POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Verifica Geometrica di Pezzi ALM in Metallo: Analisi Sperimentale per la Definizione di una Procedura di Misura con Sensore a Luce Strutturata



Relatore Ing. Andrea Mura

Tutor Aziendali Ing. Emanuele Modesto Barini Dott.ssa Suela Ruffa

> Candidato Carmelo Vazzana

A.A. 2017/2018

Abstract

L'Additive Layer Manufacturing (ALM) è ad oggi, nell'ambito dell'industria 4.0, la tecnologia più dirompente, in grado di stravolgere le tradizionali tecniche produttive.

Tra le tecnologie di fabbricazione additiva, quella relativa ai metalli è tra le più promettenti, soprattutto per l'industria aerospaziale, in quanto consente la realizzazione di oggetti strutturalmente adeguati alle principali applicazioni del settore ma con la caratteristica di essere eccezionalmente leggeri.

Per poter sfruttare al meglio le potenzialità dell'ALM occorre ancora affrontare e risolvere alcune problematiche specifiche della tecnologia produttiva; tra le quali il controllo della conformità delle specifiche e le tolleranze dei prodotti costruiti.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di ottimizzare i parametri che influiscono sul controllo geometrico di pezzi in ALM con metodologie di misura non a contatto come la luce strutturata.

I parametri che possono influenzare la misura sono di varia origine e possono essere legati all'ambiente in cui viene realizzata la misura, alle caratteristiche dell'oggetto analizzato o a quelle dello strumento di misura stesso.

Per individuare tali parametri e quantificare il loro effetto, si è pensato ad un approccio sperimentale basato sulla misura di pezzi reali e su appositi campioni da sviluppare ad hoc.

Ciò che ci si aspetta di ottenere è un elenco di grandezze di influenza da tenere sotto controllo e diversi set di parametri di misura per ottenere risultati metrologici ottimali su pezzi in metallo realizzati con la tecnologia ALM.

L'intero lavoro di tesi è stato svolto presso la Hexagon Manufacturing Intelligence di Grugliasco (TO). La Hexagon Manufactuting Intelligence da oltre 200 anni fornisce sistemi di metrologia alle industrie di diverse divisioni (Aerospaziale, Automobilistico, Medicale), offrendo ai clienti la possibilità di poter accelerare la produttività migliorando nello stesso tempo la qualità del prodotto.

Le soluzioni Hexagon integrano sensori e software che forniscono informazioni immediatamente utilizzabili. L'azienda conta oltre 17000 dipendenti in più di 40 paesi e ha un fatturato di circa 3,1 miliardi di cui l'11% è destinato ai reparti R&D. Il lavoro di tesi è stato svolto proprio in uno di questi reparti in particolare in quello che ha sede a Grugliasco (TO).

Indice

1	Bior	iic Aircraft	1
	1.1	Importanza degli artefatti	2
	1.1.1	Artefatto 1: Aileron Jack Actuator Bracket	3
	1.1.2	Artefatto 2: Blocco valvola idraulica	4
	1.1.3	Provinciti di magattazione e ottimizzazione Pionica	د۲
	1.2	Requisiti di progettazione e ottimizzazione Bionica	0
	1.3	Requisiti dei sistemi di controllo della qualità per pezzi in ALM	7
	1.3.1	Requisiti per il controllo della qualità in-process	′ 7
	1.3.3	Requisiti per il controllo della qualità in-service	8
	1.4	Possibili impieghi per i pezzi realizzati in ALM	8
2	Add	itive Manufacturing	9
	2.1	Prototipazione rapida	9
	2.2	Processo di Additive Manufacturing	10
	2.3	Strutture di supporto	13
	2.4	Vantaggi e svantaggi della realizzazione di pezzi con tecnologie Additive	
	Manuf	acturing	14
	2.5	Selective Laser Melting	15
3	Met	odi di scansione 3D	16
	3.1	Luce strutturata, acquisizione di immagini 3D di superfici	17
	3.2	Pattern binario e codifica Gray	20
	3.3	Pattern a livelli di grigio	22
	3.4	Pattern sinusoidali	22
	3.5	Metodo ibrido: Sfasamento + codifica Gray	24
4	Can	pioni per i test: Bamboo Bracket	25
	4.1	Ipotesi sull'utilizzo e specifiche	26
	4.2	Definizione dei pezzi di prova	30
5	La F	Rugosità Superficiale	33
	5.1	Introduzione alla Rugosità Superficiale	33
	5.2	Rugosità Ra	34
	5.3	Rugosimetro	36
	5.3.1	Vantaggi e svantaggi nell'utilizzo del rugosimetro	37
	5.4	Rugosità dei pezzi in metallo realizzati in Additive Manufacturing	38
	5.5	Test di rugosità	42
	5.5.1	Strumentazione utilizzata	42
	5.5.2	Stattaggio del pezzo	43
	5.5.3 5.5.4	riocedura per la misura della rugosita Risultati e conclusioni	44 45
6	Mac	chine di Misura a Coordinate	 47

	6.1	Tipologie di Macchine di Misura a Coordinate	48
	6.2	Il Tastatore-Trigger	48
	6.2.1	Differenti tipologie di tastatore	49
	6.2.2	Qualifica del tastatore	49
	6.2.3	Compensazione del raggio	50
	6.3	Descrizione del test con Macchina di Misura a Coordinate	51
	6.3.1	Definizione delle caratteristiche da testare del pezzo	52
	6.3.2	Sistema di fissaggio	52
	6.3.3	Attrezzatura utilizzata per il test	53 53
	635	Allineamento pezzo-macchina	53 54
	6.3.6	Caratteristiche misurate	54
	6.4	Analisi dei dati e risultati su CMM	55
7	Intr	oduzione ai test con scanner a luce strutturata	59
	7.1	Strumentazione utilizzata per test con sensore a luce strutturata	59
	7.2	Fattori di influenza sulla misura	64
	7.2.1	Condizioni ambiente di misura	64
	7.2.2	Caratteristiche del pezzo	65
	7.2.3	Procedura di misura	67
8	Prog	gettazione degli esperimenti e analisi dei dati	69
	8.1	Strategia della sperimentazione	69
	8.1.1	Applicazioni tipiche della pianificazione sperimentale	70
	8.1.2	Principi di base della pianificazione sperimentale	70
	8.1.3		/1
	8.2	Piani fattoriali	72
	8.3	Modello statistico	75
	8.4	Analisi statistica con ANOVA	76
	8.5	Analisi della varianza attraverso la distribuzione F	79
9	Cali	brazione del sensore a luce strutturata	80
	9.1	Identificazione della tavola di calibrazione	80
	9.2	Posizionamento del sensore per la calibrazione	81
	9.3	Allineamento del sensore per la fase di calibrazione	81
	9.4	Calibrazione del sensore	82
1	0 Te	est con sensore a luce strutturata	83
	10.1	Test Allineamento	83
	10.1.1	Metodologia test allineamento	86
	10.2	Test Teach	90
	10.2.	Metodologia Test Teach	90
	10.3	Test Posizione Pezzo	94
	10.3.	Metodologia Test Posizione Pezzo	94
	10.4	Test Inclinazione Sensore	96
	10.4.	Metodologia Test Inclinazione Sensore	96
	10.5	Test Numero di Esposizioni (Shutter Time)	97
	10.5.	Metodologia Test Numero di Esposizioni	98

10.6	Test Rugosità/Template	100
10	0.6.1 Metodologia Test Rugosità/Template	100
11	Analisi dei dati e risultati Test con sensore a luce strutturata	103
11.1	Analisi dei dati e risultati Test Allineamento	104
11.2	Analisi dei dati e risultati Test Teach	112
11.3	Analisi dei dati e risultati Test Posizione Pezzo	119
11.4	Analisi dei dati e risultati Test Inclinazione Sensore	126
11.5	Analisi dei dati e risultati Test Numero di Esposizioni (Shutter Time)	133
11.6	Analisi dei dati e risultati Test Rugosità/Template	140
12	Conclusioni	152

1 Bionic Aircraft

Questo capitolo funge da introduzione per il lavoro di tesi, dato che esso è strettamente legato al progetto europeo Bionic Aircraft. A tale progetto ha aderito l'Hexagon Manufacturing Intelligence, azienda presso la quale sono stati svolti tutti gli studi e i test relativi a tale lavoro.

Il progetto Bionic Aircraft si occupa dello sviluppo di una vasta gamma di tecnologie, che consentiranno grazie all'utilizzo dell'Additive Layer Manufacturing (ALM) di ottenere significativi risparmi in termini di peso e costi per lo sviluppo e per la produzione di parti o assiemi di velivoli altamente efficienti. Contribuirà anche a livello ambientale in quanto si avranno minori emissioni per aeromobile. Per rispettare le aspettative, in termini di risparmio sul peso, sui costi e in termini di minore impatto ambientale, il progetto Bionic Aircraft ha come obiettivo principale quello di assicurare lo sviluppo di una gamma di competenze e tecnologie (*Figura 1.1*) come:

- Design Bionico e ottimizzazione: sviluppo di efficienti processi di ottimizzazione e metodi di progettazione automatizzati e semplificati per lo sviluppo di strutture bioniche leggere per velivoli;
- Materiali in alluminio per ALM: sviluppo di polveri per ALM ad alta resistenza con proprietà meccaniche superiori e costi inferiori rispetto alle attuali leghe di alluminio per ALM;
- Processo ALM produttivo ed efficiente: sviluppo di un processo ALM efficiente per la produzione di parti in alluminio, con aumento della produttività e dell'efficienza;
- Ideazione di un controllo di qualità per parti ALM: sviluppo di metodi e sistemi per il controllo di qualità di parti ALM in alluminio, coprendo le esigenze sia durante la realizzazione, sia a pezzo finito ed infine durante l'utilizzo.



Figura 1.1 Ciclo di efficienza delle risorse

I set di strumenti di progettazione Bionic automatizzati da un lato e le nuove leghe di alluminio ad alta resistenza dall'altro, contribuiscono a migliorare la produttività e le capacità tecniche della produzione additiva laser. La produttività è ulteriormente migliorata con l'implementazione di metodi di garanzia della qualità in-line e inprocess e le efficienti catene di fornitura di parti di ricambio miglioreranno ulteriormente la capacità industriale e l'accettazione pubblica delle tecnologie ALM.

1.1 Importanza degli artefatti

L'obiettivo principale in Bionic Aircraft è di validare i benefici e dimostrare la fattibilità tecnica delle tecnologie attraverso degli artefatti. Gli artefatti non dovrebbero solo consentire una dimostrazione delle capacità e delle tecnologie sviluppate nel progetto, ma dovrebbero anche servire come "sfide reali" e dovrebbero contribuire a garantire che il progetto raggiunga il suo scopo ovvero componenti di più alto livello per quanto riguarda peso, risparmio sul costo e impatto ambientale. Per fare ciò si punta a migliorare il potenziale di leggerezza utilizzando l'ALM nella progettazione degli aeromobili, questa è vista come una tecnologia che consente ai pezzi ALM in alluminio leggero ad alta efficienza di diventare un'alternativa finanziaria valida ai pezzi meno efficienti realizzati con lavorazioni convenzionali. Una volta che la progettazione e la produzione di questi componenti, come quello mostrato in *Figura 1.2*, diventa un'alternativa valida rispetto alle lavorazioni convenzionali, l'obiettivo principale sarà quello di migliorare la leggerezza e la dimensione dei pezzi prodotti in ALM.

		2	
	Lavorazione convenzionale	ALM Lega di Titanio Ti-6AL-4V	ALM Lega di alluminio ad alta resistenza
Materiale	Alluminio 7075	ALM Titanio (Ti64)	ALM Alluminio-Litio sviluppo per Bionic Aircraft
Peso	330 g	191 g	164 g
Riduzione del peso	-	42%	50%

Figura 1.2 Risparmio di peso che può essere ottenuto riprogettando la staffa

Attualmente la maggior parte dei pezzi in ALM che vengono progettati e realizzati sono piccole staffe, come quella mostrata in *Figura 1.2*, con una funzione specifica o che vedono solo un numero limitato di applicazioni. Pezzi di questo tipo possono essere realizzati in ALM avendo una riduzione di peso che può arrivare fino al 50%, è ancora necessaria molta ricerca per migliorare l'ottimizzazione dei pezzi ma per fare ciò potrebbero essere necessarie dimensioni maggiori in modo da fornire un potenziale di risparmio sul peso complessivamente maggiore e inoltre tali pezzi potrebbero non presentare caratteristiche bioniche come quelle presenti nelle staffe e nei raccordi più piccoli. Per garantire lo sviluppo di tecnologie di ottimizzazione e design che coprano un'ampia gamma di concetti strutturali e per garantire un numero di artefatti che presentino un grado variabile di sfida alle diverse tecnologie, si riportano tre esempi di artefatti suddivisi in base alla seguente logica:

- Artefatto 1: staffa di medie dimensioni che rappresenta un pezzo per lo sviluppo sia della garanzia della qualità che dei metodi di riparazione. Il pezzo dovrebbe essere sottoposto a carichi elevati e per tale motivo deve essere spesso e voluminoso;
- Artefatto 2: pezzo molto complesso utilizzato per testare lo sviluppo della progettazione bionica. Le ridotte dimensioni e l'elevata complessità di questo pezzo rappresentano la più grande sfida sia in termini di garanzia della qualità che per lo sviluppo delle riparazioni;
- Artefatto 3: pezzo con dimensioni più elevate. Servirà principalmente a testare le capacità di ottimizzazione e progettazione. Il pezzo è una parte lavorata con pareti sottili avente una complessità di progettazione aggiuntiva dopo la riprogettazione per ALM. Il pezzo finale sarà meno complesso dell'Artefatto 2 e quindi dovrebbe essere impegnativo per la garanzia della qualità e la riparazione.

1.1.1 Artefatto 1: Aileron Jack Actuator Bracket

Il primo esempio di pezzo presente sui velivoli che può essere ottimizzato con ALM è una staffa dell'alettone. La *Figura 1.3* mostra il design attuale del pezzo, come una parte in alluminio lavorato e anche la sua posizione sul fuoribordo. L'aeromobile ha quattro staffe montate su ogni ala; due per l'azionamento dell'alettone interno e due per quello esterno. La staffa presa come esempio è quella più esterna e piccola, è stata scelta in quanto si adatta alla camera di stampaggio di Bionic Aircraft. La *Figura 1.4* fornisce due ulteriori illustrazioni, che mostrano in primo luogo come la staffa è installata sul longherone posteriore dell'ala e successivamente come viene utilizzata per supportare l'attuatore del martinetto. Il carico principale della staffa è il carico dell'attuatore del martinetto che quando ruota viene applicato con diversi livelli di carico e orientamento. Il design compatto del pezzo dovrebbe consentire lo sviluppo altamente ottimizzato con ALM e le dimensioni del pezzo forniscono un buon potenziale per quanto riguarda il risparmio di peso. Questo aumenta notevolmente dato che il medesimo pezzo è presente otto volte su ciascun velivolo.



Figura 1.3 A sinistra posizionamento della staffa sul fuoribordo, a destra staffa presente attualmente sui velivoli



Figura 1.4 Installazione della staffa sul longherone posteriore e illustrazione che mostra la funzione della staffa del martinetto per l'azionamento degli alettoni

Il pezzo dovrebbe essere sufficientemente semplice da fungere come dimostratore per la stima della durata a fatica e l'integrazione del pezzo con il carico ben definito dovrebbe consentire di eseguire anche test statici.

1.1.2 Artefatto 2: Blocco valvola idraulica

Il secondo esempio per mostrare i vantaggi dell'ALM è un blocco valvola idraulica. La *Figura 1.5* mostra il design attuale del blocco idraulico, come una parte in alluminio lavorato. Il blocco valvola idraulica è una parte già utilizzata nella ricerca ALM, il pezzo riprogettato è sufficientemente complesso e impegnativo per quanto riguarda le tecniche di controllo in-process. La *Figura 1.6* fornisce un'ulteriore illustrazione della parte dopo la riprogettazione per ALM. Il carico principale del pezzo, che serve per collegare il sistema di alimentazione idraulico ai cilindri di carico, è la pressione idraulica interna. Il pezzo è visto principalmente come dimostratore per la produzione e per il controllo di qualità. Può essere utilizzato come un caso studio per la convalida del progetto bionico e del processo di ottimizzazione, ciò potrebbe fornire un grande risparmio di peso.



Figura 1.5 Design esistente per il blocco idraulico



Figura 1.6 Riprogettazione del blocco idraulico con ALM

1.1.3 Artefatto 3: Giunzione a T

Il terzo esempio riportato è una giunzione a T, la *Figura 1.7* mostra il pezzo corrente, come una parte in alluminio lavorato e la sua posizione nella carenatura del ventre della fusoliera.



Figura 1.7 A destra pannello triangolare, a sinistra relativo posizionamento nella parte centrale della fusoliera

L'aeromobile ha due giunzioni a T montati su ciascun lato della fusoliera. La *Figura 1.8* fornisce ulteriori dettagli, che mostrano come la giunzione a T è installata nella scatola alare centrale. Tale pezzo serve per il fissaggio e viene caricato con traiettorie di carico specifiche e con carichi che accoppiano carichi di inerzia.

La giunzione deve essere progettata anche per soddisfare i requisiti a fatica imposti dalla frequenza naturale, inoltre a causa delle sue dimensioni e del design a parete sottile è incline a cedimenti.



Figura 1.8 Installazione della giunzione a T all'interno della carenatura

Per soddisfare i requisiti di fabbricazione, può essere che il pezzo venga realizzato in scala. Tuttavia, questo può generare difficoltà per il test statico. Un ulteriore possibilità potrebbe essere quella di fabbricare il pezzo suddividendolo in parti più piccole, adattandolo in questo modo alla stampa ALM.

1.2 Requisiti di progettazione e ottimizzazione Bionica

Gli artefatti devono essere scelti in modo da avere un'ampia gamma di dimensioni e complessità. La selezione di pezzi di dimensioni, caratteristiche strutturali e complessità diverse sfiderà l'ottimizzazione e la tecnologia di progettazione. Si dovrà essere in grado di sviluppare: staffe e raccordi ALM di piccole dimensioni ma anche parti aerospaziali più grandi; pezzi con caratteristiche strutturali diverse come spessore delle pareti e snellezza; parti con una complessità diversa in termini di condizioni di carico e supporto e in termini di requisiti di dimensionamento strutturale. I requisiti della progettazione bionica sono riassunti come pezzi con:

- Una vasta gamma di caratteristiche strutturali;
- Una gamma di diversi spessori delle pareti;
- Un grado variabile di complessità in termini di carico/supporto;
- Un grado variabile di complessità in termini di requisiti dimensionali (forza statica, rigidità, vibrazione, instabilità);
- Integrazione di più parti in una specificamente progettata in ALM o la progettazione di pezzi che soddisfino più funzioni;
- Assemblaggi che portino a ridurre il numero di pezzi riprogettando in ALM;
- Considerare le parti/assiemi che soddisfino più funzioni in modo da poter essere integrate in un singolo oggetto durante la riprogettazione. Dunque, sfruttare il potenziale bionico e ALM ancora prima di concentrarsi sugli aspetti strutturali.

1.3 Requisiti dei sistemi di controllo della qualità per pezzi in ALM

Lo sviluppo dei sistemi di controllo della qualità viene suddiviso in tre categorie: inline e in-process per la garanzia della qualità delle parti ALM in un ambiente di produzione controllato mentre in-service durante il funzionamento.

1.3.1 Requisiti per il controllo della qualità in-process

I sistemi di controllo della qualità in-process sono stati sviluppati per monitorare la qualità del pezzo durante lo stampaggio. Lo scopo della ricerca è di sviluppare una tecnologia, che esamini l'intero letto di polvere, e che sia capace di rilevare cricche, porosità e distorsioni del pezzo mentre viene costruito strato per strato. Per sviluppare e validare questa tecnologia, è importante utilizzare pezzi con elevate complessità strutturali. Le cricche possono, ad esempio, verificarsi a causa degli effetti dello stress termico nelle giunzioni di diverso spessore, mentre le distorsioni sono più comunemente presenti in pezzi con parti lunghi e sottili. Al fine di sviluppare un solido sistema di garanzia della qualità in-process, in grado di rilevare problemi differenti, l'artefatto selezionato dovrebbe possedere differenti spessori e snellezze nonché parti cave o a sbalzo. I requisiti del sistema di qualità in-process possono essere riassunti come:

- Misura adatta al banco di prova;
- Parti a pareti sottili in modo da controllare la risoluzione della misura;
- Parti a pareti spesse soggette a porosità;
- Parti cave o sporgenze per determinare l'influenza degli strati precedenti;
- Gradiente di spessore elevato incline alle cricche;
- Parti sottili e snelle soggette a distorsioni;
- Strutture di supporto estese.

1.3.2 Requisiti per il controllo della qualità in-line

Il sistema di controllo qualità in-line è, rispetto al sistema in-process, basato su un insieme di tecnologie completamente diverso: come sensori non a contatto, tastatori trigger a contatto e scanner a luce strutturata, che esaminano in 3D la qualità del pezzo stampato. Le diverse tecnologie prese in considerazione per i test in linea mirano a sviluppare un sistema di controllo che sfrutti una tecnologia molto più economica e veloce rispetto alla tecnologia non distruttiva della tomografia computerizzata. La cosa che accomuna tutte le tecnologie è che richiedono l'accesso alla superficie del pezzo, sia per il contatto visivo diretto per i sensori ottici che spazi liberi di accesso per i tastatori. Tali tecnologie possono quindi avere difficoltà a gestire differenti caratteristiche superficiali, superficie curve o free-form e anche strutture vuote o con cavità. Per sviluppare un sistema di controllo in-line completo, potrebbe essere necessario combinare diverse tecnologie. Per individuare meglio le caratteristiche che devono avere gli strumenti di misura, devono essere scelti artefatti che presentino una varietà di caratteristiche e complessità di progettazione in modo da poter garantire un sistema di controllo solido per l'ispezione di una vasta gamma di pezzi. I requisiti del sistema di qualità in-line possono essere riassunti come:

- Diversi spessore delle pareti (parti sottili, snelle, spesse o ingombranti);
- Differente grado di accesso alla superficie (accesso diretto, zone poco accessibili);
- Diversa curvatura della superficie (planare, curva);
- Diversi raggi di raccordo (da 3 4 *mm* fino a valori più grandi);
- Zone con diversa finitura superficiale (grezzo, pallinato, lucidato).

I sistemi di controllo in-line non hanno restrizioni per quanto riguarda le dimensioni del pezzo.

1.3.3 Requisiti per il controllo della qualità in-service

I sistemi per il controllo in-service, per le parti ALM installate nell'aeromobile, sono in via di sviluppo. Per ciò vengono prese in considerazione altre tecnologie, come i liquidi penetranti, la termografia, la visione artificiale e gli ultrasuoni. Per quanto riguarda le restanti caratteristiche, sia comuni tra le tecnologie che quelle che devono avere gli artefatti, sono analoghe alle tecnologie in-line.

1.4 Possibili impieghi per i pezzi realizzati in ALM

La tecnologia ALM all'interno di questo progetto viene utilizzata per la produzione e la fornitura di ricambi per aeromobili. In futuro si potranno avere diversi casi d'uso, alcuni dei quali vengono riportati di seguito.

- Sostituzione di un pezzo convenzionale con un pezzo di ricambio ALM: per questo uso non verrà eseguita alcuna riprogettazione dei pezzi, ma le capacità sviluppate devono consentire un processo di progettazione per la preparazione della produzione di pezzi ALM, per uno stampaggio e per un controllo della qualità efficienti;
- Sostituzione di un pezzo ALM con un nuovo ricambio ALM: uguali caratteristiche del caso precedente. Il pezzo ALM da sostituire può essere convenzionale o leggero appositamente ottimizzato per la produzione ALM (pezzo bionico);
- Riparazione di un pezzo danneggiato utilizzando la tecnologia ALM: l'utilizzo finale considera il caso in cui un problema di servizio può richiedere che un pezzo venga riparato anziché sostituito. Tale pezzo può in questo caso essere un pezzo convenzionale o un pezzo bionico ottimizzato specificatamente per ALM.

Un altro aspetto interessante dovrebbe essere quello di prendere in considerazioni pezzi ALM complessi che richiedono riparazioni direttamente dopo la stampa. Ciò consentirebbe di includere processi di riparazione durante la fase di collaudo, in questo modo un pezzo che non supera i controlli di qualità in-line potrebbe essere riparato in modo da garantire una consegna più rapida.

2 Additive Manufacturing

In questo capitolo vengono riportati alcuni concetti fondamentali riguardanti l'Additive Manufacturing. Tali informazioni sono necessarie per comprendere al meglio alcuni degli aspetti trattati in questo lavoro di tesi.

2.1 Prototipazione rapida

La tecnologia dell'Addtive Manufacturing è nata negli anni '90 per la produzione di prototipi, infatti inizialmente era nota come prototipazione rapida (*Figura 2.1*). La fase di prototipazione è molto importante in una linea di produzione, grazie ad essa si riescono a sviluppare soluzioni consentendo ai clienti di testare idee e fornire feedback durante il processo di sviluppo, da qui nasce il concetto di prototipo concettuale. Tuttavia, i prototipi possono anche servire per effettuare dei test sul prodotto, il materiale utilizzato può essere differente da quello finale. Quando il progetto del pezzo si associa alla tecnologia produttiva, il prototipo realizzato per valutazioni tecniche viene denominato prototipo tecnico.



Figura 2.1 Sviluppo storico che porta all'affermazione dell'Additive Manufacturing

La prototipazione rapida è ampiamente utilizzata per descrivere tecnologie che creano prototipi fisici direttamente da dati digitali. Il principio di base di questa tecnologia è che un modello, inizialmente generato utilizzando un sistema CAD 3D, può essere fabbricato direttamente senza la necessità di pianificare il processo. Il modello viene costruito in poche ore, senza bisogno di strumenti. È possibile costruire praticamente qualsiasi forma, il processo di realizzazione viene mostrato in *Figura 2.2*.

Capitolo 2-Additive Manufacturing



Figura 2.2 Fasi per la realizzazione del prototipo

Come mostrato nella *Figura 2.2* il processo di realizzazione del prototipo è suddiviso in più parti:

- Il modello viene orientato nello spazio, in modo da determinare la direzione di crescita e deve essere rappresentativo di tutte le superfici sia interne che esterne;
- Slicing: si "affetta" il modello solido con piani paralleli ma normali alla direzione di crescita;
- I piani saranno solitamente equidistanti e la distanza tra due piani consecutivi è pari allo spessore del layer. A seconda del pezzo da realizzare e della tecnologia utilizzata lo spessore del layer varierà tra 0,1 μm e 30 μm;
- L'intersezione tra l'oggetto virtuale ed i piani crea delle sezioni, ogni sezione includerà anche contorni e cavità interne, queste informazioni vengono passate alla macchina, sotto forma di file STL, di costruzione che realizza strato dopo strato il pezzo. Si parte dalla sezione più bassa per poi risalire fino ad avere il pezzo finito.

Il termine prototipazione rapida non descrive in modo efficace le applicazioni recenti della tecnologia. Molti pezzi sono direttamente prodotti sfruttando questa tecnologia, quindi non è più possibile etichettarli come "prototipi". Il termine adottato recentemente è Additive Manufacturing.

2.2 Processo di Additive Manufacturing

Per tutti i pezzi in Additive Manufacturing (AM) si inizia da un modello software che descrive completamente sia la geometria esterna che quella interna. Ciò può comportare l'utilizzo di quasi tutti i software di modellazione solida CAD, ma l'output dovrà necessariamente essere una rappresentazione 3D o di una superficie. Il CAD 3D dovrà essere realizzato in modo più preciso possibile, per precisione si intende che ad esempio le superfici devono essere congiungenti o che non ci devono essere superfici sovrapposte e irregolari. Una volta completo deve essere esportato ed importato nel software della macchina di produzione. Quasi ogni macchina AM accetta il formato di file STL, formato ormai standard per i processi additive, e quasi ogni sistema CAD può produrre un file di questo formato. Questo file descrive le superfici esterne ed interne presenti nel modello CAD originale e costituisce la base per il calcolo delle sezioni.

Nel file STL tutte le superfici (interne ed esterne) sono rappresentate con dei triangoli, come si può vedere in *Figura 2.3*, di conseguenza sarà una rappresentazione approssimata del file CAD. Il numero di triangoli dipenderà dalla complessità del pezzo, per una superficie complessa sono richiesti molti triangoli ma piccoli mentre per una superficie regolare pochi ma grandi. Il file finale STL sarà un file ASCII nel

quale vengono riportati, per ogni triangolo, il versore normale e le coordinate dei tre nodi ai vertici. Per tale motivo non si esegue una mesh uniforme del pezzo in modo da non appesantire il file.



Figura 2.3 Esempio di triangolazione non uniforme su file STL

Come tutte le volte che si esportano dei file si potranno avere degli errori, ciò può accadere anche per i file STL. Ci sono software che in automatico individuano e risolvono gli errori mentre altri in cui gli errori devono essere risolti manualmente. Gli errori più comuni che si possono verificare, come si può vedere in *Figura 2.4*, sono:

- Triangoli contigui che non si uniscono;
- Triangoli contigui con normali opposte, una verso l'esterno l'altra verso l'interno. Il verso della normale mi da un'informazione su dove depositare il materiale per la lavorazione, per tale motivo potrebbero sorgere problemi costruttivi;
- Triangoli intersecati o sovrapposti.



Figura 2.4 Errori comuni in un file STL in seguito ad un'esportazione del file

Una volta che è stato generato e verificato il modello STL esso verrà letto dal software della macchina additiva. Il software eseguirà tre differenti operazioni, inizialmente si deve definire l'orientamento del pezzo per la costruzione, decidendo così quale sarà

Capitolo 2-Additive Manufacturing

la direzione di costruzione. Dopo di che a seconda della tecnologia con cui viene realizzato il pezzo, possono essere richieste delle strutture di supporto. Infine, viene eseguito lo slicing ovvero la generazione delle sezioni. La macchina AM deve essere configurata correttamente prima del processo di costruzione. Si dovranno impostare parametri di costruzione come i vincoli di materiale, fonte di energia, spessore dello strato, i tempi, ecc. La costruzione del pezzo sarà un processo automatizzato e la macchina può, per la maggior parte del tempo, continuare a lavorare senza supervisione. In questa fase è necessario un monitoraggio superficiale per garantire che non si verifichino errori come l'esaurimento del materiale di costruzione, di alimentazione o del software. Una volta che la macchina AM ha completato il processo dovranno essere rimossi i pezzi dalla base di costruzione. Ciò potrebbe richiedere l'interazione con la macchina, che potrebbe avere interblocchi di sicurezza per garantire ad esempio che le temperature di funzionamento siano sufficientemente basse o che non vi siano parti in movimento. Una volta rimosso, il pezzo potrebbe richiedere una fase di pulizia aggiuntiva prima di essere pronto per l'uso. Si deve tener conto che in questa fase il pezzo potrebbe essere debole o avere delle strutture di supporto che devono essere rimosse. Per tale motivo, queste operazioni richiedono spesso tempo e una manipolazione attenta ed esperta. I pezzi possono richiedere un trattamento aggiuntivo prima di essere pronti, come ad esempio lavorazioni meccaniche o verniciatura. Possono anche dover essere assemblati insieme ad altri componenti meccanici o elettronici per formare un modello o un prodotto finale. L'intero ciclo per la realizzazione di un pezzo AM, che va dal modello CAD 3D al pezzo reale finito, viene mostrato nella *Figura* 2.5.



Figura 2.5 Fasi per la realizzazione di un pezzo in Additive Manufacturing

2.3 Strutture di supporto

Molte macchine di produzione additiva hanno bisogno di un mezzo per tenere in posizione geometrie non supportate durante la fabbricazione, un esempio è visibile in *Figura 2.6.* I supporti vengono generalmente realizzati e aggiunti al pezzo dal software del sistema e a seconda della tecnologia, potranno essere costituiti dallo stesso materiale del pezzo o da un materiale differente. Se la tecnologia non permette di utilizzare materiali differenti allora si lavora sulla geometria della struttura di supporto, per ridurre il costo finale si utilizzeranno geometrie frastagliate che genereranno una sorta di reticolo.



Figura 2.6 Utilizzo di supporti per la realizzazione di un pezzo in Additive Manufacturing

L'orientazione del pezzo nello spazio è un aspetto fondamentale nelle lavorazioni AM. Uno stesso pezzo ma con orientazioni diverse, avrà differenti caratteristiche superficiali e potrà richiedere l'utilizzo di strutture di supporto. Un esempio è riportato in *Figura 2.7*.



Figura 2.7 Differente orientamento del pezzo nello spazio nel processo AM

Solitamente se l'angolo di orientamento è inferiore ai 45° è necessario l'utilizzo delle strutture di supporto che possono servire ad aiutare il pezzo a superare il problema delle tensioni residue formatesi durante la realizzazione.

In riferimenti alla *Figura* 2.7, nel caso (a) il pezzo viene realizzato con asse verticale, come conseguenza dello slicing si avranno tanti cerchi. La distanza tra un cerchio è il successivo rappresenta lo spessore del layer, di conseguenza il pezzo sarà costituito da tanti cilindretti poggiati gli uni sugli altri. Inoltre, si ha che le caratteristiche del pezzo non richiedono l'utilizzo di strutture di supporto. Nel caso (b) il pezzo viene realizzato con asse obliquo, lo slicing produrrà tante ellissi di determinato spessore. Il pezzo viene ottenuto come l'insieme di tanti cilindri a base ellittica, in questo caso l'effetto scalino sarà presente sia nelle superfici laterali che nelle basi, inoltre il pezzo viene realizzato con asse orizzontale, lo slicing genererà rettangoli di larghezza via via crescente. Il pezzo sarà costituito da tanti parallelepipedi, l'effetto scalino sarà più accentuato che nei casi precedenti e dipenderà dallo spessore del layer e dalla dimensione finale del pezzo.

2.4 Vantaggi e svantaggi della realizzazione di pezzi con tecnologie Additive Manufacturing

Di seguito vengono riportati i maggiori vantaggi e svantaggi di questa tecnologia.

Vantaggi:

- Libertà di progettazione. Con questa tecnica di produzione strato su strato si hanno pochissimi vincoli sulla geometria, il progettista può progettare il componente pensando solamente alla sua applicazione finale;
- Si possono creare strutture alleggerite, pezzi con pelli di spessore variabile a seconda della sollecitazione oppure sostituire strutture piane con strutture reticolari;
- Si possono creare pezzi integrati, questo soprattutto quando si lavora con plastica e fotopolimeri in quanto per i pezzi in metallo è più complicato;
- Si possono creare componenti personalizzati soprattutto dal punto di vista anatomico (applicazioni biomediche);
- Si possono realizzare un numero elevatissimo di pezzi, che appartengono alla stessa famiglia, uno differente dall'altro;
- Con la stessa macchina si possono realizzare pezzi completamente differenti in quanto alla base del pezzo vi è il CAD, non vi è alcuna attrezzatura aggiuntiva per il singolo pezzo sulla macchina;
- Sono processi completamente automatici, richiedono la presenza di un operatore solo in fase di preparazione del file e per le lavorazioni finali;
- I tempi ed i costi di produzione non sono legati alla complessità della geometria del pezzo ma solo alla sua dimensione.

Svantaggi:

- Limite sulle dimensioni massime dei pezzi che si riescono a realizzare, tali restrizioni sono più elevate sui pezzi metallici rispetto a quelli plastici;
- Limite sulla produttività, tecniche che in realtà sono lente. A seconda delle dimensioni del pezzo ci possono volere da qualche ora a qualche giorno;

- Limitazioni su materiali e colori, esistono molti fotopolimeri mentre per i metalli il campo è abbastanza limitato. I colori dei materiali di base sono ridotti ma i pezzi possono essere colorati a processo ultimato;
- I materiali sono molto costosi in particolar modo quelli metallici, basta pensare che 1 kg di polvere di alluminio costa circa 170 \in mentre di titanio 500 \in ;
- Problema di finitura superficiale dovuto all'effetto a scalino che conferisce una rugosità superficiale rilevante, per cui se si vuole ridurre tale caratteristica si dovranno eseguire ulteriori lavorazioni sul pezzo.

2.5 Selective Laser Melting

Il Selective Laser Melting (SLM) è uno dei processi di fusione del letto di polvere, è stato uno tra i primi processi AM ad essere commercializzato. Tali processi condividono un insieme di caratteristiche base, includono una o più fonti termiche per indurre la fusione tra le particelle di polvere, un metodo per controllare la fusione della polvere in una regione prescritta e meccanismi per aggiungere e livellare strati di polvere.

SLM fonde sottili strati di polvere (in genere ~0,1 mm di spessore) che sono stati distribuiti nell'area di costruzione utilizzando un rullo livellatore. Il processo di costruzione dei pezzi avviene all'interno di una camera chiusa riempita con azoto per ridurre al minimo l'ossidazione e la degradazione delle polveri. La polvere nella piattaforma di costruzione viene mantenuta a temperatura elevata appena al di sotto del punto di fusione, questa temperatura uniforme all'interno della piattaforma di costruzione è necessaria per ridurre al minimo la potenza richiesta dal laser del processo. Come si può vedere in Figura 2.8, un raggio laser in fibra viene indirizzato sul letto di polvere e viene spostato utilizzando i galvanometri in modo tale da fondere a caldo il materiale per formare le varie sezioni, la polvere circostante rimane sciolta e serve da supporto per gli strati successivi. Dopo aver completato uno strato, la piattaforma di costruzione viene abbassata di una quantità pari allo spessore e un nuovo strato di polvere viene posato e livellato. Questo processo si ripete fino a quando non viene creato il pezzo completo. In genere, è necessario un periodo di raffreddamento per consentire ai pezzi di raggiungere uniformemente una temperatura sufficientemente bassa o possono anche essere sottoposti a trattamenti termici per alleviare le tensioni residue.



Figura 2.8 Rappresentazione di un sistema SLM

3 Metodi di scansione 3D

In questo capitolo vengono introdotti i metodi di misura non a contatto con un approfondimento sulla tecnica a luce strutturata. Viene approfondita tale tecnica in quanto come si potrà vedere nei capitoli successivi, lo strumento utilizzato per la realizzazione dei test sperimentali sfrutta questa particolare tecnica.

I metodi per l'acquisizione di immagini 3D, attualmente in circolazione, sono molti ed ognuno si basa su un concetto di funzionamento completamente diverso. In questo paragrafo verranno accennati solo i metodi che si basano su principi ottici. Come si può vedere dalla *Figura 3.1*, vengono tipicamente classificati in passivi e attivi.



Figura 3.1 Classificazione dei metodi di misura a distanza

Il termine passivo si riferisce ad una misura 3D non a contatto per mezzo di una radiazione (solitamente, ma non necessariamente, nello spettro visibile) già presente nell'ambiente di misura. I sistemi di visione stereoscopica sono il classico esempio di metodi appartenenti a questa famiglia. Invece il termine attivo si riferisce ad una misura 3D non a contatto ottenuta proiettando una qualche forma di radiazione nell'ambiente di misura, come viene fatto per esempio per i sensori a luce strutturata e a tempo di volo.

3.1 Luce strutturata, acquisizione di immagini 3D di superfici

Il termine "acquisizione di immagini 3D", come definito in [1], si riferisce a tecniche che sono in grado di acquisire dati 3D, cioè, valori di alcune proprietà di un oggetto 3D, come la distribuzione della densità o una funzione di coordinate 3D (x, y, z).

L'acquisizione di immagini di superfici si occupa della misurazione delle coordinate di punti sulla superficie di un oggetto e visto che è, in generale, non planare viene descritta in uno spazio 3D.

Il risultato della misura può essere considerato una mappa di profondità *z* come funzione della posizione (x, y) in un sistema di coordinate Cartesiano, e può essere espresso in forma matriciale $\{z_{ij} = (x_i, y_j), i = 1, 2, ..., L, j = 1, 2, ..., M\}$.

Una più generale acquisizione di immagini 3D di superfici è in grado di acquisire un valore scalare, come la riflettività di una superficie, associata ad ogni punto della superficie non planare. Il risultato è una nuvola di punti { $P_i = (x_i, y_i, z_i, f_i), i = 1, 2, ..., N$ }, dove f_i rappresenta il valore dell'i-esimo punto della superficie nella serie di dati. Similmente, un'immagine a colori di superficie è rappresentata da { $P_i = (x_i, y_i, z_i, r_i, g_i, b_i), i = 1, 2, ..., N$ }, dove il vettore (r_i, g_i, b_i) rappresenta le componenti di colore rosso, verde e blu associate all'i-esimo punto della superficie.

Uno dei metodi, principalmente usato, per l'acquisizione di immagini 3D di superfici è basato sull'utilizzo della "luce strutturata". Cioè l'illuminazione attiva della scena con un pattern di intensità spaziale 2D appositamente progettato. Come illustrato in *Figura 3.2*, l'illuminazione spazialmente variabile è generata da un proiettore o da una sorgente luminosa modulata da un modulatore di luce spaziale.



Figura 3.2 Configurazione adottata per una scansione con strumento a luce strutturata

L'intensità di ogni pixel sul pattern di luce strutturata è rappresentata da un segnale digitale $\{I_{ij} = (i, j), i = 1, 2, ..., I, j = 1, 2, ..., J\}$, dove (i, j) rappresenta le coordinate (x, y) del pattern proiettato.

Un sensore per l'acquisizione di immagini (ad esempio una videocamera) viene utilizzato per l'acquisizione di un'immagine 2D della scena sotto l'illuminazione della luce strutturata. Se la scena è una superficie planare senza alcuna deviazione 3D, il pattern visibile nell'immagine acquisita è simile a quello proiettato. Tuttavia, quando la superficie è non planare, la forma geometrica distorce il pattern proiettato visto dalla telecamera. Il principio di questa tecnica consiste nell'estrarre la forma della superficie 3D in base alle informazioni fornite dalla distorsione del pattern proiettato. È possibile calcolare con precisione i profili della superficie 3D degli oggetti presenti nella scena utilizzando diversi principi e algoritmi.

Come mostrato in *Figura 3.2,* la relazione geometrica tra un sensore per l'acquisizione delle immagini, un proiettore a luce strutturata e un punto della superficie di un oggetto può essere espressa tramite il principio di triangolazione (3.1).

$$R = B \frac{\sin \theta}{\sin(\alpha + \theta)} \tag{3.1}$$

In *Figura 3.3* viene rappresentato il principio di funzionamento della luce strutturata. Viene illuminata la superficie di un oggetto 3D arbitrario attraverso un proiettore di pattern a luce strutturata. In questo particolare caso, il pattern di luce strutturata è uno spettro cromatico. Un sensore di immagini a colori acquisisce l'immagine della superficie dell'oggetto sotto l'illuminazione della luce strutturata. L'immagine catturata dal sensore varia al variare della forma geometrica dell'oggetto che può essere rilevata con precisione, sulla base della distorsione del pattern vista sull'immagine rilevata rispetto alla proiezione non distorta del pattern.



Figura 3.3 Principio di funzionamento della luce strutturata

È chiaro che un sistema con due fotocamere C1 e C2 e un proiettore A, come mostrato in *Figura 3.4*, è una variante di un sistema a luce strutturata mediante il quale le coordinate del punto *P* possono essere ottenute attraverso il metodo della triangolazione. Infatti, *P* può essere calcolato mediante triangolazione sulla base dei punti $p_{C1} e p_{C2}$, i punti $p_{C1} e p_A$ o i punti $p_{C2} e p_A$.



Figura 3.4 Rappresentazione di un sistema a luce strutturata con due telecamere e un proiettore

Esistono numerose tecniche per l'acquisizione di immagini tramite luce strutturata, possono essere classificate in due diverse categorie: sequenziali (multiple-shot) o single-shot, come illustrato schematicamente in *Figura 3.5*. Se l'oggetto analizzato è statico e l'applicazione non impone un vincolo rigoroso sul tempo di acquisizione, possono essere usate le tecniche multiple-shot che spesso forniscono risultati più affidabili e accurati. Mentre, se l'oggetto si sta muovendo, devono essere usate le tecniche single-shot in modo da acquisire un'immagine della superficie 3D in un particolare istante di tempo.



Figura 3.5 Classificazione delle varie tecniche a luce strutturata

3.2 Pattern binario e codifica Gray

La codifica binaria sfrutta bande bianche e nere in modo da formare una sequenza di pattern che vengono proiettati sulla scena, così ogni punto sulla superficie dell'oggetto possiede un codice binario univoco che differisce dai codici di punti differenti. In generale, *N* pattern possono codificare 2^N bande. In *Figura 3.6* viene mostrato un pattern semplificato a 5-bit. Una volta che questa sequenza di pattern viene proiettata nella scena, ci saranno $32 (= 2^5)$ aree con una codifica differente. Le coordinate 3D (*x*, *y*, *z*) possono essere determinate (per mezzo del principio di triangolazione) per tutti i 32 punti lungo ogni linea orizzontale, in modo da comporre un'intera struttura di immagine 3D.



Figura 3.6 Sequenza di pattern con codifica binaria per acquisizione di immagini 3D

La tecnica di codifica binaria è molto affidabile e meno sensibile alle caratteristiche della superficie, poiché esistono solo valori binari in tutti i pixel. In ogni modo, per ottenere elevati valori di risoluzione, bisogna proiettare un elevato numero di pattern e inoltre tutti gli oggetti nella scena devono rimanere fermi. La durata dell'intera acquisizione delle immagini 3D può essere più lunga di una qualunque altra acquisizione 3D.

La codifica Gray, essendo anch'essa una codifica binaria, possiede bande di due colori, nella maggior parte dei casi bianco e nero in quanto facilmente distinguibili. Le bande possono essere disposte orizzontalmente o verticalmente e solitamente si tende a raddoppiare lo spessore della banda durante la sequenza di proiezione.

Differentemente dal classico codice binario quello gray ha la particolarità (*Figura 3.7*) che nel passare da un numero al successivo si avrà il cambiamento di un solo bit per volta, praticamente questo sta a significare che se si verifica un equivoco in fase di codifica o decodifica di un pixel, l'errore commesso sarà sicuramente più piccolo rispetto allo stesso in codifica binaria semplice.



Figura 3.7 Codifica Gray

3.3 Pattern a livelli di grigio

I pattern a livelli di grigio sono stati sviluppati per ridurre il numero di pattern necessari ad ottenere un'elevata risoluzione dell'immagine 3D. Ad esempio, si possono usare *M* differenti livelli di intensità (invece dei soli due presenti nel codice binario), come si può vedere nella *Figura 3.8* per realizzare una codifica dei pattern proiettati. In questo caso, *N* pattern possono codificare M^N bande. Per esempio, se N = 3, e M = 4, il numero totale di bande codificate è 64 (= 4³) numero che si sarebbe ottenuto con la codifica binaria utilizzando 6 pattern.



Figura 3.8 Sequenza di pattern con codifica a livelli di grigio per acquisizione di immagini 3D

3.4 Pattern sinusoidali

Un set di pattern sinusoidali viene proiettato sulla superficie dell'oggetto da analizzare (*Figura 3.9*). Le intensità di ogni pixel (x, y), dei tre pattern proiettati, sono descritte nel seguente set di equazioni (3.2).

$$I_{1}(x, y) = I_{0}(x, y) + I_{mod}(x, y) \cos(\phi(x, y) - \theta)$$

$$I_{2}(x, y) = I_{0}(x, y) + I_{mod}(x, y) \cos(\phi(x, y))$$

$$I_{3}(x, y) = I_{0}(x, y) + I_{mod}(x, y) \cos(\phi(x, y) + \theta)$$
(3.2)

dove $I_1(x, y)$, $I_2(x, y)$ e $I_3(x, y)$ sono le intensità dei tre pattern, $I_0(x, y)$ è il DC offset, $I_{mod}(x, y)$ è la modulazione del segnale in ampiezza, $\phi(x, y)$ la fase e θ è l'angolo di sfasamento.



Figura 3.9 Esempio di set di pattern sinusoidali

Il phase unwrapping è il processo che converte la fase wrapped nella fase assoluta, l'informazione di fase $\phi(x, y)$ può essere recuperata dalle intensità dei tre pattern.

Le coordinate 3D (x, y, z) possono essere calcolate in base alla differenza tra la fase misurata $\phi(x, y)$ e il valore della fase rispetto ad un piano di riferimento. La *Figura 3.10* illustra la configurazione adottata per la misura, attraverso l'equazione (3.3) o (3.4) si potrà estrarre la profondità dell'oggetto analizzato:

$$\frac{Z}{L-Z} = \frac{d}{B} \quad oppure \quad Z = \frac{L-Z}{B}d \tag{3.3}$$

semplificando l'equazione precedente si ottiene:

$$Z \approx \frac{L}{B} d \propto \frac{L}{B} (\phi - \phi_0) \tag{3.4}$$



Figura 3.10 Calcolo della profondità Z in base al valore della fase per pattern sinusoidali

3.5 *Metodo ibrido: Sfasamento + codifica Gray*

Ci sono due problemi principali con la tecnica dello sfasamento: i metodi unwrapping forniscono solo un unwrapping relativo e non risolvono la fase assoluta. Se due superfici hanno una discontinuità di più di 2π , allora nessun metodo basato sull'unwrapping potrà analizzare correttamente le superfici. Questi problemi, spesso chiamati "ambiguità", possono essere risolti usando la combinazione della codifica Gray e della tecnica dello sfasamento. In *Figura 3.11* è mostrato un esempio di combinazione tra la proiezione a livelli di grigio e tecnica dello sfasamento in una sequenza di 32 bande codificate. Il codice Gray determina un range assoluto di fase senza alcuna ambiguità, mentre lo sfasamento offre una risoluzione che va oltre le bande fornite dalla codifica Gray. Tuttavia, i metodi ibridi richiedono un maggior numero di proiezioni e non sono adatte per l'acquisizione di immagini 3D di oggetti in movimento.



Figura 3.11 Combinazione della codifica a livelli di grigio e tecnica dello sfasamento

4 Campioni per i test: Bamboo Bracket

In questo capitolo viene descritto nel dettaglio il pezzo utilizzato per i vari test. Verranno approfondite le sue caratteristiche ed eventuali utilizzi.

L'oggetto utilizzato come campione di prova deve avere le seguenti caratteristiche da considerare nelle attività di benchmarking:

- Deve essere progettato utilizzando principi bionici, poiché la sfida principale è la combinazione di superfici funzionali e superfici free-form;
- Devono essere imposte delle tolleranze: dovrebbero essere definite le specifiche funzionali in modo da sviluppare di conseguenza un piano di misura adatto;
- Deve essere disponibile in diverse fasi di produzione dopo che è stato completamente realizzato con il processo ALM, dal momento che l'obiettivo dell'analisi è anche di comprendere la fase in cui eseguire il controllo in-line o parte di esso durante il processo di produzione.

Considerando questi requisiti si è ritenuto adatto un pezzo il cui nome convenzionale è "Bamboo Bracket", nella *Figura 4.1* si può vedere il modello CAD. Il modello ed il CAD sono stati forniti da un partner del progetto Laser Zentrum Nord LZN, ma non è stata data alcuna informazione né per lo scopo del pezzo né per le tolleranze da applicare alle sue caratteristiche, per tale motivo è stato necessario fare delle ipotesi per entrambi gli aspetti.



Figura 4.1 Modello CAD del Bamboo Bracket

Come si può vedere il design è sia prismatico che bionico: i "braccetti" a forma di bamboo (in quanto cavi) collegano due superfici planari con fori su di esse in modo da fissare altre parti possibilmente con viti filettate. I braccetti sono completamente freeform, come probabile risultato, di un'ottimizzazione topologica. Non è disponibile un disegno 2D in quanto non completamente sufficiente per la misura come se l'intera forma dei braccetti avesse uno scopo funzionale. Il modello CAD completo è invece disponibile in quanto è necessario per l'analisi del pezzo utilizzando i sistemi di misura sia a contatto che non. La struttura interna, come detto in procedenza, è vuota, anche se questa osservazione non è rilevante da un punto di vista geometrico lo è considerando la totalità dei controlli in-line inclusa dunque la verifica della struttura interna grazie all'utilizzo di sensori a Eddy current e a ultrasuoni.

4.1 Ipotesi sull'utilizzo e specifiche

Lo scopo del pezzo è chiaro: collegare due superfici ortogonali come mostrato in *Figura* **4.2**, ma i requisiti funzionali non possono essere definiti in modo univoco. Per tale motivo sono state elaborate altre ipotesi per poter definire alcune tolleranze che il pezzo dovrebbe avere.



Figura 4.2 Rappresentazione di un possibile utilizzo del Bamboo Bracket

La prima ipotesi sull'uso funzionale del pezzo è che ad esso vengono applicate solo forze statiche come il suo peso o quello della struttura che sta reggendo, quindi non vi sarà alcun coinvolgimento dello stress a fatica. In questo caso i requisiti rappresentati nel disegno sono correlati principalmente a caratteristiche geometriche tali per cui si assicura il corretto montaggio del pezzo.

La seconda ipotesi è che il componente sia utilizzato come supporto per una struttura rotante (ad esempio un motore rotativo), quindi soggetto oltre che al peso proprio di quest' ultima anche a una componente alternata dovuta a un carico rotante. In questo caso sarà richiesta sia resistenza statica che a fatica. Rispetto all'ipotesi precedente potrebbero essere necessarie tolleranze più strette, poiché la non perfetta circolarità di un foro potrebbe essere sede di cricche e limitare la resistenza a fatica del componente. Ad esempio, riferendoci alla **Figura 4.3** se $b \neq a$ si ha un incremento degli sforzi.



Figura 4.3 Schematizzazione che serve a mostrare il comportamento a fatica

La seconda ipotesi richiede una conoscenza più approfondita sull'utilizzo del pezzo, in particolare dei livelli e della distribuzione dello stress. Per avere una definizione quantitativa delle tolleranze, il controllo potrebbe partire da assunzioni completamente sbagliate. Per la prima ipotesi, d'altro canto, le tolleranze possono essere definite in modo più realistico così come la lavorazione da eseguire dopo che il pezzo ha lasciato la camera di costruzione della macchina ALM. Infatti, è chiaro che il pezzo necessita di ulteriori fasi di lavorazione dopo la sua realizzazione, alcune potrebbero essere:

- Il pezzo richiede di essere rimosso dalla base di costruzione usando, ad esempio, l'elettroerosione a filo;
- Generalmente, le strutture di supporto devono essere rimosse dalle superficie esterne ed interne;
- Le due superfici necessitano di alcune lavorazioni di finitura, così come i fori su di esse che richiedono la rimozione dei supporti interni e di conseguenza l'operazione di perforazione di finitura;
- La superficie esterna del pezzo è molto ruvida mentre le applicazioni aerospaziali richiedo superfici più lisce in modo da diminuire le possibilità di generazione di crepe superficiali.

Tenendo conto di queste considerazioni, è stato realizzato da Hexagon Manufacturing Intelligence una nuova tavola del Bamboo Bracket completa con tolleranze imposte facendo riferimento alla prima ipotesi (*Figura 4.4* e *Figura 4.5*). Inoltre, il disegno si riferisce alla fase di produzione successiva al processo di costruzione, ma prima di eventuali lavorazioni. In questo modo si può realizzare il controllo in-line verificando la conformità del pezzo il prima possibile per evitare di impiegare tempo e sforzi su pezzi che verranno in ogni caso scartati.



Figura 4.4 Definizione delle tolleranze del Bamboo Bracket in riferimento alla prima ipotesi



Figura 4.5 Tavola completa del Bamboo Bracket realizzata da Hexagon Manufacturing Intelligence
4.2 Definizione dei pezzi di prova

I diversi Bamboo Bracket sono stati realizzati con la tecnica del Selective Laser Melting (SLM) utilizzando una polvere in lega di alluminio AlSiMg10 dal partner di progetto LZN. È stato prodotto un totale di sette staffe con specifiche diverse per quatto gruppi di esse:

- A. Tre staffe con tutte le strutture di supporto rimosse e la superficie trattata con pallinatura;
- B. Una staffa con le strutture di supporto rimosse ma senza alcun trattamento superficiale dopo la realizzazione e la rimozione dei supporti;
- C. Una staffa con le strutture di supporto rimosse, superficie trattata con pallinatura e difetti interni (utile per il controllo in-line con ultrasuoni o Eddy current) ma con uno spessore del singolo strato inferiore rispetto a quello utilizzato nella realizzazione del primo gruppo di staffe. In questo modo la superficie risulta essere differente da quella degli altri pezzi;
- D. Due staffe alla fine del processo di costruzione, con tutte le strutture di supporto in posizione e senza alcun trattamento superficiale. Una con le stesse dimensioni delle altre la seconda, non utilizzata nel controllo della qualità, più piccola e con struttura interna parzialmente esposta.

Di seguito viene rappresentata una tabella (*Tabella 4-1*) nella quale sono riportati i nomi assegnati alle staffe appartenenti ad ogni singolo gruppo:

Gruppo	Nome pezzo
	BB_P_1
Δ.	BB_P_2
A	BB_P_3
В	BB_NP_1
С	BB_D_1
D	BB_S_1
D	BB_S_2

La panoramica dei Bamboo Bracket può essere osservata in *Figura 4.6* per il gruppo A e B, in *Figura 4.7* per il gruppo C mentre la *Figura 4.8* mostra il gruppo D.



Figura 4.6 Campioni di prova appartenenti al gruppo B (staffa sulla sinistra) e al gruppo A (altre tre staffe)



Figura 4.7 Campioni di prova appartenente al gruppo C



Figura 4.8 Campioni di prova appartenenti al gruppo D

Capitolo 4-Campioni per i test: Bamboo Bracket

I gruppi A, B e C avendo una differente finitura superficiale vengono utilizzati per confrontare i sistemi di misurazione rispetto alle caratteristiche metrologiche di accuratezza in condizioni di ripetibilità e riproducibilità. Inoltre, le staffe del gruppo B hanno il compito di testare i comportamenti degli strumenti, principalmente quelli tattili, nella misurazione di superfici non lavorate e ruvide. Il gruppo C è stato concepito per verificare la capacità del sistema di misurazione ottica di rilevare i difetti subito dopo che il pezzo viene completato e quindi prima di ogni qualsiasi altra lavorazione. Se può essere identificato un difetto (parti mancanti, strutture tese, crepe) sulle strutture di supporto anche prima di rimuovere il pezzo dalla piastra di costruzione, questo sarebbe molto utile per ridurre il costo di produzione in quanto si eviterebbero una serie di possibili lavorazioni. Per testare quest'ultimo aspetto, è stata sollecitata manualmente una struttura di supporto in modo da avere una crepa nella connessione con il pezzo come mostrato in *Figura 4.9*.



Figura 4.9 Crepa indotta nella struttura di supporto su uno dei pezzi appartenenti al gruppo C

Nella logica di avere un controllo qualità in grado di scartare le parti guaste il più presto possibile nel flusso di produzione, come detto in precedenza, si è pensato di determinare l'integrità delle strutture di supporto. Come si può vedere in *Figura 4.10*, il reticolo della struttura di supporto non viene riconosciuta in modo ottimale dal sensore a luce strutturata. Questo accade in quanto le finiture sono troppo piccole per il campo di vista dello strumento utilizzato. Per avere un'analisi completa di queste caratteristiche è opportuno utilizzare un sensore con un campo di vista delle ottiche più piccolo.



Figura 4.10 Scansione delle strutture di supporto con sensore a luce strutturata

5 La Rugosità Superficiale

Questo capitolo ha due scopi: il primo è quello di fungere da richiamo teorico per alcuni aspetti fondamentali riguardo la rugosità superficiale approfondendo come essa sia influenzata dal processo di produzione Additive Manufacturing. Il secondo è quello di riportare i test di rugosità eseguiti sui pezzi al fine di riuscire ad avere una misura della rugosità dei Bamboo Bracket appartenenti ai vari gruppi, valori che serviranno per l'analisi dei dati per i test successivi.

5.1 Introduzione alla Rugosità Superficiale

Le varie superfici dei pezzi presentano delle irregolarità micro-geometriche, ovvero delle differenze tra la superficie teorica e quella reale. Le irregolarità possono generarsi in modo del tutto casuale, ciò accade per lo più nei processi di fusione o sabbiatura, oppure presentare un andamento specifico tipico delle lavorazioni ad asportazione di truciolo. Per determinare la rugosità si può pensare di sezionare la superficie con un piano, detto piano di rilievo, ad essa ortogonale. L'intersezione tra la superficie reale ed il piano di rilievo viene definita profilo reale, questi concetti sono rappresentati in *Figura 5.1*.



Figura 5.1 Schematizzazione del processo di determinazione della rugosità superficiale

Per il calcolo della rugosità viene utilizzato uno strumento chiamato rugosimetro che rileva le irregolarità della superficie riportandole graficamente sul suo display. Il risultato finale ottenuto sarà un profilo del tipo di quello mostrato in *Figura 5.2,* la lunghezza di base L è dell'ordine di qualche millimetro.



Figura 5.2 Rappresentazione di profilo ottenuto tramite rugosimetro

5.2 Rugosità R_a

Quando si parla di rugosità nella maggior parte dei casi ci si riferisce a quella indicata con il simbolo R_a e viene misurata in μm . Il calcolo della rugosità viene effettuato su una lunghezza L_n definita lunghezza di valutazione pari a cinque volte la lunghezza di base L che a sua volta dipende dal valore previsto della rugosità secondo la **Tabella** 5-1 indicata dalla norma ISO 4288:

Rugosit	à attesa in um	Lunghezza di base <i>L</i> in <i>mm</i>	Lunghezza di valutazione L_n in
oltre a	fino a		mm
0,006	0,02	0,08	0,4
0,02	0,1	0,25	1,25
0,1	2	0,8	4
2	10	2,5	12,5
10	80	8	40

Tabella 5-1 Relazione tra la lunghezza di base e la rugosità attesa

Per determinare la rugosità R_a viene utilizzato come riferimento la linea media del profilo per la quale è minima la somma delle distanze al quadrato dei punti del profilo della stessa linea, si può fare riferimento alla *Figura 5.3*.



Figura 5.3 Determinazione della linea media di riferimento per il calcolo della rugosità

Assumendo come asse delle ascisse la linea media del profilo, si può definire il parametro di rugosità come il valore medio (espresso in μm) delle ordinate $(y_1, y_2, ..., y_n)$ del profilo rilevato rispetto alla sua linea media. Si può esprimere la rugosità, sfruttando la precedente definizione, nell'insieme continuo come mostrato nell'equazione (5.1).

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| \, dx \tag{5.1}$$

Mentre nell'insieme discreto vale l'equazione (5.2).

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |y_i|$$
(5.2)

La rugosità così definita è un valore medio che però non specifica la tipologia di irregolarità, ad esempio: pochi picchi elevati potrebbero generare lo stesso effetto di molti picchi più bassi. Per tale motivo vengono utilizzati anche altri metodi per capire meglio lo stato della superficie.

La rugosità varia a seconda delle diverse lavorazioni, alcune di esse sono rappresentate in *Figura 5.4*. Come si può osservare per ogni lavorazione, i possibili risultati stanno all'interno di un intervallo abbastanza ampio e questo dipende principalmente dalle caratteristiche di ogni singola lavorazione. Sostanzialmente dipendono sia dalla lavorazione che dalle condizioni di impiego.

	Metodi di fabbricazione							Rug	osità	Ra in	μm					
Gruppo	Descrizione	9000	0,000	0,012	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50
	Colata in sabbia			Τ											的言葉	
one	Colata in conchiglia o in guscio											1	na in			3057 gt
isn	Pressofusione									450			12:33(2)	126522	<u>6</u> 90	
ш.	Microfusione															
	Stampaggio al maglio, fucinatura										and the second second					
Ira	Laminazione, rullatura					25121	Circles and	-26-5	No.							
latt	Imbutitura profonda								-		inter h	Carlo Ca				
oru	Estrusione										-		20032			
ш.	Coniatura								-							
	Laminazione dei profilati									20010151			and a second	200		
	Troncatura										100			ikis I		
	Tornitura cilindrica								-	No.	and and			123	The same	
	Tornitura di sfacciatura										C SK		75.56	10 P. 1 A		
	Tornitura di gole										T	-	1778×1			
	Piallatura								1000	Contraction of the	1010	R				
	Limatura a macchina										10.20	- Status	and the second			
	Sbarbatura									COLUMN TWO IS NOT	1000	1000	1			
	Foratura											-	2-1933		-	
ale	Alesatura							ALC: NO.		and the second	1000	Real Party	Che Che			
teri	Allargatura										-	140				
ma	Lisciatura								10000		1		_			
ē	Fresatura periferica tangenziale e frontale											e la sel	a state of the			
one	Brocciatura									-	SIG	5.5	121212			
azic	Rettifica cilindrica					-	TANK NOT	1			-					
out	Rettifica di sfacciatura					T		100	SS SS		20					
Asp	Rettifica cilindrica a tuffo								No.							
	Rettifica Front. piana, e tang. circonferenz. piana								California de	STREET.	1000	and the second				
	Levigatura				and a local distance		No.				Т					
	Smerigliatura					S120450	C 25 4 5 1 1		103	Sector .						
	Superfinitura				5. Pa 478	STARS.			T							
	Lappatura di piani e cilindrica			CANCER.	Section.	100		ALC: NOT	Paral News							
	Lavorazione a ultrasuoni				2622			100			T					
	Lucidatura		教 会で14													
	Barilatura				1990	-	A									

Figura 5.4 Valori tipici di rugosità per diverse tipologie di lavorazione

5.3 Rugosimetro

Il rugosimetro è uno strumento a contatto che misura la rugosità. La sua punta è dotata di uno stilo che, creando un contatto diretto con il campione, traccia la superficie e rileva elettricamente il movimento verticale dello stilo. I segnali elettrici vengono registrati ma prima devono essere sottoposti ad un processo di amplificazione e conversione digitale. Una rappresentazione schematica dell'acquisizione dei dati viene mostrata in *Figura 5.5*.



Figura 5.5 Schematizzazione di un rugosimetro a contatto con la superficie

Per misurare con precisione le superfici più sensibili e la rugosità con un rugosimetro a contatto, il raggio della punta dello stilo deve essere il più piccolo possibile e con una bassa pressione di contatto. Gli stilo vengono realizzati in zaffiro o diamante ed il loro raggio di punta è solitamente di 10 μ m o meno, per uno stilo è considerata ideale una forma conica con punta a sfera.

5.3.1 Vantaggi e svantaggi nell'utilizzo del rugosimetro

I rugosimetri a contatto forniscono misurazioni affidabili dato che entrano direttamente a contatto con il campione. Tuttavia, il contatto diretto con un campione ha spesso molti svantaggi, come descritto di seguito.

I vantaggi possono essere:

- Chiaro profilo d'onda;
- Capacità di misurare lunghe distanze.

Mentre gli svantaggi:

- Usura dello stilo;
- La pressione di misurazione può causare graffi sulla superficie del campione;
- Incapacità di misurare pezzi viscosi;
- Misura limitata dal raggio della punta dello stilo;
- Richiede tempo;
- Difficoltà nel posizionamento e identificazione di punti per misurazioni su superfici freeform.

Particolare attenzione deve essere prestata all'usura dello stilo. Sui rugosimetri a contatto lo stilo deve essere lucidato dato che la punta si consuma nel tempo. La modalità di usura (come si può vedere in *Figura 5.6*) varia, quindi la punta dello stilo può diventare piatta o arrotondata a seconda del materiale e della forma dell'oggetto misurato. Diverse forme dello stilo generano naturalmente diversi profili d'onda. Per la valutazione dell'usura esistono pezzi campione appositi che permettono di confrontare il profilo del pezzo prima e dopo l'usura dello stilo.



Figura 5.6 Differenza della misura dovuta all'usura dello stilo

Capitolo 5-La Rugosità Superficiale

Infine, si ha che la misura può essere limitata dal raggio della punta dello stilo. Poiché la punta è sferica, lo stilo non può tracciare correttamente la forma se la larghezza della scanalatura (graffio, ecc.) è più piccola del raggio della punta dello stilo, vedi *Figura* 5.7.



Figura 5.7 Relazione tra dimensione della sfera e della scanalatura

5.4 Rugosità dei pezzi in metallo realizzati in Additive Manufacturing

Nei processi Additive Manufacturing (AM), il tempo richiesto per la costruzione di un oggetto dipende da un elevato numero di fattori. Quanto sottili devono essere gli strati di rivestimento? Quanta sovrapposizione è richiesta per ogni passata di scansione? La distanza tra i pattern è legata direttamente alla potenza del raggio e alla velocità di costruzione. Se c'è troppa distanza tra i percorsi di scansione si rischia di non fondere completamente una traccia alla successiva. Invece, con una distanza ridotta tra le tracce si rischia un eccessivo accumulo di calore e si aumenta il tempo di costruzione. Altri fattori possono essere la dimensione, il peso e l'inerzia dei sistemi meccanici utilizzati per spargere la polvere o per articolare l'hardware di deposizione del materiale. Vi sono alcuni processi che mirano o ad aumentare la velocità di costruzione incorporando più laser scanner o fonti di calore multiple o a ridurre il tempo di diffusione dello strato di polvere.

Gli oggetti realizzati con polvere fusa, come descritto in [2] hanno una finitura superficiale che risente della polvere parzialmente fusa e tracce della fusione a strati come mostrato per i pezzi costruiti con i processi di Selective Laser Melting (SLM) e Electron Beam Melting (EBM) in *Figura 5.8*.



Figura 5.8 Finitura superficiale per pezzi in SLM e EBM

In un modo o nell'altro, le variazioni di superficie tipiche della deposizione AM di una traccia fusa alla successiva o uno strato costruito sopra l'altro causeranno una superficie irregolare comunemente indicata come "effetto scalino" (*Figura 5.9*). La rugosità della superficie per SLM può essere compresa nell'intervallo di 7,5 – 15,5 μm e 20,5 – 25,5 μm per EBM. Le caratteristiche superficiali risultanti dalla deposizione del filo fuso porteranno alla formazione di perline di materiale sovrapposte all'effetto a scalino caratteristico del tipo di materiale, dimensione del filo e condizioni di deposizione. Una grande base di fusione con corrispondenti alte percentuali di deposizione determinerà caratteristiche e superfici di deposizione grossolane. La fluidità dei metalli può variare ampiamente e cambierà la conformazione della base di fusione e il deposito finale, ciò influenzerà anche le condizioni della superficie. Comprendendo tutto ciò, i produttori offrono dimensioni di diametro della polvere più piccole che consentono l'uso di strati di polveri più piccoli.



Figura 5.9 Effetto scalino su pezzi in Additive Manufacturing

I sistemi AM più innovativi offrono due tipi di deposizione della testa laser, uno per i dettagli fini e uno per la deposizione più rapida. Tutti i processi e materiali metallici convenzionali hanno le loro caratteristiche di superficie che sono adattate in vari modi a seconda dell'applicazione. Ad esempio, le superfici in fusione possono richiedere lavorazioni, lucidature o la sigillatura con un rivestimento per ottenere le prestazioni desiderate. Le strutture in acciaio laminato a caldo o saldate possono richiedere una finitura per rimuovere la ruggine o per modificare le condizioni della superficie. Le condizioni della superficie AM possono essere parzialmente ottimizzate mediante la selezione dei parametri o potrebbero vedere un'ottimizzazione post-lavorazione. Si deve comprendere la natura delle condizioni delle superfici ottenibili per un determinato materiale e scegliere il metodo migliore per ottimizzare il risultato finale desiderato. È possibile che le dimensioni dei modelli debbano essere compensate per fornire materiale aggiuntivo da rimuovere mediante lavorazioni o lucidatura, spesso chiamato sovrametallo di lavorazione o finitura.

Sebbene ogni processo AM abbia caratteristiche uniche, come riportato in [3], esistono anche problemi comuni alla maggior parte dei sistemi AM. A causa del processo strato per strato, le qualità geometriche (ad esempio risoluzione delle caratteristiche, finitura superficiale e precisione geometrica) dei sistemi AM lungo la direzione di costruzione (direzione Z) sono solitamente influenzate dallo spessore dello strato. Con i processi SLM e EBM si può raggiungere uno spessore dello strato di 20 µm mentre con altri processi come la stereolitografia e il material jetting si può facilmente raggiugere uno spessore minimo di almeno 16 μm . Sebbene uno strato sottile generalmente indichi una maggiore precisione geometrica e risoluzione delle caratteristiche, esistono vari altri fattori che svolgono un ruolo importante nel determinare le qualità geometriche di un pezzo. Per le caratteristiche verticali (Figura 5.10a), l'effetto scalino causato dal processo strato per strato è minimo, e la precisione geometrica in direzione Z è determinata sia dallo spessore dello strato che dalle caratteristiche di sagomatura (ad esempio profilo di deposizione, ritiro, ecc.) dei materiali durante il processo. D'altra parte, per le caratteristiche inclinate (*Figura 5.10b*), l'effetto scalino è determinato sia dallo spessore dello strato che dall'inclinazione delle caratteristiche. Un'inclinazione minore non solo determina un effetto scala più significativo, ma anche una lunghezza di unione meno efficace tra gli strati, che a sua volta potrebbe influire sulle proprietà meccaniche dei pezzi.



Figura 5.10 Effetto scalino su pezzi AM ottenuti con diversi processi

Avendo come riferimento la *Figura 5.10b*, la rugosità delle superfici laterali può essere approssimativamente calcolata applicando un'analisi geometrica come mostrato in equazione (5.3).

$$R_a = \frac{t\cos\theta}{4} \tag{5.3}$$

Nell'equazione (5.3) t e θ sono rispettivamente lo spessore dello strato e l'angolo di inclinazione. Va notato che tale equazione serve solo a dimostrare l'effetto scalino, mentre in realtà è necessaria un'analisi più complessa per stimare accuratamente la qualità della superficie. Per diversi processi, l'effetto scalino presenta caratteristiche diverse come mostrato in Figura 5.10b-e. Per i processi di estrusione del materiale, a causa dell'effetto della sagomatura dell'ugello di estrusione e della distorsione indotta dalla gravità, le tracce depositate presentato estremità arrotondate e profili di sezione trasversale appiattiti (Figura 5.10c). Per i processi di stereolitografia a causa dell'umidità delle superfici tra la parte indurita e la resina non indurita, le resine aggiuntive tendono ad attaccarsi alle superfici laterali e di conseguenza vengo lavorate in seguito ai post-processi, il che aiuta a smussare la superficie laterale (*Figura 5.10d*). Per i processi di fusione a letto di polvere, l'effetto di sinterizzazione superficiale provoca l'aggiunta di polvere addizionale alla superficie dei pezzi, il che aumenta la variazione delle qualità superficiali (*Figura 5.10e*). Per la fusione AM a letto di polvere, un altro fattore che contribuisce all'errore geometrico è il restringimento durante il processo di solidificazione, che a sua volta è in gran parte determinato dalla densità del letto di polvere. La densità ottenibile per il letto di polvere è in gran parte determinata dalla morfologia della polvere tra cui forma, distribuzione, dimensioni e caratteristiche superficiali. Come regola generale, le particelle di polvere con forme più regolari possono raggiungere densità più elevate. Mentre una polvere molto irregolare può raggiungere una densità relativa del 40%, la densità relativa teorica più elevata per il letto in polvere sferico monodimensionale è di circa il 65% (Figura 5.11).



Figura 5.11 Densità relativa ottenibile con differenti forme di polvere

5.5 Test di rugosità

Per il lavoro di tesi la misura della rugosità è un aspetto molto importante, in quanto è necessario classificare i diversi Bamboo Bracket avendo informazioni precise sul valore di questa proprietà. Tale classificazione permette di andare a creare un piano di test dettagliato, per pezzi in AM che presentino le stesse caratteristiche superficiali dei pezzi analizzati. In quanto al variare della rugosità potrebbe essere necessario modificare la modalità di scansione, che può comprendere le impostazioni del software o le condizioni dell'ambiente di misura o la disposizione degli oggetti (pezzo e sensore) nel volume di misura. La rugosità è fortemente legata alla riflettività, ad esempio se la rugosità è molto bassa l'intensità con cui viene proiettato il pattern dallo strumento di misura potrebbe essere amplificata dalla superficie del pezzo e di conseguenza causare la saturazione delle ottiche, questo vuol dire che lo strumento non riuscirebbe ad acquisire i punti della superficie in questione.

5.5.1 Strumentazione utilizzata

Per la misura della rugosità è stato utilizzato il rugosimetro TESA Rugoserf 10G (*Figura* 5.12), unità di misura portatile con tre posizioni di misurazione 0° , -90° , $+90^\circ$.



Figura 5.12 TESA Rugoserf 10G

La taratura dello strumento è stata effettuata tramite un campione, prodotto da TESA, che presenta una rugosità superficiale $R_a = 2,970 \,\mu m$. Tale campione essendo misurato con il rugosimetro, attraverso la memorizzazione del valore misurato, serve da riferimento per tutte le altre misure. Di seguito nella *Tabella 5-2* vengono riportate alcune caratteristiche principali dello strumento.

Ampiezza di misura	400 μm asse Z, 16 mm asse X
Classe di precisione	Classe 1 (norma ISO 3274)
Forza di misura	0,75 <i>mN</i> (norma ISO 3274)
Risoluzione	0,001 μm
Lunghezze di cut-off	0,25 – 0,80 – 2,50 mm
Numeri di cut-off	Da 1 a 10
Punta di diamante dello stilo	$R = 5 \ \mu m$
Dimensione	$122 \times 53 \times 81 \ mm$
Velocità di scansione	1 mm/s
Alimentazione	100 ÷ 240 VAC; 5 ÷ 60 Hz; 12 V; 400 ÷ 650 mAH

Tabella 5-2 Caratteristiche principali Rugoserf 10G

5.5.2 Staffaggio del pezzo

Prima di iniziare la misura vera e propria è necessario capire come fissare il pezzo in modo da misurare correttamente il valore della rugosità superficiale. Il fissaggio del pezzo è stato realizzato come mostrato in *Figura 5.13*, utilizzando delle pinze fissate attraverso dei supporti ad un banco in granito in modo che il pezzo e lo strumento non siano soggetti a vibrazioni o spostamenti accidentali durante la misura. Invece, il rugosimetro è stato posizionato su due blocchi di ferro in modo da raggiungere l'altezza necessaria per la misura.



Figura 5.13 Staffaggio del pezzo per la misura di rugosità

5.5.3 Procedura per la misura della rugosità

Il Bamboo Bracket è un pezzo freeform, presenta oltre alle due superfici planari diversi braccetti che le collegano. Dato che il pezzo è stato realizzato in AM è necessaria, per avere un'informazione completa, un'analisi su più zone del pezzo dal momento che come è stato riportato precedentemente la finitura superficiale nei pezzi AM dipende anche dalla conformazione e dalla direzione di crescita delle caratteristiche. In questo modo si riesce ad avere sia un valore di rugosità media che valori di rugosità locali del pezzo. La procedura di misura prevede l'analisi di differenti zone, in particolare quattro differenti zone sulle due superfici (*Figura 5.14*) mentre tre lungo i braccetti. Come si può vedere dalla *Figura 5.14* la direzione di scansione sulle superfici è sia verticale che orizzontale in modo da tener conto nel valore finale dell'influenza che può avere il processo AM su tutto il pezzo.



Figura 5.14 Zone analizzate sulle due superfici per il calcolo della rugosità

La rugosità viene misurata su tre differenti Bamboo Bracket (BBP2, BBD1, BBNP1), la rugosità attesa è di circa 10 μ m per tale motivo in riferimento alla *Tabella 5-1* per le due superfici è stata impostata come lunghezza di base 2,5 mm e come lunghezza di valutazione cinque volte questo valore ovvero 12,5 mm. Per i braccetti invece data l'elevata curvatura del profilo è stato impossibile eseguire la scansione utilizzando la stessa lunghezza, per tali caratteristiche la lunghezza di base è uguale alla lunghezza di valutazione pari a 0,8 mm, lunghezza minima per una buona riuscita della misura.

5.5.4 Risultati e conclusioni

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti, per ogni zona la misura è stata ripetuta tre volte senza cambiare la posizione del pezzo e dello strumento. In questo modo si riesce ad avere un valore medio, per ridurre l'errore casuale della singola misura, ed il range all'interno del quale variano le misurazioni. Per la Superficie1 si ottengono i seguenti risultati:

R_a (μm)	BBP2				BBD1		BBNP1			
	Valori	15,94	18,826	18,875	10,435	10,07	10,106	19,87	16,611	18,076	
Zona 1	Media		17,880			10,204		18,186			
	Range		2,935			0,365		3,259			
	Valori	14,192	14,369	14,371	6,952	6,689	6,551	17,914	18,256	19,287	
Zona 2	Media	14,311				6,731		18,486			
	Range	0,179				0,401		1,373			
	Valori	16,223	15,973	15,901	7,01	5,934	6,627	16,578	16,83	17,032	
Zona 3	Media		16,032			6,524		16,813			
	Range		0,322			1,076		0,454			
	Valori	15,47	15,722	16,6	5,464	5,65	5,858	15,719	15,135	15,727	
Zona 4	Media		15,931			5,657			15,527		
	Range	1,13				0,394		0,592			

Tabella 5-3 Risultati di rugosità ottenuti per la Superficie1

Mentre per la Superficie2:

Tabella 5-4 Risultati di rugosità ottenuti per la Superficie2

R_a (μm)	BBP2				BBD1		BBNP1			
	Valori	11,621	13,237	13,234	7,243	6,32	6,239	14,778	14,844	15,07	
Zona 1	Media		12,697			6,601		14,897			
	Range		1,616			1,004		0,292			
	Valori	10,553	10,397	10,396	4,812	5,413	5,987	15,148	15,362	15,325	
Zona 2	Media	10,449				5,404		15,278			
	Range	0,157				1,175		0,214			
	Valori	9,839	11,565	10,397	5,552	5,591	5,53	19,034	19,576	19,804	
Zona 3	Media		10,600			5,558			19,471		
	Range		1,726			0,061			0,77		
	Valori	9,951	10,056	10,015	5,464	5,363	5,371	10,947	10,913	10,993	
Zona 4	Media	10,007			5,399			10,951			
	Range	0,105				0,101		0,08			

Infine, per i braccetti:

R_a ($R_a(\mu m)$ BBP2				BBD1		BBNP1				
	Valori	6,785	6,390	6,782	6,329	5,283	5,436	10,964	9,625	9,613	
Zona 1	Media		6,652			5,683		10,067			
	Range	0,395				1,046		1,351			
	Valori	14,219	13,824	14,021	6,319	7,727	7,335	14,096	12,152	13,321	
Zona 2	Media		14,021		7,127			13,190			
	Range		0,395		1,408			1,944			
	Valori	13,777	14,574	11,524	3,444	3,697	4,017	10,006	9,060	6,005	
Zona 3	Media	13,292			3,719			8,357			
	Range	3,05			0,573			4,001			

Tabella 5-5 Risultati di rugosità ottenuti per i braccetti

Effettuando una media dei valori ottenuti e riportati nelle precedenti tabelle, si ottengono i seguenti valori di rugosità media per i tre pezzi:

Tabella 5-6 Valori medi di rugosità per i tre differenti Bamboo Bracket

	$R_a (\mu m)$
BBD1	6,237
BBP2	12,898
BBNP1	14,657

Tali risultati sono in linea con quello che si è ipotizzato, la differenza di rugosità tra i tre pezzi è identificabile sia alla vista che al tatto. Di conseguenza si era certi che il pezzo meno rugoso fosse il BBD1 mentre quello più rugoso il BBNP1. Inoltre, i valori di rugosità ottenuti appartengono all'intervallo teorico per pezzi in AM realizzati con Selective Laser Melting. Infine, la rugosità del pezzo è utile anche a capire che tolleranze geometriche assegnare alle caratteristiche del pezzo, in quanto la lavorazione AM per i pezzi analizzati può essere paragonata per i valori ottenuti ad una colata in sabbia o in conchiglia (*Figura 5.4*).

6 Macchine di Misura a Coordinate

Questo capitolo è dedicato alle misure effettuate sui Bamboo Bracket con la macchina di misura a coordinate (CMM), i valori ottenuti serviranno da riferimento per le misure realizzate con il sensore a luce strutturata. Prima di passare alla descrizione del test e all'analisi dei dati è opportuno riportare i principi fondamentali di queste macchine per comprendere al meglio il funzionamento.

Tra gli strumenti di misura a coordinate attualmente disponibili, quelli più diffusi e assodati sono le Macchine di Misura a Coordinate (CMM). Si tratta di una macchina a controllo numerico progettata per la misurazione delle tolleranze dimensionali, geometriche e di forma dei particolari meccanici. L'utensile classico è sostituito da un tastatore meccanico, sensore tattile costituito da uno stilo a sfera che entra in contatto con la superficie del pezzo. La macchina è in grado di registrare le coordinate nel momento in cui la punta tocca la superficie, di conseguenza le coordinate del punto toccato sono note nel sistema di riferimento della macchina. Tali strumenti possono essere azionati sia manualmente che spostati in modo automatico attraverso il controllo numerico che dà loro la possibilità di eseguire l'attività di verifica in modo quasi completamente automatica. Su queste macchine possono essere montati sensori di diverso tipo ma nel caso di una misura accurata i tattili sono i sistemi più adatti in quanto si ottengono precisioni dimensionali che variano da $\pm 0,1 \,\mu m$ a $\pm 0,05 \,mm$ a seconda delle applicazioni.

Di seguito, in *Figura 6.1* viene riportata una descrizione dettagliata di una macchina di misura a portale.



Figura 6.1 Macchina di Misura a Coordinate con descrizione degli elementi principali

6.1 Tipologie di Macchine di Misura a Coordinate

Esistono differenti tipologie di CMM, come si può vedere in *Figura 6.2*. La struttura a sbalzo è sorretta soltanto ad una delle due estremità con un sistema a sbalzo, a causa di ciò si flette maggiormente rispetto alle altre strutture per ovviare a questo inconveniente alcune macchine hanno un sistema di compensazione che garantisce la linearità dei movimenti. Nella struttura a truschino, le guide posizionate lateralmente al piano di lavoro permettono di muovere il braccio interamente al di fuori del volume di misura, questo permette un accesso facilitato all'area di lavoro. La struttura a portale è la più appropriata per eseguire una vasta tipologia di operazioni di misura su di una singola macchina flessibile e precisa per pezzi di medio o piccole dimensioni. Infine, l'architettura Gantry è la soluzione ideale per tutte le applicazioni di misura di grandi dimensioni dell'industria automobilistica, aeronautica ed aerospaziale inoltre come si può notare non presenta il piano in granito.



Figura 6.2 Differenti tipologie di Macchine di Misura a Coordinate

6.2 Il Tastatore-Trigger

Il tastatore è l'elemento attivo della macchina di misura viene rappresentato in *Figura* 6.3. È costituito da una piastra girevole (1) caricata su tre punti portanti (2) mediante una molla elicoidale di compressione (3). I tre punti portanti sono alla base del funzionamento in quanto costituiscono un contatto elettrico: quando il tastatore entra in contatto con il pezzo da misurare, alla deflessione della piastra corrisponderà la variazione delle caratteristiche elettriche del circuito che provocherà la trasmissione di un impulso di contatto al controllo della CMM. I tre contatti sono a 120° l'uno dall'altro, questo permette di acquisire il punto qualunque sia la direzione di accostamento. In quanto per l'acquisizione del punto basta che si apra almeno uno dei tre contatti.



Figura 6.3 Struttura del tastatore

6.2.1 Differenti tipologie di tastatore

È importante evidenziare che esistono diversi tipi di tastatori, i più diffusi sono:

- Tastatore meccanico: viene utilizzato solo per CMM manuali, deve essere portato a contatto con il pezzo nel punto da misurare e successivamente deve essere dato al sistema il comando di acquisizione (ad esempio con un interruttore a pedale);
- Tastatore touch-trigger: fornisce un segnale binario al contatto o in prossimità del pezzo. La posizione del punto nel volume di misura è acquisita istantaneamente in quanto lo stesso tastatore entrando in contatto con il pezzo genera un segnale che serve sia per gestire l'informazione metrologica sia per indirizzare la testa di misura su una nuova traiettoria;
- Tastatore continuo: fornisce un segnale proporzionale allo spostamento dell'elemento sensibile dalla posizione di zero. Tali tastatori possiedono tanti trasduttori di posizione quanti sono i gradi di libertà e sono quindi in grado di effettuare una scansione continua.

6.2.2 Qualifica del tastatore

Prima di iniziare la misura di un pezzo è necessario eseguire la qualifica del tastatore. Tramite una sfera calibrata, realizzata in tungsteno o ceramica con precisioni elevatissime, è possibile calibrare il primo tastatore ed eventualmente qualificare gli altri rispetto al primo. La sfera viene misurata su tutta la sua superficie acquisendo molti punti, circa una cinquantina. I punti vengono sempre acquisiti dal tastatore in direzione normale alla sfera. Tale procedura permette di verificare il diametro del tastatore e di calcolare gli off-set rispetto all'origine del sistema di riferimento della macchina. In seguito alla qualifica, i software di misura creano la sfera di interpolazione. Come si può osservare in *Figura 6.4* il raggio di tale sfera è pari alla somma del raggio del tastatore e del raggio della sfera di qualifica e quello della sfera di interpolazione, per differenza si può determinare il raggio del tastatore. Con *R*' si indica il raggio della sfera di interpolazione, con *r* il raggio del tastatore.



Figura 6.4 Qualifica del tastatore

6.2.3 Compensazione del raggio

Il processo di qualifica viene eseguito per avere una compensazione del raggio, in quanto a priori non si conosce la dimensione, con precisione elevata, del raggio del tastatore. Tale processo viene illustrato in *Figura 6.5*. La compensazione del raggio dipende ovviamente dalla direzione di avanzamento del tastatore. A sinistra avremo una compensazione nel caso in cui la direzione di avanzamento sia concorde all'asse, mentre a destra il caso in cui la direzione di avanzamento sia discorde.



Figura 6.5 Compensazione del raggio su CMM

Viene eseguita la compensazione in quanto l'acquisizione del tastatore è riferita al centro sfera ($x_{misurato}$), mentre per avere la misura reale (x_{reale}) bisogna sommare o sottrarre alla precedente il raggio del tastatore.

6.3 Descrizione del test con Macchina di Misura a Coordinate

Prima di effettuare le scansioni dei pezzi con lo strumento a luce strutturata, si è pensato di realizzare le stesse scansioni con una CMM, per avere dei valori di riferimento. Di base la macchina ha una precisione superiore di un ordine di grandezza per tale motivo i valori ottenuti possono essere successivamente utilizzato come confronto tra le due tecnologie. La macchina di misura utilizzata è una Global Advantage (*Figura 6.6*).



Figura 6.6 CMM-Global Advantage con sensore tattile

Le caratteristiche della macchina utilizzata vengono riportate in Figura 6.7.

Probe	Standard Tempe 18 ÷ 22	rature Ranı . °C	ge	CLIMA Tempera 16 ÷ 26	R _{o,mpl}		
6	E _{0,MPE} / E _{150,MPE}	P _{FTU,MPE}	MPE _{THP/1}	E _{0,MPE} / E _{150,MPE}	P _{FTU,MPE}	MPE _{THP/t}	
HP-S-X3C/X5	1.4 + L/333	1.4	2.5/45	1.7 + L/250	1.4	2.5/45	1.2
HH-A, HH-AS/HP-S-X1S, HP-S-1H	1.4 + L/333	1.4	2.5/45	1.7 + L/250	1.4	2.5/45	1.2
HH-A, HH-AS/TP200	1.9 + L/333	1.9	-	2.1 + L/250	1.9	-	2.1
HH-A, HH-AS/HP-T, HP-TM	2.1 + L/333	2.0	-	2.4 + L/250	2.0	3	2.1

Figura 6.7 Caratteristiche della CMM usata durante il test: Global Advantage con sensore di scansione tattile equivalente al HP-S-X1, intervallo di temperatura 18÷22°C

6.3.1 Definizione delle caratteristiche da testare del pezzo

Di seguito, *Figura 6.8*, vengono definite le caratteristiche del pezzo necessarie per la realizzazione del collaudo completo. Sono state definite le caratteristiche che permettono l'analisi delle tolleranze imposte in fase di studio del pezzo.



Figura 6.8 Descrizione dei nomi dati alle caratteristiche del Bamboo Bracket

6.3.2 Sistema di fissaggio

Dopo vari tentativi, il miglior sistema di fissaggio è stato selezionato in modo da consentire il massimo accesso al pezzo, e allo stesso tempo, per mantenerlo il più stabile possibile. A causa della geometria del pezzo, non è stato possibile fissarlo in modo che tutte le superfici siano completamente accessibili, alla fine si è optato per una configurazione in cui alcune aree della Superficie2 non sono accessibili. La configurazione del sistema di fissaggio è mostrata in *Figura 6.9*.



Figura 6.9 Sistema di fissaggio per la misura tattile

6.3.3 Attrezzatura utilizzata per il test

Di seguito vengono elencati i componenti con i quali sono stati eseguiti i test:

- CMM: Hexagon Global Advantage 091508 (Volume di misura 900x1500x800 mm)
- Sfera di qualifica (B2942, materiale: ceramica, diametro certificato: 24,9972 mm)
- Testa indexabile: Renishaw PH10MQ
- Modulo di scansione: Renishaw SM25-3
- Porta stilo: Renishaw SH25-3
- Stilo a punta singola: sfera di rubino, lunghezza: 21 mm diametro: 3 mm
- Stilo a stella, 5 direzioni
 3→ sfera di rubino, lunghezza: 20 mm diametro: 4 mm
 5→ sfera di rubino, lunghezza: 20 mm diametro: 4 mm

Un esempio della configurazione della sonda è rappresentato in *Figura 6.10*.



Figura 6.10 Configurazione adottata per la sonda tattile

6.3.4 Qualifica della macchina

Per accedere a tutte le superfici del pezzo sono state utilizzate diverse configurazioni della sonda cambiando gli angoli del polso o dello stilo. Ogni configurazione della sonda deve essere qualificata per stimare la lunghezza effettiva dello stilo, insieme al diametro della punta e per creare una correlazione tra tutte le configurazioni di sonda utilizzate. La qualifica è stata eseguita seguendo la procedura standard per mezzo di una sfera di qualifica certificata, come spiegato precedentemente.

6.3.5 Allineamento pezzo-macchina

Vi sono due tipi di coordinate nel mondo della misura: sistema di coordinate macchina e sistema di coordinate pezzo. Con la CMM è possibile allineare virtualmente gli assi della macchina sul sistema di riferimento del pezzo (allineamento matematico) inoltre è possibile traslare l'origine della macchina sul pezzo. Esistono diversi tipi di allineamento, tra tutti si è scelto di utilizzare il 3-2-1 vista la semplicità di applicazione. I numeri stanno ad indicare quanti punti devono essere acquisiti per la definizione dei tre elementi che stanno alla base di questo allineamento. È necessario acquisire almeno tre punti (il numero di punti varia al variare delle dimensioni del piano) per l'identificazione di un piano, vengono definiti l'origine e la direzione del primo asse (generalmente l'asse z), in pratica vado a fissare il pezzo nel volume di misura. Il secondo elemento da definire è una linea costituita da due punti. È necessario che il secondo punto si trovi nella direzione positiva dell'asse in relazione al primo punto. Questo elemento definisce la direzione del secondo asse (generalmente l'asse x) e l'origine del terzo asse (generalmente l'asse y), con questo elemento vado a bloccare la rotazione del pezzo. Il terzo elemento è un punto e stabilisce l'origine dell'intero allineamento.

Per l'allineamento del Bamboo Bracket il piano è stato realizzato utilizzando i centri di tre cerchi, in particolare i cerchi 6,7 e 8. La linea utilizzando i centri dei cerchi 7 e 8, in modo da avere una linea orizzontale. Infine, si è posizionata l'origine nel centro del cerchio 7. Alla fine di questa procedura le coordinate macchina e le coordinate pezzo si equivalgono, in quanto dopo l'allineamento i due sistemi di riferimento coincidono.

6.3.6 Caratteristiche misurate

Per la Superficie1 tutte le misure vengono eseguite con la sonda a punta singola. Di seguito vengono riportate le caratteristiche misurate al fine di poter verificare tutte le tolleranze imposte durante lo studio su un ipotetico funzionamento del Bamboo Bracket.

Le superfici planari vengono misurate mediante profili di scansioni lineari con un percorso in grado di ricoprire l'intera superficie, sul software di misura si può impostare la cadenza di acquisizione dei punti.

I fori sono stati misurati con una strategia punto-punto, vengono misurati otto punti interni ad ogni foro. Questo numero di punti è considerato sufficiente per misurare un foro dal diametro di 6 mm con una punta di 4 mm di diametro. Sono stati misurati solo i fori funzionali (1-2-3-4-5-6-7-8) mentre quelli utilizzati per espellere la polvere residua non sono stati considerati, in quanto non necessitano di un controllo geometrico.

Per accedere alla Superficie2 è stata utilizzata una sonda a stella in modo da poter misurare sia la superficie che i fori dal basso verso l'alto. Le misure vengono eseguite come nel caso precedente con la particolarità che a causa del fissaggio l'accesso al piano è solo parziale. Invece, i fori, appartenendo a due superfici ortogonali tra di loro, vengono analizzati con due diversi angoli della sonda in modo che sia possibile accedere al meglio alle aree in cui si trovano.

6.4 Analisi dei dati e risultati su CMM

I risultati ottenuti si riferiscono a tre ripetizioni della stessa misura su tre Bamboo Bracket differenti, ovvero BBP2, BBNP1 e BBD1. Le ripetizioni vengono eseguite utilizzando lo stesso part-program senza modificare la posizione del pezzo o più in generale le condizioni dell'ambiente di misura. In *Tabella 6-1* vengono riportati i risultati ottenuti.

		BBNP1			BBP2		BBD1			
	Valori	Media	Range	Valori	Media	Range	Valori	Media	Range	
	5,673			5,692			5,853			
Diametro 1 (mm)	5,687	5,683	0,015	5,694	5,693	0,002	5,838	5,849	0,018	
	5,688			5,694			5,856			
	5,711			5,784			5,646			
Diametro 2 (mm)	5,741	5,731	0,03	5,785	5,785	0,002	5,643	5,645	0,003	
	5,741			5,786			5,645			
	5,652			5,767			5,534			
Diametro 3 (mm)	5,712	5,693	0,064	5,768	5,768	0,002	5,475	5,520	0,077	
	5,716			5,769			5,552			
	5,66			5,787			5,671			
Diametro 4 (mm)	5,704	5,685	0,044	5,787	5,787	0	5,654	5,663	0,017	
	5,692			5,787			5,665			
	5,914			6,005			5,923			
Diametro 5 (mm)	5,912	5,926	0,039	6,004	6,004	0,001	5,929	5,928	0,008	
	5,951			6,004			5,931			
	5,951			6,050			5,905			
Diametro 6 (mm)	5,971	5 <i>,</i> 975	0,053	6,050	6,050	0,000	5,918	5,913	0,013	
	6,004			6,050			5,917			
	6,004			6,054			5,929			
Diametro 7 (mm)	5,999	6,011	0,031	6,054	6,054	0	5,930	5,930	0,002	
	6,03			6,054			5,931			
	6,032			6,055			5,849			
Diametro 8 (mm)	6,02	6,041	0,05	6,054	6,054	0,001	5,851	5,850	0,002	
	6,07			6,054			5,851			
	0,228			0,236			0,272			
Perpendicolarità (mm)	0,231	0,231	0,006	0,24	0,238	0,004	0,296	0,282	0,024	
	0,234			0,239			0,278			
	0,221			0,202			0,168			
Planarità 1 (mm)	0,225	0,225	0,007	0,205	0,204	0,003	0,159	0,166	0,013	
	0,228			0,204			0,172			
	0,035			0,045			0,067			
Planarità 2 (mm)	0,039	0,036	0,006	0,046	0,046	0,001	0,088	0,076	0,021	
	0,033			0,046			0,072			

Tabella 6-1 Risultati delle misure in termini di media e range su tre ripetizioni per tre differentiBamboo Bracket



Di seguito vengono riportati in modo grafico i risultati ottenuti.

Figura 6.11 Valori del range per i differenti Bamboo Bracket



Figura 6.12 Valori medi dei diametri per i differenti Bamboo Bracket



Figura 6.13 valori medi di perpendicolarità e planarità per i differenti Bamboo Bracket

Quasi tutte le misure sono in tolleranza rispetto ai valori definiti in fase di progettazione. È interessante evidenziare che i fori appartenenti alla Superficie2 (dal foro 5 al foro 8) sono sistematicamente più grandi degli altri appartenenti alla Superficie1 (dal foro 1 al foro 4). Tale comportamento è dovuto probabilmente al loro orientamento perpendicolare rispetto al raggio laser della macchina SLM. Le considerazioni relative alla realizzazione del pezzo possono essere elaborate anche per il valore della planarità della Superficie2, in quanto tale superficie viene lavorata tramite elettroerosione dopo che il pezzo è stato rimosso dalla piastra di costruzione la Superficie1 presenta valori peggiori per il motivo accennato mentre precedentemente. Tale problema si riflette sulla perpendicolarità e sullo spessore delle superfici planari del pezzo, in quanto i valori misurati si avvicinano al limite della tolleranza, ciò potrebbe causare problemi qualora fosse necessario lavorare le superfici per ottenere un'adeguata planarità e perpendicolarità finale. Come si può vedere la misurazione tattile è generalmente ripetibile entro pochi micrometri anche nel caso di misure eseguite in scansione continua come per le planarità, ciò significa che la rugosità superficiale non influenza la ripetibilità della misurazione se la macchina viene guidata automaticamente per analizzare semplici funzioni geometriche.

La misurazione tattile richiede operatori di alto livello, partendo dal fissaggio del pezzo, che può coinvolgere forme complesse e strutture sottili e leggere, fino ad arrivare alla misurazione vera e propria, che consiste anche nella scansione di superfici ruvide. Nel caso in esame, il fissaggio del pezzo ha richiesto circa quattro ore per la comprensione di quale fosse la migliore soluzione per tenere la staffa e consentire di misurare tutte le caratteristiche richieste senza la movimentazione del pezzo, trovare le parti per realizzare la struttura e assemblarla. Durante il fissaggio si deve anche capire se la strumentazione sta introducendo stress sul pezzo, dato che ha pareti sottili ed è molto leggero. Il fissaggio deve anche essere adatto al sistema di stilo utilizzato per le misurazioni al fine di lasciargli spazio sufficiente per non entrare in contatto col pezzo e toccare solamente le superfici desiderate. La programmazione deve essere

Capitolo 6-Macchine di Misura a Coordinate

effettuata da un operatore esperto che sa come trattare pezzi prismatici e superfici freeform; questa fase richiede circa sedici ore per avere un programma in grado di misurare tutte le caratteristiche richieste in modo automatico. La ripetizione delle misure sullo stesso Bamboo Bracket è necessaria per valutare nel migliore dei modi i risultati ottenuti, l'operazione di allineamento richiede pochi minuti mentre l'esecuzione del programma per la misura del pezzo dura circa una ventina di minuti.

7 Introduzione ai test con scanner a luce strutturata

Questo capitolo serve da introduzione ai vari test eseguiti con il sensore a luce strutturata. Verranno descritti degli aspetti fondamentali utili per comprendere al meglio i test riportati nel capitolo successivo. Vengono descritti la strumentazione utilizzata e i fattori che possono influenzare la misura con relativo stato dell'arte.

7.1 Strumentazione utilizzata per test con sensore a luce strutturata

Di seguito vengono riportati i componenti utilizzati durante le varie prove.

• Sensore a luce strutturata

Il sensore utilizzato per eseguire le misurazioni è il PrimeScan. Tale sensore è realizzato dall'azienda AICON 3D-System acquisita da qualche anno dalla Hexagon Manufacturing Intelligence. Il sensore, visibile in *Figura 7.1*, è molto versatile grazie alla sua stabilità meccanica e termica ed è noto per la straordinaria robustezza e la massima precisione.



Figura 7.1 PrimeScan: sensore a luce strutturata

PrimeScan è una soluzione entry-level completamente nuova che si basa sulla tecnologia di proiezione di pattern che fornisce una maggiore potenza luminosa e una migliore qualità di proiezione. La linea di scanner PrimeScan offre 24 configurazioni con risoluzioni e campi di misura differenti per tale motivo è la soluzione adatta per ogni attività di misurazione. È dotato di tecnologia a luce blu per applicazioni industriali o a luce bianca per applicazioni relative all'arte e design in quanto sono richieste informazioni di colore aggiuntive. PrimeScan ha un design compatto, l'area di base è uguale a un foglio A4 e pesa solo 4 kg. La distanza di lavoro è ridotta, perciò è il dispositivo ideale per la scansione in aree di applicazioni speciali, come ad esempio su una scrivania o in alcuni ambienti industriali.

Capitolo 7-Introduzione ai test con scanner a luce strutturata

L'accessorio consente sia misurazioni automatiche sia una facile acquisizione di grandi volumi. A seconda della risoluzione e della precisione richieste, sono disponibili diverse risoluzioni della telecamera: 2, 3 e 8 megapixel. Sono disponibili campi di misura tra 50 mm e 1000 mm. Quindi, ogni dimensione del componente può essere catturata in condizioni ottimali. Il proiettore particolarmente potente consente la scansione di superfici lucide e scure senza pretrattamento. Inoltre, i puntatori laser integrati supportano il facile posizionamento dell'oggetto di misura. In *Tabella 7-1* ed in *Tabella 7-2* vengono riportate le caratteristiche principali di sistema e del campo di vista dello scanner utilizzato.

Risoluzione telecamera	2x7.990.272 Pixel (3264x2448)
Risoluzione proiettore	28.723.200 Pixel (6.144x4.675)
Fonte di luce	100 W Led ad alta potenza (blu o bianco)
Tempo di misura	2-3 s
Peso	3,8 kg
Alimentazione	AC 110/230 Volt, 50-60 Hz

Tabella 7-1 Caratteristiche principali del sensore PrimeScan

Angolo di triangolazione [°]	26
Distanza di lavoro [mm]	370
Campo di vista [mm]	500
Dimensioni del campo di vista [mm]	375x300
Profondità di misura [mm]	240
Risoluzione X, Y [µm]	114
Risoluzione Z [µm]	26
Accuratezza [µm]	25

Tabella 7-2 Caratteristiche principali del campo di vista del sensore PrimeScan

Tutti i dati e i valori specificati sono tipici e si applicano a una singola acquisizione con LED blu e telecamere monocromatiche. I valori effettivi possono variare fino al 20% mentre se si lavora con telecamere a colori i valori potrebbero differire di un ulteriore 20%. Le specifiche di misurazione sono valori medi per l'area centrale del campo di misura e vengono raggiunti in condizioni di misurazione predefinite e dopo una precisa calibrazione del sensore. Inoltre, tutti i valori di risoluzione e accuratezza dipendono dalle proprietà della superficie dell'oggetto e dalle condizioni dell'ambiente di misura.

• Treppiede

Il treppiede utilizzato (*Figura 7.2*) come supporto del sensore è il modello SKU MT057C3-G Manfrotto. È un treppiede professionale e versatile che assicura la massima performance grazie ai settaggi regolabili. Le gambe a tre sezioni garantiscono un incredibile livello di stabilità inoltre la colonna a cremagliera permette di scegliere la posizione del sensore. In *Tabella 7-3* vengono riportate le principali specifiche tecniche.



Figura 7.2 Treppiede tre sezioni con cremagliera

Tabella 7-3 Specifiche tecniche treppiede

Peso	3 kg
Portata massima	12 kg
Sezioni gamba	3
Angoli della gamba	23°, 50°, 75°
Attacco superiore	3/8″
Altezza minima	23 cm
Altezza massima	157 cm
Massima altezza (colonna retratta)	132 cm
Temperatura di lavoro massima	70°C
Temperatura di lavoro minima	-30°C

• Testa snodata

All'attacco superiore del treppiede viene fissata la testa snodata SKU 808RC4 Manfrotto (*Figura* 7.3). Questa testa per treppiede permette un controllo dell'inquadratura su tre assi, nonostante sia abbastanza leggera può supportare fino a 8 kg e riuscire a gestire carichi importanti e decentrati grazie anche ad un sistema a due molle di bilanciamento.



Figura 7.3 Testa snodata a tre assi

Di seguito, in *Tabella* 7-4 vengono riportate le principali specifiche tecniche.

Peso	1,5 kg
Portata massima	8 kg
Attacco superiore	3/8" femmina
Diametro della base	60 mm
Inclinazione frontale	-30° / +90°
Inclinazione laterale	-30° / +90°
Rotazione panoramica	360°
Temperatura di lavoro massima	60°C
Temperatura di lavoro minima	-30°C

Tabella 7-4 Specifiche tecniche testa snodata

• Tavola rotante

Per la scansione 3D automatica degli oggetti, lo scanner PrimeScan può essere combinato con una tavola rotante motorizzata (*Figura 7.4*). Questa tavola è controllata dal software di acquisizione dei dati 3D.



Figura 7.4 Tavola rotante motorizzata

Di seguito in *Tabella* 7-5 vengono riportate le principali caratteristiche di funzionamento.

Alimentazione	AC 110/230 Volt, 50-60 Hz
Portata massima	3 kg
Angoli di rotazione	0° / 360°
Incremento minimo	2°
Incremento massimo	180°
Inclinazione laterale	-60° / 60°

Tabella 7-5 Specifiche tecniche tavola rotante

7.2 Fattori di influenza sulla misura

I fattori che influiscono sulla misura hanno origine diverse; un elenco generale di possibili esempi viene definito nella norma ISO 14253-2:2011. Da qui si può affermare che i principali fattori che contribuiscono all'incertezza di misura e ai risultati variabili sono connessi all'ambiente di misura, alle caratteristiche del pezzo e alla procedura di misura. Alcuni di questi parametri, quelli considerati più rilevanti per la tecnica in questione, sono stati analizzati per ottenere una valutazione dei loro effetti.

7.2.1 Condizioni ambiente di misura

L'illuminazione ambientale gioca un ruolo fondamentale nella misura con sensori ottici quindi senza contatto. I laser scanner possono essere generalmente utilizzati anche in quegli ambienti le cui condizioni di illuminazione sono precarie; il motivo principale è l'uso di una sorgente di luce monocromatica che consente al sensore di essere sensibile solo a quella lunghezza d'onda. Gli scanner a luce strutturata richiedono che le condizioni di illuminazione siano più controllate perché il rumore sui dati misurati è determinato dalla precisione delle immagini proiettate sulla superficie del pezzo.

Nell'articolo [4] è stata studiata l'influenza dell'illuminazione sul numero di punti validi a fine scansione, per fare ciò hanno utilizzate due tipologie differenti di lampade una a vapore di mercurio e un'altra alogena. Per l'orientamento della lampada rispetto al sensore viene utilizzato un sistema di coordinate sferiche. Riferita a queste coordinate, la lampada deve essere posizionata in modo che la direzione di emissione della luce formi un angolo di 45° con la superficie di riferimento e un angolo di 90° con la direzione di movimentazione del sensore. Il punto di emissione deve distare 200 mm dall'origine del sistema di coordinate sferico. Come risultato dell'esperimento si ha che il numero di punti ritenuti validi con lampada a vapore di mercurio è più elevato di quello con lampada alogena.

Anche nell'articolo [5] vi è un riferimento alle condizioni ambientali. Poiché le sorgenti di illuminazione commerciale comunemente usate emettono luce in ampio spettro di frequenze, una parte dell'energia emessa da queste sorgenti luminose può essere compresa nell'intervallo delle lunghezze d'onda dei sistemi laser. Inoltre, si trovano nella gamma teorica di lunghezze d'onda accettate dal sensore e pertanto introdurranno una percentuale di energia nell'immagine catturata che non proviene dall'emissione di luce laser. In questo modo, la lettura e l'interpretazione dei dati vengono modificate e di conseguenza influenzeranno l'accuratezza del sensore. Di conseguenza, si consiglia di eseguire i test di scansione in assenza di luce esterna.

Un altro aspetto importante è legato alla temperatura e ai sistemi di condizionamento dell'aria. Errori dovuti alla temperatura possono essere causati da variazioni impreviste della temperatura assoluta da quella di riferimento di 20°C e dai gradienti di temperatura nello spazio e nel tempo. Mentre il primo potrebbe causare un'espansione lineare del pezzo che non può essere rilevata se non viene controllata la temperatura del pezzo, il secondo può causare una flessione o un'espansione non omogenea del pezzo. Per tale motivo, durante la valutazione del processo di misura dovrebbero essere considerate l'influenza della temperatura ambientale sull'attrezzatura di misurazione e la temperatura dell'apparecchiatura stessa.

Per tutte le osservazioni riportate in precedenza si è ritenuto opportuno eseguire i vari test in una sala metrologica. In quest'ambiente viene controllata sia la temperatura grazie ad un sistema di condizionamento che mantiene stabili i 22°C, inoltre non si

avranno influenze dovute alla luce esterna dato che la sala non ha interazione con l'ambiente, il pezzo sarà sottoposto alla sola luce della sala.

Ultimo aspetto da analizzare sono le vibrazioni. La metrologia senza contatto è generalmente immune alle vibrazioni, è comunque opportuno posizionare il sensore ed il pezzo su piani ben stabili dato che il movimento di uno o dell'altro può causare errori sulla misura.

Oltre alle condizioni vere e proprie dell'ambiente di misura sono importanti la posizione relativa tra pezzo e sensore e l'angolazione di quest'ultimo.

Nell'articolo [6] viene analizzata la variazione del numero di punti acquisiti al variare del dell'angolo di incidenza e al variare della distanza tra pezzo e sensore. Si è osservato che il maggior numero di punti viene acquisito alla minor distanza tra sensore e pezzo mentre si osserva una diminuzione del numero di punti lineare all'aumentare della distanza. Il numero di punti non cambia significativamente con la variazione dell'angolo longitudinale di misura fino ad un determinato angolo, da tale angolo in poi invece si ha una visibile deviazione.

Nell'articolo [7] per l'esecuzione del test, gli sperimentatori hanno inclinato il sensore in modo da avere che il proiettore colpisca la superficie del pezzo perpendicolarmente. In pezzi free-form applicare questa tecnica è piuttosto difficile in quanto con una singola inclinazione del sensore non è possibile proiettare il pattern perpendicolarmente a tutte le superfici. Per tale motivo se si vuole realizzare la misura in questo modo si dovranno prediligere alcune superfici (le più funzionali) piuttosto che altre.

7.2.2 Caratteristiche del pezzo

Come accennato in precedenza, durante la descrizione dello scanner a luce strutturata, le caratteristiche del pezzo possono influenzare in modo diretto la risoluzione e l'accuratezza dello strumento.

Una delle caratteristiche che può influenzare la misura è la rugosità superficiale. Il processo di produzione ALM non è ancora in grado di generare superfici lisce. Noti i settaggi del processo la rugosità superficiale varierà a seconda della dimensione della polvere utilizzata, dello spessore del layer, dalla direzione di crescita delle varie caratteristiche del pezzo e da eventuali lavorazioni superficiali eseguite sul pezzo dopo la realizzazione.

Nell'articolo [5] viene valutata l'influenza della rugosità superficiale sulla scansione di una superficie al variare dell'intensità del laser. Per alcuni processi di lavorazione (ad esempio l'elettroerosione) l'intervallo di intensità ottimale è molto ridotto e a volte si riduce ad un punto che coincide con l'intensità ottimale. Per altri processi di lavorazione (ad esempio rettifica piana) l'intervallo di intensità ottimale è molto ampio e a volte eccede la massima intensità del laser del sistema. Viene osservato che all'aumentare della rugosità superficiale vi è un aumento dell'intensità del laser che fornisce un valore ottimale. Perciò l'intervallo di intensità ottimale aumenta all'aumentare della rugosità se sul pezzo è stata eseguita la stessa lavorazione (piallatura, elettroerosione, fresatura). Il comportamento opposto viene osservato per processi di finitura con bassa rugosità come la rettifica piana o la lappatura. In questi casi l'effetto della riflettività è predominante rispetto alla rugosità della superficie.

Per i metodi di misurazione ottica, quindi senza contatto, le superfici altamente riflettenti o trasparenti rendono difficile il processo di acquisizione (come dimostrato dagli esperimenti dell'articolo [8]). La riflessione potrebbe riportare la luce direttamente nell'ottica della fotocamera portandola in saturazione o una riflessione
Capitolo 7-Introduzione ai test con scanner a luce strutturata

sull'oggetto potrebbe compromettere la regolarità del pattern o della linea laser. In entrambi i casi, l'acquisizione è deteriorata in quanto si vengono a generare punti spuri che non appartengono alla superficie effettiva. Superfici trasparenti o semitrasparenti causano ancora maggiori difficoltà poiché le forme proiettate non generano sulle superfici dei profili riconoscibili dell'oggetto. Per questo motivo, questi oggetti sono spesso coperti da un sottile strato di spray specifico. Invece, se le superfici sono troppo scure o opache non riflettono l'intensità luminosa minima richiesta per l'acquisizione dei dati.

Anche l'aggiunta del sottile strato di spray ha un effetto sulla misura come viene fatto notare nell'articolo [9]. Con tale applicazione si ha un ulteriore incertezza sulla misura, in quanto lo spray sul pezzo genera uno strato di copertura di 11 μ m ed una deviazione massima di forma di 45 μ m, questi dati sono stati presi da un secondo articolo. Tali valori sono molto importanti durante l'analisi e ovviamente dipendono da come lo spray viene applicato. Dopo vari test di applicazione, i valori dello strato più bassi vanno da 5 μ m ai 18 μ m con un valore medio di 11 μ m.

Il risultato finale può anche essere influenzato dal materiale o dal colore del pezzo analizzato.

Nell'articolo [4] uno dei criteri di analisi è il valutare se il materiale del pezzo è adatto per realizzare una digitalizzazione completa delle superfici. La conclusione è che anche il materiale gioca un ruolo importante in termini di dati validi, migliori risultati vengono ottenuti con Alluminio682 e Necuron540, in entrambi i casi la perdita di punti è molto bassa. Mentre pezzi in acciaio inossidabile e leghe di rame presentano nuvole di punti incomplete.

Invece l'effetto del colore dell'oggetto viene studiato negli articoli [10] e [6]. Nel primo vengono mantenuti fissi la velocità di movimentazione del laser e l'illuminazione dell'ambiente mentre viene fatto variare il colore dell'oggetto. Disponevano di quattro oggetti uguali ma con differenti colorazioni, quello grigio viene utilizzato come riferimento (in quanto di colore neutro) mentre per le varie prove vengono utilizzati i pezzi di colore rosso, verde e blu. Per valutare l'effetto sul risultato finale vengono eseguiti tre passaggi: eseguire diverse scansioni dell'oggetto grigio in modo da avere un file CAD basato sulla nuvola di punti, eseguire le scansioni cambiando l'oggetto, comparare le scansioni ottenute con quella di riferimento in termini di deviazione della mesh. Come risultato finale si ha che l'oggetto di colore rosso ha prodotto una qualità di scansione migliore.

Invece, nel secondo articolo viene analizzato il numero di punti acquisiti al variare del colore della superficie. Anche in questo caso i colori utilizzati sono rosso, verde e blu, il maggior numero di punti acquisiti si ottiene col pezzo di colore rosso poi si ha il colore verde e infine il colore blu. Il numero di punti acquisiti varia al variare dell'indice di riflessione relativa. Tanto più tale valore è alto tanti più punti verranno acquisiti.

Infine, nell'articolo [11] per la verifica dei sistemi di misura basai sull'ottica 3D è stato sviluppato un nuovo pezzo free-form. L'artefatto è realizzato per identificare le limitazioni dei sistemi ottici e per tale motivo viene realizzato sia con superfici concave che convesse. Una rappresentazione dell'artefatto è visibile in *Figura 7.5*, tale articolo ci fa capire che anche la conformazione del pezzo da misurare influisce e di molto sulla misura.



Figura 7.5 Artefatto realizzato nell'articolo [11] per valutare l'influenza della conformazione sulla misura

7.2.3 Procedura di misura

Ultimo aspetto che può influenzare il risultato finale è la procedura di misura. Per questo aspetto non vi sono riferimenti nello stato dell'arte, quindi dopo un attento studio dello strumento e del suo funzionamento si è arrivati a capire quali aspetti possono essere più o meno influenti. Alcune caratteristiche dello strumento sarebbero sicuramente influenti, ad esempio il campo di vista, le differenti tipologie di pattern a luce strutturata proiettati o la risoluzione delle ottiche, ma non si è potuto verificare l'effetto in quanto per il modello di scanner PrimeScan tali caratteristiche sono fisse e non possono essere variate. Tra le tante impostazioni software che possono essere variate, solo le più significative vengono analizzate nei vari test in modo da capire l'effetto della singola impostazione sulla misura.

Il primo aspetto analizzato è la tipologia di scansione. Lo strumento permette l'acquisizione dei dati in tre differenti modi: Contour Matching, con il quale per mettere assieme le varie scansioni eseguite dallo strumento il software sfrutta le superfici comuni tra una scansione e l'altra; Marker, vengono posizionati diversi marker nel volume di misura e/o sul pezzo in modo da permettere al software di unire le diverse scansione grazie al loro riconoscimento; Automatic, viene utilizzata una tavola rotante che prima della scansione vera e propria viene riconosciuta dal software come un asse macchina di conseguenza le rotazione della tavola e quindi del pezzo saranno note e a priori e questo permetterà l'allineamento delle varie scansioni.

Proprio nella modalità Automatic un aspetto fondamentale è il Teach ovvero il riconoscimento della tavola da parte del software ed è proprio questo il secondo aspetto approfondito. Il Teach consiste nel rilevamento della posizione e dei movimenti della tavola da parte del sensore, per fare ciò durante questa procedura il sensore rileverà il pezzo, presente sulla tavola, (che possiede due gradi di libertà: uno di rotazione e uno di inclinazione laterale) in tre posizioni differenti. Il corretto allineamento di queste tre scansioni permetterà il riconoscimento della tavola, sorge spontaneo dire che la bontà del risultato dipenderà dall'oggetto utilizzato.

Altro aspetto fondamentale è il numero di esposizioni per ogni singola scansione. Per la generazione della nuvola di punti finale sono necessarie diverse scansioni, il numero

Capitolo 7-Introduzione ai test con scanner a luce strutturata

di scansioni "ideale" dipenderà da diversi fattori come ad esempio la complessità o la finitura superficiale del pezzo. Per ogni scansione si può impostare il numero di esposizioni che va da un minimo di uno ad un massimo di quattro, per ogni esposizione si potrà impostare un diverso shutter time ovvero il tempo (in millisecondi) durante il quale le ottiche del sensore rimarranno aperte per l'acquisizione dell'immagine. Il risultato finale sarà la combinazione delle singole foto scattate con diversi shutter time, quindi è naturale pensare che un diverso numero di esposizioni può portare a misurazioni differenti.

Infine, prima dell'inizio di uno nuovo progetto si può impostare il template ovvero un filtro sui dati acquisiti. I template disponibili sono tre: Full, viene utilizzato l'intero volume di dati, l'elaborazione richiede elevate risorse di calcolo; Medium, utilizzata come impostazione di default, vengono utilizzati metà dei pixel; Preview, vengono utilizzati un terzo dei pixel. L'obiettivo nell'analizzare i dati relativi a scansioni con differenti template è di capire nel dettaglio le differenze che ne derivano sulla misura finale ovvero quali aspetti vengono maggiormente influenzati e di comprendere in che situazioni è più opportuno utilizzare un template piuttosto che un altro.

8 Progettazione degli esperimenti e analisi dei dati

In questo capitolo viene descritto il DOE (Design of Experiments), un metodo che permette di organizzare in modo schematico un esperimento e che attraverso di esso si riescono ad analizzare gli obiettivi e gli elementi più significativi degli esperimenti in modo da poter eseguire le prove sperimentali con la massima efficacia. Dopo aver approfondito tale discorso si passa alla descrizione dell'ANOVA (Analysis Of Variance) ovvero il metodo statistico utilizzato, in questo lavoro di tesi, per analizzare l'influenza dei numerosi parametri sulla misura con sensore a luce strutturata. Si fa riferimento alle spiegazioni teoriche e formule presenti in [12].

8.1 Strategia della sperimentazione

Generalmente gli esperimenti vengono utilizzati per lo studio delle prestazioni di processi e sistemi, come si può vedere in *Figura 8.1*. Il processo può essere considerato come un insieme di risorse che trasforma un input in un output. Durante questa trasformazione ci sono delle variabili di processo che possono essere controllate $x_1, x_2, ..., x_p$ e altre che non possono esserlo $z_1, z_2, ..., z_q$. Gli obiettivi dell'esperimento possono essere:

- Individuare quali variabili sono più influenti sulla risposta y;
- Individuare i valori da assegnare alle variabili *x* in modo da avere una risposta *y*, il più vicino possibile, simile al valore nominale;
- Individuare i valori da assegnare alle variabili *x* in modo che la variabilità della risposta *y* sia minima;
- Individuare i valori da assegnare alle variabili *x* in modo che l'effetto delle variabili *z* sulla risposta *y* sia il minore possibile.





Fattori non controllabili

Figura 8.1 Modello generale di un processo

Capitolo 8-Progettazione degli esperimenti e analisi dei dati

La strategia della sperimentazione può essere utilizzata sia nello sviluppo di processi, sia nella risoluzione di problemi per migliorare le prestazioni del processo o per ottenere un processo che sia robusto e insensibile a fonti di variabilità esterne. Viene considerata un metodo statistico attivo in quanto si eseguono effettivamente una serie di test sul processo o sul sistema, apportando modifiche agli input e osservando i corrispondenti cambiamenti degli output, questo produrrà informazioni che possono portare miglioramenti al processo.

8.1.1 Applicazioni tipiche della pianificazione sperimentale

La sperimentazione può essere vista come parte integrante del processo scientifico e come un aspetto utile per capire meglio il funzionamento dei sistemi o dei processi. La pianificazione sperimentale è estremamente importante in campo tecnico in quanto permette di migliorare le performance dei processi già esistenti e per trovare nuovi sviluppi in quelli già esistenti.

Sfruttando i vantaggi che tale tecnica possiede si potrà avere:

- Migliore rendimento del processo;
- Risultati con bassa variabilità che si avvicinano al valore di progetto;
- Minore tempo di sviluppo;
- Riduzione generale dei costi.

8.1.2 Principi di base della pianificazione sperimentale

Gli elementi fondamentali della pianificazione sperimentale sono la replicazione, la casualizzazione e l'impiego di blocchi. Con replicazione si intende la ripetizione di un esperimento di base senza modificare le impostazioni dei fattori.

La replicazione ha due proprietà principali. La prima consiste nel permettere di stimare l'errore sperimentale (rumore) nel sistema utilizzato, in questo modo si riesce a capire se le differenze presenti nei dati sono significative. La seconda permette di ottenere un maggiore "potere" statistico (capacità di identificare piccoli effetti).

La casualizzazione è uno strumento statistico utilizzato per ridurre al minimo i potenziali errori incontrollabili nell'esperimento assegnando in modo casuale l'allocazione del materiale sperimentale e l'ordine con cui vengono eseguite le varie prove dell'esperimento. Applicando questa tecnica si riesce a "mediare" l'influenza di fattori estranei eventualmente presenti.

Infine, il blocco viene usato per realizzare con una precisione più elevata i confronti tra i fattori di interesse. Nella maggior parte dei casi questa tecnica permette di eliminare o ridurre la variabilità dovuta dai fattori di disturbo, cioè fattori che possono influenzare il processo ma sui quali non si ha un controllo diretto.

8.1.3 Linee guida per la pianificazione degli esperimenti

Per analizzare gli esperimenti con un approccio statistico è opportuno, prima di iniziare, che siano chiari alcuni aspetti come la decisione dell'aspetto da indagare, come ricavare i dati e il modo in cui analizzarli. Vengono riportate di seguito le linee guida per la pianificazione di un esperimento:

- **Riconoscimento e formulazione del problema**: è opportuno pensare a delle liste di problemi, o domande, alle quali si vuole risolvere o rispondere attraverso l'esperimento. Uno studio dettagliato del problema è fondamentale per una comprensione completa del fenomeno e per la riuscita finale dell'esperimento. Nel maggior parte dei casi è quasi impossibile che con un unico esperimento vengano date le risposte a tutte le domande riguardanti il fenomeno, per tale motivo una delle migliori strategie è quella di utilizzare un metodo sequenziale, suddividendo l'esperimento principali in tanti ma più piccoli esperimenti;
- Scelta di fattori, livelli e intervalli: durante lo studio del fenomeno, chi effettua l'esperimento andrà ad individuare dei fattori che influenzano il processo o il sistema, tali fattori possono essere classificati come di progetto o di disturbo. Per quanto riguarda i primi, lo sperimentatore potrà avere la necessità di farli variare durante l'esperimento. Fanno parte di questa categoria i fattori che effettivamente vengono testati durante l'esperimento, i fattori che vengono mantenuti costanti durante tutto l'esperimento in quanto influiscono sulla risposta ma non sono di interesse ai fini dell'esperimento e infine quelli che vengono lasciati variare in quanto il loro effetto sul fenomeno è minimo.

Quelli di disturbo invece hanno un effetto rilevante sul fenomeno. Tali fattori possono essere controllati (lo sperimentatore può fissarne i livelli), se un fattore non è controllabile ma può essere misurato, si può utilizzare l'analisi della covarianza per compensarne l'effetto. Se invece un fattore varia naturalmente e in modo non controllato durante il processo ma può essere controllato in fase sperimentale allora viene considerato come un rumore, il compito dello sperimentatore è quello di combinare opportunamente i fattori controllabili in modo da ridurre la variabilità del fattore rumore.

Una volta che i fattori sono stati identificati e scelti, lo sperimentatore dovrà fissare gli intervalli nei quali fare variare i fattori e i livelli specifici corrispondenti alle prove, per fare ciò sarà necessaria una conoscenza globale, sia pratica che teorica, del processo.

- Scelta delle variabili di risposta: in fase preliminare è opportuno che lo sperimentatore scelga con cura la variabile di risposta, in modo che questa fornisca informazioni utili sul processo da studiare. Nella maggior parte dei casi la variabile di risposta è la media o la deviazione standard del parametro da analizzare.
- Scelta del piano sperimentale: in questa fase dell'esperimento va definita la dimensione campionaria (il numero di repliche dell'esperimento), l'ordine delle prove e la decisione se applicare eventuali restrizioni per la casualizzazione. Il piano sperimentale deve essere scelto sempre tenendo a mente l'obiettivo finale, in molti processi si sa prima di eseguire l'esperimento che alcuni fattori influenzeranno in modo significativo la risposta, di conseguenza sarà interessante capire quali fattori la causano e nel determinare il grado di variazione della risposta.
- **Esecuzione dell'esperimento**: durante l'esecuzione dell'esperimento si deve rispettare nel minimo dettaglio tutto quanto deciso precedentemente. Un errore a questo punto della procedura può portare alla perdita di validità

dell'esperimento. È opportuno eseguire delle prove prima di passare all'esperimento vero e proprio, in questo modo si riesce a verificare se le decisioni prese precedentemente sono corrette.

- Analisi statistica dei dati: per eliminare dall'analisi dell'esperimento la soggettività dello sperimentatore, è opportuno analizzare i dati ottenuti con metodologie statistiche in modo da rendere le conclusioni sull'esperimento il più oggettive possibili.
- **Conclusione e raccomandazioni**: dopo aver analizzato i dati ottenuti è opportuno arrivare a delle conclusioni sui risultati in modo da creare una linea guida. Per rendere più chiari possibili i risultati ottenuti può essere molto utile una rappresentazione grafica.

8.2 Piani fattoriali

Quando in un esperimento ci sono molti fattori di interesse, vengono utilizzati in quanto molto efficienti i piani fattoriali. Con questo termine ci si riferisce a degli esperimenti o ripetizioni degli stessi, in cui vengono analizzate tutte le possibili combinazioni di fattori e livelli. Se ci sono due fattori A e B aventi rispettivamente a e b livelli, allora ogni replicazione possiede tutte le possibili $a \times b$ combinazioni. Ogni singolo fattore avrà un effetto, visto come cambiamento della risposta in seguito ad un cambiamento nel livello del fattore, chiamato effetto principale. Ad esempio, riferendoci alla *Figura 8.2*, l'effetto principale del fattore A è la differenza tra la media della risposta al livello "alto" (+) e la media della risposta al livello "basso" (-) come mostrato nell'equazione (8.1).

$$A = \bar{y}_{A^+} - \bar{y}_{A^-} = \frac{30+40}{2} - \frac{10+20}{2} = 20$$
(8.1)



Figura 8.2 Esperimento fattoriale a due fattori, la risposta y è indicata ai vertici

Allo stesso modo l'effetto principale di *B* è:

$$B = \bar{y}_{B^+} - \bar{y}_{B^-} = \frac{20+40}{2} - \frac{10+30}{2} = 10$$
(8.2)

Si può verificare, in alcuni casi, che la differenza nella risposta tra i livelli di un fattore non è la stessa per tutti i livelli degli altri fattori (come in *Figura 8.2*); se si verifica ciò vuol dire che esiste un'interazione tra i diversi fattori.

Facendo riferimento alla Figura 8.3 avremo che:

$$A = \bar{y}_{A^+} - \bar{y}_{A^-} = \frac{30+0}{2} - \frac{10+20}{2} = 0$$
(8.3)



Figura 8.3 Esperimento fattoriale con interazione

Al livello "basso" del fattore *B* l'effetto di *A* sarà A = 30 - 10 = 20 e al livello "alto" del fattore *B* sarà A = 0 - 20 = -20. C'è un'interazione tra *A* e *B* dato che la risposta di *A* dipende dal livello di *B* scelto, si può definire l'entità dell'interazione come mostrato nell'equazione (8.4).

$$AB = \frac{-20-20}{2} = -20. \tag{8.4}$$

I concetti precedentemente espressi possono essere riportati in forma grafica, nella *Figura 8.4* né il fattore *A* né il fattore *B* hanno un effetto sulla variabile di risposta e non c'è interazione tra i due fattori, nella *Figura 8.5* il fattore *A* ha un effetto sulla variabile di risposta mentre il fattore *B* no neanche in questo caso c'è interazione, infine nella *Figura 8.6* si ha che sia il fattore *A* che il fattore *B* hanno un effetto sulla variabile di risposta inoltre in questo caso ci sarà interazione tra i due fattori.

I piani fattoriali vengono utilizzati in quanto hanno numerosi vantaggi. Risultano migliori, dal punto di vista dell'efficienza, degli esperimenti ad uno solo fattore alla volta e sono l'unico modo per individuare l'interazione tra i fattori. Infine, questa procedura permette di analizzare l'effetto dei singoli fattori per ognuno dei loro livelli, in questo modo le conclusioni saranno rapportate ad un elevato numero di condizioni sperimentali.



Figura 8.4 Rappresentazione grafica di un esperimento senza interazione e senza effetto dei singoli fattori sulla risposta



Figura 8.5 Rappresentazione grafica di un esperimento senza interazione e con effetto dei singoli fattori sulla risposta



Figura 8.6 Rappresentazione grafica di un esperimento con interazione e effetto dei singoli fattori sulla risposta

8.3 Modello statistico

Sia y_{ijk} la risposta ottenuta quando il fattore A è all'*i*-esimo livello (i = 1, 2, ..., a) ed il fattore B è al *j*-esimo livello (j = 1, 2, ..., b) per la *k*-esima replicazione (k = 1, 2, ..., n). Generalmente la rappresentazione di un esperimento a due fattori si presenta come mostrato in *Tabella 8-1*. Il numero totale delle $a \times b \times n$ osservazioni è effettuato in modo del tutto casuale, in tal caso si può parlare di piano completamente casualizzato. Tali osservazioni possono essere rappresentate da un modello che può essere espresso in differenti modi.

Il modello degli effetti è:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$
(8.5)

dove μ è l'effetto medio generale, τ_i è l'effetto dell' *i*-esimo livello del fattore di riga *A*, β_j è l'effetto dell' *j*-esimo livello del fattore di colonna *B*, $(\tau\beta)_{ij}$ è l'effetto dell'interazione tra τ_i e β_j e ε_{ijk} è una componente di errore casuale.

Un altro modello per la rappresentazione dell'esperimento è quello delle medie:

$$Y_{ijk} = \mu_{ij} + \varepsilon_{ijk} \tag{8.6}$$

dove la media dell' *ij*-esima cella è:

$$\mu_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} \tag{8.7}$$

	Fattore <i>B</i>			
		1	2	 Ь
	1	<i>y</i> ₁₁₁ , <i>y</i> ₁₁₂ , , <i>y</i> _{11n}	<i>y</i> ₁₂₁ , <i>y</i> ₁₂₂ , , <i>y</i> _{12n}	<i>Y</i> _{1b1} , <i>Y</i> _{1b2} , , <i>Y</i> _{1bn}
Fattore A	2	<i>y</i> ₂₁₁ , <i>y</i> ₂₁₂ , , <i>y</i> _{21n}	y ₂₂₁ , y ₂₂₂ , , y _{22n}	y _{2b1} , y _{2b2} , , y _{2bn}
	•••			
	а	У _{а11} , У _{а12} , , У _{а1п}	У _{а21} , У _{а22} , , У _{а2п}	Yab1 , Yab2, , Yabn

Tabella 8-1 Esempio di un piano fattoriale a due fattori

Nel piano fattoriale i due fattori, *A* e *B*, sono di uguale interesse. L'obiettivo è quello di valutare l'ipotesi sull'eguaglianza di effetti di trattamenti di riga del tipo:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 \cdots = \tau_a = 0 \tag{8.8}$$

$$H_1: almeno \ un \ \tau_i \neq 0 \tag{8.9}$$

e l'eguaglianza di effetti di trattamento di colonna, del tipo:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 \cdots = \beta_b = 0 \tag{8.10}$$

$$H_1: almeno \ un \ \beta_j \neq 0 \tag{8.11}$$

C'è anche l'interesse di sapere se i trattamenti riga e colonna interagiscono. Quindi si valuta anche:

$$H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ per tutti } i, j \tag{8.12}$$

$$H_1: almeno \ un \ (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \tag{8.13}$$

Vediamo di seguito come si possono verificare queste ipotesi attraverso l'utilizzo dell'analisi della varianza a due fattori.

8.4 Analisi statistica con ANOVA

Si può indicare con $Y_{i...}$ il totale di tutte le osservazioni effettuate col livello *i*-esimo del fattore *A*, con $Y_{.j.}$ il totale di tutte le osservazioni col livello *j*-esimo del fattore *B*, $Y_{ij.}$ il totale di tutte le osservazioni nella cella *ij*-esima e $Y_{...}$ il totale generale di tutte le osservazioni. Mentre $\overline{Y}_{i...}$, $\overline{Y}_{.j.}$, $\overline{Y}_{ij.}$ e $\overline{Y}_{...}$ sono le corrispondenti medie di riga, di colonne, di cella e generale.

Si avrà:

$$Y_{i..} = \sum_{j=1}^{b} \sum_{k=1}^{n} Y_{ijk} \quad \overline{Y}_{i..} = \frac{Y_{i..}}{bn} \quad i = 1, 2, \dots, a$$
(8.14)

$$Y_{.j.} = \sum_{i=1}^{a} \sum_{k=1}^{n} Y_{ijk} \quad \bar{Y}_{.j.} = \frac{Y_{.j.}}{an} \quad j = 1, 2, \dots, b$$
(8.15)

$$Y_{ij.} = \sum_{k=1}^{n} Y_{ijk} \quad \bar{Y}_{ij.} = \frac{Y_{ij.}}{n} \quad i = 1, 2, \dots, a \quad j = 1, 2, \dots, b$$
(8.16)

76

$$Y_{...} = \sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{b} \sum_{k=1}^{n} Y_{ijk} \qquad \overline{Y}_{...} = \frac{Y_{...}}{abn}$$
(8.17)

La somma dei quadrati totale corretta può essere scritta nel seguente modo:

$$\sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{b} \sum_{k=1}^{n} (Y_{ijk} - \bar{Y}_{...})^{2} = \sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{b} \sum_{k=1}^{n} [(\bar{Y}_{i..} - \bar{Y}_{...}) + (\bar{Y}_{.j.} - \bar{Y}_{...}) + (\bar{Y}_{ij..} - \bar{Y}_{...} - \bar{Y}_{.j.} + \bar{Y}_{...}) + (\bar{Y}_{ijk} - \bar{Y}_{ij..})]^{2}$$
$$= bn \sum_{i=1}^{a} (\bar{Y}_{i..} - \bar{Y}_{...})^{2} + an \sum_{j=1}^{b} (\bar{Y}_{.j.} - \bar{Y}_{...})^{2} + n \sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{b} (\bar{Y}_{ij.} - \bar{Y}_{...} - \bar{Y}_{...})^{2} + \sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{b} \sum_{k=1}^{n} (Y_{ijk} - \bar{Y}_{ij..})^{2}$$

poiché i sei prodotti incrociati del lato destro hanno valore zero. L'equazione precedente può essere scritta in una forma alternativa:

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E \tag{8.18}$$

La somma dei quadrati totali è calcolata come:

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{b} \sum_{k=1}^{n} Y_{ijk}^2 - \frac{Y_{...}^2}{abn}$$
(8.19)

Le somme dei quadrati degli effetti principali sono:

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^{a} Y_{i..}^2 - \frac{Y_{..}^2}{abn}$$
(8.20)

e

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^{b} Y_{.j.}^2 - \frac{Y_{..}^2}{abn}$$
(8.21)

La SS_{AB} viene ottenuta in due stadi. Si calcola prima la somma dei quadrati tra gli $a \times b$ totali di cella, detta somma dei quadrati dovuta ai "subtotali":

$$SS_{Subtotali} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{b} Y_{ij.}^{2} - \frac{Y_{..}^{2}}{abn}$$
(8.22)

L'equazione precedente contiene anche SS_A e SS_B . Pertanto, adesso si può calcolare SS_{AB} :

$$SS_{AB} = SS_{Subtotali} - SS_A - SS_B \tag{8.23}$$

Infine, per sottrazione si può calcolare SS_E :

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \tag{8.24}$$

Il numero di gradi di libertà per ciascuna somma dei quadrati viene calcolato come mostrato in *Tabella 8-2*.

Effetto	Gradi di libertà
A	a – 1
В	b-1
Interazione <i>AB</i>	(a-1)(b-1)
Errore	ab(n-1)
Totale	abn-1

Tabella 8-2 ANOVA: calcolo dei gradi di libertà

Si possono determinare i valori dei quadrati medi dividendo la somma dei quadrati per i propri gradi di libertà:

$$MS_{A} = \frac{SS_{A}}{a-1} \quad MS_{B} = \frac{SS_{B}}{b-1} \quad MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)} \quad MS_{E} = \frac{SS_{E}}{ab(n-1)}$$
(8.25)

Ipotizzando che il modello del paragrafo 3 sia corretto e che l'errore ε_{ijk} sia distribuito normalmente e con varianza σ^2 , $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$, allora i rapporti medi MS_A/MS_E , MS_B/MS_E , MS_{AB}/MS_E sono distribuiti come una variabile casuale *F* e la regione critica è la coda destra di tale distribuzione. Tutti gli elementi precedentemente analizzati fanno parte del test statistico e vengono rappresentati in una tabella di analisi della varianza, come rappresentato in *Tabella 8-3*:

Tabella 8-3 Tabella ANOVA per fattoriale a due fattori

Origine della variabilità	Somma dei quadrati	Gradi di libertà	Quadrati medi	F ₀
A	SS _A	a – 1	MS _A	$\frac{MS_A}{MS_E}$
В	SS _B	b - 1	MS _B	$\frac{MS_B}{MS_E}$
Interazione	SS _{AB}	(a-1)(b-1)	MS _{AB}	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Errore	SS_E	ab(n-1)	MS_E	
Totale	SS _T	<i>abn</i> – 1		

8.5 Analisi della varianza attraverso la distribuzione F

Lo studio della varianza viene realizzato mediante il confronto tra le varianze sfruttando il test F di Fisher, avente una distribuzione nota a priori. Si esegue questo test per assicurarsi che la differenza tra le medie è dovuta al processo e non è da correlare al caso. Una volta calcolati, i vari valori di F_0 vengono confrontati con il valore di $F_{critico}$. Questo valore viene determinato a partire dalla distribuzione di Fisher (*Figura 8.7*) noti i gradi di libertà delle variabili di interesse, dell'errore e definito il livello di significatività α (per semplificare tale calcolo sono disponibili delle tabelle). Fatto ciò si può passare al confronto, se $F_0 > F_{critico}$ si può respingere l'ipotesi nulla ovvero la differenza tra le medie è casuale e accettare quella alternativa ovvero la differenza tra le medie è dovuta al processo.



Figura 8.7 Regione di accettazione e di rifiuto per la distribuzione F

9 Calibrazione del sensore a luce strutturata

Dopo ogni tipo di trasporto o modifica del campo visivo del sensore, è necessaria una calibrazione per garantire che il sensore funzioni correttamente e in modo affidabile. Per verificare la qualità della calibrazione, si deve eseguire il processo di "Verifica calibrazione". Se un risultato di calibrazione è stato verificato come insufficiente o inadeguato, è necessario eseguire una ricalibrazione prima del successivo progetto di misurazione. Viene riportata di seguito la procedura di calibrazione in quanto prima di eseguire i vari test si è ritenuto opportuno ricalibrare il sensore per essere sicuri che esegua le misure correttamente.

9.1 Identificazione della tavola di calibrazione

A seconda delle dimensioni del campo di misura viene assegnata una differente piastra di calibrazione, come si può vedere in *Figura 9.1*.



Figura 9.1 Differenti dimensioni della tavola di calibrazione per vari campi di misura

La piastra di calibrazione deve essere posizionata parallelamente al sensore nel centro del volume di misurazione (distanza di lavoro). È presente un laser di posizione per essere sicuri che la piastra di calibrazione sia posizionata alla distanza corretta. I marker sulla piastra non devono essere toccati in quanto molto sensibili. Sia il sensore che la piastra dovrebbero essere collocati in un ambiente con temperature simili almeno 24 ore prima della procedura di calibrazione.

9.2 Posizionamento del sensore per la calibrazione

Il posizionamento del sensore per la procedura di calibrazione consta di diversi step:

- Posizionare il treppiede su una superficie piana e stabile. Regolare le gambe del treppiede ad un'altezza adeguata e, se presente, controllare la livella;
- Montare il sensore sul treppiede usando un manicotto filettato da 3/8". Assicurarsi che il sistema sia stato montato correttamente;
- La distanza tra il sensore e la piastra di calibrazione deve essere uguale alla distanza di lavoro del campo di misura. Verificare che il sensore sia allineato in posizione parallela alla piastra di calibrazione (*Figura 9.2a*);
- Regolare l'altezza del sensore in modo che le lenti siano posizionate alla stessa altezza del marker centrale sulla piastra di calibrazione (*Figura 9.2b*).



Figura 9.2 Corretto posizionamento del sensore rispetto alla tavola di calibrazione

9.3 Allineamento del sensore per la fase di calibrazione

La distanza di lavoro corretta per il sistema è basata sulla posizione in cui gli assi ottici di entrambe le videocamere si intersecano tra di loro. È necessario accertare l'esatto posizionamento del sensore prima di iniziare la calibrazione, poiché la posizione dell'origine delle coordinate deriva dalla posizione di calibrazione iniziale. L'orientamento di tutte le successive posizioni di calibrazione si basa dunque su questa posizione iniziale. Per garantire che la calibrazione abbia esito positivo, è necessario avere una profondità di campo sufficiente per l'intero volume di misurazione. Le impostazioni di apertura e messa a fuoco degli obiettivi sono predefinite. Sono ottimizzate in base al campo di misura e garantiscono una profondità di messa a fuoco sufficiente per l'intero volume di misurazione. Durante questa procedura ci possono essere dei possibili errori come: la fotocamera e l'unità del proiettore non sono a fuoco, la distanza di lavoro varia considerevolmente rispetto al valore indicato nella scheda tecnica del sistema, la dimensione visualizzata della piastra di calibrazione utilizzata non è corretta. Tali problemi sono solitamente causati da: è stato utilizzato un set di lenti errato o è stato modificato solo un obiettivo, una delle posizioni della telecamera non è corretta (posizione interna o esterna), è stata utilizzata una piastra di calibrazione errata.

9.4 Calibrazione del sensore

La calibrazione del sensore, come detto in precedenza, viene eseguita con una piastra di calibrazione che verrà rilevata in varie posizioni sull'intera area di misurazione. Dopo aver inizializzato il progetto di calibrazione, la procedura richiede lo spostamento della piastra di calibrazione nella prima posizione. Utilizzando il foglio di calibrazione sarà più semplice spostare la piastra di calibrazione nella posizione corretta. La prima posizione della piastra di calibrazione alla corretta distanza di lavoro determina il sistema di coordinate del sensore. Il marker centrale è l'origine; l'asse X scorre orizzontalmente, l'asse Y è perpendicolare all'asse X. Perpendicolare alla piastra di calibrazione in direzione del sensore c'è l'asse Z. La calibrazione viene eseguita utilizzando nove posizione standard, sette parallele e due inclinate, come si può vedere in *Figura 9.3*.



Figura 9.3 Foglio di calibrazione con rappresentate le nove posizioni standard

10 Test con sensore a luce strutturata

I test effettuati servono ad ottimizzare i parametri che influiscono sul controllo geometrico dei pezzi in ALM. Non potendo testare tutti i parametri ipotizzati in fase di analisi del processo, alcuni sono stati presi per buoni in quanto approfonditi dettagliatamente in altri studi e di conseguenza già presenti nello stato dell'arte. I restanti ovvero quelli più specifici per il sensore PrimeScan e i più critici sono stati analizzati direttamente in questo lavoro di tesi. Per individuare tali parametri e quantificare il loro effetto, si è pensato ad un approccio sperimentale basato sulla misura di pezzi reali (Bamboo Bracket) sviluppati ad hoc. Al termine di questi test si è potuto ottenere un elenco di grandezze di influenza da tenere sotto controllo e diversi set di parametri di misura per ottenere risultati metrologici ottimali su pezzi in metallo realizzati con la tecnologia ALM.

10.1 Test Allineamento

In questo test si è voluto confrontare l'effetto che hanno le tre differenti tipologie di misurazione (Contour Matching, Marker e Automatic) sull'allineamento delle diverse scansioni eseguite sul pezzo e di conseguenza sul risultato finale. Prima di passare alla descrizione vera e propria del test verrà riportata una breve descrizione delle tre tipologie di misura.

Contour matching: questo metodo di misurazione è il più semplice per misurare un oggetto con una geometria dalla superficie irregolare. Le scansioni individuali possono essere allineate solo se l'oggetto da analizzare presenta delle particolarità superficiali come ad esempio aree free-form le cui superfici presentano strutture distintive come angoli, bordi o curvature variabili. Il metodo di allineamento del profilo non richiede la presenza di marker, sfere di riferimento o dati di riferimento generati dalla fotogrammetria. L'oggetto viene catturato con misurazioni singole da tutti i lati, ognuna di queste richiede un'area sufficientemente ampia e sovrapponibile con i dati delle misurazioni precedenti e successive per garantire che le scansioni siano allineate correttamente. La precisione complessiva dell'acquisizione dipende molto dalla quantità e dalla posizione delle singole scansioni, nonché dalla sovrapposizione delle aree tra le acquisizioni. Questo metodo non è particolarmente adatto per misurare oggetti con geometria regolare, ad esempio sfere, piani o cilindri, tuttavia la misura può andare a buon fine se si posizionano degli oggetti di riferimento all'interno del campo di misura in modo da aiutare l'allineamento di due acquisizioni di dati.

Se le aree comuni tra due scansioni non sono sufficientemente grandi o causa della conformazione del pezzo il software non riesce a riconoscere parti comuni, automaticamente si attiverà la finestra di pre-allineamento. Questo è un allineamento manuale dove le due scansioni devono idealmente essere orientate allo stesso modo per facilitare la ricerca di punti omologhi appartenenti al pezzo. Come mostrato in *Figura 10.1a*, in entrambe le finestre di visualizzazione devono essere contrassegnati almeno tre punti corrispondenti; una volta selezionati, i punti corrispondenti verranno rappresentati con gli stessi colori e si può osservare l'allineamento effettuato come mostrato in *Figura 10.1b*.



Figura 10.1 Finestre di visualizzazione prima e dopo del pre-allineamento in modalità Contour Matching

Dopo il completamento delle scansioni, viene eseguito un ultimo allineamento di finitura per ottenere un risultato ottimale. La prima scansione è considerata fissa e funge da riferimento per tutte le scansioni successive da allineare. Al completamento dell'allineamento di finitura i dati di scansione si sovrappongono nel miglior modo possibile, come mostrato in *Figura 10.2*.



Figura 10.2 Effetto dell'allineamento di finitura, prima (a) e dopo (b).

Capitolo 10-Test con sensore a luce strutturata

Marker: questa strategia di scansione utilizza dei marker come aiuto per unire le singole scansioni. Non esistono restrizioni per quanto riguarda la forma dell'oggetto, tutte le superfici degli oggetti possono essere catturate allo stesso modo. I marker devono essere posizionati sull'oggetto e/o nella scena di misura in modo del tutto casuale senza una simmetria particolare. L'orientamento delle singole scansioni viene determinato automaticamente mediante l'ausilio dei marker, cioè non è richiesto il preallineamento. Se non viene utilizzato alcun riferimento, il set di dati di riferimento contenente le coordinate 3D dei marker viene integrato di volta in volta dopo ogni nuova scansione. L'allineamento automatico è possibile solo se sono presenti sufficienti marker all'interno dell'area di sovrapposizione, solitamente devono essere riconosciuti tra i 5 e i 7 marker corrispondenti tra una scansione e l'altra. Il livello di precisione ottenibile dipende dalla quantità e dall'allocazione dei marker, nonché dall'area di sovrapposizione tra le singole acquisizioni. Le singole scansioni sono ottimizzate l'una con l'altra eseguendo un allineamento finale definitivo. I marker possono essere stampati su pellicola adesiva o magnetica. Preferibilmente, dovrebbero essere usati i marker magnetici in quanto questi non lasciano alcun residuo sugli oggetti in seguito alla rimozione. Infine, a seconda del campo di misura dello strumento utilizzato, i marker utilizzati devono avere le seguenti dimensioni:

Campo di vista (mm)	Diametro dei marker (mm)
30-325	4
375-425	8
600-1050	12

Tabella 10-1	Legame tra campo	di vista e diametro	dei marker in	modalità Marker
--------------	------------------	---------------------	---------------	-----------------

Quando si utilizzano i marker, è spesso necessario lavorare con varie esposizioni in quanto l'oggetto e i marker possono presentare livelli di luminosità differenti. Per tale motivo nella maggior parte dei casi vengono utilizzate tutte le esposizioni per il rilevamento del pezzo, mentre per il rilevamento dei marker è possibile utilizzare un'impostazione di esposizione separata. Se è selezionata l'opzione di acquisizione dei marker separata, la luminosità dovrà essere regolata in un campo separato. Se i marker vengono riconosciuti saranno visualizzati con differenti colori: verde se il marker dell'ultima misurazione è riconosciuto correttamente, giallo se è riconosciuto con successo ma non ancora nel riferimento, rosso se si trova al di fuori del volume di misura e magenta se sovraesposto o sottoesposto. Dopo aver completato la misurazione, il passaggio successivo consiste nell'allineare i marker. Per fare ciò, vengono calcolati i dati 3D e allineati al set di dati di riferimento. Il risultato verrà mostrato in una finestra di visualizzazione grafica 3D. Come nel caso precedente, dopo aver completato la misurazione si esegue un allineamento di finitura per ottenere un risultato finale ottimale, per fare avvenire ciò vengono presi in considerazioni le posizioni dei marker e il contorno dell'oggetto misurato.

Automatic: modalità di acquisizione da utilizzare in combinazione con la tavola rotante, prima di eseguire la misura vera e propria devono essere solamente registrati gli assi per i movimenti di rotazione e inclinazione (procedura di teach). Specificando il numero di scansioni da eseguire, vengono calcolate le posizioni angolari dove la tavola si dovrà fermare, consentendo di eseguire automaticamente le scansioni. Per le tavole dotate di asse di inclinazione è possibile specificare massimo tre posizioni, in ogni posizione raggiunta con l'inclinazione dell'asse la tavola eseguirà il numero di rotazioni indicato. L'allineamento delle varie scansioni è automatico, per eseguirlo il software sfrutta le rotazioni della tavola note a priori dopo aver eseguito il teach. Dopo aver completato la misurazione si esegue un allineamento di finitura per ottenere un risultato finale ottimale.

10.1.1 Metodologia test allineamento

Per confrontare l'effetto delle tre tipologie di scansione sulla misura, bisogna che i processi siano il più possibile simili tra di loro. L'esperimento è stato pensato utilizzando la scansione Automatic come modello di riferimento, perciò sia nella procedura Contour Matching che Marker verrà utilizzata comunque la tavola rotante. Mentre in Automatic verranno inserite il numero di rotazioni da far eseguire e la tavola raggiungerà le posizioni desiderate automaticamente, nelle restanti due modalità la tavola verrà guidata manualmente. In questo modo si avrà che per tutte le tipologie di scansione il sensore acquisisce le immagini del pezzo nelle medesime posizioni, questo avviene dato che la posizione inziale del pezzo e il posizionamento della tavola rispetto al sensore rimangono invariate per tutte le prove e per tutte le ripetizioni. Vista la finalità del test non è indispensabile avere che il sensore acquisisca la totalità del pezzo, per tale motivo non verrà utilizzata l'inclinazione laterale della tavola (angolo di tilt) ma verrà impostato solo un determinato numero di rotazioni.

A priori si può pensare che la procedura più difficoltosa sia la Contour Matching, in quanto come detto in precedenza la buona riuscita dipende dalla conformazione del pezzo ma soprattutto dall'incremento angolare tra la scansione precedente e la successiva, per tale motivo i settaggi del software, la configurazione per l'esperimento e l'incremento angolare sono stati scelti in riferimento a questa procedura. Una scansione verrà ritenuta valida se le configurazioni adottate permettono di realizzare l'allineamento tra le varie viste senza l'utilizzo della procedura manuale (selezionando almeno tre coppie di punti omologhi). Per semplificare la procedura di allineamento si è ritenuto opportuno posizionare degli oggetti di riferimento sulla tavola, di conseguenza sia il pezzo che tali oggetti devono rimanere fermi durante tutte le rotazioni della tavola.

Come primo tentativo vengono posizionate sulla tavola rotante 6 sfere di carta dal diametro di circa 2 cm, la disposizione deve essere del tutto casuale senza uno schema preciso. Vista la presenza di oggetti esterni di riferimento, durante il settaggio delle esposizioni si imposteranno tre esposizioni per il pezzo e l'ultima specifica per le sfere, questo in quanto le sfere e l'oggetto necessitano di esposizioni differenti. Durante la disposizione delle sfere bisogna prestare attenzione al loro posizionamento, un numero minimo di sfere deve essere visibile dal sensore nel passare da una posizione della tavola alla successiva. Per tale motivo è importante soprattutto la posizione delle sfere dietro al pezzo, se tali sfere non appaiono nelle prime scansioni quando la tavola ruoterà e il sensore le riconoscerà per la prima volta potrebbero sorgere problemi sull'allineamento. Viste le dimensioni della tavola si è pensato di non fissare il pezzo al livello della tavola ma più in alto in modo da disporre meglio le sfere sul piano come mostrato in *Figura 10.3*.

Anche utilizzando questa configurazione sorgono problemi dopo che la tavola ha compiuto una rotazione di 180°. Il sensore acquisisce più punti delle sfere presenti sul retro della tavola (nella posizione iniziale) rispetto a quando le sfere ed il pezzo si trovano allo stesso livello, ma i punti acquisiti non sono sufficienti a generare un corretto allineamento. Per tale motivo si è optato sia per una riduzione delle dimensioni delle sfere, da 2 cm a un 1 cm di diametro, sia per un aumento del numero da 6 a 13. Non riuscendo ugualmente ad ottenere il risultato voluto si è deciso di ridurre l'angolo di incremento, inizialmente di 60°, a 30°. Tra le varie scansioni variando la posizione dell'oggetto variano le zone del pezzo, delle sfere e della struttura di supporto che il sensore riesce ad acquisire meglio.



Figura 10.3 Fissaggio del pezzo per Test Allineamento, configurazione che permette alle sfere di essere più visibili durante le varie scansioni

Per ridurre le fonti di disturbo si è optato per la rimozione della struttura di supporto, anche i componenti che costituiscono lo staffaggio vengono allineati dal software, ma i problemi sono i medesimi. Dopo queste varie prove, avendo capito i problemi relativi a questa procedura, si sono apportate le modifiche necessarie per un corretto funzionamento:

- Utilizzo di 13 sfere di plastilina dal diametro di 1 cm disposte sul bordo della tavola (*Figura 10.4*). È stata necessaria la sostituzione delle sfere di carta con delle sfere di plastilina in quanto le prime essendo bianche e molto frastagliate non permettevano l'acquisizione di un numero di punti sufficiente. Il posizionamento sul bordo serve a ridurre il più possibile la distanza tra le sfere ed il sensore permettendo una migliore acquisizione;
- Rotazioni della tavola non consecutive ma speculari, in questo modo si riesce ad avere un'acquisizione graduale delle sfere in modo da evitare il problema che si presentava dopo che la tavola ha eseguito una rotazione di 180°, ovvero che le sfere poste sul retro venissero visualizzate per la prima volta. Si impostano 10 rotazioni con un incremento e decremento angolare di 36°, vengono riportati in ordine gli angoli della tavola rotante utilizzati: 0° 36° 324° 72° 288° 108° 252° 144° 216° 180°.



Figura 10.4 Configurazione finale per l'analisi della procedura Contour Matching per Test Allineamento

Uno degli errori che più volte si è ripetuto in questa procedura è quello mostrato in *Figura 10.5*. Buona parte del pezzo e delle sfere vengono riconosciute con l'ultima scansione (colore verde) ma non vengono allineate correttamente con le precedenti. Questo accade in quanto il software ha eseguito l'allineamento su una sfera (cerchio rosso), tale allineamento è scorretto in quanto è relativo a due sfere differenti che però in questa determinata vista presentano zone comuni. Per questo motivo durante la realizzazione delle sfere di plastilina è molto importante che abbiano una forma del tutto casuale, devono essere l'una diversa dall'altra, si sconsiglia di realizzarle con forma puramente sferica.



Figura 10.5 Errore sull'allineamento durante la procedura Contour Matching

Capitolo 10-Test con sensore a luce strutturata

Le altre due procedure, Marker e Automatic, sono risultate essere più semplici. Per la procedura Marker si sono disposti 20 marker dal diametro di 5 mm sulla tavola (*Figura 10.6*), la disposizione è stata scelta in modo da avere il maggior numero di marker corrispondenti tra due scansioni successive. Le scansioni vengono realizzate sempre con un incremento angolare della tavola di 36°, l'ordine è il medesimo della procedura Contour Matching.



Figura 10.6 Configurazione adottata per la procedura di misura Marker per Test Allineamento

Infine, per la procedura Automatic è bastato indicare in fase di settaggio delle impostazioni software il numero di rotazioni, in questo caso 10. L'unica differenza con le precedenti due procedure è che in quest'ultima le rotazioni sono consecutive e non speculari, in quanto non si può indicare manualmente l'ordine delle rotazioni essendo la procedura automatica. Prima di passare all'analisi e al confronto dei risultati ottenuti si può effettuare un confronto delle tre tipologie di misura sulla base delle difficoltà incontrate. La procedura Automatic è da preferire alle restanti due sia per la facilità di configurazione che per il tempo impiegato. Per la configurazione è necessario solo fissare in modo stabile il pezzo alla tavola senza che durante la rotazione si scontri con parti di quest'ultima o cada, il tempo complessivo necessario per portare a termine le scansioni è sicuramente inferiore in quanto il movimento della tavola è automatico mentre nella procedura Contour Matching e Automatic la movimentazione della tavola è manuale e tra una scansione e l'altra l'operatore deve impostare manualmente l'angolo della tavola. Per la procedura Marker l'unico accorgimento è la corretta dimensione, in base al campo di vista dello strumento, disposizione e numero dei marker. La procedura Contour Matching è la più complessa da eseguire ma una volta determinata la configurazione adatta rappresenta anch'essa un'alternativa valida alle precedenti due.

10.2 Test Teach

In modalità Automatic prima che l'oggetto da misurare, sulla tavola rotante, possa essere acquisito devono essere registrati gli assi di rotazione mediante la funzione "Teach". Per determinare gli assi di rotazione deve essere posizionato sulla tavola un oggetto di calibrazione o l'oggetto da misurare. In relazione a oggetti simmetrici di rotazione come cilindri, vasi, colonne o ruote dentate, deve essere posizionato un oggetto ausiliario vicino a quello da misurare, assicurandosi che sia ancora all'interno del campo di misura. L'oggetto aggiuntivo non deve essere inferiore ad 1/5 della distanza dall'asse di rotazione.

Il processo di teach è automatico, basta impostare sul software di misura la luminosità, il numero e il tempo di esposizione. Una volta fatto ciò vengono eseguite tre scansioni sul pezzo, una in posizione zero della tavola, una dopo una rotazione di 20° e l'ultima dopo un tilt di 20°. Le due rotazioni sono molto piccole in modo che il sensore riesca ad acquisire più facilmente zone di sovrapposizione del pezzo tra una vista e l'altra. Se durante queste rotazioni ciò non avviene in quanto il software non riconosce abbastanza punti in comune tra le tre scansioni, quindi il processo di teach automatico fallisce, apparirà una finestra che permette di effettuare una correzione manuale che consiste nella selezione di punti corrispondenti. Una volta che le scansioni sono allineate correttamente, i punti acquisiti si compenetreranno. Eseguendo il teach in questo modo si aggiunge un ulteriore imprecisione alla misura, essa sarà legata all'abilità dell'operatore di individuare i punti corrispondenti e di conseguenza da quali e quanti punti vengono selezionati.

Viste le diverse alternative che possono essere scelte per eseguire questo processo, in questo test si è voluto analizzare l'effetto della procedura di teach sulla misura finale del pezzo.

10.2.1 Metodologia Test Teach

Per valutare l'influenza del teach verranno eseguite tre provi differenti riguardanti l'oggetto utilizzato per la procedura: la prima consiste nell'utilizzo del Bamboo Bracket, la seconda nell'utilizzo di un oggetto ausiliario e l'ultima nell'applicazione di piccole sfere di plastilina sulla tavola rotante. Tra le varie prove non viene cambiata la posizione della tavola e del sensore, vengono solamente inseriti e rimossi i pezzi necessari per la misura. Come pezzo da misurare viene scelto il Bamboo Bracket BBP2 in quanto presenta caratteristiche di finitura superficiali intermedie tra i diversi oggetti, per la sua ricostruzione sono stati scelti due angoli di tilt: 0° e 25°. Per ogni tilt sono state imposte 5 rotazioni della tavola rotante, in questo modo verranno eseguite in totale 10 scansioni.

In presenza di oggetti freeform o di oggetti dalla conformazione particolare, la fase di teach richiede una precedente analisi per il fissaggio del pezzo. Come detto precedentemente, se tra le tre scansioni il software non riconosce un sufficiente numero di punti in comune verrà chiesto all'operatore di eseguire l'allineamento manuale, si vuole evitare ciò in modo da non introdurre imprecisione nella misura. Per tale motivo, per uno stesso pezzo, è fondamentale il fissaggio iniziale in quanto per la buona riuscita del teach è opportuno che il sensore riesca ad acquisire zone del pezzo facilmente identificabili e sovrapponibili. Nel caso particolare del Bamboo Bracket dopo varie prove si è capito che è opportuno che il pezzo venga fissato in modo da avere la Superficie1 di fronte al sensore (*Figura 10.7*), facendo ciò quest'ultimo riesce ad allineare facilmente le tre scansioni. Se invece di avere tale superficie di fronte al sensore, il pezzo è fissato lateralmente (*Figura 10.8*) si avrà che le zone maggiormente

Capitolo 10-Test con sensore a luce strutturata

riconosciute dallo strumento sono i braccetti. L'acquisizione di queste parti non consente un facile allineamento, dato che con tre scansioni non riescono ad essere completamente ricostruite. Dunque, in presenza di pezzi che non hanno caratteristiche facilmente riconoscibili o per evitare di dover perdere troppo tempo sullo studio del fissaggio, si può utilizzare un secondo oggetto per la procedura di teach. Questo oggetto dovrà avere colore, dimensione e conformazione adatte in modo da semplificare notevolmente la procedura.



Figura 10.7 Fissaggio frontale del Bamboo Bracket sulla tavola rotante per Test Teach



Figura 10.8 Fissaggio laterale del Bamboo Bracket sulla tavola rotante per Test Teach

Capitolo 10-Test con sensore a luce strutturata

Un problema che può nascere utilizzando un pezzo differente da quello misurato è la posizione del sensore, in quanto pezzi di dimensioni differenti a parità di impostazioni software richiedono un diverso posizionamento del sensore e questo non è possibile dato che una volta eseguita la procedura di teach non si può cambiare né la posizione della tavola né la posizione del sensore. Ad esempio, se il pezzo ausiliario utilizzato per il teach è molto piccolo (*Figura 10.9*) ci si è accorti che il sensore dovrà essere posizionato molto vicino al pezzo, una volta che esso viene sostituito con il Bamboo Bracket, pezzo più grande, il posizionamento del sensore non permette una corretta acquisizione in quanto ad una distanza molto ravvicinata le parti del pezzo più vicine al sensore non vengono rilevate anche se le impostazioni software sono ottimali. Questo è dovuto al fatto che l'intensità di proiezione del pattern sul pezzo è amplificata dalla breve distanza e di conseguenza lo strumento va in saturazione non riuscendo ad acquisire i punti più vicini ad esso.



Figura 10.9 Oggetto utilizzato inizialmente per la procedura di teach

Di conseguenza, tra i vari pezzi ausiliari disponibili è stato scelto quello mostrato in *Figura 10.10*. La scelta è ricaduta su di esso in quanto ha dimensioni e colori simili al Bamboo Bracket, presenta inoltre caratteristiche circolari facilmente riconoscibili e ricostruibili anche con sole tre scansioni.



Figura 10.10 Oggetto ausiliario utilizzato per la procedura di teach

L'ultima configurazione prevede l'inserimento di sfere di plastilina sulla tavola rotante, della stessa dimensione e disposte come in *Figura 10.4*. In questo modo si è evita la parte iniziale riguardante lo studio sul fissaggio del pezzo, anche con il posizionamento laterale (*Figura 10.8*) si riesce a portare a termine correttamente la procedura di teach dato che le sfere servono ad aiutare il software qualora non riconosca abbastanza punti comuni sul pezzo.

A posteriori, si può affermare che la migliore soluzione è quella di avere un pezzo ausiliario per il teach dello stesso materiale, lavorazione superficiale e dimensione del pezzo da misurare evitando così problemi riguardanti la distanza e l'angolazione del sensore oltre alle impostazioni del software di misura come il tempo di esposizione. Nel processo ALM questa soluzione è molto più semplice, si potrebbe realizzare un file STL contente sia il pezzo da misurare che il pezzo ausiliario. Così facendo si stamperebbero i due pezzi contemporaneamente. Un esempio di pezzo adatto è quello mostrato in Figura 10.11, anche in questo pezzo sono presenti figure facilmente ricostruibili ma a differenza del precedente sono tutte differenti tra di loro e disposte in modo del tutto casuale sulla superficie frontale del pezzo, così si è sicuri che le varie caratteristiche non possono essere confuse nelle diverse scansioni in seguito alle rotazioni della tavola. Prima di passare all'analisi e al confronto dei risultati ottenuti si può effettuare un confronto delle tre tipologie di misura sulla base delle difficoltà incontrate. Sicuramente l'utilizzo del pezzo da misurare per il teach è la procedura più veloce dato che tra il teach e la misura non occorre rimuovere il pezzo ausiliario e successivamente fissare il pezzo da misurare, ma tale procedura richiede una conoscenza approfondita del pezzo e del sensore. La più semplice è la procedura che utilizza un oggetto ausiliario per il teach, in questo caso non occorrono particolari accorgimenti per l'esecuzione della misura, l'unica pecca è la perdita di tempo dovuta allo smontaggio del pezzo. La soluzione intermedia è l'utilizzo dell'oggetto da misurare ma con oggetti ausiliari sulla tavola anche in questo caso si deve prestare attenzione alla dimensione e al posizionamento di questi ultimi.



Figura 10.11 Oggetto ausiliario ideale per la procedura di Teach

10.3 Test Posizione Pezzo

In questo test si vuole testare il risultato della misura al variare della distanza tra pezzo e sensore, mantenendo costante la posizione e l'inclinazione di quest'ultimo. Tale test è fondamentale per conoscere qual è la distanza ottimale alla quale posizionare il pezzo prima di iniziare la scansione. Ovviamente, questo aspetto sarà legato al campo di vista dello strumento e alla distanza di lavoro. La variazione della distanza tra pezzo e sensore andrà ad influenzare alcuni parametri del software di misura. Il più importante è lo shutter time, allontanando il pezzo dal sensore le camere necessiteranno di differenti shutter time per la riuscita ottimale della scansione dato che il tempo per cui la camera deve rimanere aperta per l'acquisizione dell'oggetto è direttamente legato alla posizione di quest'ultimo. Per l'esecuzione di questo test si poteva scegliere una tra le tre diverse tipologie di scansione (Contour Matching, Marker e Automatic), vista la facilità e la rapidità di misura è stata scelta la modalità Automatic con tavola rotante a due assi di rotazione. Mentre il pezzo misurato è il Bamboo Bracket BBP2 dato che presenta caratteristiche superficiale intermedie, in termini di rugosità, tra i vari pezzi.

10.3.1 Metodologia Test Posizione Pezzo

Prima di iniziare l'esperimento vero e proprio c'è stata una fase di preparazione. Per prima cosa si deve definire la posizione dello strumento di misura, dato che non varierà nelle differenti prove. La posizione del sensore deve essere tale da permettere che sia sempre possibile l'acquisizione del pezzo nonostante la sua movimentazione. Per tale motivo sono fondamentali l'altezza alla quale fissare il sensore e l'angolo di inclinazione. La parte di preparazione serve sia a questo e sia a capire quanto si può variare la distanza tra tavola, in quanto il pezzo viene fissato su di essa, e il sensore. Per valutare se la distanza è corretta viene utilizzato come parametro la buona riuscita della procedura di Teach. Le distanze ed il relativo shutter time provate in fase di preparazione sono state sei e vengono riportate di seguito in *Tabella 10-2*.

Distanza (mm)	Shutter Time (ms)
320	101,4
370	126,5
420	146,5
470	157,7
520	-
570	-

Tabella 10-2 Distanza e relativo shutter time utilizzati in fase di preparazione al Test Posizione Pezzo

Questi risultati sono riferiti ad un angolo di inclinazione del sensore sull'ultimo giunto del treppiede di 25°, le ottiche sono poste ad un'altezza di 1,16 m mentre la tavola è posizionata su un piano posto a 78 cm da terra. Tali valori sono risultati ottimali dopo vari tentativi effettuati. Per le prime quattro distanze, dai 320 mm ai 470 mm, la procedura di teach va a buon fine indice che la distanza utilizzata, ottenuta mantenendo fisso il sensore montato sul treppiede e muovendo la il pezzo posizionato sulla tavola, permette la corretta esecuzione della misura. Come si può vedere in Tabella 10-2 l'unica modifica apportata è il valore dello shutter time, le motivazioni sono già descritte precedentemente. Per le prove relative alle distanze di 520 mm e 570 mm la procedura di teach non va a buon fine in quanto il sensore non riesce ad acquisire i punti appartenenti al pezzo ma comincia ad acquisire punti di oggetti presenti nella stanza dove sono state eseguite le misure. Quest'ultimo risultato era prevedibile ma si è voluto testare in ogni caso il limite massimo al quale lo strumento può eseguire una scansione, avendo come distanza di lavoro nominale 370 mm. Il passo successivo è stato quello di capire quante e quali rotazioni fare eseguire alla tavola rotante per acquisire il più possibile la superficie del pezzo, nel fare ciò si deve cercare di ridurre il più possibile il numero di rotazioni in modo da ridurre il tempo complessivo di scansione. Anche in questo caso dopo varie prove si è scelto di utilizzare due angoli di tilt, 0° e 25°, e per ogni angolo di tilt far eseguire alla tavola cinque rotazioni, di conseguenza si avranno 10 scansioni per l'acquisizione della superficie del pezzo. Il test consisterà nel posizionare il pezzo ad una distanza di 320, 370 e 420 mm dal sensore, la misura verrà eseguita tre volte ad una stessa distanza in modo da avere dati sufficienti per un'analisi statistica. La prima prova eseguita è quella a 370 mm distanza, pari alla distanza di funzionamento, e da tale distanza vengono tolti e aggiunti 50 mm per la realizzazione delle altre due prove. Le tre prove sono riuscite con successo anche se sono state notate delle particolarità per quanto riguarda la misura a 320 mm e quella a 420 mm. Nel primo caso la ridotta distanza tra sensore e pezzo porta il primo a non riconoscere alcune parti del secondo anche se le impostazioni software sono ottimali. Quando la Superficie1 era di fronte al sensore, quest'ultimo non riconosceva i punti della superficie del pezzo. Questo problema è dovuto al fatto che essendo la superficie completamente planare e ben lavorata superficialmente a ridotte distanze l'intensità luminosa con cui viene proiettato il pattern dal sensore viene amplificata e di conseguenza si avrà la saturazione dello strumento. Cosa opposta accede nella misura a 420 mm. In questo caso la superficie frontale viene riconosciuta completamente cosa che invece non accade per i braccetti del Bamboo Bracket, vista l'elevata distanza di misura. Per tale motivo si è deciso di modificare lo shutter time in modo da riconoscere più punti possibile della Superficie1 trascurando almeno per la fase di teach i braccetti. In questo test si sono verificati i problemi già incontrati nei precedenti test che ci portano a dire che il fissaggio del pezzo è fondamentale affinché il processo di teach venga portato a termine.

10.4 Test Inclinazione Sensore

In questo test si vuole testare il risultato della misura al variare dell'inclinazione del sensore, mantenendo costante la posizione di quest'ultimo e del pezzo. Tale test è fondamentale per conoscere qual è l'inclinazione migliore del sensore con la quale eseguire le misure. Per l'esecuzione di questo test si poteva scegliere una tra le tre diverse tipologie di scansione (Contour Matching, Marker e Automatic), vista la facilità e la rapidità di misura è stata scelta la modalità Automatic con tavola rotante a due assi di rotazione. Mentre il pezzo misurato è il Bamboo Bracket BBP2 dato che presenta caratteristiche superficiale intermedie, in termini di rugosità, tra i vari pezzi.

10.4.1 Metodologia Test Inclinazione Sensore

Durante questo test, per valutare l'effetto dell'angolo con cui il sensore acquisisce le immagini, si è deciso di mantenere la stessa configurazione. Per stessa configurazione si intende sia il posizionamento di sensore e pezzo, fissato sulla tavola rotante, che le impostazioni software in particolar modo lo shutter time. In fase di preparazione si è dovuto trovare un incremento angolare, in relazione al posizionamento del sensore e del pezzo, che permetta di far rimanere quest'ultimo all'interno del volume di misura dello strumento. Mantenendo la stessa configurazione, un incremento angolare del sensore (*Figura 10.12*) troppo elevato, circa 15°, non permette l'esecuzione delle scansioni dato che si verifica il problema precedentemente descritto. Dopo vari tentativi si è deciso di far variare l'angolo di 5°, con tale incremento è anche possibile mantenere lo stesso valore di shutter time sia per la procedura di teach che per la procedura di acquisizione. Di seguito, *Tabella 10-3*, vengono riportati gli angoli e lo shutter time utilizzato.



Figura 10.12 Configurazione di funzionamento per il Test Inclinazione Sensore

Capitolo 10-Test con sensore a luce strutturata

Angolo (°)	Shutter time (ms)
15	
20	142
25	

Tabella 10-3 Angoli e shutter time utilizzati durante il Test Inclinazione Sensore

In questo caso le scelte sulla misura sono uguali al Test posizione pezzo, visto l'ottimo risultato finale, di conseguenza si è scelto di utilizzare due angoli di tilt, 0° e 25°, e per ogni angolo di tilt far eseguire alla tavola cinque rotazioni, perciò si avranno 10 scansioni per l'acquisizione della superficie del pezzo. La misura verrà eseguita tre volte ad uno stesso angolo in modo da avere dati sufficienti per un'analisi statistica.

10.5 Test Numero di Esposizioni (Shutter Time)

Nella fotografia, lo Shutter Time o tempo di esposizione è il tempo in cui il sensore digitale all'interno della fotocamera viene esposto alla luce, si avrà l'apertura dell'otturatore. Si ha che la quantità di luce che raggiunge il sensore sarà proporzionale al tempo di esposizione. La quantità di luce che raggiunge il sensore dipenderà dalla velocità dell'otturatore della fotocamera, dall'apertura dell'obiettivo e dalla luminosità della scena. La luce emessa dalla scena fotografata può essere controllata attraverso l'apertura e la velocità dell'otturatore in modo da abbinare la sensibilità del sensore digitale alla luce. Ciò consentirà una buona esposizione quando tutti i dettagli della scena sono leggibili dallo strumento. Se nella fotocamera entra troppa luce si avrà un'immagine pallida ("sovraesposizione") mentre troppa poca luce può causare un'immagine troppo scura ("sottoesposizione"). Il software di misura permette di selezionare fino a quattro diverse impostazioni di esposizione. Se non si ottiene un risultato ottimale utilizzando un'intensità o un'impostazione di illuminazione, i punti dell'oggetto da misurare possono essere acquisiti mediante incrementi multipli di esposizione. L'esposizione multipla ha senso in relazione a oggetti con proprietà superficiali variabili (come nel caso di oggetti realizzare il ALM o oggetti leggermente riflettenti). Come detto precedentemente sono disponibili fino ad un massimo di quattro esposizioni, il risultato finale è la media delle immagini catturate. Questa funzione è paragonabile alla tecnica "HDR (High Dynamic Range)", ovvero la capacità di combinare più acquisizioni di immagini scattate con lo stesso oggetto di misura ma con differenti impostazioni. In fase di settaggio delle impostazioni se possibile, è necessario selezionare sempre la stessa luminosità del proiettore per ciascuna esposizione, modificando solo il valore del tempo di esposizione. In questo modo, ogni esposizione viene misurata all'interno di una sola proiezione di frangia. Tale test è fondamentale per conoscere quali sono le differenze sostanziali in termini metrologi nell'impostare uno o più tempi di esposizione. Sicuramente passando da quattro ad un'esposizione si avrà una riduzione del tempo totale impiegato per portare a termine la misura. Per l'esecuzione di questo test si poteva scegliere una tra le tre diverse tipologie di scansione (Contour Matching, Marker e Automatic), vista la facilità e la rapidità di misura è stata scelta la modalità Automatic con tavola rotante a due assi di rotazione. Mentre il pezzo misurato è il Bamboo Bracket BBP2 dato che presenta caratteristiche superficiale intermedie, in termini di rugosità, tra i vari pezzi.

10.5.1 Metodologia Test Numero di Esposizioni

In questo test non viene fatta variare né la posizione relativa tra pezzo e sensore né l'inclinazione di quest'ultimo. Prima di effettuare le misure, utilizzando la modalità Automatic, è necessario eseguire la procedura di teach. Anche i settaggi di questa procedura rimarranno invariati per tutte e tre le prove. Per testare l'effetto che il numero di esposizioni ha sulla misura finale si è deciso di eseguire tre prove: la prima con l'utilizzo di tre esposizioni, la seconda con due e l'ultima con una sola. Tra una prova e l'altra verrà rimossa l'esposizione con lo shutter time più basso come mostrato in *Tabella 10-4*. In questo caso le scelte sulla misura sono uguali ai due test precedenti visto l'ottimo risultato finale, di conseguenza si è scelto di utilizzare due angoli di tilt, 0° e 25°, e per ogni angolo di tilt far eseguire alla tavola cinque rotazioni, perciò si avranno 10 scansioni per l'acquisizione della superficie del pezzo. La misura completa verrà eseguita tre volte ad uno stesso angolo in modo da avere dati sufficienti per un'analisi statistica.

Prova	Shutter Time (ms)
	97,28
3 Esposizioni	48,59
	24,29
2 Especizioni	97,28
2 Esposizioni	48,59
1 Esposizione	97,28

Tabella 10-4 Esposizioni e Shutter Time utilizzati nel Test Numero di Esposizioni

Prima di passare all'analisi e al confronto dei risultati ottenuti si può effettuare un confronto delle tre tipologie di misura sulla base delle differenze principali. La prima caratteristica che salta in evidenza è il tempo necessario per il completamento della misura: per la prova con tre esposizioni sono richiesti 9 minuti, per quella con due 6 minuti e per quella con una singola esposizione 3 minuti. Ovviamente, tali valori sono relativi al completamento delle 10 scansioni effettuate in una singola prova. Mentre in termini di completezza di superficie del pezzo acquisita già a prima vista, come mostrato in *Figura 10.13*, si può osservare come essa aumenti gradualmente passando dalla prova ad un'esposizione a quella con tre esposizioni.



Figura 10.13 Differenza a livello di area dell'oggetto acquisito al variare del numero di esposizioni (a) 1 Esposizione (b) 2 Esposizioni (c) 3 Esposizioni

10.6 Test Rugosità/Template

In questo test viene testato il legame tra due delle caratteristiche principali che incidono sul risultato finale della misura.

La prima caratteristica è la rugosità superficiale, nei processi ALM dipende da un elevato numero di fattori. Tale caratteristica è molto importante nella misura non a contatto con metodi ottici, una diversa rugosità superficiale andrà ad influenzare la procedura di scansione. Ad esempio, una superficie troppo lisca può generare un fenomeno di riflessione del pattern durante la scansione, mentre una superficie troppo rugosa, al contrario, può generare un fenomeno di assorbimento. Avendo a disposizione tre Bamboo Bracket con rugosità superficiali differenti (*Tabella 10-5*) si può riuscire a capire il vero effetto di questa caratteristica sulla misura.

Bamboo Bracket	$R_a (\mu m)$
BBD1	6,237
BBP2	12,898
BBNP1	14,657

Tabella 10-5 Bamboo Bracket utilizzati per il Test Rugosità/Template

La seconda caratteristica è un'impostazione del software di misura, il Template, ovvero un filtro sui dati acquisiti.

I template disponibili sono tre:

- Full, viene utilizzato l'intero volume di dati, l'elaborazione richiede elevate risorse di calcolo;
- Medium, utilizzata come impostazione di default, vengono utilizzati metà dei pixel;
- Preview, vengono utilizzati un terzo dei pixel.

L'obiettivo nell'analizzare i dati relativi a scansioni con differenti template è di capire nel dettaglio le differenze che ne derivano sulla misura finale ovvero quali aspetti vengono maggiormente influenzati e di comprendere in che situazioni è più opportuno utilizzare un template piuttosto che un altro.

Lo scopo di questo test è quello di capire quale template è più opportuno utilizzare, o che differenze ci sono tra i tre disponibili, a seconda della rugosità superficiale del pezzo che devo analizzare.

10.6.1 Metodologia Test Rugosità/Template

Anche in questo test la modalità di scansione utilizzata è la Automatic con tavola rotante.

Per accentuare l'effetto delle due caratteristiche sul risultato finale, in questo test il numero di scansioni eseguite è maggiore rispetto ai precedenti: si sono impostati tre differenti angoli di tilt, 0° 30° -30°, e per ogni tilt la tavola rotante ha eseguito cinque rotazioni; di conseguenza si avranno 15 scansioni. A differenza dei test precedentemente descritti, in questo test non si utilizzerà un solo Bamboo Bracket per

Capitolo 10-Test con sensore a luce strutturata

valutare l'effetto delle caratteristiche sul pezzo, me se ne utilizzeranno tre: BBD1, BBP2 e BBNP1 (come detto precedentemente presentano tre rugosità superficiali differenti). Durante il test non si cambierà soltanto il pezzo, ma si cambierà anche il template. Di conseguenza, ripetendo la misura completa tre volte per ogni configurazione pezzotemplate si avranno un totale di 27 misurazioni. Durante tutta l'esecuzione del test non viene fatta variare né la posizione relativa tra pezzo e sensore né l'inclinazione di quest'ultimo. Inoltre, il fissaggio dei tre differenti pezzi sulla tavola rotante viene replicato esattamente, in modo da non variare la posizione relativa iniziale tra tavola rotante e sensore. Prima di passare all'analisi e al confronto dei risultati ottenuti si può effettuare un confronto delle tre tipologie di misura sulla base delle differenze principali. La prima caratteristica che salta in evidenza è il tempo necessario per il completamento della misura: per la prova con template Full sono richiesti 12 minuti, per quella con Medium 9 minuti e per quella con Preview 3 minuti. Ovviamente, tali valori sono relativi al completamento delle 15 scansioni effettuate in una singola prova. Mentre in termini di completezza di superficie e qualità di scansione del pezzo già da una prima vista, come mostrato in Figura 10.14, si può osservare come essa aumenti gradualmente, in riferimento ad uno stesso pezzo, passando dalla prova Preview, alla Medium fino ad arrivare alla Full.


Figura 10.14 Differenza a livello di punti acquisiti e qualità di scansione dell'oggetto BBP2 al variare del template utilizzato: (a) Preview (b) Medium (c) Full

In questo capitolo vengono riportati i risultati ottenuti dai vari test effettuati. Grazie ad essi si riesce a capire se il fenomeno testato incide sulla misura e quali sono le principali differenze riscontrate al variare della tipologia del fenomeno.

La fase iniziale di questo processo è stata incentrata sulla scelta dei parametri maggiormente idonei a mettere in risalto le differenze tra i vari metodi e su quale sarebbe stato il modo migliore per effettuare tale analisi. Fin da subito il metodo che è sembrato più adatto a questa tipologia di studio è quello statistico per l'analisi della varianza ANOVA, vedi capitolo ANOVA. Invece, più difficile è stata la scelta dei parametri da analizzare. Inizialmente, facendo riferimento all'articolo [10], era stata scelta come variabile di controllo la deviazione della mesh. Tale parametro variando molto poco tra le differenti prove non è adatto a dare informazioni significative sulla misura. Per tale motivo si è passati alla ricerca di altri parametri, la scelta è ricaduta sulla dimensione del diametro degli otto fori presenti sul Bamboo Bracket, sulla planarità delle due superfici e sulla perpendicolarità tra di esse. Tali valori una volta effettuata la misura e di conseguenza generato il file STL, vengono determinati attraverso l'utilizzo del software metrologico PC-DMIS come differenza tra file CAD nominale e file STL misurato. Dopo avere eseguito l'allineamento tra nuvola di punti importata e il file CAD, i fori vengono riconosciuti automaticamente dal software, mentre per la definizione dei due piani vengono utilizzati i fori precedentemente riconosciuti. I centri dei fori 1-2-3-4 rappresenteranno quattro punti che permettono la costruzione della Superficie1, mentre i fori 5-6-7-8 quelli per la Superficie2.

Una volta ricavati i dati, essi vengono modificati in modo da dare il maggior numero di informazioni sul processo, per tale motivo l'analisi ANOVA viene eseguita sui residui rispetto ai valori nominali e rispetto ai valori di riferimento ottenuti con la macchina di misura a coordinate (CMM).

11.1 Analisi dei dati e risultati Test Allineamento

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per il Test Allineamento (*Tabella 11-1*):

	Automatic	Automatic	Automatic	Contour	Contour	Contour	Marker	Marker	Marker
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Diametro1 (mm)	5,913	5,794	5,769	5,89	5,745	5,905	5,783	5,757	5,953
Diametro 2 (mm)	5,837	5,835	5,821	5,812	5,778	5,803	5,842	5,821	5,788
Diametro 3 (mm)	5,868	5,872	5,897	5,819	5 <i>,</i> 958	5,966	5,900	6,015	6,013
Diametro 4 (mm)	5,861	5,883	5,909	5,886	5,848	5,881	5,912	6,040	5,879
Diametro 5 (mm)	6,011	6,028	6,031	6,03	6,011	6,019	6,035	6,033	6,031
Diametro 6 (mm)	6,068	6,056	6,03	6,038	6,094	6,086	6,086	6,126	6,132
Diametro 7 (mm)	5,99	5,975	6,109	5,953	5,959	5,96	6,002	6,009	5,997
Diametro 8 (mm)	6,027	6,041	6,045	6,004	6,013	6,02	6,048	6,054	6,053
Planarità 1 (mm)	0,009	0,126	0,01	0,012	0,009	0,01	0,011	0,011	0,011
Planarità 2 (mm)	0,043	0,045	0,044	0,056	0,055	0,051	0,043	0,047	0,045
Perpendicolarità (mm)	0,11	0,152	0,107	0,121	0,11	0,118	0,114	0,122	0,112

Tabella 11-1 Risultati Test Allineamento

Ogni caratteristica è stata calcolata tre volte nelle stesse condizioni, in modo da permettere un'analisi statistica. Come detto in precedenza per l'analisi ANOVA non vengono utilizzati i dati di *Tabella 11-1* ma i residui. Per ottenere i residui bisogna sottrarre a tali valori quello nominale, ovvero 6 mm per i diametri e 0 mm per planarità e perpendicolarità. Fatto ciò si ottiene la tabella dei residui rispetto al valore nominale per planarità e perpendicolarità (*Tabella 11-2*) e per i diametri (*Tabella 11-3*):

	Automatic	Contour	Marker
	0,009	0,012	0,011
Planarità1 (mm)	0,126	0,009	0,011
	0,010	0,010	0,011
	0,043	0,056	0,043
Planarità2 (mm)	0,045	0,055	0,047
	0,044	0,051	0,045
Denne and is a least th	0,110	0,121	0,114
(mm)	0,152	0,110	0,122
	0,107	0,118	0,112

Tabella 11-2 Residui di planarità e perpendicolarità rispetto al valore nominale per Test Allineamento

	Automatic	Contour	Marker
	-87	-110	-217
D1 (µm)	-206	-255	-243
	-231	-95	-47
	-163	-188	-158
D2 (µm)	-165	-222	-179
	-179	-197	-212
	-132	-181	-100
D3 (µm)	-128	-42	15
	-103	-34	13
	-139	-114	-88
D4 (µm)	-117	-152	40
	-91	-119	-121
	11	30	35
D5 (µm)	28	11	33
	31	19	31
	68	38	86
D6 (µm)	56	94	126
	30	86	132
	-10	-47	2
D7 (µm)	-25	-41	9
	109	-40	-3
	27	4	48
D8 (µm)	41	13	54
	45	20	53
		•	

Tabella 11-3 Residui dei diametri rispetto al valore nominale per Test Allineamento

Utilizzando i valori di *Tabella 11-3* si può eseguire un'analisi ANOVA a due fattori, otto livelli per il campione Foro e tre livelli per il campione Allineamento, ottenendo i seguenti risultati:

Tabella 11-4 ANOVA due fattori su residui dei diametri rispetto al valore nominale per TestAllineamento

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Campione (Foro)	596716,3	7	85245	38,2	1,634E-17	2,207
Colonne (Allineamento)	15774,3	2	7887	3,5	3,702E-02	3,191
Interazione	25926	14	1852	0,83	6,347E-01	1,904
In (Errore)	107145,3	48	2232			
Totale	745561,9	71				

Il calcolo ANOVA mostra che:

- Per il campione Foro, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per il campione Allineamento, similmente al caso precedente il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per vedere l'interazione tra il campione Foro e quello Allineamento bisogna guardare la riga interazione, in questo caso $F < F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 non è respinta.

Facendo riferimento ai risultati ottenuti, si può affermare che entrambi i parametri (Foro e Allineamento) hanno un effetto significativo sulla qualità della scansione, cosa che invece non si può dire per la loro interazione. Il valore di significatività per i fori è molto più alto di quello della tipologia di allineamento, questo è sintomo del fatto che la misura è molto legata al foro in esame piuttosto che all'allineamento. Tale risultato dimostra che il processo con cui sono state eseguite le differenti tipologie di misura è molto simile, aspetto fortemente voluto in fase di preparazione del test.

Un ulteriore metodo di analisi può essere quello grafico, in questi modo possono essere messe in evidenza caratteristiche che con un'analisi numerica non vengono identificate. In *Figura 11.1* vengono riportate sulle ascisse i diversi fori mentre sulle ordinate la media dei residui per ogni singolo foro, l'andamento viene tracciato per i tre metodi di allineamento.



Figura 11.1 Analisi grafica dei residui dei diametri rispetto al valore nominale per il Test Allineamento

Nella *Figura 11.1* si può osservare che per tutti i metodi di allineamento i fori presenti sulla Superficie1, ovvero i fori 1-2-3-4, presentano dei valori dei residui negativi mentre quelli presenti sulla Superficie2, ovvero i fori 5-6-7-8, presentano dei valori positivi. Questo fenomeno può essere legato alla realizzazione del pezzo. Lo sviluppo dei fori presenti sulla Superficie2 è concorde alla direzione di crescita del pezzo e di conseguenza non necessitano di supporti interni cosa che invece non accade per i fori presenti sulla Superficie1. Nel secondo caso i fori sono orientati perpendicolarmente rispetto alla direzione di crescita e per tale motivo necessitano di supporti interni per non far cedere gli strati di polvere fusa non ancora solidificati. Di conseguenza, i fori 1-2-3-4 necessitano di un trattamento post realizzazione che molto probabilmente

influisce sulla dimensione di tali fori, risultando essere mediamente più piccoli di quelli presenti sulla Superficie2.

Utilizzando come parametro per il calcolo dei residui il valore nominale non si riesce ad avere un quadro completo dei risultati, in quanto essi possono essere influenzati sia dalla lavorazione del pezzo che dalla misura. Per capire in che modo incide la tipologia di allineamento sulla misura, i residui sono stati calcolati rimuovendo al valore misurato quello di riferimento ottenuto con la macchina di misura a coordinate (CMM). A tale scopo viene utilizzata una CMM dato che è una macchina con un'accuratezza di un ordine di grandezza superiore rispetto al sensore a luce strutturata. Di seguito vengono riportati in *Tabella 11-5* i risultati ottenuti per il Bamboo Bracket BBP2 con la CMM e i valori dei residui ottenuti sottraendo ai dati presenti in *Tabella 11-1* quelli presenti in *Tabella 11-5*.

	BBP2
Diametro 1 (mm)	5,693
Diametro 2 (mm)	5,785
Diametro 3 (mm)	5,768
Diametro 4 (mm)	5,787
Diametro 5 (mm)	6,004
Diametro 6 (mm)	6,05
Diametro 7 (mm)	6,054
Diametro 8 (mm)	6,054
Planarità 1 (mm)	0,204
Planarità 2 (mm)	0,046
Perpendicolarità (mm)	0,238

Tabella 11-5 Valori di riferimento per il pezzo BBP2 ottenuti con la CMM

	Automatic	Contour	Marker
	220	197	90
D1 (μm)	101	52	64
	76	212	260
	52	27	57
D2 (µm)	50	-7	36
	36	18	3
	100	51	132
D3 (µm)	104	190	247
	129	198	245
	74	99	125
D4 (µm)	96	61	253
	122	94	92
	7	26	31
D5 (µm)	24	7	29
	27	15	27
	18	-12	36
D6 (µm)	6	44	76
	-20	36	82
	-64	-101	-52
D7 (µm)	-79	-95	-45
	55	-94	-57
	-27	-50	-6
D8 (µm)	-13	-41	0
	-9	-34	-1

Tabella 11-6 Residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per Test Allineamento

Tabella 11-7 Residui di planarità e perpendicolarità rispetto al valore di riferimento per Test Allineamento

	Automatic	Contour	Marker
	-195	-192	-193
Planarità1 (µm)	-78	-195	-193
	-194	-194	-193
	-3	10	-3
Planarità2 (µm)	-1	9	1
	-2	5	-1
	-128	-117	-124
Perpendicolarità (µm)	-86	-128	-116
	-131	-120	-126

Utilizzando i valori di *Tabella 11-6* si può eseguire un'analisi ANOVA a due fattori, otto livelli per il campione Foro e tre livelli per il campione Allineamento, ottenendo i seguenti risultati:

Tabella 11-8 ANOVA due fattori su residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per TestAllineamento

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Campione (Foro)	375969,9	7	53710	24,062	1,12E-13	2,207
Colonne (Allineamento)	15774,3	2	7887	3,533	3,70E-02	3,191
Interazione	25925,9	14	1852	0,830	6,35E-01	1,904
In (Errore)	107145,3	48	2232			
Totale	524815,5	71				

Il calcolo ANOVA mostra che:

- Per il campione Foro, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per il campione Allineamento, similmente al caso precedente il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per vedere l'interazione tra il campione foro e quello allineamento bisogna guardare la riga interazione, in questo caso $F < F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 non è respinta.

Facendo riferimento ai risultati ottenuti, si può affermare che entrambi i parametri (Foro e Allineamento) hanno un effetto significativo sulla qualità della scansione, cosa che invece non si può dire per la loro interazione. Confrontando i risultati di *Tabella 11-4* con quelli di *Tabella 11-8* si può osservare che i risultati ottenuti per il campione colonna e per l'interazione sono identici ciò che cambia è il risultato per il campione foro, il valore di significatività aumenta rispetto al caso precedente. Per avere informazioni aggiuntive sulle tre diverse tipologie di allineamento viene effettuata, anche in questi caso un'analisi grafica (*Figura 11.2*).



Figura 11.2 Analisi grafica dei residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per il Test Allineamento

Per mettere in risalto i risultati ottenuti si è eseguita una media su tutti i fori per ogni singola modalità di allineamento ottenendo il grafico in *Figura 11.3*.



Figura 11.3 Analisi grafica della media dei residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per il Test Allineamento

Nel caso ideale, ovvero che il sensore a luce strutturata riesce a replicare perfettamente la misura della macchina di misura a coordinate, il valore del residuo delle tipologie di allineamento deve essere pari a zero. Di conseguenza, si può affermare che mediamente eseguire la scansione in modalità Contour Matching e Automatic (dato che la differenza rientra nell'ordine di una decina di µm) danno risultati che più si avvicinano a quelli di riferimento per quanto riguarda il diametro dei fori. Inoltre, si può osservare che in *Figura 11.2* non si presenta più la netta differenza di dimensione dei diametri dei fori presenti sulle due superfici, questo fenomeno può stare a significa che introducendo come valore di riferimento quello della CMM si è riusciti in gran parte a rimuovere l'effetto che la realizzazione del pezzo ha sulla misura. Inoltre, si può osservare che la dimensione dei diametri si ribalta. I fori 1-2-3-4, presenti sulla Superficie1, risultano essere più grandi di quelli 5-6-7-8, presenti sulla Superficie2. Questo risultato è più veritiero in quanto durante la rimozione dei supporti interni può darsi che la lavorazione effettuata ha inciso sulla dimensione del foro aumentandola.

Mentre per quanto riguarda il secondo gruppo di parametri presenti in *Tabella* 11-2 e *Tabella* 11-7 si ottengono gli stessi risultati con ANOVA, vengono riportate di seguito le tabelle:

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Tra gruppi	2838	2	1419,1	0,941	0,441	5,143
In gruppi	9053	6	1508,9			
Totale	11892	8				

Tabella 11-9 ANOVA a un fattore su residui della Planarità1 per Test Allineamento

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Tra gruppi	182	2	91	22,75	0,001	5,143
In gruppi	24	6	4			
Totale	206	8				

Tabella 11-10 ANOVA a un fattore su residui della Planarità2 per Test Allineamento

Tabella 11-11 ANOVA a un fattore su residui della Perpendicolarità per Test Allineamento

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Tra gruppi	93,6	2	46,8	0,202	0,822	5,143
In gruppi	1386,7	6	231,1			
Totale	1480,2	8				

Il calcolo ANOVA mostra che solo la misura della Planarità2 è legata al variare della tipologia di allineamento, mentre la misura della Planarità1 e della Perpendicolarità non sono influenzate da questo parametro. Per ottenere qualche informazione aggiuntiva su queste tre grandezze si devono interpretare meglio i dati presenti in Tabella 11-7. Come si può osservare c'è una netta differenza tra i residui, rispetto al valore di riferimento, tra Planarità1 e Planarità2 e Perpendicolarità, i valori di Planarità1 sono piuttosto differenti da quelli ottenuti con la CMM. Durante i test si è notato che il rilevamento della Superficie1 è piuttosto critico per lo strumento a luce strutturata. Ciò, può essere spiegato dal fatto che tale superficie è completamente planare e nell'atto della misura la maggior parte dei punti acquisiti per tale superficie vengono rilevati quando essa è di fronte al sensore. La posizione tra sensore e Superfcie1 è rilevante in quanto il pattern viene proiettato parallelamente alla superficie, di fatto non si ha una vera e propria deformazione (requisito fondamentale per l'acquisizione dei punti con tecnologie che sfruttano la luce strutturata). A differenza della Planarità1, la Planarità2 è molto simile a quella rilevata con CMM visto che lavorando con questa superficie non di presenta la condizione precedentemente descritta. Risulta differente, anche se in misura minore, la Perpendicolarità tra la Superficie1 e la Superficie2 misurata con sensore a luce strutturata e CMM, questa variazione può essere causata dalla non perfetta analisi della Superficie1.

11.2 Analisi dei dati e risultati Test Teach

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per il Test Teach (*Tabella 11-12*):

	Oggetto1	Oggetto2	Oggetto3	Pezzo1	Pezzo2	Pezzo3	Sfera1	Sfera2	Sfera3
Diametro 1 (mm)	5,936	5,97	5,768	5,72	5,74	5,765	5,707	5,741	5,769
Diametro 2 (mm)	5,768	5,748	5,764	5,793	5,792	5,794	5,797	5,755	5,761
Diametro 3 (mm)	5,732	5,759	5,716	5,749	6,032	5,755	5,728	5,726	5,760
Diametro 4 (mm)	5,773	5,744	5,751	5,803	5,733	5,75	5,740	5,778	5,812
Diametro 5 (mm)	5,983	6,051	6,009	5,968	5,955	5,963	6,013	6,027	6,014
Diametro 6 (mm)	6,033	6,046	6,006	5,978	5,958	5,97	6,042	6,067	6,037
Diametro 7 (mm)	5,987	5,947	5,97	5,865	5,887	5,908	5,998	5,999	5,951
Diametro 8 (mm)	6,02	6,046	5,989	5,966	5,93	5,952	6,024	5,997	6,016
Planarità 1 (mm)	0,01	0,009	0,013	0,013	0,014	0,011	0,010	0,010	0,011
Planarità 2 (mm)	0,035	0,04	0,043	0,187	0,121	0,009	0,046	0,043	0,040
Perpendicolarità (mm)	0,099	0,103	0,09	0,173	0,198	0,127	0,107	0,114	0,105

Tabella 11-12 Risultati Test Teach

Ogni caratteristica è stata calcolata tre volte nelle stesse condizioni, in modo da permettere un'analisi statistica. Come fatto in precedenza, per l'analisi ANOVA non vengono utilizzati i dati di *Tabella 11-12* ma i residui. Si riportano di seguito le tabelle dei residui rispetto al valore nominale per planarità e perpendicolarità (*Tabella 11-13*) e per i diametri (*Tabella 11-14*):

Tabella	11-13	Residui di	planarità	e perpendi	colarità	rispetto i	al valore	nominale	per '	Test	Teach

	Oggetto	Pezzo	Sfera
	055000	1 6220	oleiu
	0,010	0,013	0,010
Planarità1 (mm)	0,009	0,014	0,010
	0,013	0,011	0,011
	0,035	0,187	0,046
Planarità2 (mm)	0,040	0,121	0,043
	0,043	0,009	0,040
Porpondicolarità	0,099	0,173	0,107
(mm)	0,103	0,198	0,114
	0,090	0,127	0,105

$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$		Oggetto	Pezzo	Sfera
D1 (μm) -30 -260 -259 -232 -235 -231 -232 -207 -203 D2 (μm) -252 -208 -245 -236 -206 -239 -236 -206 -239 -236 -206 -239 -236 -206 -239 D3 (µm) -241 32 -272 D3 (µm) -241 32 -274 -284 -245 -240 -284 -245 -240 D4 (µm) -256 -267 -222 -249 -250 -188 D5 (µm) 51 -45 27 9 -37 14 33 -22 42 D6 (µm) 46 -42 67 6 -30 37 -2 D7 (µm) -53 -113 -1 -30 -92 -49 D8 (µm) 46 -70		-64	-280	-293
-232 -235 -231 D2 (μm) -232 -207 -203 D2 (μm) -252 -208 -245 -236 -206 -239 -236 -206 -239 D3 (μm) -268 -251 -272 D3 (μm) -241 32 -274 -284 -245 -240 -240 -245 -240 D4 (μm) -256 -267 -222 D4 (μm) -256 -267 -222 D5 (μm) 51 -45 27 9 -37 14 33 -22 42 D6 (μm) 46 -42 67 6 -30 37 14 -33 -2 42 D7 (μm) -53 -113 -1 -30 -92 -49 -2 D8 (μm) 46 -70 -3 -11 -48 16	D1 (µm)	-30	-260	-259
-232 -207 -203 D2 (μm) -252 -208 -245 -236 -206 -239 -236 -206 -239 D3 (μm) -268 -251 -272 D3 (μm) -241 32 -274 -284 -245 -240 -284 -245 -240 D4 (μm) -256 -267 -222 -249 -250 -188 D5 (μm) 51 -45 27 9 -37 14 33 -22 42 D6 (μm) 46 -42 67 6 -30 37 D7 (μm) -13 -135 -2 D7 (μm) -53 -113 -1 -30 -92 -49 -2 D8 (μm) 46 -70 -3 -11 -48 16 -3		-232	-235	-231
D2 (µm) -252 -208 -245 -236 -206 -239 -236 -251 -272 D3 (µm) -241 32 -274 -241 32 -274 -284 -245 -240 -244 -245 -240 D4 (µm) -256 -267 -222 -249 -250 -188 D5 (µm) 51 -45 27 9 -37 14 20 -37 14 D6 (µm) 46 -42 67 6 -30 37 $D7 (µm)$ -53 -113 -11 $D8 (µm)$ 46 -70 -3 $D8 (µm)$ 46 -70 -3 -11 -48 16		-232	-207	-203
-236 -206 -239 D3 (μm) -268 -251 -272 D3 (μm) -241 32 -274 -284 -245 -240 -241 32 -240 D4 (μm) -227 -197 -260 D4 (μm) -256 -267 -222 -249 -250 -188 D5 (μm) 51 -45 27 9 -37 14 D6 (μm) 46 -42 67 6 -30 37 37 D7 (μm) -53 -113 -1 -30 -92 -49 -49 D8 (μm) 46 -70 -3 D8 (μm) 46 -70 -3 -11 -48 16 -48	D2 (µm)	-252	-208	-245
D3 (µm) -268 -251 -272 D3 (µm) -241 32 -274 -284 -245 -240 -284 -245 -240 -249 -260 -260 -249 -267 -222 -249 -250 -188 D5 (µm) 51 -45 27 9 -37 14 D6 (µm) 46 -42 67 6 -30 37 D7 (µm) -53 -113 -1 D8 (µm) 46 -70 -3 14 -70 -3 -11 -11 -48 16		-236	-206	-239
D3 (µm) -241 32 -274 -284 -245 -240 -284 -245 -240 -240 -27 -197 -260 $D4 (µm)$ -256 -267 -222 -249 -250 -188 $D5 (µm)$ 51 -45 27 9 -37 14 $D5 (µm)$ 51 -45 27 9 -37 14 $D6 (µm)$ 46 -42 67 6 -30 37 $D7 (µm)$ -13 -135 -2 $D7 (µm)$ -53 -113 -1 $D8 (µm)$ 46 -70 -3 $D8 (µm)$ 46 -70 -3 -11 -48 16		-268	-251	-272
-284 -245 -240 -227 -197 -260 -249 -256 -267 -249 -250 -188 -17 -32 13 $D5 (\mu m)$ 51 -45 27 9 -37 14 20 -37 14 $106 (\mu m)$ 46 -42 67 6 -30 37 $D7 (\mu m)$ -53 -113 -135 20 -34 24 $D8 (\mu m)$ 46 -70 -3 111 -48 16	D3 (µm)	-241	32	-274
D4 (µm) -227 -197 -260 -256 -267 -222 -249 -250 -188 -17 -32 13 $D5 (µm)$ 51 -45 27 9 -37 14 $D6 (µm)$ 46 -42 67 6 -30 37 $D7 (µm)$ -13 -113 -135 $D7 (µm)$ 20 -34 24 $D8 (µm)$ 46 -70 -3 11 -48 16		-284	-245	-240
D4 (µm) -256 -267 -222 -249 -250 -188 -17 -32 13 D5 (µm) 51 -45 27 9 -37 14 06 (µm) 46 -42 67 6 -30 37 D7 (µm) -53 -113 -135 -20 -34 24 D8 (µm) 46 -70 -3 -11 -48 16		-227	-197	-260
-249 -250 -188 $D5 (\mu m)$ 51 -32 13 $D5 (\mu m)$ 51 -45 27 9 -37 14 33 -22 42 $D6 (\mu m)$ 46 -42 67 6 -30 37 $D7 (\mu m)$ -13 -135 -2 $D7 (\mu m)$ -53 -113 -1 $D8 (\mu m)$ 46 -70 -3 $D8 (\mu m)$ 46 -70 -3 -11 -48 16	D4 (μm)	-256	-267	-222
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		-249	-250	-188
D5 (µm) 51 -45 27 9 -37 14 9 -37 14 33 -22 42 D6 (µm) 46 -42 67 6 -30 37 713 -135 -2 713 -135 -2 710 -53 -113 -30 -92 -49 20 -34 24 28 (µm) 46 -70 -3 -11 -48 16		-17	-32	13
9-371433-2242D6 (µm)46-42676-3037 -13 -135-2D7 (µm)-53-113-1-30-92-4920-3424D8 (µm)46-70-3-11-4816	D5 (µm)	51	-45	27
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		9	-37	14
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		33	-22	42
6 -30 37 -13 -135 -2 D7 (μm) -53 -113 -1 -30 -92 -49 20 -34 24 D8 (μm) 46 -70 -3 -11 -48 16	D6 (µm)	46	-42	67
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		6	-30	37
D7 (μm) -53 -113 -1 -30 -92 -49 20 -34 24 D8 (μm) 46 -70 -3 -11 -48 16		-13	-135	-2
-30 -92 -49 20 -34 24 D8 (μm) 46 -70 -3 -11 -48 16	D7 (µm)	-53	-113	-1
20 -34 24 D8 (μm) 46 -70 -3 -11 -48 16		-30	-92	-49
D8 (μm) 46 -70 -3 -11 -48 16		20	-34	24
-11 -48 16	D8 (µm)	46	-70	-3
		-11	-48	16

Tabella 11-14 Residui dei diametri rispetto al valore nominale per Test Teach

Utilizzando i valori di *Tabella 11-14* si può eseguire un'analisi ANOVA a due fattori, otto livelli per il campione Foro e tre livelli per il campione Teach, ottenendo i seguenti risultati:

Tabella 11-15 ANOVA a due fattori su residui dei diametri rispetto al valore nominale per Test Teach

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Campione (Foro)	838358	7	119765,4	59,1	1,987E-21	2,207
Colonne (Teach)	13531,1	2	6765,5	3,3	4,393E-02	3,191
Interazione	99080,5	14	7077,2	3,5	6,037E-04	1,904
In (Errore)	97295,3	48	2027,0			
Totale	1048264,9	71				

Il calcolo ANOVA mostra che:

- Per il campione Foro, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per il campione Teach, similmente al caso precedente il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per vedere l'interazione tra il campione Foro e quello Teach bisogna guardare la riga interazione, in questo caso $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta.

Facendo riferimento ai risultati ottenuti, si può affermare che entrambi i parametri (Foro e Teach) hanno un effetto significativo sulla qualità della scansione, per questo test inoltre risulta significativa anche la loro interazione. Il valore di significatività per i fori è molto più basso rispetto a quello della tipologia di teach utilizzato, quest'ultimo è di poco superiore al valore critico sintomo che per la misura dei fori le tre differenti modalità con cui è stato effettuato il teach non generano differenze sostanziali per la misura.

Un ulteriore metodo di analisi può essere quello grafico, in questo modo possono essere messe in evidenza caratteristiche che con un'analisi numerica non vengono identificate. In *Figura 11.4* vengono riportate sulle ascisse i diversi fori mentre sulle ordinate la media dei residui per ogni singolo foro, l'andamento viene tracciato per i tre tipologie di Teach eseguite.



Figura 11.4 Analisi grafica dei residui dei diametri rispetto al valore nominale per il Test Teach

Nella *Figura 11.4* si può osservare, come notato nel test precedentemente analizzato, che vi è una marcata differenza di dimensione tra i fori presenti nella Superficie1 (1-2-3-4) e quelli sulla Superficie2 (5-6-7-8). Sistematicamente i secondi sono più grandi dei primi, questa differenza in tale test è più marcata. Di conseguenza sono confermate tutte le osservazioni fatte a riguardo nel precedente test sull'allineamento. Per ottenere ulteriori informazioni sul test, si esegue lo studio dei residui calcolati rimuovendo al valore misurato quello di riferimento ottenuto con la CMM. Essendo il pezzo lo stesso del test precedente (BBP2), i valori ottenuti con la CMM sono già stati precedentemente riportati in *Tabella* 11-5. Di seguito (*Tabella* 11-16 e *Tabella* 11-17) vengono riportati i valori dei residui ottenuti sottraendo ai dati presenti in *Tabella* 11-12 quelli presenti in *Tabella* 11-5.

	Oggetto	Pezzo	Sfera
	243	27	14
D1 (µm)	277	47	48
	75	72	76
	-17	8	12
D2 (μm)	-37	7	-30
	-21	9	-24
	-36	-19	-40
D3 (µm)	-9	264	-42
	-52	-13	-8
	-14	16	-47
D4 (μm)	-43	-54	-9
	-36	-37	25
	-21	-36	9
D5 (µm)	47	-49	23
	5	-41	10
	-17	-72	-8
D6 (µm)	-4	-92	17
	-44	-80	-13
	-67	-189	-56
D7 (µm)	-107	-167	-55
	-84	-146	-103
	-34	-88	-30
D8 (µm)	-8	-124	-57
	-65	-102	-38

Tabella 11-16 Residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per Test Teach

Tabella 11-17 Residui di planarità e perpendicolarità rispetto al valore di riferimento per Test Teach

	Oggetto	Pezzo	Sfera
	-194	-191	-194
Planarità1 (μm)	-195	-190	-194
	-191	-193	-193
	-11	141	0
Planarità2 (µm)	-6	75	-3
	-3	-37	-6
Porpondicolorità	-139	-65	-131
(μm)	-135	-40	-124
	-148	-111	-133

Utilizzando i valori di *Tabella 11-16* si può eseguire un'analisi ANOVA a due fattori, otto livelli per il campione Foro e tre livelli per il campione Teach, ottenendo i seguenti risultati:

Tabella 11-18 ANOVA a due fattori su residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per Test Teach

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Campione (Foro)	219324,6	7	31332,1	15,5	2,123E-10	2,207
Colonne (Teach)	13531,1	2	6765,5	3,3	4,393E-02	3,191
Interazione	99080,5	14	7077,2	3,5	6,037E-04	1,904
In (Errore)	97295,3	48	2027,0			
Totale	429231,5	71				

Il calcolo ANOVA mostra che:

- Per il campione Foro, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per il campione Teach, similmente al caso precedente il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per vedere l'interazione tra il campione Foro e quello Teach bisogna guardare la riga interazione, in questo caso $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta.

Facendo riferimento ai risultati ottenuti, si può affermare che entrambi i parametri (Foro e Teach) hanno un effetto significativo sulla qualità della scansione, risulta inoltre significativa la loro interazione. Confrontando i risultati di *Tabella 11-15* con quelli di *Tabella 11-18* si può osservare che i risultati ottenuti per il campione colonna e per l'interazione sono identici ciò che cambia è il risultato per il campione Foro, il valore di significatività diminuisce rispetto al caso precedente. Per avere informazioni aggiuntive sulle tre diverse misure eseguite con differenti tipologie di teach viene effettuata, anche in questo caso, un'analisi grafica (*Figura 11.5*).



Figura 11.5 Analisi grafica dei residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per il Test Teach

Per mettere in risalto i risultati ottenuti si è eseguita una media su tutti i fori per ogni singola modalità di teach ottenendo il grafico in *Figura 11.6*.



Figura 11.6 Analisi grafica della media dei residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per il Test Teach

Dal grafico in *Figura 11.6* si può vedere come mediamente, la misura dei diametri utilizzando per la fase di teach un oggetto differente da quello da analizzare si discosta di circa 3 μ m dal valore di riferimento ottenuto con la CMM. Il risultato peggiore si ottiene quando per la fase di teach si utilizza lo stesso Bamboo Bracket, ci si aspettava tale risultato vista la difficolta che incontra il sensore nel riconoscere e unire perfettamente i punti acquisiti con le sole tre scansioni eseguite per effettuare il teach. In accordo con tutte le osservazioni fatte si può notare che, introducendo delle sfere sulla tavola rotante il risultato migliora di circa 20 μ m, di conseguenza si può affermare che anche per la fase di teach l'introduzione di oggetti nel volume di misura migliore il risultato finale.

Inoltre, si può osservare che in *Figura 11.5* non si presenta più la netta differenza di dimensione dei diametri dei fori presenti sulle due superfici, con l'analisi dei residui rispetto al valore di riferimento si è riusciti anche in questo test a rimuovere l'effetto che la realizzazione del pezzo ha sulla misura.

Mentre per quanto riguarda il secondo gruppo di parametri presenti in *Tabella 11-13* e *Tabella 11-17* si ottengono gli stessi risultati con ANOVA, vengono riportate di seguito le tabelle:

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Tra gruppi	9,6	2	4,8	2,048	0,210	5,143
In gruppi	14	6	2,3			
Totale	23,6	8				

Tabella 11-19 ANOVA a un fattore su residui della Planarità1 per Test Teach

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Tra gruppi	8340,7	2	4170,3	1,54	0,288	5,143
In gruppi	16245,3	6	2707,6			
Totale	24586	8				

Tabella 11-20 ANOVA a un fattore su residui della Planarità2 per Test Teach

Tabella 11-21 ANOVA a un fattore su residui della Perpendicolarità per Test Teach

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Tra gruppi	8130,7	2	4065,3	8,9	0,016	5,143
In gruppi	2727,3	6	454,6			
Totale	10858	8				

Il calcolo ANOVA mostra che solo la misura della Perpendicolarità è legata al variare della modalità con cui viene eseguito il teach, mentre la misura della Planarità1 e della Planarità2 non sono influenzate da questo parametro. In riferimento alla *Tabella 11-17*, si può affermare che anche in questo caso i valori della Planarità1 rilevati col sensore a luce strutturata sono distanti da quelli della CMM mentre quelli della Planarità2 sono molto simili, la spiegazione è analoga a quella del test precedente. A differenza di quest'ultimo, nel Test Teach abbiamo un'influenza del teach sulla perpendicolarità anche se nessuna delle due planarità è rilevante, grazie a questo risultato si può affermare con certezza che non vi è alcun legame in termini di tolleranze tra le singole planarità e la perpendicolarità.

11.3 Analisi dei dati e risultati Test Posizione Pezzo

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per il Test Posizione Pezzo (*Tabella* 11-22):

	Prova42_ 1	Prova42_ 2	Prova42_ 3	Prova37_ 1	Prova37_ 2	Prova37_ 3	Prova32_ 1	Prova32_ 2	Prova32_ 3
Diametro 1 (mm)	5,795	5,783	5,758	5,778	5,789	5,76	6,213	6,057	6,165
Diametro 2 (mm)	5,772	5,758	5,782	5,804	5,788	5,773	5,759	5,795	6,011
Diametro 3 (mm)	5,784	5,776	5,792	5,803	6,017	5,749	5,763	5,989	5,96
Diametro 4 (mm)	5,822	5,822	5,859	5,773	5,754	5,746	5,809	5,88	5,818
Diametro 5 (mm)	6,055	6,038	6,045	5,865	5,902	5,983	5,997	5,996	5,997
Diametro 6 (mm)	6,075	6,066	6,035	5,861	5,882	6,012	6,029	6,032	6,029
Diametro 7 (mm)	6,025	6,003	6,02	5,785	5,805	6,08	6,086	5,973	5,973
Diametro 8 (mm)	6,067	6,072	6,078	5,755	5,863	5,989	6,025	6,006	6,03
Planarità1 (mm)	0,011	0,009	0,011	0,01	0,011	0,011	0,011	0,011	0,1
Planarità2 (mm)	0,031	0,029	0,027	0,041	0,192	0,035	0,041	0,04	0,04
Perpendicolarità (mm)	0,108	0,114	0,122	0,104	0,142	0,126	0,1	0,106	0,106

 Tabella 11-22
 Risultati Test Posizione Pezzo

Ogni caratteristica è stata calcolata tre volte nelle stesse condizioni, in modo da permettere un'analisi statistica. Come fatto in precedenza, per l'analisi ANOVA non vengono utilizzati i dati di *Tabella 11-22* ma i residui. Si riportano di seguito le tabelle dei residui rispetto al valore nominale per planarità e perpendicolarità (*Tabella 11-23*) e per i diametri (*Tabella 11-24*):

Tabella 11-23 Residui di planarità e perpendicolarità rispetto al valore nominale per Test Posizione Pezzo

	Prova42	Prova37	Prova32
	0,011	0,010	0,011
Planarità1 (mm)	0,009	0,011	0,011
	0,011	0,011	0,100
	0,031	0,041	0,041
Planarità2 (mm)	0,029	0,192	0,040
	0,027	0,035	0,040
	0,108	0,104	0,100
Perpendicolarità (mm)	0,114	0,142	0,106
	0,122	0,126	0,106

-205 -222 213 D1 (μm) -217 -211 57 -242 -240 165 -242 -240 165 D2 (μm) -242 -212 -205 -218 -227 11 -216 -197 -237 D3 (μm) -224 17 -11 -208 -251 -40 -208 -251 -40 -208 -251 -40 -178 -227 -191 D4 (μm) -178 -227 -191 D4 (μm) -178 -226 -120 -141 -254 -182 -3 D5 (μm) 38 -98 -4 45 -17 -3 05 (μm) 66 -118 32 35 12 29 25 -215 86 D7 (μm) 3 -195 -27 20 80 -27		Prova42	Prova37	Prova32
D1 (μm) -217 -211 57 -242 -240 165 -242 -240 -241 D2 (μm) -242 -212 -205 -218 -227 11 -216 -197 -237 D3 (μm) -224 17 -11 -208 -251 -40 -208 -251 -40 -208 -257 -191 D4 (μm) -178 -227 -191 D4 (μm) -178 -246 -120 -141 -254 -182 -3 D5 (μm) 38 -98 -4 45 -17 -3 -3 D5 (μm) 36 -18 32 35 12 29 -25 D7 (μm) 3 -195 -27 20 80 -27 20 80 -27 20 80 -27 20 80 <td></td> <td>-205</td> <td>-222</td> <td>213</td>		-205	-222	213
-242 -240 165 D2 (μm) -228 -196 -241 D2 (μm) -242 -212 -205 -218 -227 11 -218 -227 11 -216 -197 -237 D3 (µm) -224 17 -11 -208 -251 -40 -208 -251 -40 -178 -227 -191 D4 (µm) -178 -246 -120 -141 -254 -182 -182 D5 (µm) 38 -98 -4 45 -17 -3 -3 D5 (µm) 66 -118 32 D6 (µm) 66 -118 32 D7 (µm) 3 -195 -27 20 80 -27 20 80 -27 20 80 -27 20 80 -27 20 80 -27 <td>D1 (μm)</td> <td>-217</td> <td>-211</td> <td>57</td>	D1 (μm)	-217	-211	57
-228 -196 -241 D2 (μm) -242 -212 -205 -218 -227 11 -216 -197 -237 D3 (μm) -224 17 -11 -208 -251 -40 -208 -251 -40 -178 -227 -191 D4 (μm) -178 -246 -120 -141 -254 -182 -3 D5 (μm) 38 -98 -4 45 -17 -3 -3 D5 (μm) 66 -118 32 D6 (μm) 66 -118 32 D5 (μm) 33 -195 -27 D7 (μm) 3 -195 -27 D7 (μm) 3 -195 -27 D8 (μm) 72 -137 6 78 -11 30 -11		-242	-240	165
D2 (μm) -242 -212 -205 -218 -227 11 -216 -197 -237 D3 (μm) -224 17 -11 -208 -251 -40 -208 -227 -191 D4 (μm) -178 -246 -120 -141 -254 -182 D5 (μm) 38 -98 -4 45 -17 -3 D5 (μm) 66 -118 32 D5 (μm) 66 -118 32 D5 (μm) 35 12 29 D7 (μm) 3 -195 -27 D8 (μm) 72 -137 6 78 -11 30 -11		-228	-196	-241
-218 -227 11 -216 -197 -237 D3 (μm) -224 17 -11 -208 -251 -40 -208 -251 -40 D4 (μm) -178 -227 -191 D4 (μm) -178 -246 -120 -141 -254 -182 - D5 (μm) 38 -98 -4 45 -17 -3 - D5 (μm) 66 -118 32 D5 (μm) 3 -195 -27 D5 (μm) 3 -195 -27 D5 (μm) 72 -137 6 D8 (μm) 72 -137 6	D2 (µm)	-242	-212	-205
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		-218	-227	11
D3 (µm) -224 17 -11 -208 -251 -40 -208 -251 -40 -178 -227 -191 D4 (µm) -178 -246 -120 -141 -254 -182 -141 -254 -182 $D5 (µm)$ 38 -98 -4 45 -17 -3 $D5 (µm)$ 66 -118 32 $D6 (µm)$ 66 -118 32 $D7 (µm)$ 3 -195 -27 $D7 (µm)$ 3 -195 -27 $D8 (µm)$ 72 -137 6 78 -11 30		-216	-197	-237
-208 -251 -40 -178 -227 -191 $D4 (\mum)$ -178 -246 -120 -141 -254 -182 $D5 (\mum)$ 38 -98 -4 45 -17 -3 $D6 (\mum)$ 66 -118 32 $D6 (\mum)$ 66 -118 32 $D7 (\mum)$ 3 -195 -27 $D8 (\mum)$ 72 -137 6 78 -11 30	D3 (µm)	-224	17	-11
D4 (µm) -178 -227 -191 -178 -246 -120 -141 -254 -182 -141 -254 -182 -155 -135 -3 $D5 (µm)$ 38 -98 -4 45 -17 -3 -17 -3 -139 29 66 -118 32 $D6 (µm)$ 66 -118 32 $D7 (µm)$ 3 -195 -27 20 80 -27 $D8 (µm)$ 72 -137 6 78 -11 30		-208	-251	-40
D4 (μm) -178 -246 -120 -141 -254 -182 -55 -135 -3 D5 (μm) 38 -98 -4 45 -17 -3 D6 (μm) 66 -118 32 D6 (μm) 66 -118 32 D7 (μm) 35 12 29 D7 (μm) 3 -195 -27 20 80 -27 D8 (μm) 72 -137 6 78 -11 30 30		-178	-227	-191
$\frac{-141}{55} - \frac{-254}{-135} - \frac{182}{-3}$ $D5 (\mu m) = \frac{55}{45} - \frac{135}{-135} - \frac{3}{-3}$ $\frac{38}{45} - \frac{98}{-17} - \frac{3}{-3}$ $\frac{75}{-139} - \frac{29}{29}$ $\frac{66}{-118} - \frac{32}{32}$ $\frac{35}{12} - \frac{29}{29}$ $\frac{25}{-215} - \frac{86}{-27}$ $\frac{20}{80} - \frac{80}{-27}$ $\frac{67}{-245} - \frac{25}{25}$ $D8 (\mu m) = \frac{72}{78} - \frac{137}{6}$	D4 (µm)	-178	-246	-120
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		-141	-254	-182
D5 (μm) 38 -98 -4 45 -17 -3 75 -139 29 D6 (μm) 66 -118 32 35 12 29 25 -215 86 D7 (μm) 3 -195 -27 20 80 -27 20 80 -27 20 80 -27 20 80 -27 75 -137 6 78 -11 30		55	-135	-3
45-17-3D6 (μ m)75-1392906 (μ m)66-1183235122935-21586D7 (μ m)3-195-272080-272080-27208025D8 (μ m)72-137678-1130	D5 (µm)	38	-98	-4
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		45	-17	-3
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		75	-139	29
35 12 29 25 -215 86 3 -195 -27 20 80 -27 67 -245 25 D8 (μm) 72 -137 6 78 -11 30	D6 (μm)	66	-118	32
25 -215 86 D7 (μm) 3 -195 -27 20 80 -27 20 80 -27 08 (μm) 72 -137 6 78 -11 30		35	12	29
D7 (μm) 3 -195 -27 20 80 -27 67 -245 25 D8 (μm) 72 -137 6 78 -11 30		25	-215	86
20 80 -27 67 -245 25 D8 (μm) 72 -137 6 78 -11 30	D7 (µm)	3	-195	-27
67 -245 25 D8 (μm) 72 -137 6 78 -11 30		20	80	-27
D8 (μm) 72 -137 6 78 -11 30		67	-245	25
78 -11 30	D8 (µm)	72	-137	6
		78	-11	30

Tabella 11-24 Residui dei diametri rispetto al valore nominale per Test Posizione Pezzo

Utilizzando i valori di *Tabella 11-24* si può eseguire un'analisi ANOVA a due fattori, otto livelli per il campione Foro e tre livelli per il campione Distanza, ottenendo i seguenti risultati:

Tabella 11-25 ANOVA due fattori su residui dei diametri rispetto al valore nominale per TestPosizione Pezzo

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Campione (Foro)	443498,2	7	63356,9	12,708	4,284E-09	2,207
Colonne (Distanza)	198564,3	2	99282,2	19,914	5,042E-07	3,191
Interazione	273749	14	19553,5	3,922	1,926E-04	1,904
In (Errore)	239308	48	4985,6			
Totale	1155119,5	71				

Il calcolo ANOVA mostra che:

- Per il campione Foro, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per il campione Distanza, similmente al caso precedente il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per vedere l'interazione tra il campione Foro e quello Distanza bisogna guardare la riga interazione, in questo caso $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta.

Facendo riferimento ai risultati ottenuti, si può affermare che entrambi i parametri (Foro e Distanza) hanno un effetto significativo sulla qualità della scansione, per questo test inoltre risulta significativa anche la loro interazione. Questo è il primo caso in cui la misura è più influenzata dalla variazione della caratteristica analizzata (distanza pezzo-sensore) piuttosto che dal campione foro.

Un ulteriore metodo di analisi può essere quello grafico, in questi modo possono essere messe in evidenza caratteristiche che con un'analisi numerica non vengono identificate. In *Figura 11.7* vengono riportate sulle ascisse i diversi fori mentre sulle ordinate la media dei residui per ogni singolo foro, l'andamento viene tracciato per le tre differenti distanze alle quali è stata eseguita la misura.



Figura 11.7 Analisi grafica dei residui dei diametri rispetto al valore nominale per il Test Posizione Pezzo

Nella *Figura 11.7* si può osservare, come notato nel test precedentemente analizzato, che vi è una marcata differenza di dimensione tra i fori presenti nella Superficie1 (1-2-3-4) e quelli sulla Superficie2 (5-6-7-8), sistematicamente i secondi sono più grandi dei primi. La conferma di tale risultato porta a dire che la distanza alla quale viene eseguita la scansione non va a sconvolgere le osservazioni fatte in precedenza in seguito ai risultati ottenuti dagli altri test. Per ottenere ulteriori informazioni sul test, si esegue lo studio dei residui calcolati rimuovendo al valore misurato quello di riferimento ottenuto con la CMM. Essendo il pezzo lo stesso del test precedente (BBP2), i valori ottenuti con la CMM sono già stati precedentemente riportati in *Tabella* 11-5. Di seguito (*Tabella* 11-26 e *Tabella* 11-27) vengono riportati i valori dei residui ottenuti sottraendo ai dati presenti in *Tabella* 11-22 quelli presenti in *Tabella* 11-5.

	Prova42	Prova37	Prova32
	102	85	520
D1 (µm)	90	96	364
	65	67	472
	-13	19	-26
D2 (µm)	-27	3	10
	-3	-12	226
	16	35	-5
D3 (µm)	8	249	221
	24	-19	192
	35	-14	22
D4 (μm)	35	-33	93
	72	-41	31
	51	-139	-7
D5 (µm)	34	-102	-8
	41	-21	-7
	25	-189	-21
D6 (μm)	16	-168	-18
	-15	-38	-21
	-29	-269	32
D7 (µm)	-51	-249	-81
	-34	26	-81
	13	-299	-29
D8 (µm)	18	-191	-48
	24	-65	-24

 Tabella 11-26 Residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per Test Posizione Pezzo

Tabella 11-27	⁷ Residui d	di planarità e	e perpendicolarità	i rispetto al	valore d	li riferimento	per	Test
			Posizione Pezz	20				

	Prova42	Prova37	Prova32
	-193	-194	-193
Planarità1 (µm)	-195	-193	-193
	-193	-193	-104
	-15	-5	-5
Planarità2 (µm)	-17	146	-6
	-19	-11	-6
	-130	-134	-138
Perpendicolarità (µm)	-124	-96	-132
	-116	-112	-132

Utilizzando i valori di *Tabella 11-26* si può eseguire un'analisi ANOVA a due fattori, otto livelli per il campione Foro e tre livelli per il campione Distanza, ottenendo i seguenti risultati:

Tabella 11-28 ANOVA due fattori su residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per Test
Posizione Pezzo

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Campione (Foro)	559165,5	7	79880,8	16,022	1,196E-10	2,207
Colonne (Distanza)	198564,3	2	99282,2	19,914	5,042E-07	3,191
Interazione	273749,0	14	19553,5	3,922	1,926E-04	1,904
In (Errore)	239308,0	48	4985,6			
Totale	1270786,9	71				

Il calcolo ANOVA mostra che:

- Per il campione Foro, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per il campione Distanza, similmente al caso precedente il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per vedere l'interazione tra il campione Foro e quello Distanza bisogna guardare la riga interazione, in questo caso $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta.

Facendo riferimento ai risultati ottenuti, si può affermare che entrambi i parametri (Foro e Distanza) hanno un effetto significativo sulla qualità della scansione, risulta inoltre significativa la loro interazione. Confrontando i risultati di *Tabella 11-25* con quelli di *Tabella 11-28* si può osservare che i risultati ottenuti per il campione colonna e per l'interazione sono identici ciò che cambia è il risultato per il campione Foro, il valore di significatività diminuisce rispetto al caso precedente. Per avere informazioni aggiuntive sulle tre diverse misure eseguite a differenti distanze tra pezzo e sensore viene effettuata, anche in questo caso, un'analisi grafica (*Figura 11.8*).



Figura 11.8 Analisi grafica dei residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per il Test Posizione Pezzo

Per mettere in risalto i risultati ottenuti si è eseguita una media su tutti i fori per ogni distanza alla quale è stata effettuata la scansione ottenendo il grafico in *Figura 11.9*.



Figura 11.9 Analisi grafica della media dei residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per il Test Posizione Pezzo

Dal grafico in *Figura 11.9* si può vedere come mediamente, la misura dei diametri che più si avvicina al valore di riferimento è quella con una distanza di 42 cm, tra sensore e pezzo, avente una differenza di circa 20 μ m. Questo è un'importante risultato dato che, prima di eseguire questo test, si sarebbe potuto pensare che più sensore e pezzo fossero stati vicini e migliore sarebbe stato il risultato finale della misura.

Inoltre, si può osservare che in *Figura 11.8* non si presenta più la netta differenza di dimensione dei diametri dei fori presenti sulle due superfici, con l'analisi dei residui rispetto al valore di riferimento si è riusciti anche in questo test a rimuovere l'effetto che la realizzazione del pezzo ha sulla misura.

Mentre per quanto riguarda il secondo gruppo di parametri presenti in *Tabella 11-23* e *Tabella 11-27* si ottengono gli stessi risultati con ANOVA, vengono riportate di seguito le tabelle:

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Tra gruppi	1820,2	2	910,1	1,033	0,411	5,143
In gruppi	5284,0	6	880,7			
Totale	7104,2	8				

Tabella 11-29 ANOVA a un fattore su residui della Planarità1 per Test Posizione Pezzo

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Tra gruppi	6169,6	2	3084,8	1,169	0,373	5,143
In gruppi	15837,3	6	2639,6			
Totale	22006,9	8				

 Tabella 11-30 ANOVA a un fattore su residui della Planarità2 per Test Posizione Pezzo

Tabella 11-31 ANOVA a un fattore su residui della Perpendicolarità per Test Posizione Pezzo

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Tra gruppi	600,9	2	300,4	2,119	0,201	5,143
In gruppi	850,7	6	141,8			
Totale	1451,6	8				

Il calcolo ANOVA mostra che le tre caratteristiche non sono legate al variare della distanza alla quale si esegue la misura, nelle tre tabelle si può vedere che $F < F_{crit}$. In riferimento alla *Tabella 11-27*, si può affermare che anche in questo caso i valori della Planarità1 rilevati col sensore a luce strutturata sono distanti da quelli della CMM mentre quelli della Planarità2 sono molto simili, la spiegazione è analoga a quella dei test precedenti.

11.4 Analisi dei dati e risultati Test Inclinazione Sensore

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per il Test Inclinazione Sensore (*Tabella* 11-32):

	Prova15° _1	Prova15° _2	Prova15° _3	Prova20° _1	Prova20° _2	Prova20° _3	Prova25° _1	Prova25° _2	Prova25° _3
Diametro 1 (mm)	5,791	5,979	5,78	5,699	5,708	5,972	5,761	6,001	6,002
Diametro 2 (mm)	5,682	5,676	5,808	5,776	5,736	5,795	5,797	5,839	5,741
Diametro 3 (mm)	5,744	5,734	5,767	5,988	5,77	5,7	6,005	5,782	5,812
Diametro 4 (mm)	5,81	5,769	5,805	6,009	6,025	6,031	5,689	6,006	6,04
Diametro 5 (mm)	6,046	6,036	6,03	5,982	6,03	6,048	5,963	5,824	5,855
Diametro 6 (mm)	6,108	6,098	6,058	6,025	6,083	6,067	6,025	5,85	5,892
Diametro 7 (mm)	6,024	5,981	5,973	5,945	6,01	5,992	5,973	5,799	5,683
Diametro 8 (mm)	6,066	6,044	6,02	5,991	6,048	6	6,016	5,88	5,899
Planarità 1 (mm)	0,012	0,12	0,012	0,01	0,012	0,046	0,012	0,013	0,055
Planarità 2 (mm)	0,011	0,1	0,01	0,008	0,011	0,011	0,019	0,029	0,049
Perpendicolarità (mm)	0,08	0,75	0,087	0,091	0,075	0,068	0,096	0,09	0,049

Tabella 11-32 Risultati Test Inclinazione Sensore

Ogni caratteristica è stata calcolata tre volte nelle stesse condizioni, in modo da permettere un'analisi statistica. Come fatto in precedenza, per l'analisi ANOVA non vengono utilizzati i dati di *Tabella 11-32* ma i residui. Si riportano di seguito le tabelle dei residui rispetto al valore nominale per planarità e perpendicolarità (*Tabella 11-33*) e per i diametri (*Tabella 11-34*):

	Prova15°	Prova20°	Prova25°
	0,012	0,010	0,012
Planarità1 (mm)	0,120	0,012	0,013
	0,012	0,046	0,055
	0,011	0,008	0,019
Planarità2 (mm)	0,100	0,011	0,029
	0,010	0,011	0,049
	0,080	0,091	0,096
(mm)	0,750	0,075	0,090
	0,087	0,068	0,049

Tabella 11-33 Residui di planarità e perpendicolarità rispetto al valore nominale per TestInclinazione Sensore

$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $
-192 -205 -259 -256 -12 5 D3 (μm) -266 -230 -218 -233 -300 -188 -190 9 -311
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$
D3 (μm) -266 -230 -218 -233 -300 -188 -190 9 -311
-233 -300 -188 -190 9 -311
-190 9 -311
D4 (μm) -231 25 6
-195 31 40
46 -18 -37
D5 (µm) 36 30 -176
30 48 -145
108 25 25
D6 (μm) 98 83 -150
58 67 -108
24 -55 -27
D7 (µm) -19 10 -201
-27 -8 -317
66 -9 16
D8 (µm) 44 48 -120
20 0 -101

 Tabella 11-34 Residui dei diametri rispetto al valore nominale per Test Inclinazione Sensore

Utilizzando i valori di *Tabella 11-34* si può eseguire un'analisi ANOVA a due fattori, otto livelli per il campione Foro e tre livelli per il campione Angolo Sensore, ottenendo i seguenti risultati:

Tabella 11-35 ANOVA due fattori su residui dei diametri rispetto al valore nominale per TestInclinazione Sensore

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Campione (Foro)	542886,8	7	77555,3	9,959	1,307E-07	2,207
Colonne (AngoloSensore)	35053,4	2	17526,7	2,251	1,163E-01	3,191
Interazione	264425,5	14	18887,5	2,425	1,159E-02	1,904
In (Errore)	373789,3	48	7787,3			
Totale	1216155,0	71				

Il calcolo ANOVA mostra che:

- Per il campione Foro, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per il campione Angolo Sensore, il test mostra che $F < F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 non è respinta;
- Per vedere l'interazione tra il campione Foro e quello Angolo Sensore bisogna guardare la riga interazione, in questo caso $F < F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 non è respinta.

Facendo riferimento ai risultati ottenuti, si può affermare che solo il parametro Foro ha un effetto significativo sulla qualità della scansione, per questo test né il secondo parametro, in questo caso l'angolazione del sensore, né l'interazione tra questo e il primo hanno un effetto significativo.

Un ulteriore metodo di analisi può essere quello grafico, in questi modo possono essere messe in evidenza caratteristiche che con un'analisi numerica non vengono identificate. In *Figura 11.10* vengono riportate sulle ascisse i diversi fori mentre sulle ordinate la media dei residui per ogni singolo foro, l'andamento viene tracciato per le tre differenti angolazioni del sensore con le quali è stata eseguita la misura.



Figura 11.10 Analisi grafica dei residui dei diametri rispetto al valore nominale per il Test Inclinazione Sensore

Nella *Figura 11.10* si può osservare, come notato nel test precedentemente analizzato, che vi è una netta differenza di dimensione tra i fori presenti nella Superficie1 (1-2-3-4) e quelli sulla Superficie2 (5-6-7-8), sistematicamente i secondi sono più grandi dei primi. Tale comportamento è marcato nelle prove con angolo di inclinazione del sensore di 15° e 20° mentre sembra non presentarsi per la prova con angolo di inclinazione del sensore rispetto al pezzo vado a "filtrare" quella che è l'influenza del processo di realizzazione del pezzo sulla misura. Per ottenere ulteriori informazioni sul test, si esegue lo studio dei residui calcolati rimuovendo al valore misurato quello di riferimento ottenuto con la CMM. Essendo il pezzo lo stesso del test precedente (BBP2), i valori ottenuti con la CMM sono già stati precedentemente riportati in *Tabella* **11-36** e *Tabella* **11-37** vengono riportati i valori dei residui ottenuti sottraendo ai dati presenti in *Tabella* **11-32** quelli presenti in *Tabella* **11-5**.

	Prova15°	Prova20°	Prova25°
	98	6	68
D1 (µm)	286	15	308
	87	279	309
	-103	-9	12
D2 (µm)	-109	-49	54
	23	10	-44
	-24	220	237
D3 (µm)	-34	2	14
	-1	-68	44
	23	222	-98
D4 (μm)	-18	238	219
	18	244	253
	42	-22	-41
D5 (µm)	32	26	-180
	26	44	-149
	58	-25	-25
D6 (µm)	48	33	-200
	8	17	-158
	-30	-109	-81
D7 (µm)	-73	-44	-255
	-81	-62	-371
	12	-63	-38
D8 (µm)	-10	-6	-174
	-34	-54	-155

Tabella 11-36 Residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per Test Inclinazione Sensore

Tabella 11-37	' Residui	di planarità	e perpendio	colarità	rispetto a	l valore d	li riferimento	per	Test
			Inclinazio	ne sens	ore				

	Prova15°	Prova20°	Prova25°
	-192	-194	-192
Planarità1 (µm)	-84	-192	-191
-	-192	-158	-149
	-35	-38	-27
Planarità2 (µm)	54	-35	-17
-	-36	-35	3
	-158	-147	-142
Perpendicolarità (µm)	512	-163	-148
-	-151	-170	-189

Utilizzando i valori di *Tabella 11-36* si può eseguire un'analisi ANOVA a due fattori, otto livelli per il campione Foro e tre livelli per il campione Angolo Sensore, ottenendo i seguenti risultati:

Tabella 11-38 ANOVA due fattori su residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per TestInclinazione Sensore

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Campione (Foro)	564902,4	7	80700,3	10,363	7,674E-08	2,207
Colonne (AngoloSensore)	35053,4	2	17526,7	2,251	1,163E-01	3,191
Interazione	264425,5	14	18887,5	2,425	1,159E-02	1,904
In (Errore)	373789,3	48	7787,3			
Totale	1238170,6	71				

Il calcolo ANOVA mostra che:

- Per il campione Foro, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per il campione Angolo Sensore, il test mostra che $F < F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 non è respinta;
- Per vedere l'interazione tra il campione Foro e quello Angolo Sensore bisogna guardare la riga interazione, in questo caso $F < F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 non è respinta.

Facendo riferimento ai risultati ottenuti, si può affermare che solo il parametro Foro risulta significativo ai fini della misura, mentre i parametri Angolo Sensore e Interazione no. Confrontando i risultati di *Tabella 11-35* con quelli di *Tabella 11-38* si può osservare che i risultati ottenuti per il campione colonna e per l'interazione sono identici ciò che cambia è il risultato per il campione Foro, il valore di significatività diminuisce rispetto al caso precedente. Per avere informazioni aggiuntive sulle tre differenti misure realizzate con diversi angoli di inclinazione del sensore viene effettuata, anche in questo caso, un'analisi grafica (*Figura 11.11*).



Figura 11.11 Analisi grafica dei residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per il Test Inclinazione Sensore

Per mettere in risalto i risultati ottenuti si è eseguita una media su tutti i fori per ogni angolo di inclinazione del sensore con il quale è stata effettuata la scansione ottenendo il grafico in *Figura 11.12*.



Figura 11.12 Analisi grafica della media dei residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per il Test Inclinazione Sensore

Dal grafico in *Figura 11.12* si può vedere come mediamente, la misura dei diametri che più si avvicina al valore di riferimento è quella con un angolo di inclinazione del sensore di 15°, con tale configurazione si ha una differenza di circa 10 μ m. Inoltre, si può osservare che in *Figura 11.11* non si presenta più la netta differenza di dimensione dei diametri dei fori presenti sulle due superfici, con l'analisi dei residui rispetto al valore di riferimento si è riusciti anche in questo test a rimuovere l'effetto che la realizzazione del pezzo ha sulla misura.

Mentre per quanto riguarda il secondo gruppo di parametri presenti in *Tabella 11-33* e *Tabella 11-37* si ottengono gli stessi risultati con ANOVA, vengono riportate di seguito le tabelle:

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Tra gruppi	1112,9	2	556,4	0,341	0,724	5,143
In gruppi	9799,3	6	1633,2			
Totale	10912,2	8				

Tabella 11-39 ANOVA a un fattore su residui della Planarità1 per Test Inclinazione Sensore

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Tra gruppi	1482,9	2	741,4	0,765	0,506	5,143
In gruppi	5813,3	6	968,9			
Totale	7296,2	8				

 Tabella 11-40
 ANOVA a un fattore su residui della Planarità2 per Test Inclinazione Sensore

Tabella 11-41 ANOVA a un fattore su residui della Perpendicolarità per Test Inclinazione Sensore

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Tra gruppi	103512,7	2	51756,3	1,043	0,409	5,143
In gruppi	297759,3	6	49626,6			
Totale	401272,0	8				

Il calcolo ANOVA mostra che le tre caratteristiche non sono legate al variare dell'angolo di inclinazione del sensore, nelle tre tabelle si può vedere che $F < F_{crit}$. In riferimento alla *Tabella 11-37*, si può affermare che anche in questo caso i valori della Planarità1 rilevati col sensore a luce strutturata sono distanti da quelli della CMM mentre quelli della Planarità2 sono molto simili, la spiegazione è analoga a quella dei test precedenti.

11.5 Analisi dei dati e risultati Test Numero di Esposizioni (Shutter Time)

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per il Test Shutter Time (*Tabella 11-42*):

	Shutter1_	Shutter1_	Shutter1_	Shutter2_	Shutter2_	Shutter2_	Shutter3_	Shutter3_	Shutter3_
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Diametro 1 (mm)	5,964	6,028	6,019	5,848	6,039	6,057	5,959	5,768	5,741
Diametro 2 (mm)	5,966	5,918	5,967	6,116	5,824	6,121	5,775	6,009	6,009
Diametro 3 (mm)	5,885	6,229	6,216	6,064	5,787	5,851	5,753	5,778	5,722
Diametro 4 (mm)	6,007	6,134	5,944	5,861	6,130	6,130	5,792	6,054	6,036
Diametro 5 (mm)	6,016	6,03	6,048	6,040	6,045	6,068	5,995	5,968	6,004
Diametro 6 (mm)	6,073	6,075	6,077	6,065	6,079	6,075	5,973	6,008	6,023
Diametro 7 (mm)	6,023	6,03	6,035	6,006	6,021	6,019	5,976	5,911	5,972
Diametro 8 (mm)	6,032	6,049	6,05	6,008	6,057	6,043	5,989	5,935	6,005
Planarità 1 (mm)	0,2	0,01	0,009	0,011	0,011	0,009	0,009	0,013	0,207
Planarità 2 (mm)	0,049	0,054	0,047	0,050	0,057	0,063	0,049	0,047	0,045
Perpendicolarità (mm)	0,313	0,092	0,091	0,095	0,103	0,100	0,119	0,114	0,318

Tabella 11-42 Risultati Test Shutter Time

Ogni caratteristica è stata calcolata tre volte nelle stesse condizioni, in modo da permettere un'analisi statistica. Come fatto in precedenza, per l'analisi ANOVA non vengono utilizzati i dati di *Tabella 11-42* ma i residui. Si riportano di seguito le tabelle dei residui rispetto al valore nominale per planarità e perpendicolarità (*Tabella 11-43*) e per i diametri (*Tabella 11-44*):

Tabella 11-43 Residui di planariti	à e perpendicolarità	rispetto al val	lore nominale per	Test Shutter
	Time			

	Shutter1	Shutter2	Shutter3
	0,200	0,011	0,009
Planarità1 (mm)	0,010	0,011	0,013
	0,009	0,009	0,207
	0,049	0,050	0,049
Planarità2 (mm)	0,054	0,057	0,047
	0,047	0,063	0,045
Dormon di colorità	0,313	0,095	0,119
(mm)	0,092	0,103	0,114
	0,091	0,100	0,318

	Shutter1	Shutter2	Shutter3
	-36	-152	-41
D1 (μm)	28	39	-232
	19	57	-259
	-34	116	-225
D2 (µm)	-82	-176	9
	-33	121	9
	-115	64	-247
D3 (µm)	229	-213	-222
	216	-149	-278
	7	-139	-208
D4 (μm)	134	130	54
	-56	130	36
	16	40	-5
D5 (µm)	30	45	-32
	48	68	4
	73	65	-27
D6 (μm)	75	79	8
	77	75	23
	23	6	-24
D7 (µm)	30	21	-89
	35	19	-28
	32	8	-11
D8 (µm)	49	57	-65
	50	43	5

Tabella 11-44 Residui dei diametri rispetto al valore nominale per Test Shutter Time

Utilizzando i valori di *Tabella 11-44* si può eseguire un'analisi ANOVA a due fattori, otto livelli per il campione Foro e tre livelli per il campione Shutter Time, ottenendo i seguenti risultati:

Tabella 11-45 ANOVA a due fattori su residui dei diametri rispetto al valore nominale per TestShutter Time

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Campione (Foro)	128508,2	7	18358,3	2,242	0,047	2,207
Colonne (Shutter time)	168385,0	2	84192,5	10,284	0,000	3,191
Interazione	144125,9	14	10294,7	1,257	0,268	1,904
In (Errore)	392968	48	8186,8			
Totale	833987,1	71				

Il calcolo ANOVA mostra che:

- Per il campione Foro, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per il campione Shutter Time, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per vedere l'interazione tra il campione Foro e quello Shutter Time bisogna guardare la riga interazione, in questo caso $F < F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 non è respinta.

Facendo riferimento ai risultati ottenuti, si può affermare che i parametri Foro e Shutter Time hanno un effetto significativo sulla qualità della scansione, cosa che invece non ha la loro interazione. Da notare che il parametro Foro risulta essere di poco significativo, dunque si può affermare che in questo test la misura è influenzata unicamente dallo Shutter Time. Un ulteriore metodo di analisi può essere quello grafico, in questi modo possono essere messe in evidenza caratteristiche che con un'analisi numerica non vengono identificate. In *Figura 11.13* vengono riportate sulle ascisse i diversi fori mentre sulle ordinate la media dei residui per ogni singolo foro, l'andamento viene tracciato per le tre diverse impostazioni di Shutter Time con le quali sono state eseguite le misure.



Figura 11.13 Analisi grafica dei residui dei diametri rispetto al valore nominale per il Test Shutter Time

Nella *Figura* 11.13 si può osservare, come a differenza dei test precedentemente analizzati, non vi è una netta differenza di dimensione tra i fori presenti nella Superficie1 (1-2-3-4) e quelli sulla Superficie2 (5-6-7-8). Per ottenere ulteriori informazioni sul test, si esegue lo studio dei residui calcolati rimuovendo al valore misurato quello di riferimento ottenuto con la CMM. Essendo il pezzo lo stesso del test precedente (BBP2), i valori ottenuti con la CMM sono già stati precedentemente riportati in *Tabella* 11-5. Di seguito (*Tabella* 11-46 e *Tabella* 11-47) vengono riportati i valori dei residui ottenuti sottraendo ai dati presenti in *Tabella* 11-42 quelli presenti in *Tabella* 11-5.

	Shutter1	Shutter2	Shutter3	
	271	155	266	
D1 (μm)	335	346	75	
	326	364	48	
D2 (μm)	181	331	-10	
	133	39	224	
	182	336	224	
	117	296	-15	
D3 (µm)	461	19	10	
	448	83	-46	
	220	74	5	
D4 (μm)	347	343	267	
	157	343	249	
	12	36	-9	
D5 (µm)	26	41	-36	
	44	64	0	
	23	15	-77	
D6 (μm)	25	29	-42	
	27	25	-27	
	-31	-48	-78	
D7 (μm)	-24	-33	-143	
	-19	-35	-82	
	-22	-46	-65	
D8 (µm)	-5	3	-119	
	-4	-11	-49	

Tabella 11-46 Residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per Test Shutter Time

Tabella 11-47 Residui di planarità e perpendicolarità rispetto al valore di riferimento per Test Shutter Time

	Shutter1	Shutter2	Shutter3	
	-4	-193	-195	
Planarità1 (μm)	-194	-193	-191	
	-195	-195	3	
Planarità2 (µm)	3	4	3	
	8	11	1	
	1	17	-1	
Perpendicolarità (µm)	75	-143	-119	
	-146	-135	-124	
	-147	-138	80	

Utilizzando i valori di *Tabella 11-46* si può eseguire un'analisi ANOVA a due fattori, otto livelli per il campione Foro e tre livelli per il campione Shutter Time, ottenendo i seguenti risultati:

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Campione (Foro)	928360,1	7	132622,9	16,200	1,001E-10	2,207
Colonne (Shutter time)	168385,0	2	84192,5	10,284	1,918E-04	3,191
Interazione	144125,9	14	10294,7	1,257	2,683E-01	1,904
In (Errore)	392968	48	8186,8			
Totale	1633839,0	71				

Tabella 11-48 ANOVA a due fattori su residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per TestShutter Time

Il calcolo ANOVA mostra che:

- Per il campione Foro, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per il campione Shutter Time, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per vedere l'interazione tra il campione Foro e quello Shutter Time bisogna guardare la riga interazione, in questo caso $F < F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 non è respinta.

Facendo riferimento ai risultati ottenuti, si può affermare che i parametri Foro e Shutter Time risultano significativi ai fini della misura, mentre la loro interazione no. Confrontando i risultati di *Tabella 11-45* con quelli di *Tabella 11-48* si può osservare che i risultati ottenuti per il campione colonna e per l'interazione sono identici ciò che cambia è il risultato per il campione Foro, il valore di significatività diminuisce di molto rispetto al caso precedente, tanto da rendere tale fattore significativo ai fini della misura. Per avere informazioni aggiuntive sulle tre diverse impostazioni di Shutter Time viene effettuata, anche in questo caso, un'analisi grafica (*Figura 11.14*).



Figura 11.14 Analisi grafica dei residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per il Test Shutter Time
Per mettere in risalto i risultati ottenuti si è eseguita una media su tutti i fori per ogni impostazione di Shutter Time con la quale è stata effettuata la scansione ottenendo il grafico in *Figura 11.15*.



Figura 11.15 Analisi grafica della media dei residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per il Test Shutter Time

Dal grafico in *Figura 11.15* si può vedere come mediamente, la misura dei diametri che più si avvicina al valore di riferimento è quella con la configurazione Shutter3, si ha una differenza di circa 20 µm. Sempre dal grafico si vede come passando dalla configurazione 1 alla 3 si ha una diminuzione della differenza rispetto al valore di riferimento che può essere espressa con legge lineare. I risultati di questo test sono in linea con quanto ipotizzato inizialmente, nel caso dello Shutter3 per ogni scansione si impostano tre diverse acquisizioni ognuna della quali con uno shutter time differente, in questo modo si migliora la qualità della scansione. Mentre per quanto riguarda il secondo gruppo di parametri presenti in *Tabella 11-43* e *Tabella 11-47* si ottengono gli stessi risultati con ANOVA, vengono riportate di seguito le tabelle:

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Tra gruppi	8294,2	2	4147,1	0,499	0,630	5,143
In gruppi	49815,3	6	8302,6			
Totale	58109,6	8				

Tabella 11-49 ANOVA a un fattore su residui della Planarità1 per Test Shutter Time

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Tra gruppi	146,9	2	73,4	3,713	0,089	5,143
In gruppi	118,7	6	19,8			
Totale	265,6	8				

Tabella 11-50 ANOVA a un fattore su residui della Planarità2 per Test Shutter Time

 Tabella 11-51
 ANOVA a un fattore su residui della Perpendicolarità per Test Shutter Time

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Tra gruppi	11804,2	2	5902,1	0,592	0,583	5,143
In gruppi	59822,0	6	9970,3			
Totale	71626,2	8				

Il calcolo ANOVA mostra che le tre caratteristiche non sono legate al variare delle differenti impostazioni dello Shutter Time, nelle tre tabelle si può vedere che $F < F_{crit}$. In riferimento alla *Tabella 11-47*, si può affermare che anche in questo caso i valori della Planarità1 rilevati col sensore a luce strutturata sono distanti da quelli della CMM mentre quelli della Planarità2 sono molto simili, la spiegazione è analoga a quella dei test precedenti.

Capitolo 11-Analisi dei dati e risultati Test con sensore a luce strutturata 11.6 Analisi dei dati e risultati Test Rugosità/Template

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per il Test Rugosità/Template:

	Full1	Full2	Full3	Medium1	Medium2	Medium3	Preview1	Preview2	Preview3
Diametro 1 (mm)	5,727	5,714	5,793	5,821	5,731	5,873	5,598	5,782	5,896
Diametro 2 (mm)	5,838	5,975	6,015	5,766	6,102	5,726	5,753	5,848	5,803
Diametro 3 (mm)	6,004	5,803	5,793	5,821	5,799	5,855	6,027	5,654	5,777
Diametro 4 (mm)	5,822	5,866	5,866	5,783	5,917	5,8	5,741	5,666	5,9
Diametro 5 (mm)	6,011	6,03	6,034	5,941	6,059	6,102	5,742	5,802	5,924
Diametro 6 (mm)	6,023	6,021	6,05	5,936	5,976	5,952	6,041	6,048	5,878
Diametro 7 (mm)	5,963	5,988	6,009	5,915	5,946	5,853	5,897	5,725	5,661
Diametro 8 (mm)	6,019	6,038	6,052	6,027	5,975	6,068	5,719	5,783	5,816
Planarità 1 (mm)	0,08	0,01	0,01	0,011	0,01	0,01	0,01	0,129	0,099
Planarità 2 (mm)	0,081	0,079	0,079	0,075	0,075	0,069	0,073	0,066	0,07
Perpendicolarità (mm)	0,054	0,036	0,039	0,054	0,047	0,036	0,087	0,21	0,112

 Tabella 11-52 Risultati Test Rugosità/Template pezzo BBP2

Tabella 11-53 Risultati Test Rugosità/Template pezzo BBNP1

	Full1	Full2	Full3	Medium1	Medium2	Medium3	Preview1	Preview2	Preview3
Diametro 1 (mm)	5,703	5,685	5,911	5,624	5,733	5,694	5,6	5,935	6,08
Diametro 2 (mm)	5,939	5,685	5,957	5,832	6,068	6,041	5,655	5,808	5,565
Diametro 3 (mm)	5,739	5,725	5,722	5,844	5,757	5,799	5,552	6,328	5,411
Diametro 4 (mm)	5,801	5,79	5,787	5,805	5,841	5,882	6,085	5,81	5,583
Diametro 5 (mm)	6,052	6,08	6,044	5,912	6,013	5,906	5,836	6,171	5,457
Diametro 6 (mm)	6,078	6,105	6,067	5,612	5,574	5,702	6,067	5,745	6,964
Diametro 7 (mm)	5,828	5,845	5,846	5,836	5,744	5,885	5,53	5,752	5,546
Diametro 8 (mm)	5,958	6,021	5,997	5,754	5,978	5,977	5,685	5,513	5,694
Planarità 1 (mm)	0,009	0,005	0,005	0,006	0,009	0,005	0,013	0,101	0,101
Planarità 2 (mm)	0,105	0,118	0,098	0,082	0,083	0,079	0,034	0,028	0,033
Perpendicolarità (mm)	0,009	0,009	0,018	0,039	0,031	0,023	0,055	0,158	0,203

	Full1	Full2	Full3	Medium 1	Medium 2	Medium 3	Preview1	Preview2	Preview3
Diametro 1 (mm)	5,740	6,03	5,769	5,708	5,755	5,705	6,409	5,904	6,300
Diametro 2 (mm)	5,656	5,717	5,676	5,717	5,768	5,718	5,929	5,915	5,732
Diametro 3 (mm)	5,59	5,946	5,939	5,562	5,430	5,511	5,621	6,103	5,634
Diametro 4 (mm)	5,885	5,607	5,613	5,462	5,548	5,506	5,733	5,403	5,759
Diametro 5 (mm)	5,958	6,232	5,947	5,784	5,741	5,824	5,763	5,813	5,773
Diametro 6 (mm)	5,981	5,958	5,955	5,846	5,877	5,840	5,757	5,630	5,642
Diametro 7 (mm)	6,196	5,915	5,92	5,727	5,695	5,759	5,51	5,627	5,743
Diametro 8 (mm)	6,296	5,859	5,915	5,594	5,426	5,624	5,191	5,352	5,513
Planarità 1 (mm)	0,016	0,017	0,013	0,031	0,013	0,014	0,019	0,014	0,015
Planarità 2 (mm)	0,031	0,029	0,028	0,015	0,029	0,033	0,033	0,032	0,033
Perpendicolarità (mm)	0,044	0,058	0,037	0,05	0,038	0,053	0,066	0,074	0,08

Tabella 11-54 Risulta	i Test Rugosità/Te	emplate pezzo BBD1
-----------------------	--------------------	--------------------

Ogni caratteristica è stata calcolata tre volte nelle stesse condizioni, in modo da permettere un'analisi statistica. Come fatto in precedenza, per l'analisi ANOVA non vengono utilizzati i dati presenti nelle tabelle precedenti ma i residui. Si riportano di seguito le tabelle dei residui rispetto al valore nominale per i diametri e per planarità e perpendicolarità.

	Preview	Medium	Full
	0,01	0,011	0,08
Plan1_BBP2(mm)	0,129	0,01	0,01
-	0,099	0,01	0,01
	0,013	0,006	0,009
Plan1_BBNP1 (mm)	0,101	0,009	0,005
-	0,101	0,005	0,005
	0,019	0,031	0,016
Plan1_BBD1 (mm)	0,014	0,013	0,017
	0,015	0,014	0,013
	0,073	0,075	0,081
Plan2_BBP2 (mm)	0,066	0,075	0,079
	0,07	0,069	0,079
	0,034	0,082	0,105
Plan2_BBNP1 (mm)	0,028	0,083	0,118
-	0,033	0,079	0,098
	0,033	0,015	0,031
Plan2_BBD1 (mm)	0,032	0,029	0,029
-	0,033	0,033	0,028
	0,087	0,054	0,054
Perp_BBP2 (mm)	0,21	0,047	0,036
-	0,112	0,036	0,039
	0,055	0,039	0,009
Perp_BBNP1 (mm)	0,158	0,031	0,009
	0,203	0,023	0,018
	0,066	0,050	0,044
Perp_BBD1 (mm)	0,074	0,038	0,058
	0,080	0,053	0,037

Tabella 11-55 Residui di planarità e perpendicolarità rispetto al valore nominale per Test Rugosità/Template

	Preview	Medium	Full
	-402	-179	-273
D1_BBP2 (µm)	-218	-269	-286
	-104	-127	-207
	-400	-376	-297
D1_BBNP1 (µm)	-65	-267	-315
	80	-306	-89
	409	-292	-260
D1_BBD1 (μm)	-96	-245	30
	300	-295	-231
	-247	-234	-162
D2_BBP2 (µm)	-152	102	-25
	-197	-274	15
	-345	-168	-61
D2_BBNP1 (µm)	-192	68	-315
	-435	41	-43
	-71	-283	-344
D2_BBD1 (μm)	-85	-232	-283
	-268	-282	-324
	27	-179	4
D3_BBP2 (µm)	-346	-201	-197
	-223	-145	-207
	-448	-156	-261
D3_BBNP1 (µm)	328	-243	-275
	-589	-201	-278
	-379	-438	-410
D3_BBD1 (µm)	103	-570	-54
	-366	-489	-61
	-259	-217	-178
D4_BBP2 (µm)	-334	-83	-134
	-100	-200	-134
	85	-195	-199
D4_BBNP1 (µm)	-190	-159	-210
	-417	-118	-213
	-267	-538	-115
D4_BBD1 (μm)	-597	-452	-393
	-241	-494	-387
	-258	-59	11
D5_BBP2 (µm)	-198	59	30
	-76	102	34
	-164	-88	52
D5_BBNP1 (µm)	171	13	80
	-543	-94	44
	-237	-216	-42
D5_BBD1 (μm)	-187	-259	232
	-227	-176	-53
	41	-64	23
D6_BBP2 (µm)	48	-24	21
	-122	-48	50
	67	-388	78
D6_BBNP1 (µm)	-255	-426	105
	964	-298	67

 Tabella 11-56 Residui dei diametri rispetto al valore nominale per Test Rugosità/Template

	-243	-154	-19
D6_BBD1 (μm)	-370	-123	-42
	-358	-160	-45
	-103	-85	-37
D7_BBP2 (µm)	-275	-54	-12
	-339	-147	9
	-470	-164	-172
D7_BBNP1 (µm)	-248	-256	-155
	-454	-115	-154
	-490	-273	196
D7_BBD1 (μm)	-373	-305	-85
	-257	-241	-80
	-281	27	19
D8_BBP2 (µm)	-217	-25	38
	-184	68	52
	-315	-246	-42
D8_BBNP1 (µm)	-487	-22	21
	-306	-23	-3
	-809	-406	296
D8_BBD1 (µm)	-648	-574	-141
	-487	-376	-85

Capitolo 11-Analisi dei dati e risultati Test con sensore a luce strutturata

Utilizzando i valori di *Tabella 11-56* si può eseguire un'analisi ANOVA a tre fattori, otto livelli per il campione Foro, tre livelli per il campione Rugosità e tre livelli per il campione Template, ottenendo i seguenti risultati:

Tabella 11-57 ANOVA a tre fattori su residui dei diametri rispetto al valore nominale per Test Rugosità/Template

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Campione (Foro)	853252	7	121893	4,53	1,155E-04	2,063
Colonne (Template)	596374	2	298187	11,09	2,954E-05	3,049
Colonne (Rugosità)	513181	2	256591	9,54	1,175E-04	3,049
Interazione (Template*Rugosità)	278932	4	69733	2,59	3,829E-02	2,424
Interazione (Template*Foro)	1376165	14	98298	3,66	2,488E-05	1,750
Interazione (Rugosità*Foro)	719886	14	51420	1,91	2,799E-02	1,750
In (Errore)	4625308	172	25891			
Totale	8963099	215				

Il calcolo ANOVA mostra che:

- Per il campione Foro, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per il campione Template, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per il campione Rugosità, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per l'interazione tra Template e Rugosità, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per l'interazione tra Template e Foro, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per l'interazione tra Rugosità e Foro, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta.

Facendo riferimento ai risultati ottenuti, si può affermare che i parametri Foro, Template e Rugosità hanno un effetto significativo sulla qualità della scansione, così come le loro tre interazioni. Da notare che i campioni Template e Rugosità sono quelli che incidono maggiormente sulla scansione, prima di eseguire il test ci si aspettava un risultato del genere in quanto il primo va a modificare il numero di pixel utilizzati per la misura mentre il secondo dipendendo dalla finitura superficiale varia molto tra i tre pezzi, come mostrato nei capitoli precedenti. Un ulteriore metodo di analisi può essere quello grafico, in questi modo possono essere messe in evidenza caratteristiche che con un'analisi numerica non vengono identificate. In *Figura 11.16* vengono riportate sulle ascisse i diversi fori mentre sulle ordinate la media dei residui per ogni singolo foro, l'andamento viene tracciato per le tre diverse impostazioni di Template con le quali sono state eseguite le misure. Si riportano uno di fianco a l'altro i grafici ottenuti per i tre diversi pezzi.



Figura 11.16 Analisi grafica dei residui dei diametri rispetto al valore nominale per il Test Rugosità/Template

Nella *Figura 11.16* si può osservare come passando dal template Preview (peggiore in termini di qualità) al Full (migliore in termine di qualità) la misura diventa più precisa, avendo che i residui dei diametri rientrano in un range via via più piccolo. Inoltre, si può osservare che tra i tre diversi template i residui dei diametri del pezzo BBP2 sono tra di loro più simili, comportamento che va a confermare il fatto che tale pezzo ha una finitura superficiale intermedia tra i tre, non è né troppo rugoso come il pezzo BBNP1, né troppo liscio come il pezzo BBD1. Come nei test precedenti si ha una netta differenza tra i residui dei fori appartenenti alla Superficie1 (1-2-3-4) e quelli appartenenti alla Superficie2 (5-6-7-8), tale differenza è più marcata nel template Full. Per ottenere ulteriori informazioni sul test, si esegue lo studio dei residui calcolati rimuovendo al valore misurato quello di riferimento ottenuto con la CMM. Vengono riportati prima i valori ottenuti con la CMM per i tre pezzi utilizzati e successivamente i valori dei residui ottenuti sottraendo ai dati presenti in *Tabella 11-52*, *Tabella 11-53* e *Tabella 11-54* quelli presenti in *Tabella 11-58*.

	BBP2	BBNP1	BBD1
Diametro 1 (mm)	5,693	5,683	5,849
Diametro 2 (mm)	5,785	5,731	5,645
Diametro 3 (mm)	5,768	5,693	5,52
Diametro 4 (mm)	5,787	5,685	5,663
Diametro 5 (mm)	6,004	5,926	5,928
Diametro 6 (mm)	6,05	5,975	5,913
Diametro 7 (mm)	6,054	6,011	5,93
Diametro 8 (mm)	6,054	6,041	5,85
Planarità 1 (mm)	0,204	0,225	0,166
Planarità 2 (mm)	0,046	0,036	0,076
Perpendicolarità(mm)	0,238	0,231	0,282

Tabella 11-58 Valori di riferimento per i pezzi BBP2, BBNP1 e BBD1 ottenuti con CMM

Tabella 11-59 Residui di planarità e perpendicolarità rispetto al valore di riferimento per Test Rugosità/Template

	-194	1.7.7	
		-193	-124
Plan1_BBP2 (µm)	-75	-194	-194
	-105	-194	-194
	-212	-219	-216
Plan1_BBNP1 (µm)	-124	-216	-220
F	-124	-220	-220
	-147	-135	-150
Plan1_BBD1 (μm)	-152	-153	-149
	-151	-152	-153
	27	29	35
Plan2_BBP2 (µm)	20	29	33
F	24	23	33
	-2	46	69
Plan2_BBNP1 (µm)	-8	47	82
F	-3	43	62
	-43	-61	-45
Plan2_BBD1 (µm)	-44	-47	-47
	-43	-43	-48
	-151	-184	-184
Perp_BBP2 (µm)	-28	-191	-202
	-126	-202	-199
	-176	-192	-222
Perp_BBNP1 (µm)	-73	-200	-222
	-28	-208	-213
	-216	-232	-238
Perp_BBD1 (µm)	-208	-244	-224
	-202	-229	-245

Tabella 11-60 Residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per Test Rugosità/Template

	Preview	Medium	Full
	-95	128	34
D1_BBP2 (µm)	89	38	21
	203	180	100
	-83	-59	20
D1_BBNP1 (µm)	252	50	2
	397	11	228
	560	-141	-109
D1_BBD1 (µm)	55	-94	181
	55	-144	-80
	-32	-19	53
D2_BBP2 (µm)	63	317	190
	18	-59	230
	-76	101	208
D2_BBNP1 (µm)	77	337	-46
	-166	310	226
	284	72	11
D2_BBD1 (μm)	270	123	72
	87	73	31
D3_BBP2 (um)	259	53	236
20_0012 (µm)	-114	31	35

D3_B8N1 (um)14415146D3_B8D1 (um)6356452D3_B8D1 (um)42277D3_B8D1 (um)583-90426114-9419D4_D872 (um)11313791131379D4_D872 (um)12515616504_00120115561131379102D4_D8N1 (um)12515616504_001575656102177-30222D4_08D1 (um)2625526360157565696-157565696157562658098305659898305059801 (um)24887154469201183050_0801 (um)-165-1443050_0801 (um)-155-187334640920118-1757429-1442775-146-1443075-165-1661686409201139-16175-165-16616876-165-16616877-165-16816876-168-16113976-137-162-16877-136-16113978-175-138-161<		9	87	25
D3_BBN1 (un)6556432D3_BBD1 (un)28210629D3_BBD1 (un)63590450D4_BBD2 (un)78590450D4_BBP2 (un)-12113079D4_BBP2 (un)-12113079D4_BBN1 (un)125156105D4_BBN1 (un)225156105D4_BBN1 (un)2260-1155696-157555696-157505696-157505696-157505696-157505696-157505696-157505696-157505696-157505696137505097202552698091412656980148136165990-1412656990-1412656990-1412656991-145-14739915-146-1473092-53610310394-155-1041995-165-4666989-2739256999-27392-56999-27392-56999-26714666999-267-166		-141	151	46
222106231014270103_B01(µm)583-90426114-90426114-90426114-913512B87(µm)-121150791131379114-121100176115115106116122197102117-102197102118-15556119-166-15756119-15010657119-162-15756119-158-16756119-158-16830119-1225556119-1725756119-146126118119-14130114119-145-14430119-155-14419119-145-14430119-155-14419119-155-14419119-172-74-29110-172-74-29111-139-141139111-139-141139119-145-141139119-145-141139119-145-141139129-141-27-34139-141-139-141140-155-146-1	D3_BBNP1 (µm)	635	64	32
D3_BBD1(m)1014270D3_BBD1(m)588-90426114-9419-46-433D4_BB2(m)-121130791131377-1131377012011604,0012011604,0012011604,0012011604,0012010204,0012010204,00012012504,000157-5670-20122204,0005556-30983005,000-662-637-262-637-26255-30983005,000-262118-30-30-3005,000-465-14405,000-1412605,000-155-10405,000-165-14405,000-165-14405,000-165-16406,000-172-9806,000-172-9806,000-166-16706,000-167-6807-168-6608-273-9209,000-267-16609,000-267-16609,000-267-16609,000-267-16609,000-267-16609,000-268-1650		-282	106	29
D3_BBD1 (µm)983-90426114-9419114-941904_BBP2 (µm)-12113079113137901131379011313079012011610501201071020-2012221970-201222550-66-157-560-115-560-12255260-137500-20255260-141260-20355260-15-144300-15-144300-15-144300-15-144300-15-144300-15-144300-15-144300-15-144300-15-144300-15-144300-15-144300-15-144300-15-144300-15-146-1450-15-146300-15-146300-15-165-1460-15-141300-25-46-460-15-165-165 <td></td> <td>101</td> <td>42</td> <td>70</td>		101	42	70
11414.6	D3_BBD1 (μm)	583	-90	426
D4_BBP2 (µm)1.46.4.35D4_BBP1 (µm)1.13130.79D4_BBN1 (µm)1.131.13.79D4_BBN1 (µm)1.25.156.1650.400.197.102.102D4_BBD1 (µm).260.115.560.400.137.550.500.400.157.50.500.5BBP2 (µm).202.55.260.5BBN1 (µm).202.55.260.5BBN2 (µm).202.55.260.5BBN1 (µm).202.55.260.5BBN1 (µm).202.55.260.5BBN1 (µm).202.55.260.5BBN1 (µm).202.55.260.5BBN1 (µm).202.55.260.5BBN1 (µm).203.201.3010.5BBN1 (µm).155.164.300.5BBN1 (µm).155.164.3010.5BBN1 (µm).215.164.3010.5BBN1 (µm).215.164.3010.5BBN1 (µm).230.241.3270.5BBN1 (µm).230.261.4450.5BBN1 (µm).243.36.4450.5BBN1 (µm).243.361.3610.5BBN1 (µm).243.361.3650.5BBN1 (µm).243.361.3650.5BBN1 (µm).335.266.3650.5BBN1 (µm).243.361.3650.5BBN1 (µm).335.266.3650.5BBN1 (114	-9	419
D4_BBP2 (µm)1211307911313791131379113120116125156167102197102D4_BBD1 (µm)260115		-46	-4	35
1131379400120116D4_BBNP1 (um)125156105-102197102D4_BBD1 (um)260115569615750D5_BBP2 (um)262437D5_BBP2 (um)245871542469-144206D5_BBNP1 (um)245871542469-2011825_BBN1 (um)-165-14430D5_BBN2 (um)-155-1041925-7427344262-742934427-7429-1428-10419-1529,BBN2 (um)-122-742920_BBN2 (um)-122-742920_BBN2 (um)-230-10310320_BBN2 (um)-230-40113020_BBN2 (um)-250-4634520_BBN2 (um)-250-4634520_BBN2 (um)-250-267-46520_BBN2 (um)-250-267-16620_BBN2 (um)-451-175-16820_BBN2 (um)-451-175-16820_BBN2 (um)-451-265-46520_BBN2 (um)-335-267-16620_BBN2 (um)-335-267-36320_BBN2 (um)-420-268-16520_BBN2 (um)-356-267-36320_BBN2 (um)-356-267-365 <td>D4_BBP2 (µm)</td> <td>-121</td> <td>130</td> <td>79</td>	D4_BBP2 (µm)	-121	130	79
D4_BBNP1 (µm)1400120116D4_BBN1 (µm)125156105D4_BBD1 (µm)260-115.55P6.157.50D5_BBP2 (µm)245.87.15D5_BBNP1 (µm)245.87.154D5_BBN1 (µm).165.165.30D5_BBN1 (µm).165.144.30D5_BBN1 (µm).115.147.304D5_BBN1 (µm).115.187.304D5_BBN1 (µm).115.167.304D5_BBN1 (µm).115.168.30D5_BBN1 (µm).215.104.19D6_BBN2 (µm).20.118.30D6_BBN1 (µm).215.104.30D6_BBN1 (µm).230.401.130D6_BBN1 (µm).230.401.130D6_BBN1 (µm).230.401.130D6_BBN1 (µm).233.36.45D7_BBN2 (µm).245.461.45D7_BBN2 (µm).333.201.45D7_BBN1 (µm).259.267.166.333.201.45.165.333.201.45.420.203.266.333.201.45.335.247.35.346.427.35.356.287.43.356.287.43.356.287.43.356.287.44.44.44.44.459.256.4		113	13	79
D4_BBNP1 (µm)125156105-102197102D4_BBD1 (µm)-70-201222D4_BBD1 (µm)-260-115-56-66-66-750D5_BBP2 (µm)-2025526-809830-14126D5_BBNP1 (µm)24587154-469-20118-165-165-14430-115D5_BBD1 (µm)-115-187304-155-10419-27-165-10419-27D6_BBP2 (µm)-20-14430D6_BBNP1 (µm)-21-74-29-172-380-115D6_BBNP1 (µm)-23-10419-261-74-29-116-271-7342-271-7342-271-7342-271-7342-271-7342-271-7342-271-7342-271-7342-333-20145-393-20145-159-166-165-164-165-165-175-166-165-188-175-168-198-175-166-289-267-166-280-267-166-281-176-165-164-276-165-165-166-		400	120	116
1-02197102D4_BBD1 (um)-260-201222D4_BBD1 (um)-260-115-55D5_BBP2 (um)-262-637D5_BBP2 (um)-262-630D5_BBNP1 (um)-262-630D5_BBNP1 (um)24587154D5_BBNP1 (um)-165-14430D5_BBNP1 (um)-115-187344D5_BBNP1 (um)-115-187344D5_BBNP1 (um)-115-187344D5_BBNP1 (um)-20-118-118D6_BBNP1 (um)-210-14430D6_BBNP1 (um)-230-10419D6_BBNP1 (um)-230-401130D6_BBNP1 (um)-230-401130D6_BBNP1 (um)-230-401130D7_BBNP1 (um)-230-401130D7_BBNP1 (um)-237-267-166-333-201-45-165-393-201-45-165D7_BBNP1 (um)-259-267-166-361-126-165-165-333-271-355-15D7_BBNP1 (um)-355-287-383D7_BBNP1 (um)-356-287-383D7_BBNP1 (um)-356-287-383D7_BBNP1 (um)-356-287-383D7_BBNP1 (um)-356-287-383D7_BBNP1 (um)-356-287-383D8_BBNP1 (um)-356 <td>D4_BBNP1 (µm)</td> <td>125</td> <td>156</td> <td>105</td>	D4_BBNP1 (µm)	125	156	105
P4_BBD1 (um)70.201222D4_BBD1 (um)-260.115.5696.157.50D5_BBP2 (um).262.63.7D5_BBP2 (um).202.55.26.400.98.30.30D5_BBP1 (um).245.87.154.469.20.118.30D5_BBD1 (um).115.187.304D5_BBD2 (um).115.187.304.155.104.19.30.155.104.90.313D6_BBP2 (um).92.363.103D6_BBP1 (um).230.401.130.999.273.92.363.115.467.68.115.467.68.117.139.412.999.273.92.155.467.68.999.273.92.156.47.68.157.139.413.158.467.68.157.139.91.159.108.66.393.201.45.157.139.91.158.465.126.168.259.267.166.393.201.165.165.165.165.165.165.165.271.166.233.168.271.169.235.168.216.169.238.169 <td></td> <td>-102</td> <td>197</td> <td>102</td>		-102	197	102
D4_BBD1 (µm)-260-115.5696-157.50D5_BBP2 (µm)-262.63.7D5_BBNP1 (µm)-202.55.26BAO.98.30.30D5_BBNP1 (µm).40.126.30D5_BBNP1 (µm).445.87.118-165.144.30.30D5_BBD1 (µm).115.187.304D5_BBD2 (µm).415.416.30D6_BBP2 (µm).415.418.30D6_BBNP1 (µm).92.74.29D6_BBNP1 (µm).92.363.103D6_BBNP1 (µm).230.401.130D6_BBNP1 (µm).283.36.45D6_BBNP1 (µm).283.36.45D7_BBP2 (µm).263.36.45D7_BBNP1 (µm).259.266.163D7_BBNP1 (µm).259.267.163D7_BBNP1 (µm).335.201.45D7_BBNP1 (µm).335.216.165D7_BBNP1 (µm).335.226.35D8_BBNP1 (µm).335.227.35D8_BBNP1 (µm).336.287.433D8_BBNP1 (µm).459.461.20B8_BD1 (µm).459.266.446B8_BD1 (µm).337.226.446B8_BD1 (µm).337.226.446B8_BD1 (µm).337.226.446B8_BD1 (µm).337.226.446B8_BD1 (µm)		70	-201	222
96-157.50D5_BBP2 (µm)-262-637D5_BBP2 (µm)-2025526-809830D5_BBNP1 (µm)-90-14126D5_BBNP1 (µm)-24587118D5_BBD1 (µm)-115-14430D5_BBD2 (µm)-115-14430D5_BBD2 (µm)-115-14430D5_BBD1 (µm)-115-144-27D6_BBP2 (µm)-9-114-27D6_BBNP1 (µm)-92-363103D6_BBNP1 (µm)-230-401130D6_BBNP1 (µm)-230-401130D6_BBNP1 (µm)-233-401130D6_BBNP1 (µm)-245-66-303-27392D6_BBNP1 (µm)-245-66-373142-91D7_BBP2 (µm)-451-165D7_BBNP1 (µm)-259-267-166-343-201-452-165D7_BBNP1 (µm)-355-27-355D8_BBNP1 (µm)-335-27-355D8_BBNP1 (µm)-528-63-20D8_BBNP1 (µm)-528-63-287B8_BBNP1 (µm)-528-63-287B8_BBNP1 (µm)-528-63-20B8_BBNP1 (µm)-528-63-20B8_BBNP1 (µm)-528-364-44-337-226-365-364B8_BBNP1 (µm)-528-56-446 <t< td=""><td>D4_BBD1 (μm)</td><td>-260</td><td>-115</td><td>-56</td></t<>	D4_BBD1 (μm)	-260	-115	-56
D5_BBP2 (µm)-262-637D5_BBP1 (µm)-2025526-809830D5_BBNP1 (µm)-245871184-469-20118-469-20118-469-20118D5_BBD1 (µm)-165-14430D6_BBP2 (µm)-115-187304D6_BBP2 (µm)-9-114-27D6_BBP2 (µm)-9-114-27D6_BBP2 (µm)-9-114-27D6_BBP1 (µm)-9-114-29D6_BBNP1 (µm)-230-4011130D6_BBNP1 (µm)-230-4011130D6_BBNP1 (µm)-230-401130D6_BBNP1 (µm)-230-401130D7_BBP2 (µm)-156-6768D7_BBP2 (µm)-4157-168D7_BBNP1 (µm)-339-201-415D7_BBNP1 (µm)-335-267-166-77-465-126-165-78-420-203266D7_BBNP1 (µm)-335-27-35D8_BBNP1 (µm)-335-27-35D8_BBNP1 (µm)-286-43-20D8_BBNP1 (µm)-286-287-83D8_BBNP1 (µm)-336-287-83D8_BBNP1 (µm)-528-43-20D8_BBNP1 (µm)-528-64-44D8_BBNP1 (µm)-528-63-46-840-287-33-20		96	-157	-50
D5_BBP2 (µm)-2025526-809830D5_BBNP1 (µm)-469-14126-469-20118-469-20118-469-14430D5_BBD1 (µm)-115-187344D6_BBP2 (µm)-115-147-27-74-141-27-141D6_BBP2 (µm)-9-114-27-74-117-363103D6_BBP2 (µm)-22-740-172-9480130-165-401130-172-9480-172-9480-172-9480-172-9480-172-9480-175-13992-175-139-91-175-139-91-175-148-165-174-166-165-174-166-165-175-167-166-187-171-16-187-171-16-187-171-16-187-171-16-187-171-16-188-171-16-187-171-16-188-171-16-187-16-15-188-14-2-188-141-2-199-16-16-187-16-16-188-287-33-199-216 </td <td></td> <td>-262</td> <td>-63</td> <td>7</td>		-262	-63	7
809830D5_BBNP1 (µm)90.14.126D5_BBD1 (µm).245.87.154.469.20.118D5_BBD1 (µm).165.144.30D5_BBD1 (µm).715.104.19D6_BBP2 (µm).9.114.27D6_BBP2 (µm).92.363.003D6_BBNP1 (µm).92.363.103D6_BBNP1 (µm).92.363.103D6_BBNP1 (µm).230.401.130D6_BBNP1 (µm).263.667.688D7_BBP2 (µm).271.733.42D7_BBP2 (µm).329.108.666.393.201.455.455D7_BBNP1 (µm).329.108.666.393.201.455.165D7_BBNP1 (µm).333.225.155D7_BBNP1 (µm).333.225.155D7_BBNP1 (µm).335.277.355D8_BBP2 (µm).335.277.355D8_BBNP1 (µm).356.287.433D8_BBNP1 (µm).528.63.201B8_BBNP1 (µm).528.63.201B8_BBNP1 (µm).528.643.201B8_BBNP1 (µm).528.63.201B8_BBNP1 (µm).528.63.201B8_BBNP1 (µm).536.287.436B8_BBNP1 (µm).536.286.446.337.226.65.446.337.226.65	D5_BBP2 (µm)	-202	55	26
D5_BBNP1 (µm)-90-14126D5_BBNP1 (µm)-24587154-469-20118-165-14430D5_BBD1 (µm)-115-187304-155-10419-0-155-10419-0-172-980-0-172980-0-172980-0-172980-0-172980-0-172980-0-172980-0-172980-0-172980-0-172980-0-172980-0-172980-0-172980-0-172980-0-17342-0-13091-0-157-139-0-157-168-0-16-165-169-267-166-176-166-126-187-171-10-19-157-166-187-171-10-19-133-27-19-16-23-19-16-23-19-16-24-19-16-24-19-16-24-19-16-24-19-16-24-19-16-24-10		-80	98	30
D5_BBNP1 (µm) 245 87 154 -469 -20 118 -165 -144 30 D5_BBD1 (µm) -115 -187 304 -155 -104 19 -19 D6_BBP2 (µm) -2 -74 -29 -172 -98 0 -10 D6_BBP1 (µm) -230 -401 130 D6_BBNP1 (µm) -230 -401 130 D6_BBN1 (µm) -230 -401 130 D6_BBN1 (µm) -283 -36 45 D7_BBN1 (µm) -283 -36 45 D7_BBP2 (µm) -157 -139 -91 D7_BBN1 (µm) -157 -139 -91 D7_BBN1 (µm) -259 -267 -166 -393 -201 -45 -165 D7_BBN1 (µm) -303 -235 -15 D8_BBP2 (µm) -335 -27 -35 D8_BBP2 (µm) -335 -27 <t< td=""><td></td><td>-90</td><td>-14</td><td>126</td></t<>		-90	-14	126
Image: Constraint of the section of the sec	D5_BBNP1 (um)	245	87	154
D5_BBD1 (µm) -165 -144 30 D5_BBD1 (µm) -165 -144 30 -115 -187 304 -155 -104 19 -15 -104 19 -15 -104 19 -15 -104 19 -15 -104 27 -10 -9 -114 27 -172 -98 0 0 -172 -98 0 0 -172 -98 0 0 -172 -98 0 0 -172 -98 0 0 -165 -67 68 0 06_BBD1 (µm) -283 -36 45 -71 -73 42 0 07_BBP2 (µm) -157 -139 91 07_BBN1 (µm) -259 -267 -166 -465 -126 -165 -165 07_BBD1 (µm) -303		-469	-20	118
D5_BBD1 (µm) Image: Constraint of the constr		-165	-144	30
De_BBP1 (an) 1.5 1.6 0.6 -155 -104 19 155 -104 19 De_BBP2 (µm) -2 -74 -29 -172 -98 0 -172 -98 0 De_BBNP1 (µm) -230 -401 130 De_BBD1 (µm) -230 -401 130 De_BBD1 (µm) -230 -401 130 De_BBD1 (µm) -283 -36 45 -271 -73 42 -157 -139 -91 D7_BBP2 (µm) -329 -108 -66 -393 -201 -45 D7_BBNP1 (µm) -259 -267 -166 -465 -126 -165 D7_BBD1 (µm) -303 -235 -15 D8_BBP1 (µm) -335 -27 -35 D8_BBP1 (µm) -356 -287 -83 D8_BBNP1 (µm) -528 -63 -20	D5_BBD1 (um)	-115	-187	304
1.00 1.01 1.7 D6_BBP2 (µm) -9 -114 -27 D6_BBP2 (µm) -2 -74 -29 D6_BBNP1 (µm) 92 -363 103 D6_BBNP1 (µm) -230 -401 130 P8 -273 92 -156 -67 68 D6_BBD1 (µm) -283 -36 45 -271 -73 42 -271 -73 42 -271 -73 42 -271 -73 42 -271 -73 42 -271 -73 42 -271 -73 42 -271 -73 42 -393 -201 45 -393 -201 45 -166 -165 -166 -175 -183 -16 07_BBD1 (µm) -303 -225 -15 -187 -171 -10 -28BP2 (µm)	D5_ BBD1 (μm)	-155	-104	19
D6_BBP2 (µm) -1.14 -2.1 -2 -74 -29 -172 -98 0 D6_BBP1 (µm) -92 -363 103 D6_BBP1 (µm) -230 -401 130 D6_BBP1 (µm) -283 -36 45 -271 -73 42 -07_BBP2 (µm) -157 -139 -91 D7_BBP2 (µm) -329 -108 -66 -393 -201 -45 -45 D7_BBP1 (µm) -259 -267 -166 -465 -126 -165 -165 D7_BBD1 (µm) -335 -277 -35 D8_BBP2 (µm) -271 -79 -16 -335 -277 -35 -35 D8_BBP1 (µm) -528 63 -20 D8_		-135	-104	27
D6_DBP2 (µn) -2 -74 -29 -172 -98 0 06_BBNP1 (µn) 92 -363 103 D6_BBNP1 (µn) -230 -401 130 D6_BBD1 (µn) -230 -401 130 D6_BBD1 (µn) -230 -401 130 D6_BBD1 (µn) -283 -36 45 D7_BBP2 (µn) -283 -36 45 D7_BBP2 (µn) -157 -139 -91 D7_BBP2 (µn) -329 -108 -66 -393 -201 45 -45 D7_BBP1 (µn) -259 -267 -166 -465 -126 -165 -165 D7_BBD1 (µn) -303 -235 -15 D7_BBD1 (µn) -335 27 -35 D8_BBP2 (µn) -238 14 -2 D8_BBP1 (µn) -528 -63 -20 D8_BBN1 (µn) -528 -63 -20 B465 -256			-114	-27
1/2 -98 0 D6_BBNP1 (µm) 92 -363 103 D6_BBNP1 (µm) -230 -401 130 D6_BBD1 (µm) -283 -36 45 D6_BBD1 (µm) -283 -36 45 D6_BBD1 (µm) -283 -36 45 D7_BBP2 (µm) -157 -139 -91 D7_BBP2 (µm) -329 -108 -66 -393 -201 45 -91 D7_BBP1 (µm) -259 -267 -166 -465 -126 -165 -165 D7_BBD1 (µm) -303 -235 -15 D7_BBD1 (µm) -303 -235 -15 D7_BBD1 (µm) -303 -235 -15 D8_BBP2 (µm) -355 -27 -35 D8_BBP1 (µm) -528 -63 -20 B8_BBNP1 (µm) -528 -63 -20 D8_BBD1 (µm) -528 -63 -20 D8_BBD1 (µm)	D6_BBP2 (µm)	-2	-/4	-29
b6_BBNP1 (µm) 92 -363 103 D6_BBNP1 (µm) -230 -401 130 D6_BBD1 (µm) -156 -67 68 D6_BBD1 (µm) -283 -36 45 D7_BBP2 (µm) -271 -73 42 D7_BBP2 (µm) -157 -139 -91 D7_BBP2 (µm) -329 -108 -66 -393 -201 -45 D7_BBP1 (µm) -259 -267 -166 145 -126 -165 D7_BBD1 (µm) -259 -267 -166 165 -126 -165 -165 D7_BBD1 (µm) -303 -235 -15 D8_BBP2 (µm) -335 -27 -35 D8_BBP2 (µm) -238 14 -2 D8_BBNP1 (µm) -528 -63 -20 D8_BBNP1 (µm) -528 -63 -20 D8_BBNP1 (µm) -528 -63 -20 D8_BBNP1 (µm) -459		-1/2	-98	0
D6_BBNP1 (µm) -230 -401 130 989 -273 92 06_BBD1 (µm) -156 -67 68 06_BBD1 (µm) -283 -36 45 -271 -73 42 07_BBP2 (µm) -157 -139 -91 07_BBP2 (µm) -329 -108 -66 -393 -201 45 07_BBP1 (µm) -259 -267 -166 07_BBD1 (µm) -259 -267 -166 07_BBD1 (µm) -420 -203 266 07_BBD1 (µm) -303 -235 -15 08_BBP2 (µm) -335 -27 -35 08_BBP2 (µm) -271 -79 -16 0.238 14 -2 -235 08_BBNP1 (µm) -528 -63 -20 0.347 -64 -44 -20 0.498 -424 9 -337 -226 65		92	-303	103
989 -2/3 92 D6_BBD1 (µm) -156 -67 68 -283 -36 45 -271 -73 42 -157 -139 -91 D7_BBP2 (µm) -329 -108 -66 -393 -201 45 -66 -393 -201 45 -66 -393 -201 45 -66 -393 -201 45 -66 -393 -201 45 -66 07_BBN1 (µm) -259 -267 -166 -465 -126 -165 -165 -72 -303 -235 -15 D7_BBD1 (µm) -303 -235 -15 D8_BBP2 (µm) -271 -79 -16 -238 14 -2 -20 D8_BBN1 (µm) -528 -63 -20 -347 -64 44 -20 -347 -64 44 -2	D6_BBNP1 (µm)	-230	-401	130
D6_BBD1 (μm) -156 -6/ 68 -283 -36 45 -271 -73 42 D7_BBP2 (μm) -157 -139 -91 D7_BBP2 (μm) -329 -108 -66 -393 -201 -45 -75 -183 -157 D7_BBP2 (μm) -259 -267 -166 -455 -126 -165 D7_BBD1 (µm) -420 -203 266 D7_BBD1 (µm) -303 -235 -15 -187 -171 -10 -10 -8BB2 (µm) -271 -79 -16 -238 14 -2 -35 D8_BBP2 (µm) -528 -63 -20 -347 -64 -44 -2 -8BN1 (µm) -528 -63 -20 -347 -64 -44 -44 D8_BBD1 (µm) -498 -424 9		989	-273	92
D6_BBD1 (µm) -283 -36 45 -271 -73 42 -271 -73 42 D7_BBP2 (µm) -157 -139 -91 D7_BBP2 (µm) -329 -108 -66 -393 -201 445 -75 143 -175 -183 D7_BBNP1 (µm) -259 -267 -166 -465 -126 -165 -165 D7_BBD1 (µm) -303 -235 -15 D7_BBD1 (µm) -303 -235 -15 D8_BBP2 (µm) -335 27 -35 D8_BBP2 (µm) -271 -79 -16 -238 14 -2 -35 D8_BBNP1 (µm) -528 -63 -20 -347 -64 -44 -44 D8_BBD1 (µm) -498 -424 9		-156	-67	68
-271 -73 42 -157 -139 -91 07_BBP2 (μm) -329 -108 -66 -393 -201 445 -75 -183 -157 -183 D7_BBNP1 (µm) -259 -267 -166 -465 -126 -165 -465 -126 -165 D7_BBD1 (µm) -303 -235 -15 D7_BBD1 (µm) -303 -235 -15 D8_BBP2 (µm) -335 -27 -35 D8_BBP2 (µm) -271 -79 -16 -238 14 -2 -35 D8_BBNP1 (µm) -528 -63 -20 -347 -64 -44 -2 D8_BBN1 (µm) -498 -226 446	D6_BBD1 (µm)	-283	-36	45
D7_BBP2 (μm) -157 -139 -91 D7_BBP2 (μm) -329 -108 -66 -393 -201 45 D7_BBNP1 (μm) -259 -267 -166 -465 -126 -165 -465 -126 -165 07_BBD1 (μm) -303 -235 -15 07_BBD1 (μm) -303 -235 -15 08_BBP2 (μm) -335 -27 -35 D8_BBP2 (μm) -271 -79 -16 -336 -287 -83 D8_BBP1 (μm) -528 -63 -20 -347 -64 -44 D8_BBD1 (μm) -459 -256 446 D8_BBD1 (μm) -498 -424 9		-271	-73	42
D7_BBP2 (μm) -329 -108 -66 -393 -201 45 -798 -481 -175 -183 D7_BBNP1 (μm) -259 -267 -166 -465 -126 -165 -465 -126 -165 D7_BBD1 (μm) -420 -203 266 D7_BBD1 (μm) -303 -235 -15 -187 -171 -10 -10 D8_BBP2 (μm) -271 -79 -16 -238 14 -2 -20 D8_BBP1 (μm) -528 -63 -20 -347 -64 -44 -20 D8_BBD1 (μm) -459 -256 446 D8_BBD1 (μm) -498 -424 9		-157	-139	-91
-393 -201 -45 -393 -201 -45 -481 -175 -183 D7_BBNP1 (µm) -259 -267 -166 -465 -126 -165 07_BBD1 (µm) -420 -203 266 D7_BBD1 (µm) -303 -235 -15 -187 -171 -10 -187 -171 -10 D8_BBP2 (µm) -271 -79 -16 -238 14 -2 -35 D8_BBNP1 (µm) -528 -63 -20 -347 -64 -44 -44 D8_BBD1 (µm) -459 -256 446 D8_BBD1 (µm) -498 -424 9	D7_BBP2 (µm)	-329	-108	-66
-481 -175 -183 D7_BBNP1 (μm) -259 -267 -166 -465 -126 -165 D7_BBD1 (μm) -420 -203 266 D7_BBD1 (μm) -303 -235 -15 D8_BBP2 (μm) -335 -27 -35 D8_BBP2 (μm) -271 -79 -16 -238 14 -2 -20 D8_BBNP1 (μm) -528 -63 -20 -347 -64 -44 D8_BBD1 (μm) -459 -256 446 D8_BBD1 (μm) -498 -424 9		-393	-201	-45
D7_BBNP1 (μm) -259 -267 -166 -465 -126 -165 D7_BBD1 (μm) -420 -203 266 D7_BBD1 (μm) -303 -235 -15 -187 -171 -10 D8_BBP2 (μm) -335 -27 -35 D8_BBP2 (μm) -271 -79 -16 -238 14 -2 D8_BBNP1 (μm) -528 -63 -20 -347 -64 -44 D8_BBD1 (μm) -659 -256 446 D8_BBD1 (μm) -498 -424 9		-481	-175	-183
-465 -126 -165 -420 -203 266 D7_BBD1 (μm) -303 -235 -15 -187 -171 -10 -187 -171 -10 D8_BBP2 (μm) -271 -79 -35 D8_BBP2 (μm) -271 -79 -16 -238 14 -2 -356 -287 -83 D8_BBNP1 (μm) -528 -63 -20 -347 -64 -44 D8_BBD1 (μm) -498 -424 9 -337 -226 65	D7_BBNP1 (µm)	-259	-267	-166
-420 -203 266 D7_BBD1 (μm) -303 -235 -15 -187 -171 -10 -335 -27 -35 D8_BBP2 (μm) -271 -79 -16 -238 14 -2 -356 -287 -83 D8_BBNP1 (μm) -528 -63 -20 -347 -64 -44 D8_BBD1 (μm) -498 -424 9 -337 -226 65		-465	-126	-165
D7_BBD1 (μm) -303 -235 -15 -187 -171 -10 -187 -171 -10 D8_BBP2 (μm) -271 -79 -16 -238 14 -2 -356 -287 -83 D8_BBNP1 (μm) -528 -63 -20 -347 -64 -44 D8_BBD1 (μm) -498 -424 9 -337 -226 65 65		-420	-203	266
-187 -171 -10 -335 -27 -35 D8_BBP2 (μm) -271 -79 -16 -238 14 -2 -356 -287 -83 D8_BBNP1 (μm) -528 -63 -20 -347 -64 -44 -659 -256 446 D8_BBD1 (μm) -498 -424 9 -337 -226 65 65	D7_BBD1 (μm)	-303	-235	-15
-335 -27 -35 D8_BBP2 (μm) -271 -79 -16 -238 14 -2 -238 14 -2 -356 -287 -83 D8_BBNP1 (μm) -528 -63 -20 -347 -64 -44 D8_BBD1 (μm) -498 -424 9 -337 -226 65		-187	-171	-10
D8_BBP2 (µm) -271 -79 -16 -238 14 -2 -356 -287 -83 D8_BBNP1 (µm) -528 -63 -20 -347 -64 -44 D8_BBD1 (µm) -659 -256 446 -337 -226 65		-335	-27	-35
-238 14 -2 -356 -287 -83 D8_BBNP1 (μm) -528 -63 -20 -347 -64 -44 -659 -256 446 D8_BBD1 (μm) -498 -424 9 -337 -226 65	D8_BBP2 (µm)	-271	-79	-16
-356 -287 -83 D8_BBNP1 (μm) -528 -63 -20 -347 -64 -44 -659 -256 446 D8_BBD1 (μm) -498 -424 9 -337 -226 65 65		-238	14	-2
D8_BBNP1 (μm) -528 -63 -20 -347 -64 -44 -659 -256 446 D8_BBD1 (μm) -498 -424 9 -337 -226 65		-356	-287	-83
-347 -64 -44 -659 -256 446 D8_BBD1 (μm) -498 -424 9 -337 -226 65	D8_BBNP1 (µm)	-528	-63	-20
-659 -256 446 D8_BBD1 (μm) -498 -424 9 -337 -226 65		-347	-64	-44
D8_BBD1 (μm) -498 -424 9 -337 -226 65		-659	-256	446
-337 -226 65	D8_BBD1 (μm)	-498	-424	9
		-337	-226	65

Capitolo 11-Analisi dei dati e risultati Test con sensore a luce strutturata

Utilizzando i valori di *Tabella 11-60* si può eseguire un'analisi ANOVA a tre fattori, otto livelli per il campione Foro, tre livelli per il campione Rugosità e tre livelli per il campione Template, ottenendo i seguenti risultati:

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Campione (Foro)	2545327	7	363618	13,7	4,920E-14	2,063
Colonne (Template)	633148	2	316574	11,93	1,408E-05	3,049
Colonne (Rugosità)	21049	2	10525	0,4	6,732E-01	3,049
Interazione (Template*Rugosità)	267450	4	66863	2,52	4,303E-02	2,424
Interazione (Template*Foro)	1254217	14	89587	3,38	8,039E-05	1,750
Interazione (Rugosità*Foro)	422012	14	30144	1,14	3,300E-01	1,750
In (Errore)	4564530	172	26538			
Totale	9707734	215				

Tabella 11-61 ANOVA a tre fattori su residui dei diametri rispetto al valore di riferiemento per TestRugosità/Template

Il calcolo ANOVA mostra che:

- Per il campione Foro, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per il campione Template, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per il campione Rugosità, il test mostra che $F < F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 non è respinta;
- Per l'interazione tra Template e Rugosità, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per l'interazione tra Template e Foro, il test mostra che $F > F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 è respinta;
- Per l'interazione tra Rugosità e Foro, il test mostra che $F < F_{crit}$, perciò l'ipotesi H_0 non è respinta.

Facendo riferimento ai risultati ottenuti, si può affermare che i parametri Foro e Template continuano a risultare significativi ai fini della misura, mentre il parametro Rugosità no. Inoltre, le interazioni che continuano a rimanere significative sono la Template-Rugosità e la Template-Foro mentre diventa non significativa la Rugosità-Foro. Per avere informazioni aggiuntive sul test viene effettuata, anche in questo caso, un'analisi grafica.



Figura 11.17 Analisi grafica dei residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per il Test Rugosità/Template

Per mettere in risalto i risultati ottenuti si è eseguita una media su tutti i fori per ogni combinazione Template/Rugosità con la quale è stata effettuata la scansione ottenendo il grafico in *Figura 11.18*.



Figura 11.18 Analisi grafica della media dei residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per il Test Rugosità/Template

In *Figura 11.18* si può osservare come variano di molto i risultati ottenuti a seconda del pezzo analizzato e del template utilizzato. Analizzando i tre differenti pezzi si ha che i valori medi (ottenuti come media dei tre valori ottenuti per ogni singolo pezzo) sono negativi e la deviazione minima, rispetto al valore di riferimento della CMM si ha nel caso del pezzo BBNP1 con circa 2 μ m di deviazione. I valori ottenuti variano in un range massimo di 20 μ m dunque si può affermare che i risultati ottenuti sono molto simili. Invece, per quanto riguarda i valori medi (ottenuti come media dei tre valori ottenuti come media dei tre valori ottenuti per ogni singolo template) si ha che i template Preview e Medium portano ad una deviazione negativa mentre quello Full ad una deviazione positiva.

Il template che genera una deviazione rispetto al valore di riferimento minore è il Medium con circa 40 μ m, tra i tre template c'è un range rilevante di circa 120 μ m. Dunque, in seguito a tali risultati si può affermare che mediamente i fori dei tre pezzi con finiture superficiali differenti sono simili mentre l'utilizzo di un template piuttosto che un altro porta ad una differenza di deviazione, rispetto al valore di riferimento, rilevante.

Mentre per quanto riguarda il secondo gruppo di parametri presenti in *Tabella* 11-55 e *Tabella* 11-59 si ottengono risultati simili con ANOVA, vengono riportate di seguito le tabelle riferite ai residui rispetto al valore di riferimento:

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Campione (Rugosità)	10817,9	2	5408,9	5,959	0,010	3,555
Colonne (Template)	9988,7	2	4994,4	5,503	0,014	3,555
Interazione	5938,4	4	1484,6	1,636	0,209	2,928
In (Errore)	16337,3	18	907,6			
Totale	43082,3	26				

Tabella 11-62 ANOVA a due fattori su residui della Planarità1 per Test Rugosità/Template

Tabella 11-63 ANOVA a due	fattori su residui (della Planarità2	per Test Ru	gosità/Template
	/			

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Campione (Rugosità)	38304,2	2	19152,1	732,446	5,721E-18	3,555
Colonne (Template)	3378,7	2	1689,3	64,606	6,109E-09	3,555
Interazione	5651,1	4	1412,8	54,030	8,737E-10	2,928
In (Errore)	470,7	18	26,1			
Totale	47804,7	26				

 Tabella 11-64 ANOVA a due fattori su residui della Perpendicolarità per Test Rugosità/Template

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F	Valore di significatività	F crit
Campione (Rugosità)	21649,9	2	10824,9	9,300	0,00168	3,555
Colonne (Template)	37327,6	2	18663,8	16,035	0,00010	3,555
Interazione	9031,5	4	2257,9	1,940	0,14742	2,928
In (Errore)	20951,3	18	1164,0			
Totale	88960,3	26				

Dai risultati presenti nelle tre tabelle si può affermare che Planarità1, Planarità2 e Perpendicolarità sono influenzati in differente modo dalla rugosità del pezzo e dal template utilizzato. Risultano influenti ai fini della misura tutti i campioni analizzati tranne l'interazione tra Rugosità e Template per la Planarità1 e la Perpendicolarità. Tra tutti i risultati spiccano i valori ottenuti per la Planarità2, tale caratteristica è fortemente influenzata sia dalla Rugosità e dal Template che dalla loro interazione. In riferimento alla *Tabella 11-59*, si può affermare che anche in questo caso i valori della Planarità1 rilevati col sensore a luce strutturata, per i tre pezzi, sono distanti da quelli della CMM mentre quelli della Planarità2 sono molto simili, la spiegazione è analoga a quella dei test precedenti. I valori ottenuti con pezzo BBP2 sono quelli che più si avvicinano al valore di riferimento, già prima di eseguire il test ci di aspettava un risultato del genere dato che tale pezzo è il più adatto ad essere misurato con tecniche ottiche senza contatto.

12 Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è stato quello di ottimizzare i parametri che influiscono sul controllo geometrico di pezzi in ALM con metodologie di misura non a contatto come la luce strutturata. I parametri di influenza analizzati sono sei, tra tutti i parametri che possono influenzare tale misura sono stati scelti questi in quanto, durante lo studio preliminare si è visto che non erano stati approfonditi in ricerche precedenti e soprattutto sono parametri di fondamentale importanza per la tecnica utilizzata. In ogni test, la misura è stata eseguita tre volte per ogni configurazione in modo da avere dati a sufficienza per un'analisi statistica. Durante l'analisi dei test si è visto come tutti i parametri testati influenzino seppur in modo diverso la misura del pezzo, per tale motivo come conclusione di questo lavoro di tesi, tenendo conto dei risultati ottenuti, si vogliono definire quali siano le migliori condizioni per effettuare la misura su un pezzo come il Bamboo Bracket realizzato con tecnologia ALM. Come parametro di valutazione è stata utilizzata, per tutti i test, la media dei residui dei diametri dei fori rispetto al valore di riferimento, differente per ogni parametro testato. Tutto questo è stato possibile grazie alla realizzazione dei test sulla macchina di misura a coordinate (CMM) che hanno fornito i valori di riferimento e il test sulla rugosità che ha permesso di definire la rugosità superficiale dei pezzi utilizzati.

Per il Test Allineamento l'obiettivo è stato quello di capire quale tra le tre tipologie di scansione, presenti sul software di misura, risulti essere la migliore. Per allineamento si intende l'unione delle varie scansioni effettuate dal sensore per la ricostruzione del pezzo. Il software, nelle fasi inziali della misura, permette di scegliere tra tre diverse tipologie di allineamento: Contour Matching (allineamento tramite zone in comune tra le diverse scansioni), Marker (allineamento tramite l'applicazione di marker sul pezzo e/o nell'ambiente di misura che vengono riconosciuti durante le scansioni) e Automatic (allineamento tramite tavola rotante che viene riconosciuta attraverso la procedura di teach, ovvero la definizione della posizione della tavola nell'ambiente di misura e di conseguenza il riconoscimento delle sue rotazioni). I risultati hanno mostrato che effettuando l'allineamento tra le diverse scansioni con la modalità Contour Matching si ottiene mediamente la minore deviazione rispetto al valore di riferimento (CMM) e dunque il miglior risultato. C'è da dire però che la differenza tra la modalità Contour Matching e la Automatic è di 8 µm, dunque inferiore alla risoluzione del sensore. Per tale motivo si può considerare che mediamente le due modalità diano un risultato analogo, mentre la modalità Marker si discosta dalle precedenti di circa 30 µm.

Con il Test Teach si è voluto capire quale fosse il modo migliore per effettuare tale procedura. Per Teach si intende la qualifica della tavola rotante. Tale procedura deve essere eseguita, prima di iniziare la scansione vera e propria, qualora tra le tipologie di allineamento venga scelta la Automatic. La procedura consiste nella realizzazione da parte del sensore di tre scansioni di un pezzo posizionato sulla tavola rotante: la prima in posizione zero della tavola, la seconda dopo una rotazione della tavola di 20° e la terza dopo una rotazione di 20° ma del secondo asse, ovvero quello di tilt. Affinché il processo vada a buon fine il sensore deve riconoscere il più possibile zone comuni tra le differenti scansioni. I risultati mostrano come la migliore soluzione è quella di utilizzare un oggetto differente dal Bamboo Bracket, il risultato ottenuto si discosta di circa 3 µm dal valore di riferimento. Il valore può essere migliorato ulteriormente se viene realizzato un pezzo ad hoc per la fase di teach come quello proposto in *Figura* **10.11**. L'utilizzo del Bamboo Bracket porta al risultato peggiore, circa 36 µm di deviazione, in quanto con sole tre scansioni è difficile per il sensore ricostruire perfettamente le superfici del pezzo. Tale risultato viene migliorato se si applicano sul

pezzo degli oggetti, riducendo la deviazione di 20 μm rispetto al valore precedente, quindi si arriva a circa 16 μm.

Il Test Posizione Pezzo e Inclinazione Sensore sono serviti per capire come posizionare il sensore ed il pezzo prima di iniziare la misura. L'angolo di inclinazione del sensore viene controllato attraverso la testa snodata inserita nel treppiede sul quale viene montato lo strumento. L'angolo viene calcolato tra il piano sul quale giace il pezzo e la direzione di inclinazione delle ottiche del sensore.

Le angolazioni migliori risultano essere quelle a 15° e 25° . Danno circa lo stesso valore di deviazione ma con segno opposto, il primo porta ad una deviazione positiva di circa 10 µm mentre il secondo ad una negativa di circa 19 µm. Per quanto riguarda la distanza di lavoro dello strumento si ha un valore nominale di 37 cm, per tale motivo durante il test si è utilizzata questa distanza come centrale e le altre due sono state ottenute allontanando e avvicinando di 5 cm la tavola rotante, col pezzo, rispetto al sensore. Il miglior risultato si ottiene alla distanza di 42 cm ed è intorno ai 20 µm. I risultati ottenuti per l'inclinazione e per la distanza tra sensore e pezzo sono fortemente legati alla dimensione di quest'ultimo. Per tale motivo si tiene a sottolineare che questi risultati sono ritenuti ottimali per l'analisi del Bamboo Bracket e quindi possono non essere parametri ottimali per differenti tipologie di pezzi analizzati.

Il Test Shutter Time è stato effettuato per capire quanto una riduzione del tempo necessario per eseguire la misura incide sulla qualità di quest'ultima. Per Shutter time si intende il tempo di esposizione, ovvero il tempo in cui il sensore digitale all'interno della fotocamera viene esposto alla luce, si avrà l'apertura dell'otturatore. L'utilizzo di un minor numero di esposizioni porta ad una riduzione del tempo totale di scansione ma a discapito della qualità. Tale comportamento è stato confermato dal test in quanto passando dalla prova Shutter1 (una sola esposizione per scansione) alla Shutter3 (tre esposizioni per scansione) si passa da circa 135 µm di deviazione a 24 µm rispetto al valore di riferimento. Di conseguenza prima di iniziare la misura è opportuno capire quali caratteristiche del pezzo si vogliono analizzare, se le caratteristiche sono molto particolari (ad esempio oggetti con superfici free-form o oggetti molto frastagliati) è opportuno utilizzare il maggior numero di esposizioni possibili mentre se le caratteristiche sono più semplici e regolari (ad esempio la fiancata di un'auto) si può pensare di ridurre il numero di esposizioni, per singola scansione, in modo da ridurre di molto il tempo necessario per completarla. Basti pensare che tra una e tre acquisizioni nel test si è verificata una riduzione di circa 6 minuti su un totale di dieci scansioni.

Il Test Rugosità/Template è stato il più difficoltoso da analizzare in quanto si aveva la variazione di due grandezze, la rugosità del pezzo (vengono utilizzati tre Bamboo Bracket differenti: BBD1 6,237 µm, BBP2 12,898 µm e BBNP1 14,657 µm) e il template impostato nel software di misura (ovvero un filtro sui dati acquisiti. I template disponibili sono tre: Full, viene utilizzato l'intero volume di dati, l'elaborazione richiede elevate risorse di calcolo; Medium, utilizzata come impostazione di default, vengono utilizzati metà dei pixel; Preview, vengono utilizzati un terzo dei pixel). Tale test è servito soprattutto a capire se c'è un legame tra finitura superficiale del pezzo e grado di precisione con cui viene eseguite la scansione. Come risultato si ottiene che i tre pezzi hanno mediamente (media effettuata sui tre template per i tre pezzi) una deviazione rispetto al valore di riferimento negativa, quello che più si avvicina a tale valore è il BBNP1 con circa 2 µm, poi il BBP2 con 15 µm e infine il BBD1 con 26 µm. Tale risultato sta a dire che l'interazione tra pezzo BBNP1, quello con rugosità più alta, e tecnica a luce strutturata fornisce il risultato che più si avvicina al corrispettivo con macchina di misura a coordinate. Mentre per quanto riguarda il template, eseguendo una media sui tre pezzi, si ha che il Medium è quello che più si avvicina al valore di riferimento. I risultati ottenuti con template Preview e Full sono uguali in modulo ma di segno differente, il primo negativo ed il secondo positivo. In particolar modo forniscono i seguenti valori di deviazione, Preview -63 μ m, Medium -42 μ m e Full 61 μ m. Osservando questi risultati si può arrivare a dire che, come ci si aspettava, utilizzando i template medium e preview la dimensione dei fori è inferiore a quella ottenuta con il template full. Questo accade in quanto con le prime due soluzioni i fori, dato che si acquisiscono col sensore meno punti in prossimità dei bordi, verranno ricostruiti con una forma più sagomata. Tale situazione non si verifica in presenza del template full in quanto vengono riconosciuti più punti sul bordo dei fori e di conseguenza la dimensione aumenta, avendo la superficie del foro più regolare.

Di seguito viene riportata la *Tabella 12-1* contenente le informazioni principali per ogni test e il miglior risultato ottenuto per ogni parametro.

Tale tabella serve per riassumere in un'unica pagina i risultati ottenuti per ogni test. Grazie ad essi si può definire la procedura di misura con sensore a luce strutturata per il Bamboo Bracket, pezzo in metallo realizzato con tecnologia ALM. La procedura ottimale è quella che più permette di avvicinarsi ai valori di riferimento ottenuti con la CMM: impostazione del template Medium, impostazioni di almeno tre esposizioni, eventuale procedura di Teach con oggetto differente dal Bamboo Bracket, allineamento tramite Contour Matching con l'utilizzo di sferette come oggetti di riferimento, posizione del pezzo ad una distanza di 42 cm dal sensore con un'inclinazione delle ottiche del secondo di 15° rispetto al primo.

Capitolo 12-Conclusioni

Tabella	12-1	Schematizzazione	dei test	effettuati	соп	caratteristiche	principali	e miglior	risultato
				otten	uto				

Prova	Fenomeno da valutare	Variabili	Scansioni effettuate	Pezzo utilizzato	STL	Features per confronto	Miglior risutato ottenuto
kugosità/Template	Interazione tra la rugosità del pezzo ed il template utilizzato	RugositàTemplate BBP2Eull BBNP1Medium BBD1Preview	Automatic Tilt -300 30 5 rotazioni per til	BBP2/BBNP1/NoName	 3 STL per ogni pezzo al variare del template, 9 preview, 9 medium, 9 full 	Fori/Planarità/Perpendicolarità	ввиР1: -2,33 µm Меdium: -42 µm
Teach	Incidenza della procedura di teach sulla misura	Oggetto Pezzo Sfera	Automatic Trilt 025 5 scansioni per tilt	2488	 3 STL oggetto estemo per teach 3 STL pezzo stesso per teach 3 STL sfere sul pezzo per teach 	Fori/Planarità/Perpendicolarità	Oggetto: -2,875 µm
Distanza Pezzo	Influenza della distanza tra pezzo e sensore mantenendo fissa la pisizione di quest'ultimo	320 mm 370 mm 420 mm	Automatic Tilt 0.25 5 scansioni per tilt	Zd88	3 STL alla distanza di 32 cm 3 STL alla distanza di 37 cm 3 STL alla distanza di 42 cm	Fori/Planarità/Perpendicolarità	Prova420: 20,71 µm
Indinazione sensore	Influenza dell'angolo di acquisizione del sensore mantenendo fissa la posizione	15° 20° 25°	Automatic Trilt 025 5 scansioni per tilt	2488	3 STL con sensore a 15° 3 STL con sensore a 20° 3 STL con sensore a 25°	Fori/Planarità/Perpendicolarità	Prova15°.10,17 μm
Allineamento	Influenza delle tre differenti procedure sulla misura finale	Contour Matching Marker Automatic	Automatic Trit O 10 scansioni per tilt	BBP2	3 STL con Contour Matching 3 STL con Marker 3 STL con Automatic	Fori/Planarità/Perpendicolarità	Contour Matching: 37,2 µm
Shutter Time	Influenza del numero di esposzioni sulla misura finale	3 esposizioni 2 esposizioni 1 esposizione	Automatic Tilt 0.25 5 scansioni per tilt	Zd88	3 STL con tre esposizioni 3 STL con due esposizioni 3 STL con un esposizione	Fori/Planarità/Perpendicolarità	Shutter3: 23,75 µm

Bibliografia

[1] Jason Geng (2011) Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. IEEE Intelligent Transportation System Society.

[2] John O. Milewski (2017) Additive Manufacturing of Metals. Springer International Publishing.

[3] Li Yang; Keng Hsu; Brian Baughman; Donald Godfrey; Francisco Medina; Mamballykalathil Menon; Soeren Wiener (2017) Additive Manufactuting of Metals: The Technology, Materials, Design and Production. Springer International Publishing.

[4] Blanco D.; Fernández P.; Cuesta E.; Mateos S.; Beltrán N. (2009) Influence of Surface Material on the Quality of Laser Triangulation Digitiezed Point Clouds for Reverse Engineering Tasks. IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation.

[5] Eduardo Cuesta; J. Carlos Rico; Pedro Fernández; David Blanco; Gonzalo Valino (2009) Influence of roughness on surface scanning by means of a laser stripe system. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.

[6] Nikola Vukašinović; Janes Možina; Joze Duhovnik (2012) Correlation between Incident Angle, Measurement Distance, Object Colour and the Number of Acquired Points at CNC Laser Scanning.

[7] S. Martínez; E. Cuesta; J. Barreiro; B. Álvarez (2010) Methodology for comparison of laser digitizing versus contact systems in dimensional control.

[8] S. Martínez; E. Cuesta; J. Barreiro; B. Álvarez (2010) Analysis of laser scanning and strategies for dimensional and geometrical control. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.

[9] Mussa Mahmud; David Joannic; Michaël Roy; Ahmed Isheil; Jean-François Fontaine (2011) 3D part inspection path planning of a laser scanner with control on the uncertainty.

[10] Catharina Badra Nawangpalupi; Hanky Fransiscus; Bagus Arthaya; Adiyoga I Putra () Paramter Identification of Scanning Quality in 3D Laser Scanner: Hardware and Light Intensity Settings.

[11] Bojan Acko; Michael McCarthy; Frank Haertig; Borut Buchmeister (2012) Standards for testing freeform measurement capability of optical and tactile coordinate measuring machines.

[12] Douglas C. Montgomery (2005) Progettazione e analisi degli esperimenti. McGraw-Hill Education.

Indice delle figure

FIGURA 1.1 CICLO DI EFFICIENZA DELLE RISORSE	1
FIGURA 1.2 RISPARMIO DI PESO CHE PUÒ ESSERE OTTENUTO RIPROGETTANDO LA STAFFA	2
FIGURA 1.3 A SINISTRA POSIZIONAMENTO DELLA STAFFA SUL FUORIBORDO, A DESTRA STAFFA PRESENTE	3
ATTUALMENTE SUI VELIVOLI	3
FIGURA 1.4 INSTALLAZIONE DELLA STAFFA SUL LONGHERONE POSTERIORE E ILLUSTRAZIONE CHE MOST	RA LA
FUNZIONE DELLA STAFFA DEL MARTINETTO PER L'AZIONAMENTO DEGLI ALETTONI	4
FIGURA 1.5 DESIGN ESISTENTE PER IL BLOCCO IDRAULICO	4
FIGURA 1.6 RIPROGETTAZIONE DEL BLOCCO IDRAULICO CON ALM	5
FIGURA 1.7 A DESTRA PANNELLO TRIANGOLARE, A SINISTRA RELATIVO POSIZIONAMENTO NELLA PARTE	3
CENTRALE DELLA FUSOLIERA	5
FIGURA 1.8 INSTALLAZIONE DELLA GIUNZIONE A T ALL'INTERNO DELLA CARENATURA	6
FIGURA 2.1 SVILUPPO STORICO CHE PORTA ALL'AFFERMAZIONE DELL'ADDITIVE MANUFACTURING	9
FIGURA 2.2 FASI PER LA REALIZZAZIONE DEL PROTOTIPO	10
FIGURA 2.3 ESEMPIO DI TRIANGOLAZIONE NON UNIFORME SU FILE STL	11
FIGURA 2.4 ERRORI COMUNI IN UN FILE STL IN SEGUITO AD UN'ESPORTAZIONE DEL FILE	11
FIGURA 2.5 FASI PER LA REALIZZAZIONE DI UN PEZZO IN ADDITIVE MANUFACTURING	12
FIGURA 2.6 UTILIZZO DI SUPPORTI PER LA REALIZZAZIONE DI UN PEZZO IN ADDITIVE MANUFACTURINO	3 13
FIGURA 2.7 DIFFERENTE ORIENTAMENTO DEL PEZZO NELLO SPAZIO NEL PROCESSO AM	13
FIGURA 2.8 RAPPRESENTAZIONE DI UN SISTEMA SLM	15
FIGURA 3.1 CLASSIFICAZIONE DEI METODI DI MISURA A DISTANZA	16
FIGURA 3.2 CONFIGURAZIONE ADOTTATA PER UNA SCANSIONE CON STRUMENTO A LUCE STRUTTURATA	<u>17 _</u>
FIGURA 3.3 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DELLA LUCE STRUTTURATA	18
FIGURA~3.4~RAPPRESENTAZIONE~DI~UN~SISTEMA~A~LUCE~STRUTTURATA~CON~DUE~TELECAMERE~E~UN~PROI	ETTORE
	19
FIGURA 3.5 CLASSIFICAZIONE DELLE VARIE TECNICHE A LUCE STRUTTURATA	20
FIGURA 3.6 SEQUENZA DI PATTERN CON CODIFICA BINARIA PER ACQUISIZIONE DI IMMAGINI 3D	21
FIGURA 3.7 CODIFICA GRAY	21
FIGURA 3.8 SEQUENZA DI PATTERN CON CODIFICA A LIVELLI DI GRIGIO PER ACQUISIZIONE DI IMMAGINI	3D 22
FIGURA 3.9 ESEMPIO DI SET DI PATTERN SINUSOIDALI	23
$Figura \ 3.10 \ \text{Calcolo} \ \text{della} \ \text{profondit} \\ \textbf{\lambda} \ \textbf{Z} \ \textbf{in} \ \text{base al valore} \ \text{della} \ \text{fase per pattern sinusoida}$	LI _24
FIGURA 3.11 COMBINAZIONE DELLA CODIFICA A LIVELLI DI GRIGIO E TECNICA DELLO SFASAMENTO	24
FIGURA 4.1 MODELLO CAD DEL BAMBOO BRACKET	25
FIGURA 4.2 RAPPRESENTAZIONE DI UN POSSIBILE UTILIZZO DEL BAMBOO BRACKET	26
FIGURA 4.3 SCHEMATIZZAZIONE CHE SERVE A MOSTRARE IL COMPORTAMENTO A FATICA	27
FIGURA 4.4 DEFINIZIONE DELLE TOLLERANZE DEL BAMBOO BRACKET IN RIFERIMENTO ALLA PRIMA IPOT	ΓESI 28
FIGURA 4.5 TAVOLA COMPLETA DEL BAMBOO BRACKET REALIZZATA DA HEXAGON MANUFACTURING	
	29
FIGURA 4.6 CAMPIONI DI PROVA APPARTENENTI AL GRUPPO B (STAFFA SULLA SINISTRA) E AL GRUPPO A	•
(ALTRE TRE STAFFE)	31
FIGURA 4.7 CAMPIONI DI PROVA APPARTENENTE AL GRUPPO C	31
FIGURA 4.8 CAMPIONI DI PROVA APPARTENENTI AL GRUPPO D	31
FIGURA 4.9 CREPA INDOTTA NELLA STRUTTURA DI SUPPORTO SU UNO DEI PEZZI APPARTENENTI AL GRUI	PPOC 22
EXAMPLE A 10 SCANCIONE DELLE CEDUTEURE DI CURROPEO CON CENICORE A LUCE CEDUTEURATA	52
FIGURA 4.10 SCANSIONE DELLE STRUTTURE DI SUPPORTO CON SENSORE A LUCE STRUTTURATA	32
FIGURA 5.1 SCHEMATIZZAZIONE DEL PROCESSO DI DETERMINAZIONE DELLA RUGOSTIA SUPERFICIALE _	33
FIGURA 5.2 NAPPRESENTAZIONE DELLA LIDIEA MEDIA DI DIFEDI (ENITO DED IL CALCOLO DELLA DIJCOLT)	34 25
FIGURA 5.5 DETERMINAZIONE DELLA LINEA MEDIA DI RIFERIMENTO PER IL CALCOLO DELLA RUGOSITA	35
FIGURA 5.4 VALORI HIYOI DI KUGOSHA PER DIVERSE HIYOLOGIE DI LAVORAZIONE	30
FIGURA 5.5 OCHEMIATIZZAZIONE DI UN KUGOSIWIETKO A CONTATTO CON LA SUPEKFICIE	3t
FIGURA 5.0 DIFFERENZA DELLA MISUKA DUVUTA ALL USUKA DELLO STILU	3/ ວດ
FIGURA 5.7 NELAZIONE IKA DIMENSIONE DELLA SFEKA E DELLA SCANALA IUKA	აზ აი
FIGURA 5.6 FILMED CALINIA CU DEZZENI À DDITRE MANUEA CTUDINA	ວະ ວາ
FIGURA 5.5 LITETIO SCALINO SU LEZZI IN ADDITIVE IVIANUFACTUKING	ود ۱۷
FIGURA 5.10 LITETIO SCALINO SU LEZZI ANVI OTTENUTI CON DIVERSI PROCESSI	4040404040
FIGURA 5.11 DENSITA RELATIVA OTTENIDILE CON DIFFERENTI FORME DI POLVERE	4141
I NURA J.12 I LJA RUGUJERI IVU	42

FIGURA 5.13 STAFFAGGIO DEL PEZZO PER LA MISURA DI RUGOSITÀ	43
FIGURA 5.14 ZONE ANALIZZATE SULLE DUE SUPERFICI PER IL CALCOLO DELLA RUGOSITÀ	44
FIGURA 6.1 MACCHINA DI MISURA A COORDINATE CON DESCRIZIONE DEGLI ELEMENTI PRINCIPALI	47
FIGURA 6.2 DIFFERENTI TIPOLOGIE DI MACCHINE DI MISURA A COORDINATE	48
FIGURA 6.3 STRUTTURA DEL TASTATORE	49
FIGURA 6.4 QUALIFICA DEL TASTATORE	50
FIGURA 6.5 COMPENSAZIONE DEL RAGGIO SU CMM	50
FIGURA 6.6 CMM-GLOBAL ADVANTAGE CON SENSORE TATTILE	51
FIGURA 6.7 CARATTERISTICHE DELLA CMM USATA DURANTE IL TEST: GLOBAL ADVANTAGE CON SENS	ORE DI
SCANSIONE TATTILE EQUIVALENTE AL HP-S-X1, INTERVALLO DI TEMPERATURA $18{\div}22^\circ ext{C}$	51
FIGURA 6.8 DESCRIZIONE DEI NOMI DATI ALLE CARATTERISTICHE DEL BAMBOO BRACKET	52
FIGURA 6.9 SISTEMA DI FISSAGGIO PER LA MISURA TATTILE	52
FIGURA 6.10 CONFIGURAZIONE ADOTTATA PER LA SONDA TATTILE	53
FIGURA 6.11 VALORI DEL RANGE PER I DIFFERENTI BAMBOO BRACKET	56
FIGURA 6.12 VALORI MEDI DEI DIAMETRI PER I DIFFERENTI BAMBOO BRACKET	56
Figura 6.13 valori medi di perpendicolarità e planarità per i differenti Bamboo Bracket $_$	57
FIGURA 7.1 PRIMESCAN: SENSORE A LUCE STRUTTURATA	59
FIGURA 7.2 TREPPIEDE TRE SEZIONI CON CREMAGLIERA	61
FIGURA 7.3 TESTA SNODATA A TRE ASSI	62
FIGURA 7.4 TAVOLA ROTANTE MOTORIZZATA	63
FIGURA 7.5 ARTEFATTO REALIZZATO NELL'ARTICOLO [11] PER VALUTARE L'INFLUENZA DELLA	
CONFORMAZIONE SULLA MISURA	67
FIGURA 8.1 MODELLO GENERALE DI UN PROCESSO	69
FIGURA 8.2 ESPERIMENTO FATTORIALE A DUE FATTORI, LA RISPOSTA Y È INDICATA AI VERTICI	72
FIGURA 8.3 ESPERIMENTO FATTORIALE CON INTERAZIONE	73
FIGURA 8.4 KAPPRESENTAZIONE GRAFICA DI UN ESPERIMENTO SENZA INTERAZIONE E SENZA EFFETTO I	
SINGOLI FATIOKI SULLA RISPOSTA	/4 1
SINCOLLEATTORI CHILLA RISPORTA	1 7/
FIGURA 8.6 RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DI UN ESPERIMENTO CON INTERAZIONE E EFFETTO DEI SINGO	/4
FATTORI SUI LA RISPOSTA	74
FIGURA 8.7 REGIONE DI ACCETTAZIONE E DI RIFILITO PER LA DISTRIBUZIONE F	79
FIGURA 9.1 DIFFERENTI DIMENSIONI DELLA TAVOLA DI CALIBRAZIONE PER VARI CAMPI DI MISURA	80
FIGURA 9.2 CORRETTO POSIZIONAMENTO DEL SENSORE RISPETTO ALLA TAVOLA DI CALIBRAZIONE	81
FIGURA 9.3 FOGLIO DI CALIBRAZIONE CON RAPPRESENTATE LE NOVE POSIZIONI STANDARD	82
FIGURA 10.1 FINESTRE DI VISUALIZZAZIONE PRIMA E DOPO DEL PRE-ALLINEAMENTO IN MODALITÀ COM	NTOUR
MATCHING	84
FIGURA 10.2 EFFETTO DELL'ALLINEAMENTO DI FINITURA, PRIMA (A) E DOPO (B).	84
FIGURA 10.3 FISSAGGIO DEL PEZZO PER TEST ALLINEAMENTO, CONFIGURAZIONE CHE PERMETTE ALLE	SFERE
DI ESSERE PIÙ VISIBILI DURANTE LE VARIE SCANSIONI	87
FIGURA 10.4 CONFIGURAZIONE FINALE PER L'ANALISI DELLA PROCEDURA CONTOUR MATCHING PER T	EST
ALLINEAMENTO	88
FIGURA 10.5 ERRORE SULL'ALLINEAMENTO DURANTE LA PROCEDURA CONTOUR MATCHING	88
FIGURA 10.6 CONFIGURAZIONE ADOTTATA PER LA PROCEDURA DI MISURA MARKER PER TEST	00
ALLINEAMENTO	89
FIGURA 10.7 FISSAGGIO FRONTALE DEL DAMBOO DRACKET SULLA TAVOLA ROTANTE PER TEST TEACH	91
FIGURA 10.0 FISSAGGIO LATERALE DEL DAMBOO DRACKET SULLA TAVOLA RUTANTE PER TEST TEACH	91
FIGURA 10.9 OGGETTO UTILIZZATO INIZIALMENTE PER LA PROCEDURA DI TEACH	92
FIGURA 10.10 OGGETTO AUSILIARIO UTILIZZATO PER LA PROCEDURA DI TEACH	93
FIGURA 10.11 OGGETTO AUSILIARIO IDEALE PER LA PROCEDURA DI TEACH	94
FIGURA 10.12 CONFIGURAZIONE DI FUNZIONAMENTO PER IL LEST INCLINAZIONE SENSORE	90
ESPOSIZIONI (A) 1 ESPOSIZIONE (B) 2 ESPOSIZIONI (C) 3 ESPOSIZIONI	qq
FIGURA 10.14 DIFFERENZA A LIVELLO DI PUNTI ACQUISITI E QUALITÀ DI SCANSIONE DELL'OGGETTO BB	P2 AL
VARIARE DEL TEMPLATE UTILIZZATO: (A) PREVIEW (B) MEDIUM (C) FULL	102
FIGURA 11.1 ANALISI GRAFICA DEI RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE NOMINALE PER IL TEST	
Allineamento	106
FIGURA 11.2 ANALISI GRAFICA DEI RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE DI RIFERIMENTO PER IL	ΓEST
Allineamento	109

FIGURA 11.3 ANALISI GRAFICA DELLA MEDIA DEI RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE DI RIFERIN	MENTO
PER IL TEST ALLINEAMENTO	110
FIGURA 11.4 ANALISI GRAFICA DEI RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE NOMINALE PER IL TEST	
ТЕАСН	114
Figura 11.5 Analisi grafica dei residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per il 7	Геst
ТЕАСН	116
Figura 11.6 Analisi grafica della media dei residui dei diametri rispetto al valore di riferin	MENTO
PER IL TEST TEACH	117
FIGURA 11.7 ANALISI GRAFICA DEI RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE NOMINALE PER IL TEST	
POSIZIONE PEZZO	121
FIGURA 11.8 ANALISI GRAFICA DEI RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE DI RIFERIMENTO PER IL \mathbb{T}	Γest
POSIZIONE PEZZO	123
FIGURA 11.9 ANALISI GRAFICA DELLA MEDIA DEI RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE DI RIFERIM	MENTO
PER IL TEST POSIZIONE PEZZO	124
Figura 11.10 Analisi grafica dei residui dei diametri rispetto al valore nominale per il Test	ſ
Inclinazione Sensore	128
FIGURA 11.11 ANALISI GRAFICA DEI RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE DI RIFERIMENTO PER IL	. Test
Inclinazione Sensore	130
Figura 11.12 Analisi grafica della media dei residui dei diametri rispetto al valore di	
RIFERIMENTO PER IL TEST INCLINAZIONE SENSORE	131
Figura 11.13 Analisi grafica dei residui dei diametri rispetto al valore nominale per il Test	ſ
Shutter Time	135
Figura 11.14 Analisi grafica dei residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per il	TEST
Shutter Time	137
Figura 11.15 Analisi grafica della media dei residui dei diametri rispetto al valore di	
RIFERIMENTO PER IL TEST SHUTTER TIME	138
Figura 11.16 Analisi grafica dei residui dei diametri rispetto al valore nominale per il Test	ſ
RUGOSITÀ/TEMPLATE	144
Figura 11.17 Analisi grafica dei residui dei diametri rispetto al valore di riferimento per il	TEST
RUGOSITÀ/TEMPLATE	149
Figura 11.18 Analisi grafica della media dei residui dei diametri rispetto al valore di	
RIFERIMENTO PER IL TEST RUGOSITÀ / TEMPLATE	149

Indice delle tabelle

TABELLA 4-1 DEFINIZIONE GRUPPI DEL CAMPIONE DI PROVA	30
TABELLA 5-1 RELAZIONE TRA LA LUNGHEZZA DI BASE E LA RUGOSITÀ ATTESA	34
TABELLA 5-2 CARATTERISTICHE PRINCIPALI RUGOSERF 10G	43
TABELLA 5-3 RISULTATI DI RUGOSITÀ OTTENUTI PER LA SUPERFICIE1	45
TABELLA 5-4 RISULTATI DI RUGOSITÀ OTTENUTI PER LA SUPERFICIE2	45
TABELLA 5-5 RISULTATI DI RUGOSITÀ OTTENUTI PER I BRACCETTI	46
TABELLA 5-6 VALORI MEDI DI RUGOSITÀ PER I TRE DIFFERENTI BAMBOO BRACKET	46
TABELLA 6-1 RISULTATI DELLE MISURE IN TERMINI DI MEDIA E RANGE SU TRE RIPETIZIONI PER TRE DIFFER	ENTI
BAMBOO BRACKET	55
TABELLA 7-1 CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEL SENSORE PRIMESCAN	60
TABELLA 7-2 CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEL CAMPO DI VISTA DEL SENSORE PRIMESCAN	60
TABELLA 7-3 SPECIFICHE TECNICHE TREPPIEDE	61
TABELLA 7-4 Specifiche tecniche testa snodata	62
TABELLA 7-5 SPECIFICHE TECNICHE TAVOLA ROTANTE	63
TABELLA 8-1 ESEMPIO DI UN PIANO FATTORIALE A DUE FATTORI	75
TABELLA 8-2 ANOVA: CALCOLO DEI GRADI DI LIBERTÀ	78
TABELLA 8-3 TABELLA ANOVA PER FATTORIALE A DUE FATTORI	78
TABELLA 10-1 LEGAME TRA CAMPO DI VISTA E DIAMETRO DEI MARKER IN MODALITÀ MARKER 10 2 Desemble de la composition de la compositinter de la composition de la composition de la composi	85
I ABELLA 10-2 DISTANZA E RELATIVO SHUTTER TIME UTILIZZATI IN FASE DI PREPARAZIONE AL I EST	
POSIZIONE PEZZO	95
I ABELLA 10-3 ANGOLI E SHUTTER TIME UTILIZZATI DURANTE IL I EST INCLINAZIONE SENSORE	97
I ABELLA 10-4 ESPOSIZIONI E SHUTTER I IME UTILIZZATI NEL I EST NUMERO DI ESPOSIZIONI	98
TABELLA 10-5 BAMBOO BRACKET UTILIZZATI PER IL TEST KUGOSITA/ TEMPLATE	_100
TABELLA 11-1 KISULTATI TEST ALLINEAMENTO Tabella 11-2 Residui di anadità e deddendicol adità disdetto al valore nominale ded Test	_104
A LENE AMENTO	104
TABELLA 11-3 RESIDUE DE DIAMETRI RISPETTO AL VALORE NOMINALE PER TEST ALLINEAMENTO	_104 105
TABELLA 11-9 RESIDUI DEI DIAMETRI RISI ETTO AL VALORE NOMINALET ER TEST ALLINEAMENTO	_105 T
ALLINEAMENTO	105
TABELLA 11-5 VALORI DI RIFERIMENTO PER IL PEZZO BBP2 OTTENUTI CON LA CMM	107
TABELLA 11-6 RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE DI RIFERIMENTO PER TEST ALLINEAMENTO	108
Tabella 11-7 Residui di planarità e perpendicolarità rispetto al valore di riferimento per \overline{Ti}	EST
Allineamento	108
TABELLA 11-8 ANOV $\overline{ m A}$ due fattori su residui dei diametri rispetto al valore di riferimento pe	R
TEST ALLINEAMENTO	_109
TABELLA 11-9 ANOVA A UN FATTORE SU RESIDUI DELLA PLANARITÀ1 PER TEST ALLINEAMENTO	_110
TABELLA 11-10 ANOVA A UN FATTORE SU RESIDUI DELLA PLANARITÀ2 PER TEST ALLINEAMENTO	_111
TABELLA 11-11 ANOVA A UN FATTORE SU RESIDUI DELLA PERPENDICOLARITÀ PER TEST ALLINEAMENT	O
	_111
TABELLA 11-12 RISULTATI TEST TEACH	_112
I ABELLA 11-13 KESIDUI DI PLANARITA E PERPENDICOLARITA RISPETIO AL VALORE NOMINALE PER I EST	
	_112
TABELLA 11-14 KESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE NOMINALE PER TEST TEACH	_113
TABELLA 11-15 AINOVA A DUE FATTORI SU RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE NOMINALE PER	1451
IEACH	_115 115
TABELLA 11-10 RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE DI RIFERIMENTO PER TEST TEACH	_ттэ Гест
ΤΑβΕΕΕΑ ΤΙ Τ΄ ΚΕΜΟΤΟΤΙ ΕΛΙΜΑΚΤΑ ΕΤΕΚΙ ΕΝΟΓΟΘΕΑΚΤΑ ΚΟΓΕΤΙΟ ΑΕ ΥΛΕΟΚΕ ΟΙ ΚΤΕΚΙΜΕΝΤΟΤΕΚΙ ΤΕΛ.CH	115
TABELLA 11-18 ANOVA A DUE FATTORI SU RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE DI RIFERIMENTO	 PER
Теят Теасн	116
TABELLA 11-19 ANOVA A UN FATTORE SU RESIDUI DELLA PLANARITÀ1 PER TEST TEACH	117
TABELLA 11-20 ANOVA A UN FATTORE SU RESIDUI DELLA PLANARITÀ2 PER TEST TEACH	 118
TABELLA 11-21 ANOVA A UN FATTORE SU RESIDUI DELLA PERPENDICOLARITÀ PER TEST TFACH	118
TABELLA 11-22 RISULTATI TEST POSIZIONE PEZZO	119
TABELLA 11-23 RESIDUI DI PLANARITÀ E PERPENDICOLARITÀ RISPETTO AL VALORE NOMINALE PER TEST	
POSIZIONE PEZZO	119

TABELLA 11-24 RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE NOMINALE PER TEST POSIZIONE PEZZO	120
TABELLA 11-25 ANOVA DUE FATTORI SU RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE NOMINALE PER T	EST
POSIZIONE PEZZO	120
TABELLA 11-26 RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE DI RIFERIMENTO PER TEST POSIZIONE PEZZO)_ 122
TABELLA 11-27 RESIDUI DI PLANARITÀ E PERPENDICOLARITÀ RISPETTO AL VALORE DI RIFERIMENTO PER	TEST
POSIZIONE PEZZO	122
TABELLA 11-28 ANOVA DUE FATTORI SU RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE DI RIFERIMENTO F	PER
TEST POSIZIONE PEZZO	123
TABELLA 11-29 ANOVA a un fattore su residui della Planarità1 per Test Posizione Pezzo	124
TABELLA 11-30 ANOVA A UN FATTORE SU RESIDUI DELLA PLANARITÀ2 PER TEST POSIZIONE PEZZO	125
TABELLA 11-31 ANOVA A UN FATTORE SU RESIDUI DELLA PERPENDICOLARITA PER TEST POSIZIONE PE	ZZO
	125
I ABELLA 11-32 KISULTATI I EST INCLINAZIONE SENSORE	126
I ABELLA 11-55 KESIDUI DI PLANAKITA E PERFENDICOLARITA RISPETTO AL VALORE NOMINALE PER TEST INCLUME CENTROPE	100
INCLINAZIONE DENSOKE	120
TABELLA 11-34 KESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE NOMINALE PER TEST INCLINAZIONE SENSO TABELLA 11-35 A NOVA due eattori cu recidul dei diametri dispetto al valore nominale ded T	KE LZ /
I ADELLA 11-55 AINO VA DUE FAITORI 50 RESIDUI DEI DIAMETRI RISI ETTO AL VALORE NOMINALETER T INCLINIA ZIONE SENCODE	127
TABELLA 11-36 RESIDUE DEL DIAMETRI RISPETTO AL VALORE DI RIEFRIMENTO PER TEST INCLINAZIONE	12/
Sensore	120
TABELLA 11-37 RESIDI II DI PLANARITÀ E PERPENDICOLARITÀ RISPETTO AL VALORE DI RIFERIMENTO PER	TEST
Inclination sensore	1201
TABELLA 11-38 ANOVA DUE FATTORI SU RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE DI RIFERIMENTO F	PER
TEST INCLINAZIONE SENSORE	130
TABELLA 11-39 ANOVA A UN FATTORE SU RESIDUI DELLA PLANARITÀ1 PER TEST INCLINAZIONE SENSO	JRE
	131
TABELLA 11-40 ANOVA A UN FATTORE SU RESIDUI DELLA PLANARITÀ2 PER TEST INCLINAZIONE SENSO	ORE
	132
TABELLA 11-41 ANOVA A UN FATTORE SU RESIDUI DELLA PERPENDICOLARITÀ PER TEST INCLINAZION	E
Sensore	132
TABELLA 11-42 RISULTATI TEST SHUTTER TIME	133
TABELLA 11-43 RESIDUI DI PLANARITÀ E PERPENDICOLARITÀ RISPETTO AL VALORE NOMINALE PER TEST	
Shutter Time	133
TABELLA 11-44 RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE NOMINALE PER TEST SHUTTER TIME	134
TABELLA 11-45 ANOVA A DUE FATTORI SU RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE NOMINALE PER	TEST
Shutter Time	134
TABELLA 11-46 RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE DI RIFERIMENTO PER TEST SHUTTER TIME	136
TABELLA 11-47 RESIDUI DI PLANARITÀ E PERPENDICOLARITÀ RISPETTO AL VALORE DI RIFERIMENTO PER	TEST
Shutter Time	136
TABELLA 11-48 ANOVA A DUE FATTORI SU RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE DI RIFERIMENTO) PER
Test Shutter Time	137
TABELLA 11-49 ANOVA A UN FATTORE SU RESIDUI DELLA PLANARITÀ1 PER TEST SHUTTER TIME	138
TABELLA 11-50 ANOVA A UN FATTORE SU RESIDUI DELLA PLANARITÀ2 PER TEST SHUTTER TIME	139
TABELLA 11-51 ANOVA a un fattore su residui della Perpendicolarità per Test Shutter Tim	ie 139
TABELLA 11-52 RISULTATI TEST RUGOSITÀ / TEMPLATE PEZZO BBP2	140
TABELLA 11-53 RISULTATI TEST RUGOSITÀ / TEMPLATE PEZZO BBNP1	140
TABELLA 11-54 RISULTATI TEST RUGOSITÀ / TEMPLATE PEZZO BBD1	141
TABELLA 11-55 RESIDUI DI PLANARITÀ E PERPENDICOLARITÀ RISPETTO AL VALORE NOMINALE PER TEST	
RUGOSITÀ/TEMPLATE	141
TABELLA 11-56 RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE NOMINALE PER TEST RUGOSITÀ/TEMPLATE	
TABELLA 11-57 ANOVA A TRE FATTORI SU RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE NOMINALE PER	TEST
RUGOSITÀ/TEMPLATE	143
TABELLA 11-58 VALORI DI RIFERIMENTO PER I PEZZI BBP2, BBNP1 E BBD1 OTTENUTI CON CMM	145
TABELLA 11-59 RESIDUI DI PLANARITÀ E PERPENDICOLARITÀ RISPETTO AL VALORE DI RIFERIMENTO PER	TEST
RUGOSITÀ/TEMPLATE	146
TABELLA 11-60 RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE DI RIFERIMENTO PER TEST RUGOSITÀ/TEMI	PLATE
	146
I ABELLA 11-61 ANOVA A TRE FATTORI SU RESIDUI DEI DIAMETRI RISPETTO AL VALORE DI RIFERIEMENT	O PER
TEST KUGOSITA / TEMPLATE	148
1 ABELLA 11-62 ANOVA A DUE FATTORI SU RESIDUI DELLA PLANARITA 1 PER TEST RUGOSITÀ / TEMPLA	TE 150
TABELLA 11-63 ANOVA A DUE FATTORI SU RESIDUI DELLA PLANARITÀ2 PER TEST RUGOSITÀ/TEMPLA	TE 150

TABELLA 11-64 ANOVA A DUE FATTORI SU RESIDUI DELLA PERPENDICOLARITÀ PER TEST	
Rugosità/Template	_150
TABELLA 12-1 S CHEMATIZZAZIONE DEI TEST EFFETTUATI CON CARATTERISTICHE PRINCIPALI E MIGLIOR	
RISULTATO OTTENUTO	_155

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare

L'Hexagon Manufacturing Intelligence di Grugliasco che mi ha permesso di svolgere questo lavoro di tesi, imparando a lavorare di squadra in modo professionale. Un particolare ringraziamento va ai colleghi che ho incontrato durante questo percorso aziendale, Alyssa, Michael, Luca e Giuseppe, per la loro collaborazione e i Tutor Aziendali Emanuele e Suela, per la disponibilità e le opportunità datemi nel condurre al meglio il mio lavoro all'interno dell'azienda.

I miei amici, vicini e lontani, con i quali ci siamo sempre sostenuti a vicenda sia durante le fatiche e lo sconforto del nostro percorso che nei momenti di soddisfazione al raggiungimento di ogni traguardo.

La mia famiglia, punto di riferimento e di forza da quando sono al mondo.

Infine, non per ordine di importanza, i miei genitori e mio fratello per avermi sempre sostenuto e per avermi permesso di percorrere e concludere questo cammino. Grazie per essere stati il mio sostegno e la mia guida.