



**POLITECNICO  
DI TORINO**

Collegio di Ingegneria Meccanica, Aerospaziale, dell'Autoveicolo e della Produzione

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Caratterizzazione e ottimizzazione di un sistema  
Electron Beam Melting Arcam Q10 plus**

**Relatore**

Prof. Luca Iuliano

**Correlatrice**

Ing. Manuela Galati

**Candidato**

Lorenzo Piovano

Dicembre 2019



# Indice

Introduzione.....	1
1. Additive manufacturing ed Electron Beam Melting.....	3
1.1 Evoluzione storica dell'additive manufacturing.....	3
1.2 Il ciclo della fabbricazione additiva.....	5
1.3 Principali tecniche di additive manufacturing .....	6
1.3.1 Fused deposition modeling (FDM) .....	7
1.3.2 Stereolitografia (SLA).....	7
1.3.3 Selective laser sintering (SLS) .....	8
1.3.4 Selective laser melting (SLM o L-PBF o DMLS) .....	9
1.4 Electron beam melting .....	10
1.4.1 Hardware macchina.....	10
1.4.2 Processo.....	12
1.4.3 Materiali e applicazioni .....	13
2. Richiami teorici e analisi della letteratura.....	15
2.1 Richiami su tolleranze dimensionali e geometriche .....	15
2.2 Richiami sul concetto di rugosità superficiale .....	19
2.3 Analisi della letteratura sulla valutazione dell'accuratezza dei sistemi di AM.....	22
2.3.1 Valutazioni in base alla letteratura .....	31
2.4 Analisi della letteratura sulla caratterizzazione di rugosità di pezzi in EBM.....	31
2.4.1 Valutazioni in base alla letteratura .....	37
3. Produzione dei provini presso Meccanica Grasso S.R.L. ....	39
3.1 Arcam Q10 plus .....	39
3.2 Preparazione del job da realizzare .....	40
3.3 Produzione mediante EBM Arcam Q10 plus.....	42
4. Caratterizzazione della rugosità superficiale di componenti prodotti con EBM Arcam Q10 plus .....	47
4.1 Descrizione benchmark per l'analisi della rugosità.....	47

4.2	Acquisizione delle misure .....	50
4.3	Organizzazione delle analisi .....	54
4.4	Presentazione e discussione dei risultati .....	55
4.4.1	Considerazioni preliminari .....	55
4.4.2	Analisi statistica.....	58
4.4.3	Analisi della regressione.....	68
5.	Valutazione dell'accuratezza dimensionale e geometrica di componenti prodotti con EBM Arcam Q10 plus .....	74
5.1	Descrizione benchmark utilizzato .....	74
5.2	Misurazione con macchina CMM .....	77
5.3	Analisi dei risultati.....	77
6.	Ottimizzazione del processo EBM mediante bilanciamento del calore fornito ad ogni layer.....	86
6.1	Distribuzione delle aree fuse e fasi del processo.....	86
6.2	Modello per la generazione di strutture di bilanciamento del calore.....	88
6.3	Applicazione del modello al job di produzione dei provini.....	91
7.	Conclusioni .....	94
	Bibliografia.....	98

## Introduzione

L'additive manufacturing, o fabbricazione additiva, è l'insieme di tutti quei sistemi che permettono di realizzare un componente tramite l'aggiunta di materiale strato dopo strato. Il principio alla base risulta essere concettualmente opposto rispetto a quello delle tecniche tradizionali sottrattive, basate sull'asportazione di materiale dal pieno per ottenere il componente finito. Per questo motivo, la fabbricazione additiva si rivela essere una tecnologia innovativa, che negli ultimi anni ha visto una crescita esponenziale, stravolgendo i tradizionali paradigmi produttivi.

Nel corso della trattazione verrà presentata brevemente l'evoluzione storica dei sistemi additivi, che ha portato alla condizione attuale di sviluppo della tecnologia. Inoltre, verranno presentate le principali tecniche per metallo e polimero, soffermandosi in particolare sull'Electron Beam Melting (EBM). Questa tecnica utilizza un fascio elettronico per fondere selettivamente della polvere metallica che viene stesa, strato dopo strato, su tutta la piastra di costruzione: pertanto, tale tecnica appartiene al gruppo dei processi definiti "a letto di polvere". La tecnologia EBM può essere utilizzata con diversi tipi di materiale e i componenti prodotti trovano applicazione in campi differenti, tra cui i principali risultano essere il medicale e l'aerospaziale. Tuttavia, esistono ancora diverse problematiche che affliggono i componenti prodotti con tecnologia EBM e alcune di queste variano in base alla macchina utilizzata. Una delle problematiche più rilevanti è l'elevata rugosità superficiale dei componenti e la sua variazione in base alle zone del componente stesso. Un'altra è rappresentata dall'accuratezza dimensionale e geometrica, un aspetto importantissimo in ambito produttivo, in cui occorre prevedere le caratteristiche dei componenti realizzati con un determinato processo, in modo da progettare i cicli di lavoro per ottenere il prodotto finito. Queste problematiche sono state analizzate in diversi studi nel corso degli anni, con metodi e obiettivi differenti. Nella trattazione vengono presentati i principali articoli in merito, analizzando le modalità utilizzate e individuando vantaggi e svantaggi dei diversi studi. Dall'analisi della letteratura è possibile estrarre due metodologie, una per la caratterizzazione della rugosità superficiale di componenti prodotti con EBM e l'altra per la valutazione dell'accuratezza dimensionale e geometrica del sistema utilizzato.

Il lavoro di caratterizzazione e valutazione delle performance è stato svolto in collaborazione con l'azienda Meccanica Grasso S.R.L., che ha messo a disposizione la propria macchina, una Arcam Q10 plus, la quale può processare il materiale Ti6Al4V ELI. Con questa macchina e con il materiale indicato sono stati stampati i provini per effettuare le analisi successive. La prima è una caratterizzazione della rugosità superficiale, mettendo in evidenza i fattori che eventualmente la influenzano, come la disposizione della superficie sulla piastra di costruzione, ma anche le caratteristiche della superficie stessa, ovvero il tipo (interna o esterna), l'orientazione (positiva o negativa) e l'angolo di inclinazione. Dopodiché, si passa alla valutazione dell'accuratezza dimensionale e geometrica attraverso la misura, con macchina CMM, di tutte le feature presenti sul benchmark di riferimento per questa analisi. Grazie ad un apposito modello di calcolo è possibile estrarre, dai dati di misura, l'accuratezza dimensionale in termini di gradi IT e le deviazioni geometriche con le tolleranze GD&T. I risultati ottenuti vengono messi a confronto con i valori dei

principali processi tradizionali e con quelli di altri sistemi di AM simili e non. L'analisi dei risultati di entrambi gli studi è stata condotta utilizzando opportuni metodi statistici.

Nell'ultima parte del lavoro viene presentato un modello per l'ottimizzazione del processo di EBM, basato sul concetto di bilanciamento del calore fornito ad ogni strato. In questo modo è possibile rendere il processo più veloce e ottenere componenti di qualità più elevata. Il bilanciamento è effettuato rendendo le aree fuse costanti al variare dell'altezza di costruzione, aggiungendo delle apposite strutture di compensazione in fase di progettazione del job da stampare. Queste vengono generate attraverso un codice Matlab che analizza i dati del job da produrre, provenienti dal software Magics, e calcola la geometria finale e il numero delle strutture.

# 1. Additive manufacturing ed Electron Beam Melting

“Additive manufacturing”, in italiano “fabbricazione additiva”, è un termine che si riferisce a numerose tecniche produttive che permettono di creare un manufatto utilizzando una strategia “layer-by-layer” [1], che consiste nell’aggiungere materiale uno strato dopo l’altro. Queste tecniche si fondano, quindi, sul principio di addizione di materiale, a differenza di quelle per asportazione di truciolo, basate sul concetto opposto di sottrazione di materiale da un blocco [2]. Inoltre, le tecnologie additive richiedono obbligatoriamente di partire da un file CAD 3D del componente, per poi elaborarlo e realizzarlo strato per strato: in questo modo si offre un’elevata libertà geometrica e, quindi, la possibilità di creare parti molto complesse, caratterizzate da cavità, canali interni curvi, strutture reticolari e altri elementi non realizzabili (o difficilmente realizzabili) con altre tecnologie [3]. Per quanto riguarda gli appellativi con cui oggi le tecnologie additive vengono denominate, ne esistono diversi, tra cui: “stampa 3D” (3D printing), forse il termine più utilizzato grazie alla grande diffusione delle stampanti domestiche da tavolo, “prototipazione rapida” (rapid prototyping), termine nato grazie alle applicazioni dei primi componenti prodotti con queste tecnologie, “freeform fabrication”, “Autofab” ed altri. Tuttavia, è “additive manufacturing”, spesso abbreviato con “AM”, il termine globalmente riconosciuto e utilizzato per pubblicazioni, articoli e ricerca in merito [2].

## 1.1 Evoluzione storica dell'additive manufacturing

Il concetto di additive manufacturing fonda le sue radici nel XIX secolo, quando nel campo della topografia e della fotoscultura vennero ideate alcune tecniche per creare, nel primo caso, mappe in rilievo e, nel secondo, repliche in 3D di qualsiasi oggetto grazie a delle fotografie [4]. Bensì, la prima tecnica che rappresenti la definizione attuale di fabbricazione additiva venne rilasciata da Ciraud nel 1972: questa proponeva la deposizione di un materiale sotto forma di polvere e la sua simultanea fusione grazie ad un raggio energetico, costruendo il manufatto strato dopo strato. Purtroppo, sono presenti schemi e disegni di questa tecnologia ideata da Ciraud, ma non vi è un brevetto o una qualsiasi altra prova della sua effettiva realizzazione [4], [5]. Soltanto nel 1979, Housholder presentò la prima descrizione di un processo di sinterizzazione selettiva di polvere, realizzata grazie al riempimento, strato per strato, di alcuni spazi su una griglia con del materiale fondente e le cavità adiacenti con materiale refrattario. Con questo metodo riuscì a realizzare diversi manufatti sebbene di scarsa qualità [6]. Nel 1981 venne pubblicata una relazione sul primo sistema funzionante di prototipazione rapida con fotopolimero, a cura di Hideo Kodama, che prevedeva la solidificazione di un fotopolimero liquido in una vasca trasparente grazie ad una fonte di raggi UV o ad una fibra ottica e l’ausilio di una maschera o di un plotter x-y. Con questo metodo vennero prodotte alcune parti di prova. Nel 1982 Alan Herbert, in modo del tutto indipendente da Kodama, realizzò un sistema che prevedeva anch’esso la solidificazione di un fotopolimero, bensì grazie ad un laser UV controllato da un computer. Anche in questo caso vennero prodotte alcune parti di prova, ad illustrare la funzionalità della tecnica. Tuttavia, è nel 1984 che venne brevettata da Chuck Hull la macchina detta di “stereolitografia”, che viene considerata la prima stampante 3D della storia [5], [7]. Così, due anni più tardi, nel 1986, venne cofondata da Hull la 3D Systems, la prima azienda di stampa 3D che nel

1987 commercializzò la prima macchina di AM al mondo [8], [9], sancendo ufficialmente l'ingresso delle tecniche additive nel settore produttivo, sotto il nome di rapid prototyping.

Dalla fine degli anni '80 in avanti, comparvero nuovi processi additivi e se ne proposero varianti di quelli già esistenti. Infatti, sono numerosi i brevetti registrati da quel momento in avanti, il che testimonia il crescente interesse per queste tecnologie sia in ambito commerciale che di ricerca [4], [7]. Nel 1986 Carl Deckard dell'Università del Texas (UT) brevettò un sistema simile a quello creato da Hull ma che utilizzava polveri polimeriche termoplastiche fuse da un laser strato dopo strato: lo chiamò dapprima Part Generation by Layerwise Selecting Sintering (PGLSS), per poi cambiarlo in Selective Laser Sintering (SLS) [10]. Nel 1988 Scott Crump, per creare un giocattolo alla propria figlia, inventò la Fused Deposition Modeling (FDM), che brevettò nel 1989 e rese commerciale. Infatti nel 1988 fondò, insieme alla moglie Lisa, la Stratasys, ancora oggi una delle aziende leader del settore [11]. Nel 1989-90 vennero condotte le prime ricerche per utilizzare la tecnica SLS con polveri di metalli a singola fase, ma non ebbero successo. Tuttavia, nel 1994 si riuscirono ad ottenere le prime parti stampate, rispettivamente in acciaio inossidabile 316L grazie all'università Fraunhofer IPT e in un miscuglio di Fe e Cu grazie alla Katholieke Universiteit Leuven. Però, è nello stesso anno che, da una collaborazione tra l'azienda tedesca EOS GmbH e la Electrolux Rapid Development (ERD), nasce il primo prototipo di sistema di stampa layer-by-layer per metallo, la EOSINT M160, che utilizza la tecnologia denominata Direct Metal Laser Sintering (DMLS) [10], [12]. Il primo reale utilizzo di questa tecnologia fu la produzione di inserti per stampi, da cui prese il nome di rapid tooling.

Negli anni successivi altre tecniche simili alla DMLS furono sviluppate e proposte da aziende diverse. In particolare, già nel 1992 vennero condotte ricerche sul principio di fondere polveri elettricamente conduttive grazie ad un raggio elettronico, per poi diventare brevetto nel 1993 [13]. Negli anni successivi continuarono le ricerche nella Chalmers University of Technology di Gothenburg, in Svezia, fino al 1997, quando fu fondata l'azienda Arcam AB, che continuò autonomamente lo sviluppo di tale tecnologia, con l'obiettivo di commercializzare un sistema che la utilizzasse. Così, nel 2002 venne lanciato il primo sistema con tecnologia Electron Beam Melting (EBM), che permetteva di realizzare parti metalliche strato dopo strato fondendole grazie ad un raggio elettronico. Questa tecnologia venne utilizzata dapprima per la produzioni di protesi e impianti in campo medicale per poi diventare, nel 2007, un sistema chiave per la produzione di palette di turbine aeronautiche in alluminuro di titanio [14].

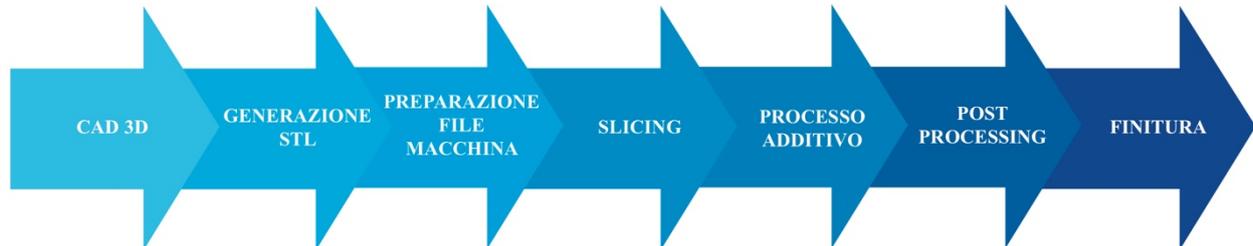
Negli ultimi vent'anni, l'additive manufacturing si è evoluta notevolmente, soprattutto grazie allo sviluppo in numerosi settori tecnologici. Sicuramente, il progresso riguardante la potenza di calcolo dei computer e la riduzione dei costi di immagazzinamento dei dati ha contribuito maggiormente nello sviluppo delle odierne tecnologie additive, insieme alla conseguente evoluzione dei software CAD, CAE e CAM. Inoltre, è stata altresì di fondamentale importanza l'evoluzione dei materiali, delle fonti energetiche come laser e fasci elettronici e dei controlli logici programmabili (PLCs), che hanno permesso la creazione di sistemi di stampa sempre più accurati e affidabili, da rendere l'AM una realtà concreta per produrre semilavorati e componenti finiti in piccoli lotti [2].

## 1.2 Il ciclo della fabbricazione additiva

Seppur esistano numerose tecniche di additive manufacturing caratterizzate da processi differenti, è possibile definire alcuni step che delineano il ciclo generale della fabbricazione additiva, ovvero l'iter che è necessario seguire per realizzare un componente. Naturalmente, potrebbero esserci delle piccole variazioni in base alla tecnologia utilizzata, al componente considerato oppure alla macchina impiegata [2], [15]. Ad ogni modo, sono sette le fasi di cui è composto il ciclo dell'additive manufacturing, come è anche possibile osservare in figura 1.1:

- Creazione modello CAD 3D. Il punto di partenza di tutto il processo è la rappresentazione virtuale in 3D del componente in esame mediante l'utilizzo di software di modellazione 2D o 3D, solida o di superficie. Si ottiene, dunque, un file CAD che può essere di diversi tipi, ad esempio STEP, IGES, PARASOLID, ecc.
- Generazione del file STL. Come secondo step è necessario convertire il file CAD 3D in STL (Standard Triangulation Language), un modello di tipo "Shell" in cui le superfici del componente sono approssimate attraverso triangoli. Il file contiene soltanto informazioni sulla geometria del modello, rimuovendo tutte le altre informazioni superflue.
- Preparazione del file macchina. Il file STL viene per prima cosa corretto, eliminando gli eventuali errori che potrebbero inficiare la riuscita del job o la qualità del componente finale. Dopodiché il componente viene posizionato all'interno del volume di lavoro della macchina, orientato e vengono generati i supporti. Questi hanno la funzione di sorreggere le parti sporgenti, ancorare la parte alla piastra di costruzione, scambiare calore con la piastra e anche, in certi casi, proteggere alcune zone del componente. Questi sono importantissimi per la buona riuscita del processo di stampa e per la qualità del manufatto finale: per questo motivo è necessario generarli correttamente e nel modo più efficiente, in termini di massa e forma.
- Slicing. È l'operazione che crea le sezioni, ovvero ogni singolo strato, che la macchina andrà a stampare. Questo avviene mediante l'intersezione del modello STL, preparato in precedenza, con piani paralleli aventi normale corrispondente alla direzione z di crescita del componente. Lo spessore degli strati e la strategia di suddivisione dipendono dalla tecnologia additiva che verrà utilizzata. Per questo motivo lo slicing è spesso gestito da un software (o da un'estensione) fornito insieme alla macchina: i dati relativi alle sezioni sono utilizzati direttamente dalla macchina durante il processo di stampa.
- Processo additivo. Questa fase rappresenta la vera e propria stampa del componente. Ogni tecnica è caratterizzata da specifiche particolarità trattate successivamente.
- Post-processing. Racchiude al suo interno tutte le operazioni successive alla stampa che permettono di ottenere il componente. In funzione del processo additivo adottato, queste possono essere: l'estrazione del pezzo, il distacco dalla piastra di costruzione, la rimozione delle polveri residue, il lavaggio, la rimozione dei supporti, trattamenti termici, ecc.
- Finitura. Grazie a quest'ultima fase è possibile ottenere il componente funzionale da mettere in opera. Infatti, per alcuni processi, soprattutto per metallo, è necessario sottoporre il

componente a trattamenti che ne migliorino la qualità in certe zone, ad esempio per rispettare una data tolleranza dovuta ad un accoppiamento o una prescritta rugosità. Questo è possibile attraverso l'utilizzo di tecniche convenzionali con macchine CNC e trattamenti per diminuire la rugosità superficiale [2], [16].



**Figura 1.1** Ciclo della fabbricazione additiva

### 1.3 Principali tecniche di additive manufacturing

Dato il grande successo delle tecnologie additive negli ultimi vent'anni, il panorama manifatturiero si è arricchito di numerose tecniche, che differiscono tra loro per la materia prima utilizzata, il tipo di fonte energetica, come viene creato il legame tra gli strati e altri fattori. Per questo motivo, per presentare le diverse tecniche di additive manufacturing, è dapprima necessario classificarle. Essendo numerosi i metodi di classificazione e poiché verranno presentate soltanto le tecniche reputate di maggior interesse, si è deciso di adottare un approccio molto semplificato, fondato sul tipo di materia prima utilizzata e sullo stato in cui si trova. Dunque, la prima distinzione è operata tra materiali metallici e polimerici, non considerando i ceramici e gli organici, per i quali le tecniche AM sono ancora di scarso interesse. Dopodiché, la seconda diversificazione è realizzata in base allo stato della materia prima richiesto dal processo, ovvero liquida, solida o sotto forma di polvere [2], [16], [17].

In tabella 1.1 è possibile osservare la classificazione presentata, in cui si trovano le tecniche che verranno descritte nel seguito.

**Tabella 1.1** Principali tecniche di AM e classificazione in base al materiale e allo stato della materia prima

	<b>Metallo</b>	<b>Polimero</b>
<b>Liquido</b>		Stereolitografia (SLA)
<b>Solido</b>		Fused deposition modeling (FDM)
<b>Polvere</b>	Selective laser melting (SLM)	
	Electron beam melting (EBM)	Selective laser sintering (SLS)

### 1.3.1 Fused deposition modeling (FDM)

È forse la tecnica più diffusa al mondo ed è sicuramente la più conosciuta, a causa delle stampanti 3D casalinghe molto di moda negli ultimi anni. Il processo, illustrato in figura 1.2, consiste in un filo sottile di materiale polimerico (quindi allo stato solido) che viene fatto passare attraverso un estrusore riscaldato, il quale porta la temperatura poco al di sopra quella di fusione del materiale, rendendolo semi-liquido, il quale per gravità si deposita in posizione. Dopodiché, questo si raffredda ritornando solido e legandosi con lo strato sottostante. L'estrusore è montato su una testina che può muoversi sul piano x-y, mentre lo spostamento in z è realizzato dalla piastra oppure dalla struttura che sorregge la testina. Poiché le superfici a sbalzo non collano, sono necessari dei supporti, spesso stampati con un materiale solubile in acqua: in questo caso la testina presenta un secondo ugello apposito. La precisione può essere del decimo di mm in direzione x-y mentre diventa più alta in z, in base allo spessore dello strato depositato. I materiali processabili sono termoplastici (riciclabili) come ABS, PLA, PC ma anche tecnopolimeri, ovvero termoplastici con rinforzo in altro materiale, come carbonio o fibra di vetro. Le applicazioni sono la prototipazione funzionale, stampi, stampi per preserie e pezzi definitivi [2], [16], [18], [19].

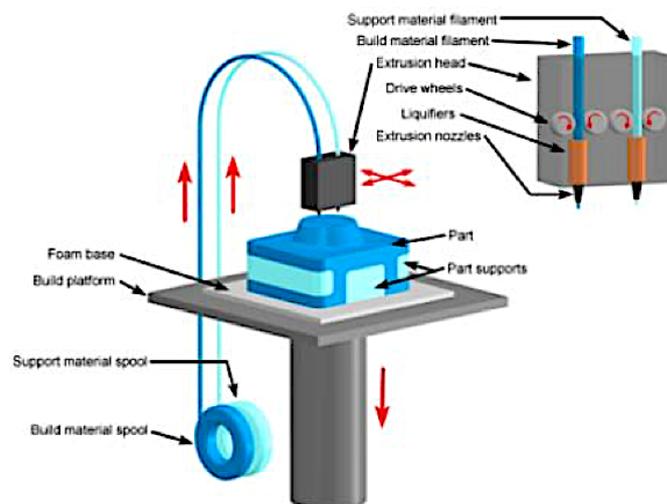


Figura 1.2 Schema del processo di FDM [16]

### 1.3.2 Stereolitografia (SLA)

La stereolitografia, come visto precedentemente, è la prima tecnica additive ad essere stata brevettata e consiste nella solidificazione di un polimero fotosensibile liquido, contenuto in una vasca, grazie ad un fascio laser, il quale attiva la polimerizzazione del materiale. Il processo è il seguente: la piastra di costruzione, che può muoversi in z, si abbassa di una distanza equivalente allo spessore di un layer, formando uno strato di liquido. Il laser viene mosso sulla sezione da solidificare indurendola e legandola con lo strato sottostante. Dopodiché la piastra si abbassa nuovamente e il ciclo riparte, ripetendosi uguale per tutti gli strati fino a che il componente non è completo. A questo punto viene inserito in un forno UV per terminare la polimerizzazione. Inoltre, sono necessari i

supporti per sostenere le parti a sbalzo e evitarne l'incurvamento. La SLA offre una precisione di 0,05-0,025 mm e un'ottima rugosità superficiale, le migliori ottenibili con processi additivi. Purtroppo, i fotopolimeri risultano essere dei termoindurenti acrilici, epossidici o vinilici, che di natura non sono riciclabili. Per questo motivo con l'SLA non è possibile produrre parti definitive, ma le applicazioni principali sono la prototipazione, modelli per replicazione siliconica, modelli a perdere, parti per test aerodinamici e di flusso [16], [18]. In figura 1.3 è riportato lo schema del processo.

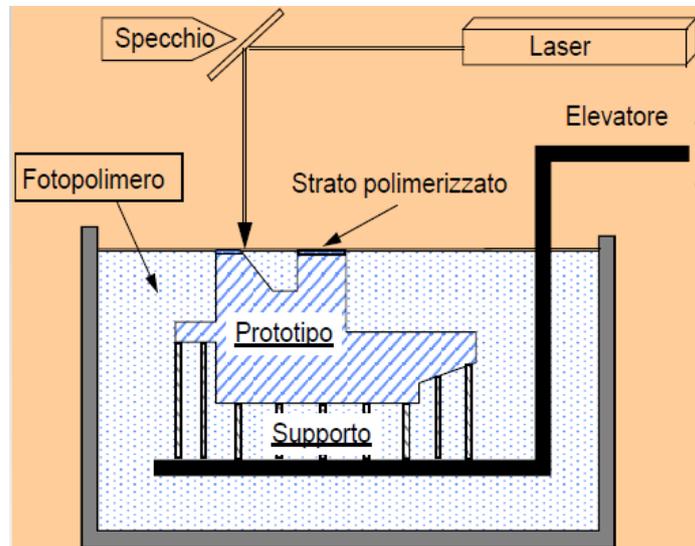


Figura 1.3 Schema del processo di SLA [16]

### 1.3.3 Selective laser sintering (SLS)

Questo è un processo in cui un materiale polimerico sotto forma di polvere viene fuso attraverso un fascio laser: dunque non vi è alcuna sinterizzazione, in contrasto con il nome. È definita una tecnica "a letto di polvere", in quanto il materiale viene steso, grazie ad una racla, su tutta la piastra di lavoro e, dopodiché, soltanto la sezione interessata (derivante dallo slicing) viene colpita dal fascio e fonde, solidifica e si lega alla sezione solida sottostante, come illustrato in figura 1.4. In seguito, la piastra si abbassa di una distanza pari allo spessore di un layer e viene steso nuovamente uno strato di polvere, facendo ricominciare il ciclo. La camera di lavoro è mantenuta ad una temperatura di poco al di sotto di quella di fusione del materiale, il che rende necessario soltanto un modesto apporto energetico da parte del laser per fondere la sezione. Inoltre, si evitano ritiri incontrollati del materiale, in modo da scongiurare deformazioni e incurvamenti della parte, e si ha la sinterizzazione della polvere circostante, il che rende non necessari i supporti. In questo modo è possibile riempire l'intero volume di lavoro anche con componenti diversi, il cosiddetto "nesting 3D". Il processo ha una buona precisione (anche di 0,1 mm) e una buona finitura superficiale, comunque peggiore rispetto alla SLA. I materiali processabili sono pochi e sono polimeri termoplastici come il nylon e il polistirene, che possono essere caricati con particelle di natura diversa a scopo di rinforzo. Le applicazioni vedono la produzione di prototipi funzionali, modelli per fusione a cera persa e parti definitive [16], [18].

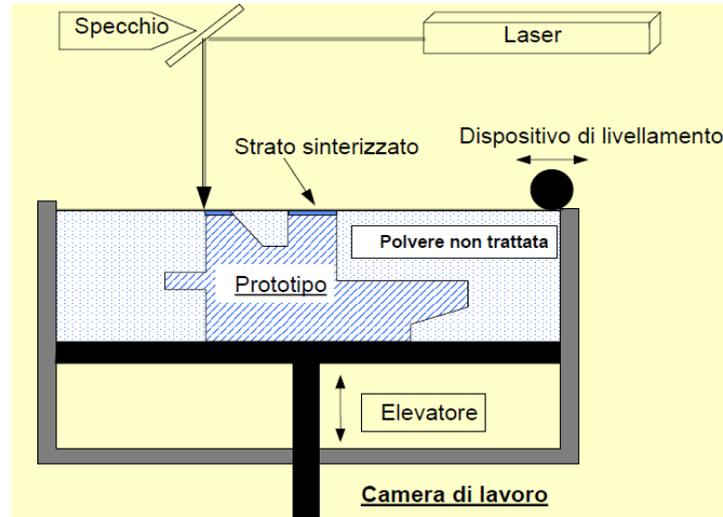


Figura 1.4 Schema del processo di SLS [16]

### 1.3.4 Selective laser melting (SLM o L-PBF o DMLS)

La selective laser melting è una tecnologia derivante dalla SLS che ha come materiale di partenza una polvere metallica. Il principio di funzionamento è lo stesso, con alcune piccole differenze. Infatti, è una tecnica a letto di polvere, in cui una racla stende uno strato di polvere e un laser la fonde selettivamente nelle zone desiderate, come mostrato in figura 1.5. In questo caso, però, il laser ha una potenza maggiore, in quanto deve fornire l'energia necessaria per fondere un metallo e legarlo correttamente con lo strato necessario, il che richiede la parziale rifusione di quest'ultimo. La camera non è riscaldata ma presenta un'atmosfera protettiva di azoto per evitare ossidazione dei metalli. In questa tecnica i supporti sono obbligatori e molto importanti, infatti la polvere metallica non costituisce un sostegno per le parti fuse che, se a sbalzo, crollerebbero. Inoltre, sono importantissimi per il trasferimento di calore e il raffreddamento del pezzo, l'ancoraggio con la piastra e per

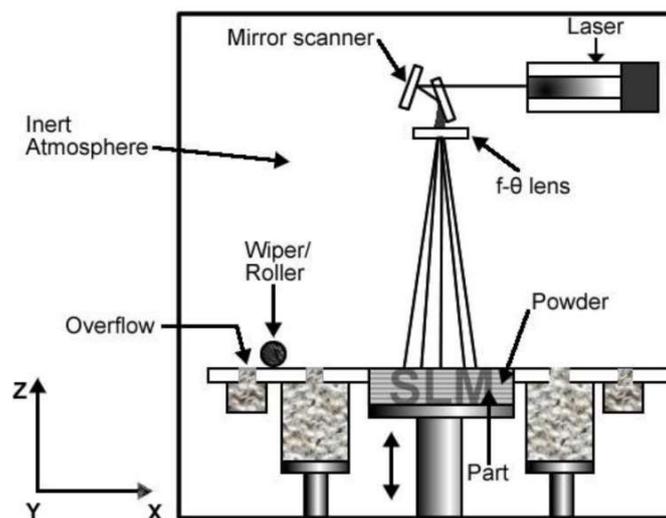


Figura 1.5 Schema del processo di SLM [16]

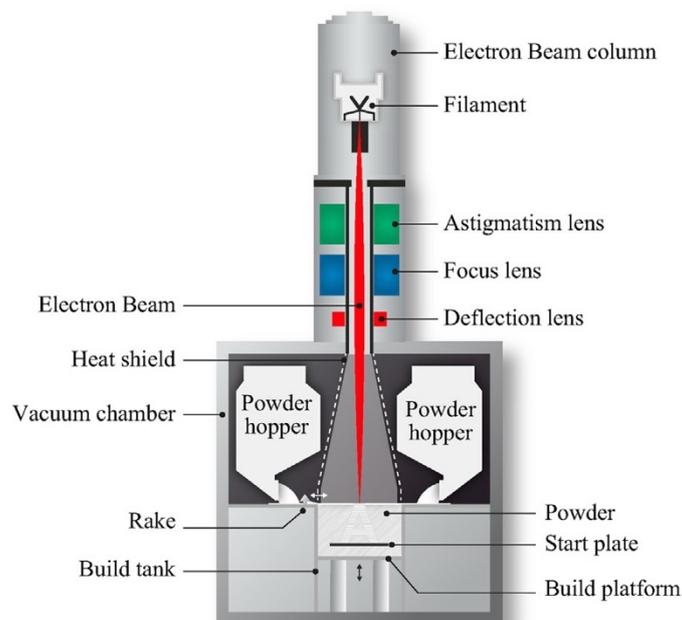
combattere le distorsioni dovute al velocissimo raffreddamento. Per questo motivo, non è possibile riempire l'intero volume di lavoro, effettuando il nesting. Questa tecnologia viene utilizzata prevalentemente per la prototipazione, gli stampi e la produzione di componenti definitivi. Le applicazioni sono molteplici in diversi settori, tra cui il medicale e dentale, l'aerospaziale, la gioielleria, il motorsport, ecc. [16], [20].

## 1.4 Electron beam melting

L'electron beam melting (EBM) o electron powder bed fusion (E-PBF) è un processo di additive manufacturing che utilizza un fascio elettronico ad alta energia per fondere, strato per strato, polveri di materiali metallici. Le applicazioni trovano spazio in diversi settori, tra cui il medicale, l'aeronautico, l'aerospaziale e il motorsport, grazie alla possibilità di produrre parti molto complesse e funzionali, con un utilizzo efficiente del materiale. La tecnologia EBM® è un'esclusiva dell'azienda Arcam AB, che ha sede a Mölndal, in Svezia e che nel 2016 è stata acquisita dal colosso statunitense General Electric Company. Nello stesso anno è stata presentata da ARCAM la nuova linea di macchine, la Q-series, con la quale sono stati introdotti diversi miglioramenti rispetto alla linea precedente, la A-series [3], [19].

### 1.4.1 Hardware macchina

Il sistema EBM potrebbe sembrare inedito e complesso: in realtà risulta essere simile ad una macchina saldatrice in cui il principio di funzionamento è paragonabile ad un microscopio elettronico. Infatti, all'interno di una macchina EBM è possibile individuare due parti fondamentali: l'unità del fascio elettronico, in cui viene generato e gestito il fascio, e la camera di costruzione, in cui la polvere



**Figura 1.6** Schema hardware semplificato di una macchina EBM [1]

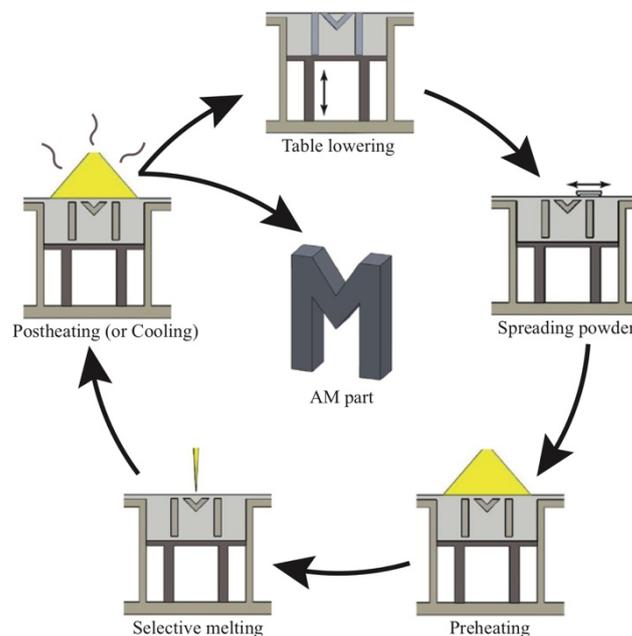
viene stesa e fusa strato per strato sulla piastra di lavoro formando il componente [1]. In figura 1.6 è possibile osservare i componenti più importanti di cui è costituito il sistema EBM della Arcam.

L'unità del fascio elettronico consiste in una colonna, chiamata anche "cannone elettronico", formata da una parte superiore in cui si genera il fascio e da quella inferiore in cui il fascio viene controllato da lenti magnetiche. Nella parte superiore della colonna è posizionato un filamento di tungsteno il quale, riscaldato a temperature altissime (superiori ai 2500 °C), emette elettroni e funge da catodo [1], [16]. Al di sotto di questo, ad una data distanza, si trova l'anodo ed è proprio la differenza di potenziale tra catodo e anodo, mantenuta pari a circa 60 kV, che accelera gli elettroni fino ad una velocità compresa tra 0,1 e 0,4 volte quella della luce [21]. Per controllare il flusso di elettroni vi è un componente forato a forma di tazza, la "grid cup", che avvolge la zona in cui è posizionato il filamento e che, grazie ad un campo elettrico al suo interno, funge da diaframma per il fascio elettronico, permettendone il passaggio oppure bloccandolo. Dopodiché il fascio entra in un tubo in cui viene direzionato per poi accedere alla parte inferiore della colonna. Qui viene controllata la forma e la deflessione del fascio attraverso tre lenti elettromagnetiche (bobine), posizionate una dopo l'altra attorno alla colonna. La prima lente, quella di astigmatismo, corregge la forma del fascio, rendendola circolare o più ovale. La seconda, quella di focus, controlla la dimensione del fascio mentre la terza, quella di deflessione, controlla la posizione del fascio sulla piastra di costruzione, muovendolo sul piano x-y in accordo con i dati delle sezioni forniti dal sistema di controllo [1]. Per questo motivo nel cannone elettronico non ci sono parti meccaniche in movimento per il controllo del fascio. La corrente di quest'ultimo è regolata nell'intervallo 1-50 mA e lo spot può essere focalizzato fino ad un diametro di 0,1 mm [3]. Per evitare che il fascio elettronico venga deviato o diffuso dalle molecole d'aria, all'interno della macchina è mantenuto un livello di vuoto abbastanza spinto, che può arrivare anche a  $10^{-8}$  Pa nella colonna del cannone elettronico, grazie a delle pompe turbomolecolari. In condizioni di lavoro, la pressione è di circa  $10^{-5}$  Pa nella colonna e  $10^{-3}$  Pa nella camera di costruzione [1], [3]. Inoltre, il vuoto scongiura la formazione di ossidi durante la fusione del materiale, rendendo il prodotto di migliore qualità e permettendo il riutilizzo delle polveri [3]. Durante il processo di stampa, una piccola quantità di elio viene insufflata nella camera alla pressione di  $10^{-1}$  Pa per evitare il sorgere di cariche elettriche nelle polveri e per assicurare la stabilità termica del processo. In aggiunta, il flusso di elio viene utilizzato per velocizzare il raffreddamento in macchina del componente stampato al termine del processo [1], [22].

La camera di costruzione è formata da tre parti principali: una struttura centrale di acciaio dove vi è la piastra di costruzione (build tank), le due tramogge contenenti la polvere e la racla per stendere gli strati. Il build tank ha lo scopo di contenere il meccanismo di movimentazione della piattaforma di lavoro, la quale è mossa in direzione z e permette il controllo dello spessore dello strato. Questo è compreso nel range 0,05-0,2 mm, in funzione del materiale. Inoltre, nella parte bassa delle pareti che guidano la piastra vi è un circuito di raffreddamento a liquido, che permette la refrigerazione del blocco di polvere una volta ultimato. Invece, le due tramogge lasciano cadere la polvere per gravità formando due cumuli dai quali la racla attinge acquisendo la quantità di polvere da stendere. Dopodiché, questa si muove da una parte all'altra del piano di lavoro creando uno strato omogeneo in x-y [1].

## 1.4.2 Processo

Il processo EBM inizia con due fasi che non si ripetono nel corso del processo: la prima è la creazione del vuoto all'interno della macchina grazie alle pompe turbomolecolari; la seconda è il riscaldamento della piastra di lavoro ad una data temperatura, la quale dipende dal materiale che verrà fuso successivamente, mediante ripetuti passaggi del fascio elettronico defocalizzato ad alta velocità [1], [3]. Dopodiché, comincia il processo ciclico che verrà ripetuto tante volte quante sono gli strati in cui è stato diviso il componente mediante lo slicing. Il primo step è la stesura, grazie ad alcuni passaggi della racla, dello strato di polvere sopra la piastra di lavoro, che viene successivamente riscaldato in due fasi. La prima ("preheating one") riscalda la polvere sull'intera area della piastra di lavoro in modo uniforme, grazie al passaggio ripetuto del fascio defocalizzato ad elevata velocità (ad esempio 15000 mm/s e 30 mA) [1], [22]. La seconda ("preheating two") consiste in un riscaldamento non più omogeneo, bensì soltanto di un offset delle zone in cui verranno fuse le sezioni. I preriscaldamenti descritti sinterizzano parzialmente le polveri in modo da evitare che le particelle vengano sparse per la camera, a causa dell'elevata energia cinetica del fascio che le colpisce e delle cariche elettriche che si instaurano nelle polveri [23]. Inoltre, le polveri parzialmente sinterizzate riescono a sopportare dei bassi carichi, il che diminuisce il numero di superfici che dovranno essere supportate con strutture apposite, ma richiederanno un post processo per eliminarle dal componente [24]. In aggiunta, il riscaldamento porta ad una diminuzione dei gradienti termici che si avranno nella successiva fase di fusione, portando ad un componente caratterizzato da basse tensioni residue, che per alcuni materiali non richiede un successivo trattamento termico [1], [25]. A questo punto, inizia la fase di fusione delle polveri ("melting"), in cui il fascio focalizzato, a potenza e velocità minori delle fasi precedenti, fonde le sezioni e le fa aderire a quelle sottostanti, grazie all'elevata penetrazione del fascio che rifonde anche una piccola percentuale dello strato precedente [1]. Inoltre il fascio, data la sua elevatissima velocità (fino a 8000 m/s), può mantenere attive diverse pozze di fusione



**Figura 1.7** Le fasi del processo di EBM

contemporaneamente: questo sistema è chiamato MultiBeam® [26]. Dopo il melting, è presente una fase di bilanciamento del calore chiamata “postheating”, che dipende dalla quantità di calore fornita allo strato nelle fasi precedenti. Infatti, lo strato può essere riscaldato dal fascio con una modalità simile al preheating two, oppure può essere raffreddato semplicemente lasciandolo riposare per qualche secondo [25], [27]. Terminata questa fase, il ciclo si conclude con l’abbassamento della piastra di lavoro in direzione z di una quantità pari allo spessore di un layer e la stesura di un altro strato di polvere. Il ciclo descritto, raffigurato in figura 1.7, viene ripetuto fino al completamento del componente il quale, una volta ultimato, viene raffreddato in macchina grazie ad un circuito di raffreddamento a liquido e grazie ad un flusso di elio all’interno della camera [1]. Raggiunta una temperatura che permetta l’estrazione, il componente, immerso in un blocco di polvere sinterizzata, viene rimosso dalla macchina e successivamente pallinato con la stessa polvere utilizzata nel processo all’interno di un’apposita macchina. In questo modo, il componente viene liberato dalla polvere in eccesso e questa può essere riciclata, in quanto non vi è contaminazione con particelle esterne [1], [28].

### 1.4.3 Materiali e applicazioni

La tecnica EBM può essere utilizzata con numerose classi di materiali diversi: acciaio inossidabile (17-4), acciaio per utensili (H13), superleghe di nichel (625 e 718), superleghe a base cobalto (Stellite 21, Arcam ASTM F75 CoCr), metalli duri (NiWC), leghe di titanio (Ti6Al4V, Ti6Al4V ELI) alluminio, leghe Invar a bassa espansione, composti intermetallici, rame, niobio e berillio [1], [3]. Tuttavia, in questo periodo è l’utilizzo delle leghe di titanio e i suoi composti intermetallici a suscitare il maggior interesse. Infatti, i componenti in titanio vengono tradizionalmente prodotti per forgiatura, estrusione o fonderia. Però, a causa dell’elevata resistenza specifica, dell’alta temperatura di fusione, la bassa fluidità del fuso e l’elevata affinità con gli agenti atmosferici, sono numerosi i problemi incontrati dalle tecnologie tradizionali, come la creazione di cricche o l’alterazione della composizione delle fasi [29]. Per questo motivo i costi per produrre componenti di qualità aumentano, limitandone di conseguenza la complessità ottenibile. Con l’EBM, che lavora in vuoto, con elevata energia del fascio e senza richiedere elevata fluidità del fuso, è possibile superare le problematiche fin qui descritte, ottenendo componenti con complessità impensabile per i processi tradizionali. Le applicazioni che trovano i componenti prodotti con questi tipi di leghe sono prevalentemente nel campo medicale, grazie all’intrinseca biocompatibilità del titanio e alla possibilità che offre la tecnologia EBM di creare strutture che ne favoriscano la osseointegrazione, come le strutture trabecolari [26], ma anche alla possibilità, grazie alle tecniche di scansione 3D, di produrre protesi personalizzate per ogni paziente, il che porta ad una “nuova generazione per gli impianti biomedicali” [1], [3], [30]. Anche le leghe di Co stampate in EBM trovano applicazioni in campo medicale, grazie alla loro alta resistenza all’abrasione fondamentale per le protesi di articolazioni [31]. In ogni caso, si trovano applicazioni anche nell’automotive e nell’aerospaziale, con la produzione di pale di turbina e turbocompressori, valvole, combustori, ecc. In particolare, nel settore aeronautico le tecnologie additive riducono il buy-to-fly ratio, in quanto le polveri vengono riciclate e riutilizzate quasi integralmente, e i tempi di sviluppo, soprattutto dove sono frequenti le variazioni di progetto. Da anni

si studiano e producono con EBM pale di turbina in TiAl, grazie alla sue ottime proprietà meccaniche, ovvero la bassa densità, l'alta resistenza e durezza specifica, l'elevata tenacità alla frattura e resistenza a fatica, resistenza alle alte temperature, resistenza all'ossidazione e buon comportamento a creep, che lo rendono un'ottima alternativa alle superleghe di nichel in un range di temperatura dai 600 °C ai 900 °C [3], [32].

## 2. Richiami teorici e analisi della letteratura

Nel seguente capitolo vengono proposti dei richiami teorici utili nel corso della trattazione. Inoltre, è presentata l'analisi della letteratura esistente in materia di valutazione dell'accuratezza dimensionale e geometrica di componenti prodotti con tecniche di additive manufacturing e di caratterizzazione della rugosità superficiale. Da questa analisi è possibile ragionare sulle metodologie da adottare successivamente per caratterizzare il sistema EBM Arcam Q10 plus.

### 2.1 Richiami su tolleranze dimensionali e geometriche

Le quote, o dimensioni nominali, assegnate ad un componente meccanico, sono riferite a superfici geometriche ideali, impossibili da produrre nella realtà a causa degli errori dimensionali e di forma derivanti dalle lavorazioni con cui vengono prodotte. Per questo motivo viene definita una "tolleranza", ovvero i limiti entro i quali risultano accettabili le inesattezze dimensionali e di forma, in relazione alla funzione che il componente dovrà svolgere. Quest'ultima riguarda la necessità di realizzare un certo tipo di accoppiamento tra due pezzi, che può essere forzato (interferenza tra le parti), mobile (gioco tra le parti) o incerto. Con l'evoluzione della produzione in serie, che richiede l'intercambiabilità delle parti per la loro sostituzione o la produzione in luoghi e tempi diversi, e degli scambi di componenti a livello internazionale, è stato necessario l'introduzione di un sistema di tolleranze unificato, che permetta la conservazione delle funzionalità dei componenti prodotti [33].

La normativa ISO 286/1-2, elaborata dall'International Organisation for Standardization (ISO), definisce un sistema generale che permette di realizzare ogni tipo di accoppiamento tra due componenti di tipo albero (pieni) e foro (vuoti) ma anche di soddisfare le esigenze dimensionali di pezzi isolati. Si definisce "tolleranza" la differenza tra la dimensione limite massima e quella limite minima consentite. Una tolleranza del sistema ISO è chiamata "tolleranza fondamentale" e viene indicata con il simbolo IT seguito da un numero, il grado. Per soddisfare tutte le necessità, per ogni dimensione nominale sono previsti 20 gradi di tolleranze normalizzate che definiscono l'ampiezza della zona di tolleranza, 18 delle quali di uso generale (da IT1 a IT18) e due per casi particolari (IT0 e IT01). A livello dimensionale, sono state unificate le tolleranze fino a 3150 mm. Ovviamente, il grado di tolleranza normalizzato varia con la dimensione nominale. Infatti, l'errore tollerato sarà minore in componenti di dimensioni ridotte e maggiore per componenti più grandi. Per questo motivo, sono stati definiti dei range dimensionali entro i quali calcolare la rispettiva tolleranza, in funzione del grado IT. Per i gradi da IT5 a IT18 esiste uno schema di calcolo unico, mentre esistono regole particolari per i gradi da IT01 a IT4, di poca importanza in questa trattazione. Inoltre, distinzione è fatta per dimensioni minori e maggiori di 500 mm. Date le dimensioni tipiche dei volumi di lavoro delle macchine di additive manufacturing per metallo, in particolare per la Arcam Q10 plus, e considerando, come si vedrà successivamente, le dimensioni caratteristiche del benchmark utilizzato per l'analisi, ci si sofferma sul sistema di calcolo per dimensioni minori di 500 mm. Per prima cosa è necessario calcolare l'unità di tolleranza  $i$ , che in questo caso si ricava grazie alla formula:

$$i = 0,45 \times \sqrt[3]{D} + 0,001D$$

dove  $D$  è la dimensione nominale. La norma definisce i diversi gradi IT in base all'unità di tolleranza  $i$  moltiplicata per un coefficiente costante  $n$ , come mostrato in tabella 2.1.

**Tabella 2.1** Classificazione dei gradi IT secondo la ISO 286-1: 1998

Grado IT	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
<b>Dimensioni 1-500 mm</b>	$7i$	$10i$	$16i$	$25i$	$40i$	$64i$	$100i$	$160i$	$250i$	$400i$	$640i$	$1000i$	$1600i$	$2500i$

Chiaramente, non è possibile creare una tabella con tutte le possibili dimensioni  $D$  dei componenti esistenti: quindi, la norma definisce una serie di intervalli dimensionali e, per ognuno di essi, viene calcolata la tolleranza, utilizzando la media geometrica degli estremi dell'intervallo ( $D_1$  e  $D_2$ ) calcolabile con la formula:

$$D = \sqrt{D_1 \times D_2}$$

Ottenuto  $D$ , per ogni intervallo dimensionale è possibile calcolare  $i$ , con cui ricavare la tolleranza per ogni grado IT [33], [34]. Le tolleranze vengono così inserite in una tabella, riportata in figura 2.1.

Dimensione nominale mm		Gradi di tolleranza normalizzati																	
		IT1 <sup>2)</sup>	IT2 <sup>2)</sup>	IT3 <sup>2)</sup>	IT4 <sup>2)</sup>	IT5 <sup>2)</sup>	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14 <sup>3)</sup>	IT15 <sup>3)</sup>	IT16 <sup>3)</sup>	IT17 <sup>3)</sup>	IT18 <sup>3)</sup>
oltre	fino a	Tolleranze																	
		μm										mm							
--	3 <sup>3)</sup>	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0,1	0,14	0,25	0,4	0,60	1	1,4
3	6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	0,12	0,18	0,3	0,48	0,75	1,2	1,8
6	10	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	0,15	0,22	0,36	0,58	0,9	1,5	2,2
10	18	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0,18	0,27	0,43	0,7	1,1	1,8	2,7
18	30	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0,21	0,33	0,52	0,84	1,3	2,1	3,3
30	50	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0,25	0,39	0,62	1	1,6	2,5	3,9
50	80	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0,3	0,46	0,74	1,2	1,9	3	4,6
80	120	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0,35	0,54	0,87	1,4	2,2	3,5	5,4
120	180	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3
180	250	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0,46	0,72	1,15	1,85	2,9	4,6	7,2
250	315	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0,52	0,81	1,3	2,1	3,2	5,2	8,1
315	400	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0,57	0,89	1,4	2,3	3,6	5,7	8,9
400	500	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0,63	0,97	1,55	2,5	4	6,3	9,7

**Figura 2.1** Tolleranze calcolate per ogni grado IT fino a 500 mm [33]

Il problema della differenza tra nominale e reale non è riferito soltanto alle dimensioni, ma anche alla forma di una definita geometria. Infatti, le superfici reali possono scostarsi dalla forma geometrica esatta prevista a disegno oppure da una posizione prestabilita rispetto ad un'altra superficie di riferimento. Per di più, lo scostamento rispetto alla forma ideale potrebbe non provocare una differenza nella dimensione misurata, la quale rimane nel limite di tolleranza imposto, ma

potrebbe compromettere la funzionalità del pezzo. Dunque, dato che le tolleranze dimensionali non riescono a controllare questo aspetto, sono state introdotte le tolleranze geometriche, tuttora normate nella ISO 1101, negli Stati Uniti conosciute come “Geometrical Dimensioning and Tolerancing” (GD&T). Queste riguardano la forma del componente ma anche l’orientamento e la posizione rispetto ad un riferimento. Per l’utilizzo di entrambi i tipi di tolleranze contemporaneamente, si è definito un principio, detto “d’indipendenza”, che sancisce appunto l’indipendenza tra quelle dimensionali e le geometriche. Per definizione, quest’ultime limitano soltanto lo scostamento della forma o dell’orientamento o della posizione di un elemento rispetto al teorico, senza tener conto delle sue dimensioni. Le tolleranze geometriche si possono suddividere in quattro categorie:

- Tolleranze di forma: limitano la variazione di una superficie o una singolarità della forma ideale indicata nel disegno. La forma è accettabile quando la distanza di ognuno dei suoi punti, rispetto alla forma geometrica ideale, è minore o uguale alla tolleranza imposta. Le tolleranze di forma sono: rettilineità, planarità, circolarità, cilindricità e profilo.
- Tolleranze di orientamento: stabiliscono i limiti di variazione di una superficie rispetto ad uno o più elementi presi come riferimento (i datum), i quali possono essere presenti sul pezzo e devono avere una forma sufficientemente precisa. Le tolleranze di orientamento sono: parallelismo, perpendicolarità e inclinazione.
- Tolleranze di localizzazione: definiscono i limiti di variazione di una superficie o di una singolarità rispetto ad una posizione ideale definita sul disegno o da un altro elemento preso come riferimento. Le tolleranze di posizione sono: posizione, simmetria, concentricità e coassialità.
- Tolleranze di oscillazione: stabiliscono i limiti di variazione di una superficie o una singolarità rispetto ad una forma definita nel disegno facendo ruotare la parte attorno ad un elemento di riferimento. Le tolleranze di oscillazione sono: oscillazione circolare e oscillazione totale.

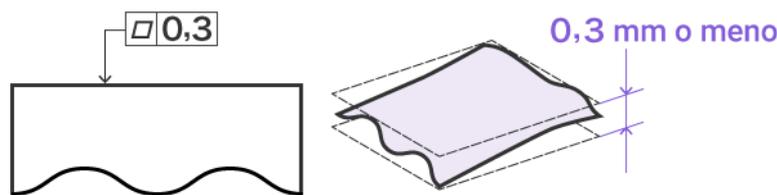
TYPE	CHARACTERISTIC	SYMBOL
Form	Straightness	—
	Flatness	
	Circularity	
	Cylindricity	
Profile	Line Profile	
	Surface Profile	
Orientation	Angularity	
	Perpendicularity	
	Parallelism	
Location	Position	
	Concentricity	
	Symmetry	
Runout	Circular Runout	
	Total Runout	

**Figura 2.2** Simboli per le tolleranze geometriche GD&T

In figura 2.2 sono riportate tutte le tolleranze geometriche insieme ai simboli con cui vengono indicate nei disegni, secondo la ISO 1101 [33], [35].

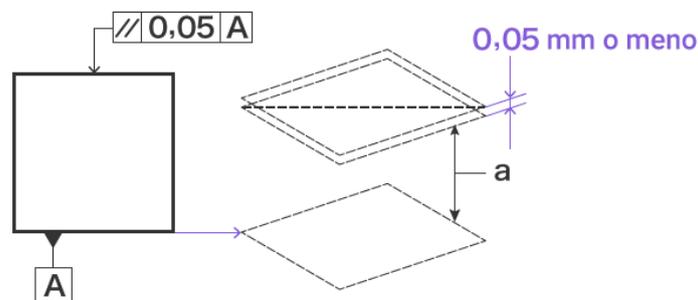
Nella successiva trattazione, la valutazione dimensionale non terrà conto di tutte le tolleranze geometriche qui citate, ma soltanto di alcune reputate più significative. Per questo motivo, per non appesantire la trattazione con una descrizione della totalità delle tolleranze geometriche, viene fornito soltanto un approfondimento di quelle che saranno utilizzate, ovvero:

- Planarità: è una tolleranza di forma che descrive la condizione dei punti di una superficie di appartenere ad uno stesso piano. La tolleranza di planarità specifica una zona tridimensionale determinata con due piani tra loro paralleli ad una distanza uguale al valore della tolleranza specificata, come visualizzato in figura 2.3.



**Figura 2.3** Definizione di planarità [36]

- Parallelismo: è una tolleranza di orientamento, quindi richiede un riferimento, e può essere riferita ad una linea, un asse o una superficie. Quindi si può avere parallelismo di una linea rispetto ad un asse, di un asse rispetto ad un piano, di una superficie rispetto ad un asse, di una superficie rispetto ad un piano. Il parallelismo definisce una zona di tolleranza in base a che cosa è applicata. Infatti, se è applicata ad un asse, la zona di tolleranza sarà un cilindro di diametro pari al valore di tolleranza e asse parallelo al riferimento, se è applicata ad una superficie sarà una zona compresa da due piani paralleli al riferimento a distanza pari alla tolleranza, come mostrato in figura 2.4.



**Figura 2.4** Definizione tolleranza di parallelismo [36]

- Perpendicolarità: è una tolleranza di orientamento simile al parallelismo e anch'essa può essere riferita agli elementi prima citati. La zona di tolleranza può nuovamente essere un

cilindro di asse perpendicolare al riferimento e diametro pari alla tolleranza se questa è applicata ad un asse, o una zona compresa tra due piani perpendicolari al riferimento distanti tra loro quanto la tolleranza, come mostrato in figura 2.5.

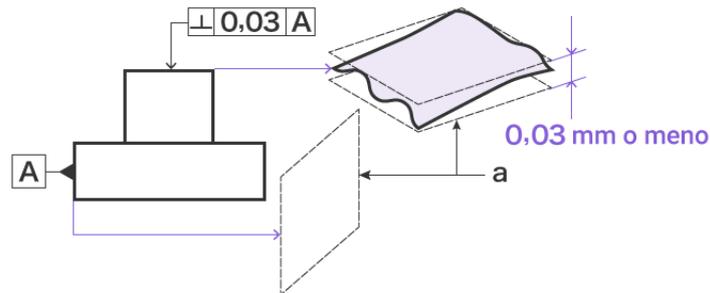


Figura 2.5 Definizione tolleranza di perpendicolarità [36]

- Coassialità: è una tolleranza di localizzazione che controlla l'errore di posizione di elementi geometrici che hanno o stesso asse di simmetria. L'asse su cui è imposta la tolleranza deve stare all'interno di una zona cilindrica di diametro pari alla tolleranza, come mostrato in figura 2.6 [33], [36].

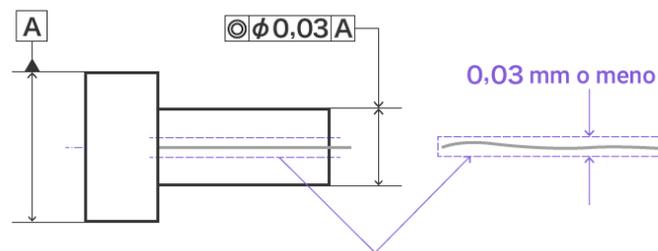
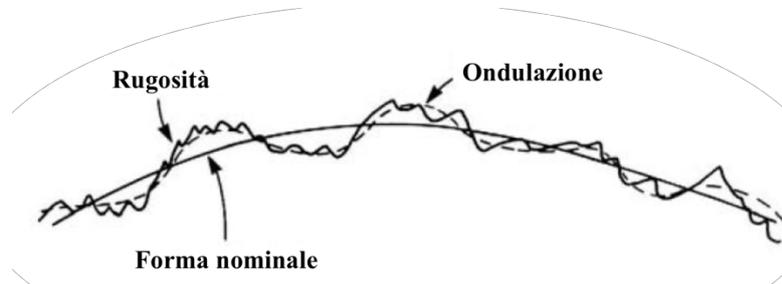


Figura 2.6 Definizione tolleranza di coassialità [36]

## 2.2 Richiami sul concetto di rugosità superficiale

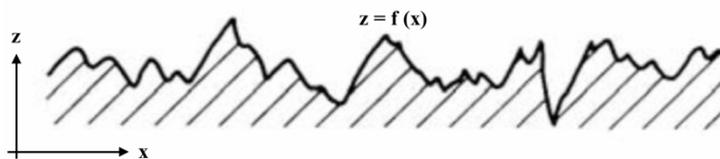
Esiste una grande differenza tra la definizione teorica di superficie, ad esempio rappresentata in un disegno, e quella realizzata nella realtà. Questa potrebbe manifestarsi in termini di forma o dimensioni della superficie, ma interessare anche la scabrosità della stessa. Infatti, le superfici che delimitano gli oggetti possono essere pensate come perfettamente lisce, ma in realtà presentano delle irregolarità che le rendono più o meno scabre: da qui nasce la differenza tra superfici ideali e reali. Gli errori che le differenziano sono di tipo microgeometrico, i quali possono essere aperiodici, come fessure, cricche, microfratture, oppure ripetersi con regolarità, come solchi, striature, ondulazione periodica. In ogni caso, le imperfezioni delle superfici sono causate dai processi di lavorazione con cui vengono prodotte e trattate, che siano questi di asportazione, di fonderia o additivi. Dunque, viene definita “rugosità” l'insieme delle irregolarità superficiali che vengono lasciate dal processo di lavorazione

e/o da altri fattori influenti, come la forma dell'utensile, la disomogeneità del materiale, la presenza di vibrazioni, ecc. Sono irregolarità caratterizzate da un passo relativamente piccolo, per il quale si differenziano dall'ondulazione che ha lunghezza d'onda maggiore. La rugosità ha notevole influenza sulla durata, sulla resistenza a fatica e alla corrosione degli organi meccanici, nonché sulle condizioni di lubrificazione presenti tra due superfici a contatto e in moto relativo tra loro [33], [37]. In figura 2.7 sono rappresentati gli errori microgeometrici rispetto al profilo nominale.



**Figura 2.7** Irregolarità microgeometriche di un profilo

Per la misura della rugosità viene utilizzato uno strumento chiamato rugosimetro. Questo presenta un'astina di metallo sulla cui estremità è montato un microtastatore a punta. Questo viene appoggiato sulla superficie da esaminare e fatto scorrere su di essa registrandone il profilo, che può essere visto come una funzione nel piano x-z, come mostrato in figura 2.8.

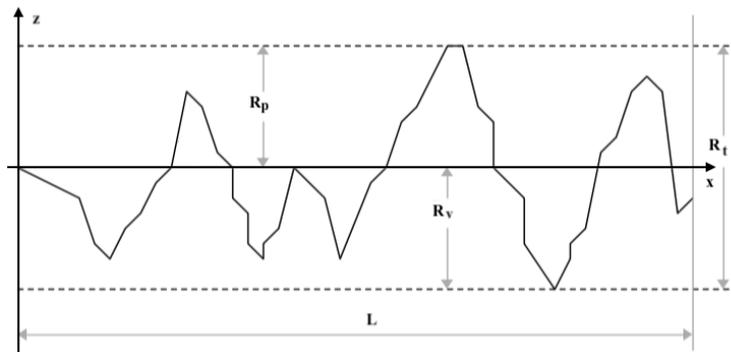


**Figura 2.8** Esempio di profilo rilevato da un rugosimetro visto come funzione in xy

Dall'analisi di questa funzione viene estratto il risultato. Esistono numerosi parametri, più o meno indicativi, per quantificare le irregolarità superficiali, normati nella ISO 4288. Prima della loro descrizione, è utile definire alcune grandezze importanti per la misurazione e il calcolo della rugosità. La prima è la lunghezza di campionamento (cut-off length), ovvero la lunghezza della porzione di profilo presa in esame per la misurazione. Questa viene presa come rappresentativa dell'intera superficie: per questo motivo dev'essere abbastanza estesa da riportare le caratteristiche della superficie, ma non troppo da essere influenzata da altre irregolarità, come l'ondulazione. La lunghezza di valutazione, invece, rappresenta l'intero tratto che il tastatore percorre per restituire il risultato: questa è multipla della lunghezza di campionamento ed è definita dalla normativa (ad esempio 5 volte la distanza di cut-off) [38]. Il risultato restituito dallo strumento in genere tiene conto dei diversi tratti misurati, facendo una media di tutti i campionamenti oppure di quelli non scartati dallo strumento. L'ultima grandezza è la linea media del profilo, definita come la linea per la quale si ha il minimo valore della somma dei quadrati delle distanze da essa dei punti del profilo reale. Di solito questa viene presa come asse delle ascisse per la funzione profilo.

È ora possibile presentare i diversi parametri per la descrizione della rugosità:

- $R_t$  o altezza massima del profilo: è la distanza che si misura tra il picco più alto e la valle più profonda.
- $R_p$  o altezza massima di picco: è la distanza tra il picco più alto e la linea media del profilo.
- $R_v$  o profondità massima di valle: è la distanza tra la valle più profonda e la linea media del profilo. Questa è visualizzabile in figura 2.9 insieme ai precedenti parametri.



**Figura 2.9** Rappresentazione dei diversi parametri che descrivono la rugosità superficiale

- $R_z$ : è la media della differenza tra i 5 picchi più alti e le 5 valli più profonde. Dato che è una media, questa misura di rugosità rende meno significativi quei picchi o quelle valli non troppo rappresentativi. La formula è la seguente:

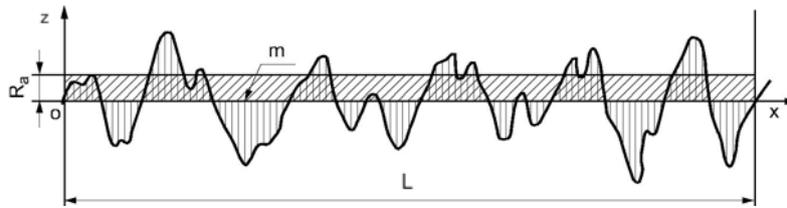
$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 P_i - \sum_{i=1}^5 V_i}{5}$$

dove  $P_i$  sono i picchi ordinati dal più elevato al meno elevato mentre  $V_i$  sono le valli ordinate dalla più profonda alla meno profonda.

- $R_a$  o rugosità media aritmetica: è la deviazione media del profilo rispetto alla linea media. Quindi, considerando la funzione del profilo e definendo con  $L$  la lunghezza di campionamento, si può calcolare con la formula:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z| dx$$

Questo integrale rappresenta l'area di un rettangolo di base  $L$  e di altezza  $R_a$ , come si può osservare in figura 2.10.



**Figura 2.10** Definizione della rugosità media aritmetica con la rappresentazione delle aree

- $R_q$  o rugosità media quadratica: è la deviazione quadratica media del profilo rispetto alla linea media. Statisticamente è più rappresentativo di  $R_a$  e si calcola con la formula:

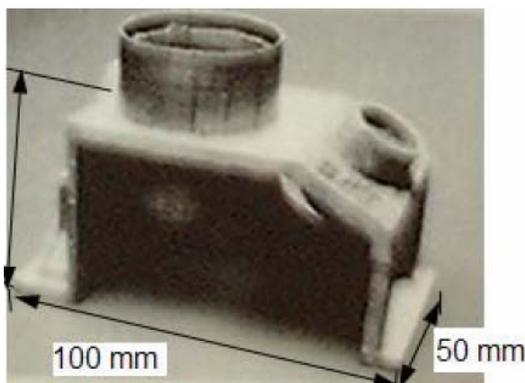
$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z^2 dx}$$

In questo caso il valore dell'integrale non è di facile rappresentazione grafica [33].

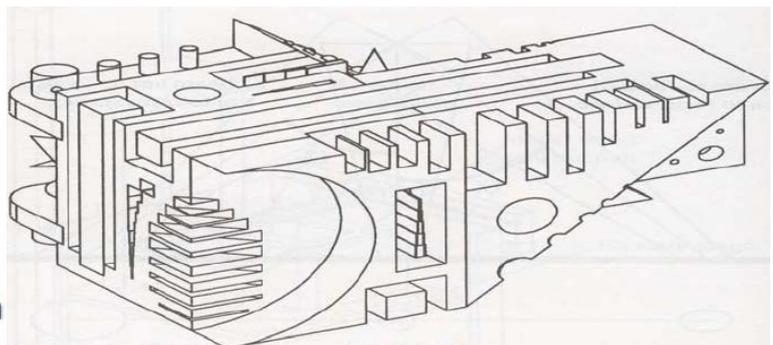
### 2.3 Analisi della letteratura sulla valutazione dell'accuratezza dei sistemi di AM

Al fine di comprendere meglio le tecniche di valutazione dell'accuratezza dimensionale e di forma dei processi di additive manufacturing, viene proposta un'analisi della letteratura, in cui sono presentati i benchmark più importanti progettati nel corso degli anni a questo scopo.

In merito a questa analisi sono stati condotti diversi studi, ma il primo benchmark appositamente progettato per sistemi additivi fu progettato da Kruth [39] nel 1991. Questo venne utilizzato per valutare le deviazioni dimensionali dei processi di SLA, SLS e FDM e confrontarli tra loro. Il benchmark presentava una struttura a forma di "U" rovesciata, sulla quale erano presenti diverse feature come cilindri verticali e inclinati, cilindri forati, superfici piane e inclinate e altre geometrie, come mostrato in figura 2.11. La struttura non presentava feature ripetute, perciò la ripetitività della macchina veniva valutata grazie alla replicazione dell'intero provino. Un anno dopo, Lart [40] ideò un provino per



**Figura 2.11** Benchmark presentato da Kruth [39]



**Figura 2.12** Benchmark presentato da Lart [40]

valutare la capacità delle macchine di AM presenti all'epoca di stampare dettagli molto fini e feature di dimensioni ridotte. Il benchmark presentava molte geometrie rettangolari in rilievo e incassate, ma anche superfici inclinate, cilindri, fori e strutture curve. In figura 2.12 si può osservare la parte descritta, notando quanto questa sia massiva e, quindi, poco adatta a sistemi di AM, in cui i ritiri causerebbero deformazioni elevate.

Childs et al. [41] nel 1994 progettaronο un benchmark per la valutazione delle caratteristiche dei sistemi di AM allora presenti sul mercato e il loro confronto. Rispetto ai benchmark precedentemente proposti, l'idea di questo studio era quella di realizzare un provino con cui testare soprattutto l'accuratezza di forma dei sistemi di AM, concentrandosi sulle deviazioni rispetto alle geometrie nominali. Inoltre, dato che le tecniche additive venivano proposte come alternativa allo stampaggio in plastica per la prototipazione funzionale, la valutazione doveva riguardare forme reali, spesso curve e non regolari. Per questo motivo, il benchmark presentava molte feature classiche, come cubi, cilindri, fori ma anche forme curve e superfici libere, come mostrato in figura 2.13. I risultati mostravano come per piccole scale (1-5 mm) il sistema di SLA avessero deviazioni minori rispetto agli altri, per medie scale (20-25 mm) non vi fosse grossa differenza tra tutti i sistemi e per larghe scale (fino a 240 mm) l'SLS fosse il migliore tra le tecniche. Il problema principale di questo provino erano le dimensioni (240 x 240 x 10 mm), non sostenibili per tutti i sistemi di AM.

Successivamente, lo studio di Iuliano et al. [42] nel 1994 ha proposto un benchmark per la valutazione delle principali performance dei sistemi additivi, ovvero la stabilità dimensionale, le tolleranze di forma, la precisione, l'influenza del software di esportazione dell'STL e la rugosità superficiale. Per quanto riguarda l'accuratezza dimensionale, questo fu forse il primo studio a esprimere i risultati in termini di gradi IT, in modo da poter confrontare le tecnologie additive con quelle tradizionali utilizzando un metodo internazionalmente riconosciuto. Inoltre, l'analisi coinvolgeva le principali tecniche di AM allora presenti, messe a confronto tra loro e testate con materiali differenti. Il provino risultava essere una rimodellazione di uno precedentemente proposto da un'azienda produttrice di macchine di AM per la valutazione delle prestazioni delle macchine, soprattutto quando veniva testato un nuovo materiale. La geometria del benchmark, mostrata in figura 2.14, presentava una struttura di forma quadrata molto regolare e soprattutto simmetrica, il che permetteva l'analisi della ripetitività, a differenza degli studi precedenti. Inoltre, sulla struttura

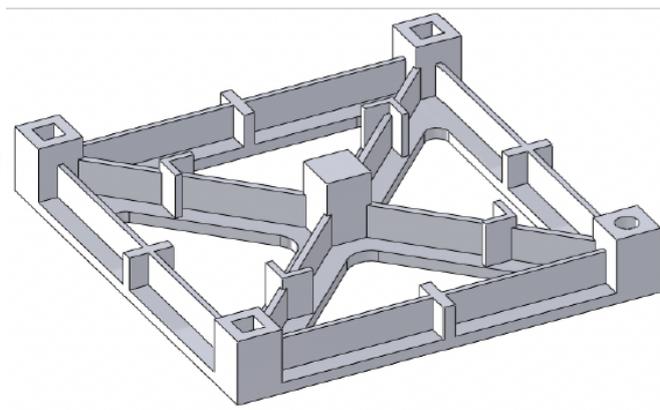
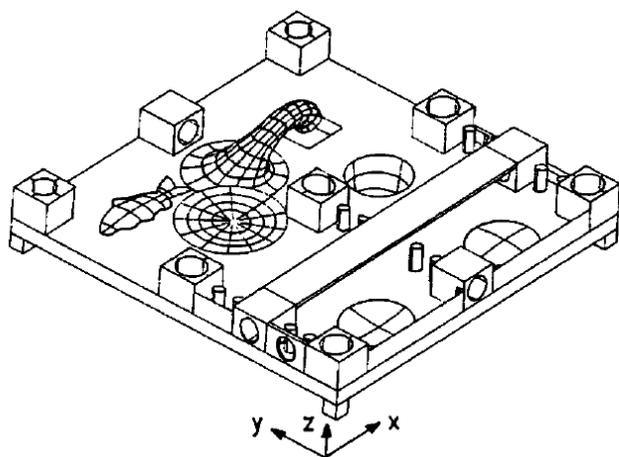


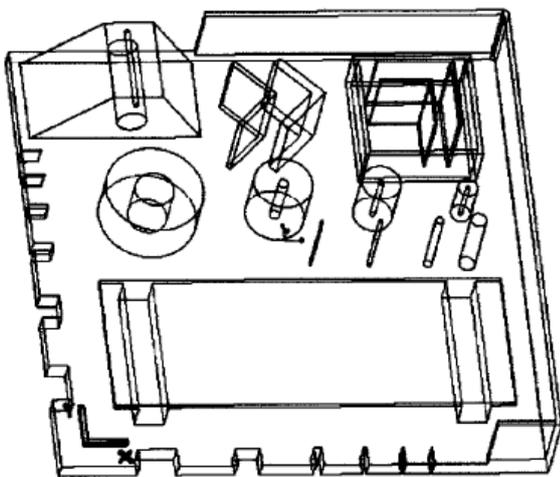
Figura 2.13 Benchmark proposto da Childs et al. [41]

Figura 2.14 Benchmark proposto da Iuliano et al. [42]

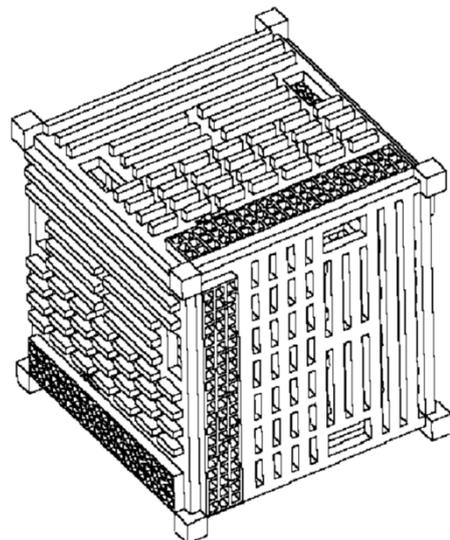
principale erano ricavate alcune feature, tra cui cubi, parallelepipedi, tacchette piane e fori di forma quadrata o circolare. Come si nota, il benchmark ha comunque una struttura poco massiva, ideale per le tecniche di AM. I risultati dello studio evidenziavano, a livello dimensionale, gradi IT compresi tra IT14 e IT16 per tutte le tecniche analizzate, dopo l'acquisizione di più di 150 valori da ogni singolo benchmark con macchina di misura CMM. Per contro, le feature contenute nel benchmark non erano molte e tutte di forma e dimensioni abbastanza simili. Infatti non vi erano forme curve, che permettessero la valutazione delle deviazioni di forma su questo tipo di strutture, o feature molto piccole per determinare la minima dimensione stampabile.

Nel 2000 Xu et al. [43] progettarono un benchmark non troppo diverso dai precedenti, con l'intenzione di valutare principalmente l'accuratezza dimensionale dei sistemi di AM, ma anche di estendere lo studio alla valutazione della rugosità, dei tempi di stampa e dei costi. Il benchmark presentava una base quadrata di lato 100 mm e spessore sottile su cui erano costruite diverse feature, come cilindri, piani, parallelepipedi, di dimensioni che partivano da 0,4 mm, così da valutare anche la capacità di stampa di dettagli molto ridotti. Il benchmark viene riportato in figura 2.15. Il provino venne utilizzato per mettere a confronto SLA, SLS, FDM e LOM ma soprattutto per selezionare i campi in cui potevano essere competitive. I risultati vedevano la SLA come il processo più preciso in tutti i range dimensionali, ma con il difetto delle strutture di supporto per parti a sbalzo. I limiti dello studio erano la presentazione dei risultati sotto forma di deviazione rispetto al nominale e non di gradi IT e la non presa in considerazione delle deviazioni di forma. Inoltre, il numero di feature presenti non era abbastanza elevato.

Invece, nel 2003 Dimitrov et al. [44] proposero un benchmark formato da numerosissime feature, ricavate su una struttura cubica di dimensioni 190x190x190 mm. Queste venivano classificate in base alla loro dimensione, definendo 4 range distinti: fini, piccole, medie e grandi. Rispetto ai benchmark precedenti, questo presentava le stesse forme su tutte le facce del cubo (come si nota in figura 2.16), in modo da valutare la precisione e la ripetibilità dei sistemi nei tre diversi piani, x, y e z. Lo studio metteva a confronto due materiali diversi stampati con la stessa macchina di 3DP (three dimensional printing). I risultati vennero riportati in termini di gradi IT, ottenendo gradi compresi tra IT16 e IT19.



**Figura 2.16** Benchmark progettato da Xu et al. [43]

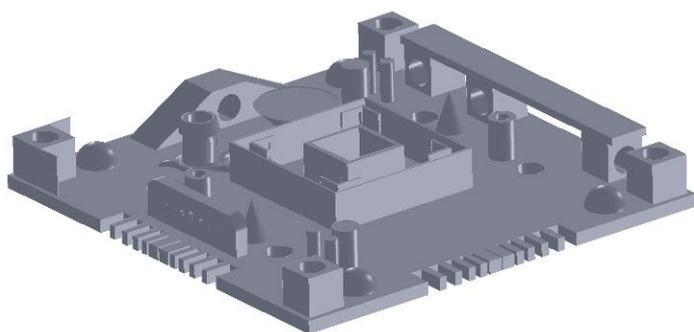


**Figura 2.15** Benchmark proposto da Dimitrov et al. [44]

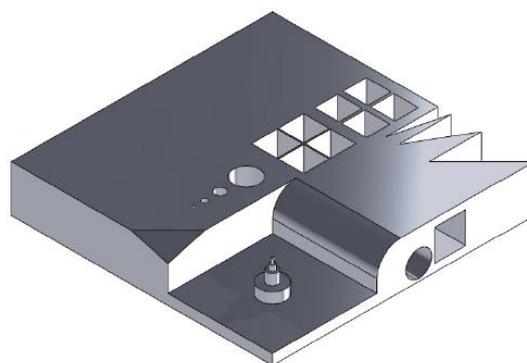
Essendo le feature dei cubi o dei parallelepipedi, non vi era la possibilità di valutare le tolleranze di forma, come circolarità, inclinazione, coassialità. Perciò, il team considerò un'altra parte per la valutazione di queste caratteristiche, che avesse superfici libere e pareti curve come i componenti reali: una scatola di un differenziale. Questa venne scalata opportunamente per essere contenuta nei volumi di lavoro delle macchine di AM. Purtroppo non ci sono risultati in merito a questa analisi.

Grazie ad una minuziosa analisi della letteratura esistente e all'obiettivo di standardizzare il design dei benchmark per i processi di AM, Mahesh et al. [45] nel 2004 proposero un benchmark per la valutazione dell'accuratezza dei sistemi di AM più collaudati esistenti in quel periodo. Questo, rispetto ai precedenti, venne progettato in riferimento agli standard esistenti per quanto riguarda la definizione delle tolleranze dimensionali e geometriche e agli standard per la misurazione con macchine CMM. In questo modo era possibile ridurre la variabilità nella determinazione dell'accuratezza dimensionale per i sistemi di AM e si gettarono le basi per la standardizzazione sia del benchmark sia della sua misurazione. In figura 2.17 è mostrato il provino, in quale presenta molte forme classiche come cubi, piani, cilindri, sfere ma anche forme curve e libere e piccole feature per la valutazione della minima dimensione stampabile. Il benchmark venne utilizzato per confrontare i processi di SLA, SLS e LOM. I risultati riportavano l'SLA come il miglior processo in termini di accuratezza, seguito da SLS, LOM e FDM. Tuttavia, i risultati dello studio non vennero espressi per mezzo dei gradi IT internazionalmente riconosciuti.

I metodi di confronto per sistemi di AM visti fino a questo punto vennero progettati appositamente per analizzare processi per materiali polimerici, in quanto i sistemi per metallo non si erano ancora sviluppati. Invece, a partire dal 2005, molti studi sono stati condotti specificatamente alla valutazione di processi AM per metallo: i primi a creare un benchmark a questo scopo sono stati Kruth et al. [46] nello stesso anno. Il provino è stato progettato per l'analisi dell'accuratezza dimensionale di sistemi laser SLM/SLS, ma anche per valutare alcune performance meccaniche e di processo, come densità, durezza e carichi di snervamento e rottura. Il benchmark, mostrato in figura 2.18, ha dimensioni ridotte (50x50x9 mm), in modo da ridurre i tempi di costruzione, ed è diviso principalmente in due zone: la prima metà in cui sono presenti diverse feature come piani inclinati, cilindri, fori, incavi, angoli acuminati e curvi, e la seconda caratterizzata da una struttura piena da cui ricavare i provini per le prove meccaniche e di densità. Lo studio ha il vantaggio di essere stato condotto appositamente per processi di AM laser per metallo, creando un benchmark ad hoc per valutarne le performance. Tuttavia, i risultati in termini di accuratezza dimensionale sono stati



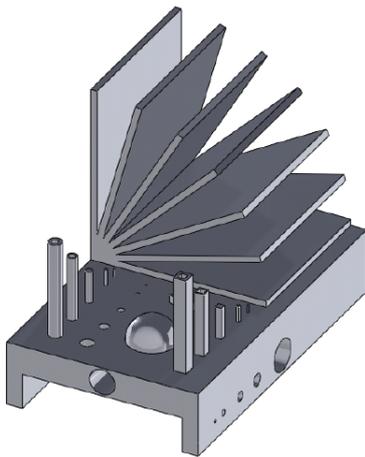
**Figura 2.18** Benchmark progettato da Mahesh et al. [45]



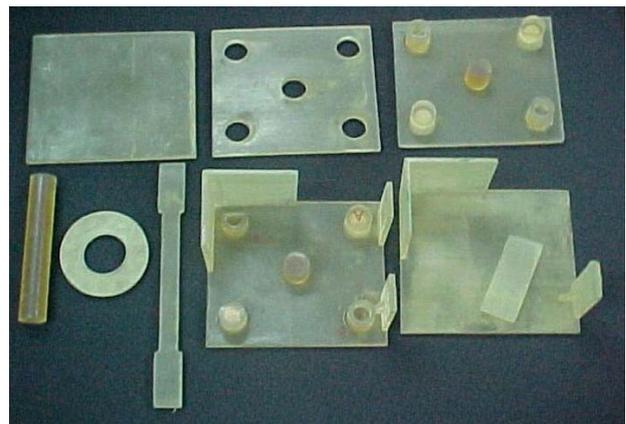
**Figura 2.17** Benchmark ideato da Kruth et al. [46]

presentati sotto forma di deviazioni rispetto al nominale e non di gradi IT. Inoltre, le dimensioni del benchmark sono ridotte e le feature non coprono molti range dimensionali.

Uno studio simile è stato condotto da Castillo et al. [47] nello stesso anno, grazie alla creazione di un benchmark sulla base del precedente. Questo permetteva di valutare l'accuratezza dimensionale di sistemi di AM per metallo, grazie alla presenza di diverse feature di varie dimensioni. In particolare, il provino consentiva di valutare la possibilità di stampare completi piani inclinati di diversi angoli grazie alla presenza di una struttura "a libro aperto", come si nota in figura 2.19. Purtroppo, anche in questo caso le feature presenti avevano dimensioni abbastanza simili, rendendo impossibile la caratterizzazione di diversi range dimensionali in relazione agli standard ISO. Inoltre, la struttura a libro, per alcune tecniche di AM, poteva richiedere dei supporti per evitare di compromettere la riuscita del job. In più, non venivano valutate le deviazioni di forma. Al contrario, uno studio di Hanumaiah et al. [48] del 2007, metteva al centro dell'attenzione l'analisi delle tolleranze geometriche utilizzando non un vero e proprio benchmark, ma un insieme di 8 parti che comprendevano tutte le feature per la valutazione di rettilineità, planarità e circolarità. L'analisi metteva a confronto un processo di SLA e di SLM, gli unici sistemi reputati in grado di produrre un prodotto finito, anche se con materiali molto diversi. I benchmark, mostrati prodotti in figura 2.20, sono stati poi misurati con una macchina CMM, ottenendo un risultato interessante: il sistema di SLM presentava tolleranze di forma più ridotte rispetto all'SLA, anche se era risaputo che quest'ultima fosse caratterizzata da performance dimensionali migliori. Ad ogni modo, i benchmark considerati non avevano lo scopo di valutare l'accuratezza dimensionale né la ripetitività dei sistemi, a causa del ridotto numero di feature tutte di dimensioni simili.



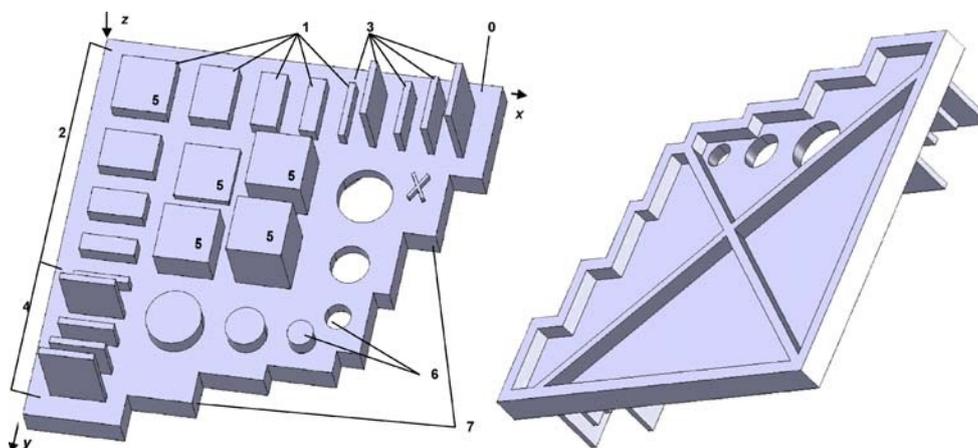
**Figura 2.19** Benchmark proposto da Castillo et al. [47]



**Figura 2.20** Parti proposte da Hanumaiah et al. [48]

Un approccio diverso è stato adottato da Scaravetti et al. [49] nel 2008, i quali hanno progettato un benchmark che permetteva la valutazione delle performance dimensionali e di forma, ma con lo scopo di stabilire un collegamento tra i difetti riscontrati e le possibili cause. A tal scopo, è stato analizzato un solo processo, la stereolitografia, e i risultati delle misurazioni sono stati utilizzati soltanto a confronto tra loro per scovare le possibili cause di deviazioni o altri difetti. Il benchmark,

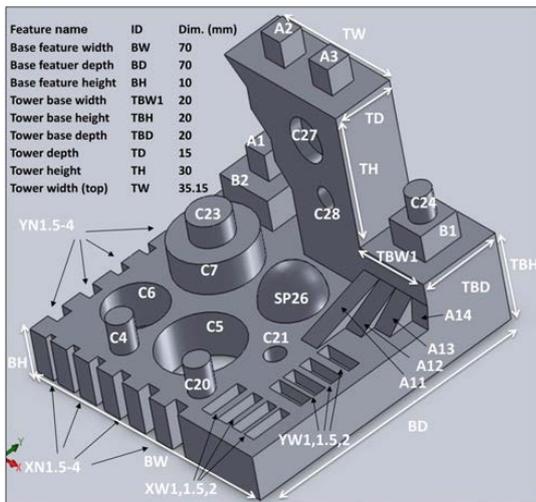
mostrato in figura 2.21, presentava diverse feature, in particolare cubi, parallelepipedi, piani e cilindri, di dimensioni diverse per valutare anche la ripetitività. Le feature sono state organizzate in modo da agevolare le misurazioni ma allo stesso tempo ridurre al minimo la superficie stampata. Inoltre, vi è simmetria nel provino, in modo da valutare l'accuratezza lungo i diversi assi, e non sono necessarie strutture di supporto. I risultati mettevano in luce la presenza di alcuni difetti in termini di deviazioni rispetto ai diversi assi e questi sono stati divisi in difetti causati dalla macchina e quelli causati dal materiale utilizzato. L'analisi non ha indicato l'accuratezza dimensionale o geometrica del processo in esame, né proposto miglioramenti sulla macchina che avrebbero migliorato le performance.



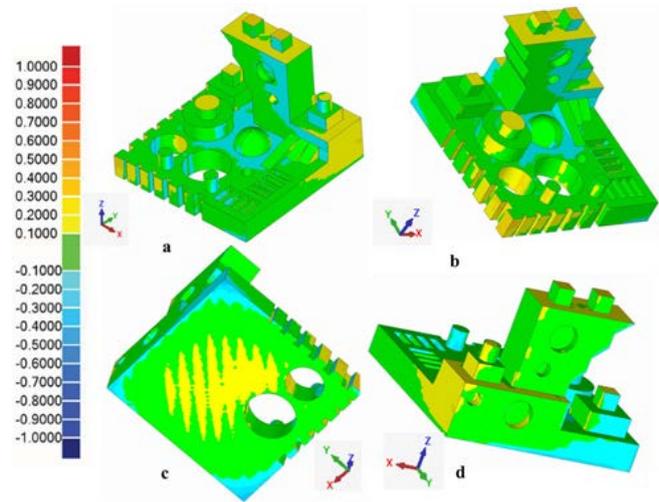
**Figura 2.21** Benchmark prodotto da Scaravetti et al. [49]

Con l'avvento delle piccole stampanti FDM ad uso domestico, molti studi si sono concentrati sulla valutazione delle loro performance e del confronto di queste tecniche con i sistemi industriali. Lo studio di Johnson et al. [50] del 2011 è stato uno dei primi a soffermarsi su questo aspetto, valutando le prestazioni di una macchina FDM "open source" e successivamente (nel 2014) confrontandola con una proprietaria di Stratasys [51]. La progettazione del benchmark è stata condotta a partire dai provini proposti negli anni precedenti, in particolare modificando quello di Mahesh et al. [45] per renderlo adatto all'analisi. Infatti, questa si concentrava sulla valutazione dell'accuratezza dimensionale e quella geometrica (GD&T), sullo studio delle deformazioni termiche e dello staircase. Il benchmark ha dimensioni contenute: la base è quadrata di lato 70 mm e spessa 10 mm, sulla quale sono presenti numerose feature tra cui cilindri, cubi, tacche rettangolari, fori, superfici sferiche, piani inclinati ma presenta anche una torre alta 50 mm con diverse superfici inclinate e feature inserite, come è possibile osservare dalla figura 2.22. La particolarità di questo studio è l'acquisizione delle misure grazie ad uno scanner 3D laser che, seppur presentando una precisione minore di una macchina CMM, si presta meglio alla valutazione di componenti prodotti in AM, grazie all'elevata quantità di punti che utilizza (circa 3.000.000 in questa analisi) e la possibilità di controllare superfici di forma libera in poco tempo e con un veloce riscontro in funzione del CAD con una mappa di colori (figura 2.23). Questo metodo potrebbe, però, essere inadatto o di difficile utilizzo per componenti metallici riflettenti o caratterizzati da alta rugosità, come quelli prodotti con tecniche di AM per metallo. I risultati mettevano in luce quanto la stampante FDM open source soffrisse di deformazioni termiche e nelle strutture a sbalzo rispetto alla stampante industriale.

Il sistema open source costituisce comunque una buona alternativa ai sistemi industriali, presentando un 98% delle feature con deviazione nel range di  $\pm 0,5$  mm. Unica pecca dello studio è la mancata espressione dei risultati in termini di gradi IT e la copertura di pochi range dimensionali, date le dimensioni del benchmark.



**Figura 2.22** Benchmark proposto da Johnson et al. [50]



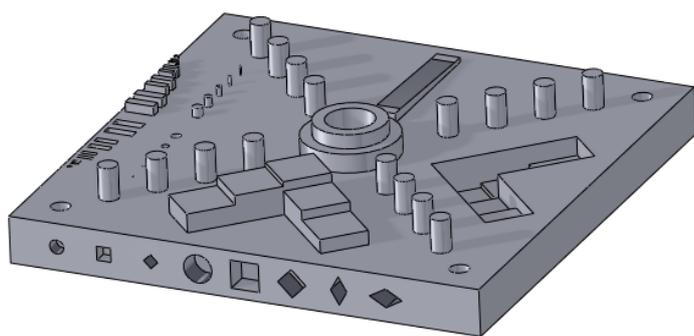
**Figura 2.23** Risultati della scansione con scanner 3D [50]

Il lavoro svolto da Moylan et al. [52] nel 2012 presso il NIST, mette al centro dell'attenzione la necessità di standardizzare tutto il processo di valutazione delle performance dei sistemi di AM, creando un benchmark finalizzato a questo scopo, che permettesse di evidenziarne le capacità e i limiti e che correlasse quest'ultimi ad aspetti specifici dei sistemi. Lo studio ha portato alla definizione di alcune regole basilari per la progettazione di benchmark atti all'analisi dei sistemi di AM. Secondo queste regole il benchmark deve:

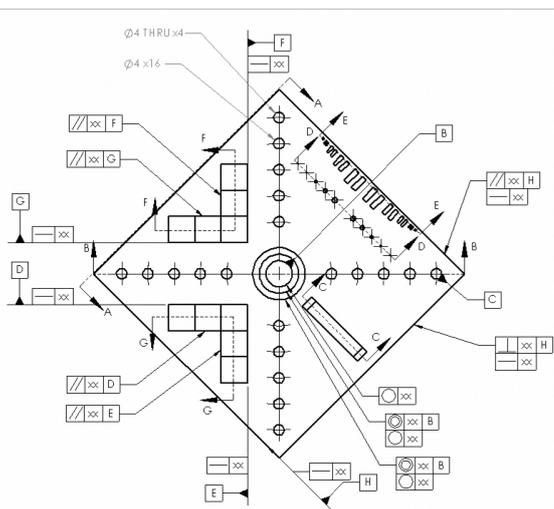
- essere grande abbastanza per testare le performance del sistema sia al centro della piattaforma sia vicino ai bordi;
- avere un numero sostanziale di feature piccole, medie e grandi;
- non richiedere troppo tempo per essere stampato;
- non utilizzare troppo materiale;
- presentare feature di forme semplici, che permettano la facile definizione e controllo della geometria;
- presentare feature di parti reali, come pareti sottili, superfici piane e inclinate, buchi, ecc;
- essere facilmente misurabile con i diversi sistemi di misura comunemente utilizzati (CMM, scanner 3D, ecc.);
- non richiedere post-trattamenti o interventi manuali (come strutture di supporto).

Dato che nessuno dei benchmark precedentemente proposti rispettava contemporaneamente tutte le regole, lo studio ne presentò uno nuovo, pensato specificatamente per i sistemi a letto di polvere, riportato in figura 2.24. Questo presenta una base quadrata spessa 17 mm su cui vi sono diverse feature di varie dimensioni, tra cui cilindri, cubi, parallelepipedi, piani, fori e altro, posizionati

accuratamente dopo diverse iterazioni volte a risolvere tutti i problemi di misura. Inoltre, il provino dev'essere posizionato con le diagonali della base allineate agli assi x e y della macchina, in modo da non avere minimizzare l'impatto del rake con i layer fusi. L'analisi consiste principalmente nella determinazione delle tolleranze geometriche, ottenibili con i sistemi di AM, in termini di GD&T, come si nota dall'esempio di figura 2.25, dove sono indicate le tolleranze da misurare. Queste sono indicate con un valore "XX", ovvero il provino non presenta tolleranze, ma queste devono essere valutate. L'accuratezza geometrica è considerata la caratteristica più importante per l'identificazione delle problematiche, che possono essere errori di allineamento del laser, della piattaforma o degli assi, errori di forma o dimensione dello spot del laser, variazioni della potenza del laser, distribuzione non adeguata delle dimensioni delle particelle di polvere. Inoltre, possono essere condotte altre misurazioni sul provino, ad esempio valutare la rugosità di alcune superfici, oppure condurre dei test meccanici, ricavando dei provini tagliando il benchmark. In questo modo è possibile ottimizzare ulteriormente l'utilizzo del materiale, soprattutto considerando il costo della materia prima nei sistemi a letto di polvere. Comunque, l'analisi punta al miglioramento del sistema di AM in esame, considerando i risultati ottenuti, e non alla determinazione delle performance utili in campo produttivo a prevedere la qualità dei componenti prodotti [47]. Ad ogni modo, lo studio ha permesso di fare grandi passi avanti sulla standardizzazione del processo di valutazione delle performance dei sistemi di AM, lasciando comunque alcuni aspetti da migliorare, come l'espressione dei risultati riguardo l'accuratezza dimensione in termini di gradi IT. L'analisi risulta essere la più completa e funzionale di quelle prese in esame.



**Figura 2.24** Benchmark studiato da Moylan et al. [51] per standardizzare la valutazione delle performance dei sistemi di AM

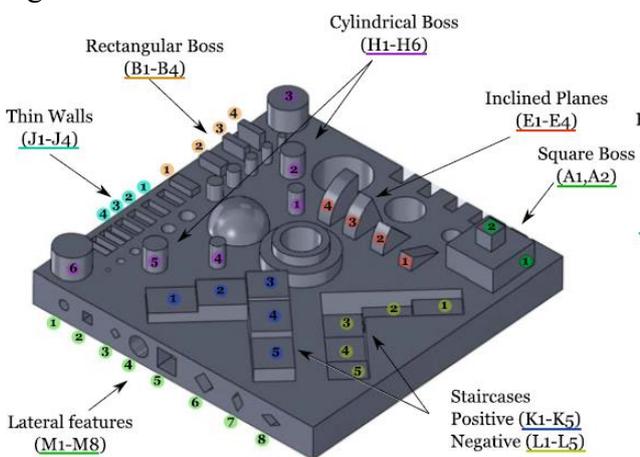


**Figura 2.25** Tolleranze geometriche da valutare nel disegno del benchmark di Moylan et al. [51]

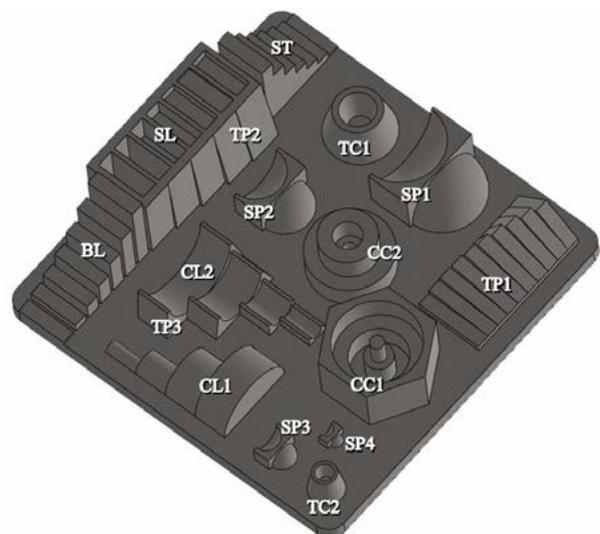
Lo studio condotto da Sanchez et al. [53] nel 2014, ricalca quello di Johnson et al. del 2011, valutando le performance di un sistema FDM open source grazie alla progettazione di un benchmark adatto allo scopo. Il provino proposto risulta essere una rielaborazione di quello creato da Moylan et al., comprendendo alcune feature aggiuntive, soprattutto curve e sferiche, come si nota dalla figura 2.26. Inoltre, il provino è stato stampato diverse volte, in modo da tenere sotto controllo i diversi parametri di processo singolarmente. Questi sono, ad esempio, la temperatura della piastra, la

temperatura dell'ugello, la densità di riempimento, la velocità di stampa, lo spessore dei layer, ecc. I risultati sono stati rielaborati e analizzati con metodi statistici, conducendo all'indicazione dell'accuratezza dimensionale in termini di gradi IT in modo da poter essere confrontabile con altri processi convenzionali e non. La stampante open source risulta avere accuratezza tra IT14 e IT16, confrontabile con processi di colata in sabbia. Il problema di questo lavoro risulta essere il metodo di misura. Infatti, le misurazioni sono state prese con l'utilizzo di un calibro manuale, il che non assicura buone precisioni e ripetitività e soprattutto vi è un'alta probabilità di commettere errori di misura.

Nel 2016 uno studio condotto da Minetola et al. [34], similmente ad alcuni lavori precedenti, ha messo a confronto le performance di un sistema FDM open source con quelle di uno industriale. A tale scopo è stato progettato un nuovo benchmark, basandosi su quelli proposti precedentemente e sottostando alle regole definite da Moylan et al., che lo rendessero altresì adatto a caratterizzare tutti i sistemi di AM, riportato in figura 2.27. Data la necessità di confrontare le performance dell'additive manufacturing con quelle degli altri processi, soprattutto quelli convenzionali, i risultati sono stati espressi in funzione dei gradi IT, internazionalmente riconosciuti. In particolare, il provino presenta numerose feature di dimensioni differenti, così che ad ogni range dimensionale ISO ne appartenessero un numero considerevole, per rendere più consistente l'analisi. Sono stati inseriti anche elementi e superfici curve simili a forme reali. Inoltre, lo studio ha interessato l'accuratezza geometrica dei sistemi, valutata su alcune feature e espressa con i valori GD&T, in particolare planarità, coassialità, parallelismo e perpendicolarità. La misurazione della parte è avvenuta con una macchina CMM, che ne assicura la massima precisione, acquisendo un elevato numero di punti (più di mille). In aggiunta, il benchmark prevede degli elementi non considerate nei lavori precedenti, come configurazioni concave e convesse della stessa feature, aspetto di studio importante per le tecnologie AM. Inoltre, il benchmark potrebbe essere utilizzato per valutare anche altre caratteristiche, come la rugosità, lo staircase, le deviazioni dovute a fenomeni termici, in modo da aumentare ulteriormente l'utilizzo del materiale. I risultati dello studio hanno messo in luce come una stampante FDM open source abbia accuratezza dimensionale decisamente inferiore ad un sistema industriale, soprattutto per i range dimensionali minori. A livello geometrico, per la planarità dei piani verticali e la coassialità i risultati sono confrontabili, mentre per le altre caratteristiche la stampante industriale presenta accuratezza migliore.



**Figura 2.27** Benchmark proposto da Sanchez et al. [52]



**Figura 2.26** Benchmark proposto da Minetola et al. [34]

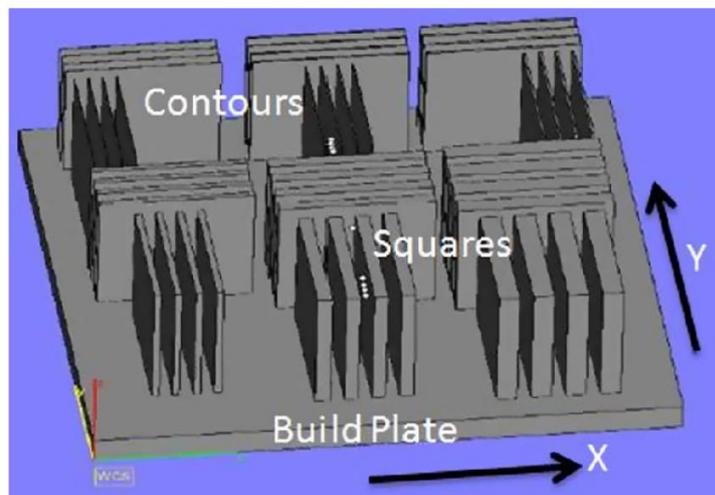
### 2.3.1 Valutazioni in base alla letteratura

Dall'analisi della letteratura qui condotta, si è messo in luce quanta importanza ha ricevuto la valutazione delle performance dei sistemi di AM negli ultimi anni. Sono stati progettati diversi benchmark, prima abbastanza diversi tra loro e con concezioni differenti, poi sempre più simili e ideati sottostando a regole per renderli più standard possibili. Lo studio condotto nel seguito della trattazione ha l'obiettivo di valutare le prestazioni dimensionali e geometriche del sistema di EBM Arcam Q10 plus inserito in un contesto produttivo. Data l'esigenza di conoscere le sue performance in termini di tolleranze generalmente riconosciute in campo industriale, i risultati devono essere necessariamente indicati in termini di gradi IT, cosa che soltanto alcuni studi hanno previsto, ovvero [34], [42], [44], [53]. Inoltre, l'accuratezza geometrica in termini di valori GD&T risulta essere altresì importante, considerata unitamente a quella dimensionale soltanto da [34]. Dunque, non avendo il bisogno di progettare ad hoc un ulteriore benchmark per la caratterizzazione del sistema EBM in esame, si è deciso di utilizzare quello proposto da Minetola et al. [34], con il vantaggio di poter utilizzare gli stessi strumenti di misura e modelli di calcolo reperibili direttamente al Politecnico di Torino.

## 2.4 Analisi della letteratura sulla caratterizzazione di rugosità di pezzi in EBM

L'analisi della rugosità di componenti prodotti con tecniche di additive manufacturing è stato un tema largamente affrontato nel corso degli anni successivi allo sviluppo di queste tecnologie. Infatti, come visto in precedenza, vi sono studi che risalgono anche al 1995, come quello di Iuliano et al. [42], in cui veniva presa in esame la rugosità ottenibile con tecniche di AM, unitamente alle performance dimensionali dei sistemi. Altri studi come quello di Xu et al. [43] del 2000 e quello di Kruth et al. [46] del 2005 presero in esame la rugosità superficiale delle parti prodotte con tecnologie additive, sempre valutandola come caratteristica aggiuntiva su benchmark pensati per la caratterizzazione dimensione e/o geometrica. Infatti, le parti venivano progettate appositamente per la valutazione delle performance dimensionali dopodiché, prendendo alcuni rilevamenti su superfici diverse del benchmark, senza dare importanza al tipo di superficie o alla sua inclinazione, venivano espressi i valori medi di rugosità del componente, in modo da averne un'indicazione di massima. Inoltre, è da considerare che le tecniche di AM presenti in quel periodo, ovvero prevalentemente quelle per polimero, non sono caratterizzate da una rugosità elevata, grazie anche alla natura del materiale e dei processi utilizzati. Probabilmente è anche questo il motivo per cui questi studi non hanno indagato la rugosità singolarmente, considerata una caratteristica meno importante rispetto all'accuratezza dimensionale e che incideva meno sulla qualità dei manufatti. Per questo motivo non è mai stata progettata una parte di riferimento apposita per l'analisi di questo aspetto, che magari ne caratterizzasse il comportamento al variare di alcuni parametri, sia geometrici che di processo. Successivamente, con lo sviluppo delle tecniche additive per metallo, in cui la rugosità ottenuta risulta essere maggiore rispetto ai manufatti in polimero e dato che questa potrebbe rappresentare un grosso limite per le applicazioni delle parti, la comunità di ricerca ha iniziato a lavorare nello specifico su questo aspetto, conducendo diversi studi che coinvolgevano tecniche differenti. Data l'elevata rugosità che si ottiene dal processo EBM, molti ricercatori si sono concentrati sulla caratterizzazione

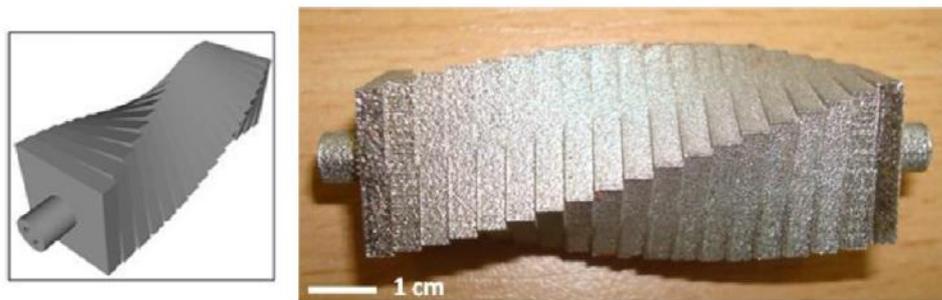
della rugosità dei componenti prodotti con questa tecnica, il primo condotto da Safdar et al. [54] nel 2012. In questo caso l'attenzione veniva posta prevalentemente sull'alterazione della rugosità superficiale causata dalla variazione dello spessore di parete e dei parametri di costruzione. L'analisi è stata condotta realizzando dei parallelepipedi di dimensione 50x55 mm e spessore variabile, posizionati sulla piattaforma di costruzione a blocchi di quattro nelle due direzioni, x e y, come è possibile osservare dalla figura 2.28. Questi sono stati poi stampati variando alcuni parametri di processo, in particolare la velocità di scansione, la corrente del fascio e il focus offset. Per la stampa è stata utilizzata una macchina EBM Arcam S12 e come materiale il Ti6Al4V. I risultati hanno mostrato come la rugosità, espressa in termini di  $R_a$ , vari tra  $1\mu\text{m}$  e  $20\mu\text{m}$  per le diverse strutture. Inoltre, l'analisi dei dati sperimentali ha evidenziato l'influenza dello spessore dei parallelepipedi e dei parametri di processo sulla rugosità superficiale ottenuta sulle pareti. In particolare, questa cresce al crescere dello spessore e al crescere della corrente del fascio, mentre diminuisce al crescere della distanza di fuoco e della velocità di scansione. Lo studio non considera, però, l'influenza della posizione dei componenti sulla piastra di lavoro e la loro vicinanza, che potrebbe comportare un accumulo di calore e influire sulla rugosità. Inoltre, vengono considerate soltanto superfici verticali, poco significative per caratterizzare la rugosità che avrà un componente prodotto con EBM.



**Figura 2.28** Job utilizzato per l'analisi della rugosità da Safdar et al. [54]

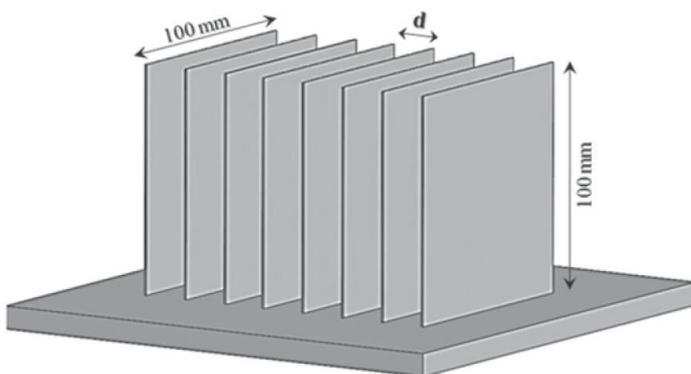
Sempre nel 2012, è stato condotto uno studio da Strano et al. [55], prendendo in considerazione il processo di SLM, caratterizzato comunque da una rugosità elevata rispetto ai sistemi tradizionali, ad esempio quelli sottrattivi. L'obiettivo del lavoro era quello di analizzare quale sia l'influenza dell'angolo di inclinazione della superficie sulla rugosità superficiale ottenuta. Per valutarla, viene preso in esame un "truncheon", ovvero un componente che presenta superfici di diverse inclinazioni rispetto al piano orizzontale, con angoli che variano da  $0^\circ$  a  $90^\circ$  con intervalli di  $5^\circ$ , mostrato in figura 2.29. Questo componente venne utilizzato precedentemente per la valutazione della rugosità su componenti polimerici prodotti con la stereolitografia. La scelta da parte di questo provino è stata dettata dalla semplicità con la quale è possibile effettuare le misure di rugosità, una volta prodotto. Il componente è stato realizzato in acciaio 316L con la macchina SLM EOS M270. Questo è stato posizionato con l'asse principale parallelo rispetto alla piattaforma di costruzione. La rugosità

superficiale è stata valutata con l'utilizzo di un profilometro e di un microscopio a scansione. L'analisi ha permesso di sviluppare un primo modello matematico, basato sulle misurazioni ottenute da questo specifico provino, che consenta di predire la rugosità di una superficie in funzione dell'angolo di cui è inclinata. Inoltre, questo teneva in considerazione la presenza di particelle parzialmente sinterizzate sulla superficie del componente combinato con l'effetto "stair stepping" ovvero della presenza di gradini dovuti al processo layer-by-layer. Per contro, durante lo studio non si è fatto riferimento a come il provino sia stato collegato alla piattaforma, men che meno come sia stato possibile realizzare superfici con certi angoli d'inclinazione senza l'utilizzo di supporti.

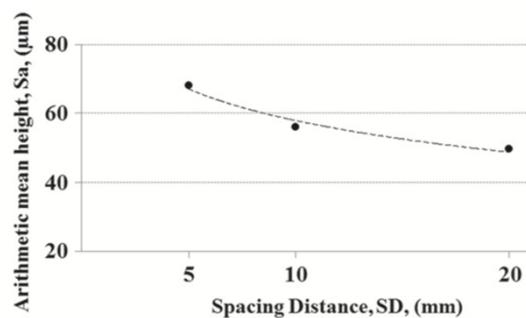


**Figura 2.29** Provino utilizzato da Strano et al. [55] per la caratterizzazione della rugosità di un processo SLM

Successivamente, nel 2015, è stato condotto uno studio da Jamshidinia e Kovacevic [56], che riguardava nuovamente la rugosità superficiale di componenti prodotti con tecnica EBM. In questo caso è stata indagata l'influenza del posizionamento delle parti sulla piattaforma sulla rugosità superficiale. Infatti, la vicinanza tra le parti potrebbe generare delle zone di accumulo di calore che influisce sulla qualità dei componenti. Per analizzare tale spettro è stato impiegato nuovamente un set di parallelepipedi di dimensioni 100x100 mm, questa volta di medesimo spessore. Questi sono stati posizionati a distanza diversa l'uno dall'altro, in particolare 5 mm, 10 mm e 20 mm, come mostrato in figura 2.30, dopodiché realizzati con un processo EBM in Ti6Al4V, utilizzando una macchina non specificata nell'articolo. La rugosità delle superfici è stata misurata con un profilometro a due assi, che permette di ottenere una misurazione standard (approccio 2D), oppure una misurazione di tutto



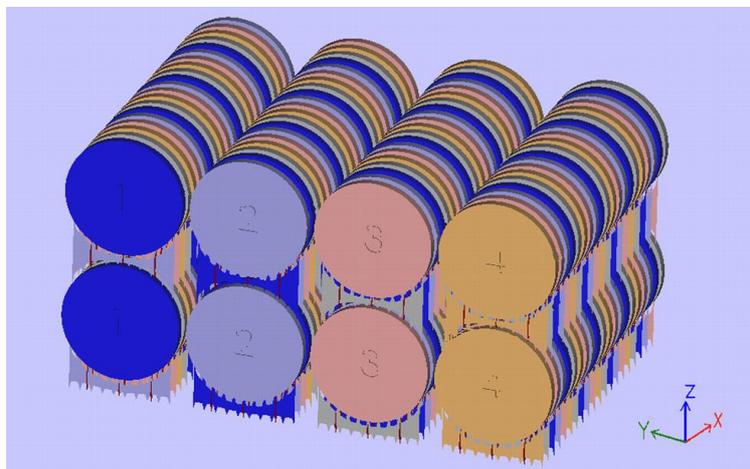
**Figura 2.31** Set di parallelepipedi utilizzato da Jamshidinia e Kovacevic [56]



**Figura 2.30** Andamento rugosità  $S_a$  in base alla distanza tra le superfici [56]

il piano (approccio 3D), più appropriata per descrivere le caratteristiche di queste superfici. I risultati ottenuti mettono in luce come la rugosità sia effettivamente influenzata dal posizionamento delle parti sulla piattaforma di costruzione, a causa della presenza di zone di accumulo del calore. In particolare, viene evidenziata un'inversa proporzionalità tra la distanza che vi è tra le superfici e la rugosità ottenuta, come si osserva dal grafico di figura 2.31, dove  $S_a$  risulta essere il corrispettivo di  $R_a$  con un approccio 3D. Tuttavia, anche se lo studio risulta completo considerando gli obiettivi, questo non considera il posizionamento delle superfici rispetto alla piastra di lavoro, ma soltanto la vicinanza tra le diverse superfici. Inoltre, anche in questo caso sono considerate soltanto superfici verticali, il che limita la caratterizzazione.

Ancora nel 2015, lo studio condotto da Klingvall et al. [57] si è concentrato sul valutare l'influenza che hanno i diversi parametri del processo EBM sulla rugosità superficiale. Per condurre l'analisi sono stati utilizzati dei provini a forma di moneta, di diametro 29 mm e spessore 2 mm, posizionati in modo che le facce delle monete fossero verticali. Inoltre, sono stati sovrapposti due provini e posizionati per file, ognuna composta da 16 repliche, come si nota in figura 2.32. I parametri sono stati fatti variare per ogni campione del set con uno schema bene definito. In particolare, i parametri che sono stati tenuti in considerazione nella realizzazione dei campioni sono: il numero di contorni, la distanza tra i contorni, la combinazione di velocità e corrente nel realizzare i contorni e il "line offset", ovvero lo spostamento della traccia del fascio rispetto a quella dello strato precedente. I provini sono stati stampati in Ti6Al4V ELI Arcam con una macchina EBM Arcam A2. I risultati evidenziavano come la rugosità dei provini sia compresa tra  $24\ \mu\text{m}$  e  $30\ \mu\text{m}$  e come questa sia influenzata dalla combinazione di certi parametri. In particolare, l'influenza maggiore è dovuta alla combinazione di velocità e corrente nella scansione del contorno. Anche la sola distanza tra i contorni e la combinazione tra il numero di contorni e la distanza dei contorni risultano essere importanti. Invece, il "line offset" risulta essere poco influente sulla rugosità superficiale. Per contro, lo studio non considera l'accumulo di calore causato dalla vicinanza tra le parti, che influenza la rugosità ottenuta. Inoltre, anche qui non viene considerata minimamente l'influenza dell'angolo di inclinazione delle superfici.



**Figura 2.32** Provini proposti da Klingvall et al. [57] e disposizione sulla piastra di costruzione

Townsend et al. [58], nel 2018, hanno svolto, dopo un'accurata disamina della letteratura condotta nel 2016, un'analisi di carattere più generale di quelle precedenti. Questo studio, infatti, ha proposto diversi artefatti per la valutazione non solo della rugosità, ma anche le caratteristiche dimensionali e di risoluzione. Così facendo, si è invertita la tendenza che negli anni precedenti portava principalmente alla valutazione dell'accuratezza dimensionale e, in secondo luogo, la rugosità. In questo caso, è la rugosità il tratto che guida il design dei provini, mentre le altre caratteristiche sono valutate in un secondo momento. In figura 2.33 sono mostrati i diversi artefatti. La parte AMSA 1 include tre superfici di misura: la prima è piana, atta a valutare la rugosità ottenuta su superfici piane; la seconda ha un'inclinazione di 1:25 e serve per valutare l'effetto della transizione da un layer all'altro; l'ultima presenta una serie di cilindretti di altezza che varia di una quantità pari ad un layer, utili per effettuare valutazioni sulle superfici rivolte verso l'alto ed indagare le porosità che il processo potrebbe generare. Invece, la parte AMSA 3 presenta una serie di cave la cui dimensione diminuisce avvicinandosi al centro, con l'obiettivo di valutare la risoluzione del processo di stampa e la minima dimensione realizzabile. L'ultimo artefatto, l'ASMA 4, contiene tre superfici con andamenti sinusoidali di ampiezza costante e lunghezza d'onda decrescente, in modo da fornire un'indicazione visiva della risoluzione del processo. I provini sono stati orientati sia orizzontalmente che verticalmente e posizionati piuttosto casualmente nel volume di lavoro, come riportato in figura 2.34. Questi sono stati successivamente realizzati in Ti6Al4V con l'utilizzo di una macchina EBM Arcam Q10 e in SLM con una macchina Renishaw AM250. La misurazione dei provini è stata eseguita con una tomografia computerizzata, ma questi sono stati progettati per essere facilmente misurati con gli altri strumenti comunemente utilizzati. I risultati evidenziano, per quanto riguarda la produzione con processo EBM, notevole differenza tra i pezzi prodotti orizzontalmente e verticalmente, in particolare le superfici orizzontali presentano risoluzione migliore ma tracce delle passate del fascio, mentre quelle verticali sono caratterizzate da una risoluzione minore e da molta polvere inglobata. Per quanto riguarda l'SLM, i risultati ottenuti mettono in evidenza la migliore qualità delle geometrie ottenute. Purtroppo, lo studio non fornisce un'analisi quantitativa della rugosità superficiale, ma soltanto una

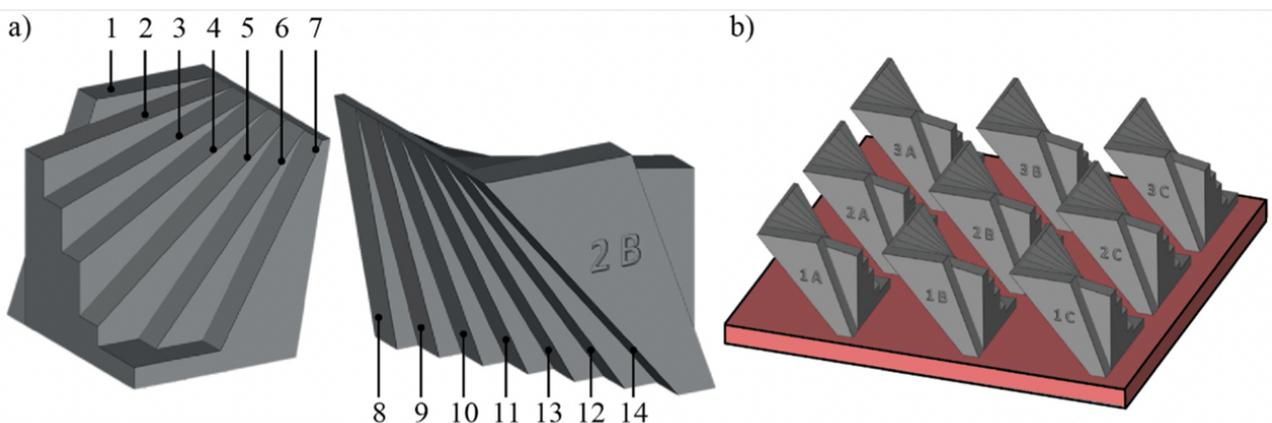


**Figura 2.34** Artefatti proposti da Townsend et al. [58]

**Figura 2.33** Disposizione dei provini nel volume di lavoro [58]

valutazione qualitativa delle superfici prese in esame. In aggiunta, non vi è nulla per valutare la rugosità in funzione dell'angolo di inclinazione, ma i componenti vengono soltanto ruotati di  $90^\circ$  attorno alle diverse direzioni, ancora per una valutazione semplicemente qualitativa.

Lo studio più recente è stato condotto da Galati et al. [25] nel 2019, con l'obiettivo di valutare la rugosità superficiale di componenti prodotti in Ti6Al4V con processo EBM realizzati con la macchina Arcam A2X. In particolare, lo studio è focalizzato sulla determinazione dell'influenza che ha l'angolo di inclinazione di una superficie sulla sua rugosità. Inoltre, viene valutato l'effetto dell'orientamento della superficie, ovvero che questa sia rivolta verso l'alto oppure verso la piattaforma, sulla rugosità. Un'ultima valutazione riguarda la ripetibilità della macchina in termini di rugosità e l'influenza su di essa della posizione del provino sulla piattaforma di costruzione. Per eseguire le diverse analisi, è stato progettato un benchmark formato da 14 diverse superfici, inclinate opportunamente, in modo da coprire un buon range di angoli e che le superfici non richiedano supporti. Infatti, gli angoli maggiori non superano il limite imposto dal produttore della macchina ( $65^\circ$  rispetto alla verticale) e il baricentro del provino cade all'interno della base d'appoggio, non causando sbilanciamento. Le superfici sono disposte a ventaglio: le 7 negative presentano angoli da  $50^\circ$  a  $80^\circ$  (rispetto all'orizzontale) con incremento di  $5^\circ$  mentre le 7 positive presentano angoli da  $0^\circ$  a  $60^\circ$  (rispetto all'orizzontale) con incremento di  $10^\circ$ . Sono state realizzate 9 repliche del provino, posizionate ognuna in una zona di allineamento del fascio. Infatti, in fase di preparazione della macchina Arcam A2X, occorre allineare manualmente il fascio elettronico su 9 zone quadrate identiche, ottenute dividendo idealmente la piastra di lavoro. Per questo motivo, i provini sono stati posizionati uno per zona, orientati con le superfici nella direzione di passaggio del rake e la superficie su cui è stato indicato numero di riga e lettera della colonna nella direzione dell'operatore. In figura 2.35 è mostrato il provino progettato e la disposizione delle repliche nel volume di lavoro della macchina. I provini sono stati prodotti, come detto in precedenza, utilizzando una macchina EBM Arcam A2X, in dotazione al politecnico di Torino, la quale utilizza i parametri indicati in tabella 2.2. Dopodiché, la rugosità delle superfici è stata misurata utilizzando un rugosimetro e seguendo le regole stabilite dalla ISO 4288:1997, acquisendo 3 misurazioni per superficie nella zona verso la cima del provino. I risultati dello studio mettono in luce come, per prima cosa, la posizione del provino sulla piattaforma di lavoro non incida sulla rugosità delle superfici. In secondo luogo, viene evidenziata la



**Figura 2.35** Provino progettato da Galati et al. [25] (a) e disposizione dei provini sulla piastra di costruzione (b)

**Tabella 2.2** Parametri di processo utilizzati per la stampa dei provini da Galati et al. [25]

Process Parameter for Contour						
Melting strategy	Scan speed [mm/s]	Focus Offset [mA]	Beam Current [mA]	Number of spots	Number of contours	Hatch contours [mm]
MultiBeam	850	6	5	70	3	0.29
Process Parameter for the Hatching						
Melting strategy	Speed Function	Focus Offset [mA]	Beam Current Max [mA]	Reference Length [mm]	Reference Current [mA]	Line Offset [mm]
Continuous	45	25	20	45	12	0.2

differenza di rugosità tra le superfici positive e quelle negative: le prime con valori di rugosità di circa 15  $\mu\text{m}$ , le seconde di circa 19  $\mu\text{m}$ . Invece, le superfici orizzontali sono caratterizzate da una rugosità di circa 6  $\mu\text{m}$ . Inoltre, le superfici positive sono influenzate maggiormente dall'effetto staircase e la rugosità varia linearmente con l'angolo d'inclinazione. Per le superfici negative, la variazione di area delle sezioni rispetto all'asse z di costruzione, ha influenzato la rugosità, creando zone con accumulo maggiore di calore causano l'adesione di più particelle di polvere. Per questo motivo non è stato fornito un modello per la variazione della rugosità in funzione dell'angolo di inclinazione delle superfici negative, indicando la necessità di studiare un nuovo benchmark che avesse area fusa pressoché costante lungo la z. Per contro, in questo caso non viene indagata l'influenza dei parametri di processo, mantenuti intenzionalmente costanti per i diversi provini.

### 2.4.1 Valutazioni in base alla letteratura

Dall'analisi della letteratura presentata, è chiaro come la rugosità superficiale di componenti prodotti con tecniche di AM sia un aspetto che ha richiamato l'attenzione di molti, traducendosi in diversi studi con obiettivi e metodologie differenti. Sono stati descritti quelli più importanti e ritenuti più significativi, delineando i pro e i contro di ognuno. In base all'analisi condotta successivamente, finalizzata alla caratterizzazione della rugosità in modo che questa possa essere prevista per componenti prodotti con tecnica EBM in ambito produttivo, è necessario che il benchmark utilizzato abbia certe caratteristiche, in particolare che sia pensato per valutare la rugosità per superfici con inclinazione diversa. Inoltre, la variazione dei parametri di processo non è un aspetto importante, in quanto il sistema EBM utilizzato dev'essere caratterizzato in funzione dei parametri standard di macchina forniti dal produttore. Perciò, soltanto pochi studi analizzati precedentemente hanno preso in considerazione gli aspetti presentati, in particolare [25], [55], [58]. Lo studio di Strano et al. [55] risulta essere poco adatto agli obiettivi considerando le difficoltà di adattamento del benchmark al processo in esame, in quanto richiederebbe strutture di supporto che interferirebbero con la misura di rugosità restituendo valori non significativi. Invece, lo studio di Townsend et al. [58] considera l'inclinazione soltanto ruotando i provini attorno alle diverse direzioni e non valuta quantitativamente la rugosità, aspetto importantissimo in ambito produttivo per avere valori da confrontare con altre tecnologie o prevedere finiture o lucidature in certe zone. Dunque, solo il lavoro di Galati et al. [25] ha proposto un benchmark utile agli obiettivi prefissati, con il problema di rendere l'area delle sezioni costanti al variare della z per minimizzare gli accumuli termici. Per questo motivo successivamente

verrà presentato un benchmark per la valutazione della rugosità ottenuto dall'elaborazione di quello proposto da Galati, Minetola e Rizza.

### 3. Produzione dei provini presso Meccanica Grasso S.R.L.

La realizzazione dei provini è stata effettuata grazie al sistema EBM Arcam Q10 plus in possesso dell'azienda Meccanica Grasso S.R.L. (Rivoli, TO), con l'obiettivo di utilizzarli per la caratterizzazione del sistema stesso e la sua ottimizzazione per la produzione. Nel seguente capitolo è descritta la preparazione del job e la successiva produzione,

#### 3.1 Arcam Q10 plus

La macchina EBM Arcam Q10 plus, in dotazione alla Meccanica Grasso S.R.L. (Rivoli, TO), è stata sviluppata per la produzione specifica di impianti e protesi nel campo medicale. Infatti, essa ha un volume di lavoro non molto esteso, di dimensioni 200x200x180 mm, ma ottimale per essere colmato con numerosi componenti di questo tipo. Inoltre, il modello di macchina in esame è stato progettato appositamente per la produzione in serie, essendo dotata di diversi sistemi per ridurre i tempi morti e aumentarne la produttività. In particolare, rispetto alla serie di macchine precedenti, la Q10 plus è dotata della Arcam xQam<sup>®</sup> e della LayerQam<sup>®</sup>, che permettono la calibrazione automatica del fascio, rendendola più veloce e precisa. La xQam<sup>®</sup> risulta essere un vero e proprio detector per i raggi X che si sprigionano nella camera, mentre la LayerQam<sup>®</sup> è una fotocamera ad alta definizione che, inoltre, scatta una fotografia per ogni layer fuso in modo da avere informazioni in più sul processo e indagare eventuali difetti e porosità che potrebbero intaccare i componenti. Un'altra differenza rispetto ai modelli precedenti per aumentare la produttività risulta essere un sistema che permette, una volta possibile aprire la macchina, di estrarre l'intero blocco della piastra di lavoro in modo da completare il raffreddamento all'esterno della macchina. Infatti, è possibile sbloccare la porta della macchina soltanto quando il blocco scende ad una temperatura di 80 °C, ma non è ancora possibile estrarre la piastra non essendo maneggiabile a quella temperatura. Per questo motivo sarebbe necessario aspettare che il blocco si raffreddi all'interno della macchina, prolungando i tempi morti. Grazie a questo dispositivo, è possibile sfruttare attivamente il tempo dell'ultimo raffreddamento del blocco, procedendo con la pulizia della macchina e la successiva preparazione. Inoltre, in confronto alla precedente A-series, oltre ad avere un cannone elettronico di ultima generazione, presenta un filamento di materiale diverso, che assicura una durata che può arrivare fino a 800 ore con il Ti6Al4V, contro le 80-100 ore di quello delle A-series. Per quanto riguarda la piastra di costruzione, questa è stata modificata, predisponendo su due angoli opposti un sistema di bloccaggio, prima non presente, e posizionandola su un piano su cui sono presenti 3 viti per l'allineamento e due termocoppie utili al controllo della temperatura della piastra durante il processo. Infatti, la piastra, nei modelli precedenti, veniva posizionata su un blocco di polvere al cui interno era posizionata una termocoppia e per allinearla occorreva farla affondare o meno nella polvere su cui era appoggiata.

Insieme alla macchina viene fornito il Powder Recovery System (PRS), il sistema di pallinatura che consente di estrarre i componenti dal blocco di polvere sinterizzata, spruzzando polvere dello stesso tipo di quella impiegata nel processo di stampa. Inoltre, sono forniti due aspirapolveri, funzionanti ad aria compressa e non a corrente elettrica, utili alla pulizia in sicurezza della macchina e dell'ambiente circostante, con la corretta gestione delle polveri metalliche. Si ricorda, infine, che la

macchina richiede di essere installata in una stanza apposita separata dagli altri ambienti aziendali, mantenuta a temperatura e umidità entro certi limiti, e questa dev'essere abbastanza lontana da organi metallici in movimento che potrebbero deviare il fascio durante la stampa [26], [59].

La macchina è mostrata in figura 3.1 insieme alle sue principali caratteristiche hardware e software e il sistema PRS.

Max. build size	200 x 200 x 180 mm (W x D x H)
Max. Beam power	3000 W
Cathode type	Single crystalline
Min. Beam diameter	140 µm
Max. EB translation speed	8000 m/s
Active cooling	Water-cooled heat sink
Vacuum base pressure	5 x 10 <sup>-4</sup> mbar (chamber pressure before start of process)
Build atmosphere	4 x 10 <sup>-3</sup> mbar (partial pressure of He)
He consumption, build process	1 liter / hour
He consumption, build cool down	50-75 liters / build
Power supply	3 x 400 V, 32 A, 7kW
Size	2060 x 1066 x 2608mm (W x D x H)
Weight	1681 kg
CAD interface	Standard: STL



**Figura 3.1** Principali caratteristiche hardware (a sinistra), macchina Arcam Q10 plus (a destra) e Arcam Powder Recovery System (in basso).

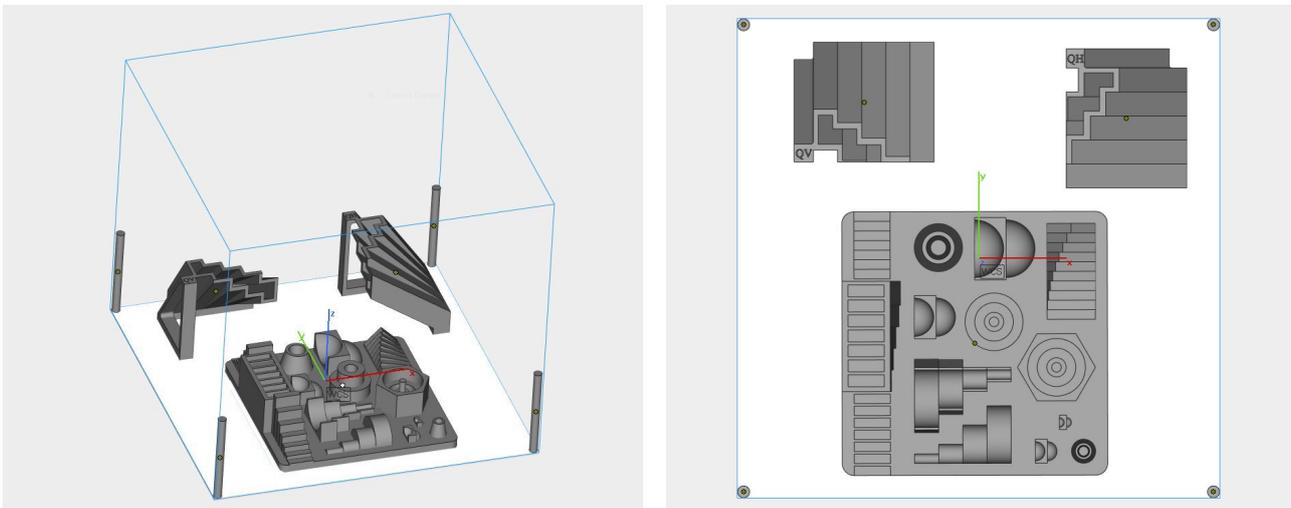
## 3.2 Preparazione del job da realizzare

Il job da preparare per la produzione con processo EBM comprende tre provini: due identici, per la valutazione della rugosità superficiale, e uno, di dimensioni maggiori, per la valutazione delle performance dimensionali e geometriche del processo. Questi sono stati forniti in formato STL e sono caratterizzati dai seguenti numeri di triangoli:

- Benchmark per valutazione accuratezza dimensionale e geometrica: 38100 triangoli
- Provino caratterizzazione rugosità QH: 1470 triangoli
- Provino caratterizzazione rugosità QV: 1186 triangoli

Dunque, per prima cosa i provini vengono importati nell'ambiente del software Materialise Magics 23.01, fornito insieme alla macchina, per la preparazione dei file delle parti da produrre. Viene fornita, inoltre, un'estensione per il software Magics appositamente sviluppata da Arcam per la generazione dei file di macchina, il Build Processor. Questo, al suo interno, include il set di parametri specifico

per la macchina Arcam Q10 plus e il materiale utilizzato, ovvero lo spessore del layer per effettuare lo slicing (50  $\mu\text{m}$  per il Ti6Al4V), le informazioni sulla piastra utilizzata, i diversi temi di fusione (Preheat, Melt, Wafer ecc.) da conferire alle diverse parti del job. Dunque, una volta importate in Magics, le parti vengono riparate, ovvero si risolvono alcuni problemi del file STL che potrebbero emergere durante l'esportazione. Dopodiché, i provini vengono posizionati sulla piattaforma di lavoro come stabilito dal DOE (design of experiments). Per quanto riguarda i due provini di rugosità, questi sono stati posizionati a contatto con la piattaforma, data l'area ristretta di connessione che ne permetterà il facile distacco. Invece, per il benchmark per la valutazione dimensionale è stato necessario generare delle strutture di supporto che lo tenessero attaccato alla piattaforma ma contemporaneamente ne favorissero il facile distacco alla fine del processo, senza la necessità di utilizzare tecniche di taglio EDM. Inoltre, si ricorda che, per il processo analizzato, i primi 5 mm stampati risultano essere di "assestamento", con la possibilità che risultino poco precisi e con difettosità. Questo non incide sui provini di rugosità che presentano una base alta 5 mm prima dell'inizio delle superfici da analizzare. Anche il benchmark dimensionale presenta una base scavata spessa 5 mm ma, data l'importanza di ottenere un provino con accuratezza dimensionale massima, si è deciso di traslarlo di 5 mm lungo la z in modo da questo fenomeno. In figura 3.2 sono riportate due viste in cui è possibile osservare il posizionamento delle parti rispetto agli assi della macchina.

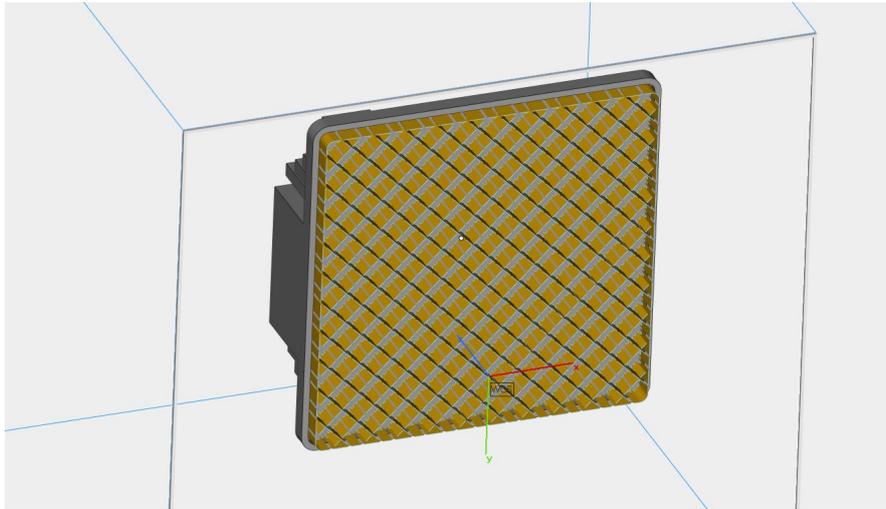


**Figura 3.2** Disposizione dei provini sulla piastra di costruzione della macchina eseguita con il software Magics

I supporti per il benchmark dimensionale sono stati generati grazie alla funzione apposita del software Magics. Questi sono di tipo "Block" con hatching di 7 mm lungo x e y e una rotazione di 45°. Inoltre, supporti sono stati frammentati, ovvero ad intervalli regolari sono interrotti da uno spazio vuoto, in modo da favorire il successivo distacco. In figura 3.3 è mostrata la base del benchmark con i supporti generati nella zona centrale svuotata. Non sono visualizzati i supporti generati sui bordi.

A questo punto, è possibile esportare il file macchina grazie al Build Processor. Durante questa fase è necessario impostare i temi che la macchina utilizzerà per realizzare le parti. Per i tre provini è stato impostato il tema "Melt", mentre per i supporti del benchmark dimensionale quello "Wafer", apposito per le strutture di supporto, le quali vengono fuse con parametri differenti. Dopodiché, viene

generato il file macchina in formato .abp, importato in EBM Control della macchina (il software che la controlla) che ne permetterà la realizzazione.



**Figura 3.3** Supporti di tipo "block" generati per il benchmark dimensionale

### 3.3 Produzione mediante EBM Arcam Q10 plus

Per la produzione del job comprendente i diversi provini, si è dapprima preparata la macchina. La preparazione consiste, per prima cosa, nella pulizia della camera di lavoro da metallizzazioni e residui di polvere lasciati dalle precedenti stampe. Dopodiché vengono caricate le tramogge in cui è contenuta la polvere metallica necessaria al processo di stampa e allineata la piastra di costruzione, agendo sulle viti poste al di sotto della piastra. Per verificare il corretto allineamento, si sparge una minima quantità di polvere sulla piastra e si fa passare il rake, controllando che non ci siano zone in cui rimane più polvere che in altre. Successivamente, viene abbassata la piastra e creato il letto di polvere, presente anche sulla piastra, in modo da poter verificare la capacità del rake di stendere la polvere. La verifica è effettuata facendo prelevare al rake la polvere da un cumulo e facendogliela stendere fino a circa metà della piastra, creando alcune "penne" di polvere, ovvero dei piccoli cumuli. Dall'analisi della forma e dimensione delle penne, è possibile regolare le posizioni di prelievo della polvere da parte del rake, in modo che lo strato venga distribuito correttamente. A questo punto, le penne di polvere vengono aspirate insieme alla polvere presente sulla piattaforma, in modo da renderla pulita e pronta per il riscaldamento. Dopodiché viene chiusa la porta della macchina ed è possibile avviare processo di stampa. La prima fase consiste nel caricamento del job in macchina e l'assegnazione dei temi di stampa. Successivamente viene creato il vuoto all'interno della camera e della colonna, ottenuto il quale è possibile accendere il cannone elettronico e avviare l'allineamento automatico. Terminata quest'ultima fase, viene avviato il job.

Il primo step del processo di stampa è il riscaldamento della piastra di lavoro a circa 500-600 °C, effettuata con passaggi ripetuti del fascio elettronico defocalizzato sull'intera piattaforma. Raggiunta la temperatura adeguata, viene steso il primo strato di polvere e inizia il processo di stampa vero e

proprio, con la fusione delle sezioni layer-by-layer. I parametri di processo utilizzati per la stampa sono quelli standard forniti dal produttore e vengono riportati in tabella 3.1 in funzione della fase del processo considerata:

**Tabella 3.1** Parametri di processo utilizzati per la stampa dei provini

<b>Parametri di processo per la fase di Preheating 1</b>						
Scan Speed (mm/s)	Focus Offset (mA)	Beam Current (mA)	Max Current (mA)	Number of Repetition	Line Offset (mm)	
18000	44	16	48	2	0,4	
<b>Parametri di processo per la fase Preheating 2</b>						
Scan Speed (mm/s)	Focus Offset (mA)	Beam Current (mA)	Max Current (mA)	Number of Repetition	Line Offset (mm)	
18000	44	19	48	2	0,4	
<b>Parametri di processo per la fase di Contour Inner</b>						
Melting Strategy	Scan Speed (mm/s)	Focus Offset (mA)	Beam Current (mA)	Offset	Number of Contours	
MultiBeam	750	2	6	0,11	3	
<b>Parametri di processo per la fase di Contour Outer</b>						
Melting Strategy	Scan Speed (mm/s)	Focus Offset (mA)	Beam Current (mA)	Offset	Number of Contours	
MultiBeam	750	5	5	0,22	3	
<b>Parametri di processo per la fase di Hatching</b>						
Melting Strategy	Speed Function	Focus Offset (mA)	Beam Current (mA)	Reference Lenght (mm)	Reference Current (mA)	Line Offset (mm)
Continuous	60	36	15	45	18	0,2

Inoltre, dopo l'intero processo di stampa, sono disponibili le fotografie dalla LayerQam<sup>®</sup>, scattate in seguito alla fusione di ogni singolo strato, prima che il rake lo ricopra con nuova polvere. In questo modo è possibile, a valle di tutto il processo, esaminare ogni singolo layer fuso in modo da individuare eventuali problematiche. Si riporta un esempio di fotografia della LayerQam<sup>®</sup> in figura 3.4.

Terminata la stampa, il job rimane in macchina per alcune ore in modo da raffreddarsi. La macchina è dotata di un circuito di raffreddamento a liquido che velocizza questa fase che, essendo la macchina in vuoto, richiederebbe moltissime ore se il raffreddamento fosse naturale. L'intero processo di stampa, dall'inizio del riscaldamento della piastra fino alla fine della stampa dell'ultimo strato, ha



**Figura 3.4** Fotografia scattata dalla LayerQam<sup>®</sup> durante il processo di stampa, in particolare all'altezza di 13,25 mm

richiesto 18 h e 20 min, a cui dev'essere aggiunto il tempo di raffreddamento (circa 3-4 ore) per ottenere il tempo totale di produzione. Raggiunta una temperatura di 80 °C, dopo aver effettuato una ventilazione con aria per eliminare il vuoto dalla camera, è possibile aprire la macchina in modo da velocizzare il processo di raffreddamento. Il processo di stampa ha prodotto un blocco di polvere



**Figura 3.5** Blocco di polvere sinterizzata sollevato al termine del processo di stampa

sinterizzata, mostrato in figura 3.5, al cui interno sono contenuti i provini stampati. Il blocco viene sollevato lungo la z della macchina e, raggiunta una temperatura di circa 40 °C, è possibile estrarlo dalla macchina. Dopodiché, questo viene posizionato sul piatto del carrello (figura 3.6), utilizzato per trasportarlo vicino al PRS, all'interno del quale viene inserito per essere pallinato.



**Figura 3.6** Posizionamento della piastra di costruzione su cui vi è il blocco di polvere sinterizzata sul piatto del carrello

Nel PRS è stata effettuata la pallinatura a pressione di 4 bar, grazie alla quale il blocco di polvere sinterizzata viene disfatto e vengono estratti i componenti, come mostrato in figura 3.7 e 3.8.

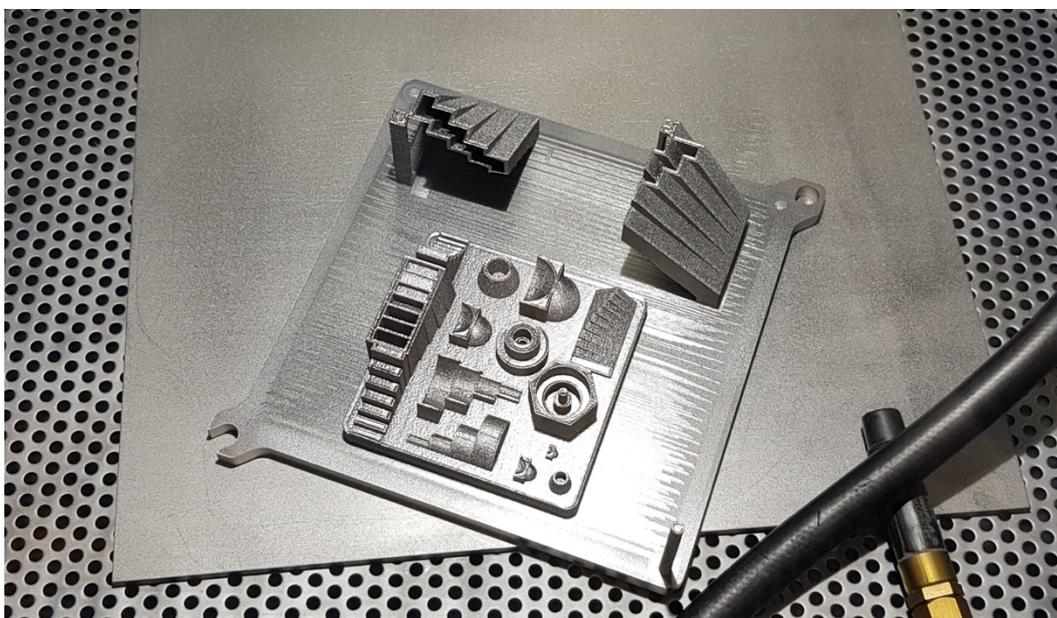


**Figura 3.7** Fase di pallinatura del blocco di polvere all'interno del PRS



**Figura 3.8** Blocco di polvere in fase di disfacimento all'interno del PRS

Dopo la pallinatura, i componenti vengono ancora soffiati con aria compressa all'interno della camera del PRS, in modo da rimuovere i residui di polvere rimasti sulle superfici. I componenti appaiono come in figura 3.9. Infine, vengono rimossi dalla piattaforma i componenti che non si sono staccati durante la pallinatura, utilizzando un martello di gomma. Infatti, la differenza di materiale tra i provini e la piattaforma, rende debole la saldatura tra di essi, che cede facilmente con qualche colpo di martello oppure già durante la pallinatura. Dunque, si sottolinea come non siano necessari post-trattamenti meccanici o termici per i componenti realizzati con processo EBM.



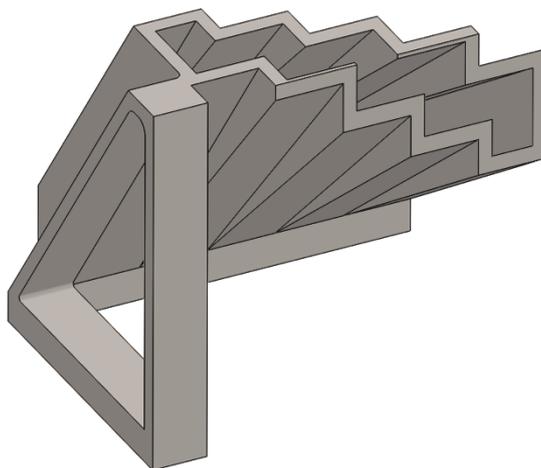
**Figura 3.9** Componenti dopo essere stati estratti dal blocco di polvere grazie al PRS

## 4. Caratterizzazione della rugosità superficiale di componenti prodotti con EBM Arcam Q10 plus

Il capitolo qui presentato mira a fornire una prima caratterizzazione di rugosità delle superfici prodotte con tecnica EBM, in particolare con una macchina Arcam Q10 plus. Le superfici analizzate sui provini appositi possono essere di tipo, orientazione e inclinazione diversi, così da indagare i diversi fattori che possono influenzare la rugosità dei componenti reali realizzati con questa tecnologia.

### 4.1 Descrizione benchmark per l'analisi della rugosità

Dall'analisi della letteratura presentata nel capitolo 2, è emerso quali siano le esigenze di un benchmark adatto allo studio da condurre. È necessario che questo presenti diverse superfici con inclinazione diversa, in modo da analizzare l'influenza dell'angolo sulla rugosità, ma anche che queste abbiano una diversa orientazione, ovvero che siano rivolte verso la piattaforma o verso l'alto. Inoltre, è di fondamentale importanza che le sezioni, al variare di  $z$ , presentino all'incirca la stessa area, in modo che non si verifichino fenomeni di accumulo termico che andrebbero ad alterare le misurazioni. In aggiunta, sarebbe necessaria l'analisi della rugosità delle superfici di canali interni, applicazione molto importante nell'additive manufacturing. Dunque, combinando questi diversi fattori, il benchmark utilizzato per l'analisi è mostrato in figura 4.1.



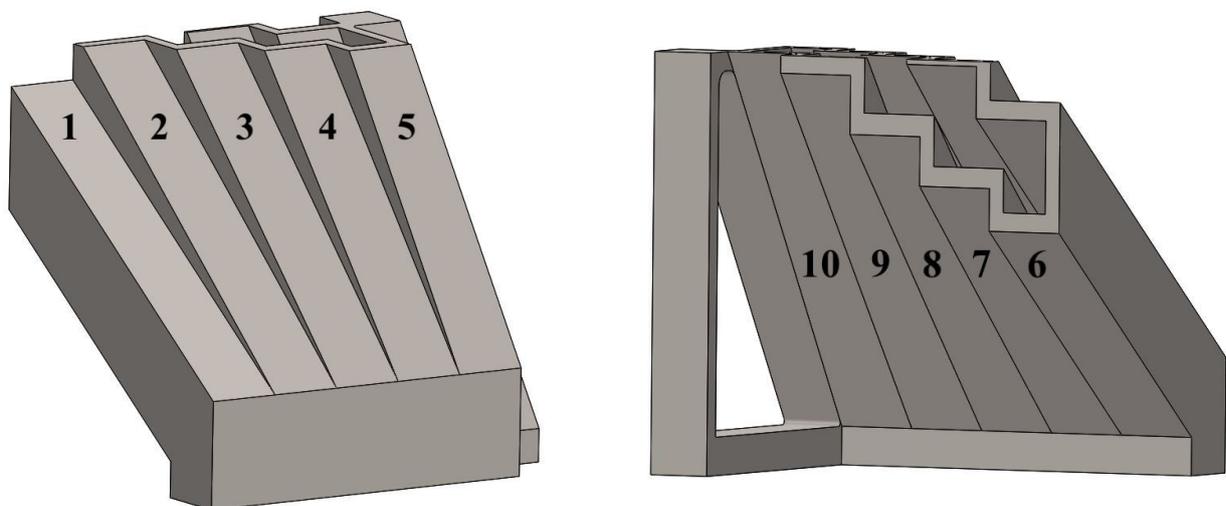
**Figura 4.1** Provino per la caratterizzazione della rugosità

Come si nota dalla figura, il provino presenta diverse superfici esterne disposte a ventaglio e la struttura risulta essere scavata al suo interno, in cui si trovano altre superfici che ricalcano la forma esterna. Lateralmente vi è una struttura, non utile all'analisi delle superfici, la quale ha il ruolo di sostegno dell'intero provino, in modo da evitare che questo crolli sotto il suo peso (o si deformi). Infatti, se non fosse presente questa struttura, il baricentro cadrebbe fuori dalla base d'appoggio creando uno sbilanciamento del provino. L'involuppo del provino è di dimensioni 50 x 55 x 58 mm,

il che gli permette di essere inserito facilmente nel volume di lavoro della macchina e, se occorre, essere replicato più volte.

Per quanto riguarda le superfici, queste sono state numerate, come si può osservare in figura 4.2, e vengono classificate in base al tipo e all'orientamento. Possono essere:

- Di tipo esterne con orientamento positivo. Sono le superfici esterne disposte verso l'alto dalla numero 1 alla 5;
- Di tipo esterne con orientamento negativo. Sono le superfici esterne disposte verso la piattaforma di costruzione di numero da 10 a 6;
- Di tipo interne con orientamento positivo. Sono le superfici nella zona interna cava del provino disposte verso l'alto. Queste prendono lo stesso numero delle superfici esterne di cui risultano essere l'altra faccia della stessa parete, ossia dal 10 al 6;
- Di tipo interne con orientamento negativo. Sono le superfici interne disposte verso la piattaforma di costruzione. La numerazione segue le regole viste nel gruppo precedente, quindi le superfici risultano avere numeri da 1 a 5.



**Figura 4.2** Numerazione delle superfici del provino per la caratterizzazione della rugosità

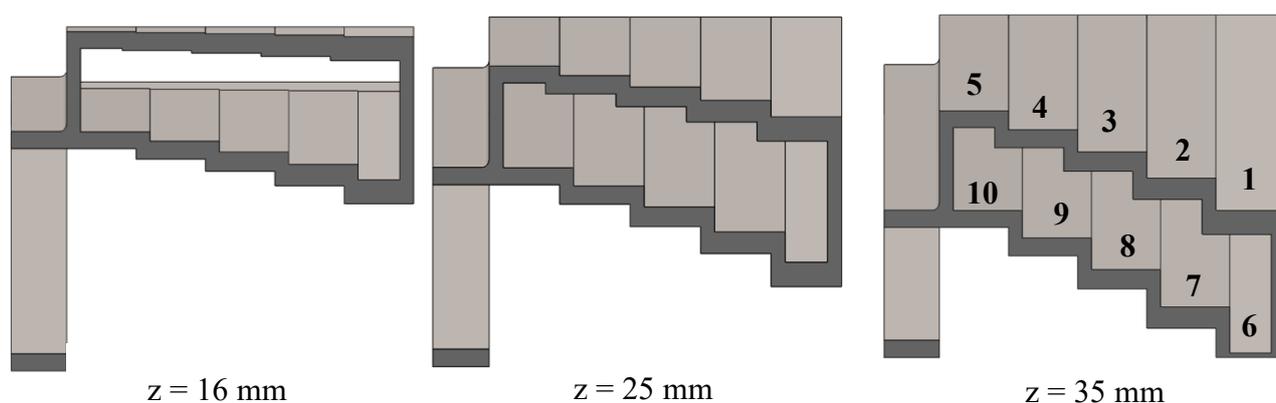
Ogni gruppo presenta 5 superfici inclinate di un angolo rispetto alla verticale che varia da  $35^\circ$  a  $55^\circ$ , con incremento di  $5^\circ$ . In tabella 4.1 vengono riassunte le informazioni riguardo le superfici.

**Tabella 4.1** Classificazione delle superfici con i rispettivi angoli di inclinazione

<b>Superfici Esterne Positive</b>					
Numero della superficie	1	2	3	4	5
Angolo rispetto alla verticale	$55^\circ$	$50^\circ$	$45^\circ$	$40^\circ$	$35^\circ$

Superfici Esterne Negative					
Numero della superficie	6	7	8	9	10
Angolo rispetto alla verticale	55 °	50 °	45 °	40 °	35 °
Superfici Interne Positive					
Numero della superficie	6	7	8	9	10
Angolo rispetto alla verticale	55 °	50 °	45 °	40 °	35 °
Superfici Interne Negative					
Numero della superficie	1	2	3	4	5
Angolo rispetto alla verticale	55 °	50 °	45 °	40 °	35 °

Invece, per quanto riguarda l'area delle sezioni, come detto in precedenza questa risulta essere circa costante layer per layer, ovvero lungo la  $z$ , in modo da evitare accumuli termici. Inoltre, la tecnologia EBM, essendo un processo caldo, non è molto adatta alla realizzazione di componenti molto massivi e pieni, anche nell'ottica della progettazione per AM. Anche per questo motivo, il provino qui analizzato si adatta meglio alla tecnologia utilizzata, presentando una parete sottile assimilabile a quelle dei componenti reali che verranno prodotti. In figura 4.3 vengono mostrate tre sezioni ad un valore di  $z$  differente, rispettivamente 16 mm, 25 mm e 35 mm. Dalle immagini, in cui l'area delle sezioni è rappresentata in grigio scuro, risulta chiaro quanto appena detto riguardo alle aree.



**Figura 4.3** Andamento dell'area fusa in funzione dell'altezza di costruzione

Sono state prodotte due repliche del provino, in modo da analizzare l'eventuale influenza della posizione delle superfici rispetto alla direzione di passaggio del rake per la distribuzione della polvere. Per questo motivo, le due repliche sono state posizionate in maniera differente sulla

piattaforma di lavoro, come visto nel capitolo 3 e di cui è riportato un dettaglio in figura 4.4. Per distinguerle sono state marchiate con nomi differenti in base alla posizione:

- QH: provino in cui le superfici vengono disposte parallelamente alla direzione di passaggio del rake;
- QV: provino in cui le superfici si dispongono perpendicolarmente alla direzione di passaggio del rake.

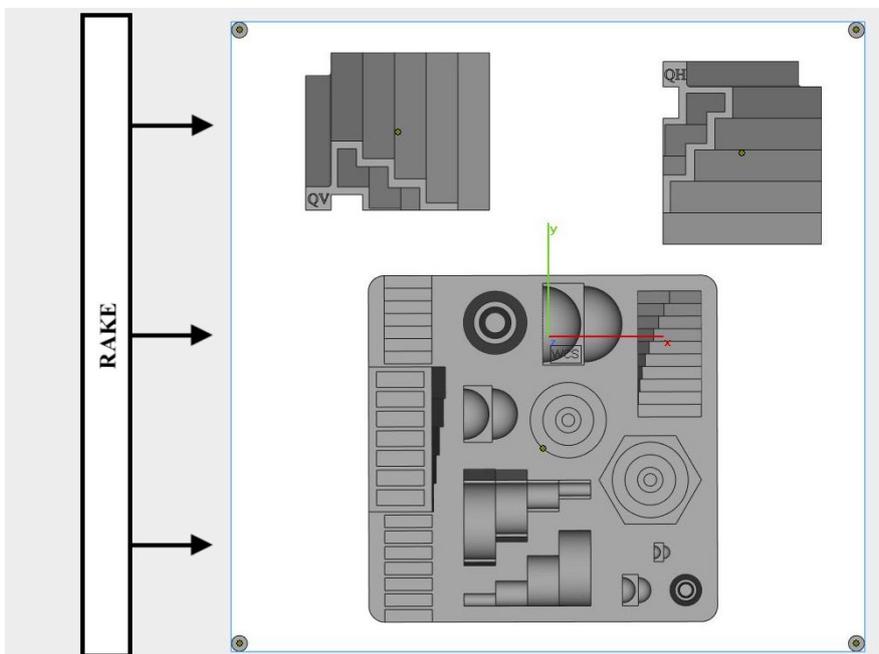


Figura 4.4 Disposizione dei provini QH e QV rispetto alla direzione di passaggio del rake

## 4.2 Acquisizione delle misure

Per l'acquisizione delle misure di rugosità su ogni superficie, si è utilizzato un rugosimetro portatile Metrology Systems RTP-80 con traslatore TL-90 [60], in dotazione al Politecnico di Torino, rappresentato in figura 4.5.

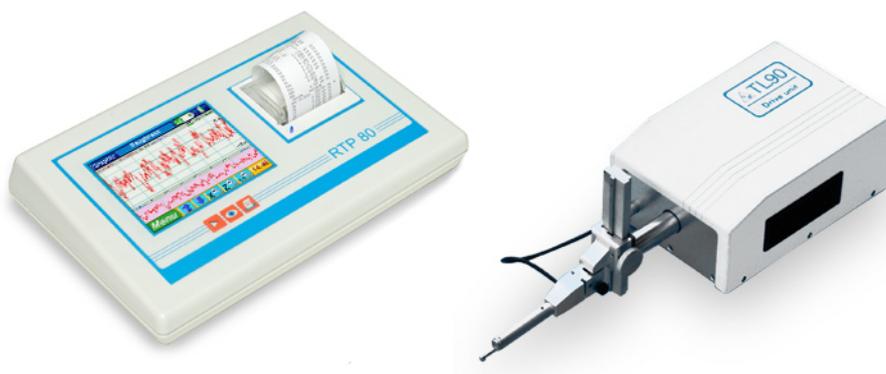


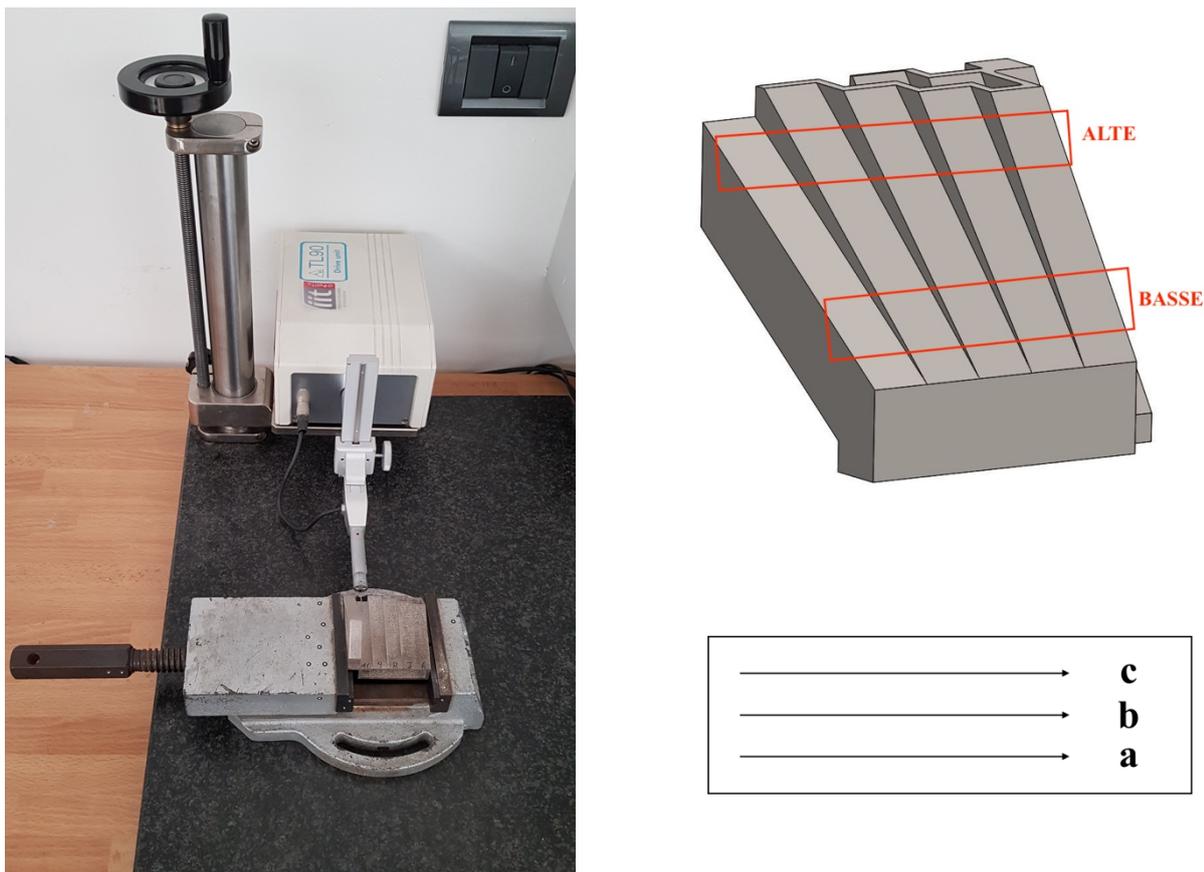
Figura 4.5 Rugosimetro portatile Metrology Systems RTP-80 con traslatore TL-90 [60]

Lo strumento permette di selezionare automaticamente la normativa secondo la quale effettuare le misurazioni e le modalità di esecuzione, ovvero i parametri adottati durante la procedura di misurazione. In questo caso è stata scelta la normativa ISO 4288 con cut-off, ovvero una lunghezza di campionamento, pari a 0,8 mm e una lunghezza di valutazione pari a 5 cut off, ovvero 4 mm. Bensì, seguendo quanto prescritto dalla normativa, che indica i cut-off e le lunghezze di valutazione in base alla rugosità prevista come riportato in tabella 4.2, occorrerebbe selezionare un cut-off di 8 mm e una lunghezza di valutazione di 40 mm, prevedendo una rugosità compresa tra 10  $\mu\text{m}$  e 20  $\mu\text{m}$  [25]. D'altro canto, si evidenzia che la normativa si riferisce a parti prodotte con tecniche tradizionali, le quali presentano caratteristiche di rugosità completamente diverse da quelle prodotte in additive manufacturing. Una lunghezza di cut-off di 0,8 mm risulta già essere rappresentativa del profilo analizzato, considerando che lo spessore dei layer è pari a 50  $\mu\text{m}$  e le polveri Arcam di Ti6Al4V ELI hanno dimensione che varia da 45  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$  [61].

**Tabella 4.2** Valori di cut-off e rispettive lunghezze di campionamento consigliate dalla ISO 4288

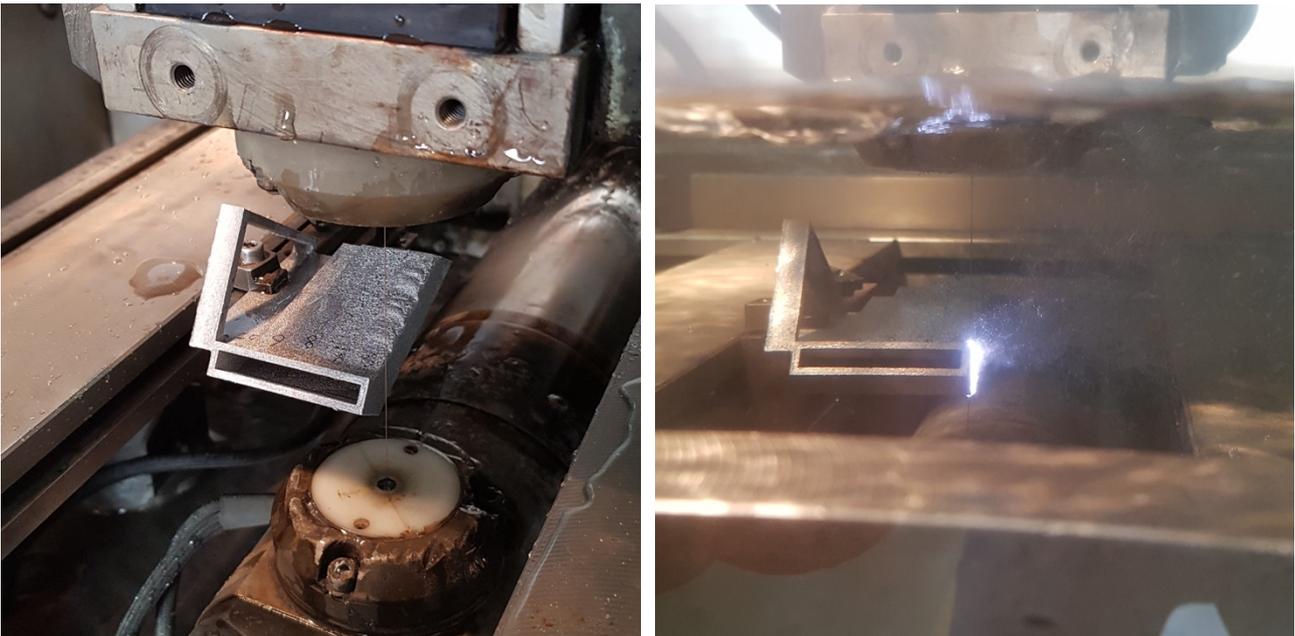
Rugosità ( $\mu\text{m}$ )	Lunghezza di campionamento (mm)	Lunghezza di valutazione (mm)
$0,006 < R_a \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$	8	40

Inoltre, la normativa richiede che vengano effettuate diverse misurazioni della stessa superficie. Per questo motivo ogni superficie in esame è stata misurata 3 volte, acquisendo le misure parallelamente al lato lungo delle superfici, nella posizione e con lo schema raffigurati in figura 4.6. Ogni acquisizione è stata nominata indicando il numero della superficie (da 1 a 10) seguito dalla lettera indicante la posizione della misura (da *a* a *c* da destra verso sinistra). Inoltre, è stato indicato il tipo di superficie, ovvero se questa risulti essere esterna o interna. In aggiunta, lo strumento utilizzato permette l'acquisizione dei profili analizzati, con la possibilità di essere diagrammati e confrontati tra loro. In questo modo è possibile comparare le diverse superfici e le loro irregolarità anche a livello grafico, non basandosi solamente sul valore di rugosità. Tuttavia, non sono stati acquisiti i profili di tutte le misurazioni eseguite, bensì si è acquisito soltanto della misurazione centrale, ovvero la *b*. Il setup utilizzato per acquisire le misurazioni è mostrato ancora in figura 4.6. Dopo aver raccolto le misurazioni, una prima analisi statistica di distribuzione (come si vedrà nel seguito) ha messo in evidenza la necessità di condurne ulteriori, per rendere più statistico il set di dati. Per questo motivo, si sono acquisite altre misurazioni, questa volta nella parte bassa dei provini, come mostrato sempre in figura 4.6.



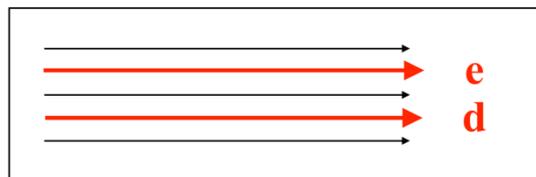
**Figura 4.6** Setup per la misura della rugosità del campione (a sinistra), zone di acquisizione delle misure (a destra in alto) e schema di misura (a sinistra in basso)

Non essendo le superfici interne raggiungibili dallo stilo del rugosimetro, è stato necessario tagliare i provini, in particolare in prossimità della base d'appoggio. Il taglio è stato effettuato con WEDM (elettroerosione a filo), grazie ad una macchina Charmilles Robofil 6020, in dotazione alla Meccanica Grasso S.R.L. La lavorazione, non essendo richiesta una precisione elevata né una buona rugosità delle superfici tagliate, è stata eseguita in modalità E2 assimilabile ad una sgrossatura con processo WEDM. Il processo è avvenuto in acqua deionizzata con un filo di rame zincato di spessore  $0,025 \pm 0,002$  mm, con rimozione di circa 0,5 mm di materiale dalle superfici tagliate e una velocità di avanzamento pari a circa 8 mm/s. Il tempo di lavorazione è stato di circa 7 min. Per quanto riguarda il posizionamento e bloccaggio del pezzo in macchina, questo è mostrato in figura 4.7. Il pezzo è stato appoggiato ad una traversa della macchina sopra la superficie del supporto (a destra della superficie 5) e mandato a battuta sulla superficie verticale, in modo da allineare la x e la z. Dopodiché, è stato bloccato con una staffa standard chiusa da un bullone. La y è stata allineata muovendo il filo ad occhio in modo che il taglio risultasse diritto. Una foto del processo nel corso della sua esecuzione è riportata in figura 4.7.



**Figura 4.7** Allineamento del provino in macchina WEDM (a sinistra) e processo di taglio (a destra)

Come verrà descritto in seguito, le misurazioni acquisite nella zona bassa dei provini dovranno essere scartate. Per questo motivo, sempre per rendere statistico il set di dati, è stato necessario effettuare delle ulteriori misurazioni nella zona alta dei provini. Questa volta sono state condotte soltanto due ripetizioni della misurazione per ogni superficie, denominate *d* ed *e* da destra verso sinistra, posizionate circa al centro rispetto alle altre 3 misurazioni effettuate precedentemente, come mostrato in figura 4.8.



**Figura 4.8** Schema di acquisizione del terzo set di dati

Riassumendo, sono state misurate 20 superfici per ognuno dei due provini e per ognuna delle quali è stata acquisita 8 volte la rugosità in posizioni e con modalità diversi, per un totale di 272 diverse acquisizioni. Queste non risultano essere 300 in quanto per le superfici 6 e 7, come si vedrà nel seguito, non è stato possibile acquisire le misurazioni di rugosità. In particolare, per il provino QH né le superfici 6 e 7 esterne né quelle interne risultano misurabili. Anche per il provino QV quelle esterne non sono state misurate, mentre per quelle interne è stato possibile acquisire le misurazioni.

### 4.3 Organizzazione delle analisi

Come già accennato nel paragrafo precedente, l'analisi è iniziata acquisendo tre misurazioni per superficie, in quanto si riteneva che il numero totale di dati forniti fosse adeguato ad analizzare adeguatamente il fenomeno. Però, una prima analisi statistica ha smentito quanto supposto, rendendo necessario eseguire ulteriori misurazioni. Per questo motivo, sono state eseguite le misurazioni nella zona bassa dei provini, che hanno reso il campione più numeroso e adatto alle analisi da condurre successivamente. Purtroppo, in seguito è stato appurato che i dati acquisiti nella parte bassa non potevano essere utilizzati (come si vedrà nel paragrafo successivo), rendendo necessario un altro step di misura. Pertanto, sono state rilevate per la terza volta delle misurazioni, in questo caso due per superficie nella parte alta del provino. Queste, insieme a quelle acquisite durante il primo step di misura, costituiscono il campione analizzato, i cui risultati sono presentati e discussi nel paragrafo successivo. L'analisi condotta ha seguito un iter specifico per la valutazione dell'influenza dei diversi fattori sulla rugosità delle superfici, che si struttura in questo modo:

- Analisi di distribuzione statistica di tutte le misurazioni acquisite. Vengono prese in considerazione tutte le misure del campione contemporaneamente, in modo da valutare se la distribuzione dei dati sia corretta e se ve ne siano alcuni da escludere;
- Confronto tra le misurazioni del provino QH e del QV. In questo modo è possibile valutare l'influenza della disposizione rispetto alla direzione di stesura della polvere, in modo da determinare se, per le analisi successive, sia possibile utilizzare i dati di entrambi i provini insieme come se fossero delle repliche identiche, incrementando la numerosità del campione.
- Confronti tra superfici di tipo e orientazione diversi. In questo modo è possibile valutare l'influenza dei diversi fattori sulla rugosità superficiale. Viene valutata l'influenza dell'orientazione tenendo fisso il tipo di superficie, ovvero confrontando:
  - Superfici interne positive e superfici interne negative;
  - Superfici esterne positive e superfici esterne negative.

Invece, l'influenza del tipo di superficie è valutata tenendo fissa l'orientazione e, quindi, confrontando:

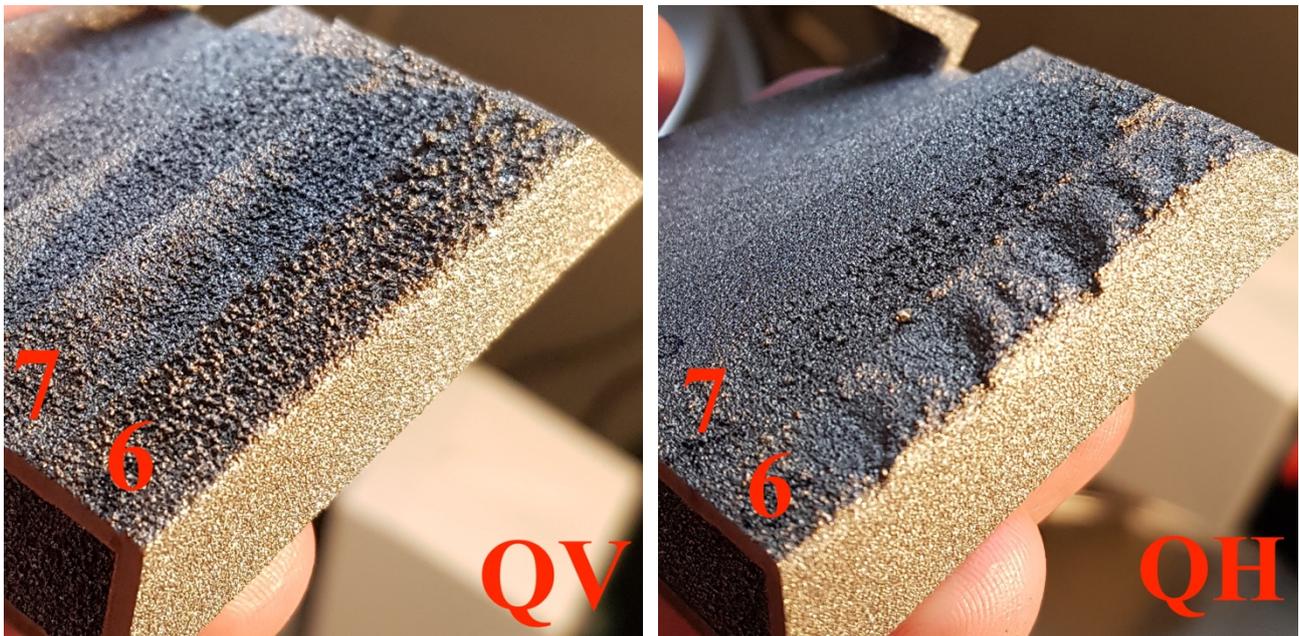
- Superfici esterne positive e superfici interne positive;
  - Superfici esterne negative e superfici interne negative.
- Analisi dell'influenza dell'angolo di inclinazione delle superfici. Vengono considerate superfici di medesimo tipo e orientazione, valutando come la variazione dell'angolo di inclinazione influisca sulla rugosità eseguendo un'analisi di regressione. Così facendo potrebbe essere definito un modello matematico che descriva l'effetto del fattore angolo sulla rugosità superficiale.

## 4.4 Presentazione e discussione dei risultati

Le misurazioni acquisite sono state elaborate facendo ricorso a strumenti di statistica descrittiva e inferenziale, in modo da estrarre informazioni dai dati grezzi raccolti e valutare l'influenza dei diversi fattori considerati. Dunque, durante tutta l'analisi è stato utilizzato un approccio di tipo scientifico, basandosi sui numeri che descrivono i fenomeni: questo però non deve far perdere di vista la realtà dei fatti colta attraverso i sensi.

### 4.4.1 Considerazioni preliminari

Prima di iniziare con l'analisi statistica dei dati rilevati con le misurazioni, occorre fare alcune considerazioni esaminando accuratamente i provini. Per prima cosa, si osservano le superfici 6 e 7 esterne di entrambi i provini, mostrate in figura 4.9, ricordano che queste sono caratterizzate da un'inclinazione rispettivamente di  $55^\circ$  e  $50^\circ$ .

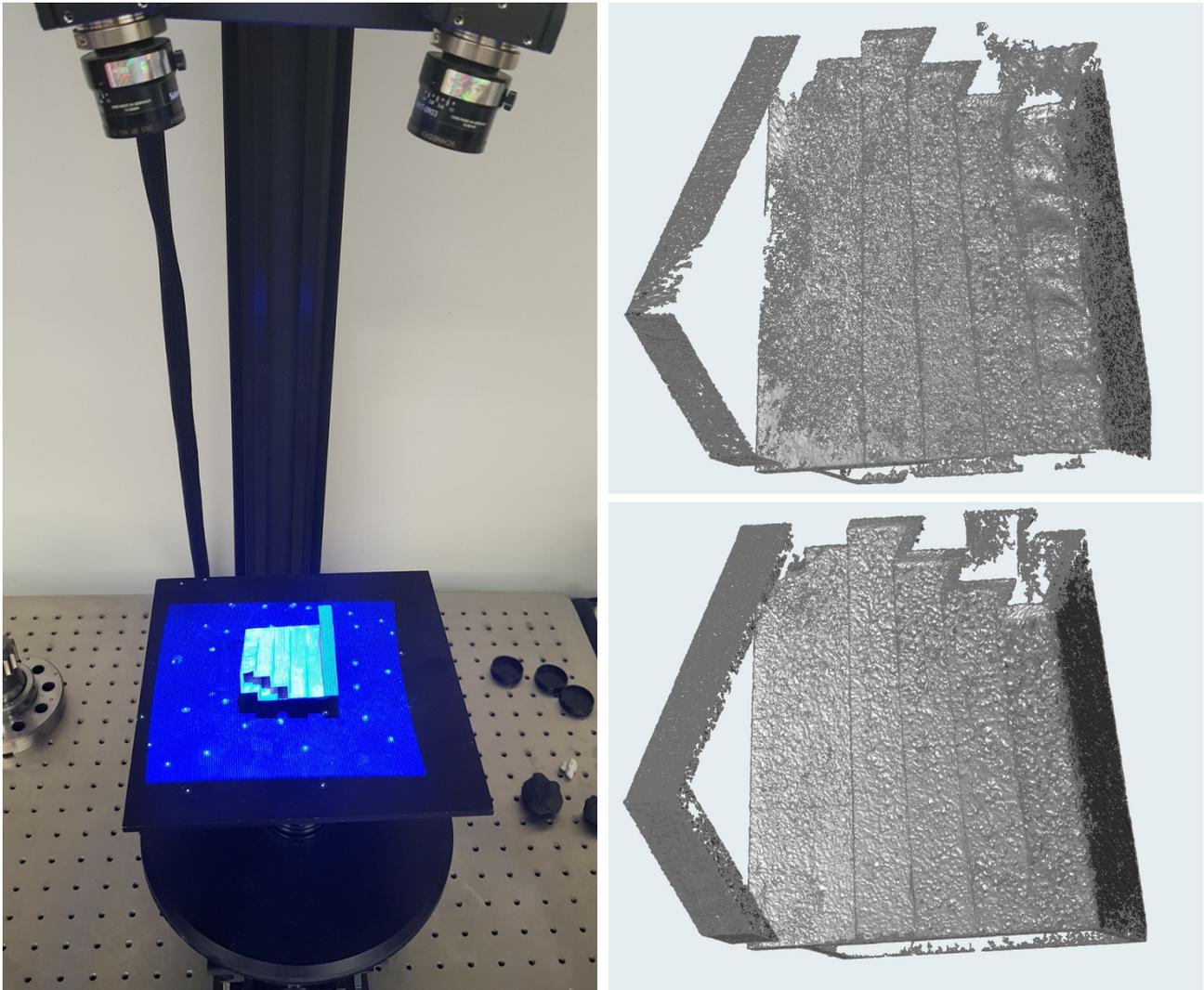


**Figura 4.9** Dettaglio delle superfici 6 e 7 esterne dei due provini QH e QV

Queste risultano essere di qualità pessima nel caso del provino QV, presentando moltissima polvere attaccata alle due superfici, il che le rende molto rugose ma, comunque, queste mantengono la forma piana. Invece, per quanto riguarda il provino QH, la superficie 6 presenta una notevole ondulazione, che ne altera nettamente la forma, fenomeno presente anche per la superficie 7, ma meno marcato. Inoltre, come nel caso del provino QV, entrambe le superfici presentano molta polvere inclusa sulle superfici, il che le rende molto rugose. Dunque, per i motivi evidenziati le superfici 6 e 7 esterne risultano essere impossibili da misurare con gli strumenti messi a disposizione per l'analisi della rugosità. Inoltre, il parziale crollo della superficie 6 esterna del provino QH ha causato anche una deformazione della stessa superficie interna, la quale risulta non misurabile. Per la superficie 7

interna, invece, è possibile eseguire la misura, in quanto il fenomeno risulta limitato alla superficie esterna.

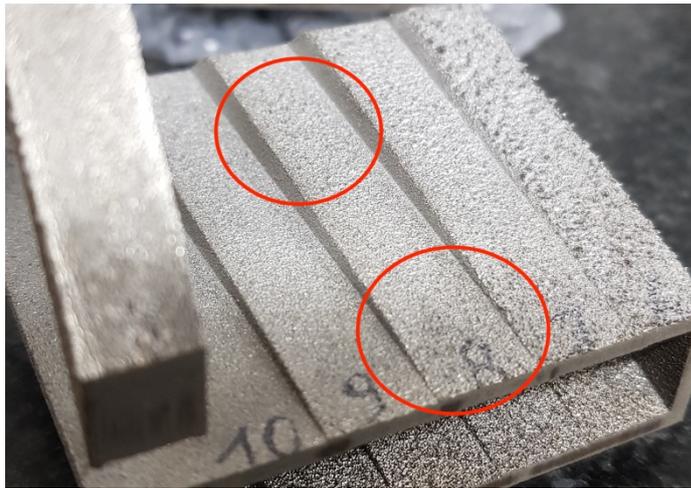
In aggiunta, le superfici esterne negative dei due provini sono state digitalizzate utilizzando uno scanner 3D ottico a luce strutturata "ATOS Compact Scan" della GOM [62], che restituisce un modello STL del provino reale scansionato. In figura 4.10 è illustrato il processo di scansione e i modelli STL risultanti. Questa operazione di reverse engineering sarà utile per future indagini sulle cause che hanno portato ad ottenere delle superfici di così scarsa qualità.



**Figura 4.10** Processo di scansione dei provini con scanner 3D ottico (a sinistra) e file STL risultanti (a destra)

Ad ogni modo, i problemi delle superfici analizzate sono probabilmente da attribuire al set di parametri di processo utilizzati, che si rivelano essere non troppo adeguati alla realizzazione di queste strutture. Tuttavia, l'azienda produttrice della macchina assicura una corretta realizzazione di superfici a sbalzo senza supporti fino ad un angolo di  $65^\circ$  rispetto alla verticale: risulta assurdo che queste crollino essendo inclinate soltanto di un angolo pari a  $55^\circ$ . Dunque, le superfici 6 e 7 vengono escluse dall'analisi non solo perché la rugosità non è misurabile con gli strumenti utilizzati, ma anche poiché vi è un altro fattore non controllato che influisce sulla qualità delle superfici.

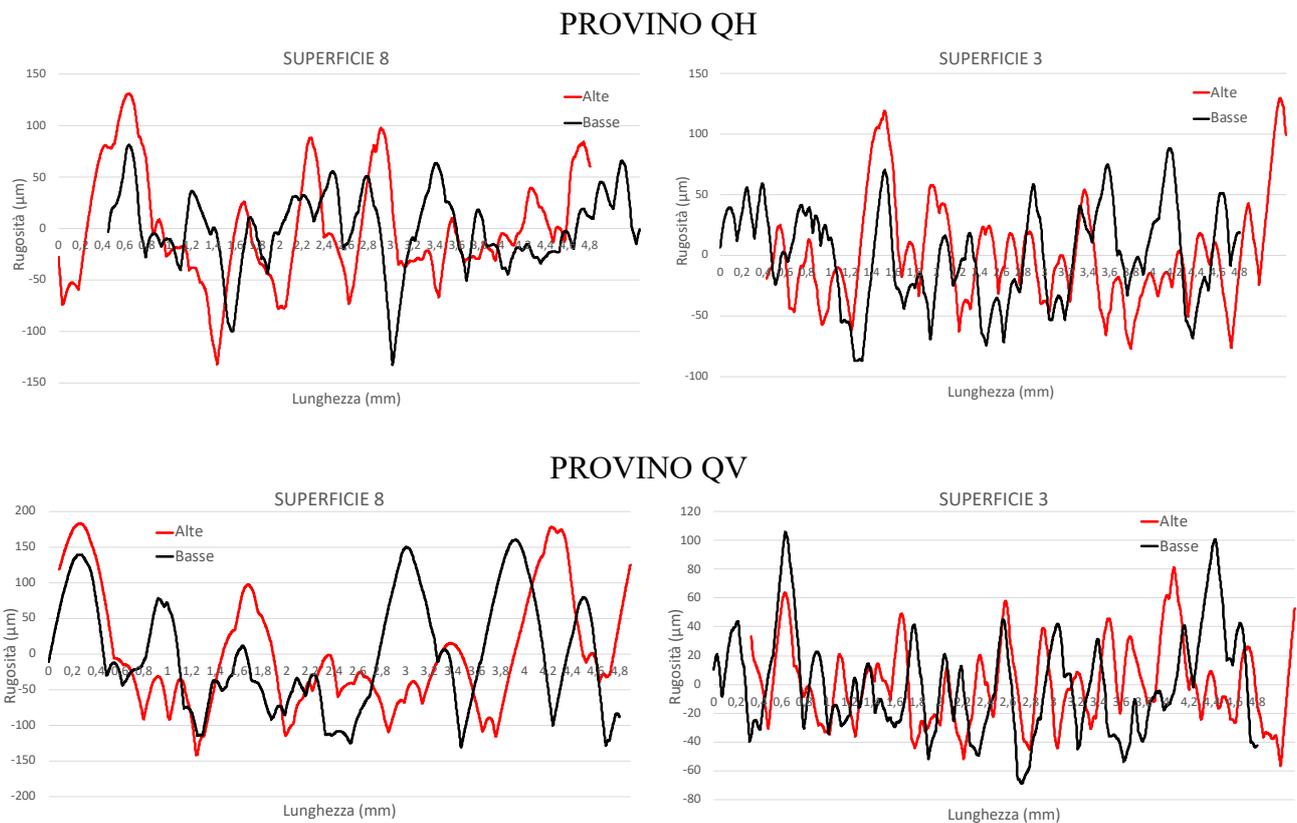
Come visto in precedenza, sono state eseguite prima le misurazioni nella parte alta dei provini, dopodiché nella parte bassa, in modo da disporre di un numero maggiore di dati. Per avere la certezza che i due set di dati non presentassero differenze e potessero essere utilizzati contemporaneamente nell'analisi, è stata condotta una prima analisi statistica, composta dalle stesse fasi che verranno descritte e spiegate nei paragrafi successivi. Il test statistico non ha sottolineato differenze tra i set di dati (misurazioni alte e basse), stabilendo la possibilità di essere utilizzate tutte insieme. Tuttavia, da un'analisi visiva dei campioni, si è notato come vi sia una consistente differenza in termini di irregolarità superficiale tra le zone alte delle superfici e quelle basse, come si può notare in figura 4.11 osservando la superficie 8.



**Figura 4.11** Differenza di irregolarità superficiale tra zona alta e zona bassa del provino

Pertanto, non basandosi soltanto sui dati numerici, sono stati presi in considerazione i profili rilevati dallo strumento di misura, in modo da confrontare graficamente gli andamenti delle irregolarità superficiali acquisiti nella zona alta con quelli della zona bassa. Sono stati analizzati i profili delle diverse superfici esterne negative, in cui il fenomeno è più marcato, e anche le rispettive superfici esterne positive, in cui lo è meno. In particolare, sono state considerate le superfici 8, 9 e 10 esterne negative e la 3, 4 e 5 esterne positive, sia per il provino QH che per il QV. I profili sono stati diagrammati nello stesso grafico, così da evidenziare meglio le differenze. Inoltre, per rendere il confronto migliore, si è operata, ove necessaria, una traslazione dei profili in modo da cercare la miglior corrispondenza tra di essi. In figura 4.12 sono riportati i grafici di confronto ritenuti più significativi, riferiti ad una superficie esterna positiva e negativa per ognuno dei due provini QH e QV, modificati come precisato precedentemente.

Osservando i grafici si nota che le differenze più sostanziali si manifestano per le superfici negative (le superfici n° 8), per le quali i profili delle misurazioni acquisite in alto risultano avere picchi più elevati e valli più profonde rispetto a quelle acquisite in basso. Inoltre, gli andamenti risultano essere anche molto diversi tra le rilevazioni alte e quelle basse: infatti spesso si trovano, ad una certa lunghezza, dei picchi per le misurazioni alte dove invece le misurazioni basse presentano delle valli e viceversa. Questo fenomeno è causato probabilmente da particelle di polvere attaccate più abbondantemente su una zona di superficie rispetto che all'altra, il che rende le acquisizioni in alto e



**Figura 4.12** Confronto tra i profili di diverse superfici dei due provini

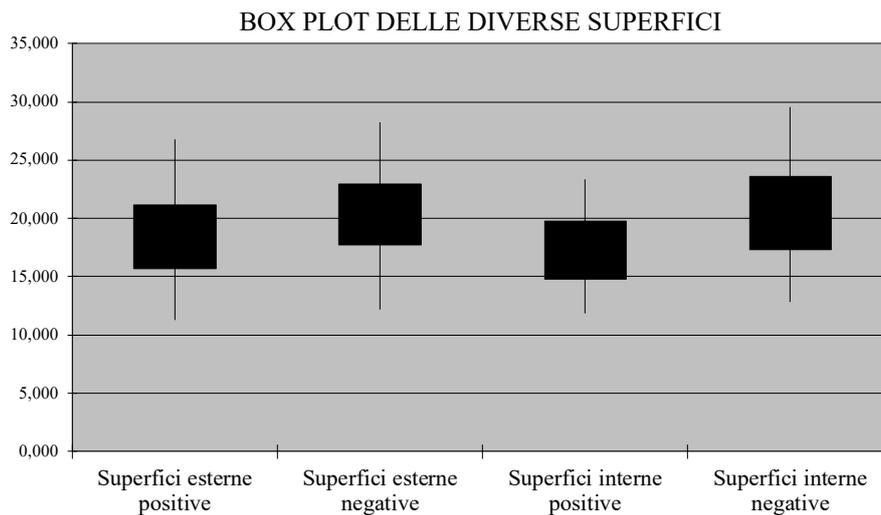
in basso molto diverse tra loro. Invece, per le superfici positive questi fenomeni sono meno marcati: infatti gli andamenti risultano essere più simili e non vi è prevalenza, a livello di valori minimi o massimi, di una rilevazione rispetto all'altra. Comunque, anche per queste superfici il fenomeno sussiste, ma in maniera molto meno marcata: forse è proprio questa piccola differenza sulle superfici positive, che si ricorda essere in numero maggiore data l'esclusione della 6 e 7 negative, che ha reso i dati numerici statisticamente ben distribuiti, lasciando pensare, in un primo momento, che non vi fosse differenza tra i due set di misurazioni. Pertanto, dopo l'analisi dei profili, è stato possibile scartare il set di dati acquisiti nella zona bassa dei provini, in cui probabilmente interviene l'influenza di un altro fattore, come i parametri di processo, già tirati in causa per il problema del crollo delle superfici.

#### 4.4.2 Analisi statistica

Dopo aver specificato i motivi per cui alcuni dati sono stati scartati, è possibile passare all'analisi statistica delle misurazioni acquisite. L'analisi prende dunque in considerazione 5 misurazioni per ogni superficie, ad esclusione delle 6 e 7 esterne e della 6 interna del solo provino QH, per un totale di 175 dati. Per quanto riguarda i modelli statistici utilizzati, si rimanda a [63].

L'analisi statistica, come specificato nel paragrafo precedente, inizia prendendo in considerazione la totalità dei dati a disposizione, in modo da testarne la distribuzione. Per prima cosa

i dati sono stati organizzati in una tabella, divisi per tipo di superficie e orientamento, e nominati in base al numero di superficie e alla posizione di misura. Dopodiché, per depurare i dati da eventuali errori di misura, si fa ricorso al principio di esclusione di Chauvenet, il quale definisce un intervallo di fiducia in base al numero di dati analizzati. Se il dato cade al di fuori di questo intervallo, significa che questo risulta essere un errore di misura e dev'essere escluso dall'analisi. Dopo l'esclusione, non essendo possibile ripetere la misura, questo verrà sostituito con il valore medio calcolato sull'intero set di valori da cui è stato escluso il dato che costituisce l'errore. Sono stati esclusi 4 dati che presentavano un valore di rugosità più elevato del limite superiore dell'intervallo di fiducia e quindi reputati errori di misura. Dunque, per avere una prima idea della distribuzione dei dati di misura, si disegnano i box plot relativi ad ogni classe di misurazioni, riportati in figura 4.13.



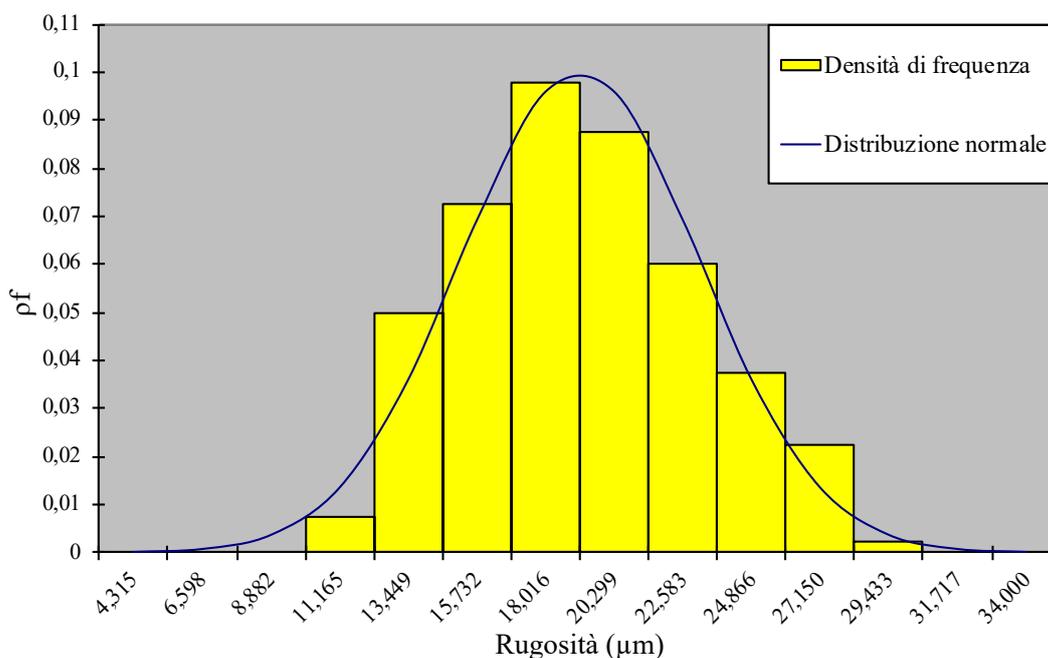
**Figura 4.13** Box plot relativo ai dati di rugosità raccolti in relazione alle superfici di tipo e orientazione diversi

Dal grafico si nota come i rettangoli dei diversi set di dati si sovrappongono parzialmente, il che segnala la corretta rilevazione delle misurazioni. L'analisi dei box plot, però, rappresenta soltanto un'analisi preliminare che fornisce un'idea qualitativa sulla corretta rilevazione dei dati, la quale non fornisce, però, alcun tipo di indicazione sulla presenza di errori sistematici. Per analizzare quantitativamente la distribuzione e quindi valutare se gli errori risultino aleatori oppure sistematici, occorre, per prima cosa, rappresentare i dati con un diagramma a colonne (istogramma), costruito opportunamente in modo da confrontare la loro distribuzione con quella normale, dopodiché effettuare due test. Il primo, quello del  $\chi^2$ , numerico e più rigoroso, che consente di rifiutare l'ipotesi di distribuzione normale con un certo livello di fiducia, e il secondo, detto Grafico di Probabilità Normale (GPN), che non ha il rigore per consentire il rifiuto della distribuzione normale, ma fornisce informazioni importanti sulle cause di non normalità. In figura 4.14 è illustrato l'istogramma delle frequenze relative dei dati sperimentali in esame, mentre in tabella 4.3 sono riportati i parametri calcolati per costruirlo.

**Tabella 4.3** Parametri risultanti per la costruzione dell'istogramma delle frequenze relative

<b>Minimo del campo esaminato (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	3,1729
<b>Massimo del campo esaminato (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	35,1422
<b>Numero di classi</b>	14
<b>Dimensione della classe (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	2,2835

Classe	Da ( $\mu\text{m}$ )	A ( $\mu\text{m}$ )	Valor medio ( $\mu\text{m}$ )	$f_a$	$f_r$	Densità di frequenza ( $\mu\text{m}^{-1}$ )	Distribuzione normale ( $\mu\text{m}^{-1}$ )
1	3,17293	5,45645	4,31469	0	0,000	0,0	0,00
2	5,45645	7,73997	6,59821	0	0,000	0,0	0,00
3	7,73997	10,02349	8,88173	0	0,000	0,0	0,00
4	10,02349	12,30701	11,16525	3	0,017	0,0	0,01
5	12,30701	14,59053	13,44877	20	0,114	0,1	0,04
6	14,59053	16,87405	15,73229	29	0,166	0,1	0,07
7	16,87405	19,15757	18,01581	39	0,223	0,1	0,10
8	19,15757	21,44109	20,29933	35	0,200	0,1	0,10
9	21,44109	23,72461	22,58285	24	0,137	0,1	0,07
10	23,72461	26,00813	24,86637	15	0,086	0,0	0,04
11	26,00813	28,29165	27,14989	9	0,051	0,0	0,01
12	28,29165	30,57518	29,43342	1	0,006	0,0	0,00
13	30,57518	32,85870	31,71694	0	0,000	0,0	0,00
14	32,85870	35,14222	34,00046	0	0,000	0,0	0,00



**Figura 4.14** Istogramma delle frequenze relative risultante dai dati acquisiti

La distribuzione sperimentale dei dati, come si nota dalla figura, risulta essere molto simile a quella normale, non presentando notevoli differenze. Si rileva soltanto una piccola asimmetria della distribuzione, che si manifesta con la presenza di pochi dati nella coda di sinistra dell'istogramma e un lieve spostamento del valore centrale verso sinistra: questo è un fenomeno tipico che si riscontra nei dati che risentono di un processo produttivo. Ad ogni modo, i dati sembrano ben distribuiti.

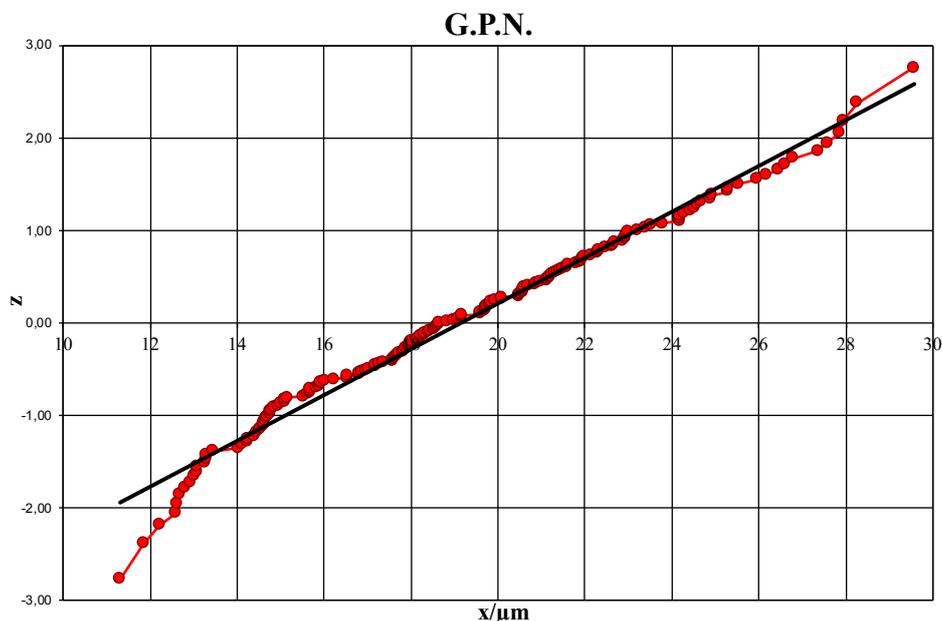
Si procede, dunque, con i test per controllare l'ipotesi di normalità della distribuzione. Il primo è il cosiddetto test del  $\chi^2$ , il quale valuta la differenza tra la distribuzione sperimentale e quella normale teorica in base alle differenze che si riscontrano nelle singole classi. In tabella 4.4 sono riportate le ipotesi adottate, i parametri calcolati e i risultati del test.

**Tabella 4.4** Parametri per la valutazione del  $\chi^2$

Da ( $\mu\text{m}$ )	A ( $\mu\text{m}$ )	$f_{rt}$	$f_{at}$	$f_a$	$(f_a - f_{at})^2/f_{at}$
3,17293	5,45645	0,0003	0,0	0	0,05
5,45645	7,73997	0,0018	0,3	0	0,32
7,73997	10,02349	0,0090	1,6	0	1,57
10,02349	12,30701	0,0321	5,6	3	1,22
12,30701	14,59053	0,0833	14,6	20	2,02
14,59053	16,87405	0,1573	27,5	29	0,08
16,87405	19,15757	0,2161	37,8	39	0,04
19,15757	21,44109	0,2161	37,8	35	0,21
21,44109	23,72461	0,1573	27,5	24	0,45
23,72461	26,00813	0,0833	14,6	15	0,01
26,00813	28,29165	0,0321	5,6	9	2,04
28,29165	30,57518	0,0090	1,6	1	0,21
30,57518	32,85870	0,0018	0,3	0	0,32
32,85870	35,14222	0,0003	0,0	0	0,05
<b><math>\chi^2</math> sperimentale</b>			<b>8,58</b>		
<b>Calcolo <math>\chi^2</math> teorico</b>					
<b>Livello di fiducia</b>			95%		
<b>Numero di classi</b>			14		
<b>Numero di vincoli</b>			3		
<b>Gradi di libertà (d.o.f)</b>			11		
<b>Limite inferiore di <math>\chi^2</math></b>			<b>3,82</b>		
<b>Limite superiore di <math>\chi^2</math></b>			<b>21,92</b>		

Dal confronto si nota come il valore di  $\chi^2$  calcolato sperimentalmente rientri nei limiti teorici. Dunque, non ci sono ragioni per rifiutare l'ipotesi che la distribuzione dei dati sperimentali sia assimilabile ad una distribuzione normale con un livello di fiducia del 95%. In pratica, il test non rileva nulla di strano nella distribuzione, il che non esclude la presenza di errori di piccola entità che possono non essere evidenziati con questa analisi.

Si passa quindi al grafico di probabilità normale, un test che mira al confronto grafico della distribuzione sperimentale con quella normale attraverso una forma semplice e facilmente riconoscibile: una retta. Infatti, grazie ad un'opportuna deformazione degli assi, il grafico della distribuzione normale cumulata risulta essere una retta obliqua: grazie al suo utilizzo il confronto grafico risulta molto più semplice e intuitivo rispetto all'impiego della curva a campana. In figura 4.15 è mostrato il G.P.N. dei dati in esame.



**Figura 4.15** Grafico di probabilità normale relativo ai dati in esame

Dal grafico si nota come i dati siano ben distribuiti nella zona centrale dell'intervallo, quella di maggior interesse. Dunque, come detto in precedenza il test del G.P.N. non è rigoroso come quello del  $\chi^2$  e non permette di dare un giudizio oggettivo e con un certo livello di fiducia. Però, è possibile affermare che non può essere scartata l'ipotesi di distribuzione normale, in quanto la distribuzione dei dati è molto simile ad una retta e non si rilevano problematiche particolari.

Quindi, dalle analisi statistiche effettuate sulla totalità dei dati si può concludere che i valori risultano ben distribuiti, non presentando rilevanti errori sistematici di misura. Per questo motivo è possibile accettarli e passare ad analisi più specifiche, che riguardano la valutazione dell'influenza dei diversi fattori sulla rugosità superficiale.

La seconda analisi condotta riguarda l'influenza della disposizione del provino rispetto alla direzione di passaggio del rake per la stesura della polvere: in questo caso vengono confrontate le misurazioni rilevate dal provino QH e dal provino QV. In prima battuta, occorre organizzare opportunamente i dati in 2 colonne con lo stesso numero di righe, in modo che questi possano essere confrontati. In particolare, per il provino QH, come visto precedentemente, non sono state rilevate le misure per le superfici 6 e 7 esterne e per la 6 interna, quest'ultima invece acquisita per il provino QV. Dunque, per rendere uguale la numerosità dei due set di dati, è stato necessario eliminare le misurazioni della superficie 6 interna del provino QV, ottenendo un totale di 170 dati organizzati in due colonne da 85 valori. In questo caso non viene condotta un'analisi di distribuzione, già eseguita

precedentemente per la totalità dei dati, ma si indagano i dati in modo da stabilire se vi siano delle differenze tra i set considerati e se queste siano dovute al caso oppure ad una ragione ben definita, individuata dal fattore sotto controllo. Dunque, organizzati i dati è possibile procedere con due test d'ipotesi, ponendo come ipotesi nulla da smentire la seguente: "la disposizione del provino rispetto alla direzione di passaggio del rake non influisce sulla rugosità". Il primo test prende in considerazione la media delle colonne e il calcolo dei limiti di accettabilità avviene considerando un livello fiduciario 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 4.5 sono riportati i valori delle medie delle colonne e i parametri utilizzati per il calcolo dei limiti di accettabilità. Sono evidenziati, per semplicità di confronto, i valori medi e i limiti di accettabilità.

**Tabella 4.5** Valori medi delle colonne relative al provino QH e QV e parametri per eseguire il test d'ipotesi

<b>PROVINO QH</b>	<b>PROVINO QV</b>
19,7379	18,7124

<b>Numero di dati mediati</b>	85
<b>Media</b>	19,2252
<b>Deviazione standard media</b>	0,4363
<b>Livello di fiducia</b>	95%
<b>Limite di accettabilità inferiore</b>	18,3701
<b>Limite di accettabilità superiore</b>	20,0803

Dalla tabella è possibile notare come i valori medi delle colonne risultano essere all'interno del range teorico imposto dai limiti di accettabilità calcolati. Dunque, il test non rileva fattori sistematici nelle colonne che possano portare al rifiuto dell'ipotesi nulla, ovvero non si rileva una variazione tra le colonne dovuta alla disposizione del provino rispetto al rake.

Il secondo test d'ipotesi, invece, tiene conto della varianza delle colonne. In tabella 4.6 sono riportati i valori delle varianze delle colonne e i parametri utilizzati per il calcolo dei limiti di accettabilità. Da questo secondo test d'ipotesi emerge come la varianza dei dati del provino QH cada al di fuori dei limiti di accettabilità. Dunque, in questo caso è possibile rifiutare l'ipotesi nulla iniziale con un rischio d'errore del 5%, ovvero sembrerebbe esserci una differenza sistematica tra le colonne dovuta alla disposizione dei provini rispetto alla direzione di passaggio della racla. Tuttavia, essendo soltanto una delle due colonne al di fuori del range, l'ipotesi risulta essere debole e occorre approfondire proseguendo nell'analisi utilizzando altri modelli statistici.

**Tabella 4.6** Varianze delle colonne relative ai provini QH e QV e parametri per eseguire il test d'ipotesi

PROVINO QH	PROVINO QV
10,8497	21,1673

Numero di dati rilevati per la varianza	85
Varianza attesa	16,0085
$\nu$ atteso	84
Livello di fiducia	95%
Limite inferiore di $s^2$	11,5375
Limite superiore di $s^2$	21,2002

Per questo motivo si passa all'Analisi della Varianza (Analysis of Variance, ANOVA) ad un solo fattore, che mette a confronto le stesse colonne definite in precedenza (sono due: una per il provino QH e un per il provino QV) e utilizza l'ipotesi nulla fissata in precedenza per i test d'ipotesi. I risultati del test ANOVA, ottenuti con un livello di confidenza del 95 %, sono riportati in tabella 4.7.

**Tabella 4.7** Test ANOVA ad un solo fattore relativo ai provini QH e QV

Causa di variazione	Gradi di libertà	Varianza	Rapporto tra varianze	$F_{Max}$
Fattore esaminato	1	44,6968	2,79	3,90
Errori casuali	168	16,0085		
Totale	169			

Dalla tabella si nota come il valore del rapporto delle varianze sia minore del valore di  $F_{max}$  ricavato dalla distribuzione teorica di Fischer con un livello di confidenza pari al 95%. Ciò significa che non può essere rifiutata l'ipotesi nulla, ovvero non si evidenziano differenze sistematiche tra le colonne. In altre parole, non si sottolinea una differenza sistematica di rugosità superficiale tra i due provini causata dalla disposizione di quest'ultimi rispetto alla direzione di passaggio del rake. Dunque, i provini possono essere assimilati a due repliche identiche e, nelle analisi successive, i dati acquisiti da entrambi possono essere utilizzati contemporaneamente. Questo risultato è importante non solo per aver messo in luce che la disposizione rispetto al rake non influisce sulla qualità dei componenti, ma anche per la numerosità dei set di dati considerati successivamente, il che permette di non stampare nuovi provini per acquisire altre misurazioni.

Si passa, quindi, ai confronti tra superfici di tipo e orientazione diversi. Il primo confronto punta a valutare l'influenza dell'orientazione delle superfici interne sulla rugosità superficiale, ovvero se vi sia differenza tra quelle rivolte verso la piattaforma di costruzione (negative) e quelle verso l'alto (positive). L'iter statistico utilizzato risulta essere lo stesso impiegato per l'analisi precedente tra provino QH e QV: non viene testata la distribuzione dei dati (test eseguito all'inizio sulla totalità dei dati) e vengono condotti subito i test d'ipotesi e l'ANOVA. Per rendere possibile il confronto, occorre

organizzare i dati in due colonne con lo stesso numero di dati, una per le superfici interne positive e una per quelle interne negative. In quest'ottica, la superficie 6 del provino QH, che risulta non misurabile, impone che venga eliminata anche la stessa superficie del provino QV. Quindi, per rendere uguale la numerosità delle colonne, è stato necessario eliminare dallo studio i dati relativi alla superficie interna negativa corrispondente alle superficie 6 interna positiva, ovvero la superficie 1. Così facendo, l'analisi comprende un totale di 80 valori, 40 per ogni colonna. Si procede con i test d'ipotesi per valutare l'influenza del fattore orientazione della superficie, assumendo come ipotesi nulla la seguente: "l'orientazione delle superfici interne non influisce sulla rugosità superficiale". In tabella 4.8 sono riportati i risultati del primo test d'ipotesi, che prende in considerazione la media delle colonne.

**Tabella 4.8** Valori medi delle colonne relative alle superfici in esame e parametri per eseguire il test d'ipotesi

SUP. INTERNE NEGATIVE	SUP. INTERNE POSITIVE
20,0227	17,6509

<b>Numero di dati mediati</b>	40
<b>Media</b>	18,8368
<b>Deviazione standard media</b>	0,6356
<b>Livello di fiducia</b>	95%
<b>Limite di accettabilità inferiore</b>	17,5911
<b>Limite di accettabilità superiore</b>	20,0825

Come è chiaro dalla tabella, le medie delle singole colonne cadono entrambe all'interno del range di ammissibilità. Dunque, non è possibile rifiutare l'ipotesi nulla, il che significa che non si riscontrano differenze sistematiche tra le colonne in esame. Si passa, così, al secondo test d'ipotesi, il quale tiene conto della varianza delle colonne, i cui risultati sono riportati in tabella 4.9.

**Tabella 4.9** Varianze delle colonne relative alle superfici in esame e parametri per eseguire il test d'ipotesi

SUP. INTERNE NEGATIVE	SUP. INTERNE POSITIVE
20,2005	9,6440

<b>Numero di dati rilevati per la varianza</b>	40
<b>Varianza attesa</b>	14,9222
<b><math>\nu</math> atteso</b>	39
<b>Livello di fiducia</b>	95%
<b>Limite inferiore di <math>s^2</math></b>	9,0506
<b>Limite superiore di <math>s^2</math></b>	22,2380

Osservando la tabella, i valori di varianza delle colonne risultano essere all'interno del range di accettabilità. Dunque, anche in questo caso il test non fornisce informazioni utili, non permettendo di rifiutare l'ipotesi nulla. Pertanto, si passa all'ANOVA, l'analisi più concreta e attendibile, condotta sempre con un livello di fiducia del 95%, i cui risultati sono illustrati in tabella 4.10.

**Tabella 4.10** Test ANOVA ad un solo fattore relativo alle superfici interne positive e negative

Causa di variazione	Gradi di libertà	Varianza	Rapporto tra varianze	$F_{Max}$
<b>Fattore esaminato</b>	1	112,5054	<b>7,54</b>	<b>3,96</b>
<b>Errori casuali</b>	78	14,9222		
<b>Totale</b>	79			

Come si nota dalle celle evidenziate della tabella, il rapporto tra le varianze risulta maggiore del valore di  $F_{Max}$  calcolato. Quindi, dal test ANOVA si può affermare, con un rischio d'errore del 5%, che esistano differenze sistematiche tra le colonne, ossia è possibile rifiutare l'ipotesi nulla. Di conseguenza, si conclude che il fattore orientazione delle superfici influisce sul valore di rugosità delle superfici interne. Per quanto riguarda la rugosità, il valore medio per le superfici interne positive risulta essere pari a 17,65  $\mu m$  con una deviazione standard di 3,11  $\mu m$ . Per quelle interne negative la rugosità media è pari a 20,20  $\mu m$  con deviazione standard di 4,49  $\mu m$ . Dai valori delle deviazioni standard, che risultano elevati, si deduce quanto i dati si rivelino essere molto dispersi.

Si procede con la valutazione di un altro fattore, ovvero il tipo di superficie. L'analisi è condotta prendendo in considerazione le superfici di orientazione positiva dei due diversi tipi, interne e esterne. Anche in questo caso, come visto nel caso precedente, occorre organizzare i dati in due colonne di ugual numero di dati. Questo è possibile eliminando le misurazioni della superficie 6 interna del provino QV (data la mancanza di quelle del provino QH) e le misurazioni della rispettiva superficie esterna positiva, ossia la 1. Si ottengono, ancora una volta, 80 dati in totale organizzati in due colonne da 40 valori. Dopodiché, si può procedere nuovamente con i test d'ipotesi, imponendo come ipotesi

**Tabella 4.11** Valori medi delle colonne relative alle superfici in esame e parametri per eseguire il test d'ipotesi

SUP. POSITIVE ESTERNE	SUP. POSITIVE INTERNE
18,8651	17,6509

<b>Numero di dati mediati</b>	40
<b>Media</b>	18,2580
<b>Deviazione standard media</b>	0,5064
<b>Livello di fiducia</b>	95%
<b>Limite di accettabilità inferiore</b>	17,2655
<b>Limite di accettabilità superiore</b>	19,2506

nulla la seguente:” il tipo di superficie non influisce sulla rugosità delle superfici positive”. Dal primo test, che considera la media delle colonne, si ottengono i risultati in tabella 4.11.

Le medie delle colonne rientrano nel range di accettabilità, il che non rende possibile il rifiuto dell'ipotesi nulla considerata. Quindi, non si evidenziano differenze sistematiche tra le colonne dovute al fattore tipo di superficie. Invece, dal secondo test si ottengono i risultati riportati in tabella 4.12.

**Tabella 4.12** Varianze delle colonne relative alle superfici in esame e parametri per eseguire il test d'ipotesi

SUP. POSITIVE ESTERNE	SUP. POSITIVE INTERNE
10,3801	9,6440

Numero di dati rilevati per la varianza	40
Varianza attesa	10,0120
$\nu$ atteso	39
Livello di fiducia	95%
Limite inferiore di $s^2$	6,0725
Limite superiore di $s^2$	14,9205

Anche in questo caso, le varianze delle colonne rientrano nei limiti di accettabilità, pertanto non si rileva una differenza sistematica tra le colonne. Il test non fornisce informazioni, dato che non è possibile rifiutare l'ipotesi nulla iniziale. Perciò, si prosegue con l'ANOVA per un solo fattore sotto controllo, i cui risultati sono riportati in tabella 4.13.

**Tabella 4.13** Test ANOVA ad un solo fattore relativo alle superfici positive interne e esterne

Causa di variazione	Gradi di libertà	Varianza	Rapporto tra varianze	$F_{Max}$
Fattore esaminato	1	29,4856	2,95	3,96
Errori casuali	78	10,0120		
Totale	79			

Osservando le celle evidenziate si nota come il rapporto tra le varianze risulti essere minore di  $F_{max}$  calcolato con la distribuzione di Fischer e livello di fiducia 95%. Pertanto, non è possibile, nemmeno con questa analisi, rifiutare l'ipotesi nulla iniziale. Dunque, si conclude che la rugosità superficiale non dipende dal tipo di superficie che viene considerata (esterna o interna), se questa presenta un'orientazione positiva. Il valore medio di rugosità per le superfici positive esterne è pari a 18,87  $\mu\text{m}$  con una deviazione standard di 3,22  $\mu\text{m}$ , mentre per quelle interne risulta essere di 17,65  $\mu\text{m}$  con deviazione standard pari a 3,11  $\mu\text{m}$ . Dai valori delle deviazioni standard si desume nuovamente quanto siano dispersi i dati di misura, il che potrebbe essere causato dal basso numero di misurazioni a disposizione.

### 4.4.3 Analisi della regressione

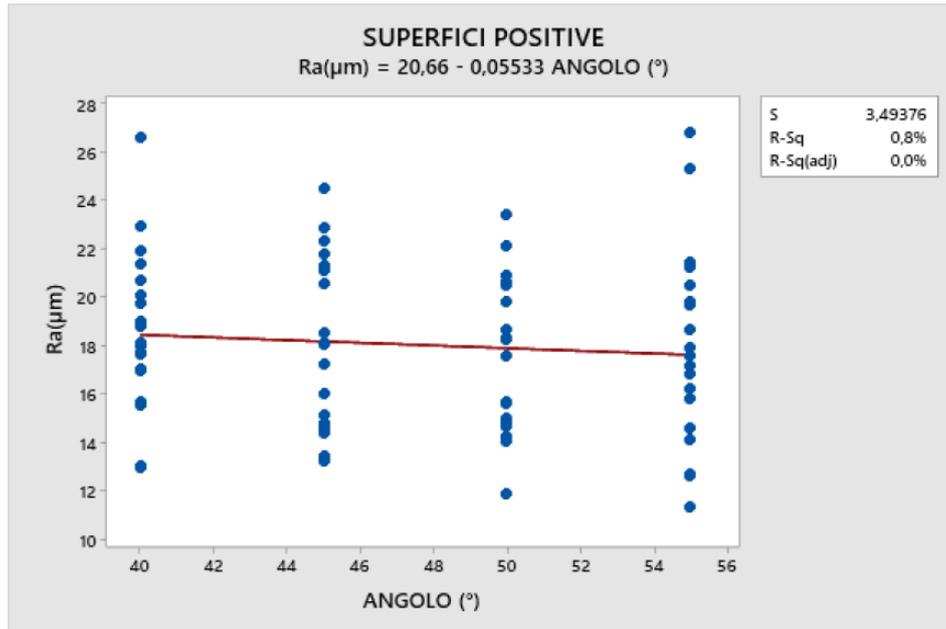
I metodi statistici utilizzati finora hanno dato un'indicazione sull'eventuale presenza di fattori sistematici che influenzano i dati sperimentali, mettendo in luce che:

- Non vi è influenza della disposizione dei provini rispetto alla direzione di passaggio del rake;
- L'orientazione, positiva o negativa, delle superfici interne dei provini influisce sul valore di rugosità;
- Il tipo di superficie, interna o esterna, non influisce sul valore di rugosità delle superfici orientate positivamente.

Però, dalle informazioni ricavate con le analisi precedenti non è possibile individuare con certezza quale sia il fattore secondo il quale si registra la variazione sistematica dei dati sperimentali: questo è possibile attraverso lo studio della regressione. In questo modo è possibile identificare l'eventuale relazione funzionale che sussiste tra rugosità superficiale e il fattore sistematico, in questo caso rappresentato dall'angolo di inclinazione delle superfici. Grazie a questo tipo di analisi potrebbe essere costruito un modello descrittivo della variazione della rugosità in funzione dell'angolo, che possa essere utilizzato per prevedere i valori di rugosità ottenuti per una superficie con un dato angolo di inclinazione. A tale scopo vengono costruiti dei modelli di regressione utilizzando un software specifico per analisi statistiche e creazione di grafici, Minitab19.1.

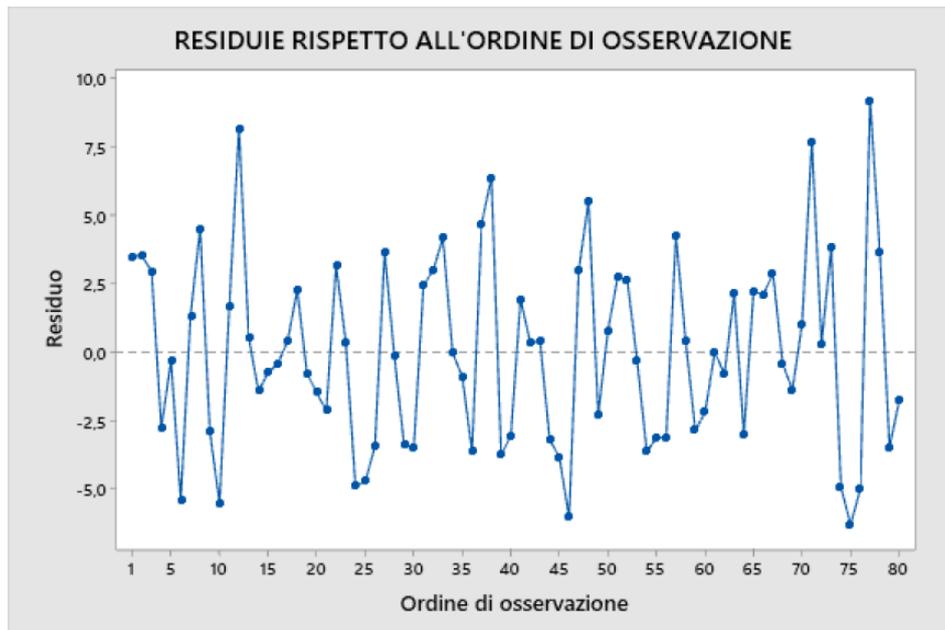
Si comincia con lo studio della rugosità delle superfici positive, ricordando che dalle analisi precedenti è emerso che questa non dipende, per le superfici così orientate, dal tipo di superficie presa in esame, ovvero che questa sia interna o esterna. Per questo motivo, i dati relativi alle superfici interne positive e esterne positive possono essere utilizzati insieme, formando un set di dati più numeroso. Inoltre, dato che per le superfici interne positive non sono disponibili le misurazioni relative alla superficie 6, vengono scartate anche quelle della superficie 1, in modo da ottenere set di dati formati dallo stesso numero di misure: dunque, le superfici prese in esame saranno 4. Per la creazione del modello, per prima cosa è necessario organizzare i dati in funzione dell'angolo di inclinazione delle superfici: le superfici positive risultano essere 4, ognuna delle quali conta 20 misurazioni, per un totale di 80 valori presi in considerazione dall'analisi. Dopodiché, questi vengono importati nel software Minitab e utilizzati per generare il modello di regressione. Il software permette di scegliere il grado del modello da utilizzare e consente, oltretutto, di generare il grafico dei residui, che fornisce informazioni importanti utili all'analisi. In questo caso è stato scelto un modello di tipo lineare per descrivere i dati sperimentali e il risultato è riportato in figura 4.16.

Il diagramma riporta graficamente i dati organizzati in base all'angolo e la retta che cerca di descriverli, la quale deriva dal modello scelto (lineare). Inoltre, all'interno del grafico sono presenti informazioni aggiuntive come l'equazione che descrive la retta e alcuni parametri contenuti nel box bianco. Già visivamente è possibile notare come i dati siano molto dispersi, tutti parzialmente sovrapposti e di cui non si rileva un andamento definito. Per questi motivi, la retta non sembra rappresentare bene i dati sperimentali, ma interpola soltanto dei punti riportati in un grafico. A conferma dell'ipotesi vengono segnalati i valori dei parametri  $R^2$  e  $R^2$  corretto (nel grafico R-Sq e R-Sq(adj)), chiamati rispettivamente coefficiente di determinazione e coefficiente di determinazione



**Figura 4.16** Modello di regressione lineare per le superfici positive

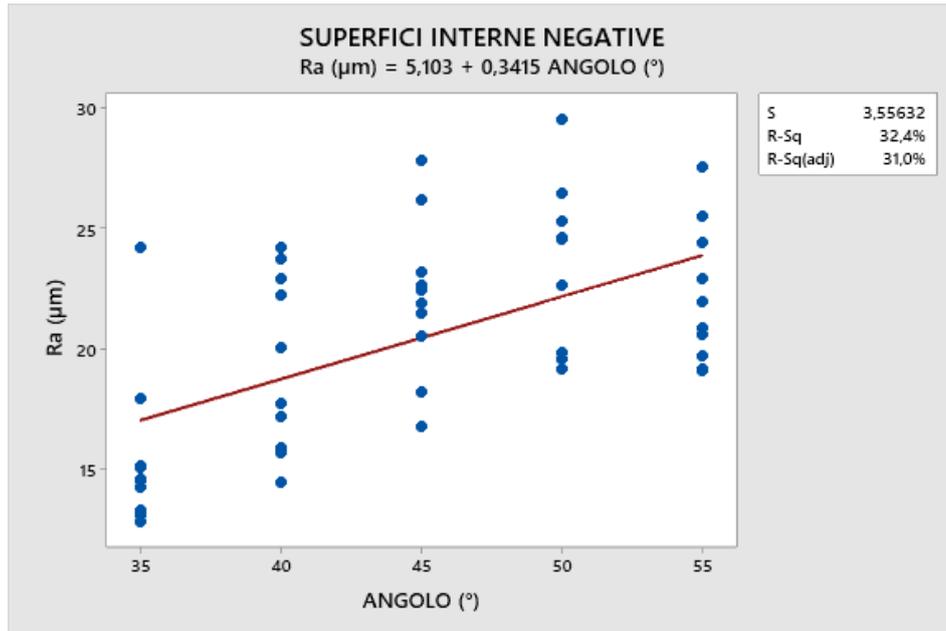
corretto. Questi due parametri possono variare da 0 a 1 (in percentuale da 0% a 100%) e indicano se la variabilità dei dati in Y è spiegata dalla variabilità del fattore in X, ossia se il modello di regressione utilizzato descrive in modo appropriato i dati. Quando i due parametri sono prossimi a 1 (a 100%) significa che il modello di regressione descrive bene i dati sperimentali e quindi il fattore in X risulta essere descrittivo della variazione dei dati in Y. Al contrario, quando  $R^2$  e  $R^2$  corretto risultano essere vicini a 0 (0%) significa che il modello non descrive adeguatamente i dati sperimentali e, dunque, non è possibile imputare la variazione dei dati in Y al fattore in X. Nel caso in esame  $R^2$  è pari a 4,5% e  $R^2$  corretto a 2,5%: entrambi i valori risultano essere molto bassi e questo significa che il modello di regressione adottato non descrive bene i dati sperimentali. Un'ulteriore analisi per indagare la bontà del modello di regressione adottato è rappresentata dallo studio dei residui, ovvero la differenza che esiste tra i dati sperimentali in esame e i valori calcolati con il modello matematico, in questo caso la retta descritta dall'equazione sempre in figura 4.16. Se il modello descrive adeguatamente i dati allora i residui si disporranno casualmente e, di conseguenza, i loro segni saranno positivi e negativi con casualità. Al contrario, se il modello non descrivesse bene i dati sperimentali, allora i residui presenterebbero una certa regolarità nel disporsi e i segni avrebbero una tendenza ad essere positivi o negativi. In figura 4.17 è riportato il grafico che illustra l'andamento dei residui dei 50 dati in esame. Dal grafico è possibile notare come i dati siano ben dispersi e come i segni non presentino una tendenza ad essere positivi o negativi. Ciò potrebbe portare a concludere che l'analisi dei residui sia in contrasto con i valori di  $R^2$  e di  $R^2$  corretto visti in precedenza. Tuttavia, in alcuni casi non solo l'andamento dei residui risulta essere significativo: spesso anche i valori assumono una certa importanza. Infatti, in questo caso, osservando i valori assunti dai residui, si nota come questi siano molto elevati, raggiungendo valori positivi vicini a 10 e negativi vicino a -6. Ciò mette in evidenza la difficoltà del modello di regressione costruito di descrivere in modo appropriato i dati sperimentali, data la grande differenza tra i valori di quest'ultimi e quelli calcolati con l'equazione della retta.



**Figura 4.17** Andamento dei residui relativi al modello lineare in funzione dell'ordine di osservazione per le superfici positive

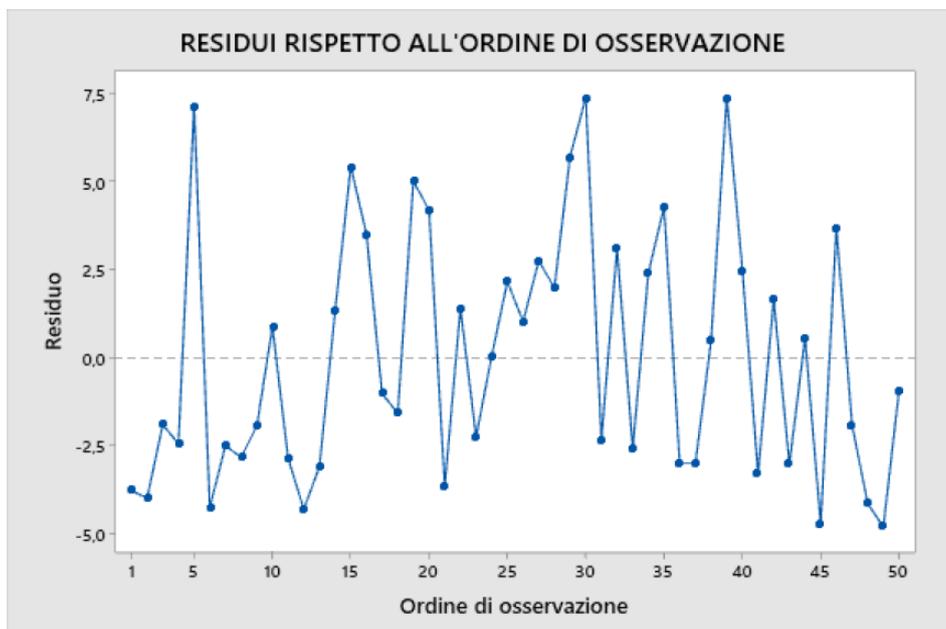
Dunque, dai risultati di questa prima analisi non è possibile definire se è il modello matematico utilizzato a non descrivere bene i dati oppure se sono questi che non presentano una sistematicità in funzione dell'angolo, anche se, osservando attentamente i dati nel grafico di figura 4.16, è chiaro come non sia un problema del modello matematico. Infatti, è chiaro come i valori di rugosità risultino molto dispersi per ogni angolo di inclinazione, non assestandosi su un valore particolare. Per questo motivo nessun modello sarebbe in grado di descrivere opportunamente i dati, il che non rappresenta un problema. Infatti, questo significa che è possibile affermare che l'angolo di inclinazione delle superfici positive esterne e interne non influisce sul valore di rugosità risultante. Questo può essere dovuto al cosiddetto effetto staircase, ossia la scalettatura provocata dalla divisione in strati di spessore finito di una superficie curva o inclinata. Il fenomeno dovrebbe essere proporzionale all'inclinazione delle superfici ma l'influenza contemporanea di un altro fattore, come l'adesione di particelle di polvere ai bordi delle sezioni, potrebbe rendere simile la rugosità di tutte le superfici positive, indipendentemente dall'angolo di inclinazione. Ad ogni modo, dato il numero non elevato dei dati a disposizione per ogni superficie, è possibile che occorrono più misurazioni per studiare meglio il fenomeno e rendere l'analisi più strutturata. Ciò non toglie, comunque, che l'analisi sia già sufficientemente significativa e che uno studio successivo, con un numero maggiore di dati, possa restituire lo stesso risultato.

Si passa, dunque, all'analisi della regressione sulle superfici interne negative. In questo caso le superfici considerate risultano essere 5 e ognuna conta 10 misurazioni, per un totale di 50 dati analizzati. Il modello di regressione scelto è di tipo lineare, dunque si cerca di descrivere i dati con una retta. In figura 4.18 viene riportato il grafico risultante.



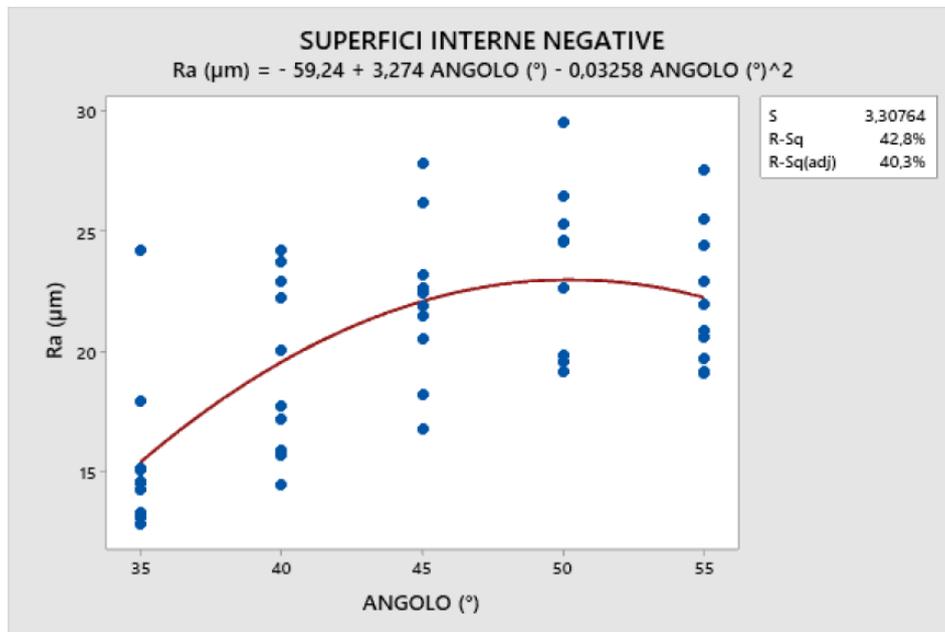
**Figura 4.18** Modello di regressione lineare per le superfici interne negative

In questo caso i valori dei coefficienti di determinazione risultano più elevati dei casi precedenti, ad indicazione del fatto che il modello sembri descrivere meglio la variazione dei dati sperimentali. Effettivamente, è chiaro come questi si dispongano con un ordine più definito, dando l'impressione che vi sia una variazione che segue un certo ordine. Ad ogni modo, i valori di  $R^2$  e  $R^2$  corretto risultano essere ancora troppo modesti, il che indica che il modello non descrive adeguatamente i dati sperimentali. Per approfondire l'analisi si prendono in considerazione i residui, mostrati in figura 4.19. I residui sembrano disporsi in maniera adeguata nella zona centrale del grafico, con



**Figura 4.19** Residui relativi al modello lineare in funzione dell'ordine di osservazione per le superfici interne negative

un'alternanza di segni casuale, mentre nelle zone destra e sinistra sembra esserci una prevalenza di segni negativi. Inoltre, alcuni di essi presentano dei valori elevati, motivo per cui i valori dei coefficienti di determinazione si rivelano ancora modesti. Ad ogni modo, la tendenza dei segni dei residui nelle zone laterali potrebbe essere indice che il modello funziona correttamente nella parte centrale, mentre non è lo stesso per le altre zone. In questo caso, essendo i dati meno dispersi dei casi precedenti, un diverso modello matematico potrebbe essere più descrittivo. Dunque, si è provato a cambiare il tipo di modello utilizzato in quadratico, ottenendo il risultato mostrato in figura 4.20.

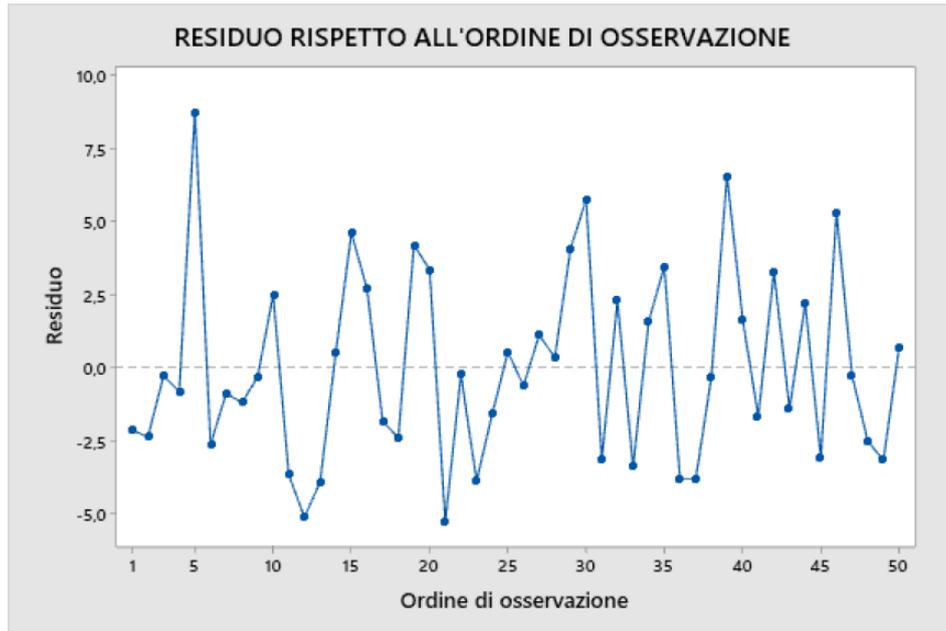


**Figura 4.20** Modello di regressione quadratico per le superfici interne negative

La parabola utilizzata, rispetto alla retta precedente, sembra rappresentare meglio i dati, seguendoli meglio nelle zone laterali che prima risultavano essere quelle descritte nel modo peggiore. I coefficienti di determinazione valgono rispettivamente 42,8% e 40,3%, valori che rendono il modello in esame più descrittivo del precedente. A conferma di quanto affermato, si analizzano i residui illustrati in figura 4.21. Rispetto al caso precedente in cui veniva utilizzata la retta, i residui sembrano avere nel complesso dei valori medi inferiori, escludendo i picchi, caratterizzati da valori sempre troppo elevati. La distribuzione sembra essere migliorata nelle zone a destra e sinistra, in cui i valori si dispongono con migliore alternanza di segni e valori, mentre la zona centrale risulta simile al caso precedente. Dunque, la variazione della rugosità rispetto all'angolo di inclinazione delle superfici interne negative potrebbe essere descritta dall'equazione:

$$R_a = -59,24 + 3,274 \cdot A - 0,03258 \cdot A^2$$

dove  $A$  rappresenta l'angolo di inclinazione della superficie considerata espresso in gradi sessagesimali ( $^{\circ}$ ) e la rugosità  $R_a$  è espressa in micron ( $\mu\text{m}$ ). Tuttavia, è opportuno sottolineare che il modello non è ancora abbastanza significativo da poter affermare che la rugosità varia con questa equazione. Infatti, anche se i valori di  $R^2$  e  $R^2$  corretto risultano essere più elevati dei casi precedenti,



**Figura 4.21** Residui relativi al modello lineare in funzione dell'ordine di osservazione per le superfici interne negative

questi non sono caratterizzati da valori sufficientemente elevati da poter concludere quanto sopra. Inoltre, da un'analisi visiva del grafico di regressione, si nota come soltanto i dati relativi a superfici inclinate di  $35^\circ$  e  $45^\circ$  vengano descritti bene dalla curva, mentre gli altri set di dati risultano dispersi e la curva passa perfino in zone in cui non sono presenti dati. Pertanto, anche in questo caso non è possibile concludere con certezza che i dati varino seguendo un certo andamento, ovvero la rugosità non sembra essere influenzata dall'inclinazione delle superfici. Ad ogni modo, come nei casi precedenti, non si esclude che con un numero maggiore di misurazioni non possa evidenziare un risultato diverso e più strutturato.

## 5. Valutazione dell'accuratezza dimensionale e geometrica di componenti prodotti con EBM Arcam Q10 plus

Nel seguente capitolo vengono presentate le modalità utilizzate e i risultati ottenuti dall'analisi delle performance dimensionali e geometriche del sistema EBM preso in esame. Inizialmente viene presentato il benchmark di riferimento per lo studio, successivamente come questo è stato misurato e infine i risultati ottenuti, offrendo altresì alcuni spunti di confronto con le tecniche convenzionali.

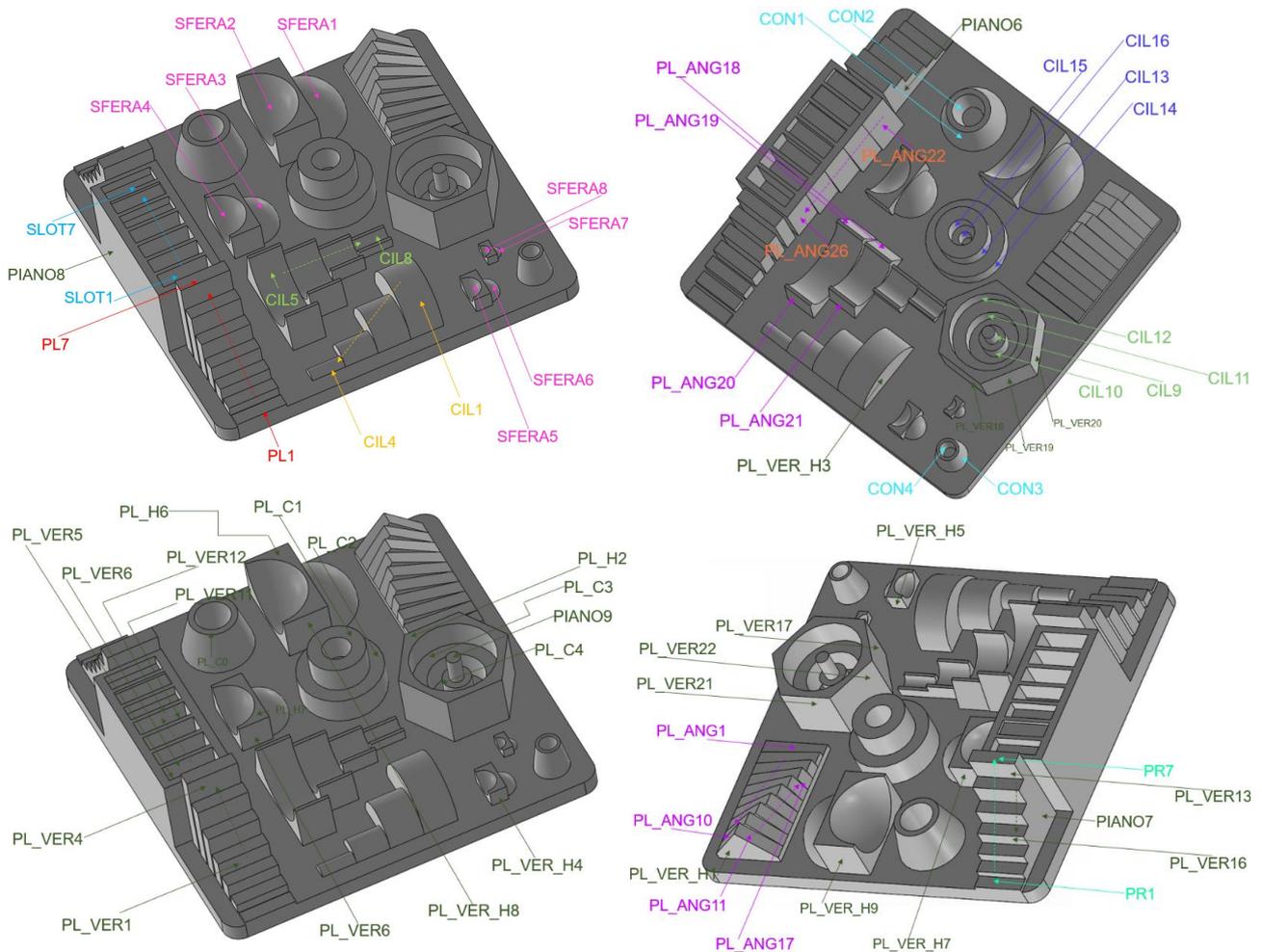
### 5.1 Descrizione benchmark utilizzato

La parte di riferimento, come visto in precedenza, è stata progettata da Minetola et al [34] per la valutazione dell'accuratezza dimensionale e geometrica dei processi additivi, ideata per essere utilizzata con macchine FDM, ma utilizzabile anche con altri sistemi di AM, sia per polimero che per metallo, per i quali non è detto sia completamente adatta. Questa presenta dimensioni di 110x110x33 mm, il che permette di inserirla all'interno del volume di lavoro della quasi totalità delle macchine di AM sul mercato, che siano a letto di polvere o meno. La base della parte risulta essere piena e di spessore 5 mm, per prevenire deformazioni durante la stampa e dopo la rimozione dal piano di lavoro, sempre facendo riferimento ad un processo di FDM. Per come è stato progettato il provino, nessuna struttura richiede supporti, sia per permetterne la stampa con macchine che non hanno la possibilità di stamparli [34], sia per non intaccare la qualità delle feature. Infatti, per quanto concerne il processo EBM e in generale quelli per metallo a letto di polvere, la presenza dei supporti in certe zone porterebbe ad una scarsa attendibilità dei risultati, in quanto verrebbero rimossi manualmente rovinando le superfici oppure lasciando dei residui. Inoltre, il benchmark è formato da semplici forme geometriche di dimensioni diverse, poiché è proprio su di esse che sono definiti gli errori e le tolleranze dimensionali e geometriche. Di seguito sono elencate le feature che compongono il campione che è possibile osservare in figura 5.1:

- Un insieme di sette blocchi rettangolari di altezza crescente (da PL1 a PL7). Questi hanno la base di dimensioni 4x15 mm e sono separati tra loro. L'altezza cresce nella sequenza 1 mm, 3 mm, 6 mm, 10 mm, 15 mm, 21 mm, 28 mm;
- Un insieme di sette incavi rettangolari di profondità decrescente (da SLOT1 a SLOT7). Questi hanno una base di dimensioni 5x15 mm e sono contenuti in un blocco rettangolare di altezza 28 mm. La profondità varia con la stessa sequenza precedente ma partendo da 21 mm e terminando a 1 mm. L'ultimo incavo è ripetuto, con profondità di 3 mm;
- Un blocco di sette gradini di altezza crescente (da PR1 a PR7). Questi hanno base rettangolare come i blocchi PL, ma sono collegati tra loro a formare una scala. L'altezza cresce da 1 mm a 28 mm nella stessa sequenza dei PL;
- Due coppie di tronco-coni coassiali (CON1, CON2 e CON3, CON4). Ogni coppia consiste in un tronco di cono esterno (convesso) e uno interno (concavo) di forma inversa. La prima coppia (CON1 CON2) presenta un cono esterno alto 20 mm, uno interno alto 10 mm e i

- seguenti diametri: esterno maggiore 20 mm, esterno minore 13,6 mm, interno maggiore 10 mm, interno minore 6,5 mm. La seconda coppia (CON CON4) presenta un cono esterno alto 9 mm, uno interno alto 6 mm e i seguenti diametri: esterno maggiore 10 mm, esterno minore 6,8 mm, interno maggiore 5 mm, interno minore 4 mm;
- Due set di cilindri coassiali ad asse verticale, sia esterni che interni (da CIL13 a CIL16 e da CIL9 a CIL12). Il primo set presenta due cilindri ad asse verticale forati al centro. Le dimensioni dei cilindri partendo dal basso sono rispettivamente 24 mm e 16 mm, mentre i fori hanno diametro 4 mm e 8 mm. Il secondo set ha la geometria inversa. Presenta due cilindri di diametro 8 mm e 4 mm posti al centro di due fori cilindrici di dimensioni 16 mm e 24 mm, il tutto racchiuso da un prisma esagonale alto 16 mm. Ogni cilindro descritto ha altezza 8 mm;
  - Due blocchi di cinque semi-cilindri ad asse orizzontale, concavi e convessi (da CIL1 a CIL4 e da CIL5 a CIL8). Il primo blocco presenta 4 cilindri convessi lunghi 10 mm, di diametro crescente con la sequenza 4mm, 8 mm, 16 mm, 24 mm. Il secondo set presenta invece 4 cilindri concavi della stessa lunghezza dei precedenti ma con diametro che decresce con la sequenza inversa;
  - Quattro blocchi formati da un quarto di sfera concava e uno convessa (SFERA1, SFERA2; SFERA3, SFERA4; SFERA5, SFERA6 e SFERA7, SFERA8). Ogni blocco è formato da un quarto di sfera concava ricavata da un parallelepipedo, sulla cui parete verticale è appoggiato il quarto di sfera convessa dello stesso diametro. I diametri delle sfere sono (in ordine di blocco): 4 mm, 8 mm, 16 mm, 24 mm;
  - Tre blocchi di piani con diversa inclinazione (da PL\_ANG1 a PL\_ANG10, da PL\_ANG18 a PL\_ANG21 e da PL\_ANG22 a PL\_ANG26). In ordine, il primo blocco è formato da 10 coppie di piani a ventaglio di angolo complementare. L'inclinazione cresce da 0° fino a 45° con incremento di 5°. Il secondo blocco è ricavato dalla parete del rettangolo con gli incavi (SLOT1-SLOT7) e serve per rilevare variazioni minori di 5°. Infatti, i piani sono 5 e variano con la sequenza 0°, 2°, 4,5°, 7°, 9°. L'ultimo blocco è necessario in quanto i piani complementari del primo blocco a ventaglio non hanno estensione abbastanza elevata da permettere una corretta misurazione;
  - Altri piani orizzontali o verticali a supporto di altre feature ma pur sempre misurabili (ad esempio PL\_VER, PL\_VER\_H, PL\_C, da PIANO6 a PIANO9 e altri). Queste sono utili a rendere più consistente la valutazione della planarità, perpendicolarità e parallelismo.

Dunque, sono presenti più di ottanta feature geometriche, che permettono la misura di più di mille dimensioni e distanze per la definizione dei gradi IT nel range da 1 mm a 120 mm. Queste sono state organizzate e posizionate in modo da permetterne l'agevole misurazione da parte della macchina di misura, con un unico posizionamento. Inoltre, come si nota dall'elenco, sono presenti elementi con la stessa forma ma di tipo concavo o convesso, così da valutare l'influenza di questo fattore sulla qualità della feature e tenerlo presente nella valutazione dell'accuratezza dimensionale e geometrica. In aggiunta, è possibile valutare anche altri aspetti con l'analisi di questo benchmark. Ad esempio, sono presenti feature con superfici curve in modo da valutare l'effetto staircase, oppure set di piani



**Figura 5.1** Benchmark per la valutazione dell'accuratezza dimensionale e geometrica progettato da Minetola et al. [34] e relativi appellativi e numerazione delle diverse feature

inclinati su cui valutare la rugosità media del componente. Ad ogni modo, si è deciso di valutare questi aspetti separatamente, utilizzando il benchmark soltanto per l'analisi dimensionale e geometrica. Per quanto riguarda la produzione con tecnica EBM, dato che il benchmark ha caratteristiche che non lo rendono particolarmente adatto ma non è possibile la riprogettazione, si è apportata una piccola modifica per renderlo più idoneo. La base piena spessa 5 mm rischia di creare un'ampia zona di accumulo termico, con la possibilità che causi deformazioni e distorsioni del componente. Per alleviare questo fenomeno, la base è stata svuotata grazie alla creazione di una tasca nella zona sottostante del provino, in modo da rendere più sottile, circa 1 mm, la base dove sono appoggiate le feature. Ovviamente, questa non può essere modificata ulteriormente per ridurre l'estensione in quanto si altererebbero le posizioni delle feature causando problemi al programma di misura, come si vedrà nel seguito.

## 5.2 Misurazione con macchina CMM

Il benchmark è stato misurato grazie ad una macchina di misura a coordinate (CMM) in dotazione al Politecnico di Torino: una DEA modello GLOBAL Image 07.07.07. Questa ha un'incertezza di misura dichiarata  $MPE_E$ , in accordo con la ISO-10360/2, di  $1,5 + L/133 \mu\text{m}$ , dove  $MPE$  è l'acronimo per "Maximum Permissible Error" e  $L$  è la lunghezza misurata. Le misure sono effettuate con un tastatore di rubino di diametro 2 mm.

Il benchmark è stato posizionato in macchina allineando il set di piani, cavità e gradini lungo la  $y$  della macchina e il lato con il set di cilindri ad asse orizzontale concavi e convessi lungo la  $x$ . Si specifica che la posizione è molto importante, in quanto il programma di misura che la macchina esegue automaticamente è stato definito considerando il pezzo in una determinata posizione. Se questo non fosse nella posizione corretta, si rischierebbe di danneggiare lo strumento di misura, che potrebbe impattare sul pezzo. Quindi, dopo il posizionamento in macchina, è necessario allineare gli assi virtuali della macchina al pezzo, tramite un processo manuale di acquisizione di punti nelle direzioni principali del benchmark. Dopodiché, si lancia il programma di misura e la macchina acquisisce tutti i punti necessari alla successiva analisi per l'estrapolazione dei gradi IT e delle tolleranze geometriche. Per ogni feature geometrica vengono presi almeno dieci punti (per le forme più piccole) che aumentano per forme più grandi, portando ad un numero totale di 987 valori. Per questo motivo il processo di misura dura circa un'ora. Sono state condotte 3 acquisizioni complete sul benchmark e per ognuna delle quali si è eseguito l'allineamento manuale degli assi macchina. In questo modo è possibile verificare che non vi siano evidenti errori di misura, come verrà chiarito in seguito.

## 5.3 Analisi dei risultati

Per il calcolo del grado IT di ogni feature, è necessario calcolare il fattore  $n$ , grazie alla formula:

$$n_j = \frac{1000 |D_{jn} - D_{jm}|}{i}$$

dove  $D_{jn}$  rappresenta la dimensione nominale, mentre  $D_{jm}$  risulta essere la dimensione misurata. L'unità di tolleranza  $i$  è calcolata in base al range dimensionale a cui appartiene la feature, utilizzando il diametro medio geometrico dell'intervallo considerato, ottenendo i risultati di tabella 5.1.

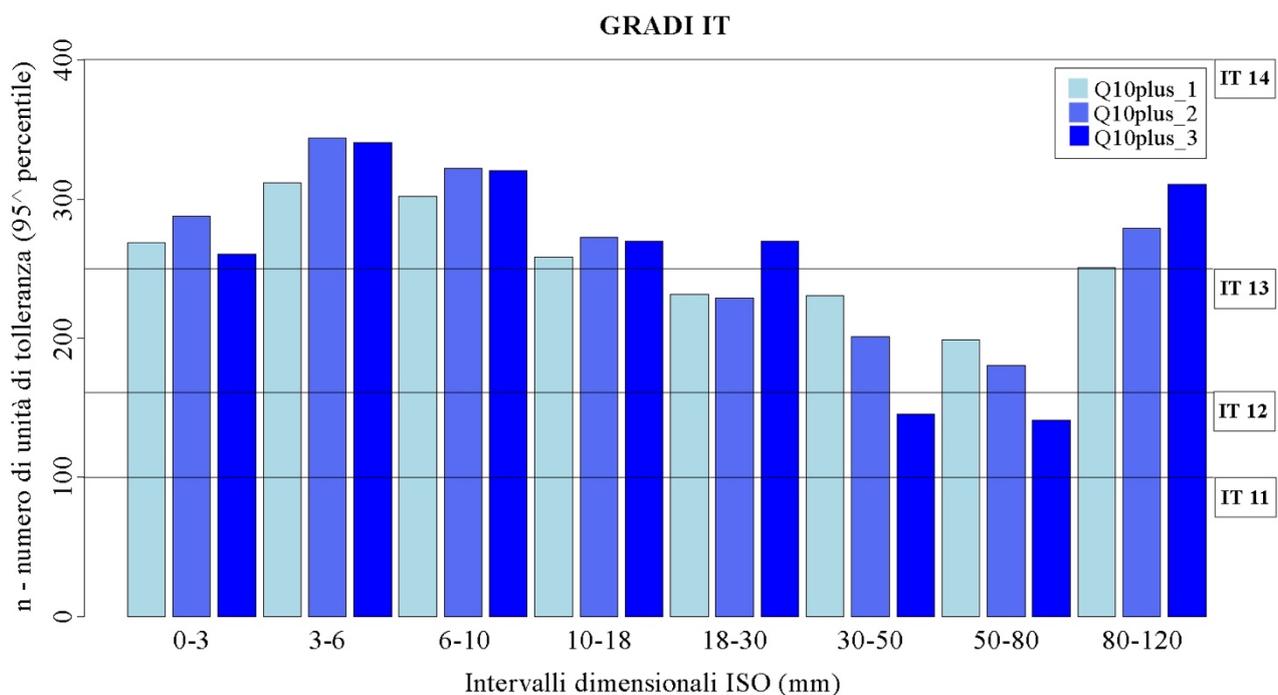
**Tabella 5.1** Range dimensionali ISO e relative unità di tolleranza

<b>Intervallo dimensionale (mm)</b>	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 18	18 - 30	30 - 50	50- 80	80 - 120
<b>Unità di tolleranza <math>i</math></b>	0,542	0,733	0,898	1,083	1,307	1,561	1,856	2,173

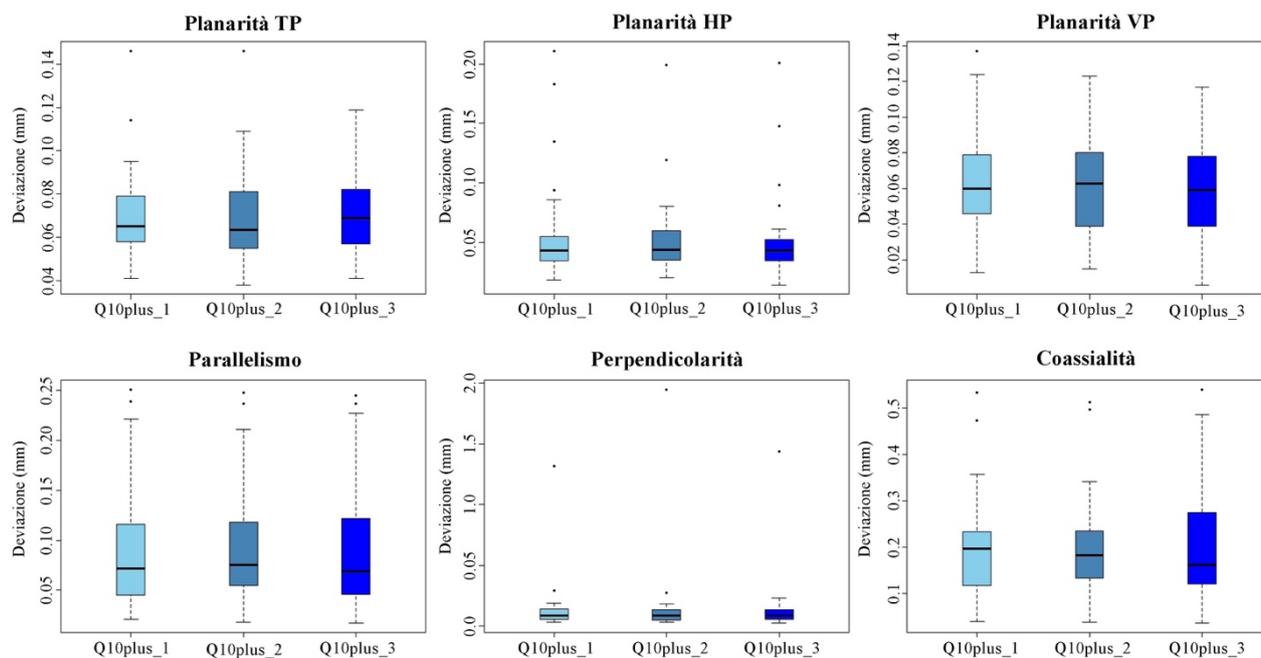
Invece, il calcolo delle tolleranze geometriche è condotto valutando la deviazione della forma in esame rispetto alla forma ideale oppure rispetto ad un elemento di riferimento. Non verranno calcolate tutte le tolleranze geometriche, ma soltanto quelle reputate più significative e quelle valutabili con lo strumento di misura utilizzato. Per l'elaborazione dei dati si è utilizzato un modello di calcolo su "Excel", appositamente creato dal Prof. Minetola del Politecnico di Torino per l'analisi dei dati di misura acquisiti da questo specifico benchmark. Il file Excel contiene una macro che, una volta importate le misurazioni della macchina CMM, applica le formule precedentemente presentate e restituisce automaticamente le informazioni sui gradi IT e sui valori GD&T. Dopodiché, grazie al software "R", sono stati diagrammati i risultati, per permettere l'analisi dei dati dal punto di vista grafico.

In un primo momento, l'analisi dei risultati punta a confrontare i gradi IT e le deviazioni di forma ottenuti dalle 3 diverse misurazioni (si specifica che queste sono state condotte sullo stesso benchmark, l'unica replica ad essere stata stampata), per evidenziare eventuali differenze tra le acquisizioni e selezionare quella reputata più descrittiva, da utilizzare successivamente per la presentazione dei risultati. In figura 5.2 e 5.3 sono riportati i grafici che mettono a confronto i gradi IT e le tolleranze geometriche GD&T delle diverse acquisizioni, denominate rispettivamente "Q10plus\_1", "Q10plus\_2" e "Q10plus\_3", in base all'ordine con cui sono state condotte.

Dal primo grafico è possibile notare come le tre misurazioni restituiscano risultati abbastanza simili per quanto riguarda i gradi IT. Non vi è una acquisizione che risulti avere un grado tendente ad essere sempre maggiore o sempre minore delle altre, come non vi è nessuna misurazione tra i vari range dimensionali che presenti un grado IT nettamente differente dalle altre. Per questo motivo le tre acquisizioni si possono considerare equivalenti. Per quanto riguarda le tolleranze di forma GD&T, è



**Figura 5.2** Confronto tra i gradi IT (95<sup>o</sup> percentile) ottenuti dalle tre misurazioni per ognuno dei range dimensionali ISO



**Figura 5.3** Valori delle tolleranze GD&T ottenute dalle tre diverse misurazioni del provino

possibile trovare, nel secondo grafico, i box plot dei risultati delle tre acquisizioni, con rappresentati gli outlier mediante pallini neri. Anche in questo caso non esistono grosse differenze tra i 3 set di dati, che risultano ben distribuiti. Probabilmente, l'unica differenza più marcata è possibile trovarla nel grafico della perpendicolarità, in cui la seconda misurazione presenta un outlier con valore più elevato, pur considerando che anche gli altri set presentano outlier con valori posizionati molto in alto. Quindi, dovendo scegliere un'unica acquisizione, la Q10plus\_2 è stata scartata per il motivo appena descritto mentre, tra le due restanti, è stata selezionata la Q10plus\_3, considerata quella con valori meglio distribuiti e outlier meno dispersi e in minor numero.

Si passa, dunque, alla presentazione dei risultati e la loro elaborazione, specificando nuovamente che questi derivano dalla terza acquisizione, la Q10plus\_3, reputata la più descrittiva. In tabella 5.2 è indicato il numero di misurazioni utilizzate per ogni intervallo dimensionale, con cui sono stati calcolati i parametri necessari ad estrapolare i gradi IT. Inoltre, è possibile trovare il numero totale dei dati acquisiti con la macchina di misura.

**Tabella 5.2** Numero di misurazioni acquisite per ogni range dimensionale ISO

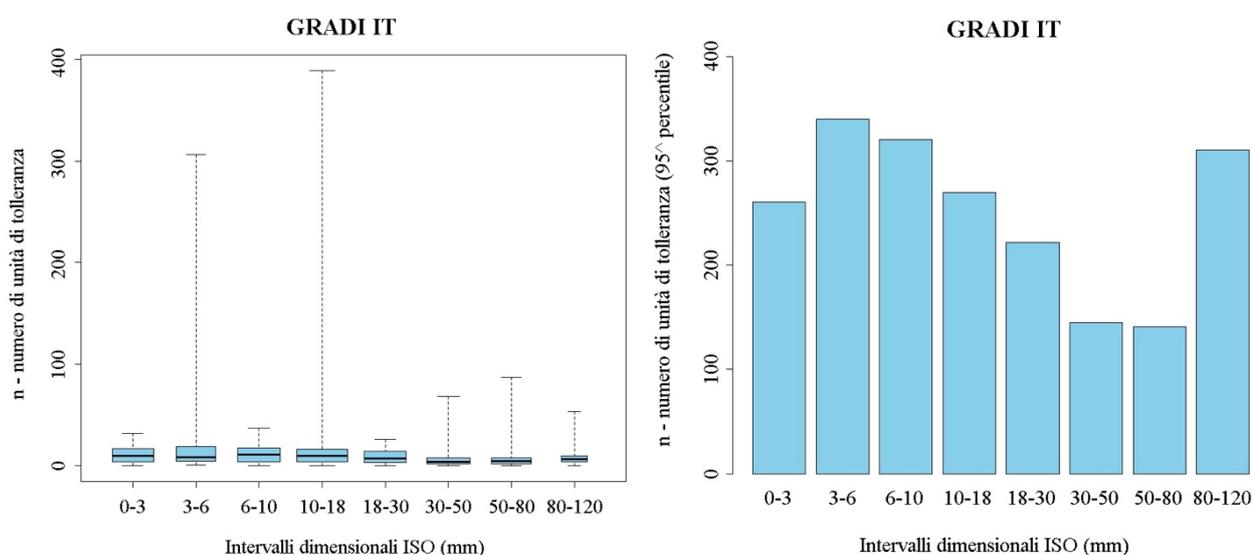
Intervallo dimensionale (mm)	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 18	18 - 30	30 - 50	50- 80	80 - 120	totale
Numero di misure	126	110	134	185	131	138	115	48	<b>987</b>

Invece, in tabella 5.3 sono riportati i risultati ottenuti da questa analisi, in cui figurano anche la media e la deviazione standard dei valori di  $n$ .

**Tabella 5.3** Risultati dell'analisi per la valutazione dell'accuratezza dimensionale in base ai diversi range

Intervallo dimensionale (mm)	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 18	18 - 30	30 - 50	50- 80	80 - 120
<b>Media</b>	107,9	164,3	122	145,9	90,1	65,9	64,5	90,0
<b>Dev. St.</b>	80,5	374,9	100,8	319,8	69	113,4	116,2	110,7
<b>95<sup>^</sup> percentile</b>	260,5	340,6	320,7	269,7	221,8	145,2	141,1	310,6
<b>Grado IT</b>	13	13	13	13	12	11	11	13

In figura 5.4 vengono riportati i risultati per quanto riguarda l'accuratezza dimensionale della macchina EBM in termini di gradi IT suddivisi in base al range dimensionale. Sulle ordinate si trova il numero di unità di tolleranza  $n$ , definite precedentemente, mentre sulle ascisse si trovano i range dimensionali. Il grafico di sinistra mostra il boxplot, senza rappresentare gli outlier. Quello di destra, più significativo, mostra il 95<sup>^</sup> percentile del valore  $n$  per ogni range dimensionale, considerato il valore di riferimento per valutare l'accuratezza dimensionale del sistema. Dal diagramma di sinistra non è possibile estrarre informazioni riguardo ai gradi IT risultanti, bensì questo dà indicazioni sulla distribuzione dei dati. Infatti, si nota come vi siano dei valori massimi molto elevati per gli intervalli 3-6 e 10-18, forse a causa di errori di misura soprattutto per feature come sfere e cilindri, le quali presentano i valori maggiori. Inoltre, anche se non rappresentati, il range 18-30 è quello che presenta il maggior numero di outlier, di valori elevatissimi, che sfiorano 4000. Per questo motivo viene



**Figura 5.4** Risultati dell'analisi dimensionale in termini di numero di unità di tolleranza. A sinistra sotto forma di box plot e a destra con un istogramma che rappresenta il 95<sup>^</sup> percentile.

avvalorata l'ipotesi di errori di misurazione, soprattutto in questo range. Per i motivi citati le distribuzioni in quei range risultano essere fortemente non simmetriche. Invece, per quanto riguarda gli altri intervalli dimensionali, le distribuzioni risultano essere spostate in alto (normale quando ho un limite fisico inferiore) ma comunque abbastanza simmetriche, ad indicare la bontà delle misurazioni. Invece, dal grafico di destra è possibile osservare che il grado IT, in funzione dei diversi intervalli dimensionali, varia tra IT11 e IT13. Questo risultato è importante, in quanto rende possibile il confronto, a livello di accuratezza dimensionale, del processo EBM dell'Arcam Q10 plus con le tecniche tradizionali e anche con altri processi di AM. In tabella 5.4 è riportato un confronto tra i risultati ottenuti e i gradi IT di alcuni processi tradizionali e di additive manufacturing.

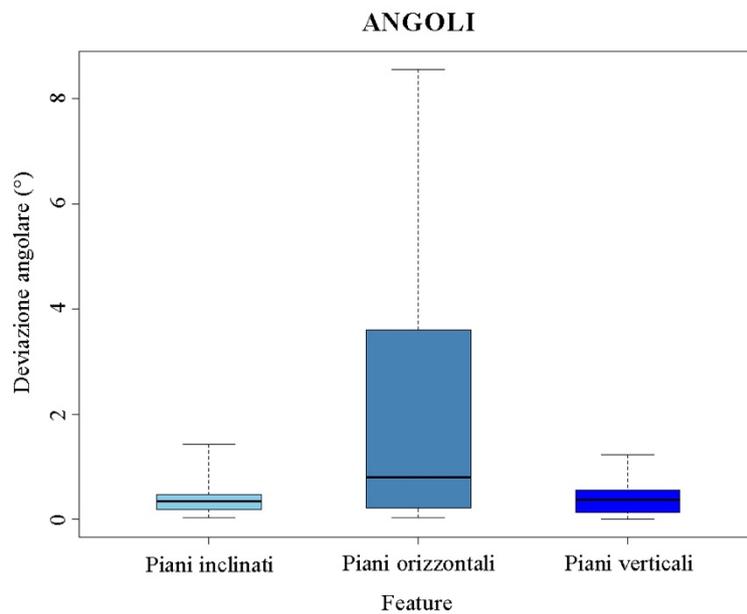
**Tabella 5.4** Confronto tra le performance dimensionali dei principali processi tradizionali e di AM

<b>GRADI IT DEI PRINCIPALI PROCESSI</b>								
<b>Range dimensionale (mm)</b>	<b>1-3</b>	<b>3-6</b>	<b>6-10</b>	<b>10-18</b>	<b>18-30</b>	<b>30-50</b>	<b>50-80</b>	<b>80-120</b>
<b>EBM (Arcam Q10plus)</b>	IT13	IT13	IT13	IT13	IT12	IT11	IT11	IT13
<b>Sand Cast, machine moulding</b>	IT18	IT17	IT17	IT17	IT16	IT16	IT16	IT16
<b>Investment casting</b>	IT15	IT14	IT14	IT14	IT13	IT13	IT13	IT13
<b>L-PBF (EOS M270)</b>	IT12	IT12	IT11	IT13	IT13	IT13	IT13	IT13
<b>EBM (Arcam A2X)</b>	IT15	IT14	IT13	IT13	IT13	IT13	IT14	IT14

Il processo EBM della Arcam Q10 plus qui esaminato, risulta essere migliore, a livello dimensionale, rispetto ai processi tradizionali di colata in sabbia e di microfusione. Inoltre, il confronto con lo stesso processo di EBM realizzato da una macchina di modello precedente, evidenzia i progressi fatti dalla nuova generazione di macchine Arcam in termini di accuratezza dimensionale, la quale risulta migliore in tutti i range dimensionali, con differenze di anche tre gradi IT (per il range 50-80). In aggiunta, si mette in rilievo il confronto con la tecnica di SLM realizzata dalla macchina EOS M270. In particolare, si evidenzia la migliore accuratezza della tecnologia a laser nei range dimensionali inferiori, con differenze in media di un grado IT. Questo forse a causa del minore spessore dei layer e del fatto che l'L-PBF risulta essere un processo freddo, a differenza dell'EBM, il che comporta una minore adesione delle polveri sulle superfici. Invece, nei range dimensionali maggiori, il processo EBM della Q10 plus risulta essere migliore, con differenze in media di due gradi IT. Dunque, i due processi risultano confrontabili a livello di accuratezza dimensionale. Ad ogni modo, i gradi IT risultanti non permettono l'accoppiamento diretto dei componenti prodotti con tecnica EBM e per questo motivo alcune feature dovranno essere lavorate con processi tradizionali per asportazione di

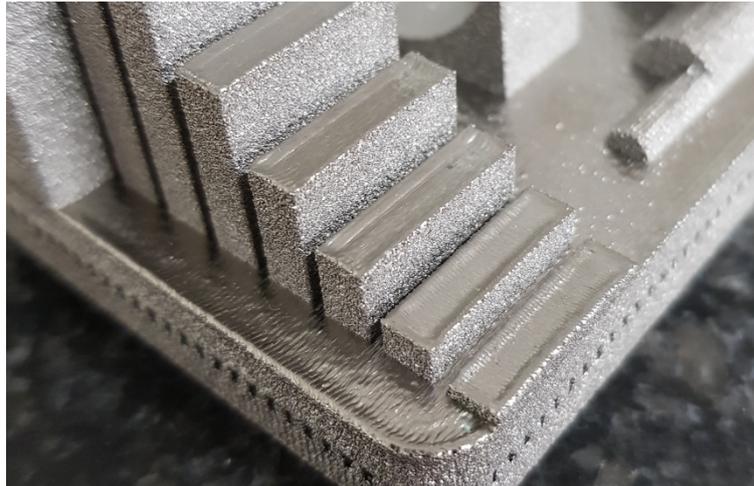
truciolo [16]. Dunque, come già noto in letteratura e qui ribadito, i processi additivi per metallo rappresentano un'alternativa ai processi di colata in fonderia e non ai processi tradizionali sottrattivi, i quali risultano complementari all'AM.

Passando all'accuratezza di forma, sono state condotte analisi diverse. In primo luogo, è stata studiata la deviazione angolare dei diversi piani che si possono trovare nel benchmark. Questi sono stati raggruppati in funzione del tipo, ovvero inclinati (“tilted planes”), orizzontali (“horizontal planes”) o verticali (“vertical planes”), com'è possibile notare in figura 5.5, in cui sono riportati i risultati ottenuti.



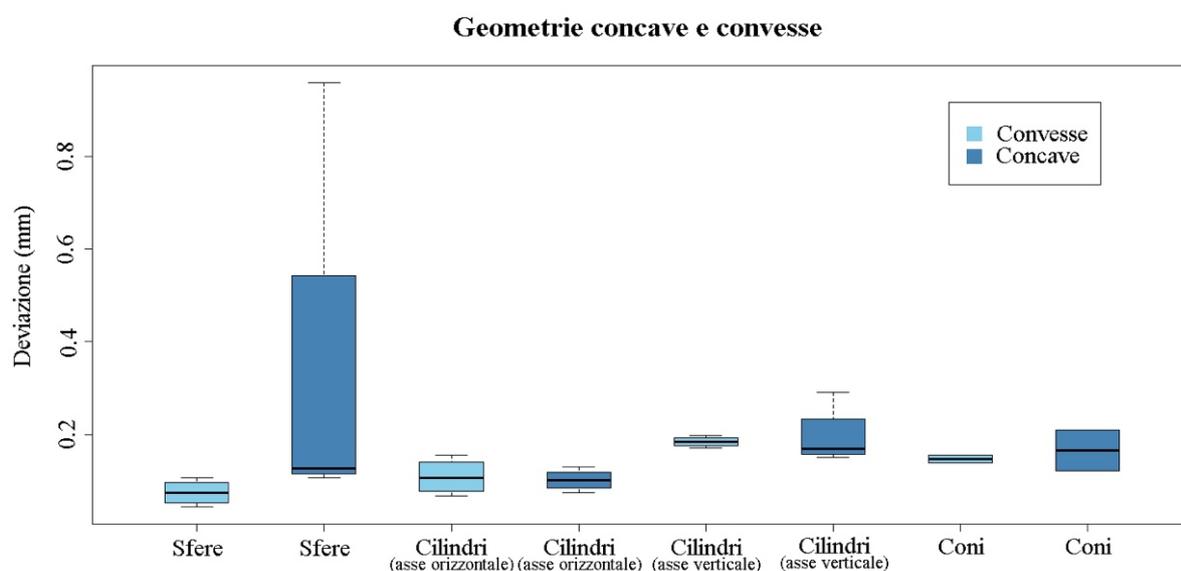
**Figura 5.5** Deviazione angolare dei diversi piani considerati dall'analisi

La maggiore deviazione angolare, pari a  $8,6^\circ$ , è stata registrata per i piani orizzontali. Questo valore potrebbe essere un errore di misurazione oppure, essendo alcuni piani orizzontali di area molto ristretta e spesso posizionati in cavità, potrebbe essere causato da polvere residua rimasta sulla superficie piana. Inoltre, analizzando i dati di misura, la deviazione massima deriva dal piano PR1 (il primo dei gradini). Questo, come gli altri gradini e i blocchi rettangolari (PR e PL), presenta un difetto, ovvero un sollevamento di tutto il bordo del piano, come se il fascio vi fosse passato una volta in più creando uno spessore, mostrato nel dettaglio in figura 5.6. Ciò è dovuto probabilmente a fenomeni termici causati dal metodo di scansione, che prevede prima il passaggio sul perimetro della sezione e poi il riempimento. Ad ogni modo, il sollevamento del bordo interferisce sulle misurazioni della macchina CMM e quindi sulla forma del piano, facendo crescere la deviazione angolare. Per quanto riguarda i piani verticali e inclinati, la deviazione massima risulta essere rispettivamente di  $1,2^\circ$  e  $1,4^\circ$ . Invece, considerando la mediana dei box si nota come la deviazione sia, per tutti e tre i tipi di piano, al di sotto del grado, risultato più che accettabile.

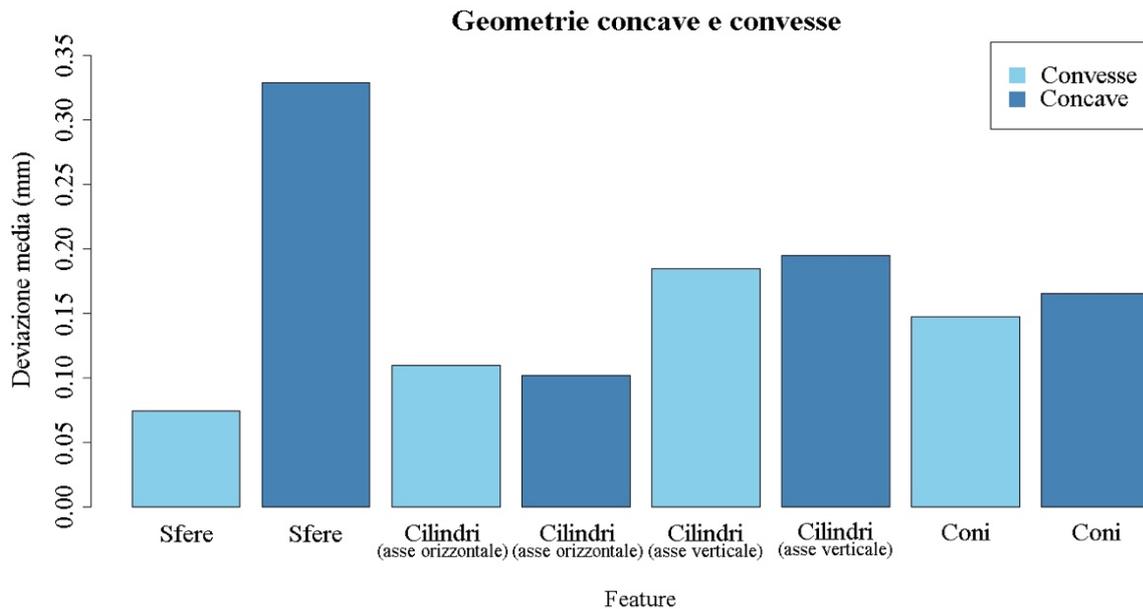


**Figura 5.6** Dettaglio del benchmark in cui si nota il sollevamento del bordo dei piani orizzontali

Dopodiché, si procede con il confronto tra le deviazioni di feature concave e convesse, mostrato con due grafici in figura 5.7 e 5.8. Il primo mette in evidenza le distribuzioni dei dati con un boxplot, mentre il secondo riporta i valori medi per ogni classe di dati, ovvero sfere, cilindri ad asse orizzontale, cilindri ad asse verticale e coni. Come si osserva dal primo grafico, la distribuzione dei dati risulta essere buona per tutti i set di valori, ad esclusione delle sfere concave, che presentano una deviazione massima di 0,96 mm. Dal secondo grafico si osserva che, se non si considerano le sfere, non risultano esserci grandi differenze tra feature concave e convesse, pari a qualche centesimo di mm al massimo. Mentre per quanto riguarda le sfere, la differenza è sostanziale, pari a 0,25 mm. Questo risultato è sicuramente influenzato dal fatto che il quarto di sfera concavo più piccolo (SFERA8) ha un diametro di 4mm, difficile da misurare per la macchina CMM con un tastatore di 2 mm, il quale restituisce risultati non troppo affidabili. Infatti, indagando sui dati di misura risulta che

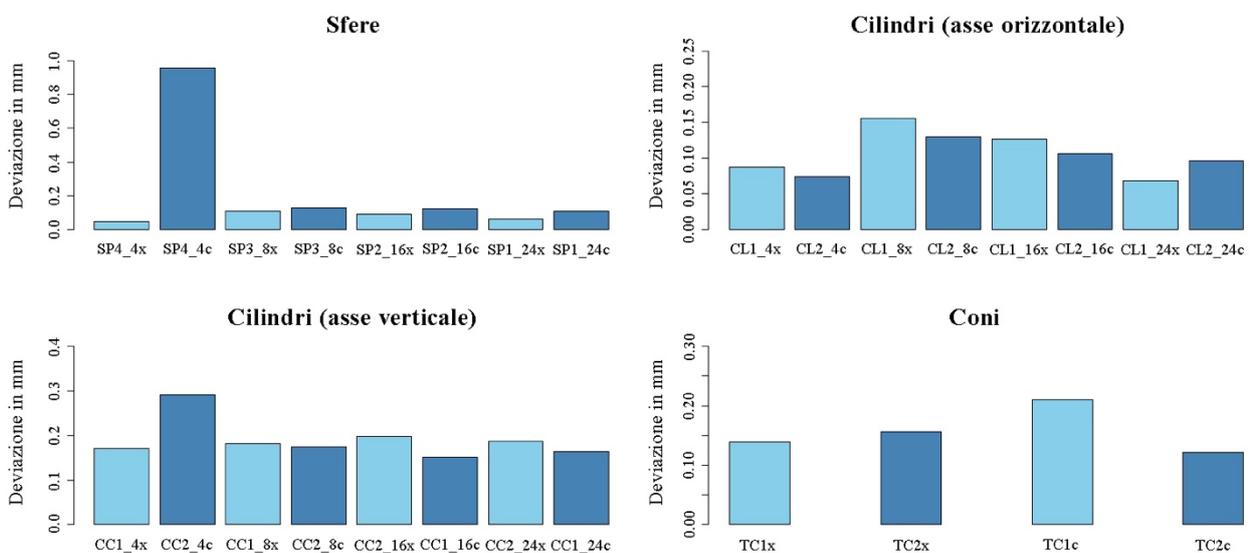


**Figura 5.7** Box plot dei risultati relativi alle deviazioni di feature concave e convesse, in particolare sfere, cilindri e coni.



**Figura 5.8** Risultati relativi alle deviazioni medie di feature concave e convesse, in particolare sfere cilindri e coni.

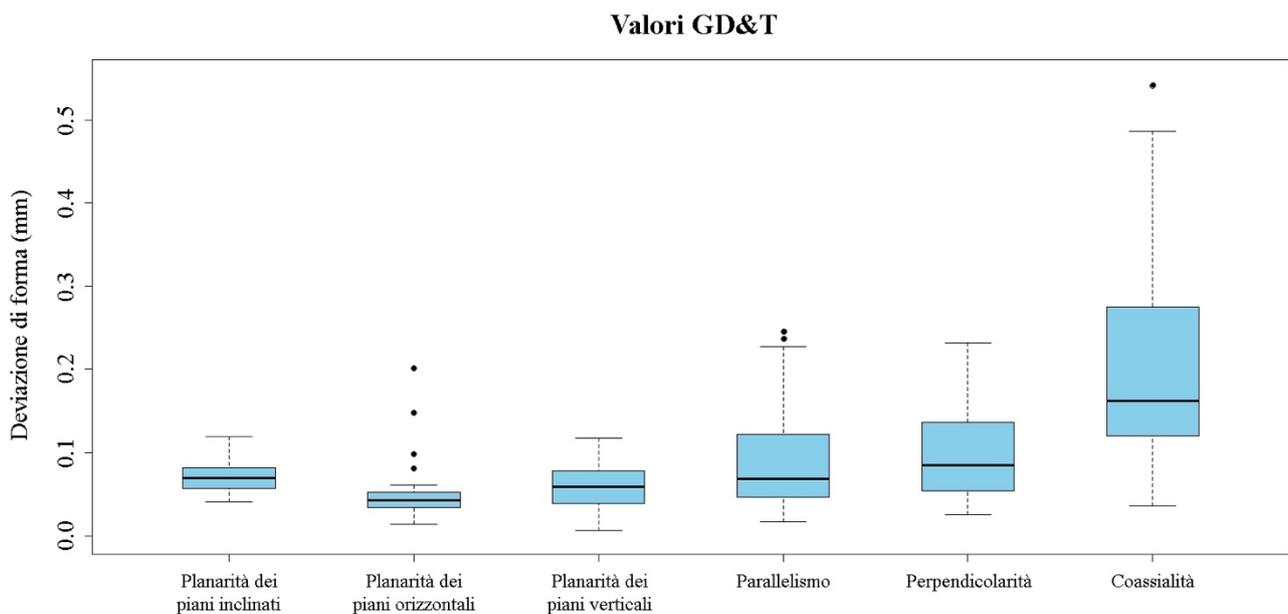
la macchina restituisce un diametro della SFERA8 pari a 6,24 mm contro un nominale di 4 mm, avvalorando l'ipotesi di errore di misurazione. Per questo motivo e basandosi sui dati delle altre feature, si può affermare che non vi sia grande differenza tra forme concave e convesse, se non una piccola tendenza di quelle concave ad essere peggiori, forse a causa non tanto della quantità di calore richiesta per la costruzione (le feature convesse sono più massive), ma dell'accumulo di esso nelle zone interne delle feature. Infatti, essendo forme concave, la zona centrale in cui rimane la polvere è scaldata dalle zone fuse circostanti, il che potrebbe causare un maggior attaccamento delle polveri alle superfici, soprattutto per feature di dimensioni ridotte. A supporto di questa analisi è fornito in figura 5.9 un grafico che confronta le deviazioni di ogni feature geometrica al variare della "key



**Figura 5.9** Deviazione di ognuna delle feature concave e convesse analizzate ordinate per tipo di feature e in funzione della dimensione

dimension” ovvero la dimensione caratteristica. Il confronto è importante per avere anche un’indicazione sulla differenza tra forma convessa e concava per ogni singola feature analizzata. Si nota come risulta verificato quanto detto riguardo la SFERA8 (nel grafico SP4\_4c), risultato che sposta di molto la media delle feature concave. Invece, il CIL16 (in figura CC2\_4x), essendo il più interno dei cilindri verticali, potrebbe presentare della polvere residua sul fondo, non rimossa con la pallinatura del pezzo oppure, più probabilmente, essendo una zona di accumulo termico, molta polvere è rimasta intrappolata sulle pareti, aumentando la rugosità e quindi la deviazione delle misure. Inoltre, il grafico sottolinea come in generale non ci sia grossa differenza tra feature concave e convesse prese singolarmente e non si evidenzia alcuna tendenza dei dati all’aumentare della dimensione caratteristica.

Si passa, dunque, all’analisi delle tolleranze GD&T. I risultati sono riportati in figura 5.10 grazie ad un boxplot, in cui si notano anche gli outlier per ogni set di dati. Per quanto riguarda la planarità, sono stati divisi i risultati riguardanti piani inclinati, orizzontali e verticali. Come si osserva dal grafico, la maggiore variazione di forma riguarda la coassialità, con un outlier di valore pari a 0,54 mm e un valore massimo del box di circa 0,5 mm. I migliori risultati si ottengono dalla planarità dei piani, in particolare quelli orizzontali, con valore massimo di 0,059 mm, senza considerare i quattro outlier, di cui il maggiore è comunque pari a 0,2 mm. Invece, i piani inclinati e quelli verticali presentano massimi di circa 0,12 mm, maggiori rispetto a quelli dei piani orizzontali, probabilmente a causa dello staircase effect, ovvero il fatto di essere stati costruiti da più strati mentre quelli orizzontali stampati su uno strato solo. Per quanto riguarda parallelismo e perpendicolarità, i valori massimi si assestano su valori di poco sotto a 0,25 mm.



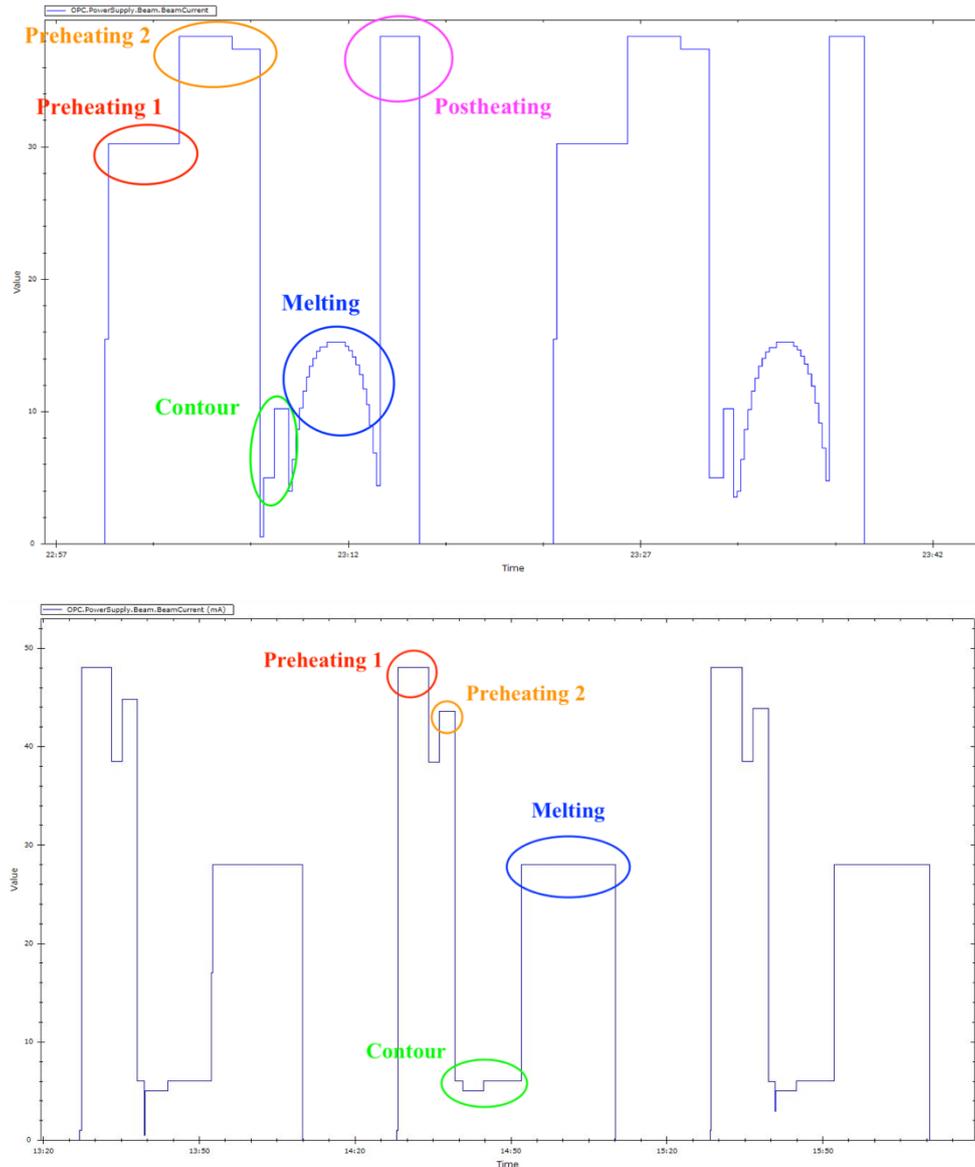
**Figura 5.10** Box plot dei risultati per le tolleranze geometriche in termini di valori GD&T

## 6. Ottimizzazione del processo EBM mediante bilanciamento del calore fornito ad ogni layer

Nel capitolo seguente viene presentato un modello per rendere costanti le aree fuse di ogni layer e, di conseguenza, il calore fornito ad ogni strato. Dunque, bilanciando il calore in fase di progettazione del job è possibile ottimizzare il processo di Electron Beam Melting in termini di tempo e ottenere componenti di maggiore qualità.

### 6.1 Distribuzione delle aree fuse e fasi del processo

I processi a letto di polvere come l'Electron Beam Melting prevedono che vi sia una vera e propria scomposizione in strati delle parti prima che queste vengano realizzate. È il cosiddetto "slicing", il quale consiste nel dividere le rappresentazioni 3D dei componenti in layer sottilissimi, con spessore che è funzione dello spessore dello strato di polvere steso dal rake della macchina. Ogni strato avrà, dunque, una certa area in cui il materiale dovrà essere fuso dal fascio elettronico, che dipende dalla geometria delle parti inserite nel volume di lavoro della macchina e dalla loro combinazione. Per questo motivo è impossibile, considerando componenti di forma reale, che l'area fusa di ogni strato sia costante al variare dell'altezza di costruzione. Essendo la tecnologia EBM un processo caldo, in cui inizialmente viene riscaldata la piastra e successivamente tenuto caldo il letto di polvere, il calore fornito ad ogni strato risulta essere un fattore importantissimo nei fenomeni termici che si sviluppano durante il processo. Con un'area fusa non costante tra un layer e l'altro, è chiaro che viene somministrata una quantità diversa di calore tra gli strati. Per questo motivo, il sofisticato sistema di controllo di processo della macchina attua delle misure correttive per alleviare la differenza di calore fornito ai diversi strati. Precisamente, dopo i preheating della polvere e la fase di melting delle parti piene, viene aggiunta una fase di bilanciamento di calore, come spiegato in precedenza nel primo capitolo. Questa può essere un ulteriore riscaldamento dello strato, oppure un raffreddamento dello stesso, in base alla quantità di calore richiesta. Il riscaldamento viene effettuato con un passaggio del fascio defocalizzato con parametri uguali al preheating two, mentre il raffreddamento o "cooling" viene realizzato lasciando riposare per un certo numero di secondi il layer appena stampato, prima che il ciclo cominci da capo. Dall'andamento della beam current (corrente del fascio elettronico) è possibile individuare, durante il ciclo di ogni layer, le varie fasi appena descritte, tra cui quella del postheating. Però, le fasi del processo di stampa di ogni layer, soprattutto quelle di postheating e cooling, dipendono dal sistema EBM utilizzato. Ad esempio, il sistema di controllo della Arcam A2X inserisce frequentemente la fase di postheating, in quanto probabilmente ragiona individuando prima l'area fusa maggiore e poi compensando tutte le altre con il riscaldamento finale. Invece, la Arcam Q10 plus opera soprattutto sul cooling degli strati, inserendo con molta meno frequenza la fase di postheating rispetto all'A2X. In figura 6.1 vengono riportati, a titolo di esempio, i grafici dell'andamento della beam current durante il ciclo di un layer per una Arcam A2X e una Arcam Q10 plus, in cui è possibile individuare le diverse fasi del processo. I grafici vengono estratti dal software LogStudio di Arcam, che permette di visualizzare i Log File del processo di stampa.



**Figura 6.1** Grafici della Beam Current in funzione del tempo in cui sono evidenziate le fasi del ciclo di un layer. In alto per una Arcam A2X, in basso per una Q10 plus.

Dal grafico della A2X è possibile osservare la fase di postheating, caratterizzata da parametri uguali al preheating 2, mentre non è possibile notarla nel grafico della Q10 plus. Comunque, la differenza più rilevante tra i due grafici risulta essere la corrente di Melting, che nel caso dell'A2X è variabile mentre per la Q10 plus è costante. Invece, le altre fasi avvengono a corrente costante per entrambe le macchine, ma con valori della corrente un poco diversi. Il tempo di cooling, non visualizzabile direttamente da questi grafici, è possibile ricavarlo per differenza, confrontando i tempi a corrente nulla tra un ciclo e l'altro. Infatti, il tempo a corrente nulla corrisponde alla fase di passaggio del rake, che è costante tra uno strato e l'altro, più il tempo di cooling, gestito dal sistema di controllo.

Ad ogni modo, anche se queste misure correttive applicate dalla macchina bilanciano il calore tra gli strati, non è detto che riescano a evitare problematiche che possono sorgere a causa degli squilibri termici tra i layer. Un esempio si trova nel lavoro svolto da Galati et al. [25], in cui viene

segnalata una rugosità maggiore in alcune zone, attribuita alla differenza di area fusa e alla presenza della fase di postheating. Inoltre, variazioni brusche di area fusa tra un layer e l'altro, con conseguente distribuzione disomogenea del calore, potrebbero causare ritiri differenti del materiale e dilatazioni termiche diverse, causando deformazioni e distorsione delle parti. Un modo per attenuare questi fenomeni, non risolvibili completamente all'interno del processo di stampa, potrebbe essere quello di bilanciare le aree fuse in fase di progettazione del job da realizzare. Questo viene fatto inserendo delle geometrie costruite appositamente per bilanciare le aree fuse al variare dell'altezza di costruzione. Tuttavia, la complessità di tali strutture è elevata, data l'area variabile con l'altezza, e queste risultano essere diverse ogniqualvolta viene preparato un job da stampare. Dunque, si procede con lo studio di un modello per la generazione delle strutture descritte.

## 6.2 Modello per la generazione di strutture di bilanciamento del calore

L'obiettivo di questo studio è creare una o più strutture che, posizionate nel job insieme alle parti da produrre, rendano l'area fusa di ogni layer costante al variare dell'altezza di costruzione. In pratica occorre progettare un modello di calcolo che analizzi l'area fusa di ogni layer e trovi quella massima, così da calcolare successivamente l'area da aggiungere ad ogni strato per rendere quella fusa costante al variare dell'altezza di costruzione. Dopodiché, occorre generare un solido che abbia area variabile con la sua altezza e che questa sia pari all'area richiesta calcolata in precedenza. Dunque, aggiungendo queste strutture è possibile rendere uniforme l'apporto di calore sui diversi strati nel corso del processo di stampa, rendendo il processo più efficiente e termicamente più stabile, con la possibile eliminazione delle fasi di post-heating e post-cooling tipiche del ciclo di ogni layer. Per fare quanto detto si è utilizzato il software Matlab, in quanto questo permette di eseguire i calcoli sulle aree acquisendo i dati provenienti dal software Magics riguardo all'estensione delle sezioni fuse. Infatti, dal software Magics è possibile, con il comando "Controlla distribuzione delle slice" della sezione "Analizza e genera report", ottenere un grafico in cui è riportato l'andamento dell'area fusa in funzione dell'altezza di costruzione. Il grafico in questione può essere esportato sotto forma di foglio di calcolo in Excel, in cui sono presenti due colonne: la prima riporta l'altezza di costruzione layer per layer, ovvero con variazione di 0,05 mm, mentre la seconda contiene l'area fusa totale del layer relativo all'altezza in esame. Quindi, con il software Matlab, dopo l'elaborazione dei dati, è possibile generare il solido, obiettivo dello studio, in formato STL. Si è deciso di utilizzare un cilindro, in quanto risulta essere una forma semplice, facilmente posizionabile all'interno di un job con l'area variabile rispetto ad un solo parametro, ossia il raggio. Inoltre, è stato scelto soprattutto perché in Matlab esiste una funzione che permette di generare un cilindro con raggio variabile in base ad una certa equazione definita dall'utente. Proprio su questo aspetto si basa il codice realizzato. Infatti, l'idea è quella di creare una funzione per l'andamento dei raggi che renda l'area del cilindro pari a quella necessaria a bilanciare l'area fusa, quest'ultima calcolata dai valori esportati da Magics. Con questa strategia è stato realizzato il codice, che può essere suddiviso in 5 piccoli blocchi, ognuno dei quali svolge una certa funzione. Questi sono:

1. Lettura e elaborazione dei dati da Excel: si occupa di leggere i dati provenienti dal software Magics riguardo la distribuzione delle aree fuse immagazzinati nel file Excel e di eseguire i calcoli per individuare l'area necessaria al bilanciamento strato per strato;
2. Controllo delle dimensioni del solido: questo blocco è necessario per controllare la dimensione delle strutture di bilanciamento, in modo da conoscere la massima dimensione che queste possono raggiungere sul piano xy;
3. Creazione della funzione per l'andamento delle aree in funzione dell'altezza: viene creata la funzione che lega l'area del solido alla sua altezza in base ai risultati dei calcoli fatti nel primo blocco;
4. Creazione solido con area variabile: è il blocco che crea un insieme di superfici chiuse a formare il solido con area variabile. Viene ovviamente utilizzata la funzione elaborata nel blocco precedente;
5. Generazione file STL: questo blocco utilizza una funzione per trasformare in un solido in formato STL l'insieme di superfici creato al punto precedente, in modo che questo possa essere inserito direttamente nella messa in macchina che lo richiede. La funzione per generare l'STL non è stata creata appositamente, ma risulta essere un codice già implementato a tale scopo.

Dunque, si passa alla descrizione, blocco per blocco, del codice Matlab realizzato per l'elaborazione dei dati e la generazione delle strutture di bilanciamento.

Il primo blocco è riportato di seguito:

```
Altezze_1=xlsread('Foglio1.xlsx','A2:A3603');
Aree=xlsread('Foglio1.xlsx','B2:B3603');

if Altezze_1(end)== 180.025
    Altezze_1(end)=180;
    Aree(end)=Aree(end-1)+0.001;
end

A_max=max(Aree);
A_max=A_max+0.785;
A_cilindro = A_max-Aree;
r = sqrt(A_cilindro./(pi()));
```

Le prime due righe consentono di leggere il file Excel proveniente da Magics e immagazzinare i dati delle due colonne (altezze e aree fuse) in due vettori. Dopodiché, viene posto un `if` soltanto perché i dati relativi all'altezza esportati da Magics non partono da 0, ma da 0,025 mm incrementando poi di step di 0,05 mm. Ciò porta ad avere un'altezza massima di 180,025 mm, a cui è ovviamente associata un'area fusa pari a 0 mm<sup>2</sup>, essendo tale altezza fuori dal volume di lavoro. Con l'`if` è possibile bypassare tale problematica. In seguito, sono presenti 4 righe di codice che per prima cosa trovano l'area fusa massima, dopo calcolano per differenza le aree di bilanciamento richieste per rendere le aree fuse pari a quella massima e, infine, calcolano i raggi del cilindro per ottenere quell'area. Inoltre, si è maggiorata l'area massima di 0,785 mm<sup>2</sup> in modo che non ottenesse mai un

solido con un'area nulla, bensì che il raggio minimo fosse almeno pari a 0,1 mm. Sia i raggi che le aree sono dei vettori di lunghezza pari al numero di strati che la macchina andrà a fondere.

Il secondo blocco è il seguente:

```
n_solidi=1;
flag=100;
for R=1:flag
if max(r)>30
    n_solidi=n_solidi+1;
    r = sqrt(A_cilindro./(n_solidi*pi()));
else R=flag;
end
end
```

Queste stringhe di codice servono soltanto a limitare le dimensioni del solido di bilanciamento e calcolare quante repliche dovranno essere inserite nel job. Questo serve sia per avere un'idea delle dimensioni del solido in modo da studiarne il collocamento, sia per motivi di controllo della lunghezza delle linee di fusione tracciate dal fascio da parte del sistema di controllo della macchina. Nella quarta riga di codice si imposta il raggio massimo che non dev'essere superato (in mm) e il contatore conta il numero di solidi che dovranno essere previsti nel job per bilanciare le aree fuse. Ovviamente il vettore che contiene i raggi viene aggiornato in base al numero di solidi necessario.

Il terzo blocco è riportato di seguito:

```
r_cilindro=zeros(length(r)+2,1);
r_cilindro(2:end-1)=r;
Altezze=zeros(length(Altezze_1)+2,1);
Altezze(2:end-1)=Altezze_1;
Altezze(end)=Altezze_1(end)+0.001;

y=interp1(Altezze,r_cilindro,Altezze);
```

Le prime 4 righe di codice servono soltanto per rendere adeguate le dimensioni dei vettori e inserire gli zeri all'inizio e alla fine del vettore dei raggi in modo da chiudere le future superfici. Invece, l'ultima riga crea la vera e propria funzione che regola l'andamento dei raggi con l'altezza del cilindro. Si utilizza la funzione `interp1` per fare un'interpolazione lineare dei punti contenuti nel vettore dei raggi in relazione alle altezze, così da ottenere l'equazione della variazione del raggio.

Il quarto blocco è qui riportato:

```
mesh=200;
[X,Y,Z]=cylinder(y,mesh);
for R=1:length(Z(1,:))
    Z(:,R)=Altezze;
end
figure
surf(X,Y,Z);
cilindro=surf2patch(X,Y,Z,'triangles');
```

Tramite la funzione `cylinder` si crea il cilindro di bilanciamento, dando come input la funzione dei raggi e il numero di punti su ogni circonferenza, i quali vengono utilizzati per creare le superfici. La funzione, però, crea un cilindro di altezza  $z$  unitaria con raggi equidistanti tra loro in base al numero

di punti del vettore dei raggi. Per questo motivo è necessario modificare le altezze con il ciclo `for`, inserendo quelle corrette lette da Excel all’inizio. Dopodiché, è possibile trasformare le superfici in formato “patch” che è quello utilizzato dalla funzione successiva per la generazione dell’STL.

L’ultimo blocco è il seguente:

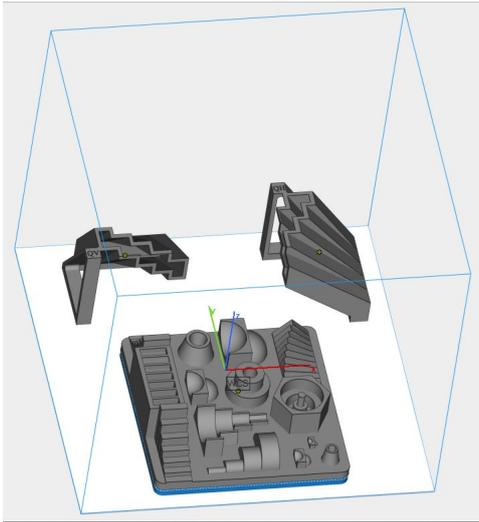
```
stlwrite('Geometria_bilanciamento_cubetti.stl',cilindro);
NUMERO_DI_SOLIDI = n_solidi
```

Il blocco genera l’STL del cilindro creato in precedenza utilizzando la funzione `stlwrite` richiamata da un altro codice apposito per tale scopo. Il file viene salvato automaticamente nella cartella in cui sono presenti i codici utilizzati e il file di Excel esportato da Magics. L’ultima riga stampa a video il numero di solidi che è necessario inserire nel job. Dunque, non rimane che importare il solido in Magics, replicarlo quante volte indicato dal software Matlab e posizionarlo nel volume di lavoro della macchina insieme ai componenti del job da produrre.

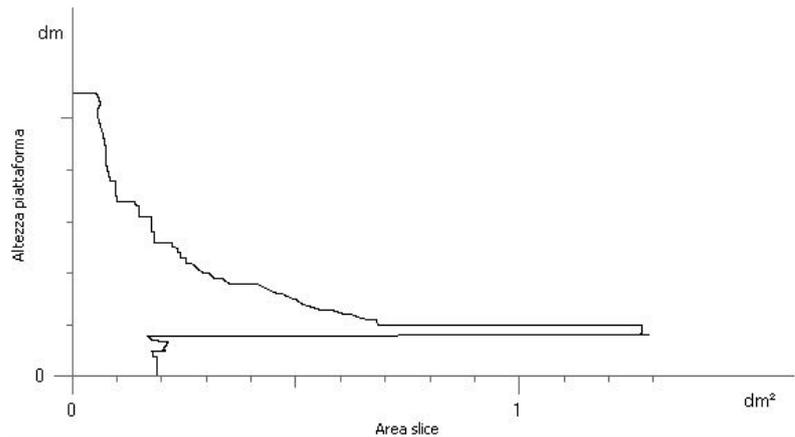
### 6.3 Applicazione del modello al job di produzione dei provini

Per dimostrare il funzionamento del codice questo viene testato sul job prodotto per la realizzazione dei provini, visto in precedenza nel capitolo 3. In questo caso non è il job migliore da prendere in considerazione, in quanto molto spazio del volume di lavoro risulta inutilizzato, essendo stato realizzato appositamente per la stampa dei soli provini. Inoltre, dato che il benchmark per la valutazione dell’accuratezza dimensionale e geometrica è costituito da una base di area abbastanza elevata, il job presenta delle grandi variazioni di sezione. Inoltre, la necessità di posizionare i pezzi ad una data  $z$  accentua queste disomogeneità tra le sezioni fuse, cosa che in ambito produttivo si cerca di attenuare posizionando i pezzi in modo opportuno. A causa di queste brusche variazioni potrebbe non essere possibile bilanciare il job, oppure si potrebbero ottenere delle geometrie di bilanciamento di dimensioni e volumi troppo elevati, il che le rende inadatte ad essere inserite in un job dove è necessario ridurre al minimo gli sprechi e quindi i costi. Alla luce delle problematiche segnalate, l’esempio riportato in seguito non è da considerare un caso produttivo reale, ma soltanto una simulazione per constatare la validità del modello realizzato.

Si procede con lo studio del job in esame, riportato in figura 6.2. Per prima cosa occorre lanciare dal software Magics l’analisi della distribuzione delle slice del job, ottenendo il grafico riportato in figura 6.3, in cui è visualizzata l’area fusa totale dello strato relativa all’altezza di costruzione. I dati di questo grafico vengono esportati in un file Excel da inserire nella cartella in cui è presente il codice Matlab per la creazione delle geometrie di bilanciamento. Dopodiché, viene fatto girare il codice inserendo un valore del raggio massimo compatibile con gli spazi a disposizione sulla piastra di lavoro. Nel caso in esame sono richieste aree di bilanciamento molto elevate, per questo motivo il processo di scelta del raggio massimo più opportuno è stato di tipo *try and error*: sono state generate numerose geometrie di dimensioni diverse e in numero differente e si è verificato il posizionamento nel volume di lavoro fino al raggiungimento della soluzione. Si sono ottenuti 3 cilindri di



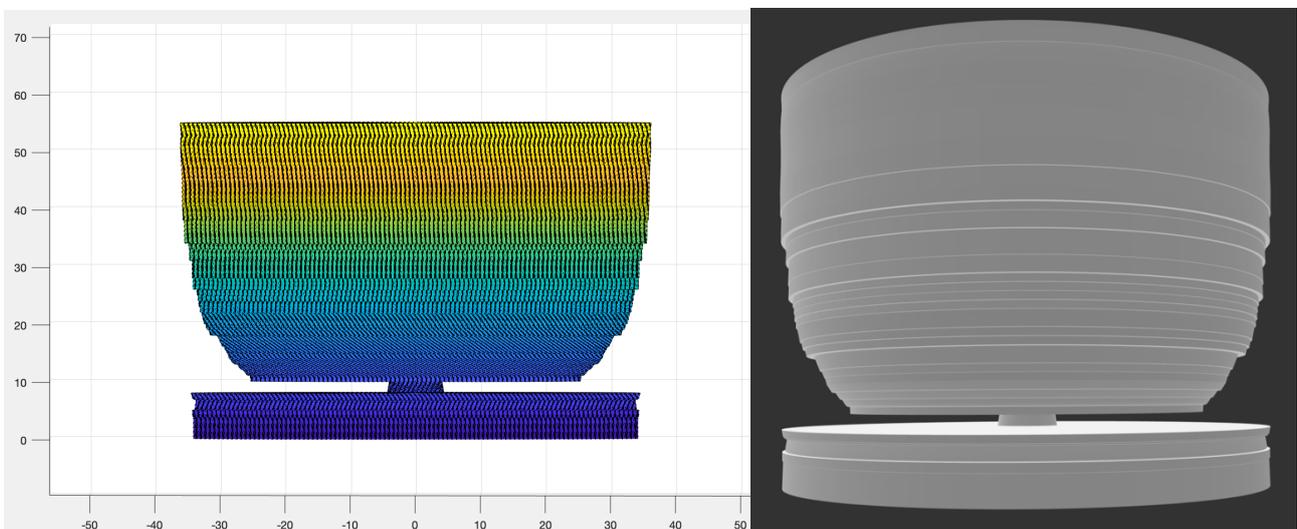
**Figura 6.3** Job per la produzione dei provini



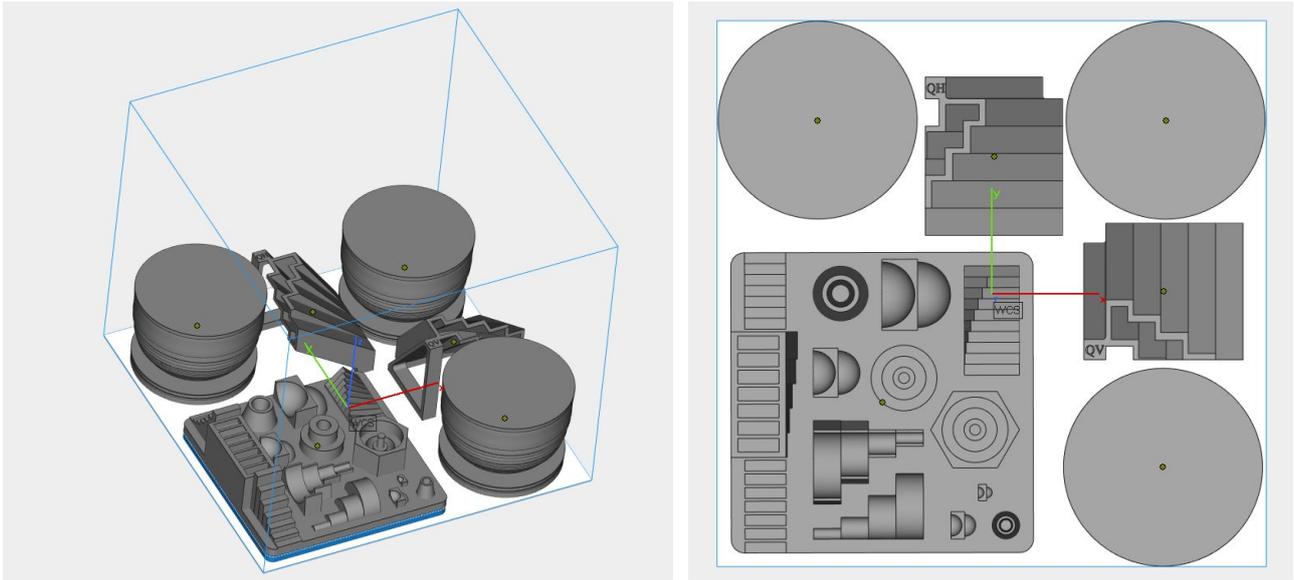
**Figura 6.2** Grafico della distribuzione delle aree fuse in funzione dell'altezza ottenuto dal software Magics relativo al job in esame

bilanciamento caratterizzati da un raggio di circa 37 mm ognuno dei quali appare come mostrato in figura 6.4, in cui è mostrato in ambiente Matlab come insieme di superfici e come STL. Il codice segnala che è necessario inserire 3 di questi cilindri all'interno del job. Questa risulta essere l'unica soluzione possibile per il job in esame, in quanto, per problemi di spazio occupato, non è possibile inserire un numero maggiore di cilindri più piccoli. Inoltre, è stato necessario cambiare la disposizione dei componenti sulla piastra di costruzione per rendere possibile il posizionamento dei cilindri. Il risultato è riportato in figura 6.5.

Ovviamente è chiaro come la disposizione delle parti non sia molto adatta alla produzione, in quanto la distanza tra le parti in alcune zone risulta essere troppo ridotta. Inoltre, alcuni componenti,

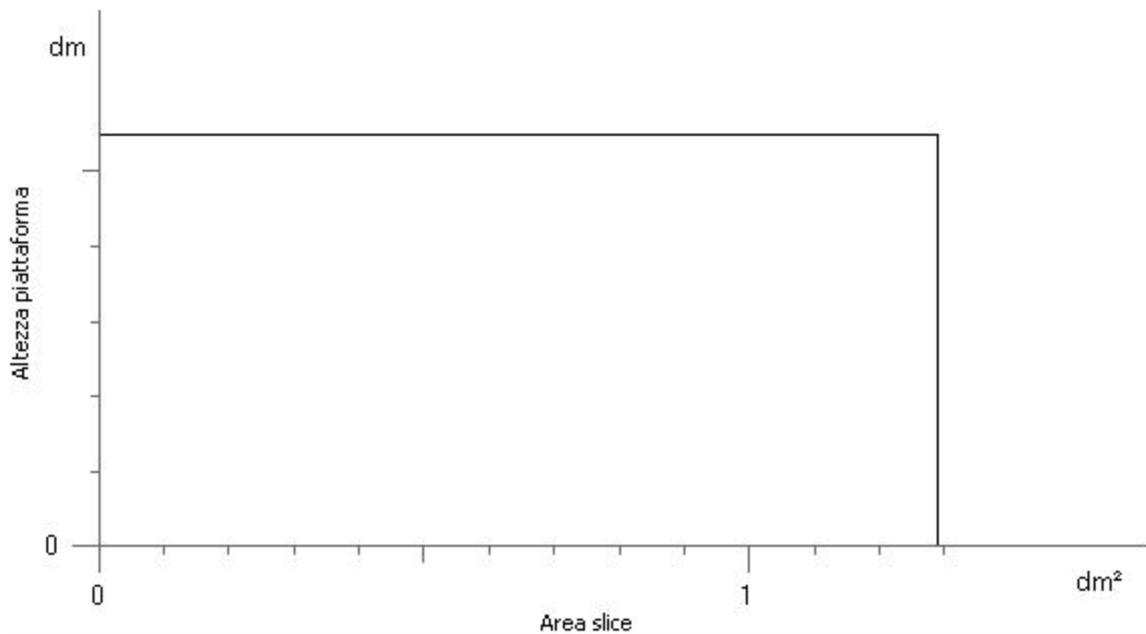


**Figura 6.4** Struttura di bilanciamento risultante. A sinistra in ambiente Matlab come insieme di superfici, a destra solida in formato STL.



**Figura 6.5** Disposizione delle parti e delle strutture di bilanciamento sulla piastra di costruzione

soprattutto i cilindri di bilanciamento, si trovano troppo vicino agli estremi della piattaforma. Ad ogni modo, non considerando la reale fattibilità del job, viene analizzato l'andamento della distribuzione delle slice dopo l'inserimento delle geometrie di bilanciamento, mostrato in figura 6.6. Come evidente dal grafico, dopo l'inserimento delle strutture di bilanciamento l'area risulta essere costante al variare dell'altezza di costruzione, dimostrando che il modello creato funziona correttamente. Si sottolinea ancora una volta che il job preso come esempio non risulta essere un caso reale in ambito produttivo, il che rende l'analisi effettuata soltanto un mero caso di studio per verificare il funzionamento del modello creato.



**Figura 6.6** Grafico di distribuzione delle aree fuse in funzione dell'altezza dopo il bilanciamento

## 7. Conclusioni

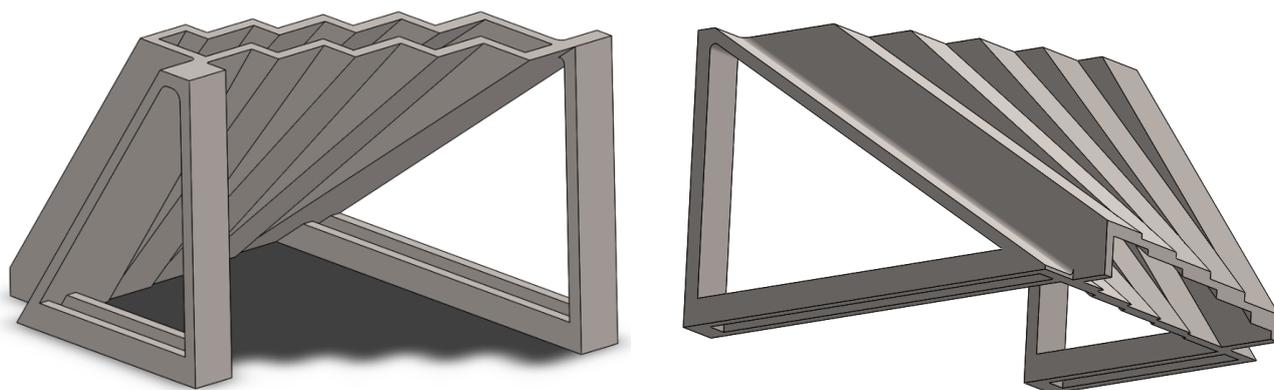
Il lavoro presentato risulta essere una determinazione delle performance, sotto diversi aspetti, e un'ottimizzazione del processo di Electron Beam Melting su una macchina Arcam Q10 plus, la quale utilizza polveri di Ti6Al4V ELI. Lo studio è formato da una caratterizzazione in termini di rugosità superficiale, analizzando l'influenza di diversi fattori che la possono influenzare, una valutazione dell'accuratezza dimensionale e geometrica del processo e un'analisi termica in relazione alla distribuzione delle aree fuse rispetto all'altezza di costruzione. I risultati delle analisi, accompagnati dalle conclusioni a cui si è giunti, vengono riportati di seguito sotto forma di elenco puntato e divisi in base al tipo di analisi condotta.

### Caratterizzazione della rugosità superficiale.

- Dopo una prima analisi visiva, si è rilevata una problematica sui provini riguardo le superfici 6 e 7 esterne negative, ovvero quelle inclinate di  $55^\circ$  e  $50^\circ$  rispetto alla verticale. Nel provino QH queste risultano aver perso la propria forma piana, crollando come se la polvere non avesse sostenuto adeguatamente la struttura. Invece, nel provino QV queste mantengono la forma ma risultano molto rugose a causa di una grande quantità di polvere inclusa sulle superfici. Il fenomeno è sicuramente causato da parametri di processo non adeguati alla realizzazione di questo tipo di strutture. Per questo motivo le superfici esterne negative sono state escluse dalle analisi, data l'influenza di un altro fattore non controllato.
- Dall'analisi dei provini QH e QV, posizionati in modo diverso rispetto alla direzione di passaggio del rake, non si è evidenziata una differenza significativa. Dunque, la disposizione delle superfici rispetto alla direzione di stesura della polvere non influisce sul valore di rugosità ottenuto.
- L'analisi statistica condotta sulle superfici interne ha evidenziato che l'orientazione, positiva o negativa, è un fattore sistematico che influisce sulla rugosità. Il valor medio di rugosità per le superfici interne positive risulta essere pari a  $17,65 \mu\text{m}$  mentre per quelle negative è pari a  $20,20 \mu\text{m}$ . Le deviazioni standard sono rispettivamente pari a  $3,11 \mu\text{m}$  e  $4,49 \mu\text{m}$ , il che evidenzia quanto i dati risultino dispersi.
- Invece, per le superfici positive, l'analisi statistica ha messo in luce come il tipo (interne o esterne) non abbia influenza sulla rugosità delle stesse. Questo è confermato dai valori medi di rugosità ottenuti, pari a  $18,87 \mu\text{m}$  per le positive esterne e  $17,65 \mu\text{m}$  per le positive interne. Questo permette di accorpate i dati per le successive analisi. Inoltre, le deviazioni standard risultano essere anche in questo caso molto elevate, rispettivamente  $3,22 \mu\text{m}$  e  $3,11 \mu\text{m}$ , a rimarcare la grande dispersione dei dati.
- Per indagare l'influenza dell'angolo di inclinazione delle diverse superfici, si sono costruiti i modelli di regressione. Per quanto riguarda le superfici positive, per cui sono state accorpate le misurazioni di quelle interne e esterne, non è stato possibile trovare un modello matematico che descriva bene i dati, a causa della forte dispersione dei valori. Dunque, è possibile

concludere che la rugosità superficiale non dipende dall'angolo di inclinazione delle superfici positive. Invece, per le superfici interne negative il modello quadratico sembra rappresentare meglio i dati, raggiungendo un valore del coefficiente di determinazione pari al 42,8%. Tuttavia, il valore risulta essere ancora troppo modesto per poter concludere che la rugosità vari in funzione dell'angolo seguendo questo tipo di modello. In entrambi i casi, la scarsa capacità dei modelli di descrivere i dati è da attribuire all'elevata dispersione delle misurazioni. Per questo motivo, sarà necessario ripetere le analisi acquisendo un numero maggiore di dati, in modo da rendere i modelli più strutturati. Peraltro, non è da escludere che venga confermato quanto ottenuto con l'analisi qui presentata.

Gli sviluppi futuri dello studio di caratterizzazione condotto vedono, per prima cosa, un'analisi approfondita del set di parametri di processo caricati in macchina, in modo da evidenziare eventuali problematiche e correggerle. A tale scopo verranno contattati i tecnici della Arcam e si procederà con l'identificazione dei problemi. Dopodiché, le analisi saranno ripetute in modo da scongiurare l'influenza di questo fattore. Inoltre, per rendere le analisi più consistenti verrà acquisito un numero maggiore di misurazioni. Invece, per quanto riguarda il provino utilizzato, data la difficoltà nell'acquisire misurazioni nella parte bassa delle superfici interne, che ha portato al taglio dei provini, si propone una modifica della parte, che mira anche all'adeguamento del modello nella zona alta, che poteva portare ad accumuli termici differenti tra le superfici. In figura 7.1 è mostrato il provino modificato.



**Figura 7.1** Benchmark per la caratterizzazione della rugosità modificato per applicazioni future

#### Valutazione dell'accuratezza dimensionale e geometrica.

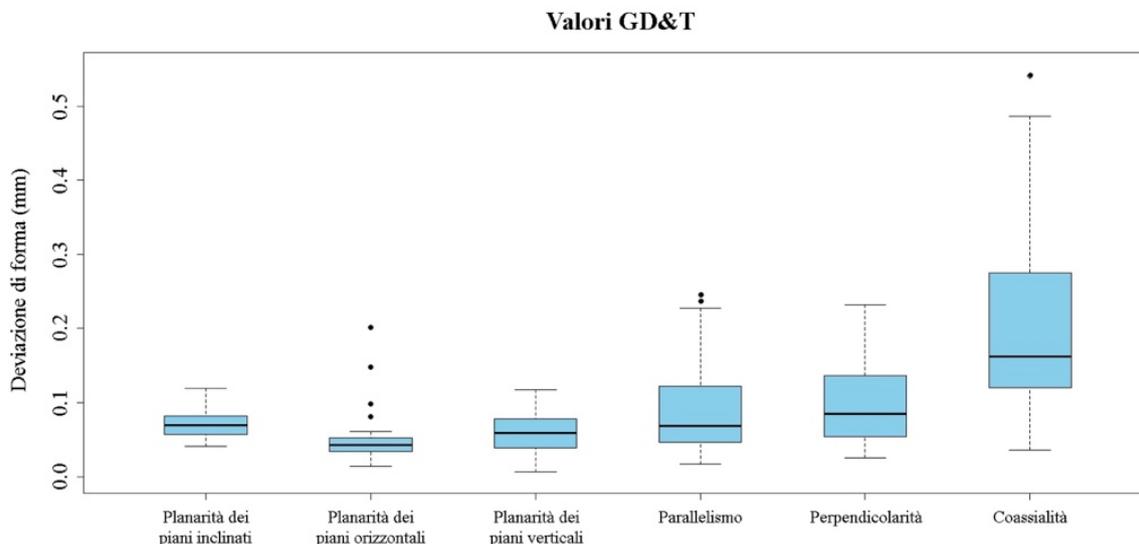
- La misura del benchmark con macchina CMM e la successiva analisi dei dati con l'apposito modello di calcolo, ha portato ai risultati riproposti in tabella 7.1, espressi in termini di gradi IT, con cui è possibile confrontare le performance con altri tipi di lavorazioni. Il processo EBM della Arcam Q10 plus risulta essere migliore rispetto a processi tradizionali di colata in sabbia e microfusione. Inoltre, questo risulta essere superiore rispetto al sistema EBM Arcam A2X e paragonabile al sistema di SLM EOS M270. Infatti, quest'ultimo ha performance maggiori nei range dimensionali minori ma il sistema della Q10 plus è più accurato nei range di dimensioni maggiori. Ad ogni modo, visti i gradi IT risultanti, i componenti prodotti con

questa tecnologia dovranno essere rilavorati nelle zone di accoppiamento per raggiungere le tolleranze tipiche richieste.

- Per quanto riguarda l'accuratezza geometrica, sono stati analizzati diversi fattori. Nel complesso il sistema sembra avere una buona accuratezza geometrica, sia per quanto riguarda i piani che per le forme più complesse come coni e sfere. Sono state riscontrate alcune problematiche dovute a difetti di stampa e difficoltà di misura che hanno reso alcune deviazioni più elevate. Si è anche analizzata la differenza tra feature concave e convesse, concludendo che le convesse risultano avere deviazione di forma minore. Per quanto riguarda le tolleranze geometriche, quelle rilevate sono state espresse tramite valori GD&T. I risultati sono mostrati in figura 7.2. La coassialità risulta essere il tratto più critico, con un valore massimo di circa 0,5 mm escludendo gli outlier. Per quanto riguarda la planarità, i risultati sono buoni, con una deviazione di 0,059 mm per i piani orizzontali (senza guardare agli outlier) e di circa 0,12 mm per quelli verticali e inclinati, che risentono dello staircase effect. Per parallelismo e perpendicolarità si ottengono deviazioni di circa 0,25 mm. Ancora una volta si conclude che i componenti prodotti con tecnologia EBM con Arcam Q10 plus necessitano di essere rilavorati in zone che richiedono un accoppiamento. Ad ogni modo, i valori GD&T ottenuti attestano che i componenti risultano avere una buona geometria, che potrebbe renderli adatti ad alcune applicazioni senza che questi vengano rilavorati.

**Tabella 7.1** Valori dell'accuratezza dimensionale del processo analizzato in termini di gradi IT

GRADI IT DEI PRINCIPALI PROCESSI								
Range dimensionale (mm)	1-3	3-6	6-10	10-18	18-30	30-50	50-80	80-120
EBM (Arcam Q10plus)	IT13	IT13	IT13	IT13	IT12	IT11	IT11	IT13



**Figura 7.2** Tolleranze geometriche risultanti in termini di valori GD&T

### Bilanciamento del calore fornito ad ogni layer.

- Lo studio per bilanciare il calore fornito ad ogni layer ha portato alla creazione di un codice Matlab che legge le informazioni riguardo alla messa in macchina, ovvero la distribuzione delle slice, calcola l'area necessaria a bilanciare le aree fuse di ogni strato e genera delle strutture cilindriche di area variabile rispetto all'altezza. Inserendo le strutture risultanti nella messa in macchina, nel numero indicato dal codice, queste rendono l'area fusa costante al variare dell'altezza di costruzione. Così facendo è possibile ottenere componenti di qualità più elevata e ottimizzare il processo in termini di tempo.
- L'applicazione del modello di calcolo al job prodotto per la realizzazione dei provini di caratterizzazione ha dimostrato che il codice funziona correttamente e ha illustrato i diversi passaggi per ottenere un job bilanciato.

Il naturale proseguimento del lavoro è costituito dalla validazione del modello di calcolo attraverso simulazioni del processo di EBM con EBM Control, software che controlla il processo in macchina e con il quale è possibile eseguire accurate simulazioni del processo. Alla prima validazione software seguirà quella reale, in cui verrà testato il metodo di bilanciamento producendo un job dedicato. Ciò potrebbe essere effettuato su un job in cui vengono inseriti provini per la caratterizzazione e valutazione delle performance, in modo da confrontare i risultati delle analisi con quelli precedentemente ottenuti e valutare eventuali miglioramenti dovuti al calore uniforme su ogni layer. Come specificato durante la trattazione, essendo il benchmark per la valutazione dell'accuratezza dimensionale e geometrica relativamente adatto alla realizzazione con EBM (in origine è stato progettato per essere prodotto in FDM), questo potrebbe essere modificato oppure posizionato diversamente per renderlo più idoneo al processo. Ad esempio, questo potrebbe essere orientato con un certo angolo di inclinazione in modo da scomporre l'area totale della base su diversi layer. Ciò, però, peggiorerebbe probabilmente la qualità dimensionale delle feature, che verrebbero interessate maggiormente dallo staircase effect. Un'altra soluzione potrebbe essere rappresentata dalla scomposizione del benchmark in settori, che conservino comunque le feature, ma con la possibilità di essere posizionati ad altezze diverse in modo da diminuire l'area fusa e rendere più agevole il bilanciamento delle slice. Inoltre, non toccando le posizioni relative tra le forme, la misura potrebbe essere fatta componendo l'intero benchmark con le diverse parti e posizionandolo nella macchina di misura, utilizzando lo stesso programma. Altrimenti, sarebbe comunque facile modificare il programma di misura dividendolo in parti per adattarlo alle nuove porzioni di benchmark.

## Bibliografia

- [1] 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.
- [2] A. Rashid, *Additive Manufacturing Technologies*. 2019.
- [3] 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.
- [4] D. Bourel, J. Beaman, M. Leu, and D. Rosen, “RAPID History of AM and 2009 Roadmap,” *RapidTech 2009 US-TURKEY Work. Rapid Technol.*, 2009.
- [5] E. Matias and B. Rao, “3D printing: On its historical evolution and the implications for business,” *Portl. Int. Conf. Manag. Eng. Technol.*, vol. 2015-Sept, pp. 551–558, 2015.
- [6] R. F. Householder, “‘Molding Process’ U.S. patent,” #4,247,508, 1981.
- [7] P. S. Fussell, *Rapid Prototyping in Europe and Japan JTEC*. 1997.
- [8] “3D Systems, La nostra storia.” [Online]. Available: <https://it.3dsystems.com/our-story>. [Accessed: 15-Sep-2019].
- [9] Wohlers Associate, “Wohlers Report 2015 – History of Additive Manufacturing,” 2015.
- [10] M. Shellabear and O. Nyrhilä, “DMLS – Development History and State of the Art,” *Lane 2004*, pp. 1–12, 2004.
- [11] “Stratasys, Inc. History.” [Online]. Available: <http://www.fundinguniverse.com/company-histories/stratasys-inc-history/>. [Accessed: 16-Sep-2019].
- [12] “30years.eos.” [Online]. Available: <https://30years.eos.info/en>. [Accessed: 16-Sep-2019].
- [13] V. R. D. D.L. Goodman, D.L. Birx, “High energy electron beam processing experiments with induction accelerators,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res.*, vol. 99, no. 94, pp. 775–779, 1995.
- [14] “Arcam, Our History.” [Online]. Available: <http://www.arcam.com/company/about-arcam/history/>. [Accessed: 15-Sep-2019].
- [15] M. S. and S. P. Mahamood, Rasheedat M, Esther T Akinlabi, “Revolutionary Additive Manufacturing: An Overview,” p. 58, 2006.
- [16] L. Iuliano, “Dispensa del corso ‘Tecniche di Fabbricazione Additiva.’” .
- [17] C. K. Chua, K. F. Leong, and C. S. Lim, *Rapid Prototyping: Principles and Applications (with Companion CD-ROM) Third Edition*. World Scientific Publishing Company, 2010.
- [18] K. S. Prakash, T. Nancharaih, and V. V. S. Rao, “Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An Overview,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 3873–3882, 2018.
- [19] F. Calignano, M. Galati, L. Iuliano, and P. Minetola, “Design of Additively Manufactured Structures for Biomedical Applications: A Review of the Additive Manufacturing Processes Applied to the Biomedical Sector,” *J. Healthc. Eng.*, vol. 2019, 2019.
- [20] “EOS technology info.” [Online]. Available: [https://www.eos.info/additive\\_manufacturing/for\\_technology\\_interested](https://www.eos.info/additive_manufacturing/for_technology_interested). [Accessed: 25-Sep-2019].
- [21] E. D. T. Fakult and G. Doktor-ingenieur, “Simulation of Selective Electron Beam Melting Processes Elham Attar,” 2011.

- [22] 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.
- [23] M. Sigl, S. Lutzmann, and M. F. Zaeh, "Transient physical effects in electron beam sintering," *17th Solid Free. Fabr. Symp. SFF 2006*, pp. 464–477, 2006.
- [24] H. Weiwei, J. Wenpeng, L. Haiyan, T. Huiping, K. Xinting, and H. Yu, "Research on Preheating of Titanium Alloy Powder in Electron Beam Melting Technology," *Rare Met. Mater. Eng.*, vol. 40, no. 12, pp. 2072–2075, 2011.
- [25] M. Galati, P. Minetola, and G. Rizza, "Surface roughness characterisation and analysis of the Electron Beam Melting (EBM) process," *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 13, 2019.
- [26] Arcam EBM, "Arcam AB EBM Brochure." pp. 1–20, 2017.
- [27] T. R. Mahale, "Electron Beam Melting of Advanced Materials and Structures," North Carolina State University, 2009.
- [28] P. Heintl, A. Rottmair, C. Körner, and R. F. Singer, "Cellular titanium by selective electron beam melting," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 9, no. 5, pp. 360–364, 2007.
- [29] A. Mitchell, "Melting, casting, and forging problems in titanium alloys," *Jom*, vol. 49, no. 6, pp. 40–69, 1997.
- [30] J. Parthasarathy, B. Starly, S. Raman, and A. Christensen, "Mechanical evaluation of porous titanium (Ti6Al4V) structures with electron beam melting (EBM)," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 3, no. 3, pp. 249–259, 2010.
- [31] F. A. Shah *et al.*, "Long-term osseointegration of 3D printed CoCr constructs with an interconnected open-pore architecture prepared by electron beam melting," *Acta Biomater.*, vol. 36, pp. 296–309, 2016.
- [32] P. Fino, "Dispense del corso 'Materiali per la Fabbricazione additiva.'" pp. 1–15, 2018.
- [33] E. Chirone and S. Tornincasa, *Disegno Tecnico industriale Vol.2*, vol. 2, no. 1. 2018.
- [34] 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.
- [35] ISO, "Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing ISO 1101," vol. E, 2017.
- [36] "www.keyence.it Concetti fondamentali di GD&T." [Online]. Available: <https://www.keyence.it/ss/products/measure-sys/gd-and-t/type/>. [Accessed: 20-Oct-2019].
- [37] C. Zhai, Y. Gan, D. Hanaor, G. Proust, and D. Reintant, "The Role of Surface Structure in Normal Contact Stiffness," *Exp. Mech.*, vol. 56, no. 3, pp. 359–368, 2016.
- [38] "Surface measurement: Selecting the correct filter - Mahr Metrology." .
- [39] J. P. Kruth, "Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 40, no. 2, pp. 603–614, 1991.
- [40] M. Fahad and N. Hopkinson, "A new benchmarking part for evaluating the accuracy and repeatability of AM processes 2012 Fahad Hopkinson," 2012.
- [41] T. H. C. Childs and N. P. Juster, "Linear and Geometric Accuracies from Layer Manufacturing," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 43, no. 1, pp. 163–166, 1994.
- [42] R. Ippolito, L. Iuliano, and A. Gatto, "Benchmarking of Rapid Prototyping Techniques in

- Terms of Dimensional Accuracy and Surface Finish,” *CIRP Ann.*, vol. 44, no. 1, pp. 157–160, 1995.
- [43] F. Xu, Y. S. Wong, and H. T. Loh, “Toward generic models for comparative evaluation and process selection in rapid prototyping and manufacturing,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 19, no. 5, pp. 283–296, 2001.
- [44] D. Dimitrov, W. Van Wijck, K. Schreve, N. De Beer, and J. Meijer, “An investigation of the capability profile of the three dimensional printing process with an emphasis on the achievable accuracy,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 52, no. 1, pp. 189–192, 2003.
- [45] M. Mahesh, Y. S. Wong, J. Y. H. Fuh, and H. T. Loh, “Benchmarking for comparative evaluation of RP systems and processes,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 10, no. 2, pp. 123–135, 2004.
- [46] J. Kruth, B. Vandenbroucke, J. Vaerenbergh, and P. Mercelis, “Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques,” *Int. Conf. Polym. Mould. Innov. (PMI), Gent, Belgium, April 20-23, 2005*, pp. 1–7, 2005.
- [47] S. Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurrens, and M. A. Donmez, “An additive manufacturing test artifact,” *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 119, pp. 429–459, 2014.
- [48] N. Hanumaiah and B. Ravi, “Rapid tooling form accuracy estimation using region elimination adaptive search based sampling technique,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 13, no. 3, pp. 182–190, 2007.
- [49] D. Scaravetti, P. Dubois, and R. Duchamp, “Qualification of rapid prototyping tools: Proposition of a procedure and a test part,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 38, no. 7–8, pp. 683–690, 2008.
- [50] W. M. Johnson, M. Rowell, B. Deason, and M. Eubanks, “Benchmarking Evaluation of an Open Source Fused Deposition,” *Proc. 22nd Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp.*, pp. 197–211, 2011.
- [51] W. M. Johnson, M. Rowell, B. Deason, and M. Eubanks, “Comparative evaluation of an open-source FDM system,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 20, no. 3, pp. 205–214, 2014.
- [52] M. A. D. S. Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurrens, “Proposal for a Standardized Test Artifact for Additive,” *Solid Free. Fabr. Symp.*, pp. 902–920, 2012.
- [53] F. A. C. Sanchez, H. Boudaoud, L. Muller, and M. Camargo, “Towards a standard experimental protocol for open source additive manufacturing,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 9, no. 3, pp. 151–167, 2014.
- [54] 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-6Al-4V,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 18, no. 5, pp. 401–408, 2012.
- [55] 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.
- [56] 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, 2015.
- [57] R. K. 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.
- [58] 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.
- [59] “arcam-ebm-q10plus @ www.ge.com.” [Online]. Available: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/ebm-machines/arcam-ebm-q10plus>.
- [60] “rtp-80 @ www.sm-instruments.com.” [Online]. Available: <http://www.sm-instruments.com/it/prodotti/rugosimetri/rtp-80.html>. [Accessed: 20-Nov-2019].
- [61] Arcam, “Ti6Al4V ELI Titanium Alloy Specification Sheet,” pp. 4–6, 2013.
- [62] “atos-compact-scan @ www.gom.com.” [Online]. Available: <https://www.gom.com/it/sistemi-di-metrologia/atos/atos-compact-scan.html>. [Accessed: 23-Oct-2019].
- [63] G. Barbato, G. Genta, and A. Germak, *Misurare per decidere*. Esculapio, 2014.