre l'altezza è rappresentata dal numero di dati che cadono in quella particolare classe, detta anche frequenza assoluta.

Fare ricorso alla frequenza assoluta, tuttavia, non consente il confronto del diagramma a colonne con le distribuzioni di probabilità.

Per poter effettuare tale confronto, è necessario stimare la probabilità che un dato cada in una determinata classe e questa operazione viene realizzata facendo ricorso alla definizione frequentista della probabilità, calcolando quindi la frequenza relativa dei dati, ottenuta come rapporto tra il numero di dati che cadono in una determinata classe e il numero di dati complessivo.

Si rende quindi necessario rappresentare la frequenza relativa tramite un istogramma, che altro non è se non un diagramma a colonne nel quale l'area delle colonne rappresenta la frequenza relativa.

Essendo, quindi, nota l'ampiezza della base delle colonne (ampiezza di classe) e l'area dei rettangoli (frequenza relativa), occorre determinare l'altezza di questi rettangoli che è rappresentata della densità di frequenza ρ_f ottenuta dividendo i valori di frequenza relativa per l'ampiezza di classe.

In sovrapposizione all'istogramma della frequenza relativa si rappresenta in genere la forma della distribuzione normale, questo per ottenere immediatamente un confronto tra l'andamento dei dati sperimentali e l'andamento ideale che dovrebbero avere. Per ottenere questa rappresentazione è necessario quindi effettuare il calcolo della media e della varianza dei dati sperimentali raccolti.

Tuttavia, non si può pensare che vi sia esatto accordo tra i dati sperimentali raccolti e la distribuzione teorica corrispondente dei dati (distribuzione normale), ma anzi potrebbe accadere che la distribuzione dei dati sperimentali si discosti apparentemente parecchio dalla distribuzione normale.

Le prime analisi che si andranno ad effettuare sui dati numerici saranno quindi rivolte ad identificare l'eventuale presenza di incidenti di misura. Successivamente, si andrà ad investigare l'eventuale presenza di errori sistematici nella rilevazione facendo ricorso ad altri strumenti statistici.

5.1.2 I principi di esclusione

La prima operazione da compiere è quindi quella di verificare l'eventuale presenza di dati sperimentali figli di errori di misura e quindi non rappresentativi. Per compiere questa operazione si ricorre ad una rappresentazione grafica chiamata "*boxplot*" che consiste nella rappresentazione tramite un rettangolo, delimitato ai lati dal valore superiore del venticinquesimo centile (primo quartile, ovvero la zona contente il venticinque percento dei dati a partire dal limite inferiore) e dal valore del settantacinquesimo centile (terzo quartile).

Nella zona rettangolare così individuata si traccia anche una linea corrispondente alla mediana. La lunghezza della zona appena descritta prende il nome di distanza interquartile (indicata con IQR).

A sinistra e a destra della zona rettangolare appena individuata si tracciano poi due linee, fino a raggiungere un valore massimo e un valore minimo individuati rispettivamente dalla quantità 1.5· IQR oltre il terzo quartile e dalla quantità 1.5· IQR al di sotto del primo quartile. Se una misura sperimentale cade al di fuori del valore massimo o minimo calcolato in precedenza, allora sicuramente sarà frutto di un errore di misura e quindi un dato da escludere.

In realtà il criterio appena presentato è valido nel caso in cui il numero di misurazioni sia basso. Nel caso in cui il numero di misurazioni *n* ecceda le cinquanta misurazioni occorre fare riferimento all'equazione 5.2 per calcolare i limiti di accettabilità:

$$1.5 \cdot IQR \cdot \left[1 + 0.1 \cdot \log\left(\frac{n}{10}\right)\right] \tag{5.2}$$

I valori che ricadono al di fuori di tali limiti sono indicati come "outliers" e possono essere distinti in due categorie: "outliers" possibili o sospetti, se ricadono nella zona di 3· IQR al di sotto del primo o al di sopra del terzo quartile, o "outliers" probabili o altamente sospetti, se ricadono al di fuori di tale limite.

Oltre ai due metodi di esclusione appena presentati, utili ad effettuare la depurazione dei dati sperimentali da eventuali incidenti di misura, si può fare ricorso al *principio di esclusione di Chauvenet*, che, a differenza dei metodi visti precedentemente i quali assegnano una probabilità prefissata alla definizione di incidente, collega la probabilità di avere un incidente al numero di misure effettuate e fissa convenzionalmente come confine la probabilità del 50% applicata all'evento "dato troppo discosto dal valore atteso" nel corso di tutte le prove di misura.

Il passaggio dalla probabilità globale, su tutte le n prove, alla probabilità per il singolo evento, si realizza poi facilmente facendo ricorso all'equazione 5.3

$$P(x < x_{li}) = P(x > x_{ls}) = \frac{50\%}{2n}$$
(5.3)

Una volta individuata tale probabilità è possibile individuare l'intervallo fiduciario e quindi andare a definire i valori limite superiore e inferiore di accettabilità delle misure.

Tale procedimento si realizza applicando la convenzione di Chauvenet ai dati e calcolando la probabilità cumulata fino al limite superiore $P_{ls} = 1 - P(x > x_{ls})$ dalla quale è possibile ricavare i valori di z_{ls} e z_{li} corrispondenti a x_{ls} e x_{li} .

Confrontando i dati sperimentali con i limiti numerici così individuati, è quindi possibile individuare quali dati andrebbero esclusi dalla serie di dati.

5.1.3 Verifica della normalità della distribuzione sperimentale

Conclusa l'analisi preliminare e verificata l'eventuale presenza di errori di misura si procede all'analisi successiva, volta ad individuare l'eventuale presenza di errori sistematici nelle misure sperimentali.

Qualora la variazione dei dati sperimentali fosse conseguenza solamente di piccoli, ma molteplici, effetti aleatori tali da produrre variazione dei dati sia positive che negative, allora ci si attende una distribuzione dei dati sperimentali normale; viceversa, nel caso in cui la distribuzione sperimentale dei dati non fosse normale, si può ritenere che le misure siano affette da errori sistematici, che devono essere individuati e corretti.

Esaminando un istogramma che contiene i dati sperimentali non è possibile tramite una semplice ispezione visiva se questi si dispongono secondo la distribuzione normale o meno, neppure effettuando un confronto diretto tra i dati sperimentali e la distribuzione normale.

Per controllare l'ipotesi di normalità della distribuzione dei dati si fa ricorso a due diversi metodi:

- Il primo, metodo numerico preciso, è detto test del χ^2 e consente, se il caso si presenta, di rifiutare l'ipotesi di normalità ad un ben definito livello di fiducia P.
- Il secondo, metodo grafico, detto Grafico di Probabilità Normale (G.P.N.) non consente il rifiuto dell'ipotesi di distribuzione normale dei dati con altrettanto rigore del

metodo del χ^2 , ma ha il pregio, essendo un metodo grafico, di fornire informazioni preziose sulle cause di non normalità.

Con il *test del* χ^2 si va valutare la differenza tra la distribuzione dei dati sperimentali e la distribuzione normale teorica in base alle differenze riscontrate in ogni classe in cui è stato suddiviso il campo della variabile *x* esaminata.

Per compiere tale operazione di confronto, la variabile aleatoria W, definita dall'equazione 5.4 e costruita appositamente facendo ricorso alla frequenza assoluta sperimentale, è confrontata con la distribuzione ottenuta dalla frequenza assoluta teorica, che risulta avere la distribuzione del χ^2 .

$$\chi^{2} = W = \sum_{j=1}^{N} \frac{\left(fa_{j} - ft_{j}\right)^{2}}{ft_{j}}$$
(5.4)

Per calcolare Wquindi, occorre calcolare prima fa ed ft.

La frequenza assoluta fa è già stata calcolata in precedenza quando si è realizzato il diagramma a colonne utile alla rappresentazione dei dati sperimentali.

La frequenza assoluta teorica *ft* si calcola con il prodotto della probabilità che nella distribuzione normale un dato cada all'interno di una ben definita classe di dati per il numero complessivo di dati, oppure facendo ricorso alla frequenza relativa teorica *frt* che si calcola come differenza della distribuzione normale cumulata agli estremi di classe, quindi secondo l'equazione 5.5

$$frt = F(z_s) - F(z_i) \tag{5.5}$$

Dove z_s rappresenta l'estremo di classe superiore, mentre z_i rappresenta l'estremo di classe inferiore.

A questo punto è possibile il calcolo di χ^2 e il valore ottenuto deve essere confrontato con i limiti teorici, ricavati dalla distribuzione teorica del χ^2 per il livello di fiducia richiesto.

La scelta del livello di fiducia deve essere effettuata tenendo conto delle conseguenze derivanti dall'accettazione di un'ipotesi nulla falsa (si vedrà più avanti, al paragrafo 5.1.4 cosa si intende per ipotesi nulla). In questo caso l'ipotesi nulla statistica è che la distribuzione sperimentale sia normale. Questa, corrisponde all'ipotesi sperimentale che la misura della rugosità non sia affetta da alcuna forma di errori sistematici, variabili o di ampiezza tale da deformare sensibilmente la distribuzione. Per effettuare il calcolo del χ^2 ideale, oltre al livello di fiducia, occorre anche tenere in conto il numero di gradi di libertà, dato dal numero di classi impiegate, ridotto del numero di vincoli impiegati, che nel confronto tra distribuzione normale e istogramma della distribuzione sperimentale sono tre: uguaglianza della media, uguaglianza dello scarto tipo e uguaglianza dell'area totale, unitaria per entrambi.

Il valore sperimentale di χ^2 può cadere all'interno o all'esterno dei limiti di fiducia individuati per il livello di fiducia stabilito. Nel caso in cui cada all'interno dei limiti di fiducia il test non fornisce nessuna informazione, per cui non vi sono ragioni di rifiutare l'ipotesi nulla che la distribuzione sperimentale dei dati sia assimilabile ad una normale. Nel caso in cui, invece il χ^2 sperimentale cada al di fuori dei limiti individuati l'ipotesi nulla viene rifiutata, ovvero i dati sperimentali non si dispongono secondo una distribuzione normale.

L'altra analisi che consente la verifica dell'ipotesi di dispersione dei dati secondo la distribuzione normale è lo studio del *Grafico di Probabilità Normale (G.P.N.)*.

L'idea fondante del metodo del Grafico di Probabilità Normale è quella di individuare una forma grafica che consenta di capire immediatamente se i dati sperimentali siano disposti secondo una distribuzione normale. Questa rappresentazione è appunto il G.P.N. costituito da un grafico in cui l'asse delle ordinate è deformato in modo che la curva ad S della distribuzione normale cumulata venga rappresentata come una retta.

Rappresentando, su grafici con l'ordinata così deformata, l'andamento della frequenza relativa cumulata sperimentale si può immediatamente valutare se questa si avvicina all'andamento rettilineo oppure si discosta da questo, con la conseguenza che viene rifiutata l'ipotesi di andamento normale della distribuzione. In quest'ultimo caso è inoltre possibile ottenere informazioni più approfondite in merito alle cause che portano allo scostamento dei dati sperimentali dalla distribuzione normale ordinaria.

Il procedimento utile alla realizzazione del G.P.N. prevede che i dati siano rappresentati in colonna e riordinati in ordine crescente. In funzione della posizione relativa si calcola la frequenza relativa cumulata, secondo l'equazione 5.6

$$f_{rc} = \frac{i - 0.5}{n}$$
 (5.6)

Nell'equazione 5.6 la *i* rappresenta la posizione del dato.

Oltre alla frequenza relativa si passa al calcolo dell'inverso della probabilità normale standard cumulativa, impiegata come ascissa nel grafico.

A questo punto è possibile effettuare la rappresentazione dei dati, ottenendo il G.P.N. e studiandone la forma. Se infatti i dati si dispongono in maniera ordinata lungo una retta non si può rifiutare l'ipotesi che la distribuzione sperimentale sia normale. Va tuttavia precisato che in questo caso, poiché il giudizio sulla distribuzione rettilinea dei dati è puramente soggettivo, non è possibile assegnare un livello di fiducia a tali considerazioni e tale situazione costituisce il prevalente limite del G.P.N.

5.1.4 Il test di ipotesi

Successivamente allo studio dei dati sperimentali si indagano i dati in maniera strutturata secondo il fattore che si vuole analizzare (detto anche fattore sotto controllo). Tale analisi ha l'obiettivo di distinguere il caso in cui le differenze riscontrate nei dati sperimentali siano legate solamente al caso, dal caso in cui tali differenze siano dovute alla presenza di qualche ragione ben definita, che le produce in modo sistematico.

Per effettuare questa indagine, il metodo che porta ad una esatta soluzione è quello del *test di ipotesi*.

Il metodo del test d'ipotesi prevede che venga formulata un'ipotesi relativa all'aspetto del piano sperimentale preso in analisi ed effettuare poi delle valutazioni che hanno lo scopo di confermare o smentire tale ipotesi.

Poiché con le risposte date per mezzo degli strumenti statistici non si è in grado di giungere ad una condizione di accettazione di un'affermazione, quello che si fa allora è cercare la negazione dell'ipotesi affermata, seppur con un certo rischio d'errore.

Il metodo prevede dunque che venga posta una certa ipotesi iniziale, detta *ipotesi nulla*, posta in senso contrario al fattore che si vuole analizzare, che sarà poi smentita tramite le successive analisi.

Per poter smentire l'ipotesi nulla, occorre innanzitutto organizzare, in maniera opportuna, i dati sperimentali di rugosità, operazione compiuta in Tabella 5.1 e seguire poi alcuni passi:

- Scegliere la maniera utile ad effettuare una rappresentazione numerica dei termini della questione, individuando, quindi, i dati rappresentativi del fattore di influenza;
- Scegliere una distribuzione statistica che si pensa possa essere rappresentativa del fenomeno analizzato;
- Stabilire il rischio di errore che si è disposti a correre;

 Valutare i confini della zona di accettazione o di rifiuto dell'ipotesi, operazione che può essere facilmente effettuata essendo noti la distribuzione statistica (quella scelta al precedente passo) e il livello di fiducia (funzione del rischio che si è disposti a correre), come determinazione di u semplice intervallo fiduciario;

Eseguiti tutti questi passi, è possibile giungere ad un verdetto, che consenta di rifiutare o eventualmente accettare l'ipotesi nulla posta all'inizio.

5.1.5 Analisi della varianza

Uno studio ulteriore volto a smentire, eventualmente, l'ipotesi nulla posta in origine si può effettuare eseguendo l'analisi della varianza.

Le situazioni in cui può essere eseguita l'analisi della varianza possono richiedere di porre l'attenzione su un solo fattore, oppure prendere in esame più fattori.

La prima analisi che si va ad affrontare è quella che tiene conto di un solo parametro.

Per effettuare tale analisi occorre innanzitutto organizzare i dati sperimentali come riportato in Tabella 5.2

Situazioni	Gruppo 1	 Gruppo j	 Gruppo k	Media globale
1	<i>x</i> ₁₁	 x_{1j}	 x_{1k}	
i	<i>x</i> _{<i>i</i>1}	 x_{ij}	 x_{ik}	
n	x_{n1}	 x_{nj}	 x _{nk}	
Media colonne	$\bar{x}_{\bullet 1}$	 $\bar{x}_{\bullet j}$	 $\bar{x}_{\bullet k}$	<i>x</i>

Tabella 5.2: Schema organizzazione dei dati per un solo fattore sotto controllo; Fonte [41]

Dove:

- x_{ij} rappresenta il dato di misura i-esimo del campione j-esimo;
- $\bar{x}_{\bullet i}$ rappresenta la media dei dati del campione j-esimo;
- $\bar{x}_{\bullet\bullet}$ rappresenta la media di tutti i dati;

Analizzando i dati organizzati secondo lo schema riportato in Tabella 5.2 risulta evidente come la differenza tra i gruppi è fortemente presente nei valori medi ottenuti per ogni gruppo; quindi il fattore stimato s_1^2 , calcolato come varianza dei valori medi, conterrà fortemente tale differenza.

A tale varianza si assegna il nome di varianza "between groups" perché appunto la varianza calcolata tra le medie dei gruppi e il calcolo di tale varianza si effettua secondo la relazione 5.7

$$s_B^2 = n s_m^2 = n \frac{\sum_{j=1}^k (\bar{x}_{\bullet j} - \bar{x}_{\bullet \bullet})^2}{k-1} = \frac{SS_B}{k-1}$$
(5.7)

Questa è calcolata come somma dei quadrati degli scarti tra i valori medi di ogni gruppo e il valore medio globale.

Occorre successivamente effettuare la stima di una varianza che non contenga dell'effetto della differenza tra i gruppi. Risulta evidente come prendendo un solo gruppo e calcolandone la varianza (varianza entro il gruppo o "within the group"), si ottiene un valore che è indipendente dalla differenza che si presenta tra i vari gruppi.

Al fine di rendere tale operazione più robusta, l'operazione viene ripetuta anche per gli altri gruppi e successivamente si effettua un'operazione di media delle stime ottenute per ciascun gruppo, come riportato nell'equazione 5.8

$$s_W^2 = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_{\bullet j})^2}{n-1} = \frac{SS_W}{k(n-1)}$$
(5.8)

Dell'equazione 5.8, la parte riportata nell'equazione 5.9 rappresenta la varianza dei dati all'interno del gruppo j-esimo e le sommatorie dei quadrati delle differenze rispetto ai valori medi di ogni gruppo rappresentano la somma dei quadrati all'interno dei gruppi (Sum of Squares within groups, SS_W).

$$\sum_{j=1}^{k} \sum_{i=1}^{n} (x_{ij} - \bar{x}_{\bullet j})^2 = SS_W$$
(5.9)

Con l'obiettivo di valutare, dunque, la presenza di un fattore sistematico tra i gruppi si effettua il rapporto tra la stima della varianza che contiene il fattore esaminato e quella che non lo contiene, effettuando poi il confronto del valore ottenuto con il limite superiore corrispondente all'intervallo di fiducia considerato della distribuzione di Fhisher.

Per il calcolo di questo, i gradi di libertà totali, necessari ad effettuare tale calcolo, sono dati dal numero totale dei dati meno uno: (kn - 1).

Sulla base di quanto fin qui riportato si può calcolare la tabella ANOVA (ANalisis Of VAriance), riportata in Tabella 5.3

Origine variazione	Gradi di libertà	Somme dei quadrati	Varianze	Rapporto di va- rianze	F
Dovuta al fat- tore esaminato	k-1	$SS_B = n \sum_{j=1}^k (\bar{x}_{,j} - \bar{x}_{,.})^2$	$s_B^2 = n \frac{\sum_{j=1}^k (\bar{x}_{\bullet j} - \bar{x}_{\bullet \bullet})^2}{k-1}$	$F_{calc} = \frac{s_B^2}{s_W^2}$	F _U
Dovuta agli er- rori casuali	k(n - 1)	$SS_W = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_{\cdot j})^2$	$s_W^2 = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_{\star j})^2}{n-1}$		
Totale	kn-1	$SS_{TC} = \sum_{j=1}^{k} \sum_{i=1}^{n} (x_{ij} - \bar{x}_{\bullet \bullet})^2$			

Tabella 5.3: Tabella ANOVA per un solo fattore sotto controllo; fonte [41]

Dopo aver calcolato la tabella, si effettua, dunque, un'operazione di confronto tra il fattore F_{calc} , che è quello che si ottiene dal rapporto tra le varianze calcolate e il fattore F_U ottenuto dalla distribuzione di Fischer valutata al relativo livello di fiducia desiderato, per lo specifico numero di gradi di libertà disponibili per numeratore e denominatore.

Nel caso in cui il valore calcolato, sia superiore al valore teorico stimato con la distribuzione di Fisher, allora non è possibile smentire l'ipotesi nulla posta in origine, ovvero non è possibile negare la presenza di errori sistematici di misurazione; in caso contrario, invece, nulla si può dire circa la presenza di errori sistematici tra le colonne.

Qualora oltre al fattore colonna, si ritiene che possa produrre una variazione sistematica dei dati anche il fattore riga, occorre effettuare una nuova analisi della varianza, questa volta però tenendo sotto controllo due parametri.

In questo caso i dati devono essere organizzati secondo quanto riportato nella Tabella 5.4

Situazioni	Campione 1	 Campione j	 Campione k	Media riga
1	<i>x</i> ₁₁	 x_{1j}	 x_{1k}	$\bar{x}_{1\bullet}$
i	<i>x</i> _{<i>i</i>1}	 x_{ij}	 x_{ik}	$\bar{x}_{i\bullet}$
n	x_{n1}	 x_{nj}	 x_{nk}	$\bar{x}_{n\bullet}$
Media colonne	$\bar{x}_{\bullet 1}$	 $\bar{x}_{\bullet j}$	 $\bar{x}_{\bullet k}$	<i>x</i>

Tabella 5.4:Schema organizzazione dei dati per due fattori sotto controllo; fonte [41]

Dove:

- *x_{ij}* rappresenta il dato di misura acquisito nella situazione i-esima del campione jesimo;
- $\bar{x}_{\bullet i}$ rappresenta la media dei dati del campione j-esimo;
- \bar{x}_{i} , rappresenta la media dei dati acquisiti nella situazione i-esima;
- $\bar{x}_{\bullet\bullet}$ rappresenta la media di tutti i dati;

I calcoli delle varianze si fanno ancora secondo le relazioni adottate per il calcolo delle varianze nel caso di un solo parametro sotto controllo.

La stima dei gradi di libertà si effettua facilmente: per il calcolo della varianza tra le righe e le colonne si adottano come gradi di libertà il numero di righe e di colonne ridotto di uno, rispettivamente; il numero di gradi di libertà utili al calcolo della varianza entro il gruppo (dovuta ad errori casuali) si ottiene per sottrazione dal totale dei gradi di libertà di quelli impiegati per il calcolo della varianza tra le righe e della varianza tra le colonne.

Origine variazione	Gradi di libertà	Somme dei quadrati	Varianze	Rapporto di varianze	F
Dovuta al fattore nelle colonne	k-1	$SS_{Bc} = n \sum_{j=1}^{k} (\bar{x}_{\star j} - \bar{x}_{\star \star})^2$	$s_{Bc}^2 = \frac{SS_{Bc}}{k-1}$	$F_{calc} = \frac{s_{Bc}^2}{s_W^2}$	F _{U1}
Dovuta al fattore nelle righe	<i>n</i> – 1	$SS_{Br} = k \sum_{i=1}^{n} (\bar{x}_{i \bullet} - \bar{x}_{\bullet \bullet})^2$	$s_{Br}^2 = \frac{SS_{Br}}{n-1}$	$F_{calc} = \frac{S_{Br}^2}{S_W^2}$	F _{U2}
Dovuta agli errori casuali	(k-1)(n-1)	$SS_W = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_{ij} - \bar{x}_{ij} - \bar{x}_{ij})^2$	$s_W^2 = \frac{SS_W}{(k-1)(n-1)}$		
Totale	kn-1	$SS_{TC} = \sum_{j=1}^{k} \sum_{i=1}^{n} (x_{ij} - \bar{x}_{})^2$			

Tabella 5.5: Tabella ANOVA per due fattori sotto controllo; fonte [41]

In Tabella 5.5 è quindi riportata la tabella ANOVA, nel caso in cui siano tenuti sotto controllo due fattori.

Anche in questo caso, determinato il valore del rapporto di varianze occorre confrontarlo con quello ricavato dalla distribuzione di Fisher valutato, una volta stabilito il livello di fiducia prescelto, per due condizioni diverse: La prima considerando come gradi di libertà al numeratore quelli della variazione dovuta al fattore nelle colonne e al denominatore i gradi di libertà per il calcolo nel caso di variazione dovuta ad errori casuali; la seconda considerando come gradi di libertà al numeratore quelli della variazione dovuta al fattore nelle righe e al denominatore il numero di gradi di libertà per il calcolo nel caso di variazione dovuta a fattori casuali.

Dal confronto, tra i valori F_{calc} e il valore stimato tramite la distribuzione di Fisher si possono trarre le conclusioni. Nel caso di variazione dovuta al fattore nelle colonne o al fattore nelle righe, si può affermare che le differenze tra le medie delle colonne o delle righe, rispettivamente, sono causate dalla presenza di errori sistematici nel caso in cui la F_{calc} sia superiore al valore stimato tramite la distribuzione di Fisher, mentre nulla si può dire nel caso in cui la F_{calc} abbia un valore numerico inferiore a quello stimato con la distribuzione di Fisher.

5.1.6 La regressione lineare

I metodi precedentemente analizzati (metodo del χ^2 , G.P.N. e analisi della varianza) danno un'indicazione sull'eventuale presenza di effetti sistematici nella rilevazione dei dati, ma non consentono l'individuazione di questi.

L'identificazione di tali effetti è possibile solo effettuando un'analisi globale dei dati sperimentali, dai quali si riesce a desumere, ad esempio, un'eventuale presenza di un fattore sistematico che porta alla deriva di tutti i dati.

Tale analisi deve essere effettuata tramite lo strumento della regressione.

Lo strumento della regressione trova ampio impiego qualora di voglia trovare un legame tra una variabile dipendente, spesso indicata con la lettera Y e una variabile indipendente, indicata spesso con la lettera X.

I passi da seguire, in generale, per effettuare un'analisi di regressione sono i seguenti:

- Presentazione grafica dei dati sperimentali o considerazione basate sull'esperienza al fine di identificare il modello di regressione che meglio descrive i dati sperimentali;
- Calcolo dei parametri del modello matematico scelto con il metodo dei minimi quadrati;
- Valutazione dei residui, ovvero della differenza tra i dati sperimentali e i valori calcolati con il modello matematico, al fine di decidere se il modello matematico adottato è adeguato alla descrizione dell'andamento dei dati sperimentali;

in una prima fase, quindi, quello che si vuole effettuare è lo studio globale dei dati sperimentali, al fine di individuare l'andamento generale dei dati e scegliere un modello matematico che ne consenta la descrizione.

Supponendo che ad esempio il modello matematico che meglio si presta alla descrizione dei dati sperimentali sia quello lineare, allora si farà ricorso all'equazione di una retta, come quella riportata nell'equazione 5.10

$$x = a_0 + a_1 t (5.10)$$

In questo caso, sarà dunque necessario individuare la variabile dipendente, in questo caso la x, la variabile indipendente rappresentata dalla t e i due parametri del modello a_0 e a_1 .

Occorre tenere presente il fatto che le variabili indipendenti potrebbero eventualmente essere più di una e che i parametri di modello potrebbero essere più di due (nel caso in cui, ad esempio, il modello matematico scelto sia quello parabolico).

Individuato il modello matematico, si procede al calcolo effettivo dei parametri di modello tramite il metodo dei minimi quadrati, per l'implementazione del quale si rimanda al testo [44].

Individuati i parametri di modello è necessario verificare che il modello scelto descriva adeguatamente i dati sperimentali e tale controllo deve essere eseguito tenendo bene a mente lo scopo dell'analisi di regressione dei dati: individuare l'eventuale presenza di fattori sistematici e il loro andamento.

Questo tipo di verifica si realizza facilmente studiando l'andamento dei residui: se il modello descrive correttamente i dati sperimentali i residui tenderanno a disporsi con andamento casuale; mentre se fosse presente all'interno dei dati sperimentali un eventuale effetto dovuto a errori sistematici di misurazione, allora i residui tenderanno a disporsi con una certa regolarità. Un metodo per verificare l'eventuale disposizione regolare dei residui è quello di studiare il segno di tali residui. Infatti, nel caso in cui non siano presenti effetti sistematici è casuale il fatto di avere residui positivi o negativi, viceversa sarà evidente una certa tendenza dei segni dei residui a raggrupparsi e quindi ad assumere solo valori positivi o negativi.

Eventualmente si volesse effettuare una valutazione più rigorosa della bontà del modello scelto, sarà necessario fare ricorso ad un test che può essere il test del χ^2 o il G.P.N.

5.2 Analisi di influenza della posizione sulle repliche

La prima analisi che si va ad effettuare sui dati sperimentali raccolti misurando la rugosità delle superfici, ha l'obiettivo di andare a verificare che la posizione di costruzione sulla piattaforma non influisca la replicazione della parte di riferimento ovvero che la rugosità non sia influenzata dalla posizione delle repliche sulla piattaforma.

Per effettuare tale analisi i dati sperimentali sono organizzati come riportato in Tabella A.2 riportata in appendice.

I dati di Tabella A.2 sono organizzati in maniera tale che nelle colonne compaiano i dati di rugosità relativi alla singola replica, mentre nelle righe sono messi in evidenza i dati relativi alla singola superficie. La numerazione delle superfici rispetta descritto nel paragrafo 5.1.1

Per ogni superficie sono riportati tre dati, poiché, come indicato dalla normativa relativa alla procedura di rilevazione della rugosità, la ISO 4288, per ogni superficie del provino sono state ripetute tre misurazioni della rugosità, al fine di ottenerne una migliore caratterizzazione. Inoltre, in Tabella A.2 sono evidenziati, con uno sfondo di colore rosso quei dati frutto di errori accidentali di misura (detti "outliers"). Per arrivare a definire quali dati sono effettivamente degli errori di misura occorre innanzitutto andare ad effettuare il calcolo della media e della deviazione standard, ottenendo i risultati riportati in Tabella 5.6

Numero di dati	Valore medio	Deviazione standard
378	0.0170 mm	0.0056 mm

Tabella 5.6: Dati principali relative alle misure sperimentali

Per fare un'analisi dei dati da escludere dalle valutazioni, e quindi andare ad individuare gli "outliers", occorre effettuare il calcolo del primo quartile, del terzo quartile, della distanza interquartile ed andare poi ad applicare la relazione 5.2 per effettuare il calcolo dei limiti superiore e inferiore di accettabilità delle misure. In Tabella 5.7 sono riportati i dati numerici utili all'individuazione della presenza di eventuali "outliers", mentre in Figura 5.1 è riportato il diagramma "box plot" relativi ad ogni provino, realizzato tenendo in considerazione contemporaneamente tutte le superfici del provino.
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
Quart 3	0,0222	0,0213	0,0210	0,0211	0,0193	0,0205	0,0204	0,0197	0,0190
Max	0,0300	0,0293	0,0331	0,0301	0,0282	0,0252	0,0256	0,0273	0,0306
Min	0,0042	0,0029	0,0037	0,0038	0,0045	0,0055	0,0036	0,0042	0,0040
Quart 1	0,0120	0,0137	0,0119	0,0117	0,0135	0,0142	0,0150	0,0146	0,0136
Median	0,0197	0,0183	0,0177	0,0181	0,0171	0,0180	0,0180	0,0166	0,0161
IQR	0,0103	0,0076	0,0092	0,0093	0,0058	0,0063	0,0054	0,0051	0,0054
Max IQR	0,0379	0,0329	0,0350	0,0353	0,0281	0,0302	0,0287	0,0275	0,0272
Min IQR	-0,0037	0,0021	-0,0021	-0,0025	0,0047	0,0045	0,0068	0,0069	0,0054

Tabella 5.7: dati utili alla rilevazione della presenza di eventuali errori di misura e limiti di accettabilità valori sperimentali

L'analisi del diagramma "box plot" riportato in Figura 5.1 mette in evidenza come la rilevazione dei dati sperimentali sia corretta, perché i vari rettangoli, relativi ad ogni singolo provino sono allineati, ovvero non si presenta il caso in cui il primo quartile relativo ad un provino sia superiore al terzo quartile di qualche altro provino, oppure il caso in cui il terzo quartile di un provino sia inferiore al primo quartile di un altro provino.



Figura 5.1: Diagramma "box plot" relativo ai dati sperimentali rilevati

Sui dati sperimentali è stata effettuata, al fine di individuare qualche errore di misura non evidenziato dall'analisi degli outliers, anche l'analisi di Chauvenet che però non ha messo in luce nessun errore di misura, quindi non è necessario escludere nessun dato dalle misure sperimentali. Appurato che i dati sperimentali non sono affetti da errori accidentali di misura si procede con la ricerca di eventuali errori sistematici.

Per effettuare tale operazione si farà ricorso al test del χ^2 e si analizzerà il G.P.N.

Volendo effettuare il test del χ^2 è necessario riorganizzare i dati sperimentali nella forma riportata in Tabella 5.8, dove i dati sperimentali sono stati suddivisi in classi e la scelta del numero di classi utile ad operare tale suddivisione è stata effettuata facendo ricorso alla relazione 5.1. In questo caso il numero di classi suggerito dalla relazione è pari a 20.

Classe	Da	А	Valore medio	f _a	f _r	Densità di frequenza	Distribuzione normale
	[mm]	[mm]	[mm]			[mm ⁻¹]	[mm ⁻¹]
1	-0,00522	-0,00299	-0,00410	0	0,000	0,0	С
2	-0,00299	-0,00077	-0,00188	0	0,000	0,0	0,22
3	-0,00077	0,00146	0,00034	0	0,000	0,0	0,80
4	0,00146	0,00368	0,00257	0	0,000	0,0	2,44
5	0,00368	0,00591	0,00479	11	0,029	13,1	6,38
6	0,00591	0,00813	0,00702	9	0,024	10,7	14,20
7	0,00813	0,01035	0,00924	12	0,032	14,3	26,92
8	0,01035	0,01258	0,01147	31	0,082	36,9	43,51
9	0,01258	0,01480	0,01369	36	0,095	42,8	59,92
10	0,01480	0,01703	0,01592	44	0,116	52,3	70,32
11	0,01703	0,01925	0,01814	67	0,177	79,7	70,32
12	0,01925	0,02148	0,02036	63	0,167	74,9	59,92
13	0,02148	0,02370	0,02259	53	0,140	63,0	43,51
14	0,02370	0,02593	0,02481	28	0,074	33,3	26,92
15	0,02593	0,02815	0,02704	13	0,034	15,5	14,20
16	0,02815	0,03037	0,02926	6	0,016	7,1	6,38
17	0,03037	0,03260	0,03149	4	0,011	4,8	2,44
18	0,03260	0,03482	0,03371	1	0,003	1,2	0,80
19	0,03482	0,03705	0,03593	0	0,000	0,0	0,22
20	0,03705	0,03927	0,03816	0	0,000	0,0	0,05

Tabella 5.8: Suddivisione dei dati sperimentali in classi e calcolo delle principali grandezze utili ad effettuare la rappresentazione dell'istogramma della frequenza relativa

Facendo ricorso ai dati riportati in Tabella 5.8 è stato inoltre possibile realizzare l'istogramma della frequenza relativa, riportato in Figura 5.2.

L'analisi della Figura 5.2 non consente di affermare con certezza che i dati sono distribuiti secondo una distribuzione normale caratterizzata da media e deviazione standard riportate in Tabella 5.6. Anzi, una prima analisi dell'istogramma di frequenza relativa mostra un andamento particolare dei dati sperimentali, ovvero una certa tendenza a spostarsi verso destra.

Questa tendenza è indicata come *asimmetria negativa* o "negative skewness" e rappresenta proprio la deviazione della distribuzione sperimentale dalla distribuzione gaussiana simmetrica, tipica delle misure di rugosità e intrinseca dei processi produttivi [45]. Infatti, questo è molto influente sulla distribuzione dei dati sperimentali che si ottiene, tanto che a seconda del processo produttivo impiegato si possono ottenere delle superfici asimmetriche a destra o a sinistra, come in questo caso.



Figura 5.2: Istogramma frequenza relativa dei dati sperimentali

Al fine di effettuare il test del χ^2 è necessario effettuare il calcolo della frequenza relativa teorica, della frequenza assoluta teorica ed effettuare il calcolo della variabile aleatoria W secondo la relazione 5.4.

Tale operazione è stata compiuta per ogni classe e i dati utili ad effettuare tale calcolo sono riportati in Tabella 5.9.

Il χ^2 ottenuto dalla relazione 4.2 deve essere confrontato con i limiti del χ^2 teorici, ottenuti dalla distribuzione del χ^2 per un livello di fiducia pari al 95% e con un numero di gradi di libertà pari a 17. I limiti del χ^2 ideale sono dati da:

- Limite superiore di χ^2 = 30.19
- Limite inferiore di χ^2 = 7.56

Dal confronto del χ^2 sperimentale, il cui valore è riportato al fondo di Tabella 5.9, con i limiti teorici determinati, si vede come questo ecceda i limiti individuati, per cui è da rifiutare l'ipotesi di distribuzione normale dei dati sperimentali.

La ragione del fallimento del test del χ^2 è che i dati sperimentali, a causa del processo produttivo, tendono a disporsi in maniera asimmetrica, presentando una asimmetria negativa, come già precedentemente discusso, che porta all'affermazione, secondo il test del χ^2 che i dati sperimentali non si dispongono secondo la distribuzione gaussiana. Quindi il test mette in luce, non tanto la presenza di errori sistematici nelle misure, quanto più che i dati sperimentali tengono conto del processo produttivo in esame.

Da	А	f _{rt}	f _{at}	fa	(f _a - f _{at})²/f _{at}
[mm]	[mm]				
-0,00522	-0,00299	0,0001	0,0	0	0,05
-0,00299	-0,00077	0,0005	0,2	0	0,20
-0,00077	0,00146	0,0019	0,7	0	0,71
0,00146	0,00368	0,0056	2,1	0	2,13
0,00368	0,00591	0,0146	5,5	11	5,50
0,00591	0,00813	0,0320	12,1	9	0,80
0,00813	0,01035	0,0603	22,8	12	5,10
0,01035	0,01258	0,0968	36,6	31	0,85
0,01258	0,01480	0,1327	50,2	36	4,00
0,01480	0,01703	0,1554	58,7	44	3,70
0,01703	0,01925	0,1554	58,7	67	1,16
0,01925	0,02148	0,1327	50,2	63	3,28
0,02148	0,02370	0,0968	36,6	53	7,37
0,02370	0,02593	0,0603	22,8	28	1,20
0,02593	0,02815	0,0320	12,1	13	0,06
0,02815	0,03037	0,0146	5,5	6	0,05
0,03037	0,03260	0,0056	2,1	4	1,63
0,03260	0,03482	0,0019	0,7	1	0,12
0,03482	0,03705	0,0005	0,2	0	0,20
0,03705	0,03927	0,0001	0,0	0	0,05
			χ ² Sperin	nentale	30,82

Tabella 5.9: Dati utili al calcolo del χ2 sperimentale

In Figura 5.3 è riportato il grafico di probabilità normale. L'analisi dell'andamento mostra come i dati si dispongano correttamente lungo una linea retta. Questa condizione implica che non è possibile escludere il fatto che i dati sperimentali siano distribuiti secondo una distribuzione normale. Si giunge quindi ad un risultato apparentemente contraddittorio, per-

ché secondo il test del χ^2 i dati sperimentali non di dispongono secondo la distribuzione normale, mentre l'analisi del grafico di probabilità normale, mostra che i dati seguono una distribuzione normale. In realtà un'analisi più profonda di Figura 5.3 mette in luce come nella parte iniziale del grafico vi siano dati sperimentali che si pongono molto al di sopra della linea retta di distribuzione normale. Questo rispecchia esattamente quanto ottenuto con il test del χ^2 , ovvero che il processo produttivo da origine ad una distribuzione sperimentale dei dati che non è esattamente simmetrica, ma che presenta una asimmetria, in questo caso a sinistra.



Figura 5.3: grafico di probabilità normale

Si procede successivamente ad effettuare il test d'ipotesi. Come già spiegato nel paragrafo 5.1.4 lo scopo del test di ipotesi è quello di smentire un'affermazione posta in origine, detta ipotesi nulla.

In questo caso, l'ipotesi che si vuole smentire tramite il test d'ipotesi è la seguente:

H₀: La posizione del pezzo sulla piattaforma di costruzione ha influenza sulla sua rugosità superficiale.

I dati, quindi vengono organizzati come nella Tabella A.2 e per ogni colonna viene calcolata la media. Questi valori di media devono essere confrontati con i limiti teorici ricavati come cumulata della distribuzione normale, per un livello di fiducia in questo caso posto pari al 95%.

Nella Tabella 5.10 sono riportate le medie delle colonne i cui valori devono essere confrontati con i limiti teorici:

1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
0,0177	0,0174	0,0170	0,0168	0,0164	0,0171	0,0172	0,0172	0,0165

Tabella 5.10: medie di colonna per la verifica del test di ipotesi

I dati di Tabella 5.10 devono essere confrontati con i limiti teorici, i quali sono riportati al fondo di Tabella 5.11 e che sono ricavati dalla funzione inversa della distribuzione normale cumulativa, calcolata con i dati riportati in Tabella 5.11.

Poiché nessuno dei valori delle medie di colonna, riportati in Tabella 5.10, eccede i limiti calcolati, allora si può smentire l'ipotesi nulla posta e quindi si può affermare che la posizione di costruzione sulla piattaforma non ha alcuna influenza sulla rugosità superficiale dei provini.

Numero di campioni mediati	42
Media	0,0170
Deviazione standard media	0,0009
Livello di fiducia	95%
Limite inferiore	0,0153
Limite superiore	0,0187

Tabella 5.11: Dati necessari al calcolo dei limiti di accettabilità delle medie di colonna e valori dei limiti

Un test di ipotesi più significativo è quello effettuato tenendo conto della varianza, più che delle media delle colonne.

In Tabella 5.12 sono quindi riportati i valori della varianza relativi alle singole colonne. Il confronto dei dati in questo caso va effettuato con la cumulata della distribuzione del χ^2 , calcolata per un livello di fiducia pari al 95%.

1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
4,6·10 ⁻⁵	3,5·10 ⁻⁵	3,4·10 ⁻⁵	3,6·10 ⁻⁵	2,6·10 ⁻⁵	2,6·10 ⁻⁵	2,5·10 ⁻⁵	2,4·10 ⁻⁵	2,9·10 ⁻⁵

Tabella 5.12: Tabelle delle varianze delle colonne

I limiti teorici in questo caso sono calcolati secondo quanto riportato in Tabella 5.13 e assumono i valori riportati al fondo di Tabella 5.13.

Numero di campioni per il calcolo della va- rianza	42
Varianza attesa	3,1·10 ⁻⁵
V attesa	41
Livello di fiducia	95%
Limite inferiore di s ²	1,9·10 ⁻⁵
Limite superiore di s ²	4,6·10 ⁻⁵

Tabella 5.13: Dati utili al calcolo dei limiti teorici e limiti teorici per l'esecuzione del test di ipotesi

Poiché come risulta evidente dal confronto dei dati riportati in Tabella 5.12 con i limiti teorici ricavati in Tabella 5.13, non sono presenti dati che eccedono i limiti, allora è possibile smentire, con un rischio d'errore del 5%, l'ipotesi nulla posta in origine, e quindi affermare che la posizione di costruzione sulla piattaforma non ha influenza sulla rugosità superficiale.

Volendo effettuare un'analisi più approfondita, con l'obiettivi di smentire ancora l'ipotesi nulla, si andrà ad effettuare l'analisi della varianza, tenendo conto, in prima battuta, di un solo fattore.

Per eseguire l'analisi della varianza i dati sono organizzati secondo la Tabella A.2 riportata in appendice e per ogni colonna viene calcolata la media dell'intera colonna e la varianza della colonna, con i risultati riportati in Tabella 5.14

	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
Media	0,0177	0,0174	0,0170	0,0168	0,0164	0,0171	0,0172	0,0172	0,0165
Varianza	4,63.10-5	3,53.10-5	3,43.10-5	3,64.10-5	2,58.10-5	2,63.10-5	2,49.10-5	2,40.10-5	2,93·10-5

Tabella 5.14: Media e varianza di ogni colonna

Con questi valori e con i dati di Tabella A.2 è possibile calcolare la tabella ANOVA ed ottenere quanto riportato nella Tabella 5.15

Causa di variazione	Gradi di libertà	Varianza	Rapporto tra le varianze	F Max
Fattore esaminato	8	6,89E-06	0,22	1,96
Errori casuali	369	3,14E-05		
Totale	377			

Tabella 5.15: Tabella ANOVA per un fattore sotto controllo

In questo caso il fattore esaminato è la posizione dei provini sulla piattaforma, come evidenziato dalle informazioni poste sulle colonne, in cui sono riportati i valori di rugosità superficiale relativa a tutto il provino. Il risultato messo in luce dall'analisi della varianza mostra, ancora una volta, che la posizione di costruzione sulla piattaforma non ha influenza sulla rugosità superficiale dei pezzi, poiché non vi sono differenze sistematiche tra le colonne di Tabella A.1, ovvero non vi sono differenze sistematiche tra le varie repliche.

Questo è evidente dal fatto che il rapporto tra le varianze ha un valore inferiore alla F Max, calcolata come inversa della distribuzione di Fisher ad un livello di fiducia pari al 95%.

Oltre all'analisi che tiene in considerazione un solo parametro, è possibile effettuare l'analisi che tiene in considerazione due parametri, ovvero da un lato la posizione dei provini sulla piattaforma e dall'altro la rugosità delle superfici dei provini.

In questo caso i dati devono essere organizzati come riportato nella Tabella A.2, ma occorre calcolare inoltre la media delle righe e la media delle colonne.

Utilizzando questi dati si arriva alla definizione della tabella ANOVA per due fattori sotto controllo riportata in Tabella 5.16.

Causa di variazione	Gradi di libertà	Somma dei quadrati	Varianza	Rapporto di varianza	F max
Fattore colonna	8	5,51E-05	6,89E-06	0,83	1,97
Fattore riga	41	8,88E-03	2,17E-04	26,08	1,43
Errori casuali	328	2,72E-03	8,30E-06		
Totale	377	1,17E-02	3,09247E-05		

Tabella 5.16: Tabella ANOVA per due fattori sotto controllo

L'analisi dei dati ricavati mette in mostra come il fattore colonna, ovvero la posizione dei provini sulla piattaforma, non abbia influenza sulla rugosità superficiale, poiché il rapporto delle varianze ha un valore inferiore a quello determinato dalla distribuzione di Fisher ad un livello di fiducia pari al 95%. Si può quindi ancora una volta affermare che non esistono differenze sistematiche tra le colonne, ovvero che la rugosità superficiale dei provini non dipende dalla posizione sulla piattaforma di costruzione.

Non si può dire altrettanto per l'altro parametro sotto controllo, ovvero la rugosità superficiale relativa ad una superficie e quindi ad un particolare livello di inclinazione. In questo caso, infatti, l'analisi della varianza non consente di affermare nulla, poiché il valore del rapporto di varianza è di gran lunga superiore a quello calcolato dalla distribuzione di Fischer.

Quello che si può desumere da tale risultato è che l'inclinazione della superficie ha influenza sulla rugosità superficiale che si ottiene.

In fine, con l'obiettivo di compiere un'analisi globale dei dati si va ad effettuare un'analisi di regressione.

Per rappresentare globalmente i dati sperimentali si sceglie il modello lineare, descritto dall'equazione 5.10. Sarà dunque necessario individuare i parametri che ne descrivono l'andamento: come variabile indipendente *t* si considera la sequenza di rilevazione dei dati, mentre come variabile dipendente x si considera la misura di rugosità stessa. L'equazione 5.10, in questo caso, può quindi essere riscritta secondo quanto riportato nell'equazione 5.11



Figura 5.4: Grafico di regressione lineare.

Dall'equazione 5.11 si evince come effettivamente il fattore legato alla successione di rilevazione dei dati sia poco influente, poiché il coefficiente della variabile indipendente è molto piccolo. In Figura 5.4 è rappresentato proprio quanto ricavato analiticamente, ovvero sono rappresentati i dati sperimentali, in successione e viene riportata la retta che rappresenta la regressione lineare, praticamente parallela all'asse delle scisse. Per verificare che il modello lineare sia in grado di spiegare sufficientemente bene i dati sperimentali, si analizza il grafico dei residui, che in questo caso assume l'andamento mostrato in Figura 5.5. In questo caso i segni dei residui non mostrano la tendenza a raggrupparsi, per cui il modello lineare scelto per rappresentare il comportamento dei dati spiega abbastanza bene i dati sperimentali.



Figura 5.5: Residui calcolati sulla base del modello di regressione

L'analisi di regressione lineare sviluppata in questo caso non conduce a risultati sperimentalmente rilevanti, poiché i dati impiegati sono globalmente tutti i dati sperimentali. Quello che è possibile rilevare dall'analisi di regressione è una certa ripetibilità nell'operazione di misura della rugosità, evidenziata dall'andamento oscillante delle rilevazioni riportate in Figura 5.4.

Dopo aver effettuato tutte queste analisi statistiche sui dati sperimentali raccolti, è possibile affermare con certezza che le misurazioni effettuate sono affette solamente da qualche errore accidentale di misura, ma che non sono affette da errori sistematici, come evidenziato dai risultati dei test sulla normalità della distribuzione dei dati sperimentali. È possibile quindi affermare che la posizione di costruzione sulla piattaforma non ha influenza significativa sulla rugosità superficiale dei provini.

5.3 Analisi di influenza dell'angolo di inclinazione delle superfici interne al provino

In questo paragrafo si vuole indagare se l'angolo di inclinazione della superficie ha influenza sulla rugosità superficiale.

Per compiere tale analisi occorre riorganizzare opportunamente i dati sperimentali. Partendo sempre dai dati grezzi, si effettua una prima conversione in millimetri, perché l'unità di misura più consona a compiere le analisi, dopo di che si riorganizzano i dati, facendo in modo che ad ogni riga corrisponda un provino in particolare e che in ogni colonna sia presente una superficie. I dati opportunamente organizzati per condurre le analisi in questo paragrafo sono riportati in Tabella A.2 presente in appendice.

Anche in questo caso, sui dati organizzati come riportato in Tabella A.3, è stata effettuata un'analisi volta ad individuare eventuali incidenti di misura. Si sono quindi individuati il primo quartile, il terzo quartile e la distanza interquartile, dopo di che tramite la relazione 5.2 si sono andati a calcolare il limite massimo e il limite minimo per ogni colonna, valori che costituiscono i limiti di accettabilità per le misure e consentono di effettuare un'analisi degli "outliers". In questo caso sono presenti alcuni dati effettivamente frutto di errori di misura, evidenziati in rosso nella Tabella A.3.

Con i dati utili al calcolo dei limiti di accettabilità delle misure è stato poi possibile andare a realizzare il grafico "box plot" relativo ad una specifica superficie di ogni provino, riportato in Figura 5.6.

L'analisi del diagramma di Figura 5.6 mostra come i dati siano molto dispersi, ovvero che la rugosità superficiale di una singola superficie assume valori molto diversi tra le varie repliche analizzati. Tuttavia, risulta evidente come i rettangoli del diagramma siano abbastanza ordinati, in maniera tale da essere tutti sufficientemente allineati tra loro. Questo fatto è indice della bontà delle misurazioni, fenomeno già messo in luce con le analisi precedentemente eseguite nel paragrafo 5.2.



Figura 5.6: Diagramma "box plot" relativo ai dati sulle superfici

Oltre all'analisi effettuata tramite l'equazione 5.2, per individuare la presenza di eventuali "outliers", si è effettuato lo studio dei dati sperimentali tramite il metodo di Chauvenet per individuare la presenza di eventuali errori di misura. Anche in questo caso lo studio non ha messo in luce la presenza di dati da escludere dall'impianto sperimentale.

Volendo effettuare un controllo sulla normalità della distribuzione dei dati sperimentali è necessario effettuare il test del χ^2 e l'analisi del grafico di probabilità normale.

Tuttavia, per come è organizzato il test, ovvero, poiché si prendono in considerazione tutti i dati sperimentali suddivisi in classi, questi test non portano a nessun nuovo risultato. Dunque, si rimanda alle considerazioni effettuate nel paragrafo 5.2 circa la normalità della distribuzione dei dati sperimentali.

Si procede quindi allo studio dei dati tramite il test di ipotesi. In questo caso l'ipotesi nulla che si pone e che si vuole smentire è la seguente:

H₀: L'inclinazione della superficie ha effetto sulla rugosità superficiale che si ottiene.

Il primo test viene effettuato considerando la media delle colonne dei dati riportati in Tabella A.3

In Tabella 5.17 sono riportati i valori della media di ogni colonna di Tabella A.3

Sup.	Su.	Sup.	Sup.	Sup.									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,018	0,01	0,01	0,018	0,020
59	11	12	29	80	09	44	02	86	0	87	88	8	9

Tabella 5.17: Media delle colonne di Tabella A.3

I limiti di accettabilità in questo caso sono calcolati considerando un livello di fiducia pari al 95% e calcolando la probabilità cumulata della distribuzione normale di media pari alla media complessiva di tutti i dati e deviazione standard media ottenuta dividendo la deviazione standard per il numero di dati contenuti in una colonna.

In Tabella 5.18 sono riportati i dati necessari al calcolo dei limiti teorici di accettabilità dei valori di media.

Numero di misure mediate	27
Media	0,0170
Deviazione standard media	0,0011
Livello di fiducia	95%
Limite inferiore	0,0149
Limite superiore	0,0191

Tabella 5.18: Calcolo dei limiti di accettabilità teorici per il test di ipotesi

Dal confronto dei valori medi di colonna, riportati in Tabella 5.17 con i limiti teorici calcolati, si nota che alcuni valori della media di colonna (evidenziati in rosso in Tabella 5.17) sono al di fuori dei limiti teorici calcolati. Poiché si realizza questa condizione nulla si può dire circa la veridicità dell'ipotesi nulla.

Per avere una maggiore certezza del risultato ottenuto, si effettua ancora un test di ipotesi, ma stavolta tenendo in considerazione la varianza delle colonne.

I valori di varianza sono riportati in Tabella 5.19

Sup.	Sup.	Sup.	Sup.	Sup.	Sup.	Sup.	Sup.	Sup.	Sup.	Sup.	Sup.	Sup.	Sup.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
4,6·	1,8∙	4,5∙	4,3·	1,5∙	1,1∙	1,4∙	8,9∙	8,3∙	6,9∙	8,5∙	1,4·	2,9·	1,3∙
10⁻6	10⁻ ⁶	10⁻ ⁶	10 ⁻⁶	10⁻⁵	10⁻⁵	10 ⁻⁵	10⁻ ⁶	10⁻ ⁶	10⁻ ⁶	10⁻ ⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10⁻⁵

Tabella 5.19: Varianza delle colonne di Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.

In Tabella 5.20 sono riportati invece i dati necessari al calcolo e il calcolo dei limiti di accettabilità della varianza.

Numero di rilevazione per la varianza	27
Varianza attesa	8,3 ·10 ⁻⁶
V atteso	26
Livello di fiducia	95%
Limite inferiore di s ²	4,4·10 ⁻⁶
Limite superiore di s ²	1,3·10 ⁻⁵

Tabella 5.20: Dati utili al calcolo dei limiti di accettabilità della varianza

Dal confronto dei dati sperimentali con i limiti calcolati in Tabella 5.20 si nota che alcuni valori sono al di fuori dei limiti calcolati. Per tale ragione, anche questo test nulla può dire circa l'ipotesi nulla posta in origine e quindi si può affermare che l'angolo di inclinazione delle superfici ha influenza sulla rugosità superficiale che si ottiene.

Un altro esame dei dati sperimentali è stata l'analisi della varianza.

In Tabella 5.21 è riportata la tabella ANOVA per un solo fattore sotto controllo. Come evidente dai risultati mostrati in Tabella 5.21 il rapporto tra le varianze supera di gran lunga il valore della F max ricavato dalla distribuzione di Fisher per un livello di fiducia pari al 95%.

Il fatto che il rapporto delle varianze sia superiore a quello calcolato dalla distribuzione di Fischer consente di affermare con certezza la presenza di effetti sistematici che agiscono sulle superfici e quindi che l'inclinazione delle superfici ha senza dubbio influenza sulla rugosità superficiale.

Causa di variazione	Gradi di libertà	Varianza	Rapporto tra varianze	F max
Fattore esaminato	13	6,64·10 ⁻⁴	79,96	1,75
Errori casuali	364	8,31·10 ⁻⁴		
Totale	377			

Tabella 5.21: Tabella ANOVA nel caso di un solo parametro sotto controllo

Volendo effettuare un'analisi ancora più approfondita, si effettua un'analisi della varianza tenendo sotto controllo due fattori.

Causa di variazione	Gradi di libertà	Somma dei quadrati	Varianza	Rapporto tra varianze	F max
Fattore colonna	13	8,63·10 ⁻³	6,64·10 ⁻⁴	80,49	1,75
Fattore riga	26	2,34·10 ⁻⁴	9,02·10 ⁻⁶	1,09	1,53
Errori totali	338	2,79·10 ⁻³	8,25·10 ⁻⁶		
Totale	377	1,17·10 ⁻²	3,09·10 ⁻⁵		

In Tabella 5.22 è riportata la tabella ANOVA per due fattori sotto controllo.

Tabella 5.22: Tabella ANOVA per due fattori sotto controllo

L'analisi dei risultati mostrati in Tabella 5.22 evidenzia, con maggiore forza, la presenza di differenza sistematiche tra le superfici della stessa replica, poiché il rapporto tra le varianze calcolato è di gran lunga superiore a quello teorico ricavato dalla distribuzione di Fisher per quel dato numero di gradi di libertà e per un livello di fiducia pari al 95%.

L'analisi di Tabella 5.22 mostra invece come il fattore riga, presenti un rapporto di varianze inferiore a quello che si ottiene dalla distribuzione di Fisher. Si può quindi affermare che non vi sono differenze sistematiche tra i vari provini, ovvero che la rugosità tra i vari provini, considerati complessivamente, è omogenea. Tale risultato era già stato messo in luce nel paragrafo 5.2.

In fine sarebbe necessario effettuare un'analisi globale dei dati sperimentali, tramite uno studio di regressione, ma questa porterebbe a risultati di nessuna rilevanza sperimentale, per cui tale analisi non è stata effettuata.

5.4 Analisi della rugosità in relazione alla direzione della superficie

Appurato con le precedenti analisi che la posizione di costruzione sulla piattaforma non ha alcuna influenza sulla rugosità superficiale che si ottiene e che al contrario l'angolo di inclinazione della superficie ha notevole influenza sulla rugosità superficiale che si ottiene dalla costruzione, si vuole adesso analizzare se l'orientamento della superficie, ovvero se questa sia costruita rivolta verso l'alto o verso la piattaforma di costruzione, abbia influenza sulla rugosità superficiale. Per realizzare tale analisi si sono prese in considerazione quattro superfici, due rivolta verso la piattaforma e due rivolta verso l'alto, che presentano il medesimo angolo di inclinazione rispetto alla piattaforma, e queste sono rispettivamente le superfici numero 6 e 7 e le superfici numero 12 e 14 del provino riportato in Figura 4.5 e Figura 4.6.

Sono quindi stati estrapolati i dati sperimentali relativi a queste due superfici, i quali sono riportati in Tabella A.4.

Anche in questo caso, sui dati organizzati come riportato in Tabella A.4, è stata effettuata un'analisi volta ad individuare eventuali incidenti di misura. Si sono quindi individuati il primo quartile, il terzo quartile e la distanza interquartile, dopo di che tramite la relazione 5.2 si sono andati a calcolare il limite massimo e il limite minimo per ogni colonna, valori che consentono di effettuare un'analisi degli "outliers". In questo caso sono presenti alcuni dati effettivamente frutto di errori di misura, evidenziati in rosso nella Tabella A.4.

Per effettuare tale analisi, si sono innanzitutto calcolati: valore medio deviazione standard e numero complessivo di rilevazioni. Questi dati sono riportati in Tabella 5.23.

Successivamente si sono calcolati i dati utili all'identificazione dei limiti di accettabilità delle misure. Si è calcolato quindi il primo quartile, il terzo quartile, la distanza interquartile, riportati in Tabella 5.24.

Tramite la relazione 5.2 si sono identificati i limiti di accettabilità delle misure, aggiungendo il risultato dell'equazione 5.2 al terzo quartile per identificare il limite massimo e sottraendolo al primo quartile per identificare il limite minimo, anch'essi riportati in Tabella 5.24.

Numero di dati	54	
Valore medio	0,0216	mm
Deviazione standard	0,0046	mm
Massimo	0,0331	mm
Minimo	0,0143	mm

Tabella 5.23: Dati utili all'individuazione degli errori accidentali di misura

	positiva	negativa
Quart 3	0,0273	0,0194
Max	0,0331	0,0301
Min	0,0181	0,0143
Quart 1	0,0219	0,0164
Median	0,0233	0,0177
IQR	0,0054	0,0030
Max IQR	0,0357	0,0241
Min IQR	0,0134	0,0117

Tabella 5.24: Grandezze necessarie all'identificazione dei limiti di accettabilità delle misure

Come mostrato nella Tabella A.4 dalle celle con sfondo rosso, l'analisi ha condotto all'identificazione di alcuni valori sperimentali frutto di possibili errori di misura.

Si è condotta un'analisi dei dati sperimentali anche attraverso il metodo di Chauvenet, al fine di identificare eventuali valori sperimentali frutto di errori accidentali durante l'operazione di misura. Tale analisi, ha messo in luce la presenza di un possibile valore frutto di errori di misura. Poiché questo dato andrebbe a traviare i risultati delle successive analisi statistiche, si andranno a rimuovere gli outliers dalle totalità dei dati sperimentali. Questi dati, infatti, sono frutto sicuramente di errori sperimentali. Inoltre, assumendo uno di essi, un valore superiore alla quantità 3·IQR, hanno un pesante effetto sui risultati delle successive analisi statistiche.

I dati sperimentali presi in esame quindi per effettuare le analisi statistiche saranno tutti quelli riportati in Tabella A.4, privati dei due outliers evidenziati.

Con l'obiettivo di analizzare globalmente i dati relativi alla rugosità delle superfici e comprendere se questi si dispongono secondo una distribuzione normale, si realizza una suddivisione dei dati sperimentali in analisi in undici classi, che in accordo con la relazione 5.1 sono sufficienti a operare una giusta discretizzazione dei dati. Il risultato della discretizzazione dei dati e il calcolo degli ulteriori parametri utili alla rappresentazione dell'istogramma della frequenza relativa, sono riportati in Tabella 5.25.

Sfruttando i dati di Tabella 5.25, quindi, è possibile rappresentare l'istogramma della frequenza relativa, riportato in Figura 5.7. Una prima analisi di questo istogramma mostra già la tendenza dei dati sperimentali ad allontanarsi dalla distribuzione normale: in particolare, i dati sperimentali, tendono ad allontanarsi dalla distribuzione normale, spostandosi verso destra.

Classe	Da	А	Valore medio	f _a	fr	Densità di freq.	Distribuzione normale
	[mm]	[mm]	[mm]			[mm ⁻¹]	[mm ⁻¹]
1	0,00573	0,00852	0,00712	0	0,000	0,0	0,14
2	0,00852	0,01131	0,00991	0	0,000	0,0	1,51
3	0,01131	0,01410	0,01271	0	0,000	0,0	9,62
4	0,01410	0,01689	0,01550	16	0,151	54,1	36,10
5	0,01689	0,01968	0,01829	25	0,236	84,5	79,81
6	0,01968	0,02247	0,02108	27	0,255	91,3	103,97
7	0,02247	0,02526	0,02387	23	0,217	77,8	79,81
8	0,02526	0,02805	0,02666	8	0,075	27,0	36,10
9	0,02805	0,03084	0,02945	7	0,066	23,7	9,62
10	0,03084	0,03364	0,03224	0	0,000	0,0	1,51
11	0,03364	0,03643	0,03503	0	0,000	0,0	0,14

Tabella 5.25: Suddivisione dei dati sperimentali in classi e calcolo ulteriori parametri utili alla rappresentazione dell'istogramma della frequenza relativa.

Al fine di convalidare numericamente tale osservazione, si effettua il test del χ^2 .



Figura 5.7: Istogramma della frequenza relativa

Sfruttando ancora la suddivisione in classi operata in Tabella 5.25, si procede al calcolo della frequenza relativa teorica, della frequenza assoluta teorica e della variabile aleatoria W, ottenendo quanto riportato in Tabella 5.26. Sommando i dati dell'ultima colonna di Tabella 5.26 si ottiene il valore del χ^2 sperimentale, che deve essere confrontato con i limiti teorici ricavati dalla distribuzione teorica del χ^2 per il livello di fiducia ipotizzato, in questo caso pari al 95%, e per il numero di gradi di libertà disponibili in questo caso, pari ad otto.

Al fondo della Tabella 5.26 è riportato il valore del χ^2 sperimentale ottenuto per i dati in esame, mentre dalla distribuzione del χ^2 si ottengono i seguenti limiti di accettabilità:

- Limite inferiore di χ^2 =2,18;

Da	А	f _{rt}	f _{at}	fa	(fa - f _{at})²/f _{at}
[mm]	[mm]				
0,00573	0,00852	0,0005	0,1	0	0,05
0,00852	0,01131	0,0049	0,5	0	0,52
0,01131	0,01410	0,0291	3,1	0	3,08
0,01410	0,01689	0,1031	10,9	16	2,35
0,01689	0,01968	0,2204	23,4	25	0,11
0,01968	0,02247	0,2839	30,1	27	0,32
0,02247	0,02526	0,2204	23,4	23	0,01
0,02526	0,02805	0,1031	10,9	8	0,79
0,02805	0,03084	0,0291	3,1	7	4,99
0,03084	0,03364	0,0049	0,5	0	0,52
0,03364	0,03643	0,0005	0,1	0	0,05
			χ ² sperim	entale	12,79

- Limite superiore di χ^2 =17,53;

Tabella 5.26: Dati per il calcolo del χ^2 sperimentale

Come evidente dal confronto tra il valore del χ^2 sperimentale e i limiti del χ^2 determinati, il χ^2 sperimentale si pone all'interno dei limiti teorici e questo consente di affermare che i dati sperimentali si dispongono secondo una disposizione normale. Questo fatto implica l'assenza di errori di natura sistematica nei dati sperimentali. Tale risultato è messo in luce anche dall'analisi del grafico di probabilità normale riportato in Figura 5.8.



Figura 5.8: Grafico di probabilità normale relativo ai dati sperimentali

L'analisi dell'andamento del grafico di probabilità normale mostra come effettivamente i dati si dispongano in maniera normale. I dati, infatti, sono disposti lungo la retta e solo alle estremità questi si distaccano dalla distribuzione normale. Tuttavia, i dati che si distaccano dalla distribuzione normale sono pochi, e quindi il fatto che ci siano è poco significativo.

Una volta studiata la distribuzione dei dati sperimentali si è effettuato il test di ipotesi, con lo scopo di smentire la seguente ipotesi nulla:

 H_0 : Il verso delle superfici, ovvero se rivolte verso l'alto o verso la piattaforma, non ha influenza sulla rugosità superficiale che si ottiene.

Il primo test di ipotesi è stato effettuato considerando la media delle colonne di Tabella A.4. Si sono confrontati i valori delle medie calcolati e riportati in Tabella 5.27 con i valori teorici ricavati dalla cumulata della probabilità normale, riportati in Tabella 5.28.

positiva	negativa
0,0225	0,0197

Tabella 5.27: Valori di media delle colonne dei dati sperimentali

Numero di campioni mediati	53
Media	0,0211
Deviazione standard media	0,0005
Livello di fiducia	95%
Limite inferiore	0,02
Limite superiore	0,0221

Tabella 5.28: Calcolo dei valori limite per la realizzazione del test di ipotesi

Dal confronto dei valori medi ricavati, con i valori limite, si vede come i valori sperimentali sono fuori dai limiti, per cui il test di ipotesi fallisce, ovvero nulla si può dire in merito all'ipotesi nulla posta in precedenza.

Un ulteriore test d'ipotesi si esegue, ma stavolta prendendo in considerazione la varianza delle colonne e non la media.

La varianza delle colonne di Tabella A.4 è riportata in Tabella 5.29

positiva	negativa
$1.3 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$

Tabella 5.29: Varianza delle colonne di Tabella A.4

Mentre il calcolo dei valori limite per effettuare il test di ipotesi è effettuato, ottenendo i risultati di Tabella 5.30

Numero di campioni per la varianza	53
Varianza attesa	$1,3 \cdot 10^{-5}$
V atteso	52
Livello di confidenza	95%
Limite inferiore di s ²	$8.4 \cdot 10^{-6}$
Limite superiore di s ²	$1.8 \cdot 10^{-5}$

Tabella 5.30: Calcolo dei limiti di accettabilità varianza

Dal confronto dei valori sperimentali, ricavati in Tabella 5.29 con i valori teorici ricavati in Tabella 5.30 si nota come la varianza ottenuta dai dati sperimentali ricada all'interno dei limiti teorici. Si può quindi smentire l'ipotesi nulla ed affermare che il verso di orientamento delle superfici ha influenza sulla rugosità superficiale che si ottiene nelle repliche.

I due test d'ipotesi effettuati, uno sulla media dei dati e uno sulla varianza, hanno riportato due risultati contrastanti tra loro. Una spiegazione plausibile sta nel fatto che i dati sperimentali sono soggetti a qualche fattore che ha effetto sulla media dei dati sperimentali ma non sulla varianza degli stessi. Tale risultato è ulteriormente evidenziato eseguendo l'analisi della varianza. Questa è stata effettuata dapprima tenendo in considerazione un solo parametro sotto controllo e successivamente prendendone in considerazione due.

In Tabella 5.31 è riportata la tabella ANOVA nel caso di un solo fattore sotto controllo

Causa di variazione	Gradi di libertà	Varianza	Rapporto tra le varianze	F Max
Fattore esaminato	1	2,08 ·10 ⁻⁴	9,98	3,93
Errori casuali	106	2,08·10 ⁻⁵		
Totale	107			

Tabella 5.31: Schema ANOVA per un solo fattore sotto controllo

Come evidente da quanto riportato in Tabella 5.31 il rapporto tra le varianze eccede di fatto il valore della F max ricavato come cumulata della distribuzione di Fischer per un livello di fiducia pari al 95% ed un solo grado di libertà.

Questo implica, di fatto, la presenza di differenze sistematiche tra le superfici positive e le superfici negative, che era il risultato già ottenuto con il test d'ipotesi condotto tramite la varianza.

Volendo approfondire ulteriormente l'analisi dei dati, si effettua ancora un'analisi della varianza, ma stavolta tenendo sotto controllo due fattori.

In Tabella 5.32 è riportato lo schema ANOVA per due fattori sotto controllo.

Causa di Variazione	Gradi di libertà	Somma dei Quadrati	Varianza	Rapporto delle Varianze	F max
Fattore colonna	1	2,08·10 ⁻⁴	2,08·10 ⁻⁴	9,06	4,02
Fattore riga	53	9,93·10 ⁻⁴	1,87·10 ⁻⁵	0,82	1,58
Errori casuali	53	1, 22 ·10 ⁻³	2,3 ·10 ⁻⁵		
Totale	107	2,42 ·10 ⁻³	2,26 ·10 ⁻⁵		

Tabella 5.32: Schema ANOVA per due fattori sotto controllo

Analizzando quanto riportato in Tabella 5.32 risulta evidente, ancora una volta, come la differenza tra le colonne sia sistematica, ovvero come ci sia una differenza sistematica tra le superfici positive e le superfici negative.

In merito alle righe, invece, nulla è possibile di circa la presenza di differenze sistematiche, in quanto il rapporto delle varianze è inferiore alla Fmax ricavata dalla distribuzione di Fisher.

5.5 Modello di regressione per studio di superfici positive e negative

Appurato dunque, con il precedente studio, che il verso delle superfici è influente sulla rugosità superficiale che si ottiene, si vuole a questo punto effettuare uno studio di regressione per individuare l'eventuale presenza di effetti sistematici e la sorgente di questi effetti.

Si comincia, quindi, studiando le superfici positive, ovvero quelle rivolte verso l'alto. I dati vengono organizzati come riportato in Tabella A.5 presente in appendice.

Questi dati sono impiegati per costruire il modello di regressione e per svolgere tale compito si fa ricorso al software Minitab (R 17.1 Minitab). Una volta importati i dati sperimentali all'interno del software si effettua un'analisi di regressione, scegliendo il modello lineare.

Il software consente di ricavare il modello di regressione, i cui risultati sono riportati in Figura 5.9. Questo è descritto dall'equazione 5.12

$$y = 0.00316 + 0.00294x \tag{5.12}$$



Figura 5.9: Modello di regressione per le superfici rivolte verso l'alto.

Nell'equazione 5.12 la variabile indipendente x rappresenta l'angolo di inclinazione della superficie rispetto alla piattaforma di costruzione. La variabile dipendente y corrisponde, invece, alla rugosità superficiale, rappresentata in questo caso dal parametro Ra.

Il modello di regressione lineare ricavato dai dati sperimentali descrive i dati con un R² pari a 79.7%.

Il fattore R², noto come coefficiente di determinazione, rappresenta la percentuale di variazione della varianza della variabile dipendente e varia da 0% a 100%. In pratica tanto più alto è il valore assunto da questa variabile, tanto meglio sono descritti i dati sperimentali dal modello di regressione lineare ricavato.

In questo caso, un valore pari a 79.7% è un valore molto alto ed indica che i dati sperimentali sono ben descritti dal modello di regressione ricavato.

Volendo andare ad indagare ulteriormente la bontà del modello di regressione ricavato, quello che si può fare è andare a studiare l'andamento dei residui.

Tale andamento è riportato in Figura 5.10.



Figura 5.10: Andamento dei residui al variare dell'ordine di osservazione

Come risulta evidente dall'andamento dei segni dei residui, questi sono molto ben dispersi, indice del fatto che il modello di regressione ricavato descrive molto bene i dati sperimentali.

Quello che si nota, studiando l'andamento del modello di regressione ricavato e riportato in Figura 5.9 è che la rugosità superficiale aumenta man mano che si riduce l'angolo di inclinazione della superficie rispetto alla piattaforma di costruzione. Tale risultato era già stato messo in luce nel paragrafo 5.3 dove si era analizzata l'influenza dell'angolo di inclinazione della superficie sulla rugosità superficiale.

Si procede quindi con l'analisi delle superfici rivolte verso la piattaforma di costruzione. I dati impiegati sono riportati in Tabella A.6 presente in appendice. In questo caso sono stati inseriti in un'unica colonna tutti i valori della rugosità superficiale relativi alle superfici rivolte verso la piattaforma di costruzione.

Ancora una volta si sono riportati questi dati, cosi come presentati in Tabella A.6 in Minitab e si è andato a realizzare un modello di regressione lineare.

Il risultato del modello è mostrato in Figura 5.11

In questo caso il modello di regressione lineare ottenuto è descritto dall'equazione 5.13

$$y = 0.01774 + 0.000126x \tag{5.13}$$

Anche i questo caso la variabile dipendente y rappresenta la rugosità superficiale, mentre la variabile indipendente x rappresenta l'angolo di inclinazione della superficie rispetto alla piattaforma di costruzione.

Il modello ricavato, tuttavia, ha un R² pari a 0.7%, che è un valore molto basso. Questo indica, senza dubbio, che il modello lineare utilizzato per la descrizione dei dati sperimentali delle superfici rivolte verso la piattaforma di costruzione non è adeguato.





Una ulteriore prova dell'inadeguatezza del modello sperimentale lineare è data dall'andamento dei residui al variare dell'ordine di rilevazione, riportato in Figura 5.12.

Studiando il segno di tali residui, si nota come questi presentino la tendenza ad assumere segno negativo, quindi presentando un sostanziale raggruppamento nella parte negativa.

Ancora una volta questo è indice dell'inadeguatezza del modello lineare a descrivere correttamente i dati sperimentali.

Dato che il modello lineare non è in grado di dare una buona descrizione dei dati sperimentali, si prova ad adottare il modello parabolico.

In Figura 5.13 è riportato il modello parabolico ricavato dai dati sperimentali relativo alle superfici negative.



Figura 5.12: Andamento dei residui al variare dell'ordine di osservazione.



Figura 5.13: Modello di regressione parabolico

Il modello di regressione parabolico ottenuto è descritto dall'equazione 5.14

$$y = 0.0465 + 0.0053x + 0.00025x^2 \tag{5.14}$$

Dove, ancora una volta la variabile dipendente y rappresenta la rugosità superficiale Ra, mentre la variabile indipendente x rappresenta l'angolo di inclinazione della superficie rispetto alla piattaforma di costruzione. Il modello di regressione parabolico è in grado di descrivere meglio i dati sperimentali relativi alle superfici negative, in quanto presenta un R² pari a 8.3%, più alto di quello assunto dal modello lineare. Tuttavia, tale valore resta ancora basso, per cui il modello non sembra ancora essere sufficientemente adeguato alla descrizione dei dati sperimentali, anche se in grado di descrivere meglio i dati sperimentali.

Una ulteriore indicazione in merito alla adeguatezza del modello di regressione scelto, si ha considerando il segno dei residui al variare della sequenza di rilevazione dei dati sperimentali.

In Figura 5.14 è riportato il grafico in cui è rappresentato l'andamento dei residui al variare della sequenza di rilevazione.



Figura 5.14: Andamento dei residui al variare della sequenza di rilevazione

Analizzando l'andamento dei residui, si nota come ci sia effettivamente una migliore distribuzione dei segni, rispetto al caso in cui si era fatto ricorso al modello di regressione lineare. Tuttavia, i segni dei residui mostrano ancora la tendenza a raggrupparsi nella parte negativa del grafico. Questo è ancora indice della scarsa adeguatezza del modello parabolico a descrivere i dati sperimentali.

Si è quindi effettuato un ulteriore tentativo, provando ad impiegare un modello cubico per descrivere i dati sperimentali.

In Figura 5.15 è riportato il modello cubico ricavato per i dati in esame.



Figura 5.15: Modello di regressione cubico

Il modello di regressione cubico è descritto dall'equazione 5.15

$$y = 0.05513 + 0.00773x + 0.000473x^2 + 0.000007 x^3$$
 (5.14)

Il modello cubico ricavato, tuttavia non è la soluzione al problema, poiché anche in questo caso presenta un R² pari a 8.4%, che resta sicuramente migliore di quello del modello lineare, ma comunque basso.

Occorre quindi andare a ricercare quale sia la ragione per cui non si riesce ad individuare un modello di regressione che descriva bene i dati sperimentali.

La ragione potrebbe essere individuata nella distribuzione termica all'interno del volume di lavoro della macchina. È già un aspetto noto il fatto che la temperatura, all'interno del volume di lavoro, non si distribuisca in maniera omogenea.

In Figura 5.16 è riportato l'andamento della rugosità superficiale (la media delle tre rilevazioni a, b e c eseguite come riportato in Figura 4.14) della superficie 8 (Figura 4.6) di tutti i provini.

L'analisi di questo grafico potrebbe portare ad una spiegazione plausibile delle cause per cui non si riesce a trovare un modello di regressione in grado di spiegare correttamente l'andamento dei dati sperimentali. Concentrando l'attenzione sui provini della prima riga (si faccia riferimento alla Figura 4.7), ovvero quelli marcati dal numero 1, si nota come la rugosità superficiale sia molto alta per la superficie 8 del provino 1A, come poi vada a decrescere per il provino 1B e poi torni a salire per il provino 1C.Questo andamento della rugosità superficiale si spiega per quanto già detto al paragrafo 4.3, ovvero che i provini disposti nella riga 1 sono quelli più vicini alla porta di accesso al volume di lavoro della macchina. In particolare, il provino 1A è quello la cui superficie 8 è maggiormente esposta verso l'esterno della macchina, perché da un lato vede la



Figura 5.16: Andamento della rugosità media della superficie 8 su tutte le repliche

porta della macchina (come d'altro canto tutte le repliche della riga 1) ma allo stesso tempo vede anche il limite della piattaforma di costruzione.

La superficie 8 del provino 1B, vede invece solamente il lato della porta della macchina, mentre la replica 1C è ancora posizionata ai limiti esterni della piattaforma di costruzione, per cui si manterrà ancora più fredda rispetto alle altre parti e questo potrebbe spiegare l'andamento della rugosità media della superficie 8.

Analizzando, invece, l'andamento della rugosità superficiale nel caso delle repliche della terza riga, si nota come questa, di fatto, sia molto più bassa e presenti meno variazioni tra le repliche della stessa riga. La ragione di questo andamento potrebbe essere spiegata ancora una volta dalla posizione della terza riga sulla piattaforma di costruzione. In questo caso, infatti, la terza riga si trova nel fondo della macchina, che è una parte meno esposta verso l'esterno e che quindi si mantiene più calda. L'andamento dei dati di rugosità, tuttavia, non è omogeneo per tutte le superfici rivolte verso la piattaforma di costruzione.



In Figura 5.17 è riportato l'andamento della rugosità superficiale media per la superficie 13.

Figura 5.17: Andamento della rugosità superficiale media per la superficie 13 di tutte le repliche

Studiando tale andamento e confrontandolo con quello ottenuto per la superficie 8 riportato in Figura 5.16, si nota come di fatto l'andamento dei dati sperimentali relativi alla rugosità sia sostanzialmente diverso.

In definitiva quello che si può ricavare dalle analisi fin qui condotte è che la diversa temperatura nelle varie zone della piattaforma di costruzione, che dai dati seprimentali ottenuti non sembra avere alcun effetto sulla rugosità superficiale delle superfici rivolte verso l'alto, sembra invece avere una forte influenza sulle superfci rivolte verso la piattaforma di costruzione, tanto che non è possibile ricavare un modello di regressione in grado di descrivere correttamente l'andamento dei dati sperimentali.

Occorre quindi indagare ulteriormente l'effetto che ha la distribuzione del calore sulle superfici rivolte verso la piattaforma di costruzione conducendo ulteriori analisi statistiche su queste superfici al fine di accertarsi che la variazione della rugosità superficiale sia dovuta alla differente distribuzione del calore all'interno del volume di lavoro, con l'obiettivo finale di sviluppare un modello di regressione che sia in grado di spiegare correttaemente l'andamento dei dati seprimentali.

Tali analisi, tuttavia, non sono state effettuate e si rimanda ad un eventuale lavoro successivo che approfondisca ulteriormente l'andamento di questa rugosità superficiale.

6. VALUTAZIONE DELL'ACCURATEZZA DIMENSIONALE

Un'altra criticità dei processi di fabbricazione additiva è l'accuratezza dimensionale. Nelle tecniche di fabbricazione additiva e quindi anche nella tecnica Electron Beam Melting (EBM) sono numerosi i parametri che hanno influenza sull'accuratezza dimensionale e spesso sono in relazione tra loro.

In questa tecnica, così come nelle altre, il modello CAD del componente da realizzare deve essere convertito nel formato STL, che è quello accettato dalla macchina di produzione e nel quale vengono approssimate le superfici del modello solido con dei triangoli di dimensione variabile. Ovviamente, maggiore sarà il numero di triangoli e quindi minore sarà la loro dimensione, migliore sarà la capacità del file STL di approssimare realmente le superfici del componente tridimensionale, tuttavia la dimensione del file sale molto al crescere del numero di triangoli e questo dà origine ad un file difficile da impiegare da parte del software della macchina. Al contrario, fare ricorso a triangoli di dimensioni superiori riduce le dimensioni del file che la macchina dovrà andare a processare, ma in questo modo i triangoli saranno meno capaci di approssimare correttamente la superficie del pezzo. Questo, quindi, da origine ad errori dimensionali, perché le varie geometrie che costituiscono i pezzi non potranno essere ben approssimate [46].

Altro parametro che produce imprecisione dimensionale è la distribuzione della granulometria della polvere di metallo impiegata nel processo produttivo. In particolare, più fine sarà la polvere impiegata nella produzione migliore sarà la finitura superficiale in termini di rugosità e quindi di accuratezza dimensionale [46]. Nel caso della tecnica EBM, tuttavia, come già discusso nel paragrafo 2.3, la scelta della granulometria della polvere da impiegare nella produzione non può essere fatta a piacere, ma sarà necessario scegliere in funzione di altri fenomeni che si verificano durante la produzione.

Un altro fenomeno che ha effetto sull'accuratezza dimensionale, è il ritiro non uniforme che si potrebbe realizzare durante la solidificazione del metallo fuso. Per porre rimedio a questa situazione, infatti, si fa ricorso a strutture di supporto con l'obiettivo di vincolare il ritiro dei nuovi layer depositati, cercando di andare ad eliminare la deformazione dimensionale che questo fenomeno genera. La distorsione dimensionale, inoltre, si verifica maggiormente in tutti quei casi in cui sono presenti delle sezioni massive che operano da zona di accumulo di calore. In questo caso, la presenza dei supporti non è più sufficiente a garantire lo smaltimento del calore durante la solidificazione della parte e quindi non si riesce a garantire la migliore accuratezza dimensionale [46].

L'accuratezza dimensionale dei principali processi di fabbricazione additiva è stata molto indagata, tanto che molti dei manufatti presenti in [40] vengono impiegati oltre che per compiere valutazioni di carattere superficiale anche per effettuare valutazioni di carattere dimensionale. Tuttavia, in merito all'accuratezza dimensionale del processo EBM sono stati condotti pochi studi.

Il lavoro condotto da Franchitti et al. [46] ha studiato l'effetto dell'orientazione del componente, la posizione del componente nella piattaforma di costruzione e l'altezza del componente nel volume di lavoro per andare a determinare quale fosse l'accuratezza dimensionale del processo e la ripetibilità di questa accuratezza dimensionale. Le analisi statistiche sui dati sperimentali ottenuti da Franchitti et al. consentono di affermare che la tecnica EBM ha una buona ripetibilità in termini di accuratezza dimensionale. Inoltre, Franchitti et al. hanno messo in mostra come i parametri che hanno maggiore influenza sull'accuratezza dimensionale siano l'inclinazione della superficie rispetto alla piattaforma di costruzione e la posizione del componente all'interno del volume di lavoro.

Volendo quindi ulteriormente indagare quali fossero le capacità del processo EBM in termini di tolleranze dimensionali, si è pensato di adottare un componente già pensato per effettuare valutazioni in termini di accuratezza dimensionale, ovvero il componente pensato da Minetola et al [47] per compiere valutazioni dimensionali circa le tolleranze dimensionali e geometriche dei processi di additive ed a oggi convalidato mediante processi polimerici, quale la Fused Deposition Modelling (FDM).

La Figura 6.1 mostra il benchmark adottato da Minetola et al. per compiere le analisi di accuratezza dimensionale. Questo componente presenta una serie di elementi, utili a compiere le valutazioni necessarie a caratterizzare l'accuratezza dimensionale della macchina in esame.

In particolare, nel benchmark, sono presenti:

- Un set di sette blocchi rettangolari (BL);
- Un set di sette cave di profondità diversa, incluse all'interno di un parallelepipedo più grande (SL);

100

- Un set di sette gradini (ST);
- Due coppie di coni coassiali troncati (TC1 e TC2);
- Due set di cilindri coassiali (CC1 e CC2)
- Due set di semicilindri (HC1 e HC2);
- Quattro set di quarti di sfera (SP1, SP2, SP3 e SP4);
- Tre set di piani inclinati (TP1, TP2 e TP3);



Figura 6.1: Modello CAD del benchmark adottato da Minetola et al. per valutazioni dimensionali sulla tecnica FDM; fonte [47]

Le dimensioni complessive del benchmark sono pari a 110 x 110 x 33 mm³ e per ognuno degli elementi utili ad effettuare le misure dimensionali, il lavoro di Minetola et al. riporta maggiori indicazioni circa la disposizione all'interno del componente e le relative dimensioni.

Le indicazioni circa la produzione tramite FDM impongono che il pezzo venga realizzato con la base attaccata direttamente alla piattaforma di costruzione della macchina.

Il benchmark introdotto da Minetola et al., tuttavia non può essere prodotto direttamente tramite la tecnica EBM così come viene realizzato tramite la tecnica FDM. Infatti questo presenta alcune caratteristiche che non ne consentono la produzione diretta nella macchina EBM.

La base del benchmark, ad esempio, è costituita da un parallelepipedo di dimensioni pari a 110 x 110 x 5 mm³. Le indicazioni costruttive fornite dal produttore della macchina EBM,

Arcam AB, raccomandano di non realizzare mai delle sezioni massive con dimensione massima superiore ai 90 mm. La ragione per cui si sconsiglia la realizzazione di queste sezioni sta nel fatto che una tale sezione, durante il raffreddamento presenta un ritiro tale che porta ad una deformazione, dovuta al ritiro del materiale, dello strato appena solidificato.

Il ritiro del materiale provoca quindi una deformazione dello strato appena solidificato, con gli estremi che tendono a sollevarsi verso l'alto, andando ad impedire il corretto movimento della lama che distribuisce la polvere.

In questo caso, poiché il benchmark presenta una base quadrata, non ci può essere un'orientazione che consente la realizzazione del pezzo senza superare la dimensione massima ammessa pari a 90 mm.

Il produttore della macchina indica inoltre come sia necessario porre dei supporti in quelle zone del componente particolarmente critiche, ovvero tutte quelle superfici che presentano un angolo di inclinazione superiore ad un determinato angolo o quelle zone particolarmente massive, in cui i supporti fungono da ausilio nello smaltimento del calore prodotto.

Poiché lo scopo di questo lavoro è quello di andare a valutare la capacità della macchina in termini di tolleranze dimensionali in fase di produzione sono stati adottati tutti quelle indicazioni fornite dal produttore della macchina, per ottenere dei pezzi della qualità migliore possibile.

Il pezzo, dunque, è stato leggermente modificato, andando a svuotare la base sulla quale vengono costruiti tutti i componenti, che non presenta più una sezione di 5 mm ma è più sottile, essendo stata realizzata con uno spessore pari a 2 mm.

Il disegno del benchmark, in formato STL è stato importato all'interno del software Magics (R21.1, Materialise Magics), in cui è installato il Build Processor con il set di parametri standard per il Ti6Al4V per la produzione mediante Arcam A2X con spessore del layer di 50 μm.

Il componente viene posizionato in posizione centrale sulla piattaforma di costruzione. Inoltre, la produzione non avviene posizionando la base del benchmark direttamente sulla piattaforma di costruzione, ma alzandolo leggermente lungo l'asse z della macchina (asse ortogonale alla piattaforma di costruzione con verso positivo dato da quello di allontanamento dalla piattaforma) di una quantità tale per cui non ci sia interferenza tra il pezzo e la piattaforma.
Il pezzo è stato inoltre ruotato di 23° rispetto all'asse x e di 23° rispetto all'asse y. Questi angoli sono quelli per cui si ottiene una distribuzione del materiale nei vari layer migliore. Inoltre, inclinando il pezzo di questa quantità nessun componente interno al benchmark ha bisogno di supporti.

In Figura 6.2 è visibile una rappresentazione del posizionamento e dell'orientamento scelto per la produzione del componente.



Figura 6.2: Posizionamento del benchmark ideato da Minetola et al. all'interno del volume di lavoro della macchina

All'interno del software Magics sono stati aggiunti i supporti alla base del pezzo, perché questa è ancora una zona critica, che potrebbe portare alla distorsione del pezzo. I supporti adottati sono necessari per favorire lo scambio termico e quindi prevenire eventuali deformazioni del componente dovute ad effetti termici.

Come detto precedentemente, l'orientamento del componente nello spazio è tale per cui non è necessario inserire nessun supporto alle superfici utili ad effettuare le rilevazioni dimensionali. Questo è un aspetto importante, poiché l'operazione di rimozione dei supporti dai componenti interni del benchmark andrebbe a determinare un deterioramento delle caratteristiche dimensionali, compromettendo di fatto il risultato della misura. In Figura 6.3 è quindi rappresentato il componente con i supporti alla base. La tecnica EBM offre la possibilità di non connettere i supporti posti per sorreggere la base del pezzo obbligatoriamente alla piattaforma di costruzione, tuttavia è stata effettuata tale scelta per favorire ulteriormente la dissipazione del calore accumulato alla base del benchmark, oltre che per avere una base di appoggio piana che favorisca le procedure di rilevazione dimensionale.



Figura 6.3: Posizionamento del benchmark ideato da Minetola et al. all'interno del volume di lavoro, con i supporti che lo collegano alla piattaforma di costruzione.

Una volta effettuato il posizionamento del componente nel volume di lavoro virtuale, si imposta per il benchmark il tema "Melted", mentre per i supporti si imposta il tema "Wafer". Successivamente il file viene convertito in linguaggio macchina tramite il Build processor (file abp). Il file così generato viene inviato alla macchina e si può dare avvio alla produzione del componente. La macchina era stata precedentemente preparata ed era già stato prodotto il vuoto all'interno di essa.

La produzione del componente ha comunque seguito le stesse fasi riportate nel paragrafo 4.3. A valle della produzione si è effettuata una sabbiatura del componente adottando ancora la stessa polvere impiegata nella produzione. In questo modo la polvere ricavata può essere ulteriormente utilizzata nella produzione di altri componenti.

Durante la fase di pulitura e rimozione della polvere non sinterizzata i supporti posti alla base del benchmark si sono staccati dalla piattaforma, poiché questa è costituita di un materiale

diverso rispetto a quello impiegato nella produzione. La presenza di un'interfaccia tra i due materiali, quindi, ha favorito il distaccamento dalla piattaforma.



La Figura 6.4 mostra il componente ottenuto dopo l'operazione di sabbiatura e la pulizia.

Figura 6.4: Benchmark pensato da Minetola et al. realizzato tramite la tecnica EBM. Alla base sono ancora presenti i supporti impiegati nella produzione

Il componente così realizzato è stato analizzato, con lo scopo di ricavarne le dimensioni principali, tramite uno scanner "ATOS compact scan" prodotto dall'azienda GOM.

La Figura 6.5 mostra l'apparato sperimentale adottato per la rilevazione delle dimensioni effettive del componente realizzato tramite EBM.

Il componente è stato ricoperto da una polvere necessaria a renderlo opaco e successivamente sono stati applicati dei marker necessari allo scanner per avere dei punti di riferimento.

Per effettuare la rilevazione si è fatto ricorso al software ATOS (R 2016 GOM Software 2016). Il software impiega le rilevazioni effettuate dallo scanner per realizzare una mesh tridimensionale che contiene le misure sperimentali. Questi dati sono immediatamente disponibili e possono essere utilizzati per effettuare un confronto con le misure nominali del componente.



Figura 6.5: Apparato sperimentale adottato per la rilevazione delle misure effettive del pezzo prodotto

La Figura 6.6 mostra la mesh tridimensionale generata dal software a partire dalle rilevazioni effettuate tramite lo scanner.



Figura 6.6: Mesh tridimensionale generata a partire dalle scansioni

Questa mesh è stata quindi importata all'interno del software GOM Ispect (R 2018, hotfix2, GOM software 2018). Questo software consente di effettuare il confronto tra e dimensioni degli elementi realizzati e le dimensioni nominali.

Purtroppo, a causa dell'elevata rugosità superficiale del componente realizzato, lo scanner non è stato in grado di ricostruire interamente il componente realizzato. Per questa ragione soltanto alcuni elementi del benchmark sono stati utilizzati per compiere rilevazioni dimensionali.

Feature	Nominale	Misurato	Deviazione	Deviazione ass.	i	n	IT
-	mm	mm	mm	mm	μm	-	-
CL1.1	24	23,78	-0,22	0,22	1,307375	168,2761	13
CL1.2	16	15,84	-0,16	0,16	1,082696	147,7793	12
CL1.3	8	7,84	-0,16	0,16	0,898117	178,1505	13
CL1.4	4	3,89	-0,11	0,11	0,732734	150,1226	12
CL2.1	24	24,2	0,2	0,2	1,307375	152,9783	12
CL2.2	16	16,08	0,08	0,08	1,082696	73,88963	11
CL2.3	8	8,07	0,07	0,07	0,898117	77,94084	11
CL2.4	4	3,97	-0,03	0,03	0,732734	40,94253	10
SP1.1	24	23,77	-0,23	0,23	1,307375	175,925	13
SP1.2	24	23,63	-0,37	0,37	1,307375	283,0098	14
SP2.1	16	16,04	0,04	0,04	1,082696	36,94481	9
SP3.1	8	8,26	0,26	0,26	0,898117	289,4946	14
SP4.1	4	4,68	0,68	0,68	0,732734	928,0308	16

La Tabella 6.1 riporta il confronto tra le dimensioni effettive e le dimensioni nominali dei componenti analizzati.

Tabella 6.1: Confronto tra le dimensioni effettive del componente realizzato e le dimensioni nominali e calcolo del grado IT di precisione.

La nomenclatura adottata in Tabella 6.1 è meglio chiarita in Figura 6.7.



Figura 6.7: Nomenclatura delle geometrie interne al benchmark

7. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stata analizzata approfonditamente la tecnica Electron Beam Melting (EBM) e in particolare sono state prese in esame la rugosità superficiale e le tolleranze dimensionali dei pezzi prodotti tramite EBM.

Inizialmente è stata presa in esame la rugosità superficiale ed è stata effettuata una prima ricerca bibliografica per identificare quali sono i parametri costruttivi e di processo, che hanno maggiore influenza su questa. Tale analisi ha messo in luce come non vi siano studi completi ed esaustivi circa questa tematica. Con il presente lavoro, quindi, si è cercato di colmare le lacune messe in evidenza con l'analisi della letteratura ed affrontare uno studio completo in merito alla rugosità superficiale. In particolare, è stato analizzato l'effetto sulla rugosità dell'inclinazione della superficie rispetto alla piattaforma di costruzione e del verso di costruzione, ovvero se le superfici sono rivolte verso l'alto o verso la piattaforma cercando di escludere effetti dovuti ad accumuli termici.

Si è giunti alla definizione di un provino utile a compiere queste valutazioni, che è stato prodotto tramite la macchina Arcam A2X di cui si dispone presso il laboratorio IAM del Politecnico di Torino.

A valle della realizzazione delle repliche sono state effettuate delle misure di rugosità su tutte le superfici tramite un rugosimetro. I dati sperimentali ottenuti sono stati analizzati tramite gli strumenti messi a disposizione dalla statistica descrittiva e inferenziale, con lo scopo di ottenere valutazioni oggettive in merito alla reale influenza dei parametri analizzati, sulla rugosità superficiale.

Le analisi statistiche condotte hanno consentito di mostrare che la posizione sulla piattaforma di costruzione ha una scarsa influenza sulla rugosità superficiale complessiva che si ottiene per le varie repliche, mentre l'angolo di inclinazione della superficie rispetto alla piattaforma di costruzione è molto influente sulla rugosità superficiale e il verso di orientamento della superficie, ovvero se rivolta verso l'alto o verso la piattaforma di costruzione, è anch'esso influente sulla rugosità superficiale che si ottiene per i pezzi prodotti.

In ultimo i dati sperimentali sono stati analizzati globalmente, per ricavare ulteriori informazioni circa i parametri più influenti sulla rugosità superficiale. È stata quindi effettuata un'analisi di regressione, la quale ha consentito di mettere in luce che il fattore che ha più influenza sulla rugosità superficiale delle superfici rivolte verso l'alto è l'angolo di inclinazione della superficie stessa, mentre non si è riuscito ad identificare altrettanto bene quale sia il fattore che ha forte influenza sulla rugosità superficiale delle superfici rivolte verso la piattaforma di costruzione.

Infatti, sebbene anche la rugosità superficiale delle superfici negative risenta dell'effetto dell'angolo di inclinazione rispetto alla piattaforma di costruzione, l'analisi di regressione effettuata tenendo in considerazione solo tale parametro non riesce a descrivere correttamente l'andamento dei dati sperimentali. Da ciò se ne deduce che l'inclinazione delle superfici non è il solo parametro che abbia influenza sulla rugosità superficiale, ma che questa è influenzata da qualche altro fattore, quale potrebbe essere, ad esempio, la distribuzione termica all'interno del volume di lavoro.

Sarà quindi necessario effettuare ulteriori analisi, rimandate ad un eventuale lavoro futuro, che approfondiscano ulteriormente l'andamento della rugosità superficiale per le superfici negative.

In seguito, è stato condotto uno studio della letteratura esistente circa l'accuratezza dimensionale dei pezzi prodotti tramite la tecnica EBM che ha messo in luce come i risultati già ottenuti per questa tecnica siano pochi e di scarso rilievo. Uno degli obbiettivi di questo lavoro, quindi, è stato quello di effettuare uno studio più approfondito di questa caratteristica.

Per analizzare questa capacità, è stato prodotto il benchmark ideato da Minetola et al. La produzione è avvenuta rispettando tutte le indicazioni fornite da Arcam in merito alla corretta inclinazione del pezzo sulla piattaforma, al posizionamento di supporti nelle parti più critiche e alla dimensione massima della sezione da solidificare, con l'obiettivo di ottenere i migliori risultati dalla produzione.

Il benchmark così prodotto è stato misurato facendo ricorso ad uno scanner, dal quale si ottiene una ricostruzione digitale del componente fisico realizzato. Per valutare l'accuratezza dimensionale del processo EBM si effettua un confronto tra le misure del componente ricostruito digitalmente e disegno CAD del benchmark.

Questo confronto ha consentito di ricavare la deviazione delle dimensioni del pezzo costruito dalle dimensioni nominali del pezzo progettato e da questo ricavare il grado di finitura che la macchina è in grado di raggiungere nella produzione delle geometrie incluse nel benchmark adottato per effettuare le valutazioni dimensionali. Uno sviluppo futuro di analisi consentirà di ricavare dai dati acquisiti il grado di accuratezza dimensionale e geometrica del processo di EBM mediante caratterizzazione usando il grado IT.

I risultati sperimentali ottenuti con questo lavoro hanno consentito di indagare ulteriormente le capacità di una tecnica di tecnica di fabbricazione molto innovativa, quale la tecnica Electron Beam Melting. Questi, tuttavia, non costituiscono un punto di arrivo, ma anzi vogliono essere una base per studi futuri che conducano ad una conoscenza più approfondita del processo produttivo, con l'obiettivo di ottenere produzioni di qualità sempre migliore.

RINGRAZIAMENTI

Il primo ringraziamento va al professore Luca Iuliano, il relatore di questo lavoro. Mi ha concesso di dare forma a questa tesi e la possibilità di conoscere il centro interdipartimentale Integrated Additive Manufacturing (IAM@polito), che mi ha accolto durante lo svolgimento della tesi.

Ringrazio l'ingegnere Manuela Galati, correlatrice di questo lavoro, perché già durante lo svolgimento del laboratorio del corso di "Tecniche di Fabbricazione Additiva" è stata fonte di ispirazione e mi ha accompagnato per mano durante tutto lo svolgimento di questo lavoro. Grazie anche per aver visto in me più di quanto io sia stato capace di vedere in me stesso.

Ringrazio il professore Paolo Minetola, senza i cui consigli e sostegno questo lavoro sarebbe risultato senza dubbio incompleto.

Ringrazio, inoltre, la professoressa Flaviana Calignano, per avermi tirato fuori più di una volta da situazioni di impasse, facendo ricorso alla sua infinita esperienza.

Un ringraziamento va anche a tutti i docenti che ho avuto modo di conoscere durante tutto il mio percorso universitario, perché ognuno di essi è riuscito a trasmettermi non solo conoscenze tecniche ma mi ha insegnato come essere veramente un ingegnere.

Ringrazio i miei genitori, per aver sofferto con me quando tutto sembrava andare come non avrebbe dovuto e per aver gioito con me quando c'era da festeggiare. Grazie per aver sempre sostenuto le mie scelte, supportandomi in tutti i momenti difficili, incitandomi ad andare sempre avanti e a non arrendermi.

Ringrazio mia sorella Claudia, che mi ha insegnato caparbietà, intraprendenza e che si può sempre migliorare anche quando i risultati sembrano già entusiasmanti.

Un ringraziamento speciale va al tesoro mio più grande, Roberta, che mi accompagna da ancora prima che io cominciassi il mio percorso accademico, dandomi l'esempio e facendomi da guida. Con il suo pragmatismo e la sua determinazione è riuscita sempre a farmi vedere la luce che più volte ho smarrito durante il mio percorso. Non mi ha fatto mai mancare il suo sostegno, anche quando ho preso decisioni che ci avrebbero potuti allontanare. Grazie per aver sempre creduto in me, riuscendo a cogliere sempre il mio valore anche quando, nei momenti di sconforto, io stesso non riuscivo a vederlo. Ringrazio i miei nonni, per essere sempre stati orgogliosi di me, per essermi stati vicini, per aver compreso le mie scelte e per avermi sostenuto moralmente a cercare il meglio dal mio percorso accademico.

Ringrazio infine i miei amici più cari, per aver mostrato interesse per il mio percorso accademico, per aver sostenuto le mie scelte e per avermi aiutato quando sembrava impossibile rialzarsi.

APPENDICE

Tabella A.1: Dati grezzi di rugosità; misure in µm

	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
superficie 1.a	6,959	8,547	3,725	9,098	5,05	7,612	8,942	4,161	4,708
superficie 1.b	5,103	2,998	10,563	3,763	5,456	5,952	6,009	8,806	6,512
superficie 1.c	4,173	2,854	6,89	3,909	4,485	5,468	3,641	8,591	4,044
Superficie 2.a	9,65	11,875	9,747	9,492	10,208	9,575	10,795	9,749	11,395
Superficie 2.b	11,711	10,097	10,923	11,683	10,436	10,317	9,863	13,28	14,151
Superficie 2.c	12,762	10,028	10,489	9,577	12,388	10,362	12,422	13,055	12,627
Superficie 3.a	9,287	12,645	9,587	10,664	13,051	8,622	11,906	11,816	12,283
Superficie 3.b	9,314	12,503	8,321	9,61	13,634	15,957	13,592	13,795	12,283
Superficie 3.c	7,588	8,937	8,915	10,17	12,459	13,32	10,599	12,915	9,341
Superficie 4.a	11,409	13,866	11,722	9,649	11,992	13,847	14,963	14,572	11,899
Superficie 4.b	9,65	13,637	12,244	11,938	13,453	13,936	15,147	15,868	12,854
Superficie 4.c	8,739	11,53	9,403	12,284	12,704	14,86	17,15	14,977	14,211
Superficie 5.a	14,05	18,549	16,888	19,247	21,579	23,5	18,758	23,787	14,359
Superficie 5.b	15,389	21,242	17,389	10,812	25,405	19,007	19,884	16,616	15,709
Superficie 5.c	15,009	17,033	14,865	20,934	13,874	12,137	25,556	17,628	17,585
Superficie 6.a	15,239	16,23	16,509	22,102	15,219	23,073	18,925	22,582	25,429
Superficie 6.b	20,286	15,968	19,858	22,343	18,526	25,213	24,085	23,954	26,464
superficie 6.c	21,387	21,609	22,016	18,339	18,262	22,862	20,648	24,693	23,674
Superficie 7.a	22,555	21,952	22,646	18,084	28,187	21,766	19,853	27,259	20,668
Superficie 7.b	28,322	28,735	22,646	21,453	25,967	23,867	23,302	27,266	30,643
Superficie 7.c	29,993	25,987	33,123	21,376	20,462	24,505	22,456	23,236	23,383
Superficie 8.a	26,669	23,039	22,593	19,021	17,026	24,372	15,516	14,808	18,961
Superficie 8.b	23,561	17,943	23,411	21,097	19,402	20,595	16,854	19,913	20,651
Superficie 8.c	25,895	19,73	21,268	17,575	20,278	20,414	18,097	18,632	17,546
Superficie 9.a	24,307	20,723	21,623	21,471	18,595	17,931	20,211	16,603	18,127
Superficie 9.b	22,184	18,059	18,894	13,436	15,775	17,453	17,906	15,99	15,749
Superficie 9.c	22,242	22,597	17,633	14,608	20,353	15,476	15,947	22,191	15,43
Superficie 10.a	22,237	21,311	22,323	18,024	13,855	15,332	19,89	16,442	15,826
Superficie 10.b	20,758	21,489	17,256	15,682	17,047	18,33	16,498	18,1	17,463
Superficie 10.c	20,047	14,561	20,673	14,135	16,135	19,226	21,373	16,387	14,858
Superficie 11.a	15,388	19,693	17,899	19,904	17,117	19,681	13,434	19,105	13,453
Superficie 11.b	22,097	19,203	18,269	20,8	20,553	19,295	17,962	16,276	18,004
Superficie 11.c	25,924	16,88	25,422	18,926	14,585	17,466	18,536	19,05	19,883
Superficie 12.a	15,824	22,495	16,113	30,096	16,163	17,031	15,874	17,663	16,7
Superficie 12.b	18,195	23,657	17,729	24,744	19,776	18,094	18,013	17,303	19,006
Superficie 12.c	18,772	14,673	20,799	25,512	18,942	16,642	17,467	14,304	15,094
Superficie 13.a	19,415	19,507	19,289	20,405	18,674	18,224	21,129	16,565	19,377
Superficie 13.b	20,195	19,634	20,239	16,17	21,637	20,536	18,35	16,695	15,149
Superficie 13.c	20,352	17,93	15,214	19,281	18,515	18,529	20,481	17,637	18,352
Superficie 14.a	20,188	29,298	21,072	25,818	17,411	21,808	22,439	20,514	23,934
Superficie 14.b	20,222	20,616	19,39	17,404	17,894	17,157	24,223	22,145	18,292
Superficie 14.c	28,849	21,208	17,724	24,165	17,835	18,848	24,678	15,954	16,471

Tabella A.2: Dati sperimentali opportunamente organizzati per l'analisi sulla posizione di costruzione dei pro-

vini; misure in mm

Misura	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
superficie 1.a	0,0070	0,0085	0,0037	0,0091	0,0051	0,0076	0,0089	0,0042	0,0047
superficie 1.b	0,0051	0,0030	0,0106	0,0038	0,0055	0,0060	0,0060	0,0088	0,0065
superficie 1.c	0,0042	0,0029	0,0069	0,0039	0,0045	0,0055	0,0036	0,0086	0,0040
Superficie 2.a	0,0097	0,0119	0,0097	0,0095	0,0102	0,0096	0,0108	0,0097	0,0114
Superficie 2.b	0,0117	0,0101	0,0109	0,0117	0,0104	0,0103	0,0099	0,0133	0,0142
Superficie 2.c	0,0128	0,0100	0,0105	0,0096	0,0124	0,0104	0,0124	0,0131	0,0126
Superficie 3.a	0,0093	0,0126	0,0096	0,0107	0,0131	0,0086	0,0119	0,0118	0,0123
Superficie 3.b	0,0093	0,0125	0,0083	0,0096	0,0136	0,0160	0,0136	0,0138	0,0123
Superficie 3.c	0,0076	0,0089	0,0089	0,0102	0,0125	0,0133	0,0106	0,0129	0,0093
Superficie 4.a	0,0114	0,0139	0,0117	0,0096	0,0120	0,0138	0,0150	0,0146	0,0119
Superficie 4.b	0,0097	0,0136	0,0122	0,0119	0,0135	0,0139	0,0151	0,0159	0,0129
Superficie 4.c	0,0087	0,0115	0,0094	0,0123	0,0127	0,0149	0,0172	0,0150	0,0142
Superficie 5.a	0,0141	0,0185	0,0169	0,0192	0,0216	0,0235	0,0188	0,0238	0,0144
Superficie 5.b	0,0154	0,0212	0,0174	0,0108	0,0254	0,0190	0,0199	0,0166	0,0157
Superficie 5.c	0,0150	0,0170	0,0149	0,0209	0,0139	0,0121	0,0256	0,0176	0,0176
Superficie 6.a	0,0152	0,0162	0,0165	0,0221	0,0152	0,0231	0,0189	0,0226	0,0254
Superficie 6.b	0,0203	0,0160	0,0199	0,0223	0,0185	0,0252	0,0241	0,0240	0,0265
superficie 6.c	0,0214	0,0216	0,0220	0,0183	0,0183	0,0229	0,0206	0,0247	0,0237
Superficie 7.a	0,0226	0,0220	0,0226	0,0181	0,0282	0,0218	0,0199	0,0273	0,0207
Superficie 7.b	0,0283	0,0287	0,0226	0,0215	0,0260	0,0239	0,0233	0,0273	0,0306
Superficie 7.c	0,0300	0,0260	0,0331	0,0214	0,0205	0,0245	0,0225	0,0232	0,0234
Superficie 8.a	0,0267	0,0230	0,0226	0,0190	0,0170	0,0244	0,0155	0,0148	0,0190
Superficie 8.b	0,0236	0,0179	0,0234	0,0211	0,0194	0,0206	0,0169	0,0199	0,0207
Superficie 8.c	0,0259	0,0197	0,0213	0,0176	0,0203	0,0204	0,0181	0,0186	0,0175
Superficie 9.a	0,0243	0,0207	0,0216	0,0215	0,0186	0,0179	0,0202	0,0166	0,0181
Superficie 9.b	0,0222	0,0181	0,0189	0,0134	0,0158	0,0175	0,0179	0,0160	0,0157
Superficie 9.c	0,0222	0,0226	0,0176	0,0146	0,0204	0,0155	0,0159	0,0222	0,0154
Superficie 10.a	0,0222	0,0213	0,0223	0,0180	0,0139	0,0153	0,0199	0,0164	0,0158
Superficie 10.b	0,0208	0,0215	0,0173	0,0157	0,0170	0,0183	0,0165	0,0181	0,0175
Superficie 10.c	0,0200	0,0146	0,0207	0,0141	0,0161	0,0192	0,0214	0,0164	0,0149
Superficie 11.a	0,0154	0,0197	0,0179	0,0199	0,0171	0,0197	0,0134	0,0191	0,0135
Superficie 11.b	0,0221	0,0192	0,0183	0,0208	0,0206	0,0193	0,0180	0,0163	0,0180
Superficie 11.c	0,0259	0,0169	0,0254	0,0189	0,0146	0,0175	0,0185	0,0191	0,0199
Superficie 12.a	0,0158	0,0225	0,0161	0,0301	0,0162	0,0170	0,0159	0,0177	0,0167
Superficie 12.b	0,0182	0,0237	0,0177	0,0247	0,0198	0,0181	0,0180	0,0173	0,0190
Superficie 12.c	0,0188	0,0147	0,0208	0,0255	0,0189	0,0166	0,0175	0,0143	0,0151
Superficie 13.a	0,0194	0,0195	0,0193	0,0204	0,0187	0,0182	0,0211	0,0166	0,0194
Superficie 13.b	0,0202	0,0196	0,0202	0,0162	0,0216	0,0205	0,0184	0,0167	0,0151
Superficie 13.c	0,0204	0,0179	0,0152	0,0193	0,0185	0,0185	0,0205	0,0176	0,0184
Superficie 14.a	0,0202	0,0293	0,0211	0,0258	0,0174	0,0218	0,0224	0,0205	0,0239
Superficie 14.b	0,0202	0,0206	0,0194	0,0174	0,0179	0,0172	0,0242	0,0221	0,0183
Superficie 14.c	0,0288	0,0212	0,0177	0,0242	0,0178	0,0188	0,0247	0,0160	0,0165

Tabella A.3: Dati sperimentali opportunamente organizzati per effettuare le analisi statistiche sulle superfici

dei provini; misure in mm

	Sup. 1	Sup. 2	Sup. 3	Sup. 4	Sup. 5	Sup. 6	Sup. 7	Sup. 8	Sup. 9	Sup. 10	Sup. 11	Sup. 12	Sup. 13	Sup. 14
1A.a	0,00 6959	0,00 965	0,00 9287	0,01 1409	0,01 405	0,01 5239	0,02 2555	0,02 6669	0,02 4307	0,02 2237	0,01 5388	0,01 5824	0,01 9415	0,02 0188
1B.a	0,00 8547	0,01 1875	0,01 2645	0,01 3866	0,01 8549	0,01 623	0,02 1952	0,02 3039	0,02 0723	0,02 1311	0,01 9693	0,02 2495	0,01 9507	0,02 9298
1C.a	0,00 3725	0,00 9747	0,00 9587	0,01 1722	0,01 6888	0,01 6509	0,02 2646	0,02 2593	0,02 1623	0,02 2323	0,01 7899	0,01 6113	0,01 9289	0,02 1072
2A.a	0,00 9098	0,00 9492	0,01 0664	0,00 9649	0,01 9247	0,02 2102	0,01 8084	0,01 9021	0,02 1471	0,01 8024	0,01 9904	0,03 0096	0,02 0405	0,02 5818
2B.a	0,00 505	0,01 0208	0,01 3051	0,01 1992	0,02 1579	0,01 5219	0,02 8187	0,01 7026	0,01 8595	0,01 3855	0,01 7117	0,01 6163	0,01 8674	0,01 7411
2C.a	0,00 7612	0,00 9575	0,00 8622	0,01 3847	0,02 35	0,02 3073	0,02 1766	0,02 4372	0,01 7931	0,01 5332	0,01 9681	0,01 7031	0,01 8224	0,02 1808
3A.a	0,00 8942	0,01 0795	0,01 1906	0,01 4963	0,01 8758	0,01 8925	0,01 9853	0,01 5516	0,02 0211	0,01 989	0,01 3434	0,01 5874	0,02 1129	0,02 2439
3B.a	0,00 4161	0,00 9749	0,01 1816	0,01 4572	0,02 3787	0,02 2582	0,02 7259	0,01 4808	0,01 6603	0,01 6442	0,01 9105	0,01 7663	0,01 6565	0,02 0514
3C.a	0,00 4708	0,01 1395	0,01 2283	0,01 1899	0,01 4359	0,02 5429	0,02 0668	0,01 8961	0,01 8127	0,01 5826	0,01 3453	0,01 67	0,01 9377	0,02 3934
1A.b	0,00 5103	0,01 1711	0,00 9314	0,00 965	0,01 5389	0,02 0286	0,02 8322	0,02 3561	0,02 2184	0,02 0758	0,02 2097	0,01 8195	0,02 0195	0,02
1B.b	0,00	0,01	0,01 2503	0,01	0,02	0,01 5968	0,02 8735	0,01 7943	0,01 8059	0,02	0,01 9203	0,02	0,01 9634	0,02
1C.b	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
2A.b	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01 7404
2B.b	0,00 5456	0,01 0436	0,01 3634	0,01 3453	0,02 5405	0,01 8526	0,02 5967	0,01 9402	0,01 5775	0,01 7047	0,02 0553	0,01 9776	0,02	0,01 7894
2C.b	0,00 5952	0,01 0317	0,01 5957	0,01 3936	0,01 9007	0,02 5213	0,02 3867	0,02 0595	0,01 7453	0,01 833	0,01 9295	0,01 8094	0,02 0536	0,01 7157
3A.b	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
3B.b	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
3C.b	0,00	0,01 4151	0,01 2283	0,01 2854	0,01 5709	0,02	0,03	0,02	0,01 5749	0,01 7463	0,01 8004	0,01	0,01 5149	0,01 8292
1A.c	0,00 4173	0,01 2762	0,00 7588	0,00 8739	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02 5924	0,01 8772	0,02	0,02 8849
1B.c	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
1C.c	0,00 689	0,01 0489	0,00 8915	0,00 9403	0,01 4865	0,02 2016	0,03 3123	0,02 1268	0,01 7633	0,02 0673	0,02 5422	0,02 0799	0,01 5214	0,01 7724
2A.c	0,00 3909	0,00 9577	0,01 017	0,01 2284	0,02 0934	0,01 8339	0,02 1376	0,01 7575	0,01 4608	0,01 4135	0,01 8926	0,02 5512	0,01 9281	0,02 4165
2B.c	0,00	0,01	0,01 2459	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01 8942	0,01 8515	0,01 7835
2C.c	0,00 5468	0,01 0362	0,01 332	0,01 486	0,01 2137	0,02 2862	0,02 4505	0,02 0414	0,01 5476	0,01 9226	0,01 7466	0,01 6642	0,01 8529	0,01 8848
3A.c	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01 5947	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
3B.c	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
3C.c	0,00 4044	0,01 2627	0,00 9341	0,01 4211	0,01 7585	0,02 3674	0,02 3383	0,01 7546	0,01 543	0,01 4858	0,01 9883	0,01 5094	0,01 8352	0,01 6471

Angolo	Positive	Negative
50°	0,0152	0,0202
50°	0,0203	0,0202
50°	0,0214	0,0288
50°	0,0162	0,0293
50°	0,0160	0,0206
50°	0,0216	0,0212
50°	0,0165	0,0211
50°	0,0199	0,0194
50°	0,0220	0,0177
50°	0,0221	0,0258
50°	0,0223	0,0174
50°	0,0183	0,0242
50°	0,0152	0,0174
50°	0,0185	0,0179
50°	0,0183	0,0178
50°	0,0231	0,0218
50°	0,0252	0,0172
50°	0,0229	0,0188
50°	0,0189	0,0224
50°	0,0241	0,0242
50°	0,0206	0,0247
50°	0,0226	0,0205
50°	0,0240	0,0221
50°	0,0247	0,0160
50°	0,0254	0,0239
50°	0,0265	0,0183
50°	0,0237	0,0165

60°	0,0226	0,0158
60°	0,0283	0,0182
60°	0,0300	0,0188
60°	0,0220	0,0225
60°	0,0287	0,0237
60°	0,0260	0,0147
60°	0,0226	0,0161
60°	0,0226	0,0177
60°	0,0331	0,0208
60°	0,0181	0,0301
60°	0,0215	0,0247
60°	0,0214	0,0255
60°	0,0282	0,0162
60°	0,0260	0,0198
60°	0,0205	0,0189
60°	0,0218	0,0170
60°	0,0239	0,0181
60°	0,0245	0,0166
60°	0,0199	0,0159
60°	0,0233	0,0180
60°	0,0225	0,0175
60°	0,0273	0,0177
60°	0,0273	0,0173
60°	0,0232	0,0143
60°	0,0207	0,0167
60°	0,0306	0,0190
60°	0,0234	0,0151

Tabella A.5: Dati sper	imentali per l'analis	i delle superfici	positive
------------------------	-----------------------	-------------------	----------

Superfi-	Ra	10°
cie		10°
0°	0,006959	10°
0°	0,005103	10°
0°	0,004173	10°
0°	0,008547	10°
0°	0,002998	10°
0°	0,002854	10°
0°	0,003725	20°
0°	0,010563	20°
0°	0,00689	20°
0°	0,009098	20°
0°	0,003763	20°
0°	0,003909	20°
0°	0,00505	20°
0°	0,005456	20°
0°	0,004485	20°
0°	0,007612	20°
0°	0,005952	20°
0°	0,005468	20°
0°	0,008942	20°
0°	0,006009	20°
0°	0,003641	20°
0°	0,004161	20°
0°	0,008806	20°
0°	0,008591	20°
0°	0,004708	20°
0°	0,006512	20°
0°	0,004044	20°
10°	0,00965	20°
10°	0,011711	20°
10°	0.012762	20°
10°	0,011875	20°
10°	0,010097	 20°
10°	0.010028	 20°
10°	0.009747	
10°	0,010923	30°
10°	0,010489	30°
10°	0,009492	30°
10°	0.011683	30°
10°	0.009577	30°
0°	0,010208	30°
10°	0.010436	30°
0°	0.012388	30°
0°	0.009575	30°
0°	0.010317	30°
 10°	0.010362	30°
0°	0.010795	30°
	,,	

10°	0,009863
10°	0,012422
10°	0,009749
10°	0,01328
10°	0,013055
10°	0,011395
10°	0,014151
10°	0,012627
20°	0,009287
20°	0,009314
20°	0,007588
20°	0,012645
20°	0,012503
20°	0,008937
20°	0,009587
20°	0,008321
20°	0,008915
20°	0,010664
20°	0,00961
20°	0,01017
20°	0,013051
20°	0,013634
20°	0,012459
20°	0,008622
20°	0,015957
20°	0,01332
20°	0,011906
20°	0,013592
20°	0,010599
20°	0,011816
20°	0,013795
20°	0,012915
20°	0,012283
20°	0,012283
20°	0,009341
30°	0,011409
30°	0,00965
30°	0,008739
30°	0,013866
30°	0,013637
30°	0,01153
30°	0,011722
30°	0,012244
30°	0,009403
30°	0,009649
30°	0,011938
30°	0,012284
30°	0.011992

30°	0,013453
30°	0,012704
30°	0,013847
30°	0,013936
30°	0,01486
30°	0.014963
30°	0.015147
30°	0.01715
30°	0.014572
30°	0.015868
30°	0.014977
30°	0.011899
30°	0.01285/
200	0,012834
<u> </u>	0,014211
40 40°	0,01405
40 40°	0,015389
40	0,015009
40°	0,018549
40°	0,021242
40°	0,017033
40°	0,016888
40°	0,017389
40°	0,014865
40°	0,019247
40°	0,010812
40°	0,020934
40°	0,021579
40°	0,025405
40°	0,013874
40°	0,0235
40°	0,019007
40°	0,012137
40°	0,018758
40°	0,019884
40°	0,025556
40°	0.023787
40°	0.016616
40°	0.017628
40°	0.01/1250
40°	0.015700
40°	0,013709
40 50°	0,01/303
50	0,010209
50	0,020286
50°	0,021387
50°	0,01623
50°	0,015968
50°	0,021609
50°	0.016509

50°	0,019858
50°	0,022016
50°	0,022102
50°	0,022343
50°	0,018339
50°	0,015219
50°	0,018526
50°	0,018262
50°	0,023073
50°	0,025213
50°	0,022862
50°	0,018925
50°	0,024085
50°	0,020648
50°	0,022582
50°	0,023954
50°	0,024693
50°	0,025429
50°	0,026464
50°	0,023674
60°	0,022555
60°	0,028322
60°	0,029993
60°	0,021952
60°	0,028735
60°	0,025987
60°	0,022646
60°	0,022646
60°	0,033123
60°	0,018084
60°	0,021453
60°	0,021376
60°	0,028187
60°	0,025967
60°	0,020462
60°	0,021766
60°	0,023867
60°	0,024505
60°	0,019853
60°	0,023302
60°	0,022456
60°	0,027259
60°	0,027266
60°	0,023236
60°	0,020668
60°	0,030643
60°	0,023383

		-	
Super-	Ra		75
ficie	Na		75
80°	0,026669		75
80°	0,023561		75
80°	0,025895		75
80°	0,023039		75
80°	0,017943		75
80°	0,01973		75
80°	0,022593		70
80°	0,023411		70
80°	0,021268		70
80°	0,019021		70
80°	0,021097		70
80°	0,017575		70
80°	0,017026		70
80°	0,019402		70
80°	0,020278		70
80°	0,024372		70
80°	0,020595		70
80°	0,020414		70
80°	0,015516		70
80°	0,016854		70
80°	0,018097		70
80°	0,014808		70
80°	0,019913		70
80°	0,018632		70
80°	0,018961		70
80°	0,020651		70
80°	0,017546		70
75°	0,024307		70
75°	0,022184		70
75°	0,022242		70
75°	0,020723		70
75°	0,018059		70
75°	0,022597		70
75°	0,021623		65
75°	0,018894		65
75°	0,017633		65
75°	0,021471		65
75°	0,013436		65
75°	0,014608		65
75°	0,018595		65
75°	0,015775		65
75°	0,020353		65
75°	0,017931		65
75°	0,017453		65
75°	0,015476		65
75°	0.020211		65

75°	0,017906
75°	0,015947
75°	0,016603
75°	0,01599
75°	0,022191
75°	0,018127
75°	0,015749
75°	0,01543
70°	0,022237
70°	0,020758
70°	0,020047
70°	0,021311
70°	0,021489
70°	0,014561
70°	0,022323
70°	0,017256
70°	0,020673
70°	0,018024
70°	0,015682
70°	0,014135
70°	0,013855
70°	0,017047
70°	0,016135
70°	0,015332
70°	0,01833
70°	0,019226
70°	0,01989
70°	0,016498
70°	0,021373
70°	0,016442
70°	0,0181
70°	0,016387
70°	0,015826
70°	0,017463
70°	0,014858
65°	0,015388
65°	0,022097
65°	0,025924
65°	0,019693
65°	0,019203
65°	0,01688
65°	0,017899
65°	0,018269
65°	0,025422
65°	0,019904
65°	0,0208
65°	0,018926
65°	0.017117

65°	0,020553
65°	0,014585
65°	0,019681
65°	0,019295
65°	0,017466
65°	0,013434
65°	0,017962
65°	0,018536
65°	0,019105
65°	0,016276
65°	0,01905
65°	0,013453
65°	0,018004
65°	0,019883
60°	0,015824
60°	0,018195
60°	0,018772
60°	0,022495
60°	0,023657
60°	0,014673
60°	0,016113
60°	0,017729
60°	0,020799
60°	0,030096
60°	0,024744
60°	0,025512
60°	0,016163
60°	0,019776
60°	0,018942
60°	0,017031
60°	0,018094
60°	0,016642
60°	0,015874
60°	0,018013
60°	0,017467
60°	0,017663
60°	0,017303
60°	0,014304
60°	0,0167
60°	0,019006
60°	0,015094
55°	0,019415
55°	0,020195
55°	0,020352
55°	0,019507
55°	0,019634
55°	0,01793
55°	0.019289

55°	0,020239
55°	0.015214
55°	0.020405
55°	0.01617
55	0,01017
55	0,019281
55°	0,018674
55°	0,021637
55°	0,018515
55°	0,018224
55°	0,020536
55°	0.018529
55°	0.021129
55°	0.01835
55	0,01833
55	0,020481
55°	0,016565
55°	0,016695
55°	0,017637
55°	0,019377
55°	0,015149
55°	0,018352
50°	0.020188
50°	0 0202020
50	0,020222
50°	0,028849
50°	0,029298
50°	0,020616
50°	0,021208
50°	0,021072
50°	0,01939
50°	0,017724
50°	0,025818
50°	0.017404
50°	0.02/165
50	0,024103
50°	0,01/411
50°	0,017894
50°	0,017835
50°	0,021808
50°	0,017157
50°	0,018848
50°	0,022439
50°	0.024223
50°	0.024223
50	0,024076
50°	0,020514
50°	0,022145
50°	0,015954
50°	0,023934
50°	0,018292
50°	0,016471
	-,

BIBLIOGRAFIA

- N. Hopkinson and P. Dickens, *Rapid prototyping for direct manufacture*, Rapid Prototyp. J., vol. 7, no. 4, pp. 197–202, Oct. 2001.
- [2] Standard Terminology for Additive Manufacturing General Principles Terminology, ASTM International, vol. i. pp. 1–9, 2015.
- [3] M. Galati and L. Iuliano, A literature review of powder-based electron beam melting focusing on numerical simulations, Addit. Manuf., vol. 19, pp. 1–20, 2018.
- Y. Zhai, D. A. Lados, and J. L. Lagoy, *Additive Manufacturing: Making imagination the major Limitation*, Jom, vol. 66, no. 5, pp. 808–816, 2014.
- [5] Blanther J. E., *Manufacture of contou r relief-maps*, US473901A, 03-May-1892.
- [6] Perera B.V., Process of Making Relief Maps ", US2189592, 1940.
- Baese Carlo, *Photographic process for the reproduction of plastic objects.*, US774549A, 17-May-1902.
- [8] O. J. Munz, *Photo-Glyph Recording*, #2775758, 1956.
- [9] W. K. Swainson, *Method, Medium and Apparatus for Producing Three-Dimensional Figure Product*, #4041476, 1977.
- [10] P. A. Ciraud, Process and Device for the Manufacture of any Objects Desired from any Meltable Material, FRG Discl. Publ., vol. 2263777, 1972.
- [11] R. F. Housholder, *Molding Process*, #4247508, 1981.
- H. Kodama, Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer, Rev. Sci. Instrum., vol. 52, no. 11, pp. 1770–1773, 1981.
- [13] A. J. Herbert, *A review of 3 D solid object generation.*, J. IMAG. TECHNOL., vol. 15, no.
 4, pp. 186–190, 1989.
- [14] J. K. Watson, K. M. Taminger, R. A. Hafley, and D. D. Petersen, *Development of a Prototype Low-Voltage Electron Beam Freeform Fabrication System*, in 13th Solid Freeform Fabrication Symposium; 5-7 Aug. 2002; Austin, TX; United States, 2002.
- [15] W. J. Sames, F. A. List, S. Pannala, R. R. Dehoff, and S. S. Babu, *The metallurgy and*

processing science of metal additive manufacturing, Int. Mater. Rev., vol. 61, no. 5, pp. 315–360, 2016.

- [16] S. Biamino *et al.*, *Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation*, Intermetallics, vol. 19, no. 6, pp. 776–781, 2011.
- [17] G. Baudana et al., Titanium aluminides for aerospace and automotive applications processed by Electron Beam Melting: Contribution of Politecnico di Torino, Met. Powder Rep., vol. 71, no. 3, pp. 193–199, 2016.
- [18] X. Gong, T. Anderson, and K. Chou, *Review on Powder-Based Electron Beam Additive Manufacturing Technology*, in *ASME/ISCIE 2012 International Symposium on Flexible Automation*, 2018, pp. 1–9.
- [19] S. M. Gaytan, L. E. Murr, F. Medina, E. Martinez, M. I. Lopez, and R. B. Wicker, Advanced metal powder based manufacturing of complex components by electron beam melting, Mater. Technol., vol. 24, no. 3, pp. 180–190, 2009.
- [20] T. R. Mahale, *Electron beam melting of advanced materials and structures*. North Carolina State University, 2009.
- [21] J. O. Milewski, Additive Manufacturing of Metals, vol. 258. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [22] E. Attar, Simulation of Selective Electron Beam Melting Processes, Der Universit at Erlangen-Nurnberg zur Erlangung des Grades, 2011.
- [23] J. Milberg and M. Sigl, *Electron beam sintering of metal powder*, Prod. Eng., vol. 2, no. 2, pp. 117–122, 2008.
- [24] B. Cheng, S. Price, J. Lydon, K. Cooper, and K. Chou, On Process Temperature in Powder-Bed Electron Beam Additive Manufacturing: Model Development and Validation, J. Manuf. Sci. Eng., vol. 136, no. 6, p. 061018, 2014.
- [25] D. J. Whitehouse, *Handbook Of Surface and anometrology Second Edition*. CRC Press, 2011.
- [26] R. Klingvall Ek, L.-E. Rännar, M. Bäckstöm, and P. Carlsson, *The effect of EBM process parameters upon surface roughness*, Rapid Prototyp. J., vol. 22, no. 3, pp. 495–503, 2016.
- [27] D. Deligianni, N. Katsala, S. Ladas, D. Sotiropoulou, J. Amedee, and Y. Missirlis, *Effect*

of surface roughness of the titanium alloy Ti-6Al-4V on human bone marrow cell response and on protein adsorption., Biomaterials, vol. 22, no. 11, pp. 1241–51, 2001.

- [28] D. G. Bogard, D. L. Schmidt, and M. Tabbita, *Characterization and laboratory simulation of turbine airfoil surface roughness and associated heat transfer*, in ASME 1996 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, 1996.
- [29] A. Safdar, H. Z. He, L. Y. Wei, A. Snis, and L. E. Chavez De Paz, *Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6AI-4V*, Rapid Prototyp. J., vol. 18, no. 5, pp. 401–408, 2012.
- [30] E. C. Santos, M. Shiomi, K. Osakada, and T. Laoui, *Rapid manufacturing of metal components by laser forming*, Int. J. Mach. Tools Manuf., vol. 46, no. 12–13, pp. 1459–1468, 2006.
- [31] M. Jamshidinia and R. Kovacevic, *The influence of heat accumulation on the surface roughness in powder-bed additive manufacturing*, Surf. Topogr. Metrol. Prop., vol. 3, no. 1, p. 14003, 2015.
- [32] A. Townsend, R. Racasan, and L. Blunt, *Surface-specific additive manufacturing test artefacts*, Surf. Topogr. Metrol. Prop., vol. 6, no. 2, 2018.
- [33] G. Strano, L. Hao, R. M. Everson, and K. E. Evans, *Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting*, J. Mater. Process. Technol., vol. 213, no. 4, pp. 589–597, 2013.
- [34] P. E. Reeves and R. C. Cobb, Surface deviation modeling of LMT processes—A comparative analysis, in Proceedings of the Fifth European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Helsinki, Finland, June, 1995, pp. 59–77.
- [35] R. I. Campbell, M. Martorelli, and H. S. Lee, *Surface roughness visualisation for rapid prototyping models*, Comput. Des., vol. 34, no. 10, pp. 717–725, 2002.
- [36] D. Ahn, H. Kim, and S. Lee, Surface roughness prediction using measured data and interpolation in layered manufacturing, J. Mater. Process. Technol., vol. 209, no. 2, pp. 664–671, 2009.
- [37] C. Oswald, ADDITIVE MANUFACTURING DESIGN CONSIDERATIONS FOR PRODUCTION IN AEROSPACE CONSIDERATIONS FOR THE FULL VALUE STREAM Additive Manufacturing Specialist LAI International.

- [38] A. Townsend, N. Senin, L. Blunt, R. K. Leach, and J. S. Taylor, *Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review*, Precis. Eng., vol. 46, pp. 34–47, 2016.
- [39] A. Safdar, *Microstructures and surface roughness of EBM produced Ti-6AI-4V*, no. c. 2010.
- [40] L. Rebaioli and I. Fassi, A review on benchmark artifacts for evaluating the geometrical performance of additive manufacturing processes, Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 93, no. 5–8, pp. 2571–2598, 2017.
- [41] A. L. Cooke and J. A. Soons, Variability in the geometric accuracy of additively manufactured test parts, in Proceedings of 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, 2010, pp. 1–12.
- [42] S. Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurrens, and M. Alkan Donmez, An Additive Manufacturing Test Artifact, vol. 119, 2014.
- [43] G. D. Kim and Y. T. Oh, A benchmark study on rapid prototyping processes and machines: Quantitative comparisons of mechanical properties, accuracy, roughness, speed, and material cost, Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf., vol. 222, no. 2, pp. 201–215, Feb. 2008.
- [44] G. Barbato, G. Genta, and A. Germak, *Misurare per decidere : misure e statistica di base*. Società Editrice Esculapio, 2014.
- [45] N. Tayebi and A. A. Polycarpou, *Modeling the effect of skewness and kurtosis on the static friction coefficient of rough surfaces*, Tribol. Int., vol. 37, no. 6, pp. 491–505, Jun. 2004.
- [46] S. Franchitti *et al.*, *Investigation on Electron Beam Melting: Dimensional accuracy and process repeatability*, Vacuum, vol. 157, pp. 340–348, Nov. 2018.
- P. Minetola, L. Iuliano, and G. Marchiandi, *Benchmarking of FDM Machines through Part Quality Using IT Grades*, Procedia CIRP, vol. 41, pp. 1027–1032, 2016.