



**Politecnico  
di Torino**

**Politecnico di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica  
A.a. 2025/2026  
Sessione di Laurea Marzo 2026

**Studio della sensibilità degli errori di  
misura dei Sistemi di Misura a Coordinate  
alle caratteristiche geometriche delle  
superfici**

Relatori:

Prof. Gianfranco Genta  
Dott. Giacomo Maculotti

Candidata:

Aurora Izzo 331679

# Indice

Indice.....	2
Abstract.....	6
1. Perché si misurano le superfici degli oggetti per identificare le loro geometrie?..	7
1.1. Profilo di una superficie.....	7
1.2. Topografia di un'area della superficie.....	7
1.3. Storia breve dei parametri areali.....	8
1.3.1. Condizioni filtro.....	8
1.3.2 Area campione.....	8
1.3.3. Altezze centrate.....	8
1.4. Parametri statistici.....	9
1.4.1. Superficie primaria.....	9
1.4.2. S-F superficie.....	9
1.4.3. Sq.....	9
1.4.4. Ssk.....	9
1.4.5. Sz.....	9
1.4.6. Sa.....	9
2. Sistemi di Misura a Coordinate (CMS) e Macchine di Misura a Coordinate (CMM).....	10
2.1. Sistemi di Misura a Coordinate (CMS).....	10
2.1.1. CMS ottica tridimensionale.....	10
2.1.2. I sensori del volume di misura.....	10
2.1.3. La registrazione.....	10
2.1.4. La fusione.....	10
2.1.5. La distorsione dell'errore.....	11
2.1.6. Condizioni ambientali.....	11
2.1.7. Pre-processing.....	11
2.1.8. Caratteristiche di distorsione.....	11
2.1.9. La derivazione dei risultati del test.....	12
2.2. Macchine di Misura a Coordinate (CMM).....	12
2.2.1. Condizioni operative.....	12
2.2.2. Ambiente per effettuare le misure.....	12

3. Come si misurano le tolleranze? .....	14
3.1. Come si misura l'incertezza in una Macchina di Misura a Coordinate .....	14
3.1.1. Caratteristiche metrologiche .....	14
3.1.2. La scelta delle caratteristiche metrologiche .....	15
3.1.3. Errori geometrici della macchina e movimento degli errori residui .....	15
3.1.4. Taratura delle caratteristiche metrologiche.....	15
3.1.5. L'incertezza specifica della task .....	15
3.1.6. Tecnica per determinare i componenti di incertezza di misura della specifica task.....	16
3.1.7. L'analisi della sensibilità .....	16
3.1.8. L'impiego di pezzi di lavoro standard o normative (ISO 15530-3) .....	16
3.1.9. L'impiego di simulazioni al computer (ISO/TS 15530-4).....	17
3.1.10. Principio di valutazione dell'incertezza adoperando pezzi tarati.....	18
3.1.11. Procedura .....	18
3.1.12. Esecuzione .....	18
3.1.13. Valutazione dell'incertezza .....	18
3.1.14. Controllo intermedio dell'incertezza di misura .....	19
3.2. Come si misurano gli errori in un Sistema di Misura a Coordinate.....	20
3.2.1 Le caratteristiche di distorsione .....	20
3.2.2. Errore di distorsione a vista singola .....	20
3.2.3. Errore di distorsione a vista multipla.....	20
3.2.4. Caratteristiche della sonda .....	20
3.2.5. Errore di distorsione della forma piana .....	21
3.2.6. L'errore di misura della lunghezza del volume in un volume concatenato di misura.....	21
4. Studio specifico degli errori sistematici.....	22
4.1. <i>Tecniche di confronto basate su ball-plate</i> .....	22
4.1.1. Determinazione delle tecniche comparative .....	22
4.1.2. Schema di confronto.....	23
4.2. <i>Impiego di scanner ottici tridimensionali per l'ispezione di geometrie complesse</i> .....	24
4.2.1. Applicazioni di uno scanner tridimensionale.....	25
4.2.2 Valutazione sperimentale dell'incertezza.....	26

4.2.3. Il problema dello strato di polvere opacizzante sulle parti scansionate	27
4.2.4. Scansione della sfera .....	27
4.3. <i>Standard per testare la capacità di misura di un oggetto con forma libera</i> .....	27
4.3.1. Standard e procedure esistenti documentate dello Stato dell'Arte .....	28
4.3.2. Progettazione dell'artefatto .....	30
4.3.3. Incertezza di misura .....	30
4.3.4. Artefatto a forma libera .....	30
4.3.5. Misura e taratura della superficie dell'artefatto .....	30
4.4. L'impiego di blocchi di riscontro per la valutazione di scanner ottici 3D .....	31
4.5. <i>Valutazione dell'incertezza di una nuvola di punti tridimensionale</i> .....	32
4.6. <i>Valutazione dell'idoneità della catena di processo dei Sistemi di Misura tridimensionali</i> .....	37
5. Metodologia.....	43
5.1. Artefatti.....	43
5.2. Strumenti di Misura .....	43
5.2.1. Macchina di Misura a Coordinate (CMM) .....	43
5.2.2. Microscopio Topografico .....	44
5.2.3. Sistemi di Misura a Coordinate (CMS) .....	44
6. Risultati .....	46
7. Conclusione .....	53
8. Appendice .....	54
Appendice 1.....	54
Appendice 2.....	55
Appendice 3.....	56
Appendice 4.....	57
Appendice 5.....	58
Appendice 6.....	61
Appendice 7.....	62
Appendice 8.....	63
Appendice 9.....	64
Appendice 10.....	68
Appendice 11.....	69
Appendice 12.....	71

Appendice 13.....	72
Appendice 14.....	73
Appendice 15.....	74
Appendice 16.....	77
Appendice 17.....	80
Appendice 18.....	81
Appendice 19.....	83
Appendice 20.....	87
Appendice 21.....	91
9. Riferimenti .....	95

# Abstract

La presente tesi si colloca all'interno del progetto Europeo DI-VISION, volto allo sviluppo di riferibilità metrologica per metodi di visione artificiale. La caratterizzazione di superfici tridimensionali è necessaria a qualificare la forma e la topografia dei componenti. I Sistemi di Misura a Coordinate (Coordinate Measuring Systems, *CMS*) permettono di acquisire nuvole di punti dense velocemente, offrendo un ottimo bilanciamento tra performance e costo rispetto alle tradizionali Macchine di Misura a Coordinate (Coordinate Measuring Machine, *CMM*). I principali errori di misura sono descritti dallo standard ISO 10360-13. Tuttavia, i *CMS* sono basati su sistemi di visione e pertanto altamente influenzati dalla cooperatività della superficie. La tesi si occupa di studiare la sensibilità dei principali errori di misura a tipiche caratteristiche funzionali, quali la finitura superficiale, la curvatura e la direzionalità della stessa. La tesi è stata svolta nel laboratorio Mind4Lab del DIGEP effettuando misure sperimentali su componenti reali piani e con geometria prismatica. L'attività sperimentale è stata finalizzata a tarare gli artefatti con una *CMM* e poi misurare in diverse condizioni i medesimi artefatti con un *CMS*.

# 1. Perché si misurano le superfici degli oggetti per identificare le loro geometrie?

La superficie è definita come “*feature*” del componente e, di solito, alcune sue caratteristiche vengono tenute sotto controllo. La topografia della superficie e il materiale di cui è composta possono influenzare il comportamento di diversi componenti a contatto, come, ad esempio, il comportamento di un fluido a contatto con il pezzo o quanto attrito è presente tra la pista dei cuscinetti e la sua sede. Per questo motivo controllare e misurare le superfici dei componenti diventa maggiormente necessario spostandosi a grandezze minori.

La topografia delle superfici è definita come l’insieme delle scale geometriche superficiali del pezzo. La forma della superficie sottolinea la forma del pezzo, ad esempio cilindrico, sferico etc. mentre la *texture* della superficie è ciò che rimane quando si toglie la forma del componente. Il modo in cui la superficie influenza la funzionalità del pezzo dipende, anche, dalle caratteristiche del materiale e dall’integrità della superficie [1].

La caratterizzazione della topografia delle superfici è un complesso ramo della metrologia con un grande range di parametri da poter considerare.

Nel passato, la caratterizzazione del profilo di una superficie è stata una tecnica standard per la definizione di una superficie. Recentemente la caratterizzazione dell’area sta diventando il metodo da standardizzare.

Dopo alcuni importanti lavori la normativa *ISO* ha iniziato a lavorare sulla standardizzazione della *texture* delle aree superficiali. I parametri di questo metodo sono stati introdotti recentemente e per questo motivo sono limitati nel loro uso.

## 1.1. Profilo di una superficie

Il profilo della superficie è un metodo standard largamente utilizzato negli anni passati per identificare la superficie di un oggetto. Le misure vengono acquisite misurando una linea attraverso la superficie e rappresentandola come una funzione in altezza con uno spostamento laterale, attraverso equazioni matematiche. Questa misura veniva eseguita con uno stilo che attraversava l’intera superficie. In alternativa, si può utilizzare uno strumento ottico areale dove viene estratto il profilo da un software dopo aver misurato un’area della superficie [1].

La misura con uno stilo è influenzata dalla direzione della misura, che viene determinata dalla normativa *ISO 4287:2000*, indicando la direzione del pattern predominante della superficie, di solito derivante dal processo di produzione del componente.

Questo metodo è ancora utilizzato in particolare per controlli di processo e di qualità all’interno delle industrie perché è relativamente semplice da implementare.

## 1.2. Topografia di un’area della superficie

L’analisi topografica di un’area della superficie fornisce maggiori informazioni rispetto alla misura del profilo della stessa. In aggiunta, negli ultimi anni sono stati introdotti dei parametri ben definiti per controllare criticamente la funzionalità della superficie, per questo motivo l’uso dello stilo per conoscere il cambiamento nel processo produttivo del componente non è più utile. Inoltre, le misure

areali vengono utilizzate per determinare problemi diagnostici e per prevedere il funzionamento del componente [1].

In ultimo una misura areale ha un significato statistico maggiormente rilevante rispetto alla misura equivalente del profilo perché riesce ad acquisire un maggiore numero di punti e una mappa areale della superficie è una rappresentazione più veritiera della “superficie reale”.

## 1.3. Storia breve dei parametri areali

I primi parametri areali erano delle semplici estrapolazioni dei parametri di profilo.

Secondo la normativa *ISO 25178-2* che dichiara che i simboli devono contenere solo una lettera e un opzionale pedice. Il prefisso maggiormente utilizzato è *S*, ad esempio *Sa*, *Sq*, in alternativa si usano i parametri di volume che iniziano con la lettera *V*.

### 1.3.1. Condizioni filtro

I parametri di profilo vengono identificati tramite la tipologia del profilo della superficie, ad esempio *R* parametri sono calcolati sulla rugosità del profilo, *W* parametri sono calcolati sulla ondulazione del profilo, mentre *P* parametri sono calcolati sul profilo primario. La tipologia della superficie non viene considerata utilizzando i parametri areali, per questo motivo il parametro *Sa* può essere calcolato sulla superficie primaria o sulla superficie filtrata e in ogni caso il parametro sarà sempre indicato con *Sa*, per questo motivo è importante fornire le condizioni filtro insieme ai valori dei parametri.

### 1.3.2 Area campione

I parametri di profilo sono definiti sulla base di una lunghezza campione o su una lunghezza calcolata. Se un parametro è definito su una lunghezza campione, per default è calcolato per ogni lunghezza campione insieme al valore medio, come stabilito dalla normativa *ISO 4288:1996*. Con i parametri areali il default è un'area campione per area di valutazione. Ciò porta al calcolo dei parametri sull'intera area campione e non si suddivide quest'ultima in sotto aree dipendenti dalla lunghezza campione. Inoltre, è possibile avvalersi di più aree campioni sulla valutazione della superficie e per ogni area campione si calcolano i parametri statistici come la media, la deviazione standard etc.

### 1.3.3. Altezze centrate

Nei parametri superficiali le funzioni di altezza devono essere centrate. Perciò il parametro *Sq* (radice della media quadratica dell'altezza) è la media dell'altezza calcolata sull'area definita già centrata. Questa semplificazione porta all'arrotondamento degli errori perché, solitamente, le altezze sono codificate con numeri interi e la media delle altezze è approssimata all'intero più vicino. Ciò può portare ad errori di arrotondamento nei risultati, questi errori possono essere minimizzati riducendo la dimensione degli intervalli presi in considerazione.

Il parametro *Sa* (media aritmetica dell'altezza) e *Sq* sono fortemente correlati. Il parametro *Sq* ha un significato statistico più importante rispetto a *Sa* perché è direttamente correlato all'energia della superficie.

Il parametro *Ssk* descrive la forma della topografia della distribuzione delle altezze. Per una superficie Gaussiana o random la distribuzione delle altezze deve avere una topografia simmetrica e il parametro *Ssk* è pari a zero. Questo parametro è fortemente influenzato da valli o picchi isolati.

Il parametro Sz rappresenta l'altezza massima della superficie. Questo parametro è sensibile a picchi e valli isolate. Il parametro Sz può essere utile su superfici filtrate con un filtro a passo basso (S-F superficie).

Alcuni di questi parametri vengono presi in considerazione nello svolgimento di questa tesi.

## 1.4. Parametri statistici

### 1.4.1. Superficie primaria

È una porzione di superficie ottenuta mediante la rappresentazione di un modello matematico primario della porzione superficiale.

### 1.4.2. S-F superficie

È una superficie derivante dalla superficie primaria rimuovendo la forma impiegando l'operatore F, dove quest'ultimo è un operatore che rimuove la forma dalla superficie primaria.

### 1.4.3. Sq

Sq definito come la radice quadrata di un parametro d'altezza, rappresenta la radice quadrata della media quadratica dei valori ordinati della superficie.

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \int \int_A z^2 dx dy}$$

### 1.4.4. Ssk

Ssk definito come il quoziente della media cubica del valore delle ordinate sulla superficie e il cubo di Sq.

$$S_{sk} = \frac{1}{AS_q^3} \int \int_A z^3 dx dy$$

### 1.4.5. Sz

Sz definito come il massimo parametro di altezza, è la somma del valore della massima altezza di picco e il valore massimo di profondità del pozzo sulla superficie.

### 1.4.6. Sa

Sa definita come la media aritmetica del parametro di altezza, rappresenta la media del valore assoluto dei valori ordinati sulla superficie in esame.

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

## 2. Sistemi di Misura a Coordinate (CMS) e Macchine di Misura a Coordinate (CMM)

In questo paragrafo vengono presentati gli strumenti impiegati nella valutazione degli errori durante i processi di misura degli oggetti in esame.

### 2.1. Sistemi di Misura a Coordinate (CMS)

La normativa *BS EN ISO 10360-13:2021* ha due obiettivi tecnici:

1. Testare l'errore quando si misura una lunghezza test tarata attraverso la misura globale del volume della *CMS*.
2. Testare l'errore indicato con una misura di volume locale.

Questi test sono benefici in quanto il risultato misurato ha una riferibilità diretta con l'unità di misura utilizzata, metro *m*, che indica come la macchina di misura a coordinate (*CMM*) o il sistema di misura a coordinate (*CMS*) lavora in condizioni di misure di lunghezza simili.

Questo documento descrive:

1. Le specifiche di lavoro che devono essere assegnate dal produttore o dall'utente della *CMS*.
2. La modalità di esecuzione dei test di accettazione e di ri-verifica per dimostrare i requisiti indicati.
3. Le regole per verificare la conformità.
4. Le applicazioni per cui i test di accettazione e di ri-verifica possono essere usati.

#### 2.1.1. CMS ottica tridimensionale

All'interno della normativa sopra citata, vengono specificate le prove di accettazione per verificare le performance di un Sistema di Misura a Coordinate ottico 3D (*CMS*) quando misura le lunghezze fornite dal produttore. La normativa è applicabile per la verifica delle performance di misura delle *CMS* se le caratteristiche della superficie dell'oggetto da scansionare sono limitate e all'interno di un range definito.

Il Sistema di Misura a Coordinate rappresenta un sistema che esegue delle misure di coordinate spaziali acquisite tramite sensori ottici.

#### 2.1.2. I sensori del volume di misura

Permettono la misura, tramite sensori, del volume del pezzo che soddisfa le specifiche fornite dal produttore, senza movimentare i sensori.

#### 2.1.3. La registrazione

Trasforma il sistema di coordinate che porta le coordinate a vista singola in un sistema di coordinate unificato.

#### 2.1.4. La fusione

Rappresenta l'operazione che unisce due o più set di coordinate misurate in un unico set di coordinate misurate.

### **2.1.5. La distorsione dell'errore**

È l'errore nell'indicare una misura di taratura sulla distanza centro a centro, dentro il volume di misura del sensore, sia con una misura singola che con multiple misure.

L'errore massimo permessibile è dato dalle specifiche.

### **2.1.6. Condizioni ambientali**

I limiti permessi dalle condizioni ambientali devono essere precisati da:

1. Il produttore in caso di test di accettazione.
2. Dall'utente in caso di prova di ri-verifica.

L'utente è responsabile affinché l'ambiente che racchiude la CMS sia vicino alle specifiche imposte dal produttore.

Nel manuale del produttore devono essere incluse i seguenti criteri:

- L'avvio e il warm up della macchina.
- La qualificazione della CMS.
- Stabilità termica della CMS.
- Posizione, tipo e numero dei sensori termici dove questi sono, almeno, parzialmente applicabili.
- Filtri software.
- Caratteristiche della superficie del materiale standard così come colore, rugosità....
- Procedure di default per la registrazione dei dati.
- Funzioni "smooth" preinstallate.
- Se applicabili misure concatenate di volume.

Il materiale usato deve essere conforme con gli standard del produttore.

Differenti materiali hanno diverse caratteristiche ottiche come il fattore di riverbero, profondità di penetrazione ottica, il colore. Tutti i parametri sopracitati possono influenzare i valori ottenuti dai test.

La rugosità del materiale standard deve essere trascurabile rispetto al massimo errore permesso.

Le caratteristiche della superficie, il materiale e il colore degli standard del materiale devono essere descritti nella documentazione tecnica degli strumenti disponibili all'utente.

### **2.1.7. Pre-processing**

Il pre-processing dei dati di misura grezzi, come parte delle condizioni operative nominali, dovrebbe essere indicato nella documentazione tecnica disponibile all'utente. Il pre-processing è tipicamente implementato per realizzare l'eliminazione degli outlier, la fluttuazione dei punti misurati...

### **2.1.8. Caratteristiche di distorsione**

L'utilizzo dei Sistemi di misura a Coordinate 3D ottici possono essere influenzati dalla distorsione del sistema del sensore ottico.

Questo tipo di errore non è facilmente ottenibile nei test d'errore di misure della lunghezza ma può avere un grosso impatto sulla misura della forma dell'oggetto [3].

L'errore di distorsione deve essere specificato.

### 2.1.9. La derivazione dei risultati del test

Per un Sistema di Misura a Coordinate ottico tridimensionale la differenza nel numero di “data points” acquisiti può influenzare significativamente il risultato dei test.

Se è disponibile, dal software installato, si può eseguire l’eliminazione di alcuni dei punti misurati prima della valutazione dei risultati.

## 2.2. Macchine di Misura a Coordinate (CMM)

Le Macchine di Misura a Coordinate (CMM) sono diventate molto importanti per la verifica delle geometrie nell’industria. In accordo con la normativa della serie degli standard *ISO 9000*, sono necessarie delle attrezzature di misura tarate con certificate attrezzature da standard internazionali o nazionali per istituire la riferibilità.

### 2.2.1. Condizioni operative

Prima di iniziare le misure, si eseguono diversi passi:

1. Inizializzazione della CMM.
2. Esecuzione delle procedure di configurazione della sonda e la sua qualificazione in accordo alle condizioni specifiche riportate nel manuale operativo del produttore.
3. Esecuzione delle procedure per la compensazione termica della macchina.
4. Se disponibili e riportati nel manuale di qualità, attivazione delle funzioni di compensazione degli errori.

La Macchina di Misura a Coordinate deve soddisfare le specifiche del produttore o le specifiche di procedura riportate per il compito di misura.

La procedura sperimentale richiede delle similarità con la procedura sperimentale reale come, ad esempio, per le dimensioni e geometria del componente, le procedure di misura per la valutazione dell’incertezza, le condizioni ambientali.

Le condizioni ambientali sono considerate simili se le condizioni sopra citate sono rispettate.

Le misure per la valutazione dell’incertezza devono coprire completamente il range di temperature, ottenuto durante le misure del componente non tarato. Se il coefficiente di espansione termica del componente misurato è considerato significativo, deve essere preso in considerazione come contributo per l’incertezza.

### 2.2.2. Ambiente per effettuare le misure

La temperatura è il maggior contributo per l’incertezza ambientale. Le caratteristiche per svolgere i *test delle performance* della Macchina di Misura a Coordinate devono contenere i limiti definiti per la temperatura.

Se le misure vengono effettuate in un ambiente con una temperatura fuori dai limiti definiti si possono aggiungere ulteriori errori.

Altri contributi, all’incertezza relativa all’ambiente, possono essere l’umidità, il rumore, lo sporco, le vibrazioni....

Inoltre, possono essere presenti dei contributi di incertezza relativi all'utilizzazione dei software disponibili, ad esempio nella correttezza degli algoritmi, le implementazioni di algoritmi disponibili. In aggiunta, altre fonti di incertezza possono essere causate dalle condizioni di lavoro del metrologo, così come dalla geometria del pezzo in esame, la sua porosità e la rigidità [4].

In ultimo, se la Macchina di Misura a Coordinate ha un sistema di compensazione della temperatura del pezzo misurato, è presente l’incertezza derivante dalla non perfetta conoscenza del coefficiente

di espansione termica del componente. Quest'ultima fonte è indipendente dalle specifiche di lavoro della Macchina di Misura a Coordinate.

## 3. Come si misurano le tolleranze?

In questo capitolo verranno presentate diverse normative e le metodologie applicate per la misura dell'incertezza di misura.

### 3.1. Come si misura l'incertezza in una Macchina di Misura a Coordinate

La normativa *ISO 15530-1* è un documento generale *GPS* che influenza gli standard sulla dimensione, distanza, raggio, forma, orientamento, *datum* e angolo di una matrice generale *GPS*. L'obiettivo della normativa *ISO 15530* è provvedere alla terminologia, alle tecniche e alle linee guida per valutare l'incertezza di misura di uno specifico compito impiegando una Macchina di Misura a Coordinate.

Queste tecniche permettono la valutazione delle sorgenti di incertezza che influenzano le misure ottenute, inclusi l'influenza del sistema di coordinate di misura, gli effetti dell'ambiente circostante, la variabilità data dall'operatore e tutti gli altri fattori che possono influenzare il risultato attuale della misura [4].

Le *CMM* vengono considerate attrezzature complesse per le misure *GPS* e la valutazione dell'incertezza delle misure delle Macchine di Misura a Coordinate spesso, coinvolgono tecniche più avanzate per poter rappresentare la normativa *ISO 15530*, che comprende sia la normativa *ISO 14253-2* che la normativa *ISO/IEC 98-3 (GUM)*. Quest'ultima normativa fornisce metodi standard per valutare l'incertezza.

Queste tecniche sono state sviluppate specificatamente per l'utilizzo delle Macchine di Misura a Coordinate, ma possono essere adottate, anche, per altre attrezzature per effettuare le misure *GPS*. Le *CMM* sono definite dai test di accettazione seguendo la normativa *ISO 10360*, che coinvolge l'abilità della macchina di misurare lunghezze tarate e forme. Inoltre, questi test vengono impiegati, anche, per individuare l'incertezza relativa alla specifica tipologia di misura della lunghezza e della forma dell'oggetto coinvolte nelle procedure di misura, ma senza ulteriori analisi, questi risultati sono insufficienti per determinare l'incertezza specifica del processo di misura eseguito.

La normativa *ISO 15530-1* fornisce delle linee guide per valutare l'incertezza nelle misure utilizzando le *CMM*.

#### 3.1.1. Caratteristiche metrologiche

Le caratteristiche metrologiche delle *CMM* sono interessanti per controllare gli errori, per il loro contributo all'incertezza originata dalla stessa Macchina di Misura a Coordinate e per valutare le incertezze nelle misure quando sono adoperate le *CMM*.

Il processo di misura influenza la dipendenza delle misure delle incertezze dalle caratteristiche metrologiche.

Per scegliere la Macchina di Misura a Coordinate e il processo di misura più adatti è necessario conoscere le attuali caratteristiche metrologiche e i loro valori di base.

Tutte le caratteristiche metrologiche, inclusi il loro valore massimo permessibile di errore e il loro limite massimo permessibile vengono applicate sulla base delle condizioni di lavoro della specifica *CMM*.

Le condizioni di lavoro delle *CMM* vengono specificate, solitamente, dal manuale operativo del produttore e non dalle normative *ISO*; tuttavia, quest'ultime possono indicare delle condizioni di orientazione specifiche, dove i valori massimi dei limiti e di errore non sono applicabili.

Per scegliere la procedura per stimare l'incertezza è necessario affidarsi a un esperto.

### 3.1.2. La scelta delle caratteristiche metrologiche

Le caratteristiche metrologiche delle Macchine di Misura a Coordinate possono essere scelte in diversi modi.

Per la scelta delle caratteristiche metrologiche, del valore massimo di errore e del limite massimo permessibile è consigliabile tenere in conto le seguenti proprietà:

1. L'utilizzo della *CMM*.
2. L'indipendenza delle caratteristiche metrologiche.
3. Il controllo dei contributi di incertezza relativi alla *CMM*.
4. Le attività di manutenzione e l'identificazione degli errori.
5. I principi di misura.
6. Le relazioni di specifiche parti o funzioni della *CMM*.

È consigliato definire le caratteristiche metrologiche che si adattano al meglio alle necessità e all'utilizzo delle Macchine di Misura a Coordinate.

### 3.1.3. Errori geometrici della macchina e movimento degli errori residui

Si possono misurare i movimenti degli errori geometrici di elementi moventi della *CMM*, come la rettilineità, il rollio, il beccheggio e l'imbardata.

Le *CMM*, di solito, utilizzano dei software di compensazione per questo tipo di errori geometrici; tuttavia, gli errori residui possono esistere e, questi possono essere tenuti in considerazione nella scelta delle caratteristiche metrologiche.

### 3.1.4. Taratura delle caratteristiche metrologiche

Le caratteristiche metrologiche necessarie, dopo essere state scelte, devono essere verificate con la taratura o tramite test di ri-verifica.

I valori tarati delle caratteristiche metrologiche devono essere forniti insieme alla relativa incertezza di misura, inoltre dove è possibile questi valori devono essere confrontati, in conformità, con i valori massimi permessibili e con i valori dei limiti massimi permessibili.

### 3.1.5. L'incertezza specifica della task

Le moderne Macchine di Misura a Coordinate sono influenzate da un range elevato di fonti di incertezza perché le Macchine di Misura a Coordinate sono tipicamente un sistema multiasse.

Per questo motivo nella normativa *ISO 15530* vengono espresse tre categorie generali di incertezza:

1. Fattori strumentali: includono tutti gli errori causati dagli strumenti di misura, come la *CMM*, punti di misura in posizioni inaccurate...

Questi errori possono essere dovuti dalla struttura della macchina, ad esempio la temperatura, le vibrazioni, gli errori nel sistema sonda ed errori negli altri sensori.

In aggiunta, in questa categoria vengono considerati gli errori dovuti alle formulazioni matematiche o all'esecuzione di algoritmi associati alle "feature".

Questi fattori sono tipicamente imputabili al produttore della *CMM* e vengono controllati attraverso limiti definiti.

2. Fattori nel piano di misura: coinvolgono il modo in cui l'utente decide di eseguire le misure.

Tutto ciò include la posizione di lavoro e la sua orientazione, la sonda e lo stilo scelto per la misura e la strategia di punti di campionamento per la specifica misura.

In aggiunta, la quantità misurata deve essere specificata in modo univoco, ad esempio per la misura del diametro di un cilindro l'utente deve scegliere se trovare il risultato con il metodo dei minimi quadrati o il massimo cilindro inscrivibile...

Alcuni di questi fattori possono influenzare i coefficienti di sensibilità di alcuni componenti di incertezza.

3. Fattori estrinseci: sono spesso fattori al di là del controllo del produttore e dell'utente della CMM.

Questi fattori influenzano l'incertezza della misura del compito specifico.

I fattori includono la geometria non ideale del componente come rugosità della superficie, errori di forma e distorsioni termiche e variazioni all'interno del lavoro degli operatori [4].

### **3.1.6. Tecnica per determinare i componenti di incertezza di misura della specifica task**

Per poter valutare l'incertezza della misura dello specifico compito è necessario che tutti i fattori sopra elencati siano stimati e combinati in maniera coerente con la normativa *ISO/IEC Guide 98-3*, solitamente sono richieste diverse tecniche di valutazione per includere tutte le fonti, impiegando, poi, una legge di propagazione dell'incertezza per trovare l'incertezza combinata standard.

Il bilancio di incertezza contiene le fonti di incertezza, la loro combinazione e l'espressione dell'incertezza estesa.

L'espansione dell'incertezza è connessa all'incertezza standard combinata attraverso il fattore di copertura, che cambia a seconda del livello di fiducia desiderato. Per un livello di fiducia del 95% il fattore di copertura è pari a due se la distribuzione dell'incertezza segue una distribuzione Gaussiana.

### **3.1.7. L'analisi della sensibilità**

L'analisi di sensibilità è descritta nella normativa *ISO/IEC Guide 98-3*, tuttavia nella normativa *ISO 14253-2* è esposta un'implementazione semplificata e iterativa di questa tecnica.

Quest'ultima semplificazione è possibile introdurla solo per un limitato range di compito di misura perché le Macchine di Misura a Coordinate sono uno strumento di misura complesso.

Il metodo consiste di quattro passi:

1. Segnare ogni fonte di incertezza inclusa nell'analisi di sensibilità.
2. Per ogni fonte di incertezza segnata quantificare l'importanza con la deviazione standard, conosciuta come fonte di incertezza standard.
3. Per ogni fonte di incertezza è necessario determinare l'incertezza standard, il coefficiente di sensibilità e la correlazione con altre fonti di incertezza.
4. Si combina il prodotto di ogni incertezza standard e il coefficiente di sensibilità insieme agli effetti correlati dell'incertezza, utilizzando la legge di propagazione dell'incertezza.

### **3.1.8. L'impiego di pezzi di lavoro standard o normative (ISO 15530-3)**

L'utilizzo di componenti tarati o standard consente di adoperare dei metodi molto potenti per catturare le fonti appropriate di incertezza e le loro interazioni, tramite l'applicazione di misure ripetute del componente in esame.

L'utilizzo del componente tarato comporta un costo elevato e riduce la versatilità della macchina CMM.

Alcune fonti di incertezza, come i fattori estrinseci richiedono delle valutazioni indipendenti.

Questo metodo è facilmente applicabile per geometrie semplici dove gli artefatti tarati possiedono una geometria simile e facilmente disponibile e dove i fattori estrinseci sono minimizzati.

### 3.1.9. *L'impiego di simulazioni al computer (ISO/TS 15530-4)*

Il metodo di simulazione, come l'analisi di sensibilità, quantifica ogni fonte di incertezza con dei valori distribuiti, che sono caratterizzate da proprietà statistiche.

A differenza dell'analisi della sensibilità, le tecniche di simulazioni possono individuare interazioni più complesse tra le fonti di incertezza, utilizzando modelli matematici del processo di misura. Le simulazioni al computer permettono di implementare diversi scenari per effettuare ripetute simulazioni di misura e, ogni scenario implica uno specifico set di errori di misura.

Per una più completa descrizione delle interazioni, è necessario l'uso di specifici errori di misura, del modello matematico.

Per caratterizzare a sufficienza le fonti di incertezza, utilizzando le simulazioni, è necessario un gran numero di cicli di simulazioni perché gli errori di misura specifici non sono conosciuti. Questa tecnica è adoperabile quando i processi di misura sono matematicamente descritti [4].

I risultati degli studi di simulazione sono validi fintantoché anche il modello matematico per descrivere il processo di misura è valido.

La parte della normativa *ISO 15530-3* si occupa della documentazione relativa a "*Geometrical Product Specifications (GPS)*" [5].

I metodi per valutare l'incertezza coprono gli errori, che derivano dai molteplici compiti di misura delle *CMM*, che possono essere molto complessi.

In questi casi la stima non realistica dell'incertezza legata al compito svolto dalla Macchina di Misura a Coordinate si alza.

L'obiettivo della normativa *ISO 15530-3* è provvedere a una tecnica sperimentale per semplificare le misure dell'incertezza della *CMM*.

In questa procedura sperimentale, le misure vengono eseguite nello stesso modo con cui si svolgono le attuali misure, tuttavia il componente in esame non presenta geometrie ignote ma il componente è tarato o presenta delle geometrie e dimensioni standard.

La standardizzazione di questa procedura sperimentale è necessaria per essere riconosciuta a livello globale per taratura e altri risultati delle misure [5].

In aggiunta, questa parte della normativa è impiegata per correggere gli errori sistematici della *CMM*. Questa parte della normativa *ISO 15530* descrive diversi metodi per valutare l'incertezza; inoltre, l'approccio sperimentale è semplice da eseguire e provvede a incertezze di misura realistiche.

L'approccio sperimentale ha delle limitazioni che sono:

1. La disponibilità di artefatti che presentano caratteristiche geometriche sufficientemente definite,
2. Costi ragionevoli,
3. La stabilità,
4. La possibilità di tarare gli artefatti con incertezze sufficientemente piccole.

La normativa *ISO 15530-3* copre, inoltre, sia misure che forniscono indicazioni non corrette della Macchina di Misura a Coordinate usati come risultati, sia le misure del componente in esame e le misure effettuate per vedere la correttezza dei risultati per poter provvedere alla correzione addizionale degli errori sistematici della Macchina di Misura a Coordinate.

### 3.1.10. Principio di valutazione dell'incertezza adoperando pezzi tarati

La valutazione delle misure di incertezza è una sequenza di misure eseguite tutte nella stessa maniera e sotto le stesse condizioni delle misure attuali. Le differenze ottenute dalle misure e dai valori tarati noti sono utilizzate come stima dell'incertezza delle misure. L'incertezza di misura si compone dei seguenti contributi di incertezza: procedure di misura, di taratura dei componenti, variazione dei componenti misurati, come il coefficiente di espansione e la struttura della superficie.

### 3.1.11. Procedura

L'attrezzatura necessaria per la valutazione dell'incertezza, utilizzando la Macchina di Misura a Coordinate, dei componenti tarati è:

1. Il setup dello stilo specificatamente per il compito assegnato.
2. Almeno un componente tarato.

Le caratteristiche metrologiche dei componenti tarati devono essere tarate con un'incertezza bassa e nota per soddisfare le specifiche del compito di misura.

La sonda deve essere qualificata nuovamente per ogni taratura.

### 3.1.12. Esecuzione

L'utente della Macchina di Misura a Coordinate ha un'elevata libertà nella scelta della procedura di misura in accordo con le specifiche tecniche. Tutto ciò è possibile perché la procedura e le condizioni delle misure attuali e quelle durante la valutazione dell'incertezza sono le stesse.

La posizione e l'orientamento dei componenti misurati è libera all'interno del range coperto dalla valutazione dell'incertezza.

### 3.1.13. Valutazione dell'incertezza

La valutazione dell'incertezza deve avvenire come espresso di seguito:

I componenti tarati devono essere misurati al posto dei componenti effettivi.

Per ottenere un numero sufficiente di campioni per la valutazione dell'incertezza, sono necessari almeno dieci cicli di misura e almeno venti misure sui componenti tarati.

Durante la valutazione dell'incertezza, la posizione e l'orientamento dei componenti tarati sono sistematicamente variati, nei limiti dati dalla procedura delle misure effettive [5].

In un resoconto di misura, il risultato di misura e l'incertezza corrispondente è espressa nella forma  $y \pm U$ , dove  $U$  è determinato dal fattore di copertura  $k=2$  per un livello di fiducia del 95%.

I contributi di incertezza durante l'esecuzione delle misure sono dati dalle seguenti incertezze standard:

$$U = k \cdot \sqrt{(u_{cal}^2 + u_p^2 + u_b^2 + u_w^2)}, \text{ dove:}$$

- $u_{cal}$ , incertezza standard associata con l'incertezza di taratura dei componenti ed è espressa dalla seguente equazione  $u_{cal} = \frac{U_{cal}}{k}$  ;
- $u_p$ , incertezza standard associata alla procedura di misura, ed è esplicitata da

$$u_p = \sqrt{\left(\frac{1}{n-1} \sum (y_i - y^*)^2\right)} \text{ con } y^* = \frac{1}{n} \sum y_i \text{ e } n = \text{numero di misure;}$$

- $b$ , è l'errore sistematico tra il valore indicato dalla CMM e il valore del componente tarato,  $b = y^* - x_{cal}$ .

La valutazione dell'errore sistematico è stimata tramite venti o più misure ripetute sul componente tarato. La deviazione standard della media, che rappresenta una quantità statistica, sarà piccola e perciò sarà trascurata nella procedura di valutazione dell'incertezza.

Tuttavia, l'incertezza standard associata all'errore sistematico tiene in conto anche dell'effetto dell'incertezza sul valore del coefficiente di espansione termica del componente tarato. Questa quantità non è trascurabile.

- $u_b$  , è l'incertezza associata agli errori sistematici dei processi di misura valutati utilizzando il componente tarato, dove:  $u_b = (T - 20^\circ C) \cdot u_\alpha \cdot l$  ;
- $u_\alpha$  , è l'incertezza standard associata al coefficiente di espansione del componente tarato;
- T è la media della temperatura del componente tarato durante la procedura di valutazione dell'incertezza di misura;
- $l$  , è la dimensione misurata.
  - $u_w$  , incertezza standard associata alle variazioni nel materiale e nella produzione.
  - Le variazioni negli errori di forma e di rugosità dovute ai cambiamenti nei processi produttivi e alle variazioni di elasticità dovute al cambiamento del materiale e delle proprietà dei componenti non tarati influenza l'incertezza di misura.

Queste influenze rientrano nell'incertezza standard  $u_{wp}$ .

Se vengono utilizzati molteplici componenti tarati, tutti i componenti misurati contengono le proprietà sopra citate e rientrano, quindi, nei limiti, questo contributo può essere trascurato.

Le rispettive tolleranze di forma e di rugosità possono variare questi contributi. Inoltre, viene tenuto conto anche della variazione del coefficiente di espansione termica:

$$u_{wt} = (T - 20^\circ C) \cdot u_\alpha \cdot l .$$

Di conseguenza,  $u_w = \sqrt{(u_{wt}^2 + u_{wp}^2)}$ .

In alcuni casi, è possibile applicare il metodo di sostituzione che consiste nella correzione degli errori sistematici. Per utilizzare questo metodo è necessaria la misura di una funzione standard addizionale inclusa nel ciclo di misura.

Misurando questa funzione standard regolarmente e comparandola con il valore della *CMM*, si ottiene un valore correttivo, che è poi applicato al componente da misurare:  $y_i = y_i^\circ + \Delta_i$  dove  $y_i^\circ$  rappresenta il valore ottenuto dalla *CMM* e  $\Delta_i$  tiene conto delle correzioni.

L'incertezza deve coprire l'intera procedura.

La funzione standard è una parte intrinseca della procedura di misura e non deve essere utilizzata come componente tarato durante la valutazione dell'incertezza. È necessario distinguere chiaramente tra la funzione standard per la correzione e l'analisi del processo di misura del componente tarato.

### 3.1.14. Controllo intermedio dell'incertezza di misura

Il controllo intermedio è una semplificazione della valutazione dell'incertezza, dove i componenti tarati sono sostituiti con una campionatura statistica dei componenti da misurare. I controlli intermedi sono utili per verificare se le assunzioni fatte sono ancora valide dopo lunghi periodi di variazione delle condizioni di misura, soprattutto per quanto riguarda la temperatura.

Il tempo trascorso tra un controllo e l'altro è deciso dall'utente della Macchine di Misura a Coordinate. In aggiunta, i controlli intermedi sono dipendenti dall'incertezza di misura richiesta e dalle condizioni ambientali.

## 3.2. Come si misurano gli errori in un Sistema di Misura a Coordinate

### 3.2.1 Le caratteristiche di distorsione

La distorsione dei sistemi di sensori ottici influenzano i Sistemi di Misura a Coordinate ottici tridimensionali. Questo tipo di errore è difficile da riscontrare nei test di errore sulla misura della lunghezza ma possono avere una larga influenza sulla misura della forma nella pratica.

L'errore di distorsione deve essere precisato e un corrispondente test deve essere eseguito.

Il principio di questo test è di stabilire se il CMS ottico 3D è capace di misurare nel volume di misura del sensore all'interno del massimo errore di distorsione permessibile.

Il materiale standard consiste in due sfere, tarate per la distanza centro-centro per la valutazione dell'errore di distorsione.

Le dimensioni del materiale standard devono soddisfare le seguenti condizioni a meno che non sia altrimenti specificato:

$L_p \geq 0.3 \cdot L_0$  e  $0.02 \cdot L_0 \leq \phi_p \leq L_0$  dove:

- $L_p$ , è la distanza centro-centro tra le sfere,
- $L_0$ , rappresenta la distanza più lunga tra il volume di misura del sensore,
- $\phi_p$ , è il diametro nominale delle sfere.

Se il rapporto tra la distanza più lunga e quella più corta lungo le direzioni da testare, all'interno del volume di misura del sensore, è maggiore di tre, le dimensioni del materiale standard possono essere adottate in accordo reciproco.

### 3.2.2. Errore di distorsione a vista singola

Le misure della distorsione a vista singola devono essere eseguite in una singola misura in accordo con le normali procedure operative date dal produttore.

Questa singola misura deve essere eseguita senza il riposizionamento della CMS e del materiale standard.

### 3.2.3. Errore di distorsione a vista multipla

Le misure di distorsione a vista multipla devono essere eseguite con una combinazione di dodici misure singole in accordo alle normali procedure operative date dal produttore.

Almeno una semisfera per ogni sfera deve essere catturata dalla combinazione delle dodici misure singole.

La registrazione e la fusione delle misure sono necessarie per ottenere l'errore di distorsione a vista multipla. Il produttore deve descrivere i dettagli operativi e fornire all'utente la guida pratica migliore per la registrazione e fusione della vista multipla.

### 3.2.4. Caratteristiche della sonda

Il principio del metodo di valutazione degli errori della sonda è definire se il Sistema di Misura a Coordinate ottico tridimensionale è capace di misurare nel volume di misura del sensore entro il massimo errore della sonda permessibile.

Lo stesso materiale standard usato per la valutazione dell'errore di distorsione è usato come test di sfere tarate per la forma e la dimensione della sfera. Il diametro della sfera tester deve essere in un range tra il due e il venti percento della distanza maggiore dentro il volume di misura del sensore. Con

una lunghezza massima superiore a due metri e mezzo una lunghezza minima di cinquanta millimetri è permessa.

I test per le caratteristiche metrologiche della sonda devono essere eseguiti applicando un singolo set di parametri dati dal produttore entro le stimate condizioni operative. È richiesto il novantacinque e cento percentili della popolazione dei dati per le caratteristiche metrologiche.

Gli stessi dati sono usati per determinare l'errore di dispersione della forma della sonda separatamente nel novantacinquesimo e nel centesimo percentile che devono essere associati a una sfera Gaussiana non vincolata e non pesata.

Gli errori corrispondenti al novantacinquesimo e centesimo percentile per una misura a vista multipla e singola sono derivanti dalla differenza tra il diametro misurato della sfera test e il suo valore tarato.

### ***3.2.5. Errore di distorsione della forma piana***

I tester piani sono utilizzati per determinare l'errore di distorsione di forma piana.

La forma del tester piano deve essere tarata, dato che la deviazione della forma influenza i risultati del test e deve essere considerata quando si verifica la conformità o la non conformità delle specifiche.

Le dimensioni del tester piano devono seguire le seguenti indicazioni:

- La lunghezza del lato più lungo: deve essere almeno il cinquanta per cento della distanza del volume di misura del sensore maggiore.
- La lunghezza del lato più corto: deve essere almeno il dieci per cento della distanza del volume di misura del sensore maggiore.

Se un tester piano non riesce a coprire la lunghezza del lato più lungo, devono essere effettuate molteplici misure a vista singola, con diverse posizioni, all'interno del volume di misura del sensore.

È fortemente raccomandato eseguire il test dell'errore di distorsione di forma piana usando un tester piano abbastanza largo.

Una particolare attenzione deve essere posta per una potenziale deflessione del tester piano dovuta all'influenza della gravità o dalle limitazioni del design per supportare il piano, in particolare nel caso in cui è richiesto un tester piano con grandi dimensioni [6].

Se la deflessione non è trascurabile, bisogna tenerne in conto come contributo dell'incertezza.

I risultati del test possono essere significativamente influenzati dalla posizione e dall'orientamento del sensore ottico. Si raccomanda di impostare il sensore ottico in diverse posizioni per vedere se questo effetto si presenta durante il test.

Se la performance del test non verifica l'errore di distorsione della forma piana, l'attrezzatura deve essere verificata per ogni guasto che può probabilmente influenzare il risultato di misura.

### ***3.2.6. L'errore di misura della lunghezza del volume in un volume concatenato di misura***

Il principio di questo test stabilisce se il Sistema di Misura a Coordinate ottico tridimensionale è capace di misurare le lunghezze nel volume di misura concatenato entro il massimo errore di misura permessibile, comparando il valore tarato e quello indicato dal test delle lunghezze tarate.

Da default, la dimensione del volume di misura concatenato è determinata dalla più lunga distanza lineare incapsulata all'interno del volume di misura concatenato, lunga più del doppio della distanza interamente incapsulata nel volume di misura, a meno che non sia altrimenti specificato.

## 4. Studio specifico degli errori sistematici

In questo capitolo verranno esposte diverse ricerche eseguite da autori differenti per studiare gli errori sistematici nelle misure.

### 4.1. Tecniche di confronto basate su *ball-plate*

Il software di compensazione degli errori geometrici della Macchina di Misura a Coordinate può migliorare l'accuratezza della stessa macchina, ridurre significativamente i costi di produzione ed è fornito per quasi tutte le moderne *CMM*.

La conoscenza degli errori è richiesta per adattare i componenti della Macchina di Misura a Coordinate e per valutarne la sua performance. In molti casi, la compensazione degli errori geometrici è basata sui modelli di errore dei corpi rigidi, che descrivono il comportamento dell'errore riguardo alle diciotto funzioni d'errore.

Esistono una varietà di tecniche per determinare i parametri del modello di errore. Queste tecniche sono basate sulla misura diretta dei componenti di errore utilizzando strumenti di misura indipendenti, largamente utilizzati dai produttori di Macchine di Misura a Coordinate.

Alcuni laboratori hanno proposto delle tecniche basate su misure ripetute di artefatti, come "*ball plate*", eseguite direttamente dalla *CMM*. Queste tecniche sono benefiche sia per i produttori che per gli utenti della *CMM* perché sono più semplici, meno costose e più robuste delle tradizionali tecniche impiegate.

Forniscono agli utenti esperti un modo per testare autonomamente le proprie macchine, gli errori dei parametri determinati riflettono il comportamento generale della macchina così come viene adoperata giornalmente per i setup di misura.

Un problema di queste tecniche sono la necessità delle prove documentate dell'equivalenza delle diverse tecniche basate sulle *ball-plate*, per poter essere impiegate nelle industrie.

Questa parte è necessaria per superare le limitazioni della taratura delle *CMM*.

Per questo motivo, le tecniche basate su *ball-plate*, per determinare gli errori parametrici, sono intraprese come un'attività cooperativa tra diversi laboratori. In questo campo l'inesperienza pregressa necessita un maggiore sforzo per costruire uno schema appropriato.

#### 4.1.1. Determinazione delle tecniche comparative

Le tecniche comparative seguono le seguenti caratteristiche:

1. L'impiego dello stesso modello generale di errore basato sulle diciotto funzioni di errore.
2. Le procedure sperimentali sono basate su misure ripetute di un *ball o hole plate* nella misura del volume della Macchina di Misura a Coordinate.

Quest'ultima caratteristica è la più particolare e permette di avere il contesto per il confronto.

I vantaggi derivati dall'uso del *ball-plate* sono i seguenti:

1. Non sono richiesti né strumenti costosi aggiuntivi né personale altamente qualificato per eseguire queste procedure, grazie all'ottima ingegnerizzazione del processo, reso più veloce e facilmente usufruibile.
2. I risultati di misura sono sensibili a qualunque compensazione di errore preesistente e la procedura tiene traccia di ogni errore residuale non compensato.

I *ball-plate* possono essere usati non solo dai produttori della Macchina di Misura a Coordinate per compensare gli errori ma anche dagli utenti per controllare la prestazione della macchina [7].

L'uso di un piano 2D al posto di un'asta 1D conviene economicamente perché ogni misura di un piano permette di ottenere le stesse informazioni che si acquisirebbero con diverse misure in differenti posizioni.

Questi artefatti differiscono nelle procedure sperimentali, negli approcci matematici e nelle funzioni di approssimazioni utilizzate, ad esempio nel passato si calcolavano gli errori utilizzando una funzione che minimizzava globalmente le funzioni degli errori e dei dati sperimentali, ultimamente si separano le funzioni non note e vengono calcolate una ad una.

Alcuni laboratori hanno utilizzato la tecnica della *auto-taratura*, i vari valori della distanza corrispondenti alle paia di sfere misurate, quando il piano è collocato in diverse posizioni comparate tra loro e, la differenza interpretata in termini di errori volumetrici: la somma dei quadrati di queste differenze è la funzione da minimizzare. La procedura di misura può essere estesa.

Devono essere utilizzati più di uno stilo sonda e devono includere gli effetti di tutte le diciotto funzioni di errore per poter adattarsi ai diversi orientamenti del piano.

Il piano, durante la procedura di taratura, deve essere dimensionalmente stabile ma non è necessaria la sua taratura, al contrario della *ball-bar* che deve essere tarata per poter fornire la riferibilità.

Gli errori geometrici residuali e la temperatura vengono minimizzati. I risultati delle misure sono ottimali alla temperatura di lavoro della Macchina di Misura a Coordinate perché minimizzano l'incertezza tra il coefficiente di espansione termica e la temperatura effettiva del componente in esame.

Un altro laboratorio ha utilizzato un approccio geometrico diretto, cioè la posizione del piano e le configurazioni della sonda sono scelte in modo da separare le funzioni di errore parametriche utilizzando della matematica elementare.

L'obiettivo è determinare la posizione di errore, la rettilineità e l'ortogonalità di due diverse distanze lungo lo stesso asse o meno. Questa tecnica permette la scelta della posizione ottimale del piano per la separazione degli errori.

Questo approccio richiede una sfera pre-tarata o un *hole-plate*.

Il vantaggio economico di questa tecnica è la richiesta di un numero minimo di posizione del piano. D'altro canto, la riferibilità e la stabilità del *ball-plate* devono essere assicurati.

#### 4.1.2. Schema di confronto

Le procedure sperimentali sono una parte importante delle tecniche per la determinazione degli errori e per un confronto totale è richiesto che tutti i partecipanti eseguono le procedure sulle stesse *CMM*. Questo approccio ha i seguenti svantaggi:

1. L'esecuzione consecutiva di tre procedure non garantisce perfette condizioni ambientali costanti nei giorni di tempo richiesti e le procedure saranno influenzate da diversi errori accidentali.
2. Deve essere definito un numero massimo comune di misure per fornire una quantità di informazioni di misura, più informazioni sono disponibili più accurata è la determinazione degli errori.
3. Le procedure sono molto costose dal momento che si è scelto di impiegare almeno due *CMM*, in Paesi diversi, per ottenere ridondanza [7].

Gli autori di queste sperimentazioni hanno scelto di approfittare delle similitudini nei procedimenti sperimentali e di usare gli stessi risultati di misura per tutti i partecipanti.

In queste procedure hanno tenuto separato l'errore di posizione per evitare una possibile e apparente sottostima degli errori residui dati dall'adattamento eccessivo.

Gli autori di questa ricerca pensarono di effettuare un confronto diretto dei parametri degli errori; tuttavia, lo trovarono di difficile esecuzione e perciò lo abbandonarono.

In seguito, decisero di confrontare gli effetti degli errori parametrici, e il confronto prevedeva i seguenti passi:

1. Attività sperimentale: le misure vengono eseguite su due *CMM*. Entrambi i piani utilizzati non vengono pre-compensati per errori geometrici e termici, ma vengono precedentemente tarati.
2. Determinazione di errori parametrici: ogni partecipante utilizza una selezione di sedici posizioni per determinare gli errori parametrici in ogni *CMM*.
3. Confronto tra errori residui di misura di pezzi fisici: le posizioni test sono compensate e confrontate individualmente con i valori indipendenti tarati, ciò simula una singola misura dei piani. Vengono calcolati gli errori residui di tutte le posizioni non utilizzate per determinare gli errori parametrici. Tutto ciò fornisce una misura delle capacità medie volumetriche di riduzione dell'errore per compensazione della *CMM*.
4. Confronto di errori residui di misura di pezzi virtuali: un pezzo virtuale comune consiste in un numero di punti regolarmente spazati del volume compensato, simulato con il computer per ogni *CMM*. Per ogni pezzo virtuale sono assunte quattro differenti sonde per individuare gli effetti di rollio, beccheggio e imbardata, tutto ciò è stato eseguito anche per convalidare le tecniche di simulazioni.

La quantità media di riduzione di errore ottenuta fornisce una misura del potenziale delle tecniche di compensazione usate.

Le differenze negli errori residui dopo la compensazione tra le due *CMM* sono attribuite alla diversa risoluzione, ripetibilità e alle condizioni ambientali.

Gli autori di questa sperimentazione raccomandano di indagare separatamente le procedure sperimentali e i software di riduzione dei dati. Le procedure di confronto devono includere effetti accidentali e ambientali, mentre i programmi software di confronto necessitano di dati di input in comune. I risultati dimostrano delle tecniche di confronto soddisfacenti ed equivalenti e il loro vantaggio per la determinazione di errori parametrici con la conseguente previsione e compensazione degli errori geometrici.

## **4.2. Impiego di scanner ottici tridimensionali per l'ispezione di geometrie complesse**

Uno scanner ottico tridimensionale acquisisce i dati geometrici da un oggetto fisicamente esistente. L'acquisizione dei dati geometrici permette di costruire un modello virtuale tridimensionale dell'oggetto fisico, che può essere impiegato in diverse applicazioni come la prototipazione, le ispezioni e il controllo qualità [8].

Lo scanner ottico impiegato è un sensore a luce con proiezione di frange che si basa sul principio della triangolazione, dove il sensore proietta uno schema a bande sull'oggetto da scannerizzare, che poi viene registrato da due telecamere.

Ogni singola misura genera fino a quattro milioni di punti. Lo scanner registra solo quei punti che vengono individuati da entrambe le telecamere in una singola scansione.

Diverse singole misure da differenti angolazioni sono necessarie per digitalizzare completamente un oggetto fisico.

Lo scanner riesce a trasformare i punti acquisiti nelle singole misure, grazie all'utilizzo di punti di riferimento, detti *markers*, attaccati direttamente sull'oggetto o sul piano di misura, in un sistema di coordinate globali. Lo scanner è composto da diversi proiettori e configurazioni degli obiettivi della telecamera, che permettono la scansione all'interno di diversi volumi di misura. La scelta di un volume di misura più grande permette una più veloce scansione delle parti più grandi, riducendo il numero di acquisizioni consecutive.

Tuttavia, l'accuratezza delle acquisizioni diminuisce con l'aumentare del volume.

#### **4.2.1. Applicazioni di uno scanner tridimensionale**

Le scansioni tridimensionali vengono impiegate in molti campi come metodo di acquisizione dati consolidato.

In ingegneria meccanica, le scansioni tridimensionali sono spesso utilizzate per eseguire le ispezioni dei componenti, l'analisi di deformazione, l'ingegnerizzazione degli stampi e i processi di controllo della qualità.

Oppure, in ingegneria civile vengono impiegati per ispezionare i palazzi o nelle indagini forensi usano gli scanner ottici nelle scene del crimine...

L'impiego delle scansioni tridimensionali in campi così vasti ha portato a una certa specializzazione da parte dei produttori degli scanner nei campi specifici di applicazione.

Gli autori di questo progetto hanno impiegato lo scanner tridimensionale per la misura di impianti cranici.

Con l'impiego di tecnologie produttive rapide si può personalizzare la fabbricazione del prodotto. Tuttavia, i processi produttivi con l'implementazione di queste tecnologie sono limitati a causa di diversi fattori come una bassa accuratezza, superfici ruvide e costi di produzione elevati.

In alcuni campi, come la produzione di impianti cranici non è richiesta un'elevata accuratezza, è, invece, richiesta una superficie ruvida e produzione veloce individuale ed è per questo motivo che l'impiego degli scanner ottici tridimensionali in questo caso è la migliore scelta.

Le ispezioni degli impianti cranici sono obbligatorie perché sono prodotti medici essenziali e hanno la necessità di stabilire le inesattezze produttive e le possibili deformazioni post-processo.

Ci sono diversi fattori che rendono l'ispezione ottica tridimensionale il metodo favorito comparato alla Macchina di Misura a Coordinate [8].

Gli autori di questo progetto hanno eseguito la loro ricerca impiegando un impianto cranico [8]. I dati ottenuti dal CAD dell'impianto cranico vengono, solitamente, forniti sotto forma di una mesh poligonale nel formato *STL* [8]. Questo tipo di formato rende difficile l'importazione all'interno del software della *CMM* [8].

Il formato *STL* è usato, senza problemi, all'interno del software dello scanner tridimensionale perché permette l'ispezione molto più semplice [8].

L'impiego della Macchina di Misura a Coordinate porta un'accuratezza maggiore di quella richiesta e può provocare il danneggiamento della sonda a causa della rugosità della superficie in misure continue [8].

Gli autori di questa ricerca hanno, successivamente, presentato il metodo di ispezione per gli impianti crani [8]. Vengono eseguite due indipendenti scansioni di ogni lato dell'impianto e vengono poligonalizzate in mesh indipendenti [8].

Un passo necessario durante l'ispezione è la mutua registrazione dei dati scansionati e quelli ottenuti dal CAD [8].

La registrazione dei dati è compiuta in due passi. Per prima cosa, le mesh vengono registrate manualmente mediante marcatura di quattro punti comuni ad ogni mesh. I risultati di due mesh indipendenti vengono registrati separatamente. Successivamente, si esegue la registrazione semi-automatica più adatta.

#### 4.2.2 Valutazione sperimentale dell'incertezza

Per una Macchina di Misura a Coordinate è quasi impossibile calcolare un'incertezza universale indipendente dalla applicazione specifica a causa di complessi calcoli dovuti alla geometria tridimensionale per un numero elevato di punti misurati.

Le procedure di taratura per stabilire l'incertezza di misura delle CMM sono, solitamente, dipendenti dall'applicazione specifica e vengono impiegate in casi particolari dove è richiesta una misura molto precisa.

Le industrie domandano controlli universali impiegando la Macchina di Misura a Coordinate, perché le CMM sono veloci e forniscono informazioni sufficienti per l'accuratezza stabilita all'interno di un range di misura.

Per questo motivo, i test di accettazione e di ri-verifica vengono standardizzati.

I produttori delle Macchine di Misura a Coordinate specificano l'utilizzo di alcuni artefatti come il *ball-plate* per verificare l'incertezza; tuttavia, queste procedure non sono state né standardizzate né generalmente accettate utilizzando gli scanner tridimensionali [8].

I produttori di questi ultimi dispositivi hanno sviluppato i propri standard e svolgono dei controlli periodici per i loro clienti.

Si è cercato di trasferire la conoscenza della verifica della Macchina di Misura a Coordinate nel campo di scansioni tridimensionali.

Le prime verifiche sono state eseguite scansionando delle sfere o dei blocchi di riscontro.

Altri lavori si sono concentrati per creare artefatti tridimensionali per omologhe procedure di verifica. Sono stati scansionati e digitalizzati diversi blocchi di riscontro per verificare l'accuratezza ottenibile dallo scanner ottico.

Le scansioni sono state realizzate nel più piccolo volume di misura per ottenere un'accuratezza migliore possibile. Inoltre, il numero di scansioni consecutive è stato limitato a due, sufficienti per acquisire abbastanza dati e limitare gli errori durante la fusione delle scansioni.

La digitalizzazione e il post processing dei dati scansionati iniziano con una nuvola di punti dei punti acquisiti. Questa forma di dati non è utilizzabile per ottenere ulteriori informazioni, perciò si poligonalizza la nuvola di punti in una mesh poligonale tridimensionale.

Il processo di poligonizzazione può essere controllato con diversi parametri per ottenere la mesh voluta. Successivamente si rende più *smooth* la mesh eliminando il rumore prodotto dallo scanner e in ultimo la mesh viene controllata per trovare i possibili errori di triangolazione.

Si calcola una media delle distanze ottenute tra due lati opposti del blocco di riscontro per ottenere il risultato delle scansioni.

L'impiego di modelli matematici non ha portato all'evidenza di dipendenze sistematiche per l'incertezza.

#### ***4.2.3. Il problema dello strato di polvere opacizzante sulle parti scansionate***

Gli scanner ottici sono basati sulle acquisizioni di dati ottici, si presentano dei problemi quando si scansionano le parti che presentano superfici riflettenti o di colore scuro.

In alcuni casi, è necessario stendere uno strato di polvere opacizzante bianca sulla superficie per poter scansionare queste parti. Lo spessore dello strato della polvere opacizzante contribuisce inevitabilmente a errori sui dati scansionati.

Per limitare questo tipo di errore lo spessore della polvere opacizzante deve essere steso appropriatamente; tuttavia, questa definizione è molto soggettiva perché bisogna applicarne solo lo stretto necessario che è dipendente dall'esperienza acquisita dall'operatore.

Dopo diverse sperimentazioni, si è visto che lo strato della polvere opacizzante non ha un'influenza predominante sull'incertezza.

#### ***4.2.4. Scansione della sfera***

Successivamente alle prime considerazioni effettuate sul blocco di riscontro, si è deciso di scansionare una geometria più complessa, rappresentata da una sfera di metallo.

I dati necessari per la creazione della geometria possono essere ottenuti tramite una singola scansione, in questo modo si eliminano gli errori dati dalla fusione consecutiva delle scansioni.

I risultati ottenuti con le scansioni vengono confrontati con quelli ottenuti con una Macchina di Misura a Coordinate.

Dal confronto dei due risultati si è potuto constatare che l'accuratezza è migliorata notevolmente con l'eliminazione degli errori di fusione durante il post processing dei dati scansionati.

In conclusione, gli autori di questa ricerca hanno potuto constatare che con geometrie complesse uno scanner ottico tridimensionale è uno strumento valido alternativo alla tradizionale Macchina di Misura a Coordinate.

### ***4.3. Standard per testare la capacità di misura di un oggetto con forma libera***

Dall'iniziale sviluppo negli anni Settanta delle Macchine di Misura a Coordinate, le industrie insieme agli istituti metrologici hanno sviluppato delle procedure per verificare le performance di diversi tipi di *CMM*, che possono essere eseguite sia dai produttori che dagli utenti della Macchina di Misura a Coordinate.

La riferibilità delle misure delle Macchine di Misura a Coordinate è possibile solo utilizzando un metodo sostituzionale ben noto su artefatti tarati e impiegando tecniche virtuali avanzate della *CMM*. Le misure di componenti ad alta precisione associate a produzioni avanzate richiedono sempre nuovi sofisticati standard.

Fino ad adesso, i produttori della Macchina di Misura a Coordinate e i laboratori accreditati non sono stati capaci di offrire la riferibilità delle misure entro i limiti di incertezza richiesti perché non sono disponibili degli standard appropriati [9].

A parte per le misure tattili, la riferibilità delle misure tridimensionali ottiche è ancora un problema aperto, perché l'attestazione dell'incertezza di misura della specifica task, richiesta dagli standard internazionali come la normativa *ISO 9001*, non può essere fornita.

La riferibilità di artefatti di riferimento standard e le procedure sia per la taratura che per la verifica di sistemi ottici tridimensionali, al momento non esistono [9].

Alcune forme di verifica vengono eseguite sulle attrezzature da parte dei produttori dei sistemi di misura ma queste procedure non sono state validate per gli standard interni dell'industria. Nessun laboratorio nazionale o accreditato è coinvolto nella catena della riferibilità [9].

Per questo motivo la dimostrazione di conformità del pezzo dell'attrezzatura di misura non incontra i requisiti della normativa *ISO 14253-1*. Tutto ciò porta ad un aumento dei costi. In aggiunta, non è possibile distinguere in modo affidabile tra parti accettabili e no, specialmente nel caso in cui le tolleranze sono piccole rispetto all'incertezza di misura.

Sono stati sviluppati una serie di artefatti di riferimento, permettendo l'esecuzione dei sistemi di misura tridimensionali su base ottica, come proiezione a bande, scanner laser e altri sistemi senza contatto, che devono essere verificati rispetto ai requisiti della superficie ben noti.

Lo scopo degli artefatti è di dimostrare la capacità delle misure dimensionali delle tecnologie di misura tridimensionali a base ottica, di rilevare forme specifiche e condizioni di svariate superfici al posto degli standard universali.

Tutti gli standard presentati sono progettati secondo i requisiti assegnati dall'industria.

#### *4.3.1. Standard e procedure esistenti documentate dello Stato dell'Arte*

Dal 1994 in avanti la normativa *ISO 10360-3: "Geometrical Product Specifications (GPS) acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM)"* è disponibile per assistere alla verifica della performance delle macchine [9].

Fino al 2011 erano disponibili sei parti di questa normativa, ogni parte è specializzata in un diverso campo tecnico.

Tuttavia, questi standard non possono essere applicati a un Sistema di Misura a Coordinate ottico, come quello che applica la triangolazione laser o lo scanner di proiezione a bande.

Nel 2011 viene introdotta una nuova parte nella normativa *ISO 10360-7: "CMMs equipped with imaging probing systems" [9]*.

Nel 2002 è stata introdotta una linea guida tedesca, la *VDI/VDE 2634 1*. Questa guida si riferisce agli scanner tridimensionali ottici e, al momento, consiste di tre parti:

- 1- Sistemi di immagini di sonda punto a punto.
- 2- Sistemi ottici basati su scansioni di aree.
- 3- Sistemi a vista multipla basati su scansioni di aree.

Questa linea guida definisce un metodo particolare di misura degli artefatti di riferimento, tipicamente utilizzata per definire lunghezze spaziali e semplici forme ad elevata accuratezza. Tuttavia, la linea guida non copre la performance dei sistemi di misura per la verifica di superfici a forma libera.

Per garantire la riferibilità nelle misure tridimensionali vengono impiegate, tipicamente, le seguenti tipologie di procedure:

- 1- Test di verifica della prestazione.
- 2- Tarature specifiche per il task.
- 3- CMM virtuale.

I test delle performance sono utilizzati come strumento per confermare l'incertezza di misura dichiarata dal produttore della *CMM*. Per eseguire questi test vengono impiegati artefatti standard monodimensionali, bidimensionali e tridimensionali. I test hanno le caratteristiche di essere semplici, relativamente veloci e finanziariamente economici. Sono largamente applicati nell'industria per assicurare la riferibilità delle misure industriali [9].

La taratura del task, che include il principio del comparatore, è usata per task di misure specifiche, dove sono richieste piccole quantità da misurare o da tarare ad elevata accuratezza. Il misurando è confrontato con uno tarato di forma e dimensione standard.

Questa procedura non può essere impiegata per forme complesse e dispendiose in termini temporali. Di conseguenza, tipicamente, non viene impiegato per assicurare la riferibilità delle misure industriali di precisione.

La *CMM* virtuale rappresenta il livello più alto per assicurare la riferibilità delle misure a coordinate. È l'unico metodo che consente di eseguire le tarature impiegando una *CMM*. Gli errori casuali significativi e sistematici della *CMM* sono modellati per caratterizzare il comportamento cinematico della *CMM* e il suo processo di sondaggio. Tutti i parametri di input devono essere determinati in modo riconducibile alle Unità di Misura del Sistema Internazionale. Il metodo per determinare i parametri di input richiede, relativamente, molto tempo ed è piuttosto costoso.

La *CMM* virtuale è utilizzata dai laboratori per tarare modelli standard complessi bidimensionali e tridimensionali.

Possono essere impiegati una varietà di artefatti standard per tarare e testare le performance delle *CMM*. Esistono artefatti commerciali come il blocchetto di riscontro, cilindri interni ed esterni etc., che possono essere utilizzati da soli o combinati in modo differente.

In aggiunta, sono stati sviluppati diversi artefatti particolari bidimensionali e tridimensionali. Molti dei quali consistono in differenti configurazioni spaziali o planari. In molti casi questo tipo di artefatti sono forniti con sfere interne ed esterne.

La sfera è l'elemento corrente più comunemente utilizzato per determinare le caratteristiche metrologiche dei sistemi di misura ottici tridimensionali come la proiezione a bande o scanner laser e di altri sistemi senza contatto [9].

La verifica di questi sistemi di misura senza contatto è complessa e vengono sfruttate delle guide utili come la normativa VDI/VDE 2643 2, che descrivono i metodi per dimostrare la capacità utilizzando artefatti test con caratteristiche prismatiche, come sfere e piani [9].

Tuttavia, le guide non sono estese alla verifica totale quando le superfici a forma libera sono misurate usando tecniche su base ottica.

Al fine di verificare la maggior parte del volume di misura, gli artefatti di verifica devono essere misurati in alcune posizioni entro il volume di misura.

La normativa VDI/VDE 2634 dichiara che devono essere scelte almeno tre posizioni arbitrarie per le misure, ma raccomanda di utilizzare dalle cinque alle sette posizioni.

In particolare, per un sistema scanner a vista multipla il numero minimo richiesto dalla normativa è rappresentato dal numero totale delle scansioni risultante da almeno cinque posizioni differenti del sensore per almeno tre posizioni degli artefatti.

Questo tipo di approccio richiede molto tempo e comporta costi elevati.

Un laboratorio (*MIRS/UM-FS/LTM*) ha creato il progetto del primo artefatto tridimensionale, che è rappresentato dall'artefatto di verifica tetraedrico.

Lo scopo di questi artefatti è analizzare la performance dei proiettori a bande e dispositivi di misura ottici tridimensionali simili sia per scansione singola che multipla.

Allo scopo di minimizzare il tempo di verifica e di essere ancora conforme con i requisiti standard, è stato progettato un nuovo artefatto combinando i vantaggi degli artefatti del *ball-cube* e *ball-bar*. Normalmente, le sfere nel retro della *ball-cube* sono nascoste ai sensori di misura. Muovendo la sfera dal retro all'interno dell'artefatto, questo problema viene risolto. Questo artefatto spaziale è applicabile per verifiche singole così come per sistemi scanner a base ottica a vista multipla. Permette di confrontare solo tre posizioni di misura, al posto delle sette, con un singolo posizionamento dell'artefatto spaziale, riducendo il tempo di verifica in modo significativo.

#### **4.3.2. Progettazione dell'artefatto**

Il nuovo artefatto ha la forma geometrica di un tetraedro irregolare. Consiste in sei tubi, di cui tre lunghi e tre corti, e quattro sfere ceramiche, usati come elementi sonda.

Lo scopo di questo progetto è ottenere uno standard spaziale con un numero minimo di elementi sonda, che possono essere scansionati da uno scanner ottico in una singola scansione. Questo artefatto viene progettato in due dimensioni differenti per essere in grado di analizzare diversi range di misura, comunemente disponibili, per i sistemi di proiezione a bande commerciali. Le telecamere di questi sistemi possono essere configurate in diverse posizioni e le loro caratteristiche metrologiche possono cambiare quando si lavora in diversi range di misura.

#### **4.3.3. Incertezza di misura**

I principali componenti che influenzano l'incertezza standard, risultati dalla misura eseguita, sono la combinazione: dell'incertezza di taratura dell'artefatto, dell'incertezza causata dalla deriva delle posizioni spaziali delle sfere, dall'incertezza data dalle influenze ambientali e dall'incertezza dell'indicazione del risultato del dispositivo sotto esame, che consiste in risoluzione e ripetibilità [9]. La componente ambientale tiene in conto del coefficiente di espansione termica dell'artefatto e le dure condizioni ambientali.

#### **4.3.4. Artefatto a forma libera**

Il concetto base dietro all'artefatto a forma libera è una superficie che può essere utilizzata per dimostrare la performance di questi sistemi di misura della forma libera, ma in un modo più avanzato rispetto alle indicazioni fornite dalle linee guida o dagli standard.

È stato prodotto un modello di progettazione assistita dal computer (CAD) della superficie, che è stato possibile utilizzando macchine con tecniche di alta precisione. Di seguito, si esegue una misura specifica della CMM impiegando una sonda tattile. È importante considerare la necessità di avere un'incertezza di misura della CMM molto maggiore rispetto alla corrente capacità offerta dai Sistemi di Misura ottici tridimensionali.

Nel modello si è utilizzato un artefatto che presenta forme geometriche sia convesse che concave per ottenere una forma libera più complessa.

#### **4.3.5. Misura e taratura della superficie dell'artefatto**

L'approccio adottato per la misura della superficie include la produzione di una nuvola di punti, ottenuti dalla superficie superiore dell'artefatto.

Ogni set di dati, considerati per ogni strumento, è analizzato adoperando il pacchetto software usato per eliminare le discrepanze dovute al processo.

Si intende catturare la maggior superficie possibile dell'artefatto impiegando delle misure ottiche.

Ogni set di dati della nuvola di punti viene poligonalizzato per produrre una superficie continua.

Per ridurre la densità dei punti vengono utilizzati dei filtri applicati alle curvature e lo smoothing della superficie.

I parametri di processo rimangono costanti per ogni set di dati.

Ogni set di dati poligonalizzato viene allineato al modello CAD impiegando il miglior adattamento del processo di allineamento, includendo tutti i punti dati della superficie.

Il metodo del miglior adattamento viene utilizzato perché è rappresentativo di molti processi di misura delle forme libere.

Non è stata, ancora, progettata nessuna analisi a lungo termine né sono stati svolti standard industriali.

Gli autori di questa sperimentazione hanno notato che il confronto con i sistemi ottici ha mostrato una deviazione più alta dai valori di riferimento, tutto ciò può essere influenzato dall'accuratezza e dall'affidabilità dei dispositivi ottici applicati, piuttosto che da standard qualitativi impropri [9].

In aggiunta, hanno notato una mancanza di disponibilità di artefatti di verifica per quantificare indipendentemente la performance dei sistemi di misura dimensionali 3D.

Le future investigazioni dovrebbero concentrarsi su stabilità e sensibilità degli artefatti usati in condizioni ambientali rigide.

#### 4.4. L'impiego di blocchi di riscontro per la valutazione di scanner ottici 3D

Nell'attuale paragrafo gli autori di questa differente ricerca vogliono assicurare la qualità delle parti prodotte, che rappresenta un aspetto fondamentale nel campo industriale e nell'adozione, sempre più diffusa, dei sistemi ottici tridimensionali nelle verifiche dimensionali.

La capacità di queste tecnologie di acquisire una grande quantità di punti in un tempo, relativamente, breve, è fondamentale. In aggiunta, la presenza delle parti a forma libera rende queste tecniche molto invitanti.

Gli scanner laser sono, correntemente, impiegati per le ispezioni di geometrie tridimensionali e per le applicazioni biomediche.

Gli scanner a luce strutturata sono adottati come tecnica consolidata nella metrologia industriale per la verifica delle tolleranze e, in particolare, nelle analisi che coinvolgono confronti tridimensionali rispetto ai modelli CAD e per le misure di getti nell'industria dell'*automotive* [10].

Dal punto di vista della riferibilità, gli scanner ottici tridimensionali presentano diverse limitazioni, dovute alle fonti di errore coinvolte nel processo di misura. Le valutazioni delle prestazioni, al momento, vengono svolte riferendosi alla normativa VDI/VDE 2634 part 2 e part 3, impiegando sfere, blocchi di riscontro in metallo o ceramica misurati scansionandone il volume.

Questi standard sono adatti solo per i test di prima accettazione perché le geometrie e i materiali non rappresentano al meglio i casi industriali più complessi e i risultati non possono diventare generalmente validi per altri task di misura.

Uno dei limiti più grandi delle tecniche a base ottica è la loro dipendenza dalle caratteristiche della superficie, a causa della diversa interazione tra i sistemi di misura e le proprietà ottiche dei differenti materiali e dei colori dei componenti [10].

La riferibilità degli scanner a base ottica e la valutazione dell'accuratezza produttiva di un processo di produzione additiva sono di fondamentale importanza nel contesto della quarta rivoluzione

industriale e sono, molto spesso, strettamente correlati tra loro e grazie alle proprietà degli scanner ottici portano dei vantaggi nella verifica di parti prodotte in modo additivo.

Gli autori di questa ricerca hanno selezionato un oggetto di geometria semplice che permette una taratura con una bassa incertezza impiegando una Macchina di Misura a Coordinate tattile.

Gli autori del progetto hanno deciso di utilizzare come artefatto un blocchetto di riscontro, perché permette la misura della lunghezza sia unidirezionalmente che in due direzioni, riuscendo con successo a correggere gli errori sistematici nelle scansioni tomografiche computerizzate.

Le lunghezze bidirezionali sono utili per il rilevamento degli effetti dovuti all'interazione tra le proprietà ottiche del pezzo e dello strumento di misura.

Lo scanner a luce strutturata è uno scanner a luce blu strutturata con due telecamere e un proiettore. L'obiettivo è l'acquisizione dell'intero oggetto di riferimento, tramite scansioni con il sensore a diverse angolazioni per un'acquisizione di scansioni a vista multipla.

Si può utilizzare, anche uno scanner basato sulla fotogrammetria. Come risultato di questa analisi è stata considerata una mesh, perché risulta più semplice da gestire rispetto ad una nuvola di punti. Tuttavia, l'errore che si manifesta deriva dall'approssimazione e dalla semplificazione della mesh, dipendente dall'algoritmo adottato e dal numero di punti acquisiti.

Ogni metodo utilizzato presenta diversi effetti attribuibili a cause diverse.

L'importanza dell'utilizzo dei sistemi scanner tridimensionali è relativa alla quantità di informazioni che questi sistemi possono fornire [10].

Uno scanner ottico tridimensionale provvede a fornire informazioni per un'analisi dimensionale in 2D e 3D, che permette di rilevare le criticità del processo produttivo.

L'impiego di scanner tridimensionali, rispetto all'impiego di una Macchina di Misura a Coordinate, permette di estendere l'analisi di una ricostruzione generale. È di fondamentale importanza per la verifica del processo produttivo capire dove sono posizionate le deviazioni, per prendere al meglio la radice della causa del guasto [10].

In alcuni casi, è possibile osservare che alcune aree del pezzo sono maggiormente soggette al processo produttivo, ciò permette al produttore di capire le principali criticità occorse in quelle zone.

Lo scanner a luce strutturata si è rilevato, in questo caso, lo scanner più affidabile in termini di errori e incertezza registrati.

La geometria del blocchetto di riscontro ha messo in evidenza l'interazione ottica tra lo scanner e l'oggetto, che deve essere tenuto in considerazione nell'incertezza di misura.

## ***4.5. Valutazione dell'incertezza di una nuvola di punti tridimensionale***

La metrologia è considerata uno strumento fondamentale nel contesto dell'industria 4.0, dove dati affidabili sono necessari per realizzare strategie produttive. La metrologia sta rompendo lo stigma di attività non produttiva e sta ottenendo una posizione come tecnologia abilitante, che porta valore ad ogni passo del processo produttivo.

Tutto ciò si nota dal fatto che sono richiesti dati delle misure ottenute da diversi sensori, che includono i dati dimensionali, impiegati per monitorare il completo processo produttivo e l'aggiustamento in tempo reale dei parametri di processo, inclusi la creazione e l'utilizzo metrologico del *digital twins*.

Negli ultimi tempi, si sta verificando un'integrazione massiva di sensori ottici tridimensionali all'interno dei processi produttivi, sostituendo le tradizionali Macchine di Misura a Coordinate (CMM).

L'assunzione di milioni di punti in pochi secondi da parte dei sensori ottici tridimensionali è scontata, il processo che converte automaticamente i dati in informazioni significative e che assicurano la qualità di questi dati rimane una sfida [11].

Gli autori di questa ricerca hanno presentato un approccio pratico per affrontare queste sfide.

La garanzia della qualità dei dati conta sull'istituzione della riferibilità metrologica, valutata seguendo le specifiche tecniche fornite dalle normative *ISO 15530-3* e *ISO 15530-4*, che richiedono una valutazione dell'incertezza di misura e la realizzazione di una catena intatta di taratura dei risultati di misura rispetto a un valore di riferimento.

Considerando la valutazione dell'incertezza di misura la *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) JCGM 100:2008* stabilisce delle regole generali per la valutazione e l'espressione dell'incertezza nelle misure, che possono essere applicate ad un ampio range di misure [11].

La normativa *GUM* propone di adottare una procedura di misura generale, che sembra chiara e semplice ma può essere molto difficile da implementare per la valutazione di sistemi di misura complessi.

I sistemi ottici tridimensionali rappresentano una nuova tecnologia se vengono confrontati con le tradizionali *CMM*, inoltre le loro fonti di errore di misura sono, ancora, in fase di ricerca.

Le linee guida tedesche per i sistemi ottici tridimensionali, cioè la *VDI/VDE 2634 series part 2 e 3*, tentano di provvedere ad una procedura per confrontare le performance di diversi sistemi di accettazione e di ri-verifica degli stessi, ma non tiene in considerazione di tutte le fonti di incertezza potenziali mentre si opera in condizioni ambientali sfavorevoli [11].

In aggiunta, la mancanza di procedure di misura per capire completamente come i sistemi ottici tridimensionali si comportano sotto differenti scenari di misura, limita la possibilità di sviluppare modelli matematici di alto livello per questi sistemi.

La sfida di convertire dati densi in informazioni significative, in pochi secondi, coinvolge la capacità di provvedere a processi decisionali in tempo reale e aggiustare costantemente i parametri di processo per un processo con zero difetti.

Tuttavia, quando un sistema ottico 3D è implementato in un processo produttivo, catturare milioni di punti e processarli velocemente rimane una sfida.

In aggiunta, una recente pubblicazione di una normativa *ISO Standard 23952:2020 "Automation systems and integration-Quality Information Framework (QIF)-An integrated model for manufacturing quality information"* apre una porta ad un controllo automatico della qualità in linea in tempo reale [11].

Questa normativa ha permesso di definire un nuovo schema di linguaggio che definisce, associa e organizza la qualità e le informazioni metrologiche e permette lo scambio lungo l'intero processo produttivo delle misure di qualità dei dati metrologici [11].

Per definire il prodotto, la normativa *QIF* include la terza parte della normativa *ISO QIF*, cioè *QIF Model-based Definition (MBD)*, definendo un formato di dati digitali che trasmette una parte della geometria, tipicamente chiamata modello *CAD* e, l'informazione che i processi produttivi di qualità a valle devono utilizzare, come le informazioni sulla produzione del prodotto (*PMI*) [11].

Tutto ciò significa che *MBD* permette di collegare le informazioni relative a *Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T)* al modello *CAD*.

Il modello *CAD*, così creato, permette al software metrologico di creare automaticamente o un piano di ispezione o i risultati del processo decisionale disponibile dai dati tridimensionali.

In aggiunta, le informazioni del modello *QIF MBD* permettono di convertire i dati catturati in informazioni significative usando metodologie automatiche di elaborazione dati.

*MBD* è un modello digitale del prodotto, che definisce le specifiche e i requisiti del prodotto ed è la pietra miliare del *Model Based Enterprise (MBE)*, dato che *MBE* impiega *MBD* per definire i requisiti e le specifiche del prodotto al posto dell'utilizzo di documenti di carta stampata, come fonte per tutte le attività ingegneristiche, incluse quelle metrologiche durante la produzione del prodotto ed attraverso il suo ciclo di vita [11].

Differenti approcci, svolti in diversi studi, suggeriscono la valutazione dell'incertezza delle nuvole di punti tramite l'analisi della registrazione delle caratteristiche spaziali oppure con metodi associati alla posizione, dimensioni e forma della nuvola di punti o, ancora, utilizzando studi di propagazione probabilistica delle incertezze in un'ispezione tridimensionale, inoltre, molti altri metodi sono stati impiegati per la valutazione dell'incertezza.

Quando le fonti di incertezza per il processo di misura possono essere accertate, è relativamente semplice seguire l'ordine della struttura dell'incertezza data da *GUM JCGM 100:2008*.

In ogni caso, per sistemi ottici tridimensionali e *CMM*, è estremamente difficile da capire come ogni probabile fonte di incertezza influisce sul risultato finale.

Per questo motivo, vengono utilizzati altri approcci per stimare l'incertezza nelle Macchine di Misura a Coordinate, seguendo, prevalentemente, le linee guida date dalla normativa *ISO 15530*. La *parte uno* di questa normativa provvede ad un tutorial molto informativo, le *parti tre e quattro* forniscono le procedure seguite dall'industria.

Il progetto *“Evaluating the Uncertainty in Coordinate Measurement” entro il programma di European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR)* ha sviluppato la ricerca per elaborare le due parti mancanti della normativa *ISO 15530*, la *parte due*, che si occupa dei metodi inversi e ripetuti e, la *parte cinque* che applica un metodo basato su informazioni preventive e sul giudizio di esperti [11].

Per sistemi ottici tridimensionali, i produttori di sistemi impiegano la *VDI 2634 parts 2 e 3* per caratterizzare ed eseguire i test di accettazione del prodotto prima della consegna dello stesso, ma ciò non significa che è stata eseguita una caratterizzazione del sistema per una robusta valutazione dell'incertezza di misura.

La specifica tecnica *ISO 15530-3* è un metodo sostitutivo, che semplifica la valutazione dell'incertezza esercitata tramite le similitudini tra le dimensioni, le forme del componente e di una parte di riferimento tarata.

È basata sulla valutazione statistica degli errori di misura osservata con riferimento al valore tarato della parte.

L'utente deve eseguire un numero rilevante di misure, sotto diverse condizioni, che possono capitare misurando il reale componente.

Questo approccio permette di tentare di racchiudere sia i contributi intrinseci che estrinseci dell'incertezza, anche se è pieno di difficoltà.

A causa delle similitudini richieste tra il pezzo prodotto e quello standard tarato, questo approccio è molto arduo e dispendioso per la metrologia su larga scala.

Nonostante ciò, è un approccio affidabile per una produzione in serie, di solito per componenti di piccole e medie dimensioni, perché è conveniente produrre e tarare una parte di riferimento per scopi di valutazione dell'incertezza.

Questo approccio determina quattro quantità in input:

1. L'incertezza standard associata all'errore sistematico del processo di misura.
2. L'incertezza standard associata alla procedura di misura.
3. L'incertezza standard associata all'incertezza della taratura del pezzo.
4. L'incertezza standard associata al materiale e alle variazioni nella produttività.

La legge di propagazione dell'incertezza è applicata per ottenere l'incertezza standard combinata in accordo con *GUM JCGM 100:2008* e il risultato è moltiplicato per un fattore di copertura appropriato che porta ad un'incertezza espansa.

La specifica tecnica *ISO 15530-4* introduce un metodo per valutare l'incertezza specifica del compito da eseguire basato sulla simulazione al computer.

Gli strumenti di misura come le *CMM* e i sistemi ottici tridimensionali sono strumenti multiuso, significa che le incertezze potenziali di misura variano con il compito assegnato, con l'ambiente, con l'operatore e con le metodologie di misura scelte [11].

L'incertezza specifica del compito nelle Macchine di Misura a Coordinate è l'incertezza di misura che risulta quando una specifica caratteristica è misurata impiegando un piano di ispezione specifico.

Questo approccio, molto più complesso rispetto all'approccio *GUM*, impiega un metodo di simulazione eseguito al computer per la stima dell'incertezza per un particolare task di misura.

Il modello di simulazione o il modello di strumentazione virtuale genera punti perturbati, che rappresentano una stima dello strumento di misura particolare, che avrebbe segnalato i punti controllati. Questo processo è eseguito diverse volte per poter creare dei risultati di simulazione dell'incertezza di misura.

Il corrente *Stato d'Arte* mostra che l'approccio della normativa *ISO 15530-4* è, già, stato applicato agli strumenti di misura come le *CMM*, mentre la modellazione dei sensori ottici è ancora in fase di sviluppo dalla comunità ricercatrice.

Il metodo virtuale applicato alle *CMM* è comunemente chiamato Macchina di Misura a Coordinate Virtuale (*VCMM*), che svolge simulazioni di misura punto a punto, simulando la strategia di misura, le condizioni di misura e il comportamento fisico della *CMM* con i maggiori contributi di incertezza che influiscono sulla misura.

L'approccio *MBD* permette di affrontare la sfida di convertire i dati densi in informazioni significative in un poco tempo, entro la produzione in linea, permettendo al processo decisionale di essere rapido all'interno dell'ambiente produttivo.

L'obiettivo dell'approccio *MBD* è di ottenere, a valle della produzione della parte, una singola fonte delle operazioni di produzione, molti produttori *CAD* forniscono l'approccio *MBD* in un formato privato, rendendo l'interoperabilità tra i sistemi una sfida.

Un formato *MBD* generale esiste ma rimangono diverse questioni aperte per una definizione completa dell'approccio *MBD*.

Le normative come *ASME Y14.41* e la *ISO 16792* permettono di documentare, tramite delle annotazioni, come un modello dovrebbe essere definito.

Queste normative aiutano a capire come interpretare i dati dentro al modello, ma non documentano l'ammontare delle informazioni necessarie che il modello deve contenere.

Il processo metrologico basato sull'approccio *MBD* inizia con la creazione di un modello *CAD* tridimensionale con informazioni *PMI*, che dovrebbero essere lette sia dall'uomo che dalla macchina.

Il modello tridimensionale con *PMI* dovrebbe contenere tutte le informazioni geometriche *GD&T* relative al componente misurato, così come le informazioni relative alla distinta base (*BOM*), la finitura

della superficie, i simboli di saldatura, i dati del piano del processo di misura o produzione, le note legali, di proprietà ed altri dati digitali.

L'associazione tra il modello *CAD* e *MBD* è richiesta per avere un modello intelligente e completo, che permette la programmazione automatica e il post processing.

La *CMM* è configurata virtualmente e una volta che il file *MBD* è importato e un set di regole sono applicate e abbinata alla *CMM* configurata, viene generato automaticamente un programma con l'aiuto di questi approcci digitali.

In seguito, viene eseguita una ottimizzazione per ridurre il numero dei cambi della sonda e per minimizzare la lunghezza del percorso condotto dalla *CMM*.

Nella fase del post processing, l'approccio *MBD* permette l'analisi rapida della nuvola di punti e la valutazione dei dati di misura.

Durante il processo di valutazione automatico, la nuvola di punti acquisita è allineata al modello *CAD* e un processo segmentato automatico è eseguito utilizzando i dati *MBD* disponibili. In questa fase ogni punto misurato è associato alle corrispondenti caratteristiche geometriche.

Successivamente, le caratteristiche geometriche sono corrette impiegando metodi di regressione lineare, rifiutando possibili outliers.

Infine, la vera relazione tra le caratteristiche corrette viene stimata attraverso un'interpretazione completamente automatica e una valutazione precedentemente definita da *GD&T*.

Così il processo di conversione di dati in informazioni metrologiche significative è eseguito automaticamente in pochi secondi.

I passi principali della metodologia sono esposti di seguito:

1- Valutazione di *GD&T* misurata: misura automatica di una nuvola di punti tridimensionale, valutazione e analisi statistica dei risultati ottenuti con *GD&T* basata sull'approccio *MBD*. Da questi dati viene estratta l'incertezza standard associata con la variabilità del processo di misura.

2- Valori di riferimento *GD&T*: in questa fase si ottiene l'incertezza standard associata con l'incertezza di taratura della strumentazione di misura.

3- Metodo *ISO 15530-3*: la valutazione dell'incertezza specifica del compito di ogni valore *GD&T* ottenuto dalla misura della nuvola di punti tridimensionale. È eseguita in accordo con le specifiche tecniche della normativa *ISO 15530-3*. Da questi dati si ottiene l'incertezza standard associata agli errori sistematici del processo di misura.

Di seguito viene mostrata l'implementazione sperimentale della metodologia esposta:

1. Conversione della nuvola di punti in una mesh: la nuvola di punti misurata è convertita in un formato mesh per effettuare la gestione dei dati, rendendo così i passi successivi più robusti e precisi. Il formato mesh è in grado di ottenere risultati più accurati per le seguenti fasi.

2. La mesh tridimensionale è allineata al modello *CAD* disponibile, necessario per assicurare l'accuratezza e la robustezza del metodo di valutazione basato sull'approccio *MBD*, perché determina la corretta parametrizzazione con il metodo di segmentazione della nuvola di punti.

Una migliore accuratezza è richiesta per ottenere dei risultati affidabili.

3. È eseguita una segmentazione automatica della caratteristica geometrica e la mesh è divisa in multiple nuvole di punti corrispondenti ad ogni caratteristica geometrica, con l'aiuto delle informazioni geometriche nominali estrapolate dal *CAD*.

4. Il processo di regolazione delle caratteristiche geometriche reali: i dati segmentati dalla nuvola di punti della geometria specifica sono costruiti sulle corrispondenti caratteristiche geometriche, impiegando i metodi di regressione lineare, rifiutando i possibili outliers.

Impiegando dei filtri adatti si eliminano i punti di disturbo.

5. Valutazione *GD&T*: è eseguita una valutazione automatica di *GD&T* per ogni caratteristica misurata, con l'aiuto di annotazioni e relazioni definite, nominalmente, seguendo le specifiche tecniche fornite dalla normativa *ISO 1101*.

Successivamente si valuta l'incertezza impiegando la normativa *ISO 15530-3*.

I risultati ottenuti si interessano di ogni componente di incertezza che cade nella variabilità del processo di misura, come la ripetibilità degli strumenti, la strategia dell'elaborazione dei dati *MBD* o la potenziale deriva termica e altri contributi minori [11].

Si vuole evidenziare che i sistemi ottici tridimensionali sono, relativamente, una nuova tecnologia e le loro fonti di errore sono ancora sotto esame.

L'influenza di potenziali fonti di errore dell'incertezza, come le condizioni della luce, le proprietà dei materiali e delle misure, l'orientamento del sistema e la sua risoluzione, la temperatura ambientale, il volume misurato e gli effetti cromatici, complica il processo per la valutazione dell'incertezza di misura in larga misura.

Gli autori di questa ricerca hanno individuato i tre maggiori contributi di incertezza secondo le specifiche tecniche della normativa *ISO 15530-3* che sono:

- La variabilità del processo di misura.
- L'incertezza della taratura della *CMM*.
- Gli errori sistematici di incertezza, che sono risultati come fattore principale sull'incertezza totale.

Una limitazione della metodologia presentata da *Kortaberria et al.*, è la scalabilità su grandi componenti, dove i valori di riferimento con la *CMM* sono difficilmente ricavabili [11].

## **4.6. Valutazione dell'idoneità della catena di processo dei Sistemi di Misura tridimensionali**

Nell'industria manifatturiera 4.0, i diversi strumenti e metodi di misura sono decisivi per assicurare la qualità del prodotto. Questi strumenti devono incontrare i bisogni tecnologici della complessa catena di produzione. Per questo, la gestione effettiva dei dati di misura (*MDM*) è essenziale per ottimizzare il controllo della qualità negli ambienti industriali 4.0.

Le misure dimensionali sono essenziali per l'avanzamento delle tecnologie produttive, perché migliorano la qualità del prodotto e aumentano la produttività.

Le scansioni tridimensionali, spesso sono state trascurate, ma al momento si stanno affermando nella progettazione, ispezione e controllo della qualità.

Questa tecnologia impiega metodi senza contatto, modelli fisici digitalizzati in formato *CAD* attraverso software specializzati. Con l'aiuto di sensori leggeri e portatili, è permessa la ricostruzione rapida e senza contatto di geometrie intricate in pochi secondi, offrendo vaste applicazioni della metrologia nella produzione.

I principi di misura basati sulla triangolazione offrono scalabilità e permettono lo sviluppo di scanner tridimensionali per diversi intervalli di scala.

È presente una crescente inclinazione nello sfruttare i benefici proposti dalle tecnologie di misura ottiche. I dispositivi di ispezione intelligenti automatici e senza contatto riducono i tempi ciclo; di

conseguenza, la durata dell'ispezione è minimizzata e si assicura continuamente il monitoraggio del processo di qualità.

Mentre i metodi relativi alla Macchina di Misura a Coordinate tattile (*CMM*) forniscono un'accuratezza alta, i loro limiti diventano evidenti quando si confrontano con superfici di forme complesse e irregolari.

Le qualità più importanti in un processo di misura includono la velocità, l'adattabilità e la trasportabilità.

I sistemi di misura tridimensionali incontrano i criteri sopra citati, se sono caratterizzati da procedure lineari, densità di dati elevati, capacità di ispezione, il reverse engineering integrato e l'indipendenza dalla rigidità dell'oggetto.

Sono presenti due categorie dei sistemi di misura tridimensionali, quelli a base laser e quelli ottici.

Una catena di processo è definita come una pianificazione di processi in sequenza per ottenere un prodotto, trasformandone una parte per incontrare le specifiche tecniche richieste come la geometria, la forma e altre proprietà.

Nel contesto di sistemi di misura ottici, queste tecnologie sono integrate in uno stato avanzato nella catena del processo e sono adoperati nello sviluppo di prodotti e processi produttivi.

Con l'integrazione di sistemi di misura ottici si migliora il tempo, i costi e la qualità, migliorando, inoltre, la competitività delle compagnie produttive.

Questi sistemi vengono impiegati maggiormente nelle ispezioni automatiche, facilitati dai potenti sistemi di elaborazione dati, che caricano automaticamente i dati per una maggiore precisione dei sistemi di controllo della qualità e per rendere le operazioni, globalmente, più snelle.

Il ruolo della metrologia, definita come scienza della misura, sta evolvendo in modo significativo grazie alle numerose innovazioni che avvengono nella catena di processo produttivo.

L'adozione delle tecnologie di misura ottiche per l'automazione nella ricerca e nella produzione è stata esaminata per un lungo periodo prima della quarta rivoluzione industriale, sottolineando la sua importanza duratura nel tempo.

I sistemi di misura ottici tridimensionali giocano un ruolo cruciale nell'industria moderna assicurando la precisione e la qualità delle parti complesse.

Gli autori di questa ricerca si sono concentrati sui sistemi di misura ottici tridimensionali, un sottosistema senza contatto, strumenti di misura non distruttivi progettati per catturare digitalmente la forma e le dimensioni degli oggetti.

Questo sistema agisce seguendo il metodo dei principi della triangolazione ed è comprensivo di due telecamere congiunte con un proiettore posizionato centralmente. Il proiettore emana una struttura a griglia prestabilita sull'oggetto in esame, in seguito viene rilevato dalle telecamere.

Lo scanner ottico digitale tridimensionale, posizionato di fronte all'oggetto sotto esame, cattura l'oggetto tramite immagini in diverse prospettive. Seguendo il processo di digitalizzazione, viene generato un modello *CAD*, consentendo misure successive impiegando software specifici nella scansione tridimensionale.

Avvalendosi di scanner tridimensionali, l'oggetto è digitalizzato e i dati sono trasferiti per creare un modello solido. Questi sistemi sono utilizzati come strumenti efficienti per una veloce e sicura produzione, quando sono impiegati insieme alla prototipazione rapida e alle tecnologie additive.

In metrologia, i sistemi di misura ottici tridimensionali sono apprezzati per la loro velocità e praticità nelle misure di oggetti con geometrie complesse.

Trovano applicazione nelle industrie come quelle di fusione, dove aiutano nella misura e nell'ispezione dei getti e di una serie di altri oggetti di geometria complessa, come i componenti dei motori a reazione.

Oltre alle loro applicazioni nelle misure e ispezioni, questi sistemi vengono impiegati in medicina, odontoiatria, nella conservazione del patrimonio culturale, esplorazioni nella paleontologia e contribuiscono nell'industria della moda.

L'integrazione delle informazioni industriali pone requisiti specifici per i sistemi di misura, ad esempio come dispositivi di input nell'idoneità della catena di processo.

Il problema della riferibilità e l'incertezza di misura nei sistemi di misura ottici tridimensionali rimangono in gran parte irrisolti.

È presente una evidente assenza di artefatti di riferimento tracciabili o protocolli di verifica e taratura e standardizzata per questi sistemi [12].

Anche se è presente una linea guida tedesca "VDI/VDE 2634 part 3- Optical measuring systems, multiple view systems based on area scanning" che offre raccomandazioni, non rappresenta uno standard universalmente accettato [12].

Devono essere ancora stabilite le procedure standard per determinare l'incertezza di misura nei sistemi di misura ottici tridimensionali.

I sistemi di misura ottici tridimensionali sono intrinsecamente complessi, sono presenti molti parametri influenti.

Queste fonti di incertezza di misura possono essere divise in cinque differenti categorie:

1. L'ambiente, che comprende la temperatura, le vibrazioni, l'illuminazione e la polvere.
2. Le persone, stress e competenza.
3. Hardware.
4. Oggetto da misurare, comprensivo di dimensioni e geometria, materiale e strato di polvere opacizzante che riveste l'oggetto.
5. Software, poligonalizzazione, interpolazione.

Ricerche passate hanno condotto indagini sull'influenza degli effetti delle condizioni atmosferiche sulle misure e dell'influenza della temperatura.

Il *National Physical Laboratory (NPL)* in Inghilterra ha ideato degli artefatti sensibili alla temperatura, illuminazione e rugosità superficiale. Altri ricercatori hanno indagato l'impatto dei parametri di superficie nelle scansioni laser tridimensionali oppure hanno esplorato gli effetti del rivestimento dello strato di polvere opacizzante applicato alla superficie degli oggetti in esame.

Oltre ai sistemi di misura ottici tridimensionali, si possono considerare altre tecnologie di misura come, ad esempio, la tomografia computerizzata a raggi X, che è emersa come strumento potente per la metrologia dimensionale, in particolare per misurare le caratteristiche interne inaccessibili alla Macchina di Misura a Coordinate.

La metrologia superficiale nel processo e nella macchina è diventata fondamentale nella produzione di precisione. Queste tecniche facilitano il controllo di qualità in tempo reale e l'ottimizzazione del processo permettendo di prendere le misure direttamente in linea durante la produzione [12].

Questa integrazione riduce i tempi di inattività e migliora l'accuratezza degli allineamenti iniziali, la diagnostica di processo e la compensazione della lavorazione.

Gli avanzamenti nei sistemi di visione della superficie tridimensionale e gli algoritmi di separazione dell'errore hanno migliorato l'affidabilità e l'applicabilità di queste tecniche nei contesti industriali. In

aggiunta, l'ottimizzazione delle tecniche di estrazione della superficie nella CT è fondamentale per le misure accurate di micro-geometrie complesse.

In aggiunta, la comprensione degli errori di misura random è stata evidenziata come cruciale per valutare l'idoneità dei sistemi di misura, avvalendosi di misure ripetute senza il bisogno di valori di riferimento o geometrie nominali.

Gli autori di questa ricerca hanno impiegato una metodologia divisa in tre passi in sequenza.

Per prima cosa, hanno eseguito un esame esaustivo per identificare i fattori influenti sulle misure tridimensionali adottando le scansioni ottiche. La determinazione dei fattori influenti avviene attraverso l'analisi ANOVA e la regressione lineare. Successivamente, la valutazione dell'incertezza di misura è eseguita in accordo alla normativa ISO 15530-3. In ultimo, la determinazione dell'incertezza di misura è calcolata impiegando il metodo GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement), questo metodo è impiegato quando non è possibile effettuare la misura dell'oggetto tarato utilizzando il metodo CMM. Il metodo GUM fa variare un solo fattore alla volta mentre gli altri rimangono costanti. L'obiettivo di questo processo in tre passi è di contribuire ad una migliore comprensione e ad un'attenuazione delle incertezze di misura nei sistemi di misura ottici tridimensionali al fine di alimentare catene di processo complesse.

Questa ricerca si è concentrata sull'esaminare i fattori in modo collettivo impiegando sia l'analisi della varianza che le metodologie di *machine learning*.

La determinazione dell'incertezza di misura seguendo la normativa ISO 15530-3 fornisce approfondimenti relativi alle capacità del sistema di misura ottico tridimensionale quando si misura un oggetto complesso. Questo metodo di valutazione dell'incertezza di misura è impiegato nella produzione di massa e richiede la misura dell'oggetto tarato. L'obiettivo di questo approccio globale è l'ottimizzazione dei processi produttivi, migliorare l'efficienza e migliorare la qualità nelle applicazioni industriali, fornendo una valutazione più precisa e affidabile dell'incertezza di misura.

Gli autori di questa ricerca hanno condotto le misure in un ambiente controllato, utilizzando lo stesso dispositivo nel laboratorio con lo stesso operatore.

Di conseguenza i fattori relativi all'ambiente, all'hardware e all'uomo non influenzano i risultati di misura, perciò i fattori influenzanti sono quelli relativi al software e all'oggetto misurato.

Di questi ultimi fattori consideriamo, in particolare, la rugosità superficiale e lo strato di polvere opacizzante relativo all'oggetto mentre per il software consideriamo la poligonalizzazione e l'interpolazione. La rugosità superficiale e lo strato di polvere opacizzante sono scelti per la loro importanza nei risultati di misura e nella loro pertinenza nelle applicazioni industriali. La rugosità superficiale influisce direttamente sulla consistenza e sulla qualità della superficie dell'oggetto, introducendo potenzialmente deviazioni nei risultati di misura, in particolare nelle caratteristiche che richiedono precise proprietà. Lo strato di polvere opacizzante altera le proprietà della superficie, influenzando potenzialmente le caratteristiche geometriche e di superficie, così da influenzare l'accuratezza di misura.

Per quanto riguarda il software, sono state selezionate la poligonalizzazione e l'interpolazione grazie alla loro diretta influenza sulla rappresentazione degli oggetti digitali. La poligonalizzazione converte i dati della nuvola di punti in mesh poligonali, passaggio decisivo per la creazione dei modelli tridimensionali. La scelta delle caratteristiche della poligonalizzazione influenza il dettaglio e l'accuratezza del modello. L'interpolazione stima i valori intermedi tra i dati della nuvola di punti per la generazione della superficie arrotondata, impattando sulla fedeltà della geometria e sull'accuratezza della misura.

I risultati dell'analisi della ANOVA rivelano che i fattori influenti presentano variazioni contingenti alla specifica caratteristica geometrica misurata. Gli autori di questa ricerca hanno notato che lo strato di polvere opacizzante, la poligonalizzazione e la rugosità sono i fattori che influenzano di più l'analisi. Capire come questi fattori influenzano le specifiche caratteristiche geometriche è critico per migliorare i processi produttivi e garantire la qualità del prodotto.

Integrando questa conoscenza nel processo decisionale basato sui dati, i produttori possono migliorare l'efficienza, minimizzare i difetti e migliorare i risultati generali produttivi.

I valori di *R quadro* vengono utilizzati come indicatori della misura in cui la varianza di una variabile si allinea con un'altra varianza. Questo parametro è indicativo di un robusto grado di abbinamento tra le variabili misurate. Un valore alto di *R quadro* indica una forte capacità predittiva dei modelli per le corrispondenti caratteristiche geometriche.

In aggiunta all'analisi ANOVA è stata eseguita anche una regressione in *machine learning* che approfondisce l'intricata relazione tra i fattori influenti e le caratteristiche geometriche. La congruenza tra l'analisi ANOVA e i risultati della regressione indica la robustezza dei risultati, aumentando l'affidabilità globale dello studio.

Questo approccio analitico duplice non solo conferma l'influenza degli specifici fattori ma amplia, anche, l'analisi in ambiti predittivi, arricchendo la conoscenza del comportamento del sistema di misura ottico tridimensionale.

I sistemi di misura ottici tridimensionali incontrano delle difficoltà, in particolare per quanto riguarda le misure di concentricità, dovute alle limitazioni intrinseche nel catturare accuratamente le caratteristiche circolari.

Questi sistemi possono avere delle difficoltà nel definire precisamente i confini delle caratteristiche circolari, portando a non determinare in modo esatto la concentricità. Spesso è utilizzato uno strumento supplementare chiamato "sonda a sfioramento" per superare questa limitazione.

Questo strumento funziona come un sensore tattile, che permette un contatto diretto fisico con la superficie misurata. Integrando lo strumento supplementare con il sistema ottico tridimensionale, gli utenti possono migliorare l'accuratezza delle misure della concentricità, compensando la difficoltà intrinseca del sistema nel catturare otticamente le geometrie circolari.

Gli autori di questa ricerca hanno trovato che l'incertezza più significativa è quella associata agli errori sistematici. L'elevata incertezza è attribuita alla metodologia impiegata nel calcolare l'errore sistematico. In particolare, il processo di misura dell'errore sistematico implica un'analisi comparativa con i dati ottenuti dalla misura eseguita con la Macchina di Misura a Coordinate, questo contrasto sottolinea una disparità nelle procedure di misura tra i sistemi di misura ottici tridimensionali e le macchine CMM. Mentre le macchine CMM catturano un sottoinsieme limitato di punti durante la procedura di misura, i sistemi di misura ottici tridimensionali tengono in conto di un intero set di dati. Una macchina CMM può raccogliere dati da punti specifici sulla superficie creando una rappresentazione sparsa. Al contrario, un sistema di misura ottico tridimensionale può catturare l'intera superficie, permettendo una migliore comprensione della geometria.

La causa sottostante per queste grandi incertezze di misura può essere attribuita alle procedure intrinseche distinte tra i sistemi ottici tridimensionali e le macchine CMM. La CMM, in virtù del suo campionamento di dati limitato, potrebbe perdere delle sottili variazioni o sfumature della geometria dell'oggetto, risultando in una rappresentazione meno accurata. D'altra parte, il sistema di misura ottico tridimensionale, considera un set di dati completo, che provvede ad una visione più globale ma

la sua dipendenza dai metodi approssimativi introduce delle incertezze, specialmente quando si affrontano forme irregolari o complicate [12].

La normativa *ISO 15530-3* fornisce un approccio strutturato per la valutazione dell'incertezza di misura tarando il sistema di misura con un oggetto di riferimento e analizzando i risultati per convalidare la performance dei sistemi in un ambiente industriale. Questo metodo assicura la produzione di misure costanti e affidabili. Il metodo *GUM* offre un approccio differente per la valutazione dell'incertezza di misura, in particolare quando la taratura diretta con un oggetto di riferimento non è possibile.

Questo metodo coinvolge molteplici misure e l'analisi dei dati per considerare le varie fonti di errore. Con questa procedura si crea un'incertezza globale che provvede a una comprensione dettagliata della prestazione del sistema di misura sotto diverse condizioni.

Attraverso il processo di ottimizzazione dei sistemi di misura ottici tridimensionali, si migliora la loro accuratezza e affidabilità, che ne consente un'applicazione più ampia nell'integrazione delle informazioni in ambito industriale, fornendo dati di qualità nelle dimensioni e caratteristiche del prodotto che possono essere impiegati nel migliorare e ottimizzare le catene di processi complesse.

## 5. Metodologia

Nei precedenti studi i ricercatori si sono concentrati solo su alcuni specifici fattori influenzanti l'incertezza di misura e solo per alcuni specifici artefatti. In questa tesi sperimentale si è cercato di valutare l'incertezza di misura per alcuni diversi tipi di oggetti valutando gli errori sistematici relativi alla rugosità, alla dimensione del diametro e all'errore di cilindricità. Le misure effettuate in questa tesi sono state eseguite nel laboratorio Mind4Lab presso il dipartimento DIGEP del Politecnico di Torino.

### 5.1. Artefatti

In questa tesi sono stati impiegati tre differenti artefatti.

Il primo artefatto utilizzato è stato denominato "*Drill holes*", che consiste in un blocchetto rettangolare dove sono state ricavate delle semisfere cilindriche convesse di diametro differente. La semisfera più piccola possiede un diametro pari a 10 mm, mentre la più grande presa in considerazione ha un diametro pari a 40 mm.

Il secondo artefatto è stato definito "*Hemispherical cavities*", che consta di un blocchetto parallelepipedo dove sono state ottenute delle semisfere circolari convesse di diverso diametro. Il diametro della semisfera più piccola è pari a 5 mm mentre quella maggiore è pari a 50 mm.

Il terzo artefatto nominato "*Albero*", formato da una struttura cilindrica, di simile diametro, intervallato da delle gole di uguale dimensione.

Tutti gli artefatti impiegati presentano una superficie non riflettente per poter adoperare il Sistema di Misura a Coordinate (CMS).

Nella sezione *Appendice* sono presenti i disegni tecnici degli artefatti impiegati.

In aggiunta, per ampliare il campo di misura nello studio statistico sono stati impiegati altri artefatti come la "*Sfera Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>*" di diametro nominale pari a 6 mm, il "*Ball Plate Black*" di diametro nominale di 38 mm e il "*Ball Plate Screwed*" di diametro nominale pari a 20 mm.

### 5.2. Strumenti di Misura

#### 5.2.1. Macchina di Misura a Coordinate (CMM)

La Macchina di Misura a Coordinate è composta da un basamento in granito, da un attuatore e da un sistema polso dove è fissata la sonda. Inoltre, presenta un sistema di smorzamento passivo per ridurre le vibrazioni prodotte dalla macchina, che influenzerebbero i risultati delle misure. Lo smorzamento è costituito da un sistema di tubi dove all'interno passa aria compressa ad una pressione determinata dal manuale del produttore. La *CMM* è impiegata insieme a un computer per poter raccogliere i dati ottenuti dalle misure.

Prima di iniziare con le misure, è necessario tarare la macchina e la sonda utilizzata. Per tarare la sonda e la macchina si seguono le indicazioni date dal software della *CMM*, come, ad esempio, la necessità di tarare nuovamente la sonda impiegata per ogni diversa angolazione presa in considerazione.

Durante le misure, si inserisce l'artefatto in esame all'interno di una morsa per evitare il movimento del pezzo, perché il suo spostamento interferirebbe con i risultati ottenuti.

A seconda del diametro in esame si variano i punti della superficie presi in considerazione. Per il diametro maggiore si è scelto di prendere sette punti per ogni livello di misura, per un totale di sei livelli di interesse. L'algoritmo di interpolazione scelto è il *metodo dei minimi quadrati*.

Per l'artefatto "Drill holes" sono state eseguite cinque misure per ogni diametro preso in considerazione.

Per l'artefatto "Hemispherical cavities" sono state realizzate tre repliche per ogni semisfera e, sono state effettuate tre misure per la valutazione della distanza tra il centro della semisfera di diametro pari a cinque millimetri e tutti gli altri centri delle altre semisfere. Sono stati considerati cinque livelli di cui ognuno costituito da otto punti, tranne la cavità di diametro pari a cinque millimetri, dove sono stati presi in considerazione quattro punti per ogni livello.

Per questo artefatto si sono presi anche trentadue punti per quattro livelli per valutare la planarità del piano superiore.

Per l'"Albero" sono state effettuate tre misure per ogni porzione di cilindro, compresa tra due gole. Sono stati presi tre punti lungo l'asse del cilindro per otto sezioni in ogni porzione cilindrica.

Dai risultati ottenuti da ogni misura si estrapolano i valori relativi alla tolleranza geometrica di forma, cilindrica, e alla tolleranza dimensionale, rappresentata dal diametro rilevato. Questi valori vengono esportati in un file prodotto dal software della macchina. Successivamente si è creato un file *Excel* dove si sono calcolati, preliminarmente la media e lo scarto tipo di ogni diametro in esame.

### 5.2.2. Microscopio Topografico

Mentre la Macchina di Misura a Coordinate effettua delle misure dimensionali in macroscala, il microscopio topografico analizza l'elemento geometrico associato alla superficie. Con questo strumento di misura si osserva la rugosità superficiale.

In passato, lo strumento impiegato era il profilometro, costituito da uno stilo a contatto. Per ottenere i profili della superficie si posizionava l'asse dello stilo in modo perpendicolare alla superficie in esame. Successivamente, è stato adoperato il microscopio, strumento più efficace. Di seguito, si è utilizzato l'interferometro, ma questo strumento è troppo lento per effettuare la misura della rugosità. In questa tesi, si è adoperato un microscopio topografico con la variazione di fuoco, costituito da un modello tridimensionale per rilevare la forma e la rugosità della porzione superficiale in esame. Una volta, catturata l'immagine della porzione superficiale, presa in esame, si passa alla valutazione dell'immagine utilizzando il software topografico, che mette a fuoco la superficie e permette di esaminare la qualità dell'immagine superficiale.

Nel post processing, si utilizza un software per correggere la qualità delle immagini acquisite. Si rimuove la forma della superficie, se necessario, si operano dei *threshold* per trascurare eventuali outliers ed escludere la possibile presenza di sporcizia sulla superficie, senza danneggiare l'analisi. Da questa valutazione si estraggono alcuni parametri come il parametro  $S_a$ , che rappresenta la media del valore assoluto dei valori ordinati sulla superficie in esame,  $S_q$ , che rappresenta la radice quadrata della media quadratica dei valori ordinati della superficie,  $S_z$  è la somma del valore della massima altezza di picco e il valore massimo di profondità del pozzo sulla superficie.

### 5.2.3. Sistemi di Misura a Coordinate (CMS)

Il Sistema di Misura a Coordinate è costituito da un sistema a luce strutturata, dove si alternano frange orizzontali, verticali e pallini. La distorsione del pattern proiettato sulla geometria indica quanto la geometria estratta è lontana da quella reale. Vengono utilizzati dei marker, applicati alla superficie dell'artefatto, per far sì che il sistema di visione della macchina CMS riconosca la superficie in considerazione.

Si eseguono le misure al variare delle condizioni di posizione del misurando, ad esempio gli artefatti “*Drill Holes*” e “*Hemispherical cavities*” vengono misurati sia in posizione orizzontale che con un’inclinazione di quarantacinque gradi.

Il sistema registra una nuvola di punti. Si considera la vista migliore dell’artefatto, cioè quella a metà del trapezio simulato dal software, e le viste laterali.

Si eseguono molteplici misure per ottenere un risultato migliore.

L’esecuzione effettiva delle misure avviene nel seguente modo. Si attua una prima scansione manuale, per tarare la macchina, e poi uno automatico. Successivamente si eseguono le misure vere e proprie del pezzo.

A seguire, si poligonalizzano i dati scansionati per riunire le misure effettuate, si creano i cilindri o le sfere simulate delle parti reali. Si estrapolano i valori della deviazione standard e della dimensione del diametro delle parti simulate.

Questi dati sono stati inseriti in un file *Excel* per la generazione di grafici per esaminare il comportamento delle variabili rispetto all’errore di forma e dimensionale.



Figura 1. Sistema di Misura a Coordinate (CMS), impiegato per l’acquisizione dei dati degli artefatti.

## 6. Risultati

In questa sezione vengono esposti i risultati della tesi. Si possono valutare, inizialmente, i grafici ottenuti dalle misure. Successivamente, si svolge l'analisi ANOVA e si valutano i risultati ottenuti. Di seguito vengono riportati alcuni grafici, come per esempio errore di forma vs diametro e errore dimensionale vs diametro relativi all'artefatto "Drill Holes". Gli altri grafici vengono riportati nella sezione *Appendice*.

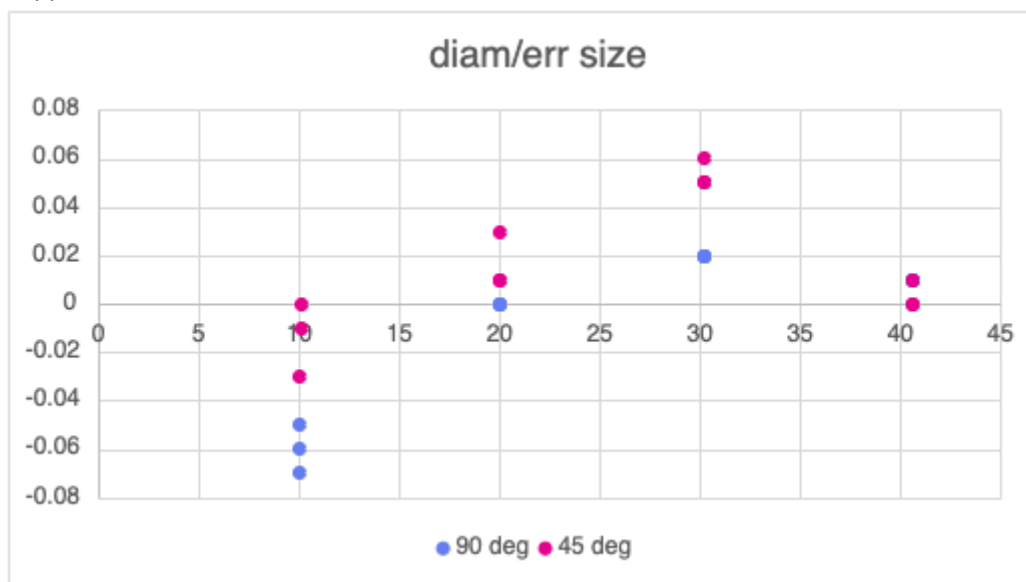


Figura 2. Grafico errore dimensionale vs diametro con le misure ottenute con due rotazioni diverse dell'artefatto "Drill Holes".

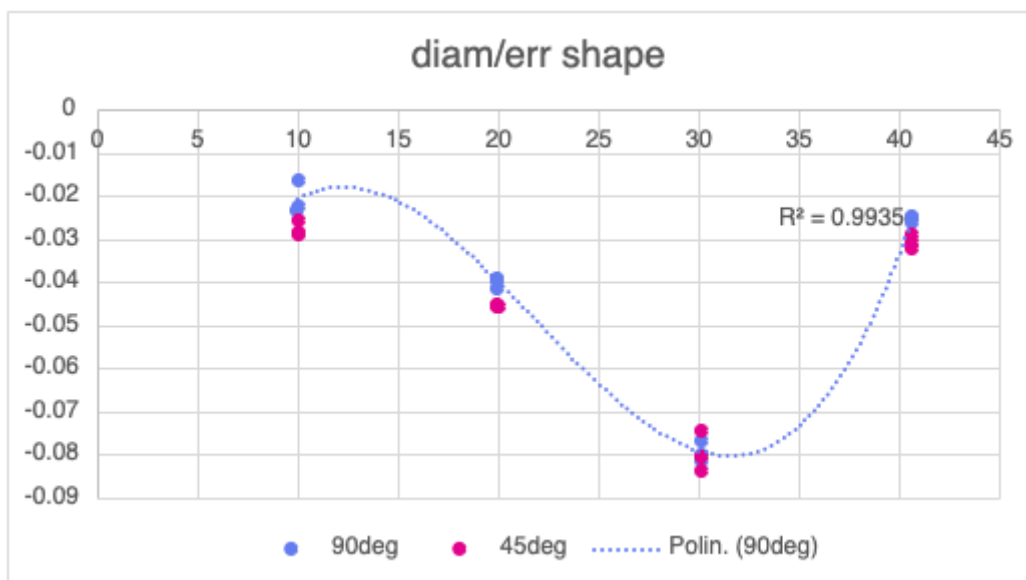


Figura 3. Grafico errore di forma vs diametro considerando le misure eseguite in due orientamenti differenti.

Nei grafici è possibile individuare alcuni punti lontani dal valore attorno a cui oscillano, ciò può essere causato da un rilevamento del punto in una parte della superficie che presenta dei graffi superficiali o delle impurità.

Si auspica che i risultati ottenuti mostrino la correlazione degli errori alle caratteristiche geometriche e dimensionali del misurando.

Si è notato che gli errori mostrano una dipendenza dalla posizione e dall'orientamento dell'artefatto. Dall'analisi topografica, si rilevano che i parametri  $Sa$  e  $Sq$  variano al variare della superficie. In aggiunta, si è potuto constatare, durante la topografia dell'artefatto "Albero", che una metà dell'artefatto è stata impiegata, probabilmente, per uno studio di riproducibilità perché dalla porzione dell'albero denominata "L13" alla "L23", presenta una rugosità simile e che la porzione di riferimento è la "L09".

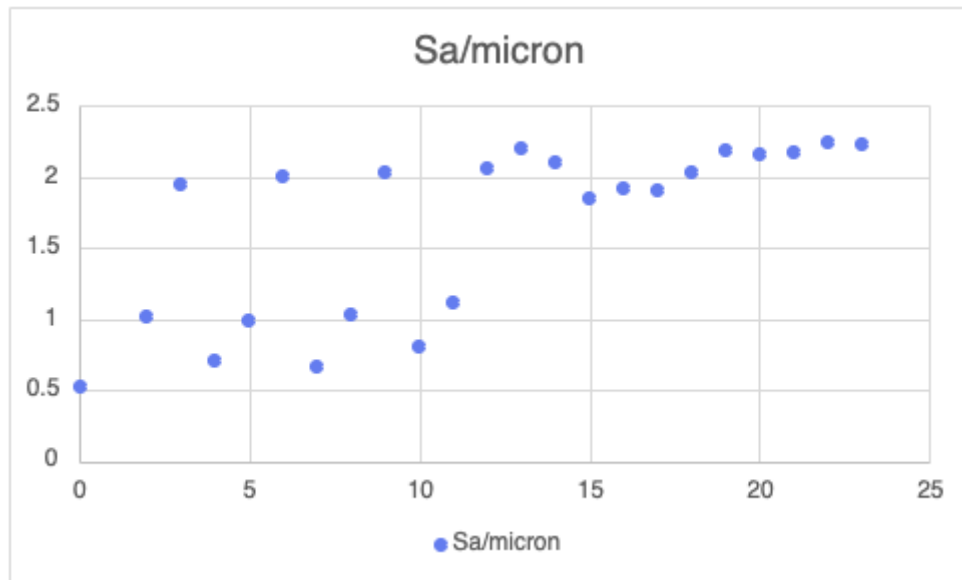


Figura 4. Grafico del parametro  $Sa$  dell'artefatto "Albero".

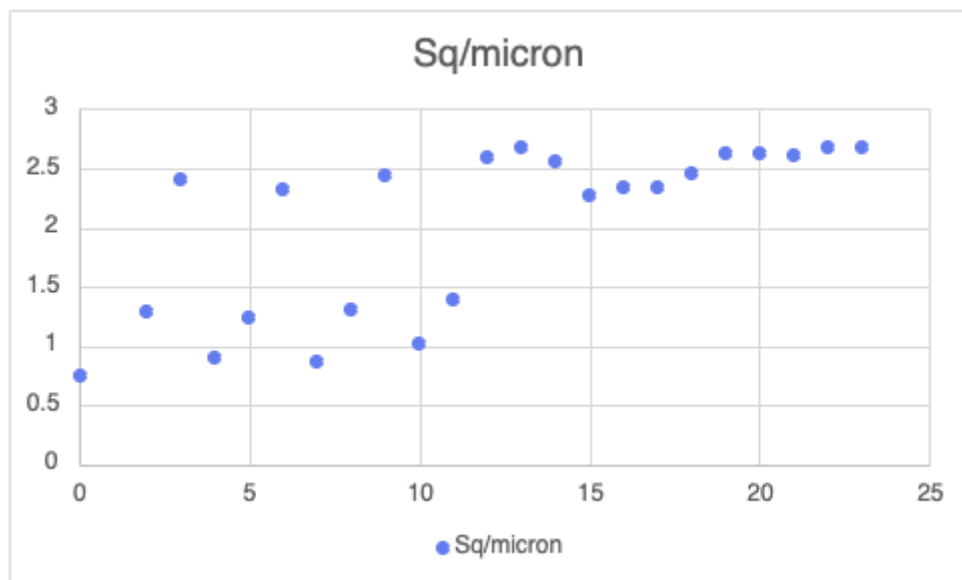


Figura 5. Grafico del parametro  $Sq$  dell'artefatto "Albero".

Dalle analisi eseguite fino ad adesso non si è notato alcuna influenza della rugosità sugli errori. Nelle misure relative all'artefatto "Drill Holes" e "Hemispherical Cavities", si è visto che la rugosità si mantiene costante.

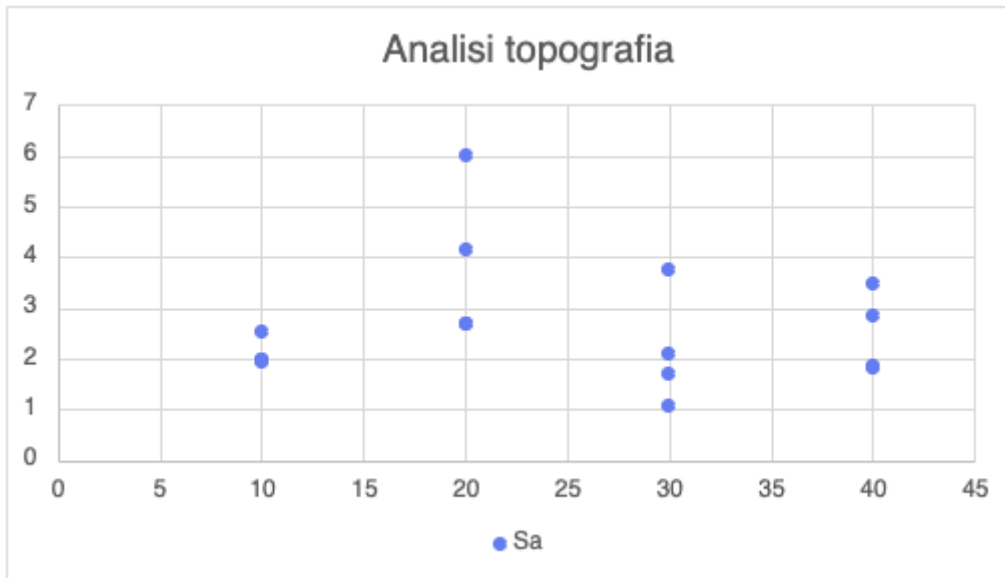


Figura 6. Grafico relativo al parametro Sa dell'artefatto "Drill Holes".

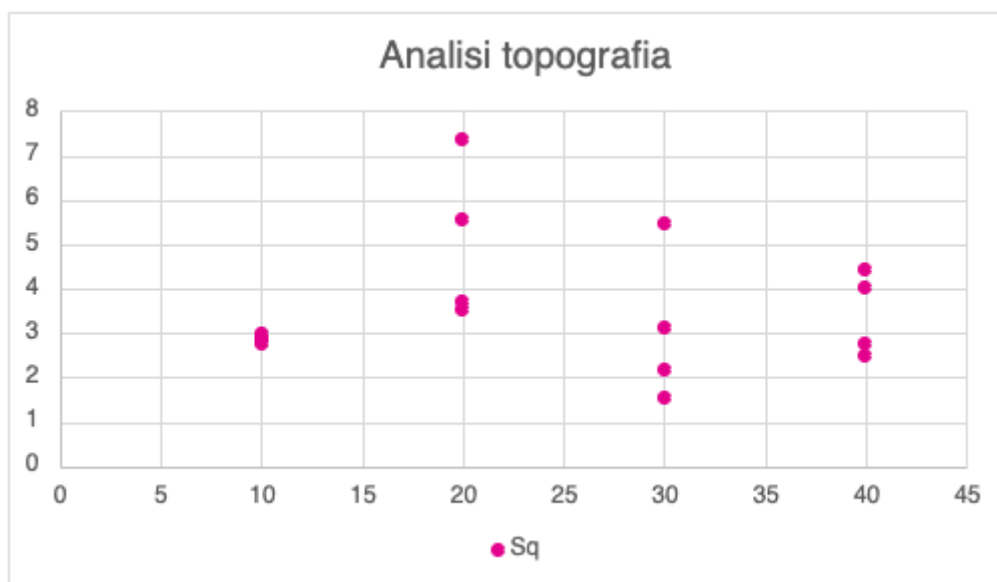


Figura 7. Grafico relativo al parametro Sq dell'artefatto "Drill Holes".

Nei seguenti grafici vengono riportati i valori delle misure eseguite comprendendo tutti gli artefatti considerati all'interno di questa tesi. La relativa tabella e grafici supplementari vengono riportati nella sezione *Appendice*.

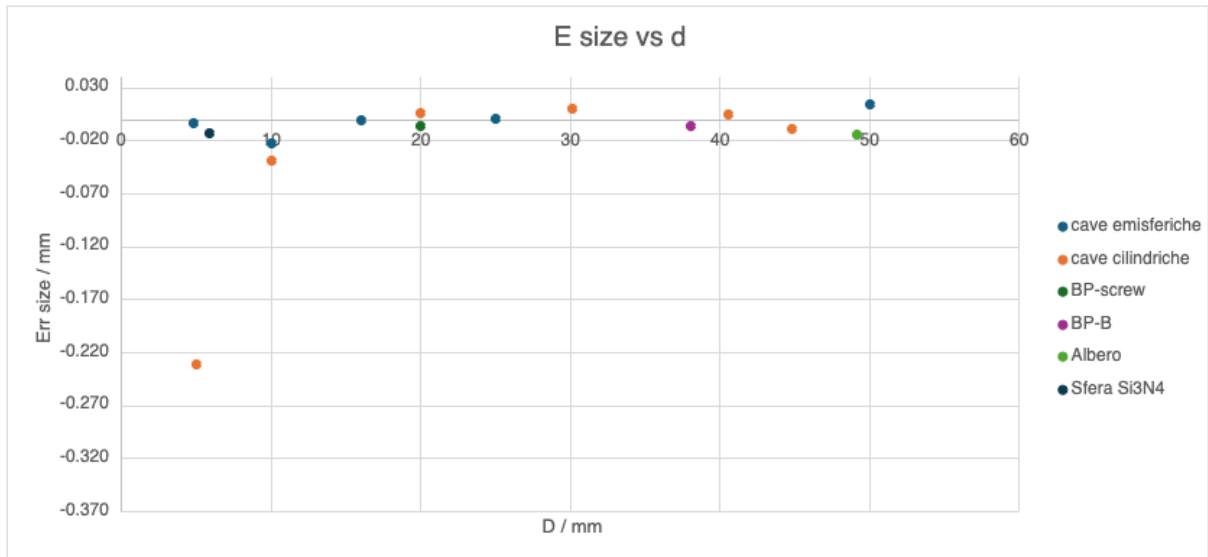


Figura 8. Grafico errore dimensionale vs diametro di tutti gli artefatti in esame.

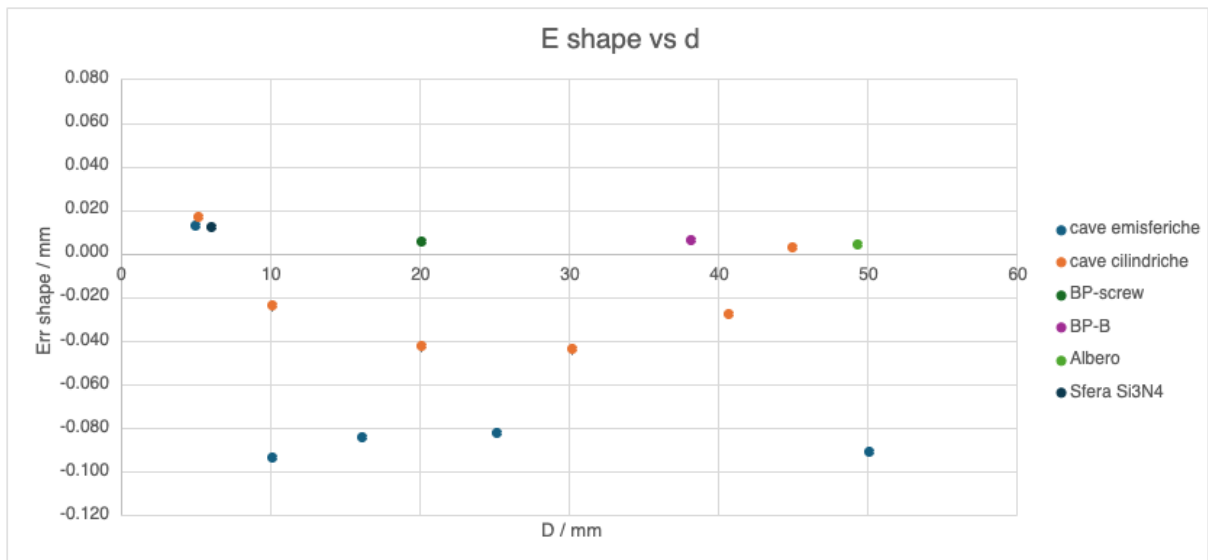


Figura 9. Grafico errore di forma vs diametro di tutti gli artefatti considerati.

Successivamente, come si è detto, si è svolto l'analisi ANOVA.

Di seguito viene riportato l'output ottenuto, impiegando un software commerciale, dell'analisi ANOVA eseguita su tutti gli artefatti in esame. Nella sezione *Appendice* vengono inseriti i risultati dell'analisi ANOVA relativi agli artefatti "Drill Holes", "Hemispherical Cavities" e "Albero".

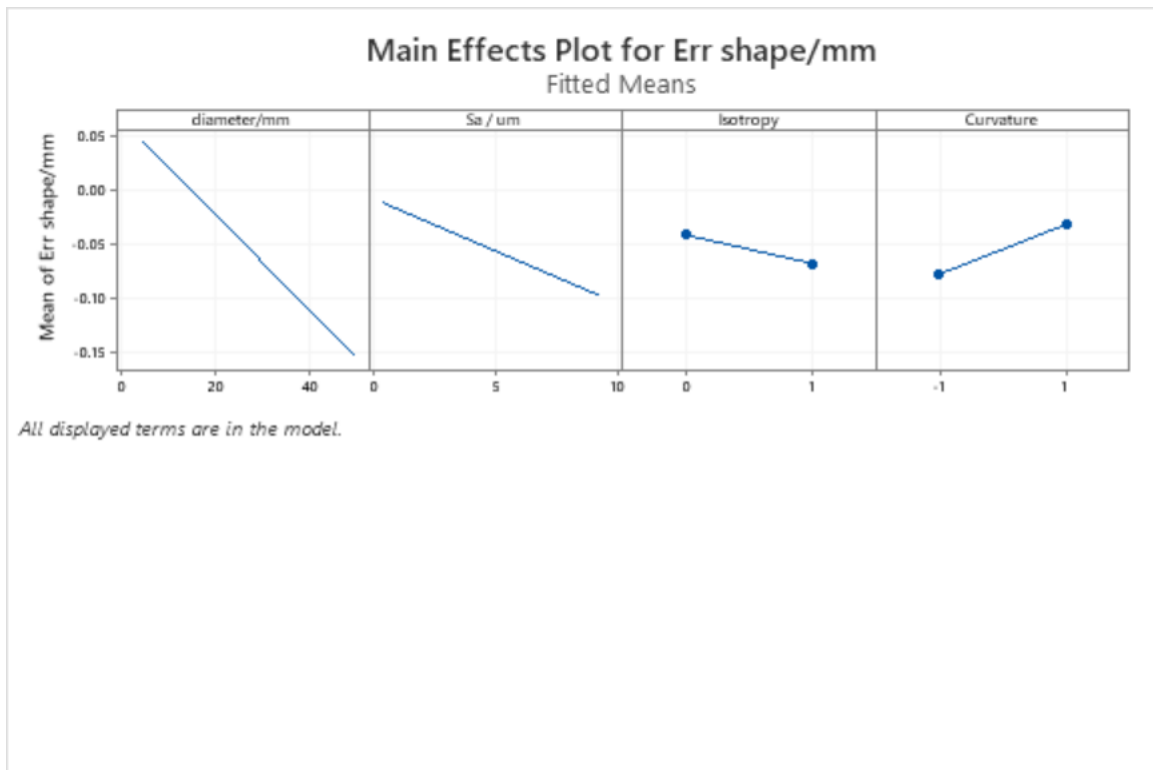


Figura 10. Grafico sull'influenza dei parametri diametro/Sa/Isotropia/Curvatura sull'errore di forma.

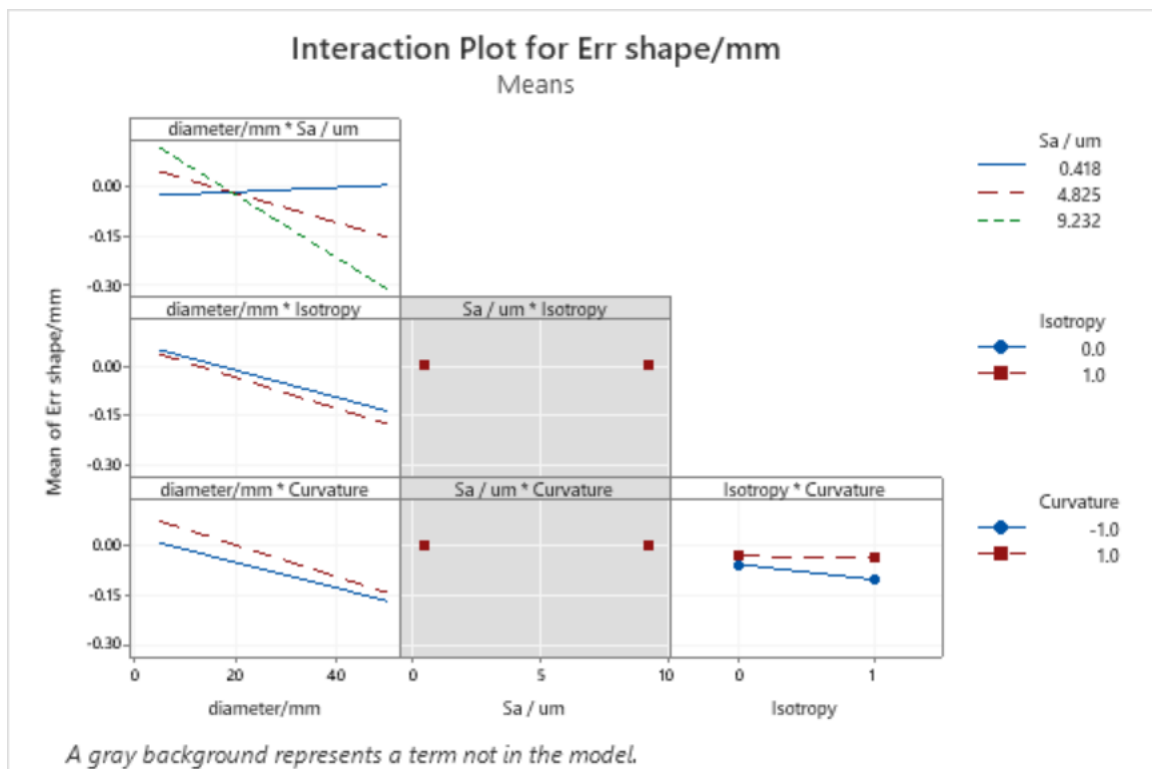


Figura 11. Grafico sull'influenza dell'interazione dei parametri diametro/Sa/Isotropia/Curvatura sull'errore di forma.

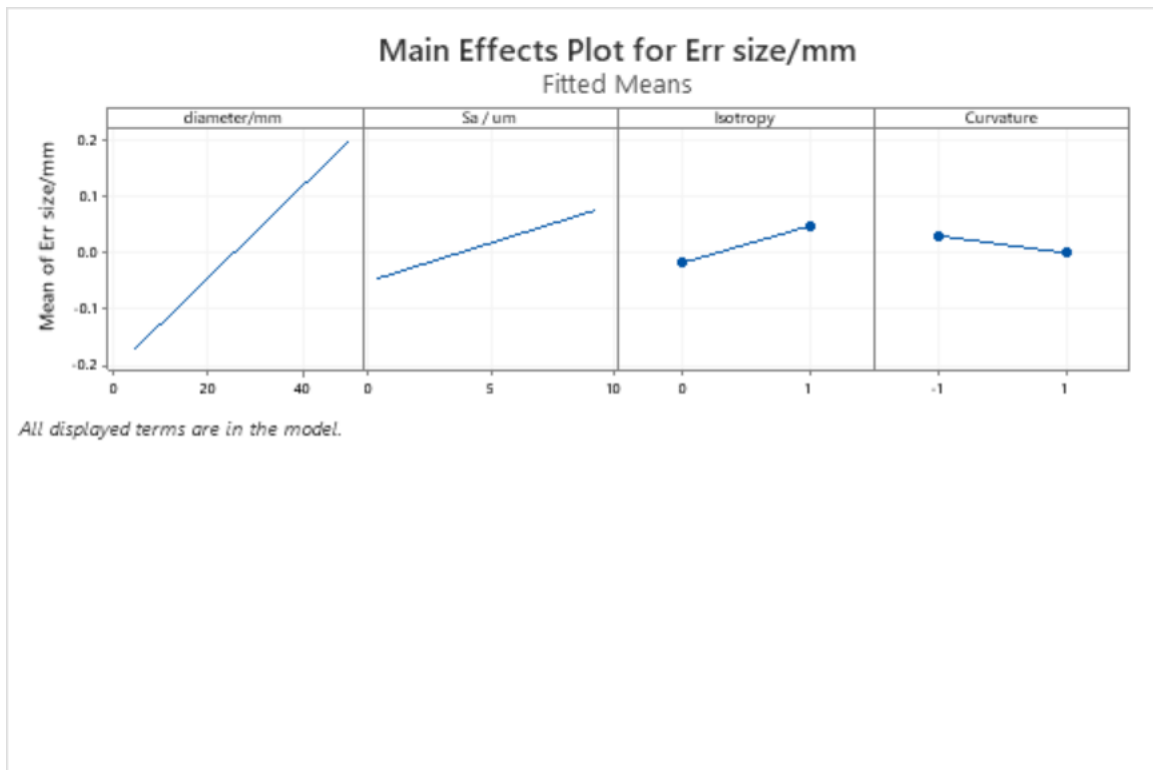


Figura 12. Grafico sull'influenza dei parametri diametro/Sa/Isotropia/Curvatura sull'errore dimensionale.

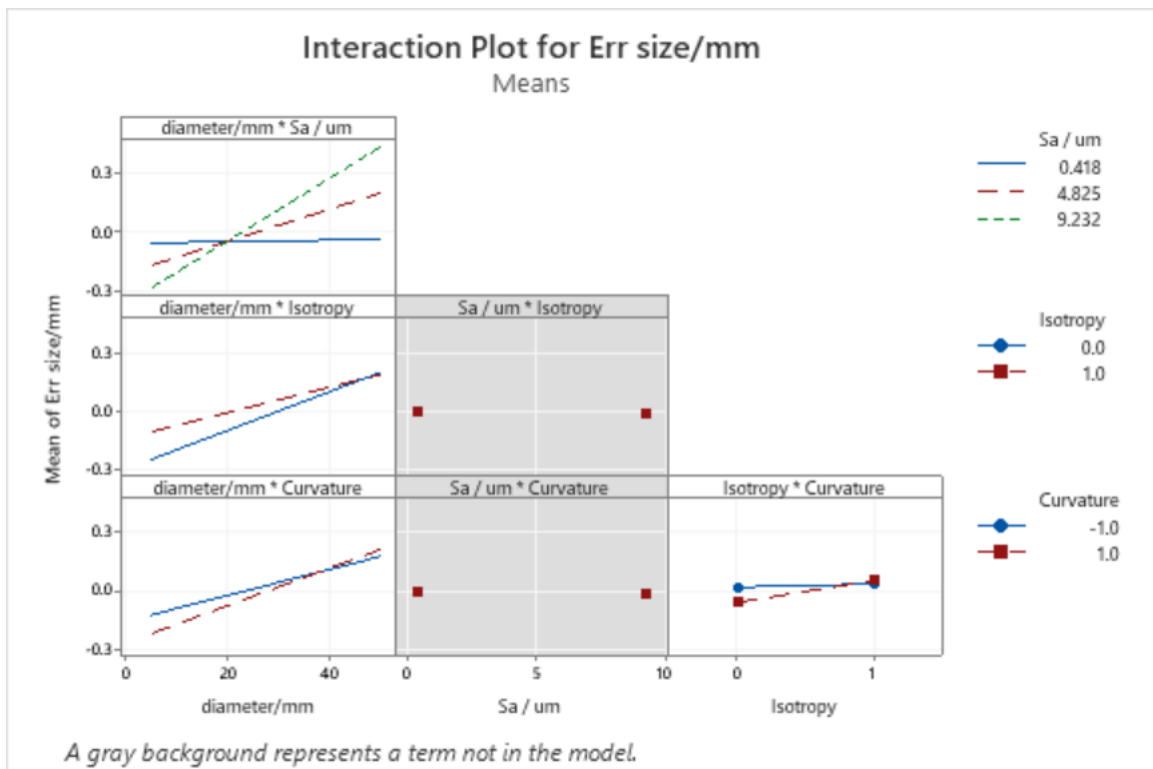


Figura 13. Grafico sull'influenza dell'interazione dei parametri diametro/Sa/Isotropia/Curvatura sull'errore dimensionale.

L'analisi ANOVA (*Analysis of variance*), è una tecnica utile e generale per valutare statisticamente alcuni parametri. L'analisi contiene un'ipotesi nulla, che in questo caso è definire il parametro  $Sa$  costante e un'ipotesi alternativa che consiste nella valutazione dell'influenza del parametro  $Sa$  e del diametro sull'errore di forma e dimensionale. Si rifiuta l'ipotesi nulla se il valore del  $p$ -value è minore di 5%. L'analisi ANOVA è stata eseguita impiegando un software commerciale.

Alla fine dell'analisi, si è rilevato che l'influenza sugli errori dimensionali dipenda principalmente dal diametro, mentre l'ipotizzato effetto della rugosità (modellata tramite  $Sa$ ) non è stato rilevato. Si nota che la variazione del parametro  $Sa$  avviene solo con il cambiamento del diametro. Allo stesso modo si rileva l'influenza del diametro sull'errore geometrico. In aggiunta, si può notare che l'isotropia e la curvatura dei vari artefatti abbiano entrambe un effetto significativo (si vedano *Appendice 17* e *18*) sull'errore geometrico o dimensionale, seppur con un effetto di second'ordine rispetto al diametro. L'influenza di un parametro sull'errore di forma o dimensionale è visibile dalla sua inclinazione maggiore rispetto agli altri in esame, se due linee hanno la stessa inclinazione significa che il parametro non ha alcuna influenza sull'errore.

## 7. Conclusione

In conclusione, si è visto che la variazione del diametro è il parametro che influenza maggiormente gli errori di forma e dimensionali presi in considerazione, mentre il valore di rugosità, di isotropia e di curvatura non ottengono un riscontro rilevante per l'influenza degli errori esaminati. Nelle ricerche passate sono stati impiegati artefatti standard o oggetti per applicazioni particolari, in questa tesi si è cercato di osservare diverse tipologie di artefatti senza limitarsi alla forma particolare dell'oggetto, impiegando diversi strumenti di misura come la Macchina di Misura a Coordinate, il Sistema di Misura a Coordinate e il Microscopio Topografico.

# 8. Appendice

## Appendice 1

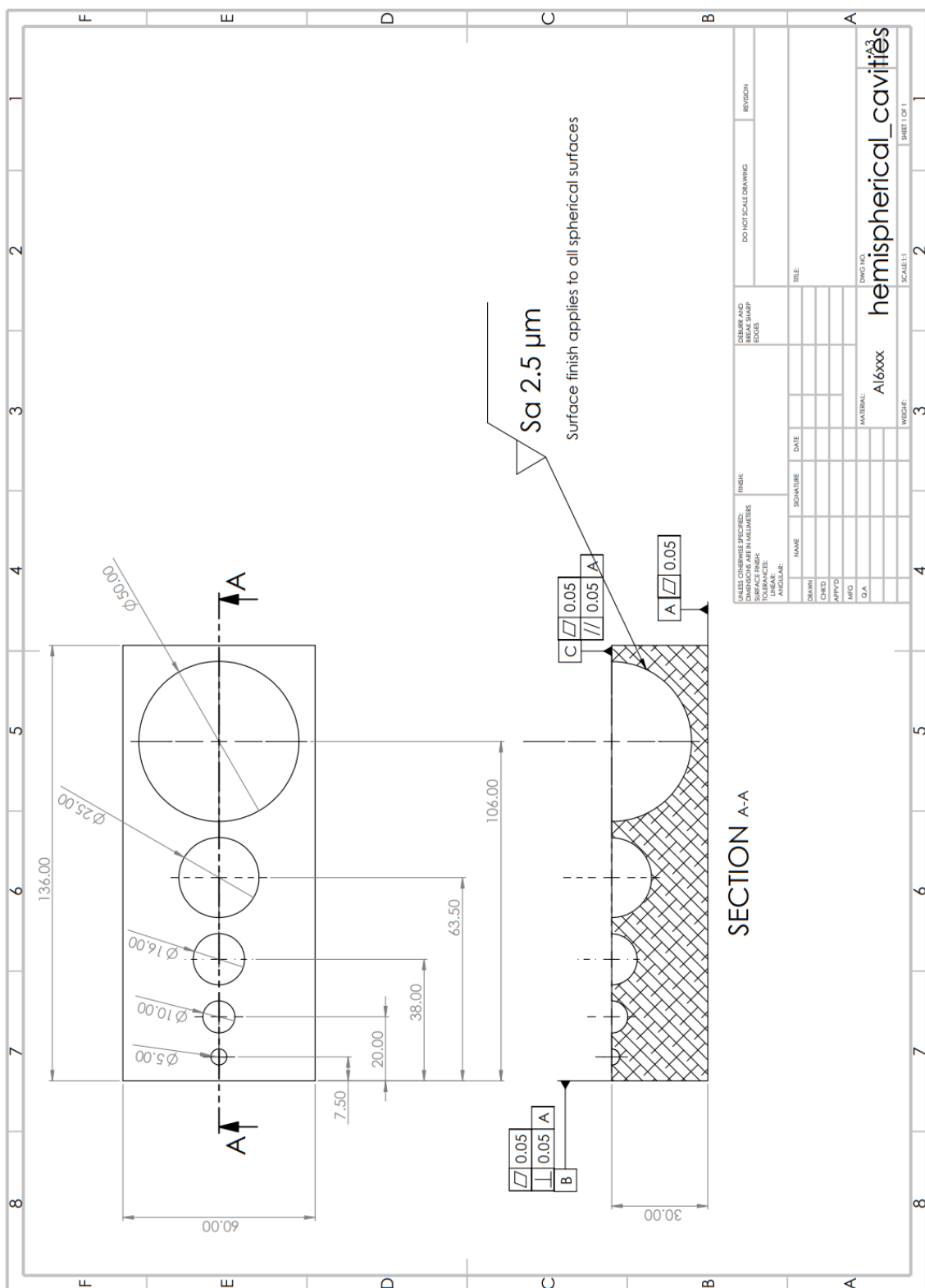


Figura 14. Disegno tecnico relativo all'artefatto "Hemispherical cavities".



# Appendice 3

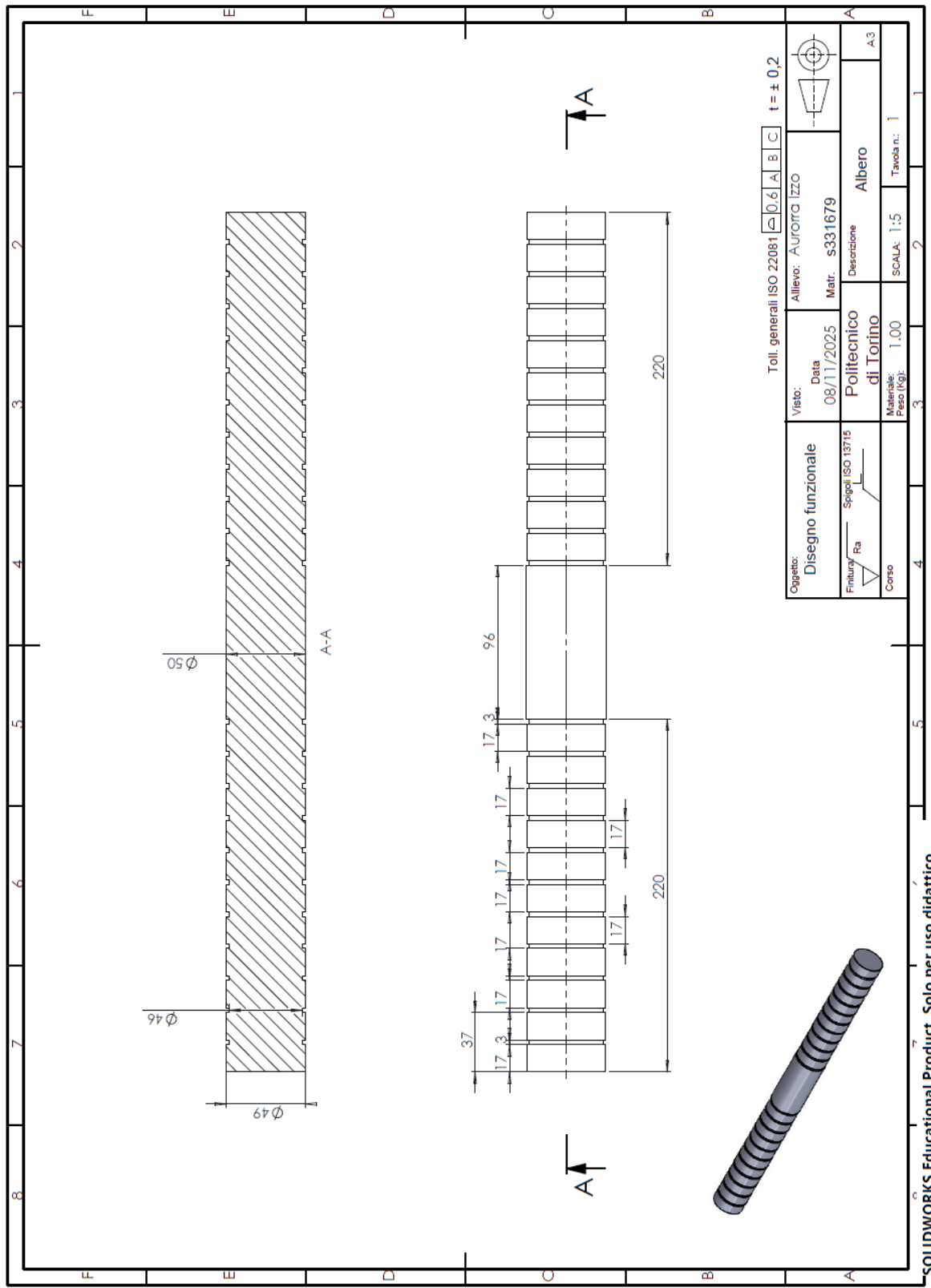


Figura 16. Disegno qualitativo dell'artefatto "Albero".

## Appendice 4

elemento	CMM D / mm	diameter / mm	curvature (1/R)	CMM fomr dev / mm	cylindricity / mm	Err size / mm	Err shape / mm	Err size / %	Err shape / %
10	10.115	10.06	0.198807157	0.0568	0.0346	-0.06	-0.0222	-0.6%	-39.1%
20	20.0368	20.04	0.099800399	0.0686	0.0295	0	-0.0391	0.0%	-57.0%
30	30.1788	30.2	0.066225166	0.1554	0.0753	0.02	-0.0801	0.1%	-51.5%
40	40.6816	40.69	0.049152126	0.0486	0.0241	0.01	-0.0245	0.0%	-50.4%
10	10.115	10.05	0.199004975	0.0568	0.0335	-0.07	-0.0233	-0.7%	-41.0%
20	20.0368	20.03	0.099850225	0.0686	0.0292	0	-0.0394	0.0%	-57.4%
30	30.1788	30.2	0.066225166	0.1554	0.0787	0.02	-0.0767	0.1%	-49.4%
40	40.6816	40.69	0.049152126	0.0486	0.0225	0.01	-0.0261	0.0%	-53.7%
10	10.115	10.06	0.198807157	0.0568	0.0403	-0.05	-0.0165	-0.5%	-29.0%
20	20.0368	20.04	0.099800399	0.0686	0.0274	0	-0.0412	0.0%	-60.1%
30	30.1788	30.2	0.066225166	0.1554	0.0741	0.02	-0.0813	0.1%	-52.3%
40	40.6816	40.69	0.049152126	0.0486	0.0234	0.01	-0.0252	0.0%	-51.9%

Figura 17. Tabella dei valori delle misure ottenute con l'artefatto "Drill Holes" con un angolo pari a 90°.

elemento	CMM D / mm	diameter / mm	curvature (1/R)	CMM fomr dev / mm	cylindricity / mm	Err size / mm	Err shape / mm	Err size / %	Err shape / %
10	10.115	10.08	0.198412698	0.0568	0.028	-0.03	-0.0288	-0.3%	-50.7%
20	20.0368	20.06	0.099700897	0.0686	0.023	0.03	-0.0456	0.1%	-66.5%
30	30.1788	30.23	0.066159444	0.1554	0.0717	0.05	-0.0837	0.2%	-53.9%
40	40.6816	40.69	0.049152126	0.0486	0.0163	0.01	-0.0323	0.0%	-66.5%
10	10.115	10.1	0.198019802	0.0568	0.0283	-0.01	-0.0285	-0.1%	-50.2%
20	20.0368	20.05	0.099750623	0.0686	0.0236	0.01	-0.045	0.0%	-65.6%
30	30.1788	30.24	0.066137566	0.1554	0.0749	0.06	-0.0805	0.2%	-51.8%
40	40.6816	40.68	0.049164208	0.0486	0.0179	0	-0.0307	0.0%	-63.2%
10	10.115	10.11	0.197823937	0.0568	0.0314	0	-0.0254	0.0%	-44.7%
20	20.0368	20.04	0.099800399	0.0686	0.0231	0.01	-0.0455	0.0%	-66.3%
30	30.1788	30.23	0.066159444	0.1554	0.0811	0.05	-0.0743	0.2%	-47.8%
40	40.6816	40.68	0.049164208	0.0486	0.0196	0	-0.029	0.0%	-59.7%

Figura 18. Tabella contenente i valori delle misure dell'artefatto "Drill Holes" con un angolo pari a 45°.

## Appendice 5

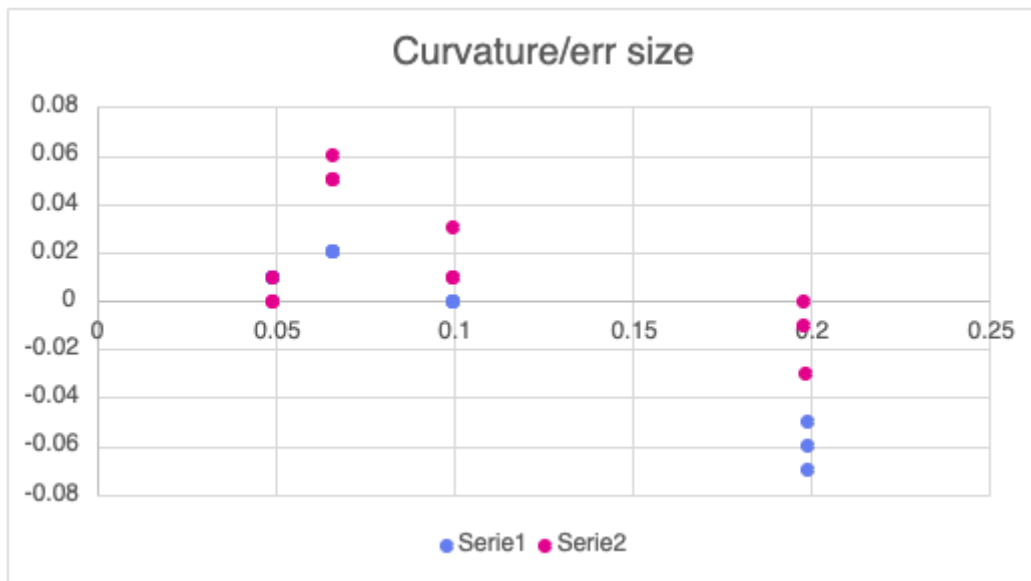


Figura 19. Grafico errore dimensionale vs curvatura dell'artefatto "Drill Holes".

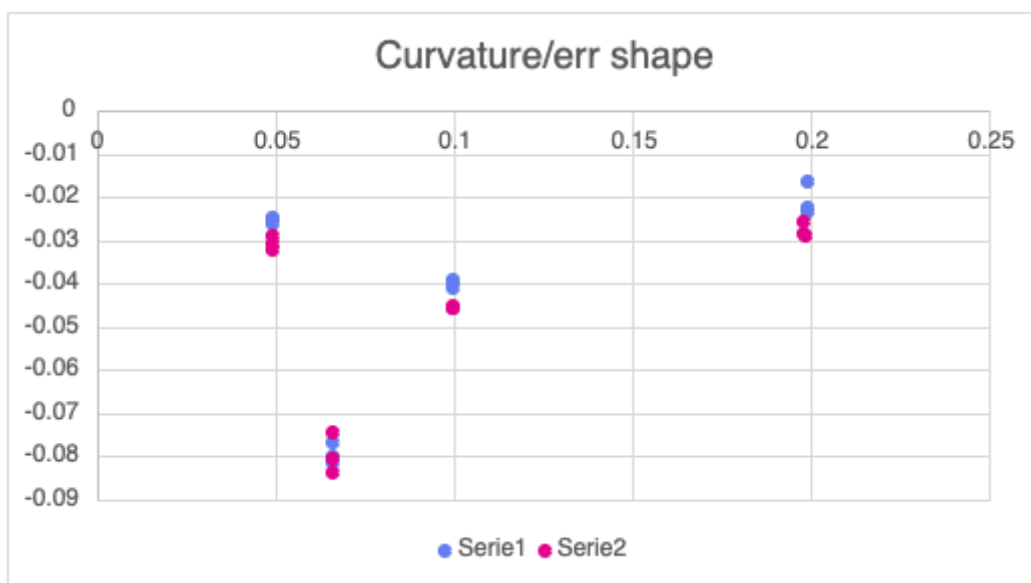


Figura 20. Grafico errore di forma vs curvatura dell'artefatto "Drill Holes".

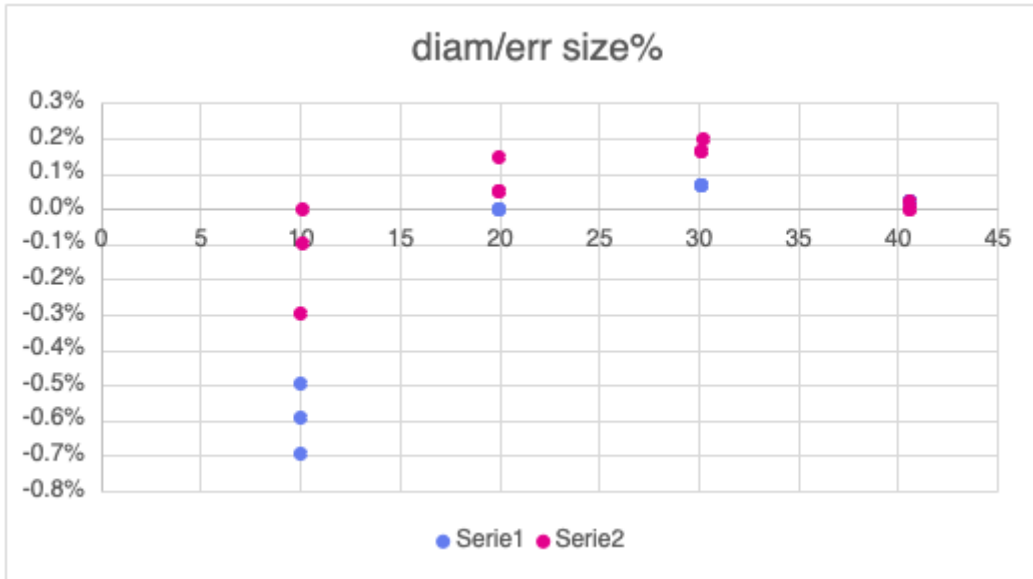


Figura 21. Grafico errore dimensionale percentuale vs diametro dell'artefatto "Drill Holes".

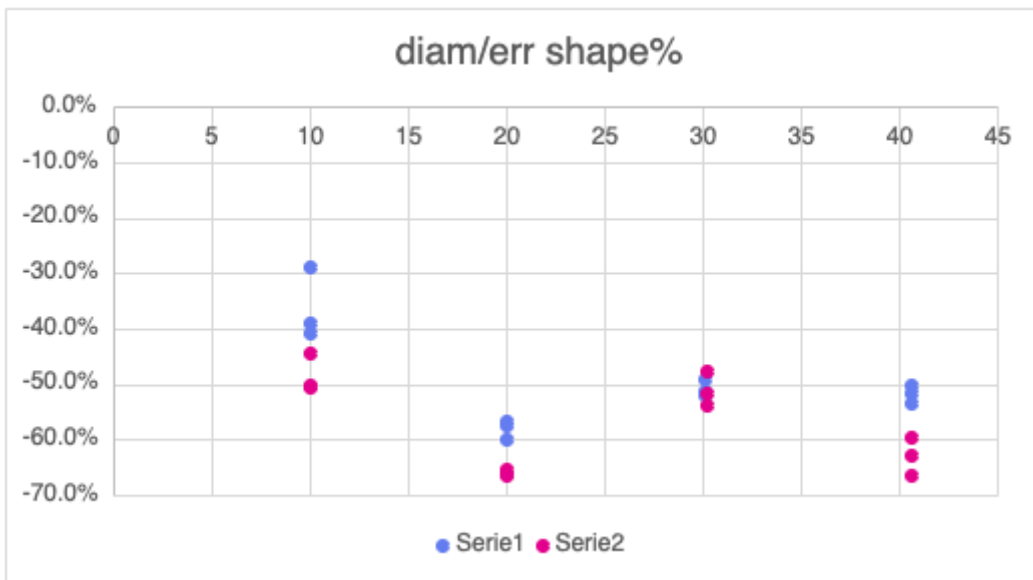


Figura 22. Grafico errore di forma percentuale vs diametro dell'artefatto "Drill Holes".

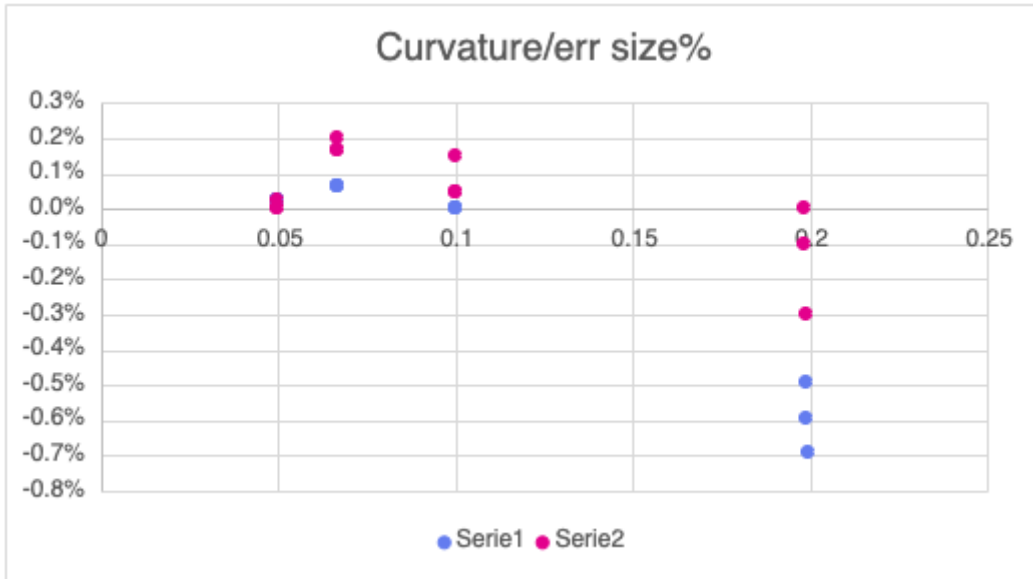


Figura 23. Grafico errore dimensionale percentuale vs curvatura dell'artefatto "Drill Holes".

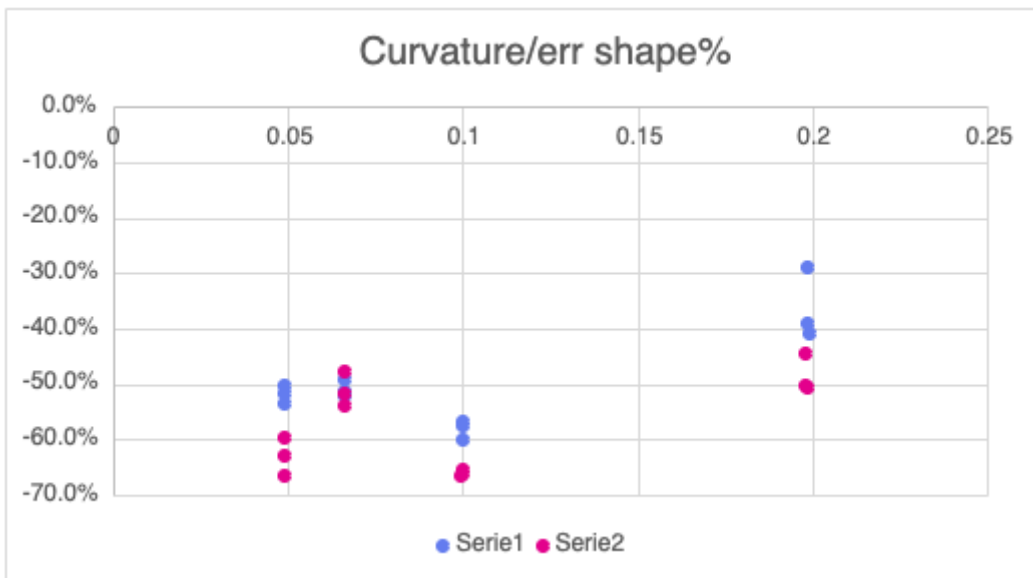


Figura 24. Grafico errore di forma percentuale vs curvatura dell'artefatto "Drill Holes".

## Appendice 6

elemento	Sa/micron	Sq/micron	Ssk/micron	Sz/micron
10	1.92263	2.87814	1.82265	33.4671
10	2.54331	3.005	0.242567	36.1811
10	1.99981	2.8701	-0.67349	30.6336
10	1.9799	2.76138	-0.74725	30.518
20	6.00394	7.35297	1.01346	44.523
20	2.68027	3.54607	0.478622	32.1318
20	4.14423	5.55306	1.52235	39.7464
20	2.70332	3.70838	1.28772	35.2763
30	2.08371	3.11461	-0.5684	35.4139
30	3.74066	5.48996	1.67898	44.776
30	1.71696	2.16937	-0.02518	19.3518
30	1.08342	1.56043	0.882715	17.6309
40	1.82306	2.48701	0.849435	29.565
40	3.50074	4.43968	-0.73953	32.2911
40	2.8429	4.03123	0.945177	37.6454
40	1.86946	2.75369	-1.20948	24.071

Figura 25. Tabella dei valori ottenuti dalla topografia della superficie dell'artefatto "Drill Holes".

## Appendice 7

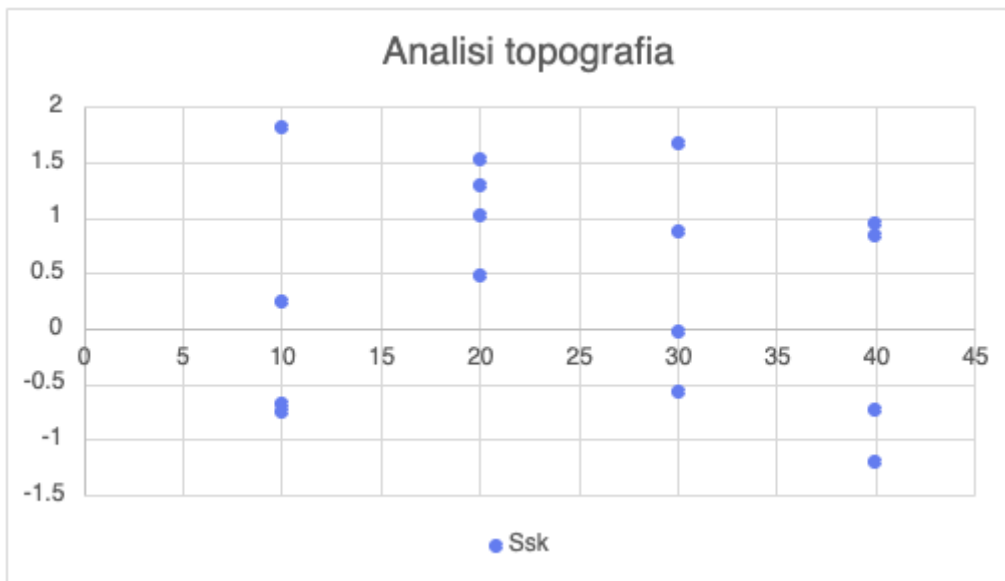


Figura 26. Grafico del parametro Ssk relativo all'artefatto "Drill Holes".

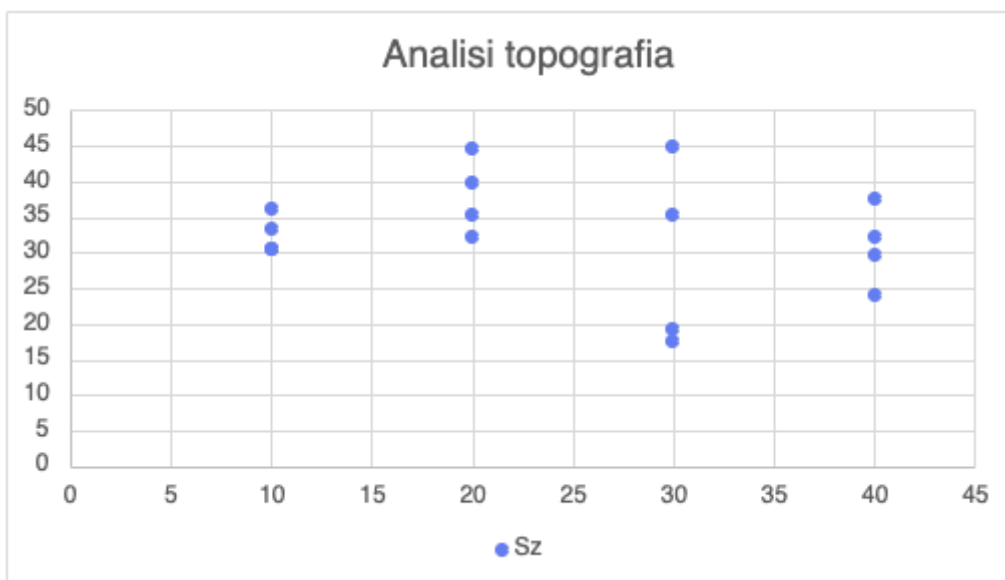


Figura 27. Grafico del parametro Sz relativo all'artefatto "Drill Holes".

## Appendice 8

angolo	Elemento	CMM D /mm	diameter/mm	CMM form dev / mm	circularity-flatness/mm	Err size/mm	Err shape/mm	distanza centro-centro/mm	curvature (1/R)	Err size/%	Err shape/%
90	5	4.925333333	4.93	0.011333333	0.0287	0.01	0.0174		0.405679513	0.20%	153.24%
90	10	10.10566667	10.08	0.137333333	0.0452	-0.03	-0.0921	12.51	0.198412698	-0.30%	-67.09%
90	16	16.09533333	16.09	0.124333333	0.0413	0	-0.0830	30.51	0.124300808	0.00%	-66.78%
90	25	25.108	25.11	0.122	0.0399	0	-0.0821	56.01	0.079649542	0.00%	-67.30%
90	50	50.08933333	50.11	0.128	0.0386	0.02	-0.0894	98.5	0.039912193	0.04%	-69.84%
90	5	4.925333333	4.92	0.011333333	0.0264	-0.01	0.0151		0.406504065	-0.20%	132.94%
90	10	10.10566667	10.09	0.137333333	0.0449	-0.01	-0.0924	12.5	0.198216056	-0.10%	-67.31%
90	16	16.09533333	16.09	0.124333333	0.041	-0.01	-0.0833	30.5	0.124300808	-0.06%	-67.02%
90	25	25.108	25.1	0.122	0.0407	-0.01	-0.0813	56	0.079681275	-0.04%	-66.64%
90	50	50.08933333	50.1	0.128	0.039	0.02	-0.0890	98.49	0.03992016	0.04%	-69.53%
90	5	4.925333333	4.94	0.011333333	0.0322	0.01	0.0209		0.4048583	0.20%	184.12%
90	10	10.10566667	10.08	0.137333333	0.0478	-0.02	-0.0895	12.51	0.198412698	-0.20%	-65.19%
90	16	16.09533333	16.09	0.124333333	0.0432	-0.01	-0.0911	30.51	0.124300808	-0.06%	-65.25%
90	25	25.108	25.1	0.122	0.0416	-0.01	-0.0804	56.01	0.079681275	-0.04%	-65.90%
90	50	50.08933333	50.1	0.128	0.0398	0.01	-0.0882	98.5	0.03992016	0.02%	-68.91%
45	5	4.925333333	4.92	0.011333333	0.0202	-0.01	0.0089		0.406504065	-0.20%	78.24%
45	10	10.10566667	10.08	0.137333333	0.0395	-0.03	-0.0978	12.5	0.198412698	-0.30%	-71.24%
45	16	16.09533333	16.1	0.124333333	0.0375	0.01	-0.0868	30.5	0.124223602	0.06%	-69.84%
45	25	25.108	25.12	0.122	0.0379	0.01	-0.0841	56	0.079617834	0.04%	-68.93%
45	50	50.08933333	50.1	0.128	0.035	0.01	-0.0930	98.5	0.03992016	0.02%	-72.66%
45	5	4.925333333	4.91	0.011333333	0.0195	-0.02	0.0082		0.407331976	-0.41%	72.06%
45	10	10.10566667	10.09	0.137333333	0.0401	-0.01	-0.0972	12.5	0.198216056	-0.10%	-70.80%
45	16	16.09533333	16.1	0.124333333	0.0373	0.01	-0.0870	30.5	0.124223602	0.06%	-70.00%
45	25	25.108	25.11	0.122	0.0373	0	-0.0847	56	0.079649542	0.00%	-69.43%
45	50	50.08933333	50.11	0.128	0.0349	0.02	-0.0931	98.5	0.039912193	0.04%	-72.73%
45	5	4.925333333	4.91	0.011333333	0.0161	-0.01	0.0048		0.407331976	-0.20%	42.06%
45	10	10.10566667	10.08	0.137333333	0.0427	-0.03	-0.0946	12.5	0.198412698	-0.30%	-68.91%
45	16	16.09533333	16.1	0.124333333	0.0387	0	-0.0856	30.51	0.124223602	0.00%	-68.87%
45	25	25.108	25.11	0.122	0.0397	0	-0.0823	56	0.079649542	0.00%	-67.46%
45	50	50.08933333	50.1	0.128	0.0351	0.01	-0.0929	98.51	0.03992016	0.02%	-72.58%
90	piano				0.0085		-0.0128				
90	piano				0.0092		-0.0121				
90	piano				0.0088		-0.0125				
45	piano				0.0088		-0.0125				
45	piano				0.008		-0.0133				
45	piano				0.0096		-0.0117				

Figura 28. Tabella contenente i valori ottenuti dalle misure eseguite sull'artefatto "Hemispherical cavities".

## Appendice 9

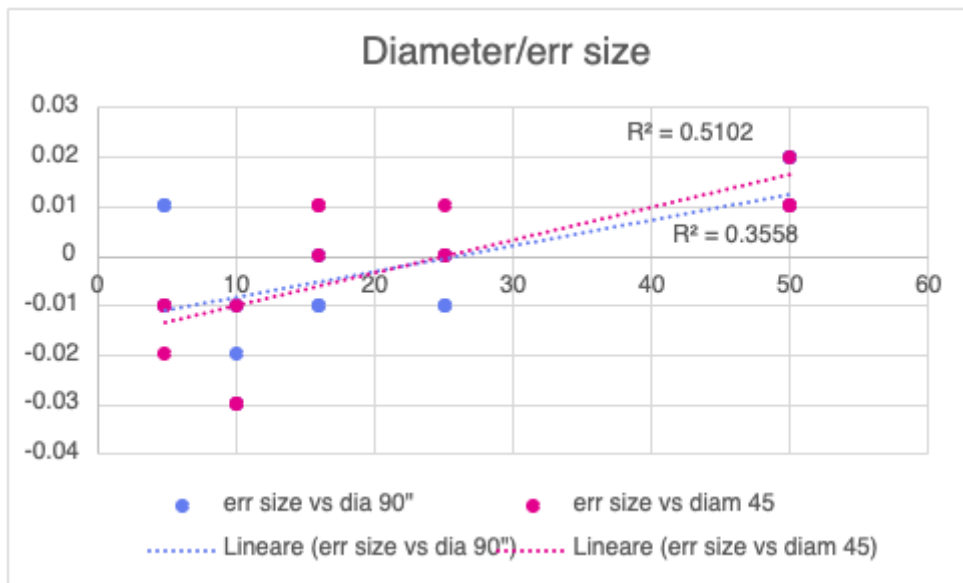


Figura 29. Grafico errore dimensionale vs diametro dell'artefatto "Hemispherical Cavities".

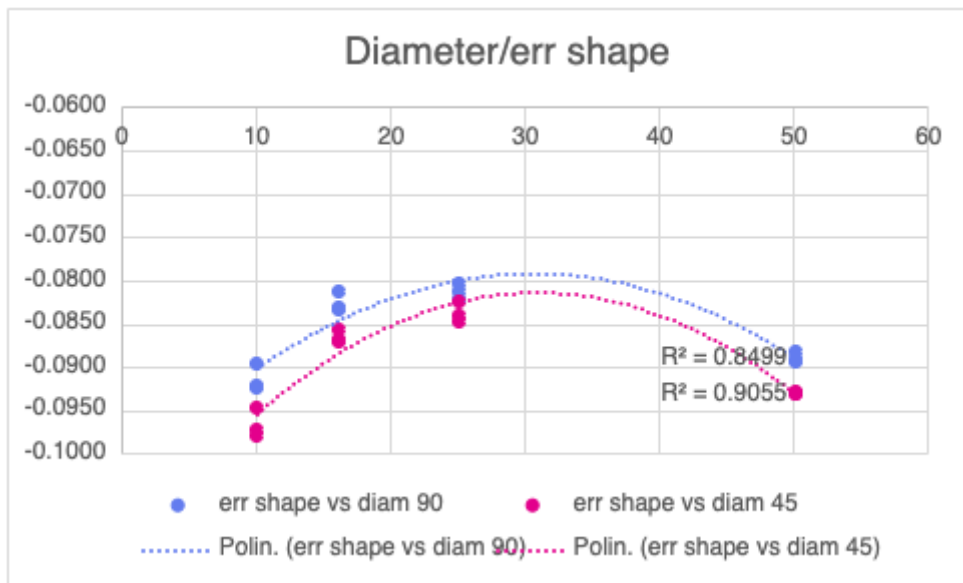


Figura 30. Grafico errore di forma vs diametro dell'artefatto "Hemispherical Cavities".

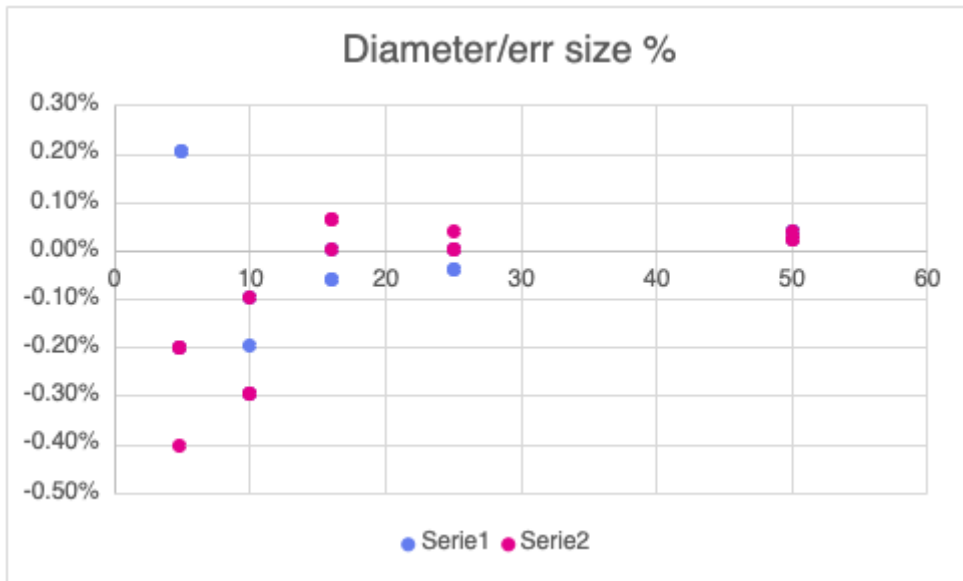


Figura 31. Grafico errore dimensionale percentuale vs diametro dell'artefatto "Hemispherical Cavities".

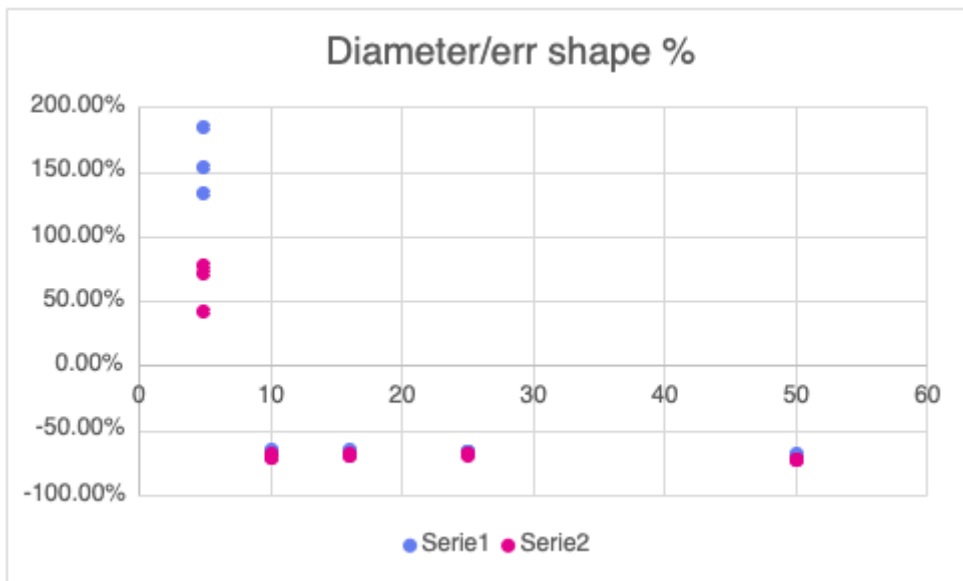


Figura 32. Grafico errore di forma percentuale vs diametro dell'artefatto "Hemispherical Cavities".

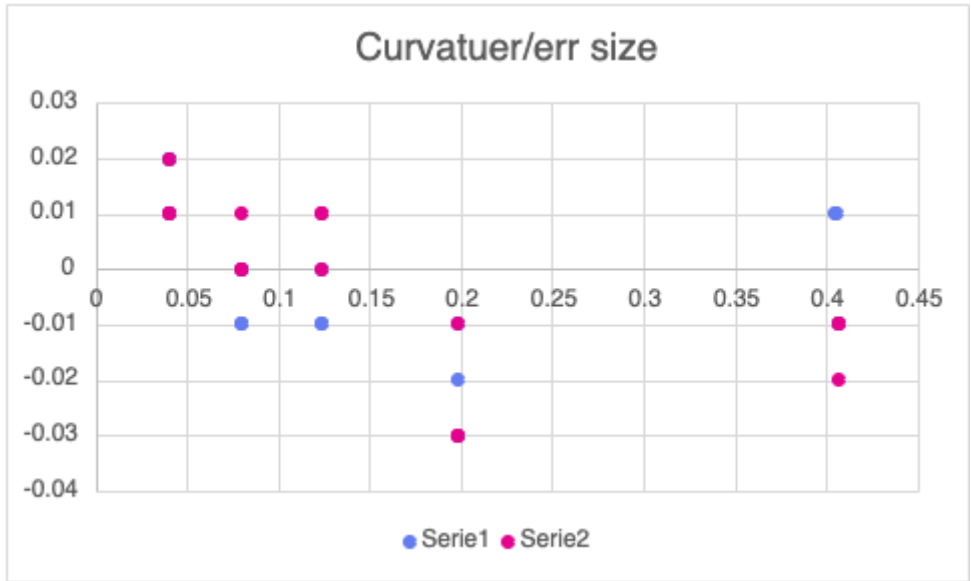


Figura 33. Grafico errore dimensionale vs curvatura dell'artefatto "Hemispherical Cavities".

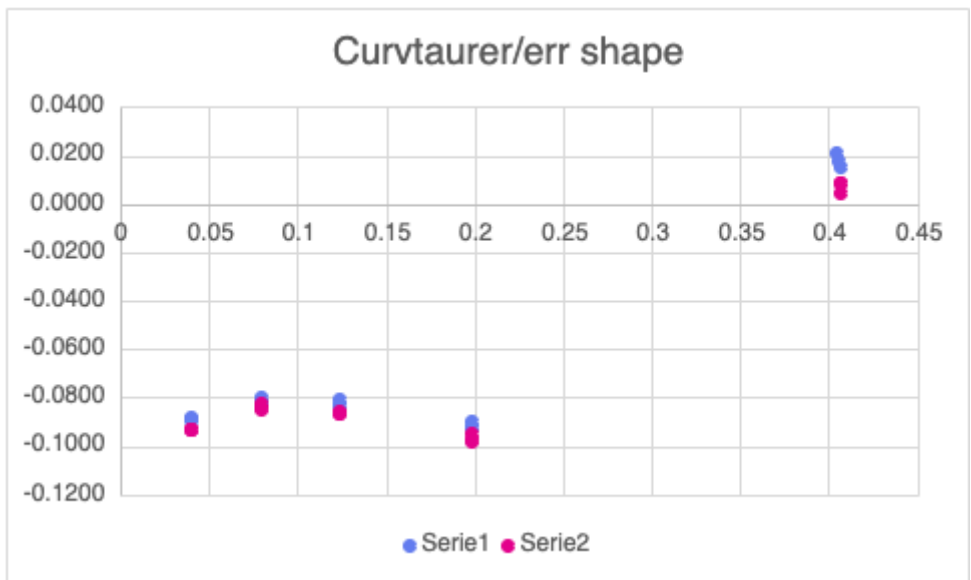


Figura 34. Grafico errore di forma vs curvatura dell'artefatto "Hemispherical Cavities".

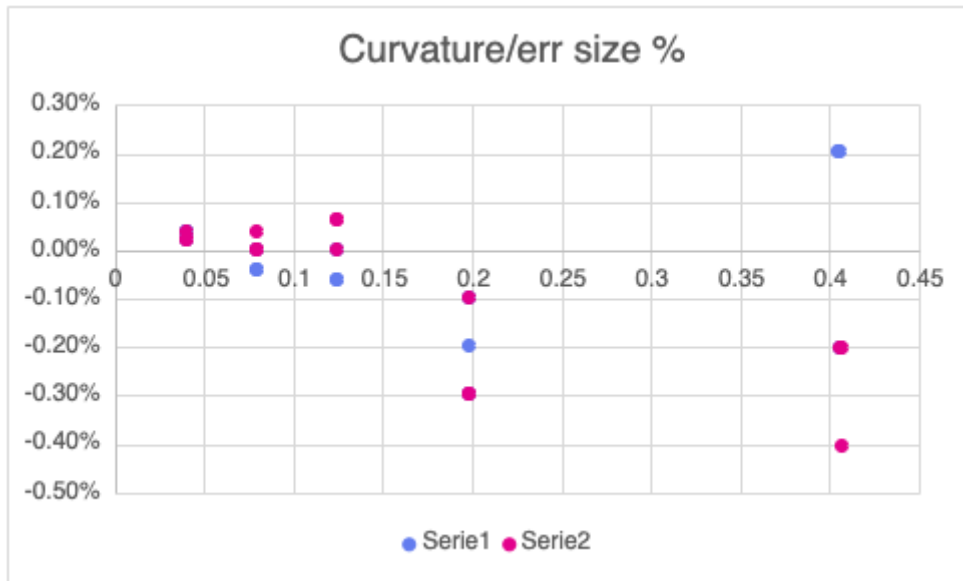


Figura 35. Grafico errore dimensionale percentuale vs curvatura dell'artefatto "Hemispherical Cavities".

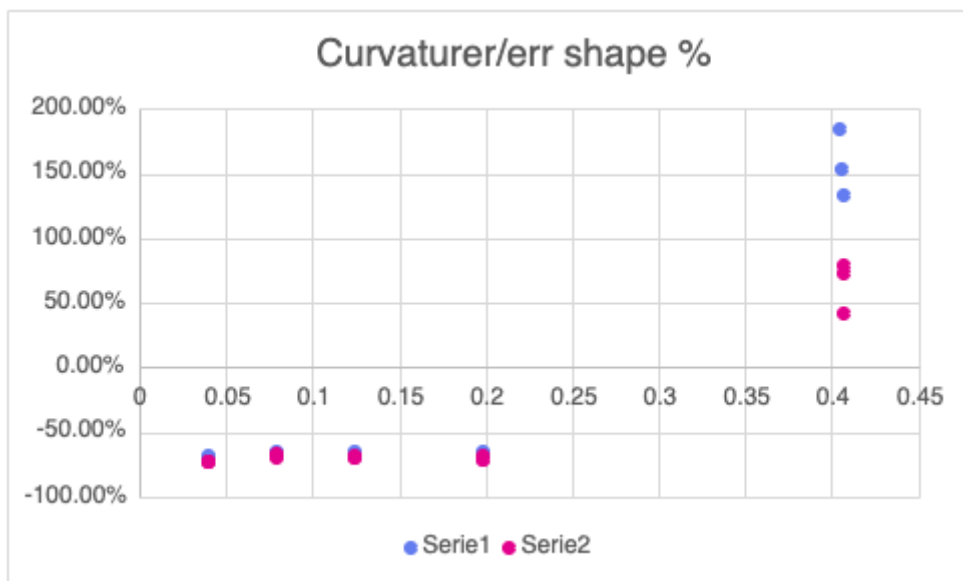


Figura 36. Grafico errore di forma percentuale vs curvatura dell'artefatto "Hemispherical Cavities".

## Appendice 10

elemento	elemento	Sq/micron	Ssk	Sz/micron	Sa/micron
5	5	3.58554	0.703616	38.5116	2.7257
5	5	5.02236	1.93213	54.2486	3.39582
5	5	4.46738	0.814776	43.0164	3.32753
10	10	2.95403	0.118383	29.1298	2.32734
10	10	2.99732	0.124589	31.0403	2.35583
10	10	3.14877	0.253127	29.4624	2.46365
16	16	4.12535	0.234584	34.5311	3.23164
16	16	3.09282	0.507925	28.2604	2.36959
16	16	3.12381	0.406934	31.052	2.43535
25	25	3.32269	0.0215512	30.3692	2.62054
25	25	2.96657	-0.00276856	32.5371	2.3544
25	25	2.85208	-0.0210695	32.1925	2.24788
50	50	2.90769	-0.0572417	26.8348	2.30447
50	50	2.50933	-0.167602	24.9019	1.97797
50	50	2.31362	-0.101887	18.4537	1.83516
sup_A	1	2.99661	0.0820805	25.4178	2.38735
sup_B	1	2.9777	0.0743467	24.3612	2.37991
sup_C	1	3.00191	0.0310146	24.7559	2.40271

Figura 37. Tabella relative alle misure ottenute con la topografia della superficie dell'artefatto "Hemispherical Cavities".

## Appendice 11

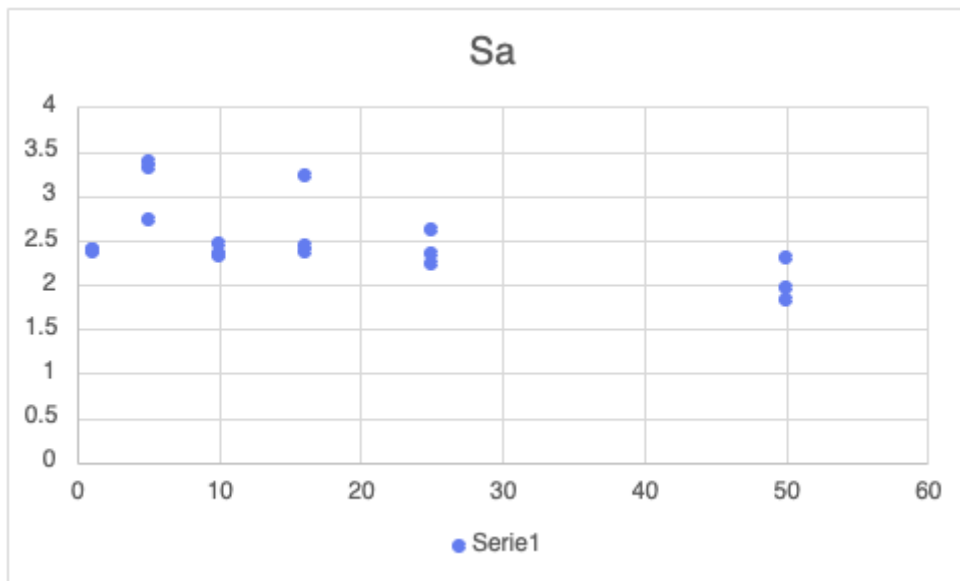


Figura 38. Grafico del parametro Sa dell'artefatto "Hemispherical Cavities".

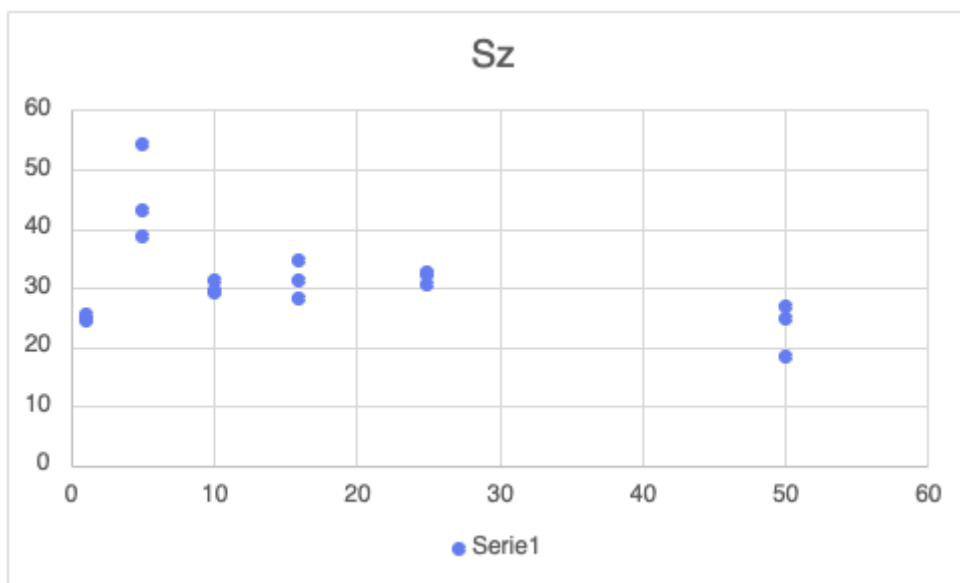


Figura 39. Grafico del parametro Sz dell'artefatto "Hemispherical Cavities".

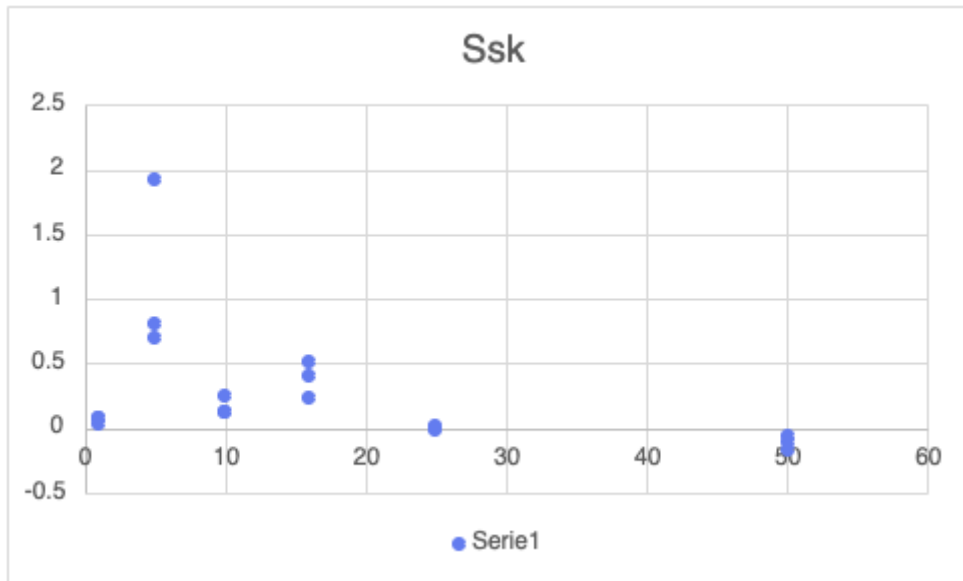


Figura 40. Grafico del parametro  $Ssk$  dell'artefatto "Hemispherical Cavities".

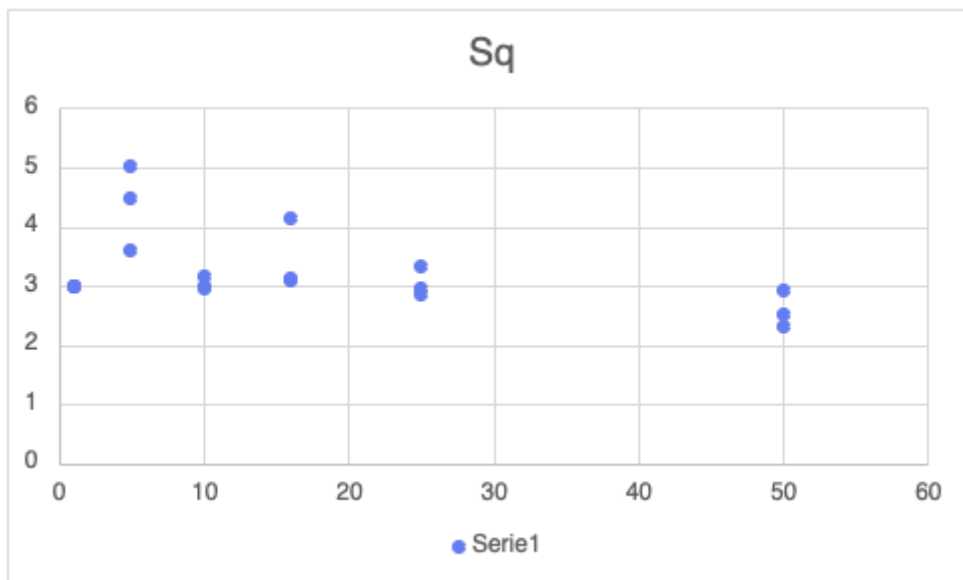


Figura 41. Grafico del parametro  $Sq$  dell'artefatto "Hemispherical Cavities".

## Appendice 12

elemento	diameter / mm	cylindricity / mm	Err size / mm	Err shape / mm
L02	49.23	0.0095	-0.01	0.00117
L03	49.25	0.0081	-0.01	0.00277
L04	49.24	0.0084	0.00	0.00340
L05	49.25	0.0081	0.00	0.00443
L06	49.25	0.0074	-0.02	0.00207
L07	49.24	0.0057	-0.02	-0.00130
L08	49.23	0.0067	-0.02	0.00270
L09	49.24	0.0072	-0.03	0.00187
L10	49.23	0.0031	-0.01	-0.00123
L11	49.25	0.0108	-0.01	0.00480
L12	49.25	0.0099	-0.02	0.00323
L02	49.23	0.0113	-0.01	0.00297
L03	49.25	0.0102	-0.01	0.00487
L04	49.23	0.0097	-0.01	0.00470
L05	49.24	0.01	-0.01	0.00633
L06	49.25	0.0087	-0.02	0.00337
L07	49.23	0.0063	-0.03	-0.00070
L08	49.23	0.0082	-0.03	0.00420
L09	49.24	0.0072	-0.03	0.00187
L10	49.23	0.0062	-0.01	0.00187
L11	49.25	0.0104	-0.01	0.00440
L12	49.25	0.0093	-0.02	0.00263
L02	49.23	0.0099	-0.01	0.00157
L03	49.25	0.0082	-0.01	0.00287
L04	49.23	0.0084	-0.01	0.00340
L05	49.25	0.0086	0.00	0.00493
L06	49.25	0.0081	-0.02	0.00277
L07	49.23	0.0061	-0.03	-0.00090
L08	49.23	0.008	-0.03	0.00400
L09	49.24	0.0093	-0.03	0.00397
L10	49.22	0.0084	-0.02	0.00407
L11	49.24	0.0118	-0.02	0.00580
L12	49.24	0.0111	-0.03	0.00443
Centrale	50.25	0.019	-0.02	-0.02067

Figura 42. Tabella delle misure dell'artefatto "Albero".

## Appendice 13

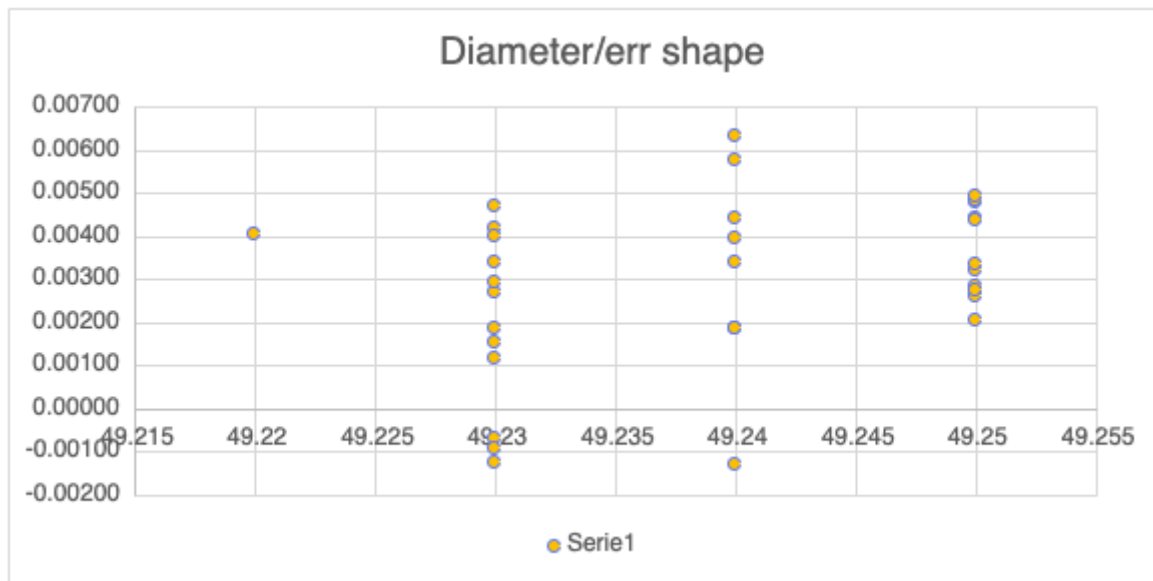


Figura 43. Grafico errore di forma vs diametro dell'artefatto "Albero".

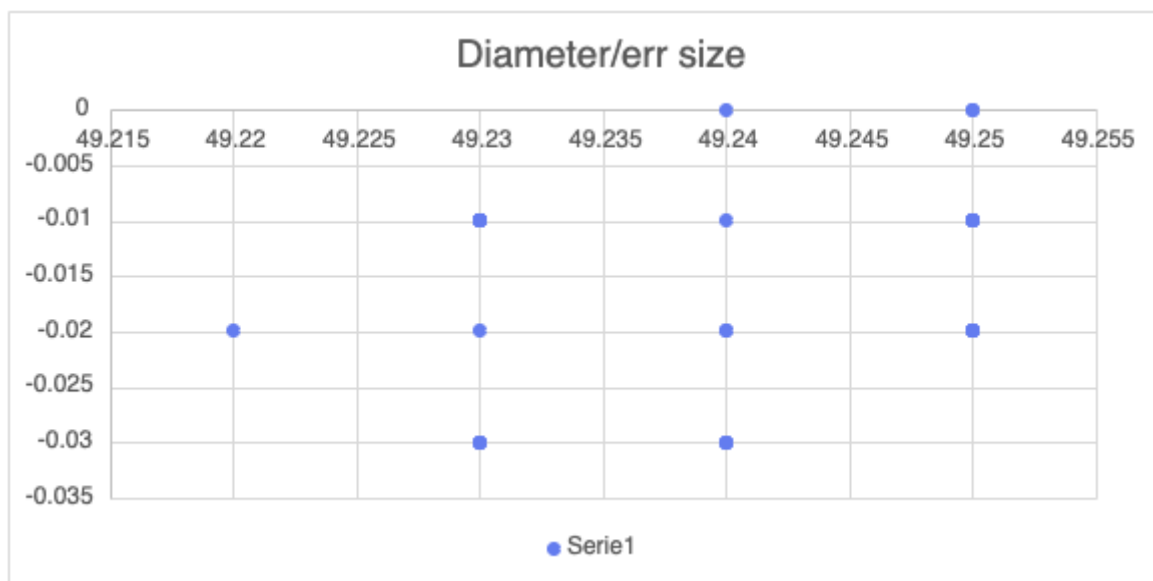


Figura 44. Grafico errore di forma vs diametro dell'artefatto "Albero".

## Appendice 14

Elemento	Sq/micron	Ssk/micron	Sz/micron	Sa/micron	Sa1/micron	Str	Sdq	Sdr/ %	Texture wavelenght / micron	Waviness wavelenght / micron
centrale	0.741394	0.715557	154.373	0.530605	13.673	0.178593	0.137979	0.925082	80.84	43.31
L02	1.29096	0.676727	12.3192	1.01585	18.5231	//	0.184233	1.6585	14.37	106.83
L03	2.40812	0.76259	19.5463	1.94814	39.9121	//	0.212486	2.18903	14.37	225.12
L04	0.904871	0.161252	9.2158	0.706058	11.9424	0.142875	0.184415	1.66084	37.54	14.44
L05	1.23579	0.15248	10.8316	0.992101	11.8532	0.0154708	0.224513	2.43397	14.43	107.03
L06	2.32419	0.1199	15.8078	2.00474	43.459	//	0.209624	2.12905	17.32	225.212
L07	0.859953	-0.0752071	9.0456	0.663471	15.492	0.064011	0.155429	1.18782	34.65	28.87
L08	1.30429	0.341422	11.1756	1.03373	12.9039	0.0152234	0.227602	2.50515	37.53	106.83
L09	2.44372	0.53725	18.0109	2.03028	40.7422	//	0.220539	2.35442	14.44	225.212
L10	1.02668	0.1609	8.081	0.80423	12.2784	0.0222939	0.186012	1.69085	34.65	34.65
L11	1.38676	0.154608	12.6837	1.1134	14.1946	//	0.203792	2.02022	14.43	108.03
L12	2.58451	0.421686	19.7043	2.05707	39.9361	//	0.248667	2.95837	17.34	225.212
L13	2.68444	0.392142	19.8587	2.19915	42.7932	//	0.24886	2.96438	14.44	225.212
L14	2.55343	0.209729	18.0255	2.09972	44.0281	//	0.241709	2.80835	17.34	225.212
L15	2.26744	0.519198	20.3623	1.84956	41.7061	//	0.213189	2.19471	14.36	225.212
L16	2.33997	0.489212	20.6254	1.91553	44.6919	//	0.218438	2.30865	14.44	225.212
L17	2.33096	0.321215	19.3609	1.91186	43.8459	//	0.21101	2.15938	14.44	225.212
L18	2.45106	0.326232	18.8181	2.02837	44.5889	//	0.212878	2.19988	14.44	225.212
L19	2.63046	0.323923	18.5725	2.19249	43.5022	//	0.23513	2.66129	14.44	225.212
L20	2.6216	0.473206	19.6052	2.16297	42.7585	//	0.230432	2.56091	14.44	225.212
L21	2.61144	0.498243	19.8806	2.17801	44.1415	//	0.219204	2.32738	14.44	225.212
L22	2.68214	0.529384	19.1281	2.2395	44.2137	//	0.218681	2.31653	14.44	225.212
L23	2.6845	0.521684	17.9966	2.23394	43.9955	//	0.217593	2.28984	14.44	225.212

Figura 45. Tabella contenente i valori ottenuti dalla topografia dell'artefatto "Albero".

## Appendice 15

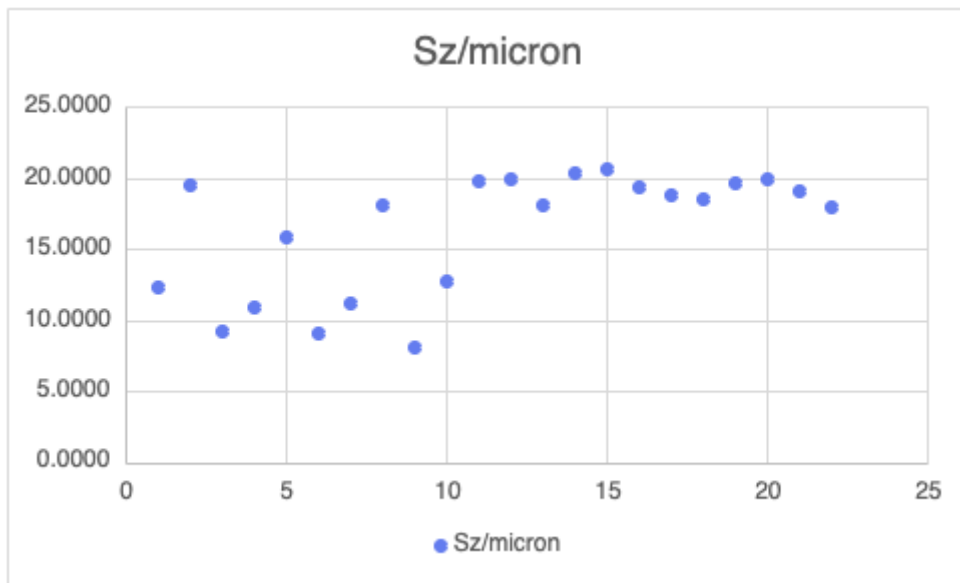


Figura 46. Grafico del parametro Sz dell'artefatto "Albero".

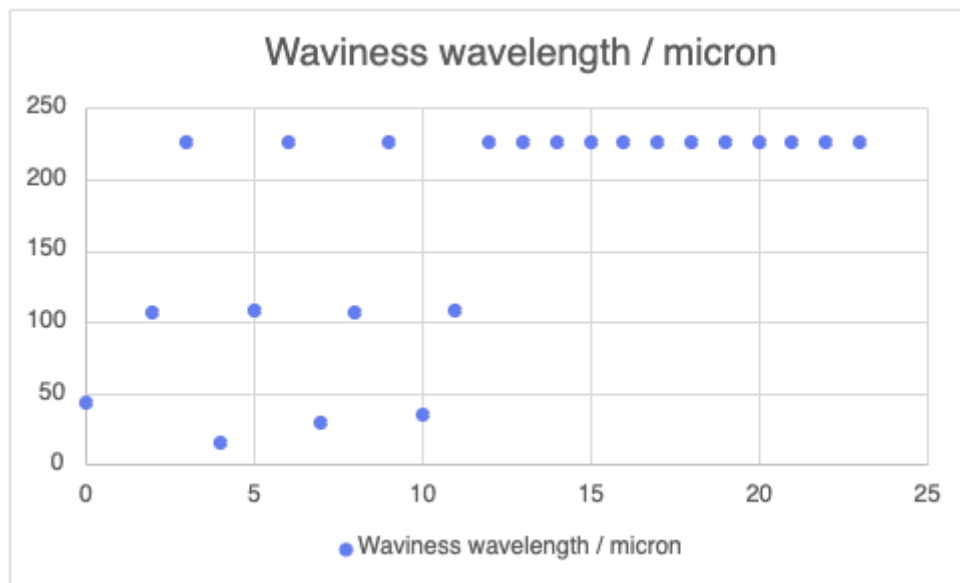


Figura 47. Grafico del parametro *Waviness wavelength* dell'artefatto "Albero".

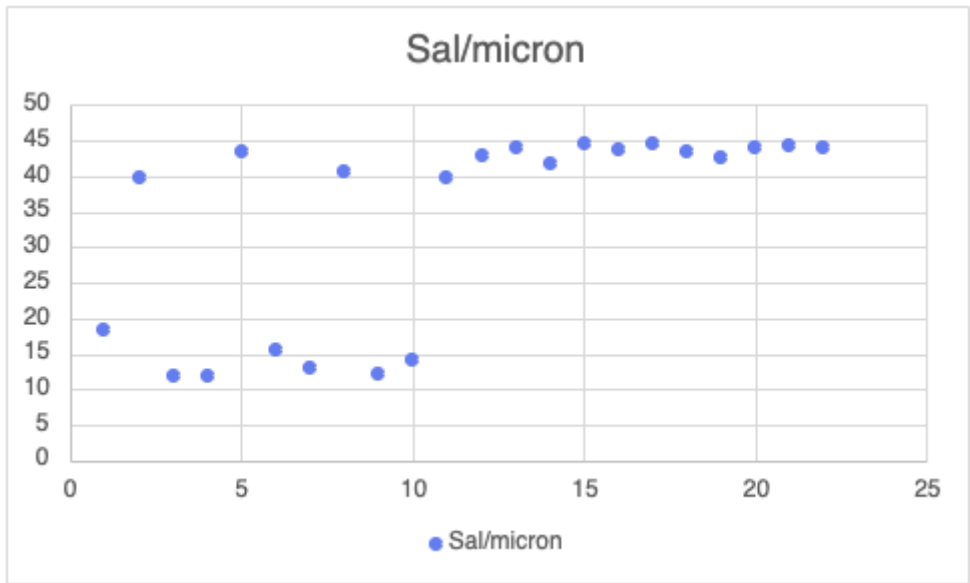


Figura 48. Grafico del parametro *Sal* dell'artefatto "Albero".

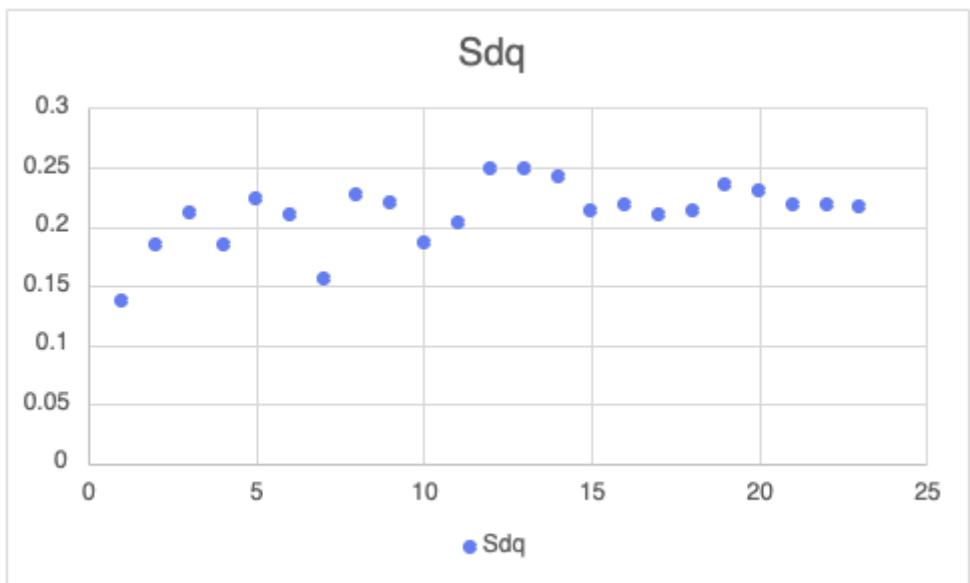


Figura 49. Grafico del parametro *Sdq* dell'artefatto "Albero".

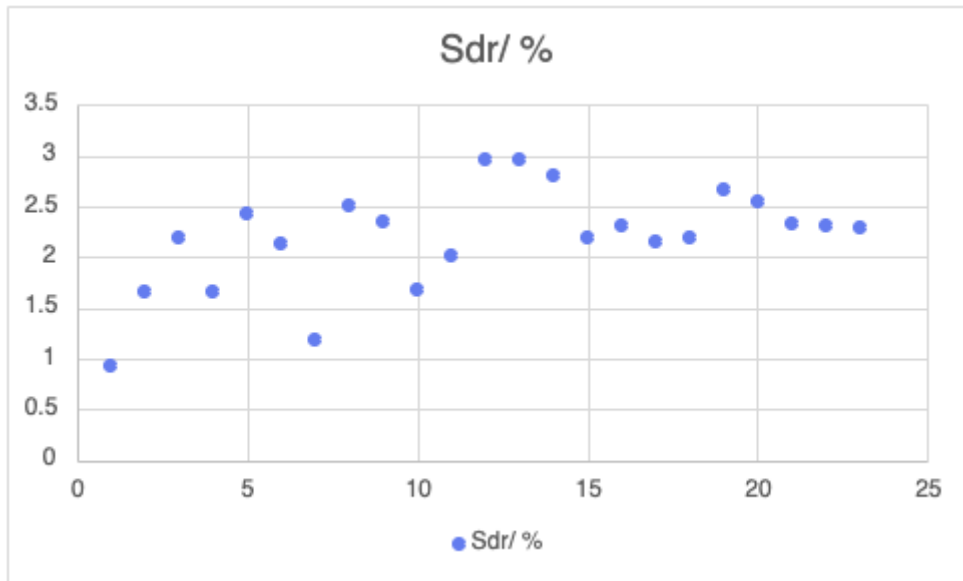


Figura 50. Grafico del parametro Sdr% dell'artefatto "Albero".

# Appendice 16

Artefatto	ang°	Elem°	CMM D /mm	diameter/mm	CMM form dev / mm	circularity-flatness/n	Err size/n	Err shape/n	Mean Curvat	Err size/%	Err shape/%	Sa / um	Isotropy	Curvature
cave cilindriche	45	10	10.115	10.080	0.057	0.028	-0.035	-0.029	-0.098863075	-0.003460208	-0.507042254	1.92263	0	-1
cave cilindriche	45	10	10.115	10.100	0.057	0.028	-0.015	-0.025	-0.098863075	-0.001482946	-0.501760563	1.99981	0	-1
cave cilindriche	45	10	10.115	10.110	0.057	0.031	-0.005	-0.029	-0.098863075	-0.000494315	-0.447183099	1.9799	0	-1
cave cilindriche	45	20	20.037	20.060	0.069	0.023	0.023	-0.046	-0.049908169	0.00115787	-0.664723032	2.68027	0	-1
cave cilindriche	45	20	20.037	20.050	0.069	0.023	0.013	-0.045	-0.049908169	0.00058768	-0.655976676	4.14423	0	-1
cave cilindriche	45	20	20.037	20.040	0.069	0.023	0.003	-0.046	-0.049908169	0.000159706	-0.663265306	2.70332	0	-1
cave cilindriche	45	40	40.682	40.690	0.049	0.016	0.008	-0.032	-0.024581137	0.000206482	-0.664609053	1.82306	0	-1
cave cilindriche	45	40	40.682	40.680	0.049	0.018	-0.002	-0.031	-0.024581137	-3.93298E-05	-0.631687243	2.8429	0	-1
cave cilindriche	45	40	40.682	40.680	0.049	0.020	-0.002	-0.029	-0.024581137	-3.93298E-05	-0.596707819	1.86946	0	-1
cave cilindriche	90	10	10.115	10.060	0.057	0.035	-0.055	-0.022	-0.098863075	-0.005437469	-0.39084507	1.92263	0	-1
cave cilindriche	90	10	10.115	10.050	0.057	0.034	-0.065	-0.023	-0.098863075	-0.0064261	-0.410211268	1.99981	0	-1
cave cilindriche	90	10	10.115	10.060	0.057	0.040	-0.055	-0.017	-0.098863075	-0.005437469	-0.290492958	1.9799	0	-1
cave cilindriche	90	20	20.037	20.040	0.069	0.029	0.003	-0.039	-0.049908169	0.000159706	-0.569970845	2.68027	0	-1
cave cilindriche	90	20	20.037	20.030	0.069	0.029	-0.007	-0.039	-0.049908169	-0.000339376	-0.574344023	4.14423	0	-1
cave cilindriche	90	20	20.037	20.040	0.069	0.027	0.003	-0.041	-0.049908169	0.000159706	-0.60058309	2.70332	0	-1
cave cilindriche	90	30	30.173	30.180	0.064	0.021	0.007	-0.044	-0.033142213	0.000231995	-0.515444015	2.786	0	-1
cave cilindriche	90	30	30.173	30.190	0.064	0.021	0.017	-0.044	-0.033142213	0.000563418	-0.483564994	2.432	0	-1
cave cilindriche	90	30	30.173	30.180	0.064	0.020	0.007	-0.044	-0.033142213	0.000231995	-0.523166023	3.33	0	-1
cave cilindriche	90	40	40.682	40.690	0.049	0.024	0.008	-0.025	-0.024581137	0.000206482	-0.504115226	1.82306	0	-1
cave cilindriche	90	40	40.682	40.690	0.049	0.023	0.008	-0.026	-0.024581137	0.000206482	-0.537037037	2.8429	0	-1
cave cilindriche	90	40	40.682	40.690	0.049	0.023	0.008	-0.025	-0.024581137	0.000206482	-0.518518519	1.86946	0	-1
cave cilindriche	90	45	44.912	44.900	0.008	0.011	-0.012	0.003	-0.022285764	-0.000267189	0.313253012	1.009	0	-1
cave cilindriche	90	45	44.912	44.910	0.008	0.010	-0.002	0.002	-0.022285764	-4.45315E-05	0.228915663	0.632	0	-1
cave cilindriche	90	5	5.108	4.880	0.039	0.055	-0.228	0.016	-0.195771339	-0.044635865	0.407692308	3.618	0	-1
cave cilindriche	90	5	5.108	4.840	0.039	0.058	-0.268	0.019	-0.195771339	-0.052466719	0.484615385	1.714	0	-1
cave cilindriche	90	5	5.108	4.910	0.039	0.055	-0.198	0.016	-0.195771339	-0.038762725	0.397435897	2.47	0	-1
Cave Emisferiche	45	5	4.925	4.920	0.011	0.020	-0.005	0.009	-0.406063887	-0.002030319	0.782352941	2.4257	1	-1
Cave Emisferiche	45	5	4.925	4.910	0.011	0.020	-0.015	0.008	-0.406063887	-0.004060639	0.720588235	2.498	1	-1
Cave Emisferiche	45	5	4.925	4.910	0.011	0.016	-0.015	0.005	-0.406063887	-0.002030319	0.420588235	2.335	1	-1
Cave Emisferiche	45	10	10.106	10.080	0.137	0.040	-0.026	-0.098	-0.197908764	-0.002968631	-0.712378641	2.32734	1	-1
Cave Emisferiche	45	10	10.106	10.090	0.137	0.040	-0.016	-0.097	-0.197908764	-0.000989544	-0.708009709	2.35563	1	-1
Cave Emisferiche	45	10	10.106	10.080	0.137	0.043	-0.026	-0.095	-0.197908764	-0.002968631	-0.68907767	2.46365	1	-1
Cave Emisferiche	45	16	16.095	16.100	0.124	0.038	0.005	-0.087	-0.12425962	0.000621298	-0.698391421	2.403	1	-1
Cave Emisferiche	45	16	16.095	16.100	0.124	0.037	0.005	-0.087	-0.12425962	0.000621298	-0.7	2.36959	1	-1
Cave Emisferiche	45	16	16.095	16.100	0.124	0.039	0.005	-0.086	-0.12425962	0	-0.688739946	2.43535	1	-1
Cave Emisferiche	45	25	25.108	25.120	0.122	0.038	0.012	-0.084	-0.079655887	0.000398279	-0.689344262	2.62054	1	-1
Cave Emisferiche	45	25	25.108	25.110	0.122	0.037	0.002	-0.085	-0.079655887	0	-0.694262295	2.3544	1	-1
Cave Emisferiche	45	25	25.108	25.110	0.122	0.040	0.002	-0.082	-0.079655887	0	-0.674590164	2.24788	1	-1
Cave Emisferiche	45	50	50.089	50.100	0.128	0.035	0.011	-0.093	-0.039928661	0.000199643	-0.7265625	2.30447	1	-1
Cave Emisferiche	45	50	50.089	50.110	0.128	0.035	0.021	-0.093	-0.039928661	0.000399287	-0.72734375	2.229	1	-1
Cave Emisferiche	45	50	50.089	50.100	0.128	0.035	0.011	-0.093	-0.039928661	0.000199643	-0.72578125	2.216	1	-1

Figura 51. Tabella contenente tutti i valori delle misure ottenuti da tutti gli artefatti presi in considerazione.

Cave Emisferiche	90	5	4.925	4.930	0.011	0.029	0.005	0.017	-0.406063887	0.002030319	1.532352941	2.4257	1	-1
Cave Emisferiche	90	5	4.925	4.920	0.011	0.026	-0.005	0.015	-0.406063887	-0.002030319	1.329411765	2.498	1	-1
Cave Emisferiche	90	5	4.925	4.940	0.011	0.032	0.015	0.021	-0.406063887	0.002030319	1.841176471	2.335	1	-1
Cave Emisferiche	90	10	10.106	10.080	0.137	0.045	-0.026	-0.092	-0.197908764	-0.002968631	-0.670873786	2.32734	1	-1
Cave Emisferiche	90	10	10.106	10.090	0.137	0.045	-0.016	-0.092	-0.197908764	-0.000989544	-0.673058252	2.35583	1	-1
Cave Emisferiche	90	10	10.106	10.080	0.137	0.048	-0.026	-0.090	-0.197908764	-0.001979088	-0.651941748	2.46365	1	-1
Cave Emisferiche	90	16	16.095	16.090	0.124	0.041	-0.005	-0.083	-0.12425962	0	-0.667828418	2.403	1	-1
Cave Emisferiche	90	16	16.095	16.090	0.124	0.041	-0.005	-0.083	-0.12425962	-0.000621298	-0.670241287	2.36959	1	-1
Cave Emisferiche	90	25	25.108	25.110	0.122	0.040	-0.005	-0.081	-0.12425962	-0.000621298	-0.652546917	2.43535	1	-1
Cave Emisferiche	90	25	25.108	25.100	0.122	0.041	-0.008	-0.082	-0.079655887	0	-0.67295082	2.62054	1	-1
Cave Emisferiche	90	25	25.108	25.100	0.122	0.041	-0.008	-0.081	-0.079655887	-0.000398279	-0.666393443	2.3544	1	-1
Cave Emisferiche	90	50	50.089	50.110	0.128	0.039	0.021	-0.089	-0.079655887	-0.000398279	-0.659016393	2.24788	1	-1
Cave Emisferiche	90	50	50.089	50.100	0.128	0.039	0.021	-0.089	-0.039928661	0.000399287	-0.6984375	2.30447	1	-1
Cave Emisferiche	90	50	50.089	50.100	0.128	0.039	0.011	-0.089	-0.039928661	0.000399287	-0.6953125	2.229	1	-1
Cave Emisferiche	90	50	50.089	50.100	0.128	0.040	0.011	-0.088	-0.039928661	0.000199643	-0.6890625	2.216	1	-1
Ball plate screwed	90	20	20.050	20.044	0.030	0.036	-0.006	0.006	0.099750623	-0.000299252	0.208948215	4.88	1	1
Ball plate screwed	90	20	20.050	20.046	0.030	0.033	-0.004	0.003	0.099750623	-0.000199501	0.104327696	6.079	1	1
Ball plate screwed	90	20	20.050	20.042	0.030	0.034	-0.008	0.004	0.099750623	-0.000399002	0.150825704	9.232	1	1
Ball plate Red	90	38	38.095	38.094	0.013	0.019	-0.001	0.006	0.052500328	-2.62502E-05	0.432523224	0.426	1	1
Ball plate Red	90	38	38.095	38.100	0.013	0.020	0.005	0.007	0.052500328	0.000131251	0.510660855	0.437	1	1
Ball plate Red	90	38	38.095	38.100	0.013	0.019	0.005	0.005	0.052500328	0.000131251	0.406477347	0.418	1	1
Ball plate Black	90	38	38.104	38.096	0.011	0.016	-0.008	0.006	0.052487928	-0.000209952	0.521614728	0.426	1	1
Ball plate Black	90	38	38.104	38.098	0.011	0.017	-0.006	0.007	0.052487928	-0.000157464	0.618739072	0.437	1	1
Ball plate Black	90	38	38.104	38.100	0.011	0.016	-0.004	0.005	0.052487928	-0.000104976	0.456865165	0.418	1	1
Albero	0	L02	49.237	49.230	0.008	0.010	-0.007	0.001	0.02030993	-0.00014217	0.144578313	1.01585	0	1
Albero	0	L02	49.237	49.230	0.008	0.011	-0.007	0.003	0.02030993	-0.00014217	0.361445783	0.992101	0	1
Albero	0	L02	49.237	49.230	0.008	0.010	-0.007	0.002	0.02030993	-0.00014217	0.192771084	1.03373	0	1
Albero	0	L11	49.260	49.250	0.006	0.011	-0.010	0.005	0.020300447	-0.000203004	0.8	1.1134	0	1
Albero	0	L11	49.260	49.250	0.006	0.010	-0.010	0.004	0.020300447	-0.000203004	0.733333333	0.992101	0	1
Albero	0	L11	49.260	49.240	0.006	0.012	-0.020	0.006	0.020300447	-0.000406009	0.966666667	1.03373	0	1
Stera S3N4	0	6	5.980	5.970	0.024	0.035	-0.010	0.011	0.334448161	-0.001672241	0.441666667	0.697	1	1
Stera S3N4	0	6	5.980	5.960	0.024	0.033	-0.020	0.009	0.334448161	-0.003344482	0.375	0.676	1	1
Stera S3N4	0	6	5.980	5.970	0.024	0.041	-0.010	0.017	0.334448161	-0.001672241	0.720833333	0.711	1	1

Figura 52. Tabella contenente tutti i valori delle misure ottenuti da tutti gli artefatti presi in considerazione.

Artefatto	d CMM / mm	s(d) CMM / mm	CMM form / mm	s(form dev) CMM / mm	d / mm	s(d) / mm	form dev / mm	s(form dev) / mm	E size	u(E size)	E form	u(E form)	E size %	E shape %	E size UL	E shape UL	E form LL	E shape LL	E size LL
cave cilindriche	5.1077	0.0086	0.039	0.006	4.877	0.035119	0.056	0.001858315	-0.231	0.020875	0.017	0.003626	-0.04523	0.429915	-0.18928	-0.27278	0.02402	0.009514	-0.18928
cave cilindriche	10.115	0.0143	0.0568	0.0134	10.077	0.024221	0.033	0.004858811	-0.038	0.016239	-0.024	0.008177	-0.00379	-0.42459	-0.00585	-0.07081	-0.00776	-0.04047	-0.00585
cave cilindriche	20.0368	0.0162	0.0686	0.0059	20.043	0.010328	0.026	0.003085882	0.007	0.011092	-0.043	0.003844	0.000326	-0.62148	0.028718	-0.01565	-0.03495	-0.01565	-0.05032
cave cilindriche	<b>30.173</b>	<b>0.0071</b>	<b>0.064</b>	<b>0.0195</b>	30.183	0.005774	0.020	0.000404145	0.010	0.005283	-0.044	0.011261	0.000342	-0.68698	0.0209	-0.00023	-0.02145	-0.00023	-0.06649
cave cilindriche	40.6816	0.0047	0.0486	0.0034	40.687	0.005164	0.021	0.003177211	0.005	0.004031	-0.028	0.002687	0.000125	-0.57545	0.013129	-0.003	-0.02259	-0.003	-0.03334
cave cilindriche	44.912	0.0025	0.0083	0.0015	44.903	0.005774	0.011	0.000404145	-0.009	0.003632	0.002	0.000897	-0.00019	0.285141	-0.0014	-0.01593	0.00416	0.000573	-0.0014
cave emisferiche	4.925333333	0.0049	0.011333333	0.0025	4.922	0.01169	0.024	0.006197661	-0.004	0.007318	0.013	0.003858	-0.00074	1.104412	0.01097	-0.0183	0.020233	0.01097	0.0048
cave emisferiche	10.10566667	0.0404	0.137333333	0.0097	10.083	0.005164	0.043	0.003207283	-0.022	0.023515	-0.094	0.005898	-0.00221	-0.68422	0.024696	-0.06936	-0.08217	-0.06936	-0.10576
cave emisferiche	16.09533333	0.0286	0.124333333	0.0172	16.085	0.005477	0.040	0.00236615	0.000	0.01588	-0.085	0.010024	-2.1E-05	-0.67962	0.031026	-0.03169	-0.06445	-0.03169	-0.10455
cave emisferiche	25.108	0.0044	0.122	0.0111	25.108	0.007528	0.040	0.00164002	0.000	0.005034	-0.082	0.006478	1.33E-05	-0.67609	0.010402	-0.00973	-0.06953	-0.00973	-0.09544
cave emisferiche	50.08933333	0.018	0.128	0.0165	50.103	0.005164	0.037	0.002297585	0.014	0.010812	-0.091	0.009618	0.00028	-0.71042	0.035623	-0.00762	-0.0717	-0.00762	-0.11017
Sfera SIGN4	5.98	0.0074	0.0243	0.0032	5.967	0.005774	0.036	0.004403408	-0.013	0.005419	0.012	0.003143	-0.00223	0.493827	-0.0025	-0.02417	0.018285	0.005715	-0.0025
BP-screw	20.050	0.008	0.029	0.004	20.044	0.002	0.034	0.00156205	-0.006	0.004761	0.005	0.002479	-0.0003	0.186554	0.003522	-0.01552	0.010369	0.000452	-0.01552
BP-B	38.104	0.004	0.0107	0.0025	38.098	0.002	0.016	0.00087178	-0.006	0.002582	0.006	0.001529	-0.00016	0.532406	-0.00084	-0.01116	0.008754	0.00264	-0.00084
Albero	49.252	0.001	0.0055	0.002	49.238	0.009	0.0094	0.0015	-0.014	0.005228	0.004	0.001443	-0.00028	0.709091	-0.00354	-0.02446	0.006787	0.001013	-0.00354

Figura 53. Tabella contenente i parametri per costruire i grafici dell'errore dimensionale e di forma relativo a tutti gli artefatti.

## Appendice 17

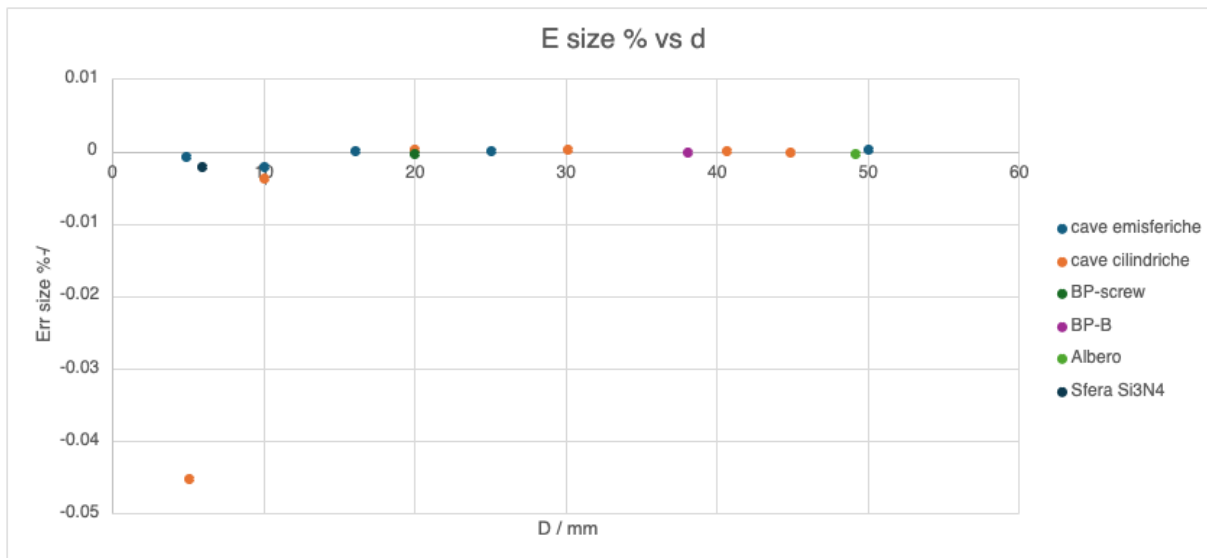


Figura 54. Grafico errore dimensionale percentuale vs diametro di tutti gli artefatti in esame.

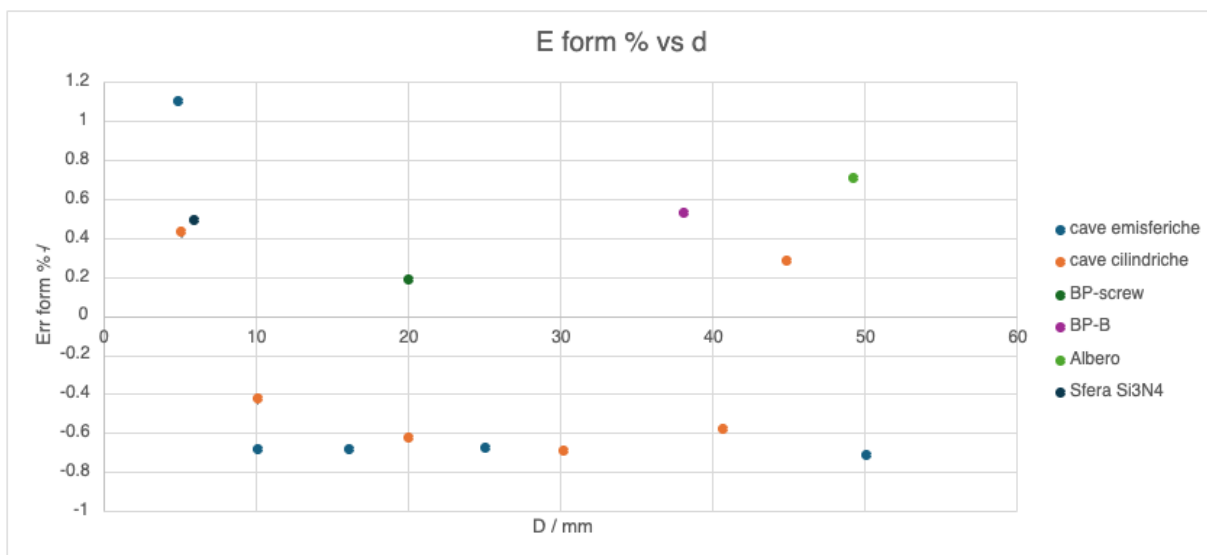


Figura 55. Grafico errore di forma percentuale vs diametro di tutti gli artefatti in esame.

## Appendice 18

In questa appendice vengono presentati le tabelle e i grafici di tutti gli artefatti in esame.

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	0.081814	0.010227	7.72	0.000
Linear	4	0.026681	0.006670	5.04	0.001
diameter/mm	1	0.018510	0.018510	13.98	0.000
Sa / um	1	0.009989	0.009989	7.54	0.008
Isotropy	1	0.021510	0.021510	16.25	0.000
Curvature	1	0.005700	0.005700	4.30	0.042
2-Way Interaction	4	0.035465	0.008866	6.70	0.000
diameter/mm*Sa / um	1	0.011609	0.011609	8.77	0.004
diameter/mm*Isotropy	1	0.030491	0.030491	23.03	0.000
diameter/mm*Curvature	1	0.006212	0.006212	4.69	0.034
Isotropy*Curvature	1	0.009334	0.009334	7.05	0.010
Error	66	0.087389	0.001324		
Lack-of-Fit	59	0.087348	0.001480	255.89	0.000
Pure Error	7	0.000041	0.000006		
Total	74	0.169203			

Figura 56. Tabella dell'analisi della varianza relativo all'errore dimensionale.

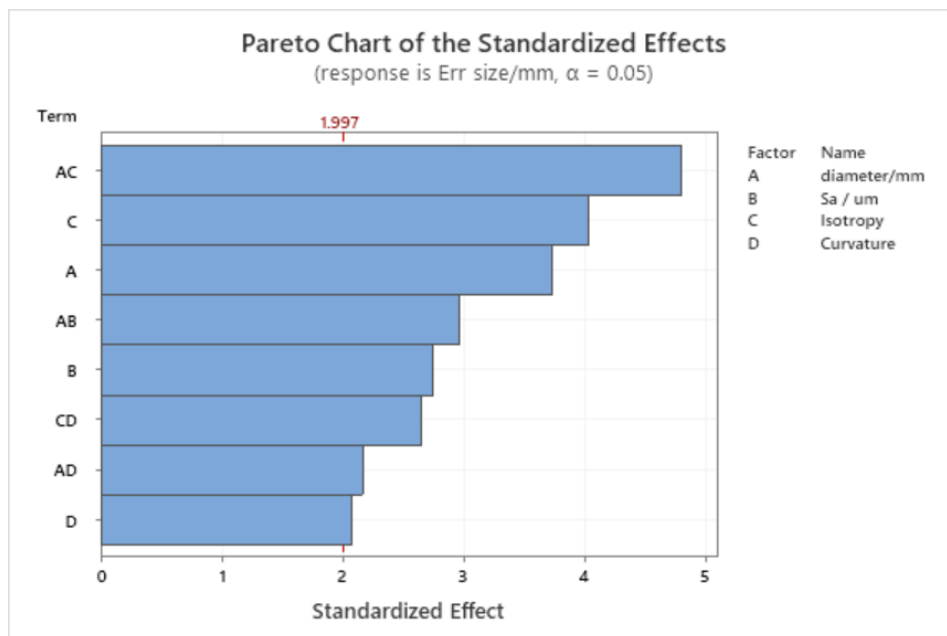


Figura 57. Diagramma di Pareto, mostra il parametro maggiormente influente sull'errore dimensionale.

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	0.084900	0.010612	16.99	0.000
Linear	4	0.019546	0.004887	7.82	0.000
diameter/mm	1	0.005332	0.005332	8.54	0.005
Sa / um	1	0.004979	0.004979	7.97	0.006
Isotropy	1	0.003482	0.003482	5.57	0.021
Curvature	1	0.013128	0.013128	21.02	0.000
2-Way Interaction	4	0.012603	0.003151	5.04	0.001
diameter/mm*Sa / um	1	0.004921	0.004921	7.88	0.007
diameter/mm*Isotropy	1	0.000991	0.000991	1.59	0.212
diameter/mm*Curvature	1	0.000640	0.000640	1.02	0.315
Isotropy*Curvature	1	0.001642	0.001642	2.63	0.110
Error	66	0.041229	0.000625		
Lack-of-Fit	59	0.041136	0.000697	52.76	0.000
Pure Error	7	0.000093	0.000013		
Total	74	0.126129			

Figura 58. Tabella dell'analisi della varianza relativa all'errore di forma.

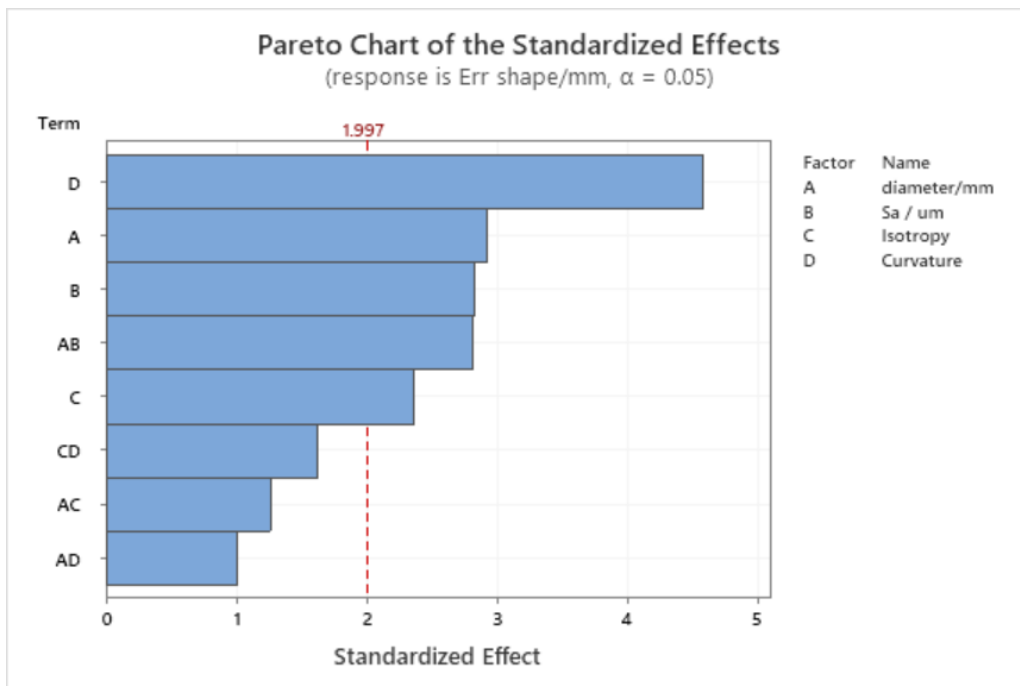


Figura 59. Diagramma di Pareto, mostra il parametro maggiormente influente sull'errore di forma.

## Appendice 19

Vengono presentati i grafici e le tabelle dell'analisi ANOVA dell'artefatto "Drill Holes".

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	11	0.144089	0.013099	36.11	0.000
Linear	6	0.124566	0.020761	57.23	0.000
Sa	1	0.000038	0.000038	0.11	0.749
Elemento	5	0.124335	0.024867	68.55	0.000
2-Way Interaction	5	0.000734	0.000147	0.40	0.838
Sa*Elemento	5	0.000734	0.000147	0.40	0.838
Error	15	0.005441	0.000363		
Lack-of-Fit	6	0.002241	0.000374	1.05	0.454
Pure Error	9	0.003200	0.000356		
Total	26	0.149531			

Figura 60. Tabella dell'analisi della varianza relativa all'errore dimensionale considerando i diametri come valori continui.

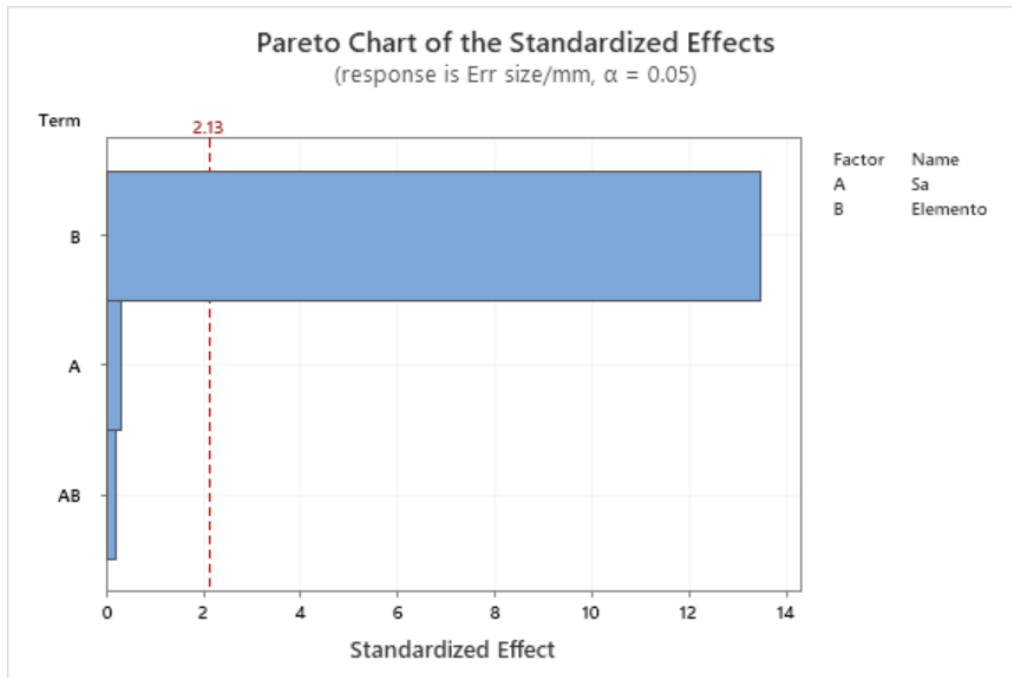


Figura 61. Diagramma di Pareto per identificare l'influenza dei parametri sull'errore dimensionale.

## Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	11	0.010569	0.000961	68.79	0.000
Linear	6	0.006691	0.001115	79.84	0.000
Sa	1	0.000001	0.000001	0.08	0.785
Elemento	5	0.006259	0.001252	89.63	0.000
2-Way Interaction	5	0.000007	0.000001	0.10	0.990
Sa*Elemento	5	0.000007	0.000001	0.10	0.990
Error	15	0.000210	0.000014		
Lack-of-Fit	6	0.000035	0.000006	0.30	0.921
Pure Error	9	0.000175	0.000019		
Total	26	0.010779			

Figura 62. Tabella dell'analisi della varianza relativa all'errore dimensionale considerando i diametri come valori continui.

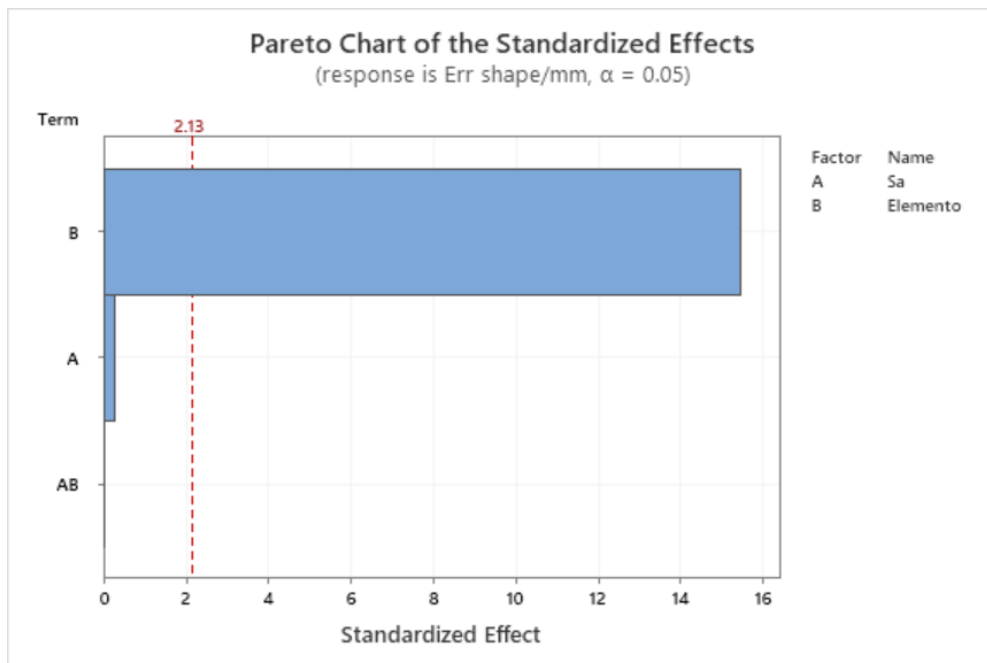


Figura 63. Diagramma di Pareto per identificare l'influenza dei parametri sull'errore di forma.

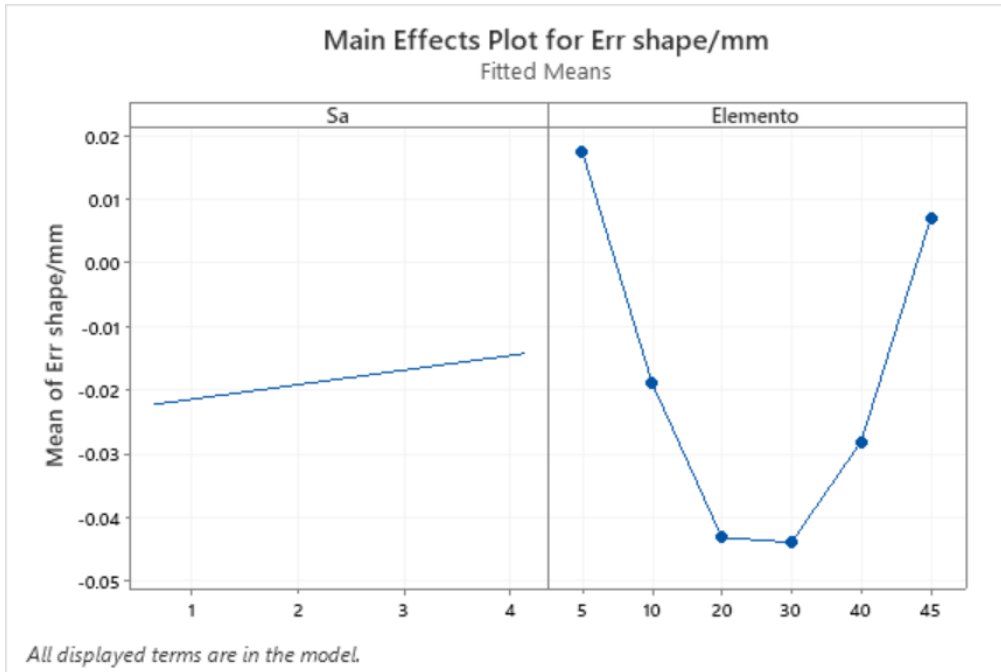


Figura 64. Grafici dove si nota l'influenza del diametro e la non influenza del parametro Sa sull'errore di forma.

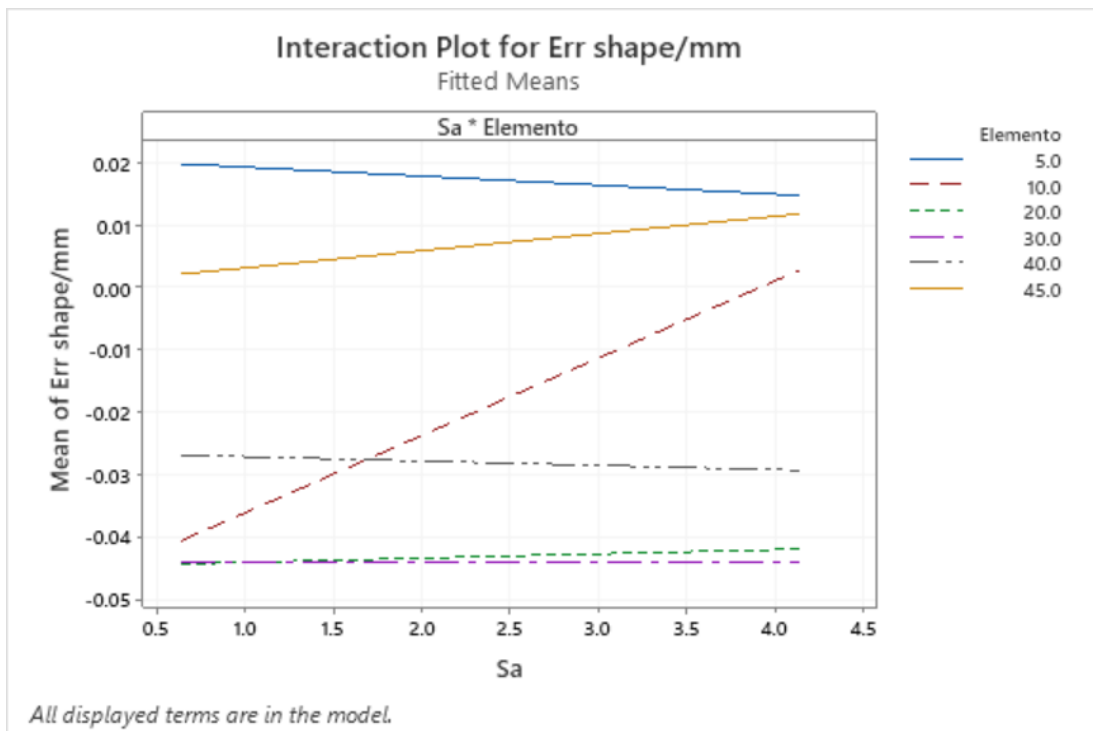


Figura 65. Grafico delle interazioni parametro errore di forma vs Sa/diametro.

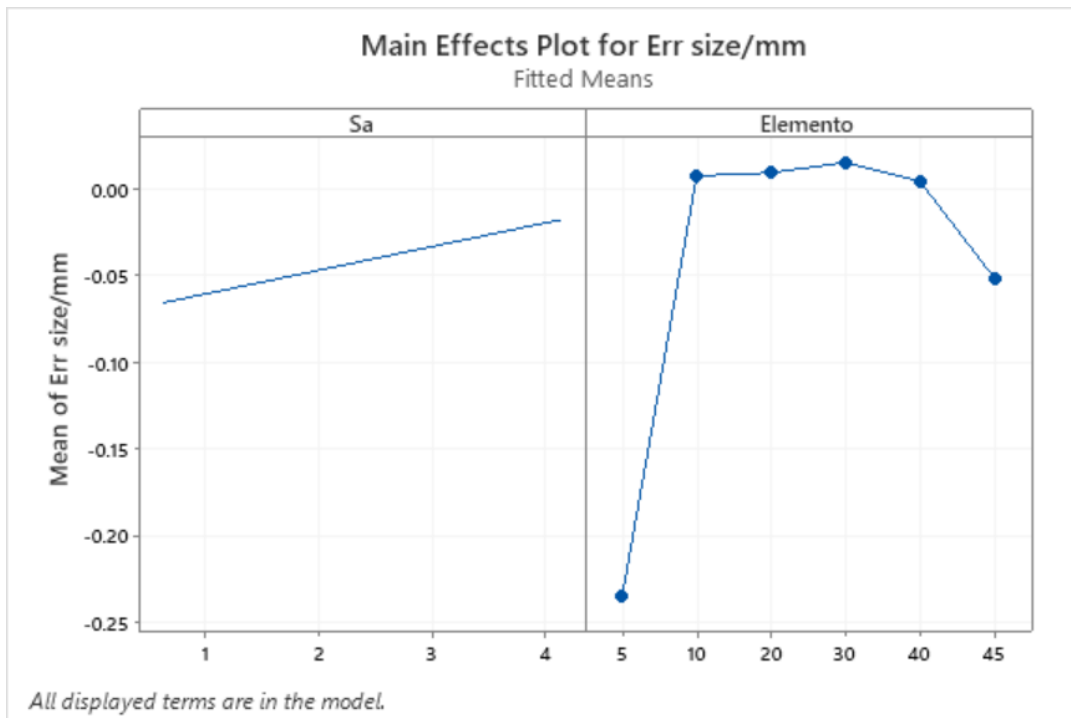


Figura 66. Grafico che mostra l'effetto del parametro Sa e del diametro sull'errore dimensionale.

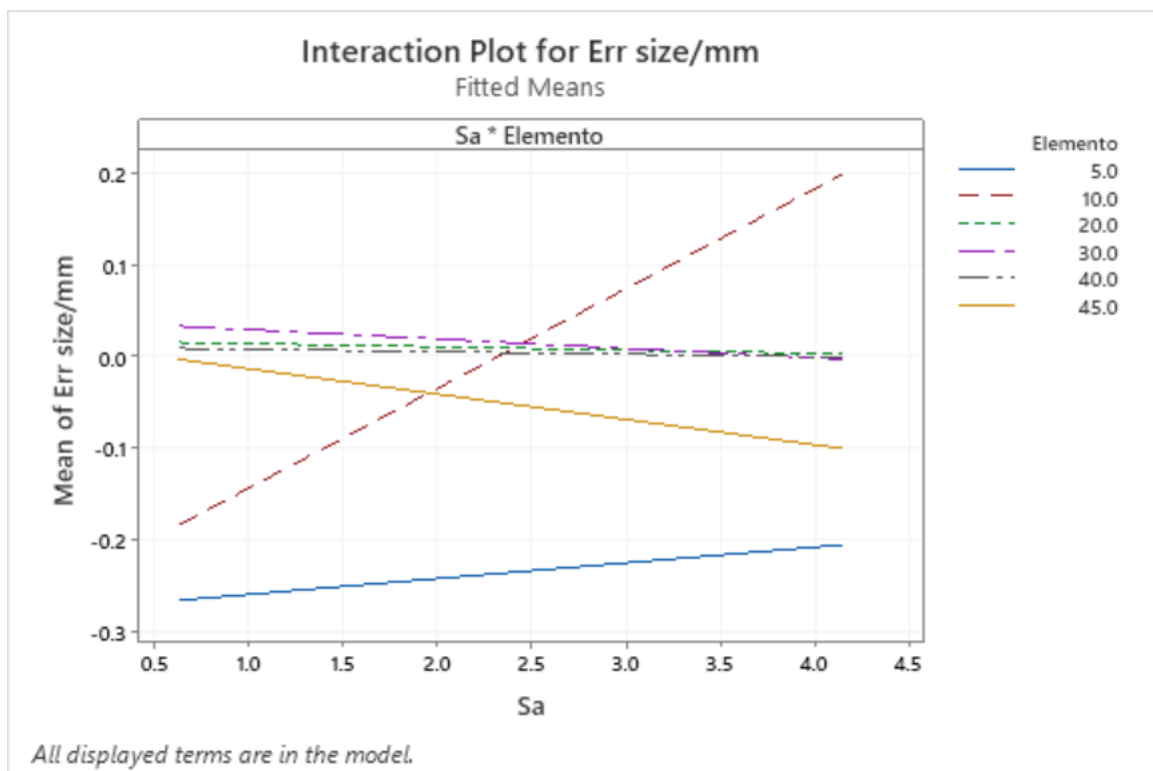


Figura 67. Grafico dell'interazione errore dimensionale vs Sa/diametro.

## Appendice 20

Sono esposti i grafici e le tabelle relative all'analisi ANOVA dell'artefatto "Hemispherical Cavities".

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.004470	0.000497	8.70	0.000
Linear	5	0.002068	0.000414	7.24	0.001
Sa/um	1	0.000001	0.000001	0.01	0.908
Elemento	4	0.002024	0.000506	8.86	0.000
2-Way Interaction	4	0.000211	0.000053	0.93	0.469
Sa/um*Elemento	4	0.000211	0.000053	0.93	0.469
Error	20	0.001142	0.000057		
Lack-of-Fit	5	0.000192	0.000038	0.61	0.696
Pure Error	15	0.000950	0.000063		
Total	29	0.005612			

Figura 68. Tabella dell'analisi ANOVA rispetto all'errore dimensionale.

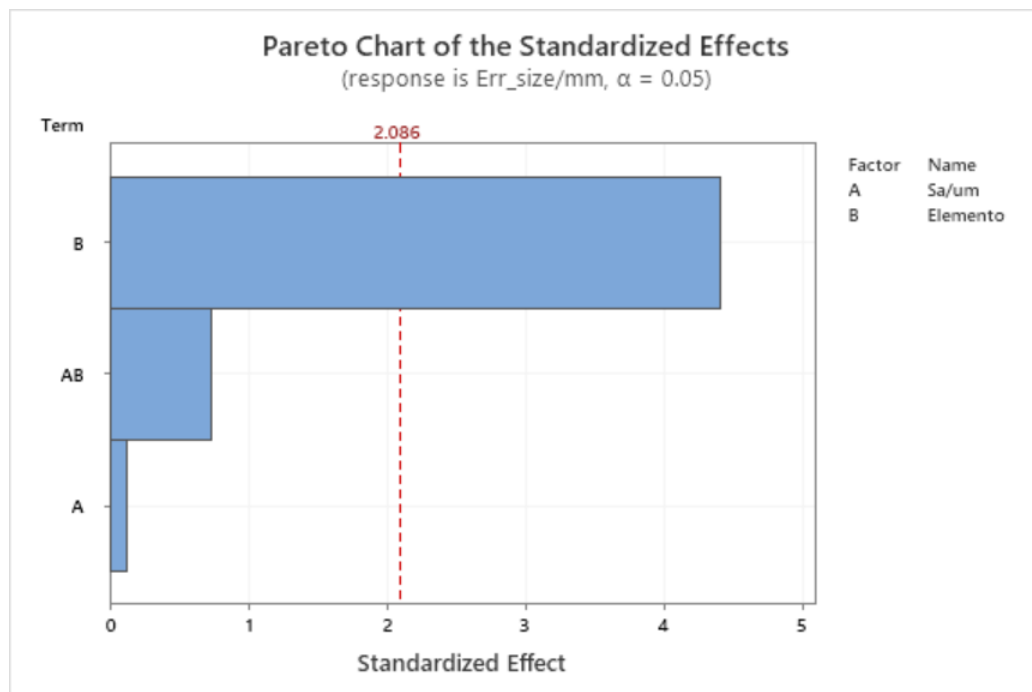


Figura 69. Diagramma di Pareto per l'influenza dei parametri sull'errore dimensionale.

## Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.048945	0.005438	361.39	0.000
Linear	5	0.045109	0.009022	599.52	0.000
Sa/um	1	0.000001	0.000001	0.09	0.767
Elemento	4	0.042220	0.010555	701.39	0.000
2-Way Interaction	4	0.000013	0.000003	0.22	0.923
Sa/um*Elemento	4	0.000013	0.000003	0.22	0.923
Error	20	0.000301	0.000015		
Lack-of-Fit	5	0.000004	0.000001	0.05	0.999
Pure Error	15	0.000297	0.000020		
Total	29	0.049246			

Figura 70. Tabella dell'analisi della varianza sull'errore di forma.

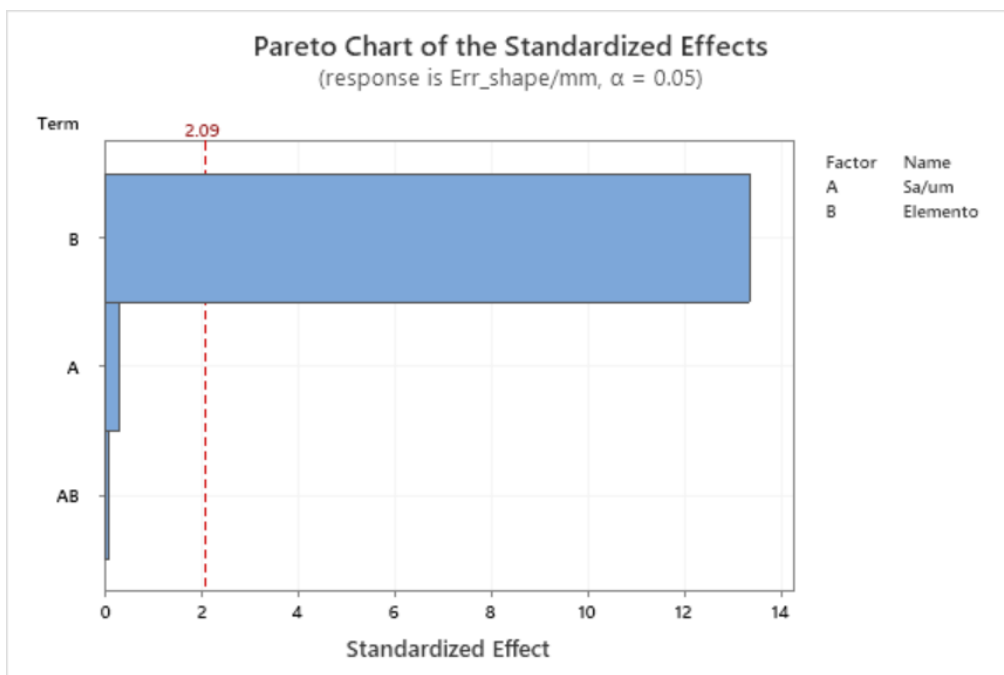


Figura 71. Diagramma di Pareto per l'errore di forma.

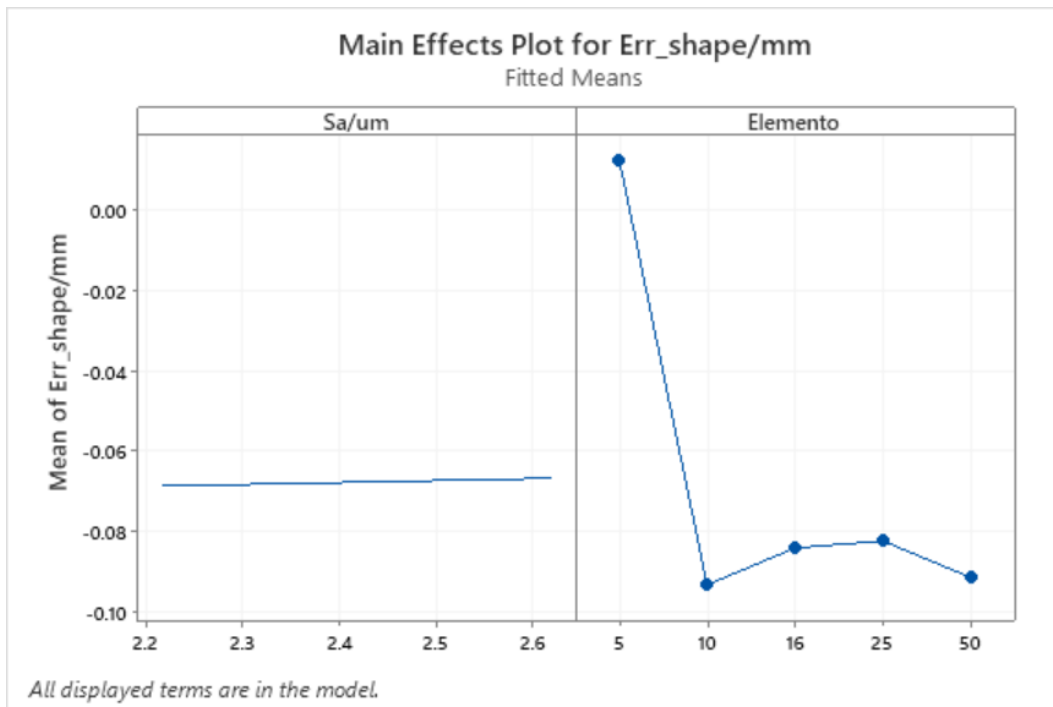


Figura 72. Influenza del parametro Sa e del diametro sull'errore di forma.

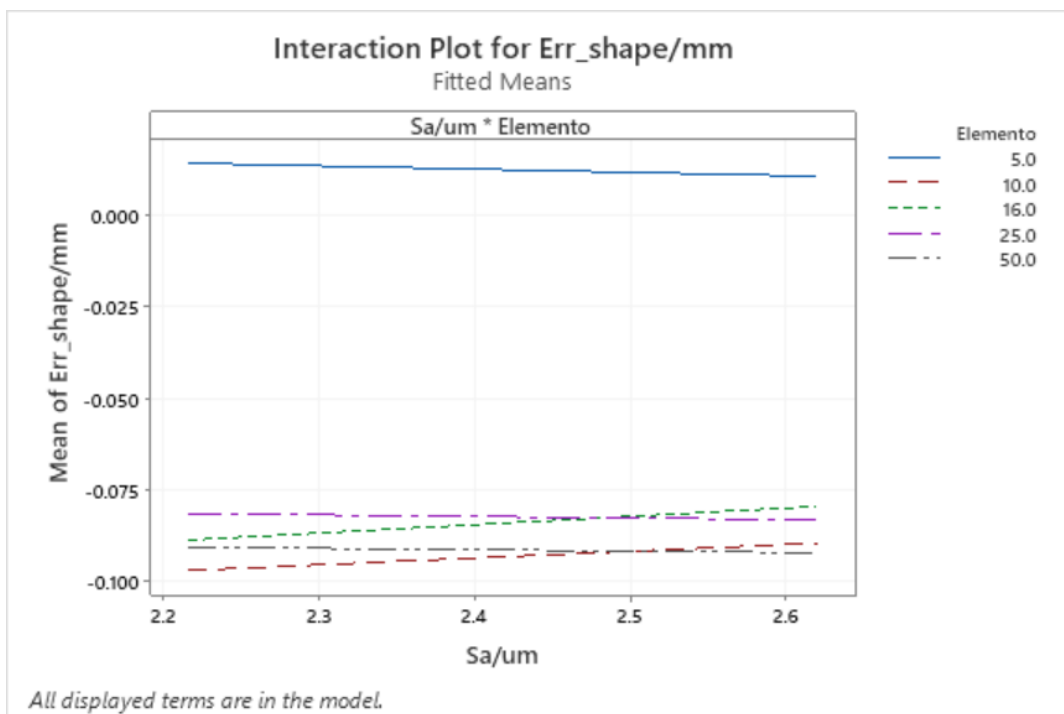


Figura 73. Grafico delle interazioni dei parametri per la valutazione della loro influenza sull'errore di forma.

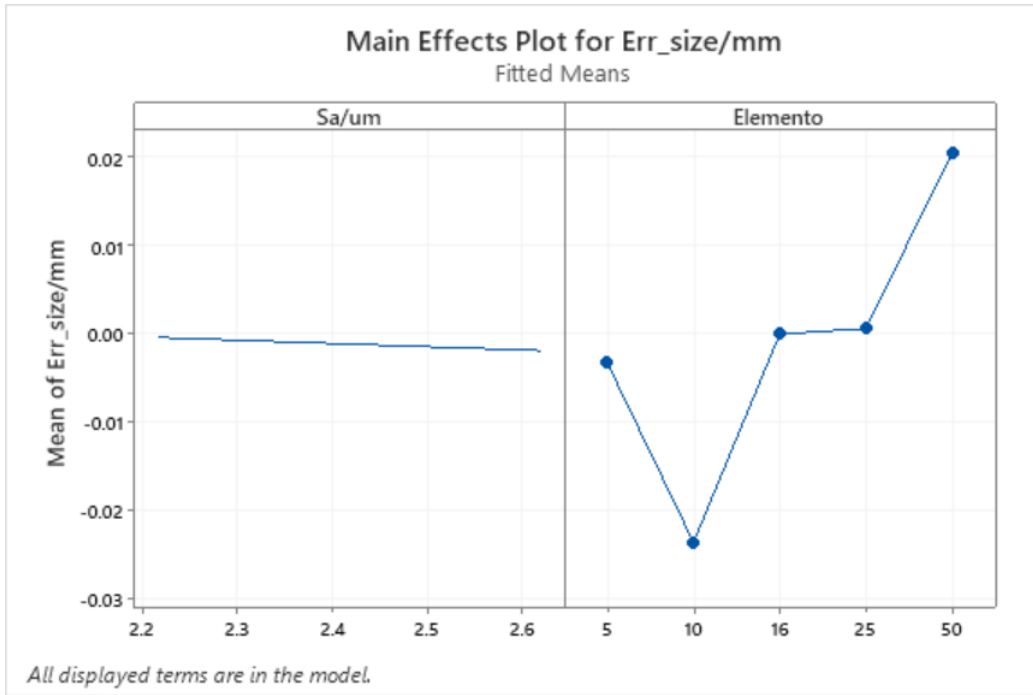


Figura 74. Influenza del parametro Sa e del diametro sull'errore dimensionale.

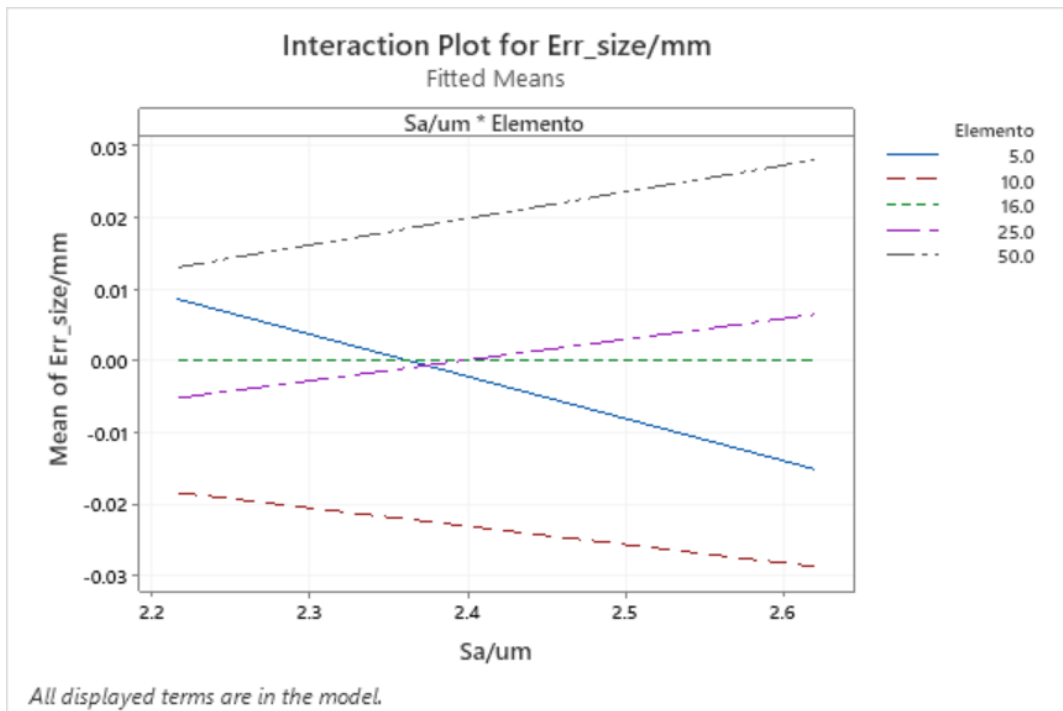


Figura 75. Grafico delle interazioni dei parametri per la valutazione della loro influenza sull'errore dimensionale.

## Appendice 21

Si illustrano le tabelle e i grafici dell'analisi ANOVA relativi all'artefatto "Albero".

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	1	0.000063	0.000063	0.82	0.386
Linear	1	0.000063	0.000063	0.82	0.386
Sa/micron	1	0.000063	0.000063	0.82	0.386
Error	10	0.000769	0.000077		
Total	11	0.000832			

Figura 76. Tabella dell'analisi della varianza del parametro errore dimensionale vs Sa.

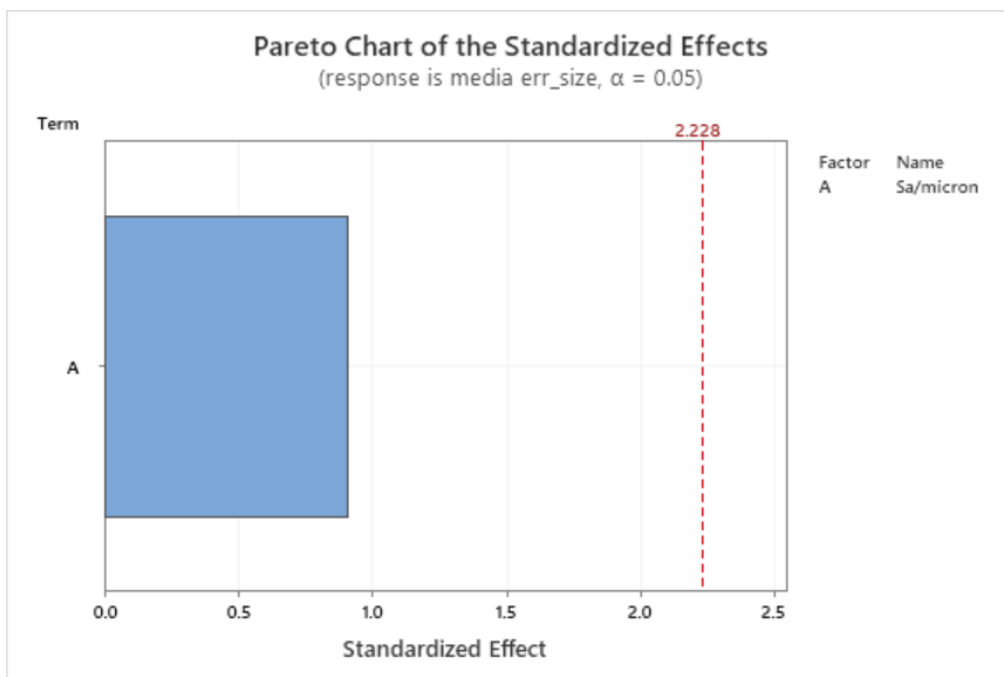


Figura 77. Diagramma di Pareto del parametro errore dimensionale vs Sa.

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	1	0.000091	0.000091	2.03	0.185
Linear	1	0.000091	0.000091	2.03	0.185
Sa/micron	1	0.000091	0.000091	2.03	0.185
Error	10	0.000450	0.000045		
Total	11	0.000541			

Figura 78. Tabella dell'analisi della varianza del parametro errore di forma vs Sa.

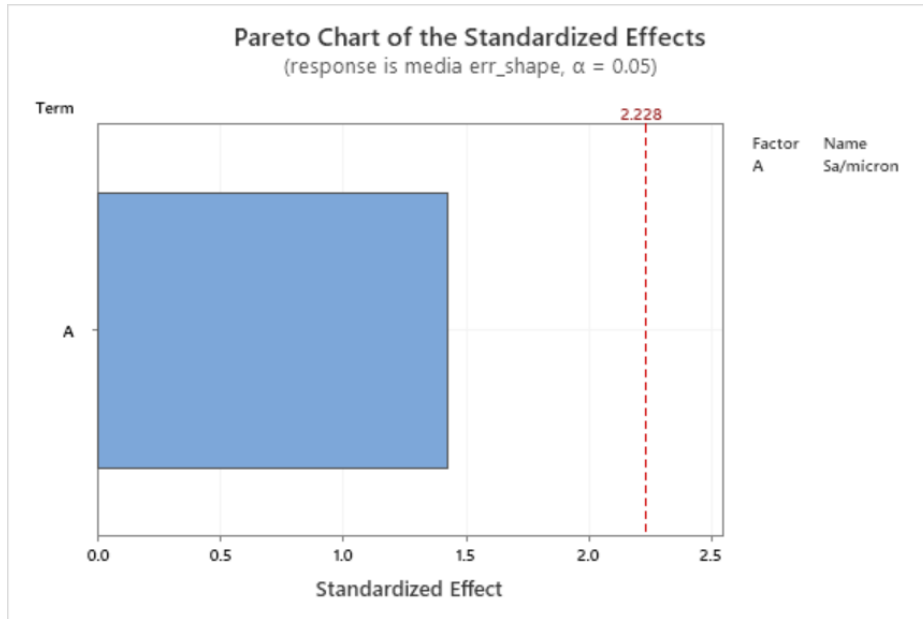


Figura 79. Diagramma di Pareto del parametro errore di forma vs Sa.

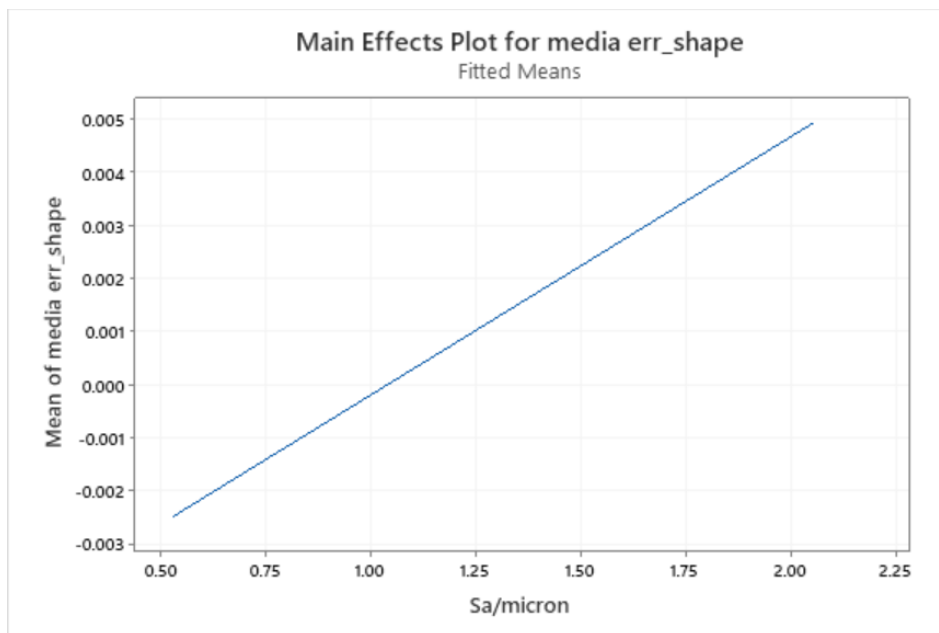


Figura 80. Grafico errore di forma vs Sa.

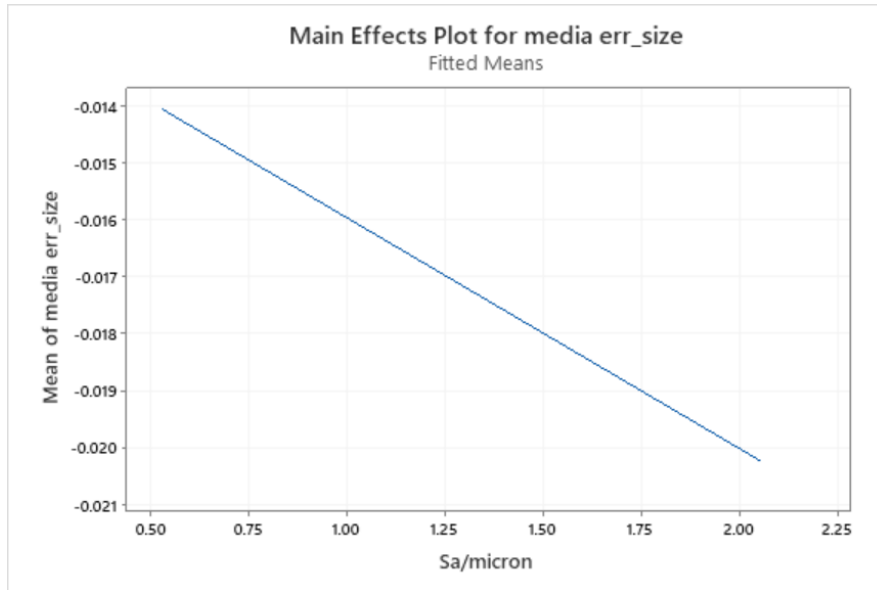


Figura 81. Grafico errore dimensionale vs Sa.

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	1	0.000057	0.000057	0.73	0.413
Linear	1	0.000057	0.000057	0.73	0.413
Waviness wavelength / micron	1	0.000057	0.000057	0.73	0.413
Error	10	0.000776	0.000078		
Lack-of-Fit	7	0.000585	0.000084	1.31	0.449
Pure Error	3	0.000191	0.000064		
Total	11	0.000832			

Figura 82. Tabella dell'analisi della varianza dimensionale vs *waviness wavelength* .

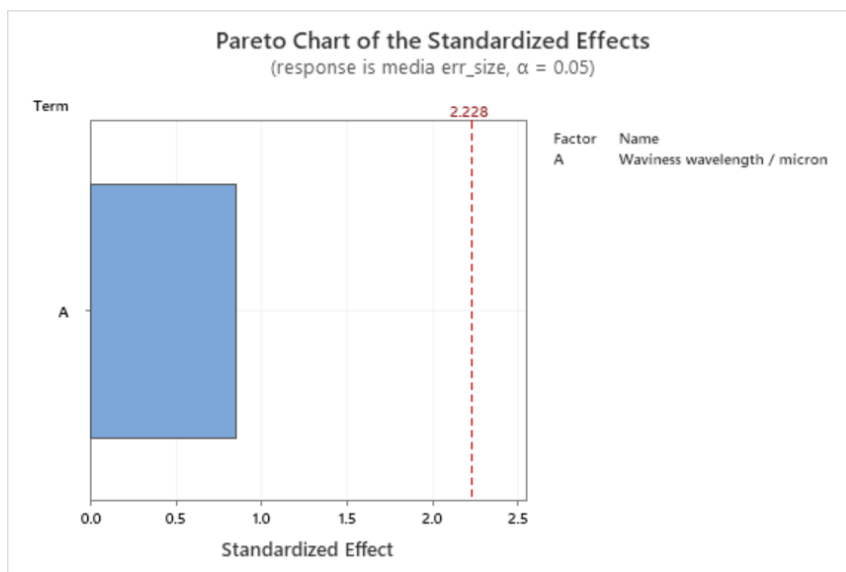


Figura 83. Diagramma di Pareto errore dimensionale vs *waviness wavelength*.

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	1	0.000063	0.000063	1.32	0.278
Linear	1	0.000063	0.000063	1.32	0.278
Waviness wavelength / micron	1	0.000063	0.000063	1.32	0.278
Error	10	0.000478	0.000048		
Lack-of-Fit	7	0.000476	0.000068	105.97	0.001
Pure Error	3	0.000002	0.000001		
Total	11	0.000541			

Figura 84. Tabella dell'analisi della varianza errore di forma vs *waviness wavelength*.

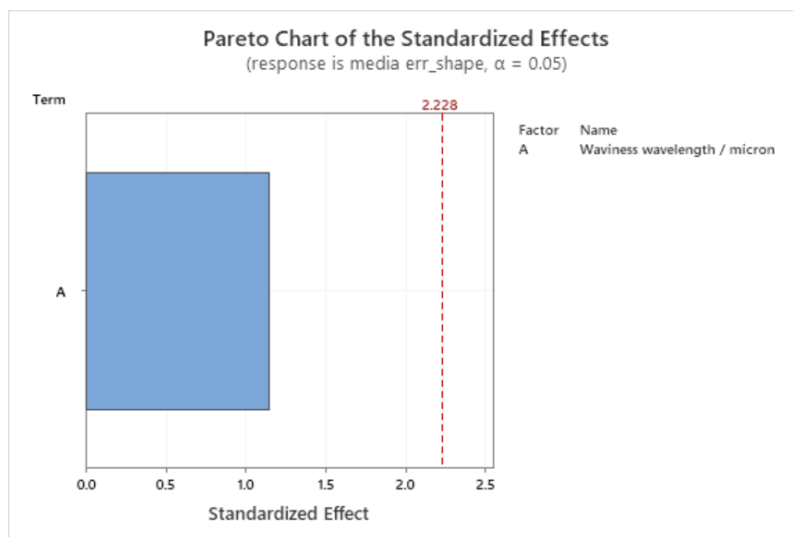


Figura 85. Diagramma di Pareto errore di forma vs *waviness wavelength*.

## 9. Riferimenti

- [1] Characterization of Areal Surface Texture – Richard Leach
- [2] BS EN ISO 25178-2:2022 Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture areal
- [3] BS EN ISO 10360-13:2021 Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for Coordinate Measuring Systems (CMS)
- [4] PD CEN ISO/TS 15530-1:2013 Geometrical Product Specifications (GPS) - Coordinate Measuring Machine (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement
- [5] BS EN ISO 15530-3:2011 Geometrical Product Specifications (GPS) - Coordinate Measuring Machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement
- [6] BS EN ISO 10360-13:2021 Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for Coordinate Measuring Systems (CMS) - A. Balsamo et al
- [7] Results of the CIRP-Euromet Intercomparison of Ball Plate-Based Techniques for Determining CMM Parametric Errors
- [8] Possibilities of Using Three-Dimensional Optical Scanning on Complex Geometrical Inspection – Tomaz Brajljeh et al.
- [9] Standards for testing freeform measurement capability of optical and tactile coordinate measuring machines – Bojan Acko et al 2012 Meas. Sci. Technol. 23 094013
- [10] Use of Miniature Step Gauges to Assess the Performance of 3D Optical Scanners and to Evaluate the Accuracy of a Novel Additive Manufacture Process – Luigi Maria Galantucci et al.
- [11] Three-Dimensional Joint Cloud Task-Specific Uncertainty Assessment Based on ISO 15530-3 and ISO 15530-4 Technical Specifications and Model-Based Definition Strategy - Kortaberria G.;Mutilba,U; Gomez,S.;Ahmed,B. ,Metrology 2022,2, 394-413.
- [12] Assessment of process chain suitability of the optical 3D measuring system by using influencing factors for measurement uncertainty- Martin Bilusic e Luka Olivari
- [13] Engineering Statistics – Montgomery, Runger, Hubele
- [14] International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM) JCGM 200:2012