

Politecnico di Torino



Laurea magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di laurea
in
Tecnologie e Sistemi di Lavorazione

**Analisi dell'influenza dei marcatori
sulla stabilità di misura
in uno scanner a luce strutturata**

Relatore
Prof. Luca Iuliano

Candidato
Manuel de Crescenzo
S243763

Anno Accademico
2018/2019

Sommario

1	Introduzione.....	5
2	Sistemi di acquisizione dati.....	7
2.1	Industria 4.0	7
2.1.1	Reverse Engineering e Controllo qualità.....	8
2.2	Digitalizzazione e Scansione.....	8
2.2.1	Digitalizzazione	8
2.2.2	Scansione	9
2.3	Sistemi ottici per l'acquisizione digitale 3D.....	10
2.3.1	Acquisizione di milioni di punti	10
2.3.2	Oltre i limiti delle macchine a contatto.....	11
2.3.3	Necessità di un progresso costante	11
2.4	Tecnica della luce strutturata.....	12
2.4.1	Interferenza di sorgenti laser.....	13
2.4.2	Metodo proiettivo	13
2.5	Tecnica della triangolazione laser.....	13
2.5.1	Caratteristiche della radiazione laser.....	14
2.6	Allineamento ed unione delle differenti viste 3D.....	14
2.6.1	Un'acquisizione più "libera"	15
2.7	Attrezzatura di supporto.....	16
2.8	Allineamento tra modello effettivo e modello nominale.....	17
2.8.1	Metodi di allineamento	18
2.9	Principali aziende del settore dell'acquisizione digitale	18
3	Attività sperimentale	21
3.1	GOM.....	21
3.1.1	ATOS ScanBox.....	22
3.2	Obiettivo della tesi	25
3.2.1	Riproducibilità, ripetibilità e stabilità	25
3.3	Descrizione dell'attività sperimentale.....	26
3.3.1	Creazione del Progetto Gearbox	26
3.3.2	Fasi di lavoro	30
3.3.3	Creazione del progetto a stadi.....	35
3.4	Sintesi complessiva dell'attività sperimentale	35

4	Analisi dei risultati	37
4.1	Comparazione dei risultati ottenuti con ottiche MV700.....	37
4.1.1	Controllo di forma	38
4.1.2	Controllo di posizione.....	39
4.1.3	Calibri.....	41
4.1.4	Punti di volume.....	42
4.1.5	Fori: coordinate del centro	43
4.1.6	Fori: misura del diametro	45
4.2	Comparazione dei risultati ottenuti con ottiche MV320.....	47
4.2.1	Controlli di forma.....	47
4.2.2	Controllo di posizione.....	49
4.2.3	Calibri.....	50
4.2.4	Punti di volume.....	50
4.2.5	Fori: coordinate del centro	51
4.2.6	Fori: misura del diametro	53
4.3	Stima di riproducibilità e ripetibilità.....	53
4.4	Difficoltà del processo di acquisizione senza marker	54
5	Conclusioni	57
6	Bibliografia	59
7	Appendice.....	61
7.1	Ottiche MV700, marker presenti.....	61
7.1.1	Controllo di forma	61
7.1.2	Controllo di posizione.....	62
7.1.3	Calibri.....	63
7.1.4	Punti di volume.....	63
7.1.5	Fori: coordinate del centro	63
7.1.6	Fori: misura del diametro	65
7.2	Ottiche MV700, marker assenti	66
7.2.1	Controllo di forma	66
7.2.2	Controllo di posizione.....	67
7.2.3	Calibri.....	67
7.2.4	Punti di volume.....	68
7.2.5	Fori: coordinate del centro	68
7.2.6	Fori: misura del diametro	70

1 Introduzione

Il rapporto tra industrie e metodi di produzione che sfruttano tecnologie innovative è molto complesso ed è basato su equilibri che risultano essere particolarmente instabili. Questo perché, nel corso della storia, l'innovazione ha sempre comportato la rottura e la conseguente modifica di schemi industriali consolidati nel tempo, che fino a quel momento avevano garantito all'impresa un profitto ottimale con livelli di competitività equiparabili, se non addirittura superiori, a quelli delle industrie concorrenti. Allo stesso tempo, l'esperienza insegna che restare ancorati alle tradizioni non consente di stare al passo con un'economia globale che evolve con ritmi sempre più sfrenati e senza direzioni privilegiate [1].

Ad oggi, tra i numerosi metodi innovativi si è fatta larga strada l'acquisizione digitale di oggetti fisici tridimensionali, che può avvenire sia come processo continuo, prendendo il nome di scansione, sia come processo discreto, parlando quindi di digitalizzazione. I dispositivi che realizzano tale processo sono definiti in generale sistemi di acquisizione dati e possono essere distinti in macchine di misura a contatto e non a contatto. Tra le prime, troviamo sistemi tradizionali quali CMM e bracci articolati, mentre tra le seconde sono presenti sistemi innovativi quali sensori ottici ed acustici, come testine laser, imager e sonar.

In particolare, i dispositivi non a contatto di tipo ottico basano il proprio funzionamento sull'interazione dell'oggetto fisico con un fascio luminoso, che può essere una radiazione laser o una luce strutturata. In entrambi i casi si ottiene una nuvola di milioni di punti che definiscono le coordinate spaziali dell'oggetto stesso. L'acquisizione di un così alto numero di punti definisce la sostanziale differenza dei sistemi ottici non a contatto rispetto le tradizionali macchine di misura a contatto che, al contrario, consentono l'acquisizione di un numero molto minore di punti e sono caratterizzate da maggiori tempi di processo, anche se presentano gradi di accuratezza maggiori. Ad ogni modo, i sistemi ottici consentono di ottenere un'analisi complessiva del particolare, indagando immediatamente possibili distorsioni o deviazioni superficiali che non potrebbero essere riscontrate con sistemi tradizionali quali CMM e bracci articolati. Un esempio tipico nel settore industriale è il controllo di particolari realizzati per stampaggio a iniezione o per processi fusori, dove l'acquisizione dell'intera geometria è fondamentale nell'individuazione di eventuali distorsioni superficiali post-stampaggio o di cricche interne dopo il processo di colata.

Il processo di acquisizione di un oggetto fisico si basa sull'ottenimento di differenti viste 3D dell'oggetto stesso, che devono essere unite ed allineate in modo corretto. Ad oggi, differenti sistemi ottici impiegano differenti tecnologie per garantire il corretto montaggio di tali viste. I sistemi della GOM, ad esempio, prediligono l'utilizzo di marker adesivi, ottenendo ottimi risultati in termini di riproducibilità e ripetibilità delle misure. L'attività sperimentale inerente al lavoro di tesi, svoltasi presso l'ufficio tecnico dell'azienda torinese Metrologia S.p.A., in diretto contatto con GOM Italia S.r.l., azienda responsabile della produzione e della distribuzione di sistemi di misura ottici, ha avuto come obiettivo la raccolta di dati utili per realizzare un'analisi critica nei confronti dell'utilizzo dei marcatori. È stato raccolto un campione statistico abbastanza vario di scansioni, ottenute sia con l'utilizzo di marker che senza di essi, adoperando due aree di scansione differenti. Successivamente, sono state tratte conclusioni e attente valutazioni delle differenze riscontrate tra i due metodi di acquisizione.

In primo luogo, sono stati analizzati i risultati derivanti dalle prime due serie di misura (particolare con e senza marker), che hanno previsto l'impiego di un'area di scansione di 700 mm². In seguito, sono state tratte ulteriori considerazioni dalle serie ottenute con area di scansione di 320 mm², dove il numero di viste 3D ottenute è maggiore, essendo l'area di scansione minore. Infine, sono state discusse le difficoltà riscontrate nell'acquisizione del particolare senza marker.

2 Sistemi di acquisizione dati

Elevata qualità del prodotto, competitività delle imprese e riduzione di costi e tempi della produzione sono tutti aspetti che caratterizzano l'odierno mondo industriale, comportando la ricerca di nuove tecnologie che permettano di soddisfare le richieste del mercato.

Digitalizzazione e scansione sono due differenti tecnologie che soddisfano tali requisiti, mentre i dispositivi, che adottano tali tecniche, possono essere suddivisi in macchine di misura a contatto e sistemi non a contatto di diversa tipologia.

In particolare, i sistemi di acquisizione senza contatto di tipo ottico basano il proprio funzionamento sull'emissione di un fascio luminoso che, interagendo con l'oggetto fisico tridimensionale, restituisce una nuvola di punti costituente l'insieme delle coordinate spaziali dell'oggetto stesso; questo può essere una radiazione laser o una luce strutturata. Su quest'ultimo principio è basato il funzionamento di numerosi dispositivi, tra cui i sistemi GOM, impiegati nel lavoro di tesi. Ci si soffermerà quindi sui principi di funzionamento dei sistemi ottici, illustrando differenze, vantaggi e limiti rispetto le tradizionali macchine di misura a contatto e presentando le principali aziende attive nel settore dell'acquisizione digitale 3D.

2.1 Industria 4.0

Il termine Industria 4.0 indica l'incremento della competitività e dell'efficienza delle odierne imprese industriali e manifatturiere, grazie all'uso delle nuove tecnologie digitali, che tendendo a sostituire sempre più velocemente quelle tradizionali, hanno dato inizio ad una nuova rivoluzione industriale: la quarta nel corso della storia [2]. La crescente globalizzazione richiede da parte delle aziende la definizione di prodotti con alti standard qualitativi, dovuti sia da un ingente grado di competitività, ma anche alla necessità di una continua e reciproca cooperazione.

Al contrario di quando le industrie preferivano sviluppare interamente un nuovo prodotto al proprio interno, oggi ci si sta spostando verso un livello di integrazione orizzontale sempre maggiore, tendendo a parcellizzare e segmentare le numerose fasi di progettazione e produzione di un particolare tra stabilimenti diversi. Ecco perché il rispetto minuzioso delle tolleranze è diventato un fattore di primaria importanza, che segue precisi criteri normativi.

La riduzione dei tempi di sviluppo rappresenta un secondo, ma non meno importante, fattore di predominio sul mercato e può essere conseguito solo con l'impiego di moderne tecnologie che consentano di ridurre il numero di step inerenti alla realizzazione di un prodotto, a partire dalla sua concezione fino alle verifiche ed i test finali.

2.1.1 Reverse Engineering e Controllo qualità

La *Reverse Engineering* si presenta a tutti gli effetti come una moderna tecnologia di produzione e consiste nel processo di acquisizione di un particolare fisico da cui ne scaturisce il modello digitale tridimensionale. Una definizione più precisa del termine definisce tale tecnica come: "Il processo di duplicazione di un oggetto reale nelle sue funzioni e nelle sue dimensioni attraverso un'analisi fisica e la misura delle sue parti, ottenendo i dati tecnici richiesti per la lavorazione" [3]. Il modello effettivo così ottenuto, completo nei minimi particolari, viene successivamente impiegato come punto di partenza per la definizione di un nuovo prodotto, consentendo di minimizzare i tempi di sviluppo [4].

L'innovativa tecnica dell'acquisizione è molto utile anche nel campo del controllo della qualità, termine che indica: "Parte della Gestione della qualità mirata a soddisfare i requisiti per la qualità", in cui il modello effettivo, ovvero il modello acquisito tridimensionale dell'oggetto in esame, viene confrontato con il modello nominale preesistente, rappresentato dal CAD [5]. Ciò permette di avere una completa analisi degli scostamenti tra i due modelli, attraverso dati numerici e mappature con indice cromatico. È bene precisare che, in questo caso, non è necessario ottenere una geometria che restituisca tutti i dettagli dell'oggetto, ma che riproduca in modo completo solo le parti che saranno sottoposte al controllo, ottimizzando così i tempi di acquisizione.

2.2 Digitalizzazione e Scansione

L'acquisizione di un particolare è un processo che può essere discreto o continuo. In entrambi i casi sono ottenute una serie di coordinate spaziali che descrivono le posizioni relative dei punti rilevati sull'oggetto, il cui numero dipende dalla tipologia di tecnologia impiegata. Ad ogni modo, nel campo tecnico/industriale, si tende solitamente a trascurare la differenza dei due metodi, inter scambiando l'uso dei termini che definiscono le differenti tecnologie.

2.2.1 Digitalizzazione

La *digitalizzazione* definisce un processo discreto, in cui il numero di punti acquisiti risulta essere preventivamente noto al codice che pilota la macchina di misura, che sia questa a contatto o non a contatto. Per poter

intendere quanto appena esposto, si consideri il processo di acquisizione raffigurato in Figura 1, che viene realizzato con un tastatore meccanico.

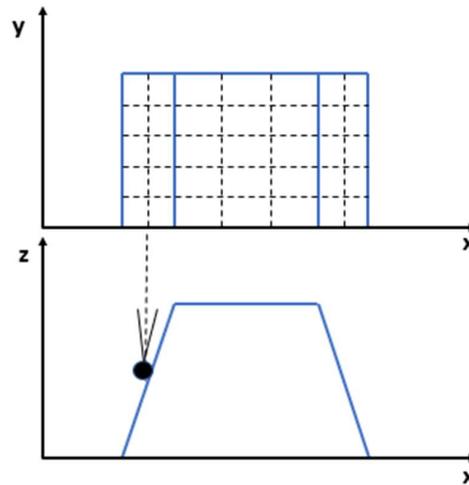


Figura 1: processo di acquisizione di un particolare per digitalizzazione

La fase di digitalizzazione è preceduta dalla creazione di una griglia di $N \times M$ punti di coordinate (x,y) note, che consente quindi al tastatore di toccare il pezzo nelle posizioni predefinite, rilevandone anche la coordinata z . Laddove sono presenti curve, pendenze o raccordi, la griglia deve essere infittita al fine di garantire maggiore precisione ed accuratezza nella rilevazione della superficie.

Nel caso di un dispositivo ottico senza contatto, il numero di punti rilevati sarà stabilito a priori dal numero di pixel della telecamera responsabile dell'acquisizione, dove tale numero resta fisso per ogni vista acquisita.

2.2.2 Scansione

Nel secondo caso si parla di *scansione* dove, prendendo nuovamente come riferimento una macchina di misura a contatto, il tastatore scorre sul pezzo toccandolo in un numero di punti che non è noto a priori al codice che pilota la macchina. A differenza di una digitalizzazione quindi, l'unità di governo del dispositivo non richiede di essere programmata, poiché è gestita in modo automatico dal relativo software di controllo.

Essendo la geometria da rilevare ignota, ne deriva che tali dispositivi rilevano la stessa densità di punti indipendentemente dalla complessità della zona considerata e a prescindere dalla tipologia di sistema impiegato, ovvero con contatto o senza contatto. Al termine della scansione, la densità dei punti ottenuti può perciò risultare non ottimale: se non è sufficiente a descrivere correttamente la zona acquisita, si necessiterà di ulteriori

scansioni, se invece risulta essere eccessiva, si effettuerà l'operazione di *sampling*, che ha lo scopo di minimizzare la ridondanza dei punti.

In conclusione, se da un lato la gestione dell'unità di governo è meno onerosa, i dispositivi di scansione potrebbero richiedere in alcuni casi un processo di acquisizione maggiore rispetto i sistemi di digitalizzazione.

2.3 Sistemi ottici per l'acquisizione digitale 3D

Si è detto che l'acquisizione dei dati può avvenire con diverse tecnologie, che, se basate su un processo continuo, rientrano nel campo della scansione, mentre se basate su un processo discreto, rientrano nel campo della digitalizzazione.

Le principali macchine di misura a contatto, che rientrano in entrambi i campi, sono le CMM (*Coordinate Measuring Machine* - Macchina di Misura a Coordinate) ed i bracci articolati. Per i dispositivi non a contatto, invece, è necessario distinguere tra sistemi ottici ed acustici, come i sonar. In particolare, i sistemi ottici si dividono in dispositivi che sfruttano l'interazione del pezzo fisico con un fascio di luce monocromatica e coerente emessa da una sorgente laser e dispositivi che basano il proprio funzionamento sull'interazione del pezzo fisico con un fascio di luce strutturata emessa da un proiettore. I primi rientrano nel campo della scansione, mentre i secondi realizzano una digitalizzazione.

2.3.1 Acquisizione di milioni di punti

La sostanziale differenza dei sistemi ottici rispetto macchine di misura, quali CMM e bracci articolati, consiste in una scansione completa del componente, che viene così identificato da una nuvola di milioni di punti, rispetto le poche centinaia che sono considerate dalle macchine di misura a contatto. L'acquisizione di così tanti punti permette di esaminare l'oggetto nel suo complesso e di indagare immediatamente possibili distorsioni o deviazioni superficiali rispetto il modello nominale. Tale aspetto assume notevole valenza nel controllo qualità di particolari realizzati con metodi di fabbricazione in cui potrebbero verificarsi deformazioni non visibili chiaramente [6]. Ad esempio, ritiri post-stampaggio di materiali termoplastici tipici del processo di stampaggio a iniezione o deformazioni errate di lamiera sottoposte ad imbutitura potrebbero sfuggire ad un controllo attuato per contatto, in cui si tende a focalizzare l'attenzione solo in zone critiche, ovvero in quelle zone in cui sono presenti accoppiamenti. Inoltre, come mostrato in Figura 2, l'utilizzo di mappe a colori può evidenziare la presenza di cricche o bave sui grezzi ottenuti per colata in fonderia.

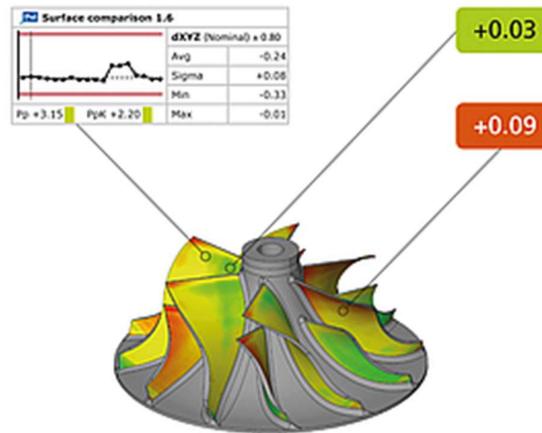


Figura 2: mappa a colori di un componente ottenuto per colata in fonderia

2.3.2 Oltre i limiti delle macchine a contatto

I fattori cruciali, che hanno determinato lo sviluppo ed il diffondersi sempre più spinto dei dispositivi non a contatto, sono essenzialmente tre:

- velocità di acquisizione;
- maneggevolezza;
- facilità di trasporto.

Unitamente a ciò, i sistemi non a contatto garantiscono il superamento di alcuni gravi limiti delle macchine a contatto, quali la necessità di applicare una forza sulla superficie da esaminare, la dimensione dei pezzi da poter acquisire legata alla dimensione della macchina e l'impossibilità di acquisire tutti i punti in caso di geometrie complesse. Infatti, nel caso di CMM e bracci articolati, l'acquisizione di un punto non può avvenire senza l'applicazione di una forza, seppur minima, la quale potrebbe intaccare superfici delicate o facilmente deformabili. La dimensione di un pezzo che può essere acquisito è funzione diretta della dimensione della macchina, o, più precisamente, della tavola di supporto su cui questo sarà collocato, per cui, a meno che non si disponga di macchine con ingenti dimensioni, ci si deve limitare a pezzi di misura ridotta. Infine, in alcuni modelli, la testa non è in grado di compiere movimenti complessi, riscontrando particolare difficoltà nell'acquisizione di superfici nascoste o di sottosquadra critici.

2.3.3 Necessità di un progresso costante

In applicazioni in cui è richiesta estrema precisione, le macchine di misura a contatto risultano ancora fondamentali. La struttura su cui è montata la testa mobile è spesso realizzata in ghisa grigia lamellare, un materiale con alte proprietà smorzanti, grazie alle lamelle di grafite, da cui deriva un'accuratezza inferiore al micron. Ad oggi, i dispositivi di acquisizione non a

contatto sono caratterizzati da accuratezza minore, ma il costante progresso della tecnologia permetterà presto di usufruire di macchine con un grado di precisione equiparabile.

2.4 Tecnica della luce strutturata

La tecnica ottica della luce strutturata consiste nel proiettare un codice conosciuto di pixel, noto come pattern, su una scena. È possibile generare svariati tipi di pattern, ma il metodo più comune, in quanto veloce e versatile, prevede la proiezione di un reticolo di linee parallele che possono essere orizzontali o verticali, mostrato in Figura 3. La curvatura superficiale degli oggetti presenti nella scena deforma il reticolo proiettato e le informazioni di misura, quali geometria e profondità delle medesime superfici, sono ricavate dal software della macchina attraverso il confronto tra i pattern deformati e i pattern di riferimento, cioè gli stessi codici proiettati su superfici piane di riferimento con cui si esegue la calibrazione dello strumento.

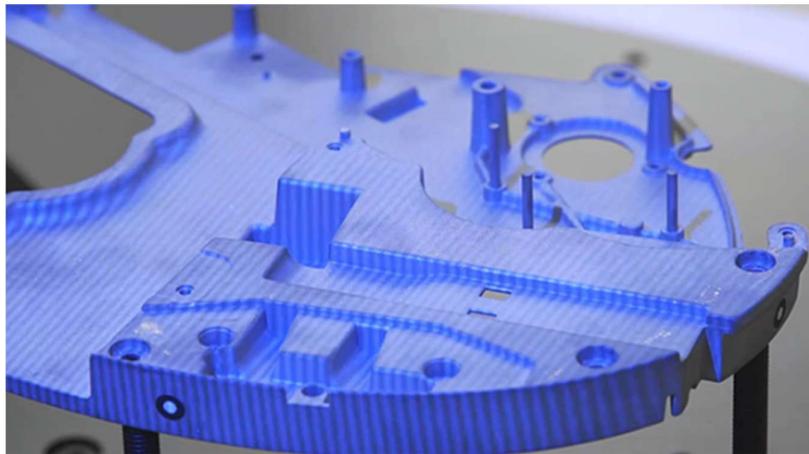


Figura 3: esempio di proiezione di un codice di linee parallele sulla superficie di un oggetto

La fase di calibrazione è fondamentale, poiché permette al software di misura di stabilire dimensione e passo del reticolo di linee parallele, nonché la futura posizione del dispositivo rispetto all'oggetto, la quale influenzerà la deformazione del reticolo stesso. [7].

I metodi per poter generare le strisce di luce sono principalmente due: interferenza di sorgenti laser o metodo proiettivo. In entrambi i casi, il software acquisisce la serie di coordinate spaziali dei punti appartenenti alla superficie confrontando il reticolo deformato con quello di riferimento e definisce la distanza dell'oggetto dalla telecamera responsabile dell'acquisizione per triangolazione. Quindi, esegue l'estrazione dell'im-

immagine tridimensionale che rappresenta una delle viste dell'oggetto attraverso la misura della fase del reticolo, ovvero l'algoritmo di estrazione opera sull'immagine compresa di reticolo liberandola dal contrasto dello sfondo attraverso il confronto con l'immagine senza reticolo. La telecamera rende inoltre possibile aggiungere alle coordinate spaziali ottenute delle informazioni di tessitura superficiale a livelli di grigio o a colori [7].

2.4.1 Interferenza di sorgenti laser

Il metodo di interferenza di sorgenti laser si basa sull'intersezione di due sorgenti luminose planari, ottenendo così la creazione di linee regolari ed equidistanti. Cambiando l'angolo tra i due fasci, è possibile definire le dimensioni delle frange. In questo modo si garantisce un pattern particolarmente preciso e con una grande profondità. Di contro, si riscontrano alti costi d'implementazione e forti problemi di riflessione, a cui si devono aggiungere difetti tipici delle sorgenti laser, come gli speckle [7].

2.4.2 Metodo proiettivo

Il metodo proiettivo, come suggerisce il termine stesso, sfrutta i proiettori, ovvero dei mezzi che generano luce non coerente. In tal caso, si riscontrano piccole discontinuità dovute ai bordi dei pixel stessi che compongono l'immagine. La precisione dello strumento è quindi fondamentale, poiché un'attenta messa a fuoco dell'obiettivo permette di attenuare tali discontinuità. I sensori della GOM, ad esempio, una delle principali aziende attive nel settore dell'acquisizione digitale 3D, impiegano questo metodo [7].

2.5 Tecnica della triangolazione laser

Strumenti che sfruttano la triangolazione laser permettono l'acquisizione di modelli tridimensionali a scale e con risoluzioni differenti. Sono costituiti da una sorgente laser di bassa potenza, ovvero da un'apparecchiatura in grado di trasformare energia da una forma primaria, che può essere elettrica, ottica, chimica, termica o nucleare, in una radiazione elettromagnetica monocromatica e coerente di intensità elevata: il laser [8].

La lama di luce, prodotta tramite un'ottica opportuna, viene fatta scorrere lungo la superficie ignota del particolare. Questa viene quindi rilevata da un'apposita telecamera CCD e successivamente elaborata dal software della macchina di misura, ottenendo la nuvola di punti costituente la serie di coordinate spaziali che descrivono la forma dell'oggetto. Il valore di tali coordinate è ricavato tramite l'applicazione di semplici formule trigonometriche, in cui sono noti gli angoli e la misura della base, che dipende

dalla geometria e dalle dimensioni di ogni dispositivo (Figura 4). In sintesi, il software conosce la distanza tra il sistema di scansione e la superficie analizzata.

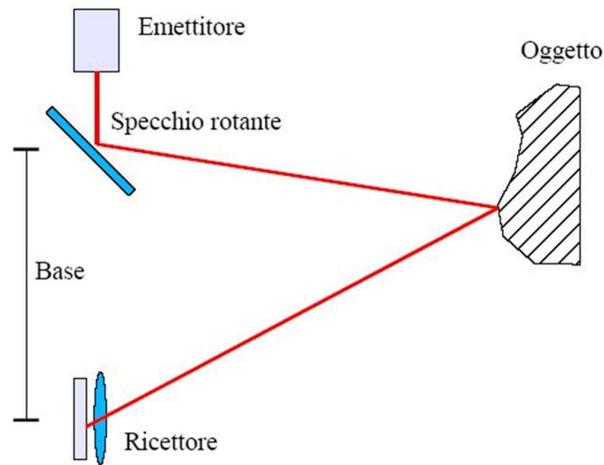


Figura 4: tecnica della triangolazione laser

2.5.1 Caratteristiche della radiazione laser

Le caratteristiche fisiche di una radiazione elettromagnetica come il laser offrono una serie di vantaggi che rende tali sistemi concorrenti di tutto rispetto dei dispositivi a luce strutturata. In primis, il laser si presenta come un'onda luminosa monocromatica, ovvero composta da una sola frequenza di luce dello spettro elettromagnetico [8]. Ciò permette di impiegare un filtro passa banda direttamente montato sulla telecamera e centrato sulla frequenza di emissione del laser che evita che il sensore possa essere influenzato da sorgenti di luce esterne. In secondo luogo, il laser è una radiazione coerente, presentandosi come un'onda che non viene irradiata in tutte le direzioni [8]. Tale caratteristica rende quasi nullo l'angolo di divergenza del fascio, così da generare lame di spessore limitato e costante anche su grandi profondità di proiezione.

2.6 Allineamento ed unione delle differenti viste 3D

I sistemi ottici senza contatto richiedono alcuni step comuni che precedono il processo di acquisizione. Prima di procedere all'acquisizione, infatti, il pezzo deve essere opportunamente preparato. In primo luogo, occorre rimuovere la presenza di polvere e altri elementi esterni che potrebbero compromettere un'acquisizione ottimale. Dopo di che, uno studio preliminare della geometria dell'oggetto garantisce l'individuazione della miglior strategia di acquisizione, minimizzando il numero di scansioni.

Inoltre, tale studio consente di individuare i punti in cui posizionare i *marker*, adesivi dalla forma circolare impiegati da alcuni sistemi di misura non a contatto come elementi di riferimento che agevolano l'allineamento e l'unione, con errori al di sotto del centesimo di millimetro, di ciascuna vista 3D del particolare (Figura 5). Il montaggio corretto di due viste è realizzato se queste condividono da tre a più marker, così che il software possa individuare di volta in volta un sistema di riferimento locale.

Il posizionamento dei marcatori può avvenire prima o dopo l'opacizzazione di superfici particolarmente riflettenti, come nel caso del nero lucido; se si decide di far aderire i marker successivamente al trattamento, è necessario eliminare lo strato di opacizzante nel punto in cui sarà posizionato l'adesivo, evitando micro-spostamenti dello stesso dovuti ad una presa non adeguata dello stesso.

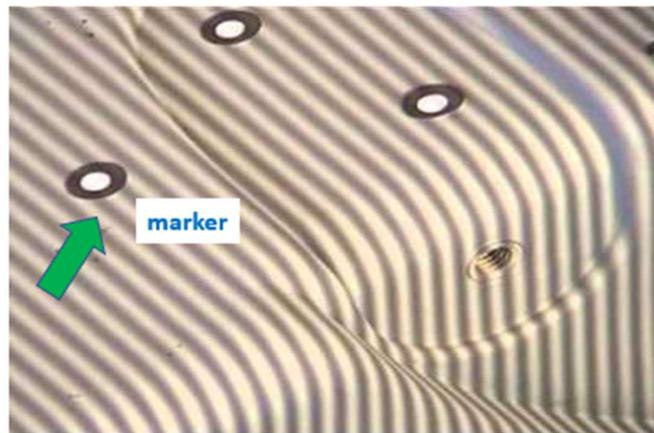


Figura 5: posizionamento dei marker sulla superficie dell'oggetto

2.6.1 Un'acquisizione più "libera"

Durante la fase di scansione spostamenti anche minimi del sistema di misura potrebbero causare errori di allineamento delle viste, per cui alcuni dispositivi, oltre che con ausilio dei marker, eseguono il montaggio anche tramite un fattore di forma. Ovvero, il software ricerca per ogni vista 3D la configurazione che restituisca la minor deviazione possibile dalle viste adiacenti; in altre parole, ricerca il maggior numero di punti che due o più viste possono condividere con quella appena acquisita. Tale ricerca prende il nome di *best-fit*, che nell'analisi di sequenze di dati, indica quindi "la qualifica che si dà alla curva che meglio approssima una distribuzione di punti" [9].

In conclusione, in base alle applicazioni, è possibile optare per:

- un'acquisizione "libera" -> montaggio delle scansioni per best-fit. La scelta di legare le viste unicamente con un fattore di forma è adottata per superfici delicate e facilmente deformabili, su cui non è possibile applicare alcun tipo di adesivo, a patto che la geometria del particolare sia molto complessa e ricca di dettagli. In questo modo il software, individuando numerosi elementi di riferimento, è in grado di ricreare la miglior configurazione possibile senza elementi ausiliari.
- un'acquisizione "vincolata" -> montaggio delle scansioni sia per best-fit che con l'ausilio dei marcatori. Questa scelta non può essere esclusa per geometrie molto semplici o assialsimmetriche, per le quali il software non dispone di elementi di riferimento in sede di montaggio.

2.7 Attrezzatura di supporto

In alcuni casi, come per geometrie assialsimmetriche o pezzi di dimensione elevata, il particolare può essere fissato su adeguati supporti della macchina o posizionato su una tavola rotante, come illustrato in Figura 6. In tal caso, lo studio preliminare comprende il posizionamento dei marker anche sui sistemi di supporto così che, in base alla geometria del pezzo e alla strategia di acquisizione, si può scegliere di:

- posizionare i marker solo sul particolare;
- posizionare i marker solo sull'attrezzatura di supporto;
- posizionare i marker sia sul particolare che sull'attrezzatura di supporto.



Figura 6: esempio di impiego della tavola rotante nel sistema GOM: ATOS ScanPort

2.8 Allineamento tra modello effettivo e modello nominale

Nel capitolo precedente sono state discusse le differenze dei metodi di acquisizione in caso di Reverse Engineering e controllo qualità. In particolare, è stato precisato che per il controllo qualità è importante garantire una riproduzione precisa solo delle parti sottoposte ad analisi, velocizzando i tempi di acquisizione. Il modello effettivo viene confrontato con il modello nominale del prodotto preesistente, costituito dal CAD, così da ottenere un'analisi degli scostamenti attraverso dati numerici e mappe a codice cromatico. Per poter attuare tale confronto è necessario dapprima eseguire l'operazione di *allineamento* dei due modelli, ovvero "la messa in relazione dei due sistemi di coordinate" [10].

Il termine allineamento sta ad indicare quindi l'identificazione della posizione del componente reale rispetto il modello matematico nominale e, nel caso di una macchina di misura a contatto, anche rispetto quest'ultima; in tal caso, una volta definito l'allineamento iniziale tra macchina di misura ed oggetto fisico, la loro posizione reciproca non può essere in alcun modo mutata, pena la perdita dell'allineamento stesso. Dal metodo di allineamento dipenderanno i valori delle misure effettuate; in altre parole, le deviazioni delle quote della geometria reale rispetto quella nominale variano in base alla tipologia di allineamento adottata.

2.8.1 Metodi di allineamento

Un qualunque corpo immerso nello spazio possiede sei gradi di libertà: tre traslazioni e tre rotazioni. L'operazione di allineamento consiste nell'individuare sei punti distinti del corpo in modo da sopprimere i suddetti gradi di libertà, identificando una posizione univoca dell'oggetto nello spazio.

I possibili metodi di allineamento sono:

- *3-2-1 o Piano-Linea-Punto (PLP)*
Identificazione di tre punti per cui passerà un piano, dalla cui normale scaturisce l'asse z , di due punti per cui passerà una retta, che definisce l'asse x , e di un punto che individua l'origine $O (x_0; y_0; z_0)$ del sistema. L'asse y è automaticamente definito.
- *Best-fit*
Individuazione della configurazione che riproduca la minore deviazione possibile del modello effettivo rispetto quello nominale. Vale dunque un discorso analogo all'allineamento della singola vista 3D, ma, in tal caso, la ricerca è estesa all'intera geometria del componente.
- *Reference Point System (RPS)*
Individuazione di almeno tre elementi per identificare lo zero di ciascuna dimensione (ciascun asse). Ad esempio, considerando tre circonferenze: i centri delle tre circonferenze definiscono $z=0$, due di questi definiscono $x=0$ e uno di questi definisce $y=0$; oppure, considerando tre piani: un piano definisce tre punti, il secondo definisce una linea per intersezione col primo, quindi due punti, il terzo piano definisce un punto per intersezione con gli altri due. Come si nota, occorre sempre un totale di sei punti per poter identificare la posizione univoca di un oggetto nello spazio.

2.9 Principali aziende del settore dell'acquisizione digitale

Le maggiori aziende produttrici di sistemi di acquisizione non a contatto di tipo ottico sono GOM, Zeiss, V-GER e Faro, una società americana nota in Italia, per diritti di nome, come CAM2.

La GOM è una multinazionale nata in Germania nei primi anni '90, i cui sistemi di misura sono stati oggetto del lavoro di tesi. Si rimanda quindi la trattazione al capitolo successivo.

La Carl Zeiss è un'importante azienda, con sede in Germania, responsabile della produzione e della commercializzazione a livello mondiale di un'ampia serie di prodotti del settore ottico, meccanico ed elettronico [11]. L'azienda è leader nella realizzazione di semiconduttori che consentono la produzione di microchip con tecnologie ottiche molto efficienti dal

punto di vista energetico e competitivo dal punto di vista economico. Zeiss è inoltre attiva nel settore della metrologia industriale, producendo macchine di misura a coordinate complete di software metrologici per un'ottimale ispezione dei materiali, e nel campo della tecnologia biomedicale con le sue soluzioni per oftalmologia, neurochirurgia, chirurgia ORL, odontoiatria e oncologia [12]. Nel 2019, l'azienda ha ampliato il suo portfolio acquisendo la GOM, che è diventata a tutti gli effetti parte del gruppo Zeiss.

V-GER è un'azienda italiana con sede a Bologna, che fornisce servizi di scansione e modellazione tridimensionali, garantendo soluzioni ottimali nel campo della Reverse Engineering e dei controlli dimensionali. Ad oggi, l'azienda svolge un'importante attività di ricerca relativa al settore metrologico, collaborando con le maggiori entità produttrici di hardware e software a livello internazionale [13].

FARO Technologies è una multinazionale americana che si presenta come principale produttore di macchine di misura a contatto portatili per il controllo qualità, come bracci articolati, laser tracker e imager, e sistemi ottici a luce strutturata per la digitalizzazione. L'azienda è leader in numerosissimi settori quali aerospaziale, architettura e costruzioni, automotive, beni culturali, cantieristica navale, fonderia, energia eolica, energia idroelettrica e gallerie e miniere [14].

3 Attività sperimentale

Differenti tipologie di dispositivi ottici adottano tecnologie diverse per garantire il corretto montaggio delle varie viste 3D di un oggetto che viene acquisito. I sistemi della GOM, ad esempio, prediligono l'utilizzo di marker adesivi, ottenendo ottimi risultati in termini di stabilità e ripetibilità delle misure.

L'attività sperimentale, richiesta da GOM Italia S.r.l (Buccinasco, MI) e svolta in diretto contatto con Metrologia S.p.A. (Beinasco, TO), ha avuto come obiettivo il concepimento di dati utili per realizzare un'analisi critica nei confronti di tali elementi. È stato raccolto un campione statistico abbastanza vario di scansioni, ottenute sia con l'utilizzo di marcatori che senza di essi e con due aree di scansione differenti. Quindi, è stato creato il cosiddetto progetto a stadi, che ha permesso il confronto delle varie acquisizioni da cui è scaturita l'analisi dei risultati.

3.1 GOM

“GOM è un'azienda che progetta e produce hardware e software, quali macchine e sistemi automatizzati, per la misurazione ottica e l'analisi di componenti tridimensionali”. La società è attiva nel mondo della metrologia industriale a partire dal 1990, anno in cui fu fondata la casa madre in Germania; da allora, l'azienda ha espanso i propri confini arrivando a contare oltre 60 uffici collocati in vari Paesi del mondo, tra cui le importanti sedi di Milano e Padova, riunite sotto il nome di GOM Italia S.r.l. Ad oggi, GOM si presenta come uno dei principali fornitori di sensori di misura ottica 3D non a contatto, software di analisi, corsi di formazione del personale e supporto professionale a livello mondiale. La sua strumentazione è utilizzata in numerosi settori, quali automotive, industria aerospaziale, beni di consumo, biomeccanica e medicale, power generation, propulsione e trasporti [15].

Nel settore automotive ed in campo biomeccanico è possibile notare la presenza dei sistemi GOM durante l'intero processo di sviluppo di un nuovo prodotto a partire da un modello preesistente. In alcuni casi, i dati di misura possono essere prelevati anche in tempo reale come durante lo svolgersi di test di impatto o prove di fatica, ottimizzando la simulazione e la costruzione di componenti tipici degli autoveicoli, ma anche di impianti e protesi mediche grazie ad un'adeguata scelta dei materiali [15].

Nel campo del controllo qualità, che sta raggiungendo livelli di automazione crescente a vista d'occhio, l'acquisizione di geometrie di varie forme e relativa complessità permette di avere tutti i dati necessari per l'analisi di elementi come stampi, utensili o intere carrozzerie, nonché di profili alari di motori di aeromobili (Figura 7) e turbine terrestri a gas e a vapore e di sistemi di turbocompressori tipici dell'industria aerospaziale.

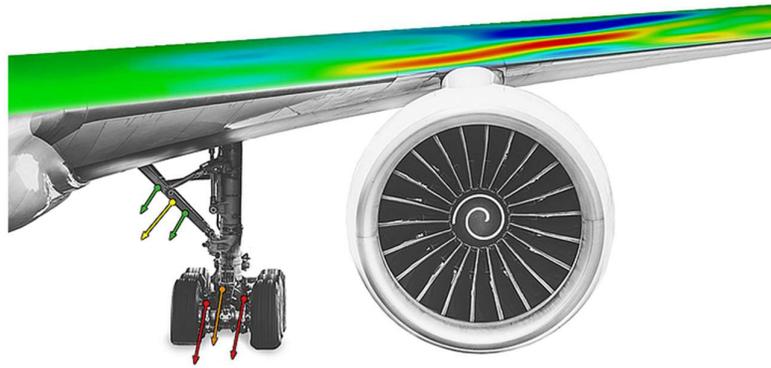


Figura 7: analisi del profilo alare e delle deformazioni del carrello di un aereo

La crescente competizione a livello globale richiede cicli di produzione che si esauriscono in tempi brevi e con costi ridotti, senza trascurare la qualità. Tali fattori hanno fatto sì che la strumentazione GOM trovi spazio anche per la progettazione dei tradizionali beni di largo consumo. Infine, l'individuazione di punti critici da cui scaturiscono vibrazioni indesiderate assicura un ottimale livello di comfort sia di veicoli utilitari che di veicoli adibiti al trasporto di massa, così che i loro sistemi di metrologia non manchino nel collaudo di carrozze ferroviarie o di imbarcazioni, semplificando le operazioni di manutenzione e minimizzando i tempi morti [15].

3.1.1 ATOS ScanBox

Una particolare attenzione è rivolta al sistema di scansione ottica ATOS ScanBox Series 6 (Figura 8), appartenente alla strumentazione GOM della linea ATOS, il quale è stato impiegato nell'attività sperimentale del lavoro di tesi. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

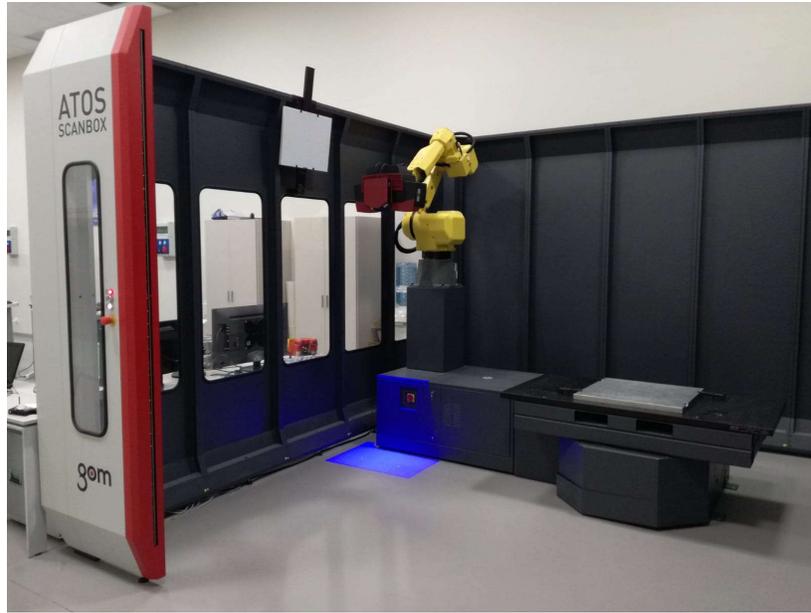


Figura 8: sistema GOM: ATOS ScanBox Series 6

La cella di misura industriale automatizzata è dotata di una tavola di lavoro in grado di ruotare intorno al proprio asse ed un braccio antropomorfo a cinque gradi di libertà per un totale di sei gradi di libertà. Può operare in completa sicurezza, grazie ad una serie di sensori disposti sia all'ingresso della cella che dietro il corpo mobile del sistema, come raffigurato in Figura 9, azzerando i rischi per l'operatore. L'elevata flessibilità e la possibilità di misurare elementi fino a 3000 mm di diametro rendono la ScanBox Series 6 in grado di sostituire celle di misura progettate ad hoc per molteplici progetti di applicazione industriale.



Figura 9: sensori interni di protezione

All'estremità del braccio meccanico è montato il sistema di digitalizzazione ATOS III Triple Scan, i cui dati tecnici sono riportati in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** Il sensore utilizza una particolare tecnologia di misurazione e proiezione, detta *tecnica della tripla scansione*, che lo rendono in grado di offrire un'accuratezza molto spinta e di acquisire serie di dati complete anche per componenti geometricamente complessi e con diverse dimensioni o finiture superficiali. La tecnica della tripla scansione, rappresentata in Figura 10, si basa sulla messa in fase di due immagini provenienti da due telecamere poste ad una distanza nota e tra loro convergenti verso un punto con un angolo noto. Un punto di un oggetto viene quindi acquisito se visto da entrambe le telecamere, rendendo il sistema più preciso, seppur creando una leggera ridondanza [15]. Il processo di acquisizione si completa con l'interazione del pezzo fisico con un fascio di luce blu strutturata a banda stretta. La *Blue Light Technology* consente di minimizzare le interferenze luminose presenti nell'ambiente, che sono filtrate durante la scansione della superficie, riuscendo così a lavorare in qualunque condizione di luce [15].

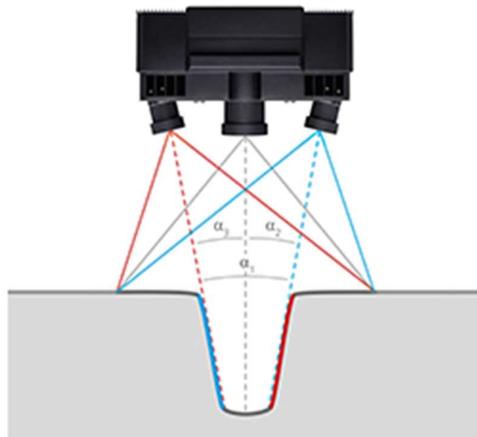


Figura 10: tecnica della tripla scansione

Tabella 1: dati tecnici del sensore ATOS III Triple Scan

Nome sensore	Punti misurati	Tempo di misura	Ottiche disponibili	Aree di scansione [mm ²]	Dimensioni del sensore [mm]
ATOS III Triple Scan	2 x 8 000 000	1 s	MV320 MV700	320 700	570 x 360 x 240

3.2 Obiettivo della tesi

In fase di scansione diversi sistemi ottici sfruttano diverse metodologie per montare assieme le singole acquisizioni, e i sistemi GOM, che al momento restituiscono i risultati migliori in termini di ripetibilità e riproducibilità delle misure, sfruttano l'utilizzo di marker adesivi. A tal proposito, ciò che si è desiderato valutare è di quanto i risultati potrebbero variare se, al posto di utilizzare i marker, si sfruttasse un'acquisizione più "libera", che leghi le scansioni solamente con un fattore di forma. È stato ottenuto un campione statistico abbastanza vario di scansioni, 15 per tipo, effettuate sia con l'utilizzo di marcatori sia senza di essi. La valutazione della variabilità di misure di tipologia diversa, come diametri, distanze o controlli di forma, ha avuto il fine di giustificare, o confutare, l'effettivo beneficio dei marker rispetto ad una semplice scansione montata in fitting di forma.

In secondo luogo, aspettandosi che questo effetto potesse aumentare al crescere delle dimensioni del particolare, visto che il software è costretto a legare tra loro un maggior numero di viste, l'area di scansione iniziale è stata modificata impiegando un'area minore, in modo che si trattasse sempre dello stesso particolare e quindi delle stesse dimensioni valutate.

In sintesi, la finalità dello studio è stata quella di avere un'indicazione della stabilità di determinate misure su un certo campione statistico; misure diverse tra di loro per tipologia, eseguite sotto condizioni di lavoro differenti. È bene sottolineare che, tra gli scopi dell'analisi, non si è cercato di definire l'accuratezza dello strumento, non potendo disporre di elementi opportunamente calibrati di cui è perfettamente nota la dimensione.

3.2.1 Riproducibilità, ripetibilità e stabilità

La *riproducibilità* rappresenta il grado di coerenza di una serie di misure di una stessa grandezza, definita *misurando*, nel caso in cui le singole misurazioni siano effettuate cambiando una o più condizioni al contorno.

Un errore comune è confondere la riproducibilità con la *ripetibilità*, la quale, invece, valuta la concordanza dei risultati nel caso in cui le condizioni siano mantenute inalterate.

“Al contrario, il concetto di riproducibilità potrebbe in alcuni casi sovrapporsi a quello metrologico di *stabilità*. Alcuni esempi, sono la stima della riproducibilità al variare della temperatura ambiente, quindi valutazione della stabilità in temperatura, o nel lungo periodo, valutazione della stabilità nel tempo”. Nel caso in esame, come è stato preventivamente anticipato, l'obiettivo è stato la valutazione della stabilità di determinate misure, diverse tra di loro per tipologia, sotto condizioni di lavoro differenti [16].

Lo studio della riproducibilità è stato molto utile poiché ci si aspettava che la variazione della condizione al contorno in esame potesse influenzare significativamente le misure effettuate. Tale condizione è stata così variata in modo strettamente controllato e, al termine del processo, una premurosa analisi della riproducibilità, nonché della ripetibilità di ogni serie di misura, è stata in grado di rilevare l'entità dell'impatto di tale variazione.

3.3 Descrizione dell'attività sperimentale

Il particolare impiegato per l'analisi è un *gearbox*, il cui modello CAD 3D è mostrato in Figura 11. Il componente in questione, di proprietà della GOM, costituisce una delle due semi-scatole di contenimento e protezione di un *gearmotor*.

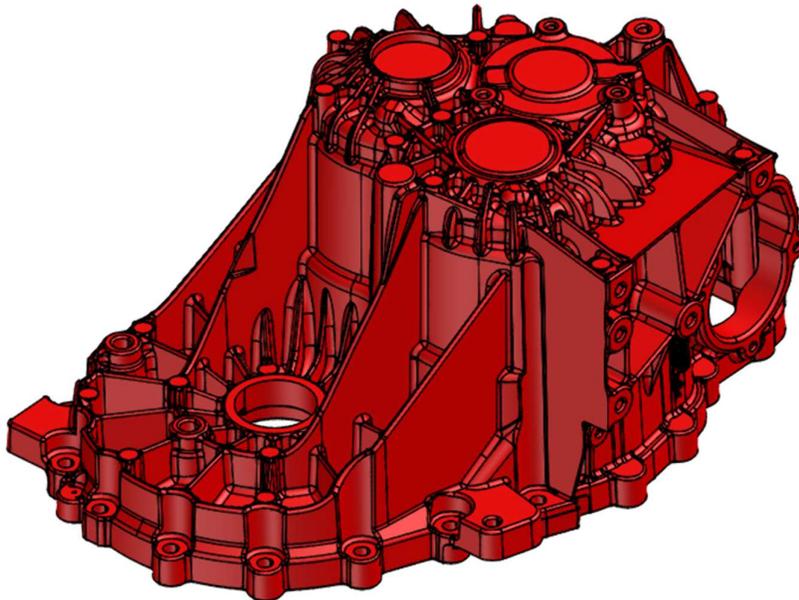


Figura 11: modello CAD 3D del gearbox

3.3.1 Creazione del Progetto Gearbox

Gli elementi da misurare sono stati definiti in modo da ottenere un'indagine completa delle possibili differenze dei due metodi di acquisizione: con e senza marcatori. Tramite il software GOM ATOS Professional 2018 sono stati quindi attuati controlli di forma e di posizione, nonché la verifica di dimensioni scalari come diametri e coordinate del centro di fori.

Dal momento che non si disponeva ancora di un modello effettivo tridimensionale derivante dalla scansione del particolare, il programma per la rilevazione delle misure è stato creato utilizzando un modello effettivo

fittizio derivante dal modello nominale, ovvero dal CAD. Il software permette infatti di editare un programma di misura di riferimento, denominato *template*, che aggiorna le misure ogni qual volta si inserisce un nuovo modello effettivo.

Gli elementi di misura che sono stati presi in considerazione per lo studio sono:

- calibri (Figura 12) -> calcolo delle dimensioni di ingombro complessivo del particolare;
- punti di volume (Figura 13) -> calcolo della deviazione della posizione di un punto rispetto i 3 assi di riferimento;
- piani (Figura 14) -> calcolo della tolleranza geometrica di planarità;
- fori (Figura 15, Figura 16, Figura 17) -> calcolo delle tolleranze geometriche di circolarità e localizzazione e calcolo della variabilità del diametro e delle coordinate di un foro. Le misure sono state rilevate su sezioni realizzate all'interno delle cavità, rispettivamente per $Y = -53$ mm per i fori 1 e 2, $Y = -18$ mm per i fori 3, 4, 5, 6, 7 e 8 e $Z = +141$ mm per i fori 9, 10 e 11, rispetto il sistema di riferimento del CAD.

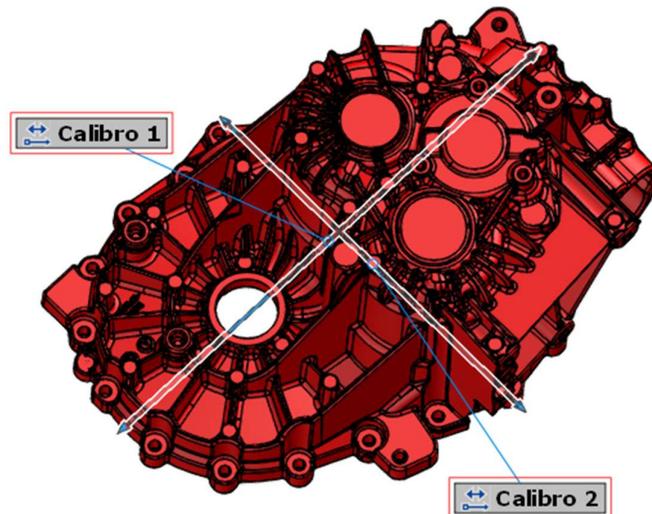


Figura 12: calibri

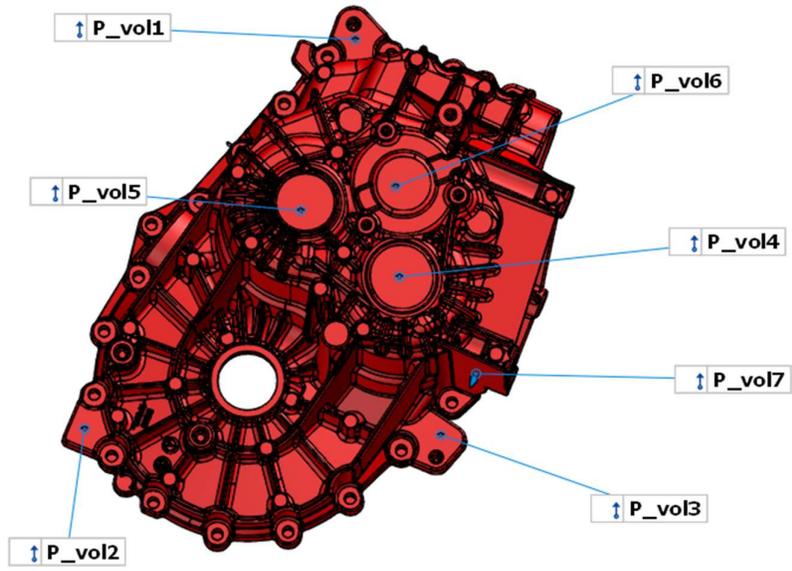


Figura 13: punti di volume

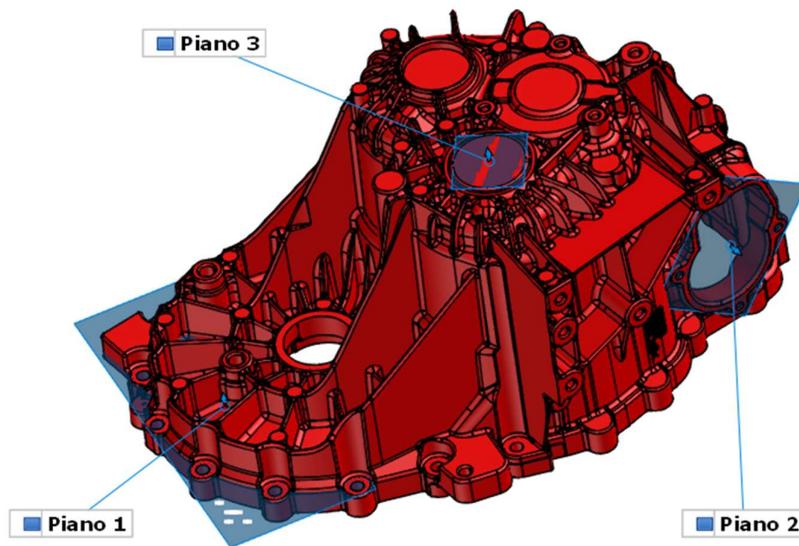


Figura 14: piani

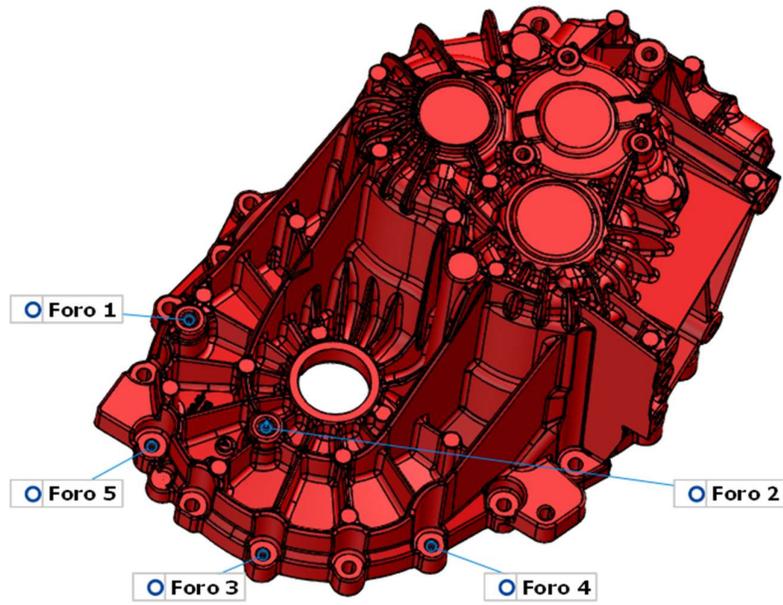


Figura 15: prima serie di fori

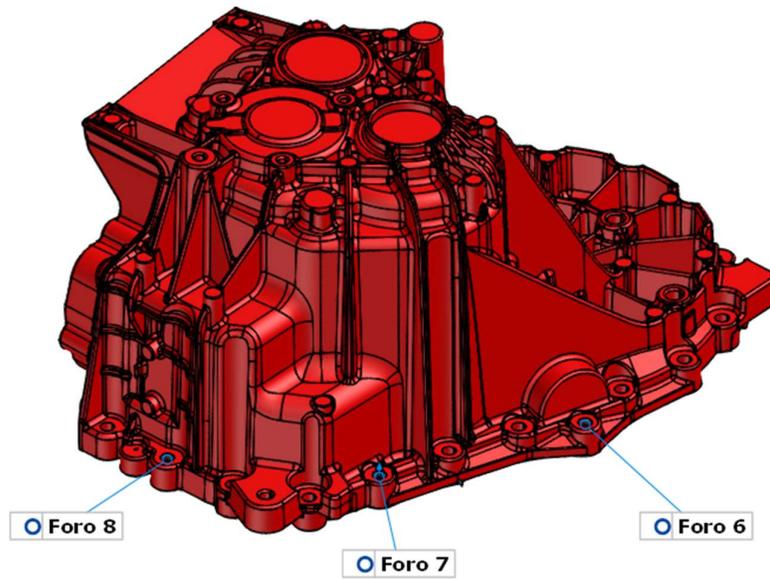


Figura 16: seconda serie di fori

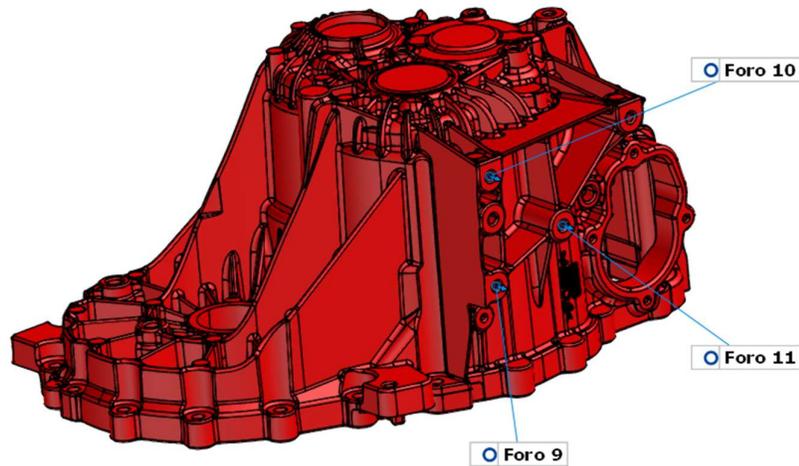


Figura 17: terza serie di fori

3.3.2 Fasi di lavoro

Successivamente alla creazione del Progetto Gearbox, contenente le misure da rilevare, si è proceduto con l'acquisizione del particolare nelle differenti condizioni di lavoro, che sono riassunte in Tabella 2.

Come anticipato nel capitolo precedente, le numerose scansioni del gearbox sono state svolte con il sistema di misura GOM: ATOS ScanBox series 6. L'elevato grado di automazione della macchina ha permesso di concludere la serie di acquisizioni in tempi ottimali, limitando al contempo il fattore umano nella stima della stabilità delle misure.

Tabella 2: fasi dell'attività sperimentale

Fase	Metodo di acquisizione	Numero acquisizioni	Area di scansione [mm ²]
1	con marker	15	700
2	senza marker	15	700
3	con marker	15	320
4	senza marker	15	320

Considerando la fase 1, le operazioni svolte sono state:

- preparazione del pezzo, opportunamente pulito;
- adesione di marker adesivi di diametro 3 mm;
- collocazione del pezzo sulla tavola rotante della macchina e registrazione della sua posizione tramite lettura delle coordinate presenti sulla tavola stessa (Figura 18);

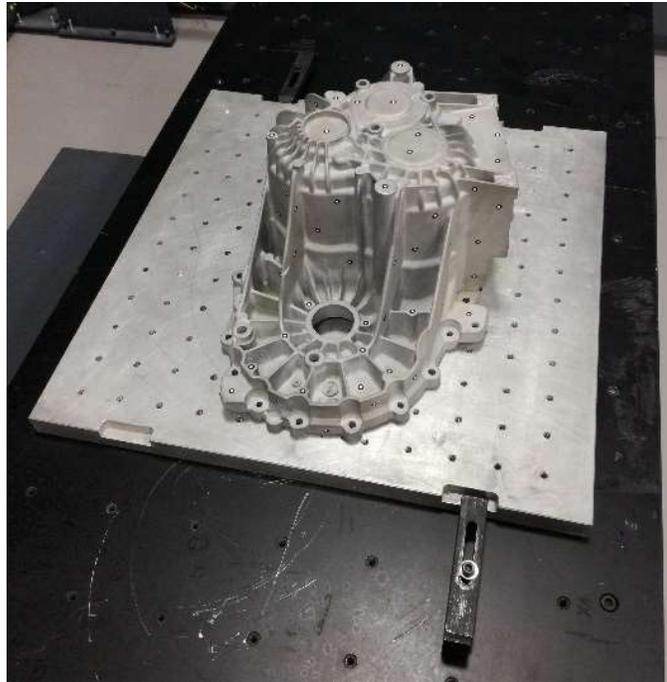


Figura 18: posizionamento del particolare sulla tavola rotante della macchina

- creazione di un nuovo file di tipo ATOS compreso di template relativo alla calibrazione dello strumento per ottiche MV700 (area di scansione: 700 mm²);
- importazione del progetto *Gearbox* completo di misure;
- allineamento della cella di lavoro della ScanBox al CAD del gearbox; in tale fase è stato necessario eguagliare quanto più possibile la posizione virtuale del pezzo visualizzata dal software rispetto quella reale del pezzo sulla macchina;
- creazione automatica della serie di misura: il software è stato in grado di elaborare un primo percorso di scansione del particolare in base agli elementi di misura presenti nel progetto, successivamente ottimizzato, eliminando posizioni difficili ed eventuali collisioni con l'inserimento di "posizioni di svincolo";
- impostazione dei parametri di lavoro provvisori, riportati in Tabella 3:

Tabella 3: parametri di lavoro provvisori

Qualità della scansione	Numero di shutter time
qualità elevata	3

- esecuzione virtuale del programma di scansione: il software permette di avere una prima valutazione della mesh che si otterrebbe eseguendo la scansione, realizzando una mesh virtuale;
- esecuzione reale del programma di scansione a velocità ridotta e senza acquisizione del particolare; ciò ha permesso di valutare fisicamente le posizioni del robot e, contemporaneamente, al software di validare il percorso compiuto dal sensore, ritenuto sicuro in quanto privo di collisioni;
- esecuzione della sola prima scansione della serie di misura;
- variazione dei parametri di lavoro sino ad ottenere una configurazione definitiva, successivamente estesa a tutte le scansioni presenti nella serie;
- impostazione dei parametri di lavoro definitivi, riportati in Tabella 4:

Tabella 4: parametri di lavoro definitivi

Qualità della scansione	Numero di shutter time
più punti	2

- esecuzione dell'intero programma di scansione (Figura 19);
- interruzione manuale del programma nei casi in cui il software non è riuscito a legare opportunamente le singole scansioni (marker non riconosciuti o nascosti) e relativa correzione delle posizioni preesistenti del sensore;
- validazione delle nuove posizioni o di quelle variate;
- continuo della scansione del componente;
- ripetizione degli ultimi tre punti sino ad ottenere il programma di scansione definitivo.

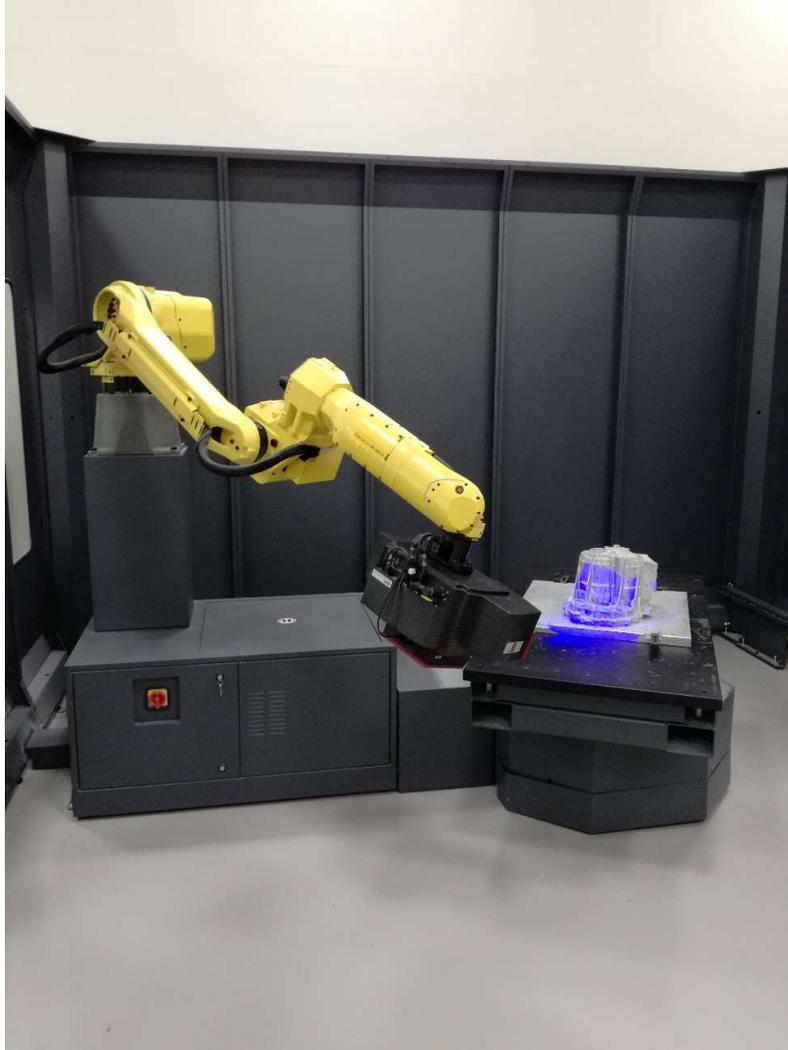


Figura 19: esecuzione del programma di scansione

Le fasi 2, 3 e 4 sono state svolte analogamente alla fase 1, dove, come indicato in precedenza, per la fase 3 e la fase 4 l'area di lavoro della macchina è stata opportunamente modificata, e, per la fase 2 e la fase 4 il pezzo è stato sprovvisto di marker.

In Figura 20 e Figura 21 sono riportati, a titolo di esempio, i modelli effettivi ottenuti rispettivamente dalla scansione del particolare provvisto di marcatori ed in seguito sprovvisto con ottiche MV700.

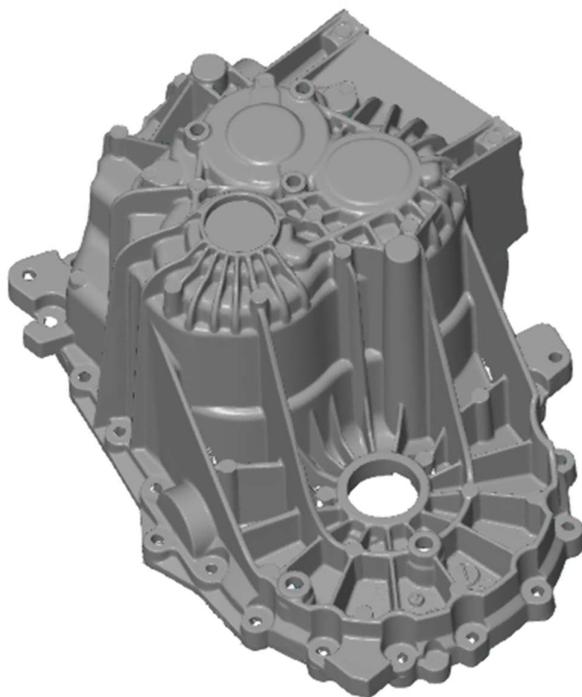


Figura 20: modello effettivo per ottiche MV700, particolare con marker

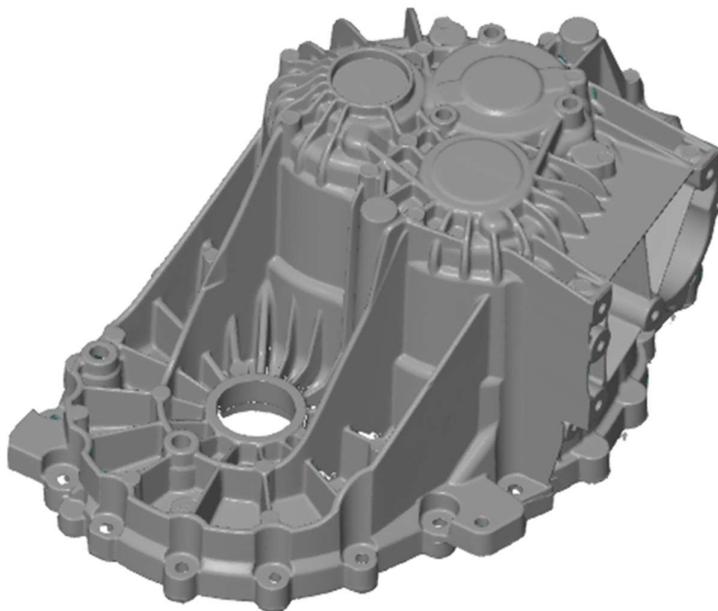


Figura 21: modello effettivo per ottiche MV700, particolare senza marker

3.3.3 Creazione del progetto a stadi

Dai 15 modelli effettivi in formato *.atos*, ottenuti per ogni condizione al contorno, sono stati derivati 15 file in formato *.stl*, per un totale di 60 file. Quindi, sempre tramite il software GOM ATOS Professional 2018, è stato creato il cosiddetto *progetto a stadi*. Il progetto a stadi rende possibile mettere in luce la deviazione di valori ricavati su una serie di modelli effettivi rispetto un modello di riferimento scelto all'interno della serie stessa o rappresentato dal CAD.

Nel caso in esame, il confronto è stato effettuato rispetto il modello nominale, ovvero il CAD, e sono stati creati 4 progetti a stadi rispettivamente per:

- ottiche MV700, 15 acquisizioni, pezzo provvisto di marker;
- ottiche MV700, 15 acquisizioni, pezzo sprovvisto di marker;
- ottiche MV320, 15 acquisizioni, pezzo provvisto di marker;
- ottiche MV320, 15 acquisizioni, pezzo sprovvisto di marker.

3.4 Sintesi complessiva dell'attività sperimentale

L'attività sperimentale appena descritta nel dettaglio può essere riassunta negli step illustrati in Figura 22, dove la parte più onerosa del lavoro è risultata la parte intermedia, inerente all'acquisizione del particolare nelle differenti condizioni di lavoro richieste dall'azienda.

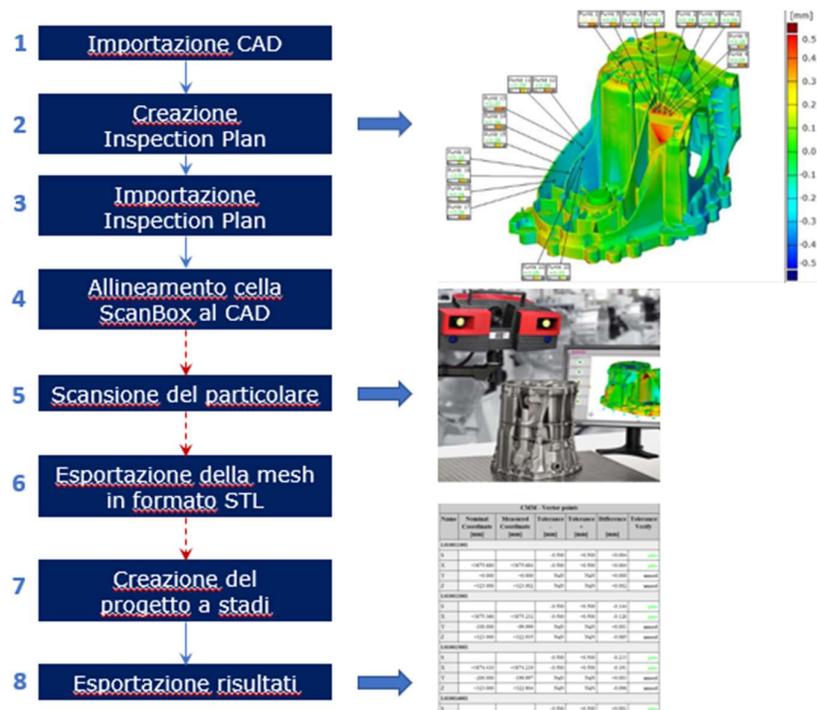


Figura 22: schema dell'attività sperimentale

Ricapitolando quindi, i vari step hanno previsto:

1. importazione del CAD del componente nel software di lavoro e creazione di un modello effettivo fittizio a partire da questo;
2. definizione degli elementi da misurare, ottenendo il piano di ispezione del componente;
3. importazione del piano di ispezione nella sezione del software dedicata alla ScanBox;
4. allineamento della cella di lavoro automatizzata al modello nominale del particolare e definizione del programma di scansione;
5. acquisizione del particolare con due aree di scansione differenti rispettivamente di 700 e 320 mm², sotto condizioni di lavoro differenti (con e senza marker);
6. esportazione in formato *.stl* di ciascuna mesh ottenuta;
7. creazione del progetto a stadi per il confronto delle misure all'interno di ogni serie;
8. esportazione dei risultati.

4 Analisi dei risultati

L'analisi dei risultati è stata suddivisa in tre parti distinte, permettendo di avere una visione chiara e completa delle differenze riscontrate tra i metodi di acquisizione del particolare con e senza marker.

In primo luogo, sono stati analizzati i risultati derivanti dalle due prime serie di misure, che hanno previsto l'impiego di un'area di scansione di 700 mm². Successivamente, sono state tratte ulteriori considerazioni dalle serie ottenute con area di scansione di 320 mm², dove il numero di viste 3D è maggiore, essendo l'area di lavoro minore. Infine, sono state esposte le difficoltà riscontrate durante i processi di acquisizione del particolare sprovvisto di marcatori.

4.1 Comparazione dei risultati ottenuti con ottiche MV700

I primi risultati analizzati sono quelli inerenti alle serie di acquisizioni del particolare eseguite con e senza marker e impiegando un'area di scansione di 700 mm².

Le grandezze considerate sono:

- *valore nominale*: valore misurato sul CAD;
- *valore effettivo*: valore misurato sul modello effettivo;
- *dev* (deviazione):

$$\text{valore effettivo} - \text{valore nominale}$$

- *avg* (average): media delle deviazioni;
- *sigma* (σ): deviazione standard dei valori;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}}$$

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

dove x_i è il singolo valore, N è il numero dei valori totali e μ è la media aritmetica dei valori considerati,

- *max*: valore massimo di deviazione;
- *min*: valore minimo di deviazione;
- *range*: $[\text{valore max} - \text{valore min}]$

4.1.1 Controllo di forma

Il controllo della forma di un oggetto è generalmente molto critico, poiché anche un solo triangolo della mesh del modello effettivo può sfasare il risultato. In generale, quindi, indipendentemente dalla tipologia di sistema ottico impiegato, i controlli di forma si caratterizzano per essere poco riproducibili.

I risultati ottenuti con e senza marker sono riportati rispettivamente in Tabella 5 e in Tabella 6.

Tabella 5: controllo di forma, ottiche MV700, marker presenti

Elemento	GD&T	Avg	Sigma	Range	Min	Max
Piano 1	Toll. di planarità	0,180	0,003	0,010	0,175	0,184
Piano 2	Toll. di planarità	0,165	0,005	0,018	0,159	0,178
Piano 3	Toll. di planarità	0,100	0,003	0,012	0,095	0,107
Foro 1	Toll. di circolarità	0,044	0,006	0,023	0,030	0,053
Foro 2	Toll. di circolarità	0,045	0,004	0,016	0,037	0,053
Foro 3	Toll. di circolarità	0,094	0,027	0,080	0,057	0,137
Foro 4	Toll. di circolarità	0,308	0,011	0,044	0,293	0,337
Foro 5	Toll. di circolarità	0,029	0,015	0,041	0,007	0,048
Foro 6	Toll. di circolarità	0,400	0,157	0,435	0,136	0,572
Foro 7	Toll. di circolarità	0,257	0,025	0,084	0,230	0,313
Foro 8	Toll. di circolarità	0,045	0,022	0,075	0,005	0,080
Foro 9	Toll. di circolarità	0,115	0,028	0,090	0,078	0,168
Foro 10	Toll. di circolarità	0,114	0,015	0,047	0,092	0,139
Foro 11	Toll. di circolarità	0,147	0,037	0,123	0,070	0,193

Tabella 6: controllo di forma, ottiche MV700, marker assenti

Elemento	GD&T	Avg	Sigma	Range	Min	Max
Piano 1	Toll. di planarità	0,188	0,004	0,012	0,182	0,194
Piano 2	Toll. di planarità	0,173	0,010	0,039	0,164	0,203
Piano 3	Toll. di planarità	0,123	0,009	0,028	0,112	0,140
Foro 1	Toll. di circolarità	0,056	0,009	0,034	0,043	0,076
Foro 2	Toll. di circolarità	0,047	0,006	0,023	0,035	0,057
Foro 3	Toll. di circolarità	0,084	0,034	0,123	0,021	0,143
Foro 4	Toll. di circolarità	0,331	0,031	0,143	0,239	0,382
Foro 5	Toll. di circolarità	0,064	0,009	0,034	0,049	0,083
Foro 6	Toll. di circolarità	0,379	0,158	0,471	0,100	0,571
Foro 7	Toll. di circolarità	0,296	0,025	0,093	0,260	0,353
Foro 8	Toll. di circolarità	0,404	0,069	0,266	0,272	0,538
Foro 9	Toll. di circolarità	0,079	0,017	0,059	0,056	0,115
Foro 10	Toll. di circolarità	0,123	0,028	0,084	0,078	0,161
Foro 11	Toll. di circolarità	0,122	0,041	0,133	0,065	0,197

In primo luogo, si nota una deviazione standard della planarità dell'ordine di 10^{-2} , mentre la circolarità mostra un valore medio dell'ordine di 10^{-1} . La spiegazione risiede nel fatto che le sezioni dei fori si trovano in una posizione difficile dal punto di vista dell'acquisizione, ostacolata anche dall'irregolarità della superficie superiore situata in prossimità delle cavità. Questi due aspetti portano alla presenza di maggior rumore, ovvero all'acquisizione di punti esterni all'oggetto.

In secondo luogo, i valori di deviazione ottenuti per il particolare prima provvisto di marcatori e successivamente sprovvisto sono comparabili. Si consideri, ad esempio, il sigma del piano 1 rispettivamente pari a 0,003 e 0,004 ottenuto con e senza marker.

È bene evidenziare però, che in assenza di riferimenti, l'ampiezza di oscillazione dei valori di sigma è leggermente maggiore, come si può vedere dal maggior valore medio di range.

4.1.2 Controllo di posizione

Idealmente, i valori derivanti dal controllo della posizione di un foro risultano più variabili rispetto la dimensione del foro stesso. Questo accade poiché il controllo della tolleranza di localizzazione di un foro è funzione dell'allineamento e dell'unione di numerose viste, mentre il diametro del medesimo è funzione della singola scansione. Come anticipato nel precedente paragrafo però, la posizione critica delle sezioni considerate non ne ha permesso un'acquisizione completa per cui, come sarà mostrato più avanti, ciò ha avuto un effetto diretto anche sulla variabilità del diametro.

L'effetto di sezioni incomplete si riversa inoltre sulla variazione della posizione del foro, aggiungendosi a quello appena descritto dovuto al montaggio delle varie viste 3D. Quanto appena detto è visibile in Figura 23, dove è mostrata la ricostruzione della sezione effettiva operata dal software tramite best-fit dell'elemento geometrico. Il software ricerca la configurazione della circonferenza che restituisca la minor deviazione possibile dalla sezione effettiva, che è stata acquisita in modo parziale.

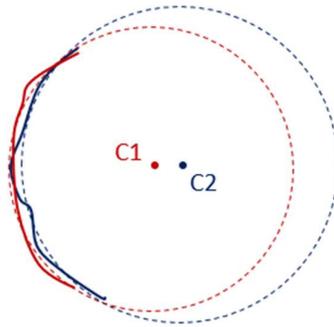


Figura 23: variabilità della posizione del centro del foro per due scansioni differenti

I risultati ottenuti con e senza marker sono riportati rispettivamente in Tabella 7 e in Tabella 8.

Tabella 7: controllo di posizione, ottiche MV700, marker presenti

Elemento	GD&T	Avg	Sigma	Range	Min	Max
Foro 1	Toll. di localizzazione	0,472	0,005	0,016	0,463	0,479
Foro 2	Toll. di localizzazione	0,787	0,004	0,014	0,780	0,794
Foro 3	Toll. di localizzazione	0,416	0,033	0,101	0,355	0,456
Foro 4	Toll. di localizzazione	0,195	0,013	0,041	0,173	0,214
Foro 5	Toll. di localizzazione	0,306	0,046	0,174	0,244	0,418
Foro 6	Toll. di localizzazione	0,417	0,096	0,379	0,152	0,531
Foro 7	Toll. di localizzazione	0,397	0,029	0,091	0,346	0,436
Foro 8	Toll. di localizzazione	0,290	0,072	0,278	0,146	0,423
Foro 9	Toll. di localizzazione	0,150	0,012	0,046	0,133	0,179
Foro 10	Toll. di localizzazione	0,314	0,009	0,033	0,297	0,330
Foro 11	Toll. di localizzazione	0,141	0,011	0,039	0,124	0,162

Tabella 8: controllo di posizione, ottiche MV700, marker assenti

Elemento	GD&T	Avg	Sigma	Range	Min	Max
Foro 1	Toll. di localizzazione	0,486	0,011	0,050	0,462	0,512
Foro 2	Toll. di localizzazione	0,784	0,015	0,060	0,755	0,815
Foro 3	Toll. di localizzazione	0,424	0,040	0,146	0,341	0,488
Foro 4	Toll. di localizzazione	0,185	0,020	0,076	0,154	0,229
Foro 5	Toll. di localizzazione	0,294	0,047	0,141	0,232	0,373
Foro 6	Toll. di localizzazione	0,435	0,106	0,557	0,150	0,707
Foro 7	Toll. di localizzazione	0,422	0,040	0,153	0,367	0,520
Foro 8	Toll. di localizzazione	0,830	0,083	0,275	0,721	0,996
Foro 9	Toll. di localizzazione	0,158	0,007	0,024	0,145	0,169
Foro 10	Toll. di localizzazione	0,325	0,009	0,036	0,307	0,343
Foro 11	Toll. di localizzazione	0,169	0,013	0,042	0,147	0,190

Dalle considerazioni precedenti, l'insieme dei fori che va da 3 a 8 rappresenta un gruppo di elementi maggiormente critici, poiché caratterizzati da valori di deviazione standard dell'ordine del decimo, a differenza dei restanti valori che rientrano nell'ordine del centesimo. L'impossibilità della corretta acquisizione delle sezioni dei fori considerati ne comporta l'esclusione dall'analisi complessiva.

Spostandosi sul confronto dei risultati, in assenza di marker era stato ipotizzato un trend maggiormente variabile, mentre si riscontrano a posteriori valori del tutto comparabili. Ciò può essere spiegato dal fatto che, per un'area di scansione particolarmente grande come 700 mm², il numero di viste da unire è minore rispetto quello ottenuto con un'area minore quale 320 mm². Per tanto, si rimandano ulteriori commenti al paragrafo dedicato all'acquisizione con ottiche MV320.

4.1.3 Calibri

La valutazione della variabilità delle dimensioni di ingombro complessivo del particolare ha previsto l'esclusione della parte sottostante dei modelli effettivi, dove è stato riscontrato maggior rumore derivante da un'acquisizione parziale della tavola di appoggio (Figura 24). Una considerazione complessiva della porzione inferiore avrebbe comportato una variabilità molto più alta, falsando in tal modo l'analisi.

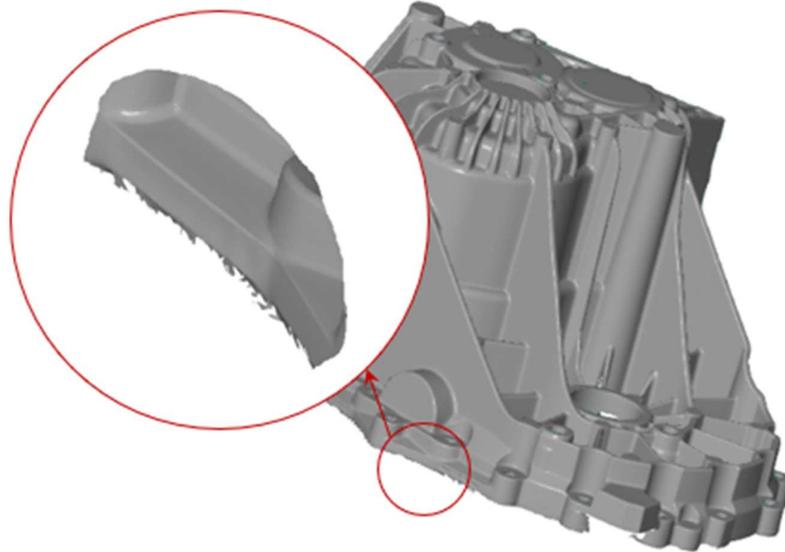


Figura 24: rumore derivante dall'acquisizione della tavola d'appoggio della macchina

I risultati ottenuti con e senza marker sono riportati rispettivamente in Tabella 9 e in Tabella 10.

Tabella 9: ingombro complessivo, ottiche MV700, marker presenti

Elemento	Proprietà	Nominale	Avg	Sigma	Range	Min	Max
Calibro 1	LX	473,997	0,156	0,022	0,079	0,108	0,187
Calibro 2	LZ	353,051	0,130	0,010	0,042	0,111	0,153

Tabella 10: ingombro complessivo, ottiche MV700, marker assenti

Elemento	Proprietà	Nominale	Avg	Sigma	Range	Min	Max
Calibro 1	LX	473,997	0,162	0,028	0,119	0,114	0,234
Calibro 2	LZ	353,051	0,170	0,011	0,040	0,148	0,187

I valori di deviazione standard delle due serie di misura risultano nuovamente simili, ma lievemente maggiori per le acquisizioni ottenute senza impiego dei marcatori.

4.1.4 Punti di volume

Il montaggio delle differenti viste 3D di un particolare può influire enormemente sulla variabilità dei punti di volume se questo non è eseguito in maniera corretta. Il processo di allineamento e unione viene svolto dal software durante la fase di scansione stessa e richiede una notevole potenza di calcolo. In questo caso, i bassi valori di sigma ottenuti in entrambi

i casi, con risultati confrontabili, denotano un corretto montaggio delle viste sia con impiego di marker che per solo fitting di forma.

I risultati ottenuti con e senza marker sono riportati rispettivamente in Tabella 11 e in Tabella 12.

Tabella 11: punti di volume, ottiche MV700, marker presenti

Elemento	Proprietà	Avg	Sigma	Range	Min	Max
P_vol1	dN	-0,175	0,004	0,015	-0,183	-0,168
P_vol2	dN	0,316	0,008	0,029	0,300	0,328
P_vol3	dN	-0,115	0,005	0,019	-0,124	-0,105
P_vol4	dN	0,027	0,005	0,014	0,019	0,033
P_vol5	dN	0,125	0,004	0,017	0,118	0,135
P_vol6	dN	0,256	0,003	0,012	0,249	0,261
P_vol7	dN	-0,110	0,003	0,013	-0,116	-0,103

Tabella 12: punti di volume, ottiche MV700, marker assenti

Elemento	Proprietà	Avg	Sigma	Range	Min	Max
P_vol1	dN	-0,178	0,008	0,027	-0,193	-0,167
P_vol2	dN	0,320	0,005	0,015	0,312	0,327
P_vol3	dN	-0,115	0,004	0,015	-0,122	-0,108
P_vol4	dN	0,024	0,009	0,026	0,012	0,038
P_vol5	dN	0,125	0,007	0,023	0,115	0,138
P_vol6	dN	0,256	0,006	0,020	0,248	0,268
P_vol7	dN	-0,111	0,006	0,021	-0,121	-0,100

4.1.5 Fori: coordinate del centro

Per le coordinate del centro del foro vale un discorso del tutto analogo alla tolleranza di localizzazione, dal momento che tali coordinate individuano la posizione del foro stesso. Quindi, da sezioni incomplete deriva un'elevata variabilità dei risultati, che è nuovamente riscontrabile nella serie di fori compresi tra il foro 3 e il foro 8. Osservando la deviazione standard, tale insieme presenta valori dell'ordine di 10^{-2} , a differenza dei restanti che mostrano valori dell'ordine di 10^{-3} .

I risultati ottenuti con e senza marker sono riportati rispettivamente in Tabella 13 e in Tabella 14.

Tabella 13: fori, coordinate del centro, ottiche MV700, marker presenti

Elemento	Proprietà	Nominale	Avg	Sigma	Range	Min	Max
Foro 1	X	202,600	-0,053	0,004	0,013	-0,061	-0,047
Foro 1	Z	-175,500	-0,230	0,003	0,009	-0,234	-0,225
Foro 2	X	242,600	0,088	0,003	0,011	0,083	0,094
Foro 2	Z	-86,500	-0,383	0,002	0,006	-0,386	-0,380
Foro 3	X	310,600	-0,204	0,019	0,060	-0,226	-0,166
Foro 3	Z	-42,700	-0,039	0,012	0,040	-0,063	-0,024
Foro 4	X	238,700	-0,093	0,006	0,023	-0,103	-0,080
Foro 4	Z	49,400	-0,026	0,015	0,058	-0,056	0,002
Foro 5	X	283,400	-0,122	0,010	0,042	-0,147	-0,105
Foro 5	Z	-151,500	0,087	0,039	0,144	0,004	0,148
Foro 6	X	87,100	-0,203	0,053	0,220	-0,263	-0,043
Foro 6	Z	-197,300	0,021	0,035	0,131	-0,037	0,094
Foro 7	X	-51,900	-0,188	0,018	0,057	-0,211	-0,153
Foro 7	Z	-133,300	0,056	0,032	0,119	-0,002	0,117
Foro 8	X	-132,200	0,032	0,017	0,059	0,013	0,072
Foro 8	Z	-11,500	0,141	0,033	0,130	0,070	0,200
Foro 9	X	102,500	0,074	0,006	0,022	0,066	0,088
Foro 9	Y	-97,000	-0,008	0,005	0,018	-0,017	0,001
Foro 10	X	100,000	0,156	0,005	0,017	0,147	0,164
Foro 10	Y	-182,000	-0,017	0,006	0,020	-0,027	-0,007
Foro 11	X	36,000	0,022	0,003	0,013	0,017	0,030
Foro 11	Y	-124,000	-0,067	0,006	0,024	-0,079	-0,055

Tabella 14: fori, coordinate del centro, ottiche MV700, marker assenti

Elemento	Proprietà	Nominale	Avg	Sigma	Range	Min	Max
Foro 1	X	202,600	-0,055	0,003	0,010	-0,060	-0,050
Foro 1	Z	-175,500	-0,236	0,006	0,027	-0,251	-0,224
Foro 2	X	242,600	0,085	0,009	0,032	0,073	0,105
Foro 2	Z	-86,500	-0,383	0,006	0,025	-0,394	-0,369
Foro 3	X	310,600	-0,209	0,023	0,080	-0,243	-0,163
Foro 3	Z	-42,700	-0,030	0,018	0,058	-0,057	0,000
Foro 4	X	238,700	-0,088	0,016	0,067	-0,108	-0,042
Foro 4	Z	49,400	-0,001	0,027	0,123	-0,086	0,037
Foro 5	X	283,400	-0,121	0,012	0,037	-0,140	-0,103
Foro 5	Z	-151,500	0,081	0,029	0,092	0,038	0,129
Foro 6	X	87,100	-0,211	0,063	0,328	-0,352	-0,024
Foro 6	Z	-197,300	0,011	0,038	0,142	-0,071	0,071
Foro 7	X	-51,900	-0,204	0,025	0,097	-0,258	-0,161
Foro 7	Z	-133,300	0,033	0,040	0,149	-0,032	0,117
Foro 8	X	-132,200	0,163	0,021	0,072	0,135	0,207
Foro 8	Z	-11,500	0,382	0,037	0,119	0,334	0,453
Foro 9	X	102,500	0,076	0,004	0,014	0,069	0,083
Foro 9	Y	-97,000	-0,019	0,008	0,028	-0,032	-0,004
Foro 10	X	100,000	0,159	0,005	0,019	0,149	0,168
Foro 10	Y	-182,000	-0,034	0,004	0,016	-0,042	-0,027
Foro 11	X	36,000	0,022	0,003	0,012	0,017	0,029
Foro 11	Y	-124,000	-0,081	0,007	0,021	-0,092	-0,070

Unitamente a quanto appena espresso, i risultati risultano ancora comparabili. Ad esempio, in riferimento al foro 1, valori di $\sigma_x=0,004$ e $\sigma_y=0,003$ ottenuti con impiego dei marcatori sono confrontabili a valori di $\sigma_x=0,003$ e $\sigma_y=0,006$ ottenuti per un montaggio con solo fattore di forma.

4.1.6 Fori: misura del diametro

Nel sottoparagrafo dedicato al controllo della posizione, si è detto che, nel caso ideale di sezioni acquisite in modo completo, i valori derivanti dal controllo della posizione di un foro risultano più variabili rispetto la dimensione del foro stesso, poiché il controllo della tolleranza di localizzazione deriva dall'allineamento e dall'unione delle numerose viste che compongono l'oggetto tridimensionale, mentre il diametro del medesimo foro appartiene alla singola scansione.

Come si denota dalla Figura 25 però, l'acquisizione incompleta delle sezioni ha comportato una notevole variabilità anche del diametro.

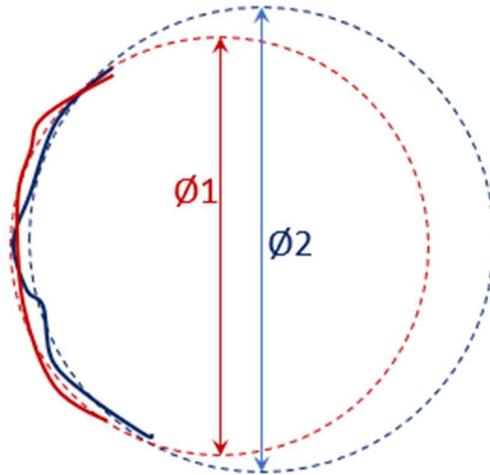


Figura 25: variabilità della dimensione del foro

I risultati ottenuti con e senza marker sono riportati rispettivamente in Tabella 15 e in Tabella 16.

Tabella 15: fori, misura del diametro, ottiche MV700, marker presenti

Elemento	Proprietà	Nominale	Avg	Sigma	Range	Min	Max
Foro 1	Ø	11,369	1,027	0,009	0,028	1,008	1,036
Foro 2	Ø	11,369	1,043	0,008	0,024	1,027	1,051
Foro 3	Ø	9,835	0,125	0,030	0,090	0,093	0,183
Foro 4	Ø	9,835	0,105	0,016	0,055	0,085	0,140
Foro 5	Ø	9,835	0,081	0,070	0,265	-0,034	0,231
Foro 6	Ø	9,835	0,069	0,058	0,222	-0,082	0,140
Foro 7	Ø	9,835	0,097	0,024	0,085	0,056	0,142
Foro 8	Ø	9,800	0,255	0,065	0,260	0,137	0,397
Foro 9	Ø	7,421	-0,020	0,007	0,032	-0,038	-0,006
Foro 10	Ø	7,421	-0,038	0,006	0,022	-0,052	-0,030
Foro 11	Ø	7,421	-0,065	0,009	0,029	-0,082	-0,053

Tabella 16: fori, misura del diametro, ottiche MV700, marker assenti

Elemento	Proprietà	Nominale	Avg	Sigma	Range	Min	Max
Foro 1	∅	11,369	1,027	0,005	0,014	1,021	1,035
Foro 2	∅	11,369	1,043	0,009	0,033	1,027	1,060
Foro 3	∅	9,835	0,122	0,033	0,087	0,076	0,164
Foro 4	∅	9,835	0,100	0,036	0,163	0,040	0,203
Foro 5	∅	9,835	0,074	0,054	0,188	-0,019	0,169
Foro 6	∅	9,835	0,045	0,070	0,267	-0,134	0,133
Foro 7	∅	9,835	0,055	0,060	0,214	-0,071	0,143
Foro 8	∅	9,800	-0,197	0,057	0,196	-0,312	-0,117
Foro 9	∅	7,421	0,009	0,009	0,027	-0,008	0,019
Foro 10	∅	7,421	-0,012	0,009	0,026	-0,025	0,001
Foro 11	∅	7,421	-0,044	0,008	0,029	-0,059	-0,031

Dalle tabelle soprastanti è possibile osservare nuovamente che i fori caratterizzati da un'elevata variabilità appartengono al gruppo compreso tra il foro 3 e il foro 8 inclusi.

Infine, i valori di sigma riscontrati nelle due serie di misure sono equiparabili.

4.2 Comparazione dei risultati ottenuti con ottiche MV320

Passando da un'area di scansione di 700 mm² ad una di 320 mm², il numero di viste 3D acquisite durante la scansione aumenta notevolmente, in quanto l'area considerata è minore. In principio, si è ipotizzato quindi che misure quali il controllo di posizione e di ingombro complessivo potessero risentire particolarmente del processo di allineamento ed unione delle varie viste dell'oggetto.

Al contrario di quanto ci si aspettava però, l'ipotesi è stata confermata solamente per i calibri, i quali hanno mostrato valori non comparabili. Se infatti i σ_x ottenuti con ottiche MV700, rispettivamente pari a 0,018 e 0,030 possono essere ritenuti poco discostanti, i σ_y ottenuti con ottiche MV320, rispettivamente pari a 0,007 e 0,047, non lo sono affatto, riscontrando addirittura una variazione dell'ordine di grandezza.

4.2.1 Controlli di forma

I risultati ottenuti con e senza marker sono riportati rispettivamente in Tabella 17 e in Tabella 18.

Tabella 17: controllo di forma, ottiche MV320, marker presenti

Elemento	GD&T	Avg	Sigma	Range	Min	Max
Piano 1	Toll. di planarità	0,211	0,009	0,032	0,198	0,230
Piano 2	Toll. di planarità	0,183	0,005	0,017	0,176	0,193
Piano 3	Toll. di planarità	0,155	0,012	0,038	0,139	0,177
Foro 1	Toll. di circolarità	0,024	0,002	0,008	0,020	0,029
Foro 2	Toll. di circolarità	0,021	0,002	0,008	0,018	0,026
Foro 3	Toll. di circolarità	0,107	0,026	0,095	0,045	0,140
Foro 4	Toll. di circolarità	0,084	0,017	0,059	0,058	0,117
Foro 5	Toll. di circolarità	0,026	0,009	0,042	0,012	0,054
Foro 6	Toll. di circolarità	0,093	0,036	0,110	0,043	0,153
Foro 7	Toll. di circolarità	0,196	0,008	0,024	0,183	0,208
Foro 8	Toll. di circolarità	0,057	0,023	0,062	0,023	0,085
Foro 9	Toll. di circolarità	0,023	0,004	0,016	0,016	0,032
Foro 10	Toll. di circolarità	0,032	0,008	0,026	0,017	0,044
Foro 11	Toll. di circolarità	0,043	0,003	0,010	0,038	0,048

Tabella 18: controllo di forma, ottiche MV320, marker assenti

Elemento	GD&T	Avg	Sigma	Range	Min	Max
Piano 1	Toll. di planarità	0,190	0,005	0,016	0,185	0,201
Piano 2	Toll. di planarità	0,185	0,012	0,042	0,169	0,210
Piano 3	Toll. di planarità	0,146	0,013	0,042	0,131	0,173
Foro 1	Toll. di circolarità	0,031	0,003	0,009	0,026	0,035
Foro 2	Toll. di circolarità	0,020	0,003	0,008	0,016	0,024
Foro 3	Toll. di circolarità	0,132	0,023	0,081	0,105	0,186
Foro 4	Toll. di circolarità	0,089	0,009	0,033	0,074	0,107
Foro 5	Toll. di circolarità	0,016	0,004	0,013	0,009	0,023
Foro 6	Toll. di circolarità	0,096	0,022	0,080	0,061	0,140
Foro 7	Toll. di circolarità	0,214	0,005	0,015	0,208	0,223
Foro 8	Toll. di circolarità	0,087	0,024	0,084	0,048	0,132
Foro 9	Toll. di circolarità	0,021	0,005	0,017	0,015	0,032
Foro 10	Toll. di circolarità	0,033	0,004	0,014	0,028	0,041
Foro 11	Toll. di circolarità	0,051	0,003	0,012	0,045	0,057

4.2.2 Controllo di posizione

I risultati ottenuti con e senza marker sono riportati rispettivamente in Tabella 19 e in Tabella 20.

Tabella 19: controllo di posizione, ottiche MV320, marker presenti

Elemento	GD&T	Avg	Sigma	Range	Min	Max
Foro 1	Toll. di localizzazione	0,545	0,008	0,028	0,535	0,564
Foro 2	Toll. di localizzazione	0,824	0,007	0,025	0,815	0,841
Foro 3	Toll. di localizzazione	0,312	0,007	0,024	0,298	0,322
Foro 4	Toll. di localizzazione	0,233	0,013	0,044	0,204	0,248
Foro 5	Toll. di localizzazione	0,264	0,012	0,053	0,240	0,293
Foro 6	Toll. di localizzazione	0,455	0,029	0,104	0,409	0,513
Foro 7	Toll. di localizzazione	0,424	0,011	0,035	0,411	0,446
Foro 8	Toll. di localizzazione	0,370	0,012	0,039	0,359	0,398
Foro 9	Toll. di localizzazione	0,132	0,007	0,030	0,116	0,146
Foro 10	Toll. di localizzazione	0,296	0,007	0,027	0,281	0,308
Foro 11	Toll. di localizzazione	0,145	0,007	0,028	0,130	0,159

Tabella 20: controllo di posizione, ottiche MV320, marker assenti

Elemento	GD&T	Avg	Sigma	Range	Min	Max
Foro 1	Toll. di localizzazione	0,546	0,006	0,020	0,537	0,557
Foro 2	Toll. di localizzazione	0,825	0,006	0,020	0,816	0,836
Foro 3	Toll. di localizzazione	0,305	0,013	0,047	0,280	0,327
Foro 4	Toll. di localizzazione	0,218	0,015	0,070	0,192	0,262
Foro 5	Toll. di localizzazione	0,260	0,024	0,076	0,226	0,302
Foro 6	Toll. di localizzazione	0,469	0,010	0,033	0,458	0,491
Foro 7	Toll. di localizzazione	0,396	0,014	0,056	0,369	0,425
Foro 8	Toll. di localizzazione	0,380	0,018	0,063	0,351	0,414
Foro 9	Toll. di localizzazione	0,136	0,006	0,021	0,123	0,144
Foro 10	Toll. di localizzazione	0,295	0,007	0,027	0,277	0,304
Foro 11	Toll. di localizzazione	0,138	0,009	0,042	0,118	0,160

4.2.3 Calibri

I risultati ottenuti con e senza marker sono riportati rispettivamente in Tabella 21 e in Tabella 22.

Tabella 21: ingombro complessivo, ottiche MV320, marker presenti

Elemento	Proprietà	Nominale	Avg	Sigma	Range	Min	Max
Calibro 1	LX	473,997	0,238	0,018	0,066	0,204	0,269
Calibro 2	LZ	353,051	0,224	0,007	0,025	0,210	0,235

Tabella 22: ingombro complessivo, ottiche MV320, marker assenti

Elemento	Proprietà	Nominale	Avg	Sigma	Range	Min	Max
Calibro 1	LX	473,997	0,246	0,030	0,104	0,202	0,306
Calibro 2	LZ	353,051	0,353	0,047	0,168	0,276	0,443

4.2.4 Punti di volume

I risultati ottenuti con e senza marker sono riportati rispettivamente in Tabella 23 e in Tabella 24.

Tabella 23: punti di volume, ottiche MV320, marker presenti

Elemento	Proprietà	Avg	Sigma	Range	Min	Max
P_vol4	dN	0,030	0,003	0,011	0,024	0,036
P_vol5	dN	0,132	0,003	0,010	0,128	0,138
P_vol6	dN	0,268	0,003	0,010	0,262	0,272
P_vol7	dN	-0,108	0,004	0,015	-0,115	-0,100
P_vol1	dN	-0,193	0,007	0,020	-0,204	-0,184
P_vol3	dN	-0,158	0,007	0,025	-0,169	-0,145
P_vol2	dN	0,298	0,010	0,031	0,278	0,309

Tabella 24: punti di volume, ottiche MV320, marker assenti

Elemento	Proprietà	Avg	Sigma	Range	Min	Max
P_vol1	dN	-0,199	0,004	0,018	-0,211	-0,193
P_vol2	dN	0,270	0,011	0,035	0,249	0,284
P_vol3	dN	-0,167	0,006	0,026	-0,183	-0,158
P_vol4	dN	0,026	0,003	0,015	0,018	0,033
P_vol5	dN	0,128	0,004	0,016	0,118	0,133
P_vol6	dN	0,258	0,003	0,012	0,250	0,263
P_vol7	dN	-0,106	0,003	0,013	-0,112	-0,099

4.2.5 Fori: coordinate del centro

I risultati ottenuti con e senza marker sono riportati rispettivamente in Tabella 25 e in Tabella 26.

Tabella 25: fori, coordinate del centro, ottiche MV320, marker presenti

Elemento	Proprietà	Nominale	Avg	Sigma	Range	Min	Max
Foro 1	X	202,600	-0,038	0,004	0,015	-0,045	-0,030
Foro 1	Z	-175,500	-0,270	0,004	0,013	-0,279	-0,266
Foro 2	X	242,600	0,112	0,002	0,008	0,108	0,116
Foro 2	Z	-86,500	-0,396	0,004	0,013	-0,405	-0,392
Foro 3	X	310,600	-0,142	0,004	0,014	-0,149	-0,135
Foro 3	Z	-42,700	-0,066	0,004	0,014	-0,074	-0,059
Foro 4	X	238,700	-0,071	0,008	0,024	-0,083	-0,059
Foro 4	Z	49,400	-0,092	0,006	0,027	-0,105	-0,078
Foro 5	X	283,400	-0,080	0,003	0,015	-0,085	-0,070
Foro 5	Z	-151,500	0,105	0,008	0,037	0,088	0,125
Foro 6	X	87,100	-0,209	0,019	0,070	-0,245	-0,176
Foro 6	Z	-197,300	-0,089	0,010	0,031	-0,106	-0,075
Foro 7	X	-51,900	-0,100	0,007	0,023	-0,110	-0,087
Foro 7	Z	-133,300	0,187	0,006	0,021	0,174	0,194
Foro 8	X	-132,200	0,035	0,008	0,031	0,021	0,053
Foro 8	Z	-11,500	0,182	0,005	0,016	0,176	0,192
Foro 9	X	102,500	0,066	0,004	0,014	0,058	0,072
Foro 9	Y	-97,000	0,004	0,004	0,012	-0,001	0,010
Foro 10	X	100,000	0,147	0,004	0,014	0,139	0,153
Foro 10	Y	-182,000	-0,019	0,003	0,012	-0,026	-0,014
Foro 11	X	36,000	-0,003	0,003	0,014	-0,011	0,002
Foro 11	Y	-124,000	-0,072	0,003	0,013	-0,078	-0,065

Tabella 26: fori, coordinate del centro, ottiche MV320, marker assenti

Elemento	Proprietà	Nominale	Avg	Sigma	Range	Min	Max
Foro 1	X	202,600	-0,034	0,004	0,011	-0,038	-0,028
Foro 1	Z	-175,500	-0,271	0,003	0,010	-0,276	-0,266
Foro 2	X	242,600	0,116	0,004	0,014	0,111	0,126
Foro 2	Z	-86,500	-0,396	0,003	0,008	-0,401	-0,392
Foro 3	X	310,600	-0,139	0,006	0,023	-0,150	-0,127
Foro 3	Z	-42,700	-0,063	0,003	0,010	-0,068	-0,058
Foro 4	X	238,700	-0,065	0,006	0,025	-0,080	-0,056
Foro 4	Z	49,400	-0,088	0,006	0,025	-0,104	-0,078
Foro 5	X	283,400	-0,068	0,008	0,030	-0,078	-0,048
Foro 5	Z	-151,500	0,110	0,017	0,054	0,085	0,140
Foro 6	X	87,100	-0,208	0,009	0,032	-0,225	-0,193
Foro 6	Z	-197,300	-0,107	0,008	0,029	-0,123	-0,095
Foro 7	X	-51,900	-0,107	0,008	0,029	-0,119	-0,090
Foro 7	Z	-133,300	0,167	0,008	0,032	0,146	0,178
Foro 8	X	-132,200	0,037	0,007	0,024	0,028	0,052
Foro 8	Z	-11,500	0,186	0,009	0,031	0,172	0,203
Foro 9	X	102,500	0,067	0,003	0,011	0,061	0,072
Foro 9	Y	-97,000	0,008	0,005	0,020	-0,002	0,018
Foro 10	X	100,000	0,146	0,004	0,013	0,138	0,150
Foro 10	Y	-182,000	-0,018	0,005	0,019	-0,028	-0,008
Foro 11	X	36,000	-0,003	0,004	0,011	-0,011	0,000
Foro 11	Y	-124,000	-0,069	0,005	0,022	-0,080	-0,058

4.2.6 Fori: misura del diametro

I risultati ottenuti con e senza marker sono riportati rispettivamente in Tabella 27 e in Tabella 28.

Tabella 27: fori, misura del diametro, ottiche MV320, marker presenti

Elemento	Proprietà	Nominale	Avg	Sigma	Range	Min	Max
Foro 1	∅	11,369	1,044	0,004	0,014	1,038	1,051
Foro 2	∅	11,369	1,058	0,002	0,008	1,055	1,063
Foro 3	∅	9,835	0,228	0,005	0,016	0,222	0,238
Foro 4	∅	9,835	0,217	0,009	0,033	0,202	0,235
Foro 5	∅	9,835	0,052	0,011	0,043	0,032	0,075
Foro 6	∅	9,835	0,157	0,025	0,081	0,108	0,189
Foro 7	∅	9,835	0,170	0,010	0,034	0,154	0,188
Foro 8	∅	9,800	0,245	0,007	0,024	0,231	0,254
Foro 9	∅	7,421	-0,017	0,006	0,022	-0,026	-0,003
Foro 10	∅	7,421	-0,060	0,005	0,020	-0,070	-0,050
Foro 11	∅	7,421	-0,080	0,005	0,017	-0,087	-0,070

Tabella 28: fori, misura del diametro, ottiche MV320, marker assenti

Elemento	Proprietà	Nominale	Avg	Sigma	Range	Min	Max
Foro 1	∅	11,369	1,041	0,003	0,011	1,034	1,046
Foro 2	∅	11,369	1,055	0,002	0,009	1,052	1,060
Foro 3	∅	9,835	0,229	0,006	0,024	0,216	0,241
Foro 4	∅	9,835	0,225	0,014	0,048	0,203	0,251
Foro 5	∅	9,835	0,043	0,028	0,091	-0,015	0,076
Foro 6	∅	9,835	0,163	0,012	0,037	0,144	0,181
Foro 7	∅	9,835	0,189	0,008	0,029	0,171	0,200
Foro 8	∅	9,800	0,249	0,011	0,042	0,225	0,267
Foro 9	∅	7,421	-0,019	0,005	0,018	-0,030	-0,012
Foro 10	∅	7,421	-0,062	0,005	0,017	-0,069	-0,052
Foro 11	∅	7,421	-0,088	0,004	0,013	-0,094	-0,081

4.3 Stima di riproducibilità e ripetibilità

Nel Capitolo 3, la *riproducibilità* è stata definita come il grado di coerenza di una serie di misure di una stessa grandezza, detta *misurando*, nel caso in cui le singole misurazioni siano effettuate cambiando una o più condizioni al contorno. Nel caso in esame, la condizione al contorno è costituita dalla presenza dei marker durante la fase di scansione, che influenza enormemente il processo di allineamento delle varie viste 3D dell'oggetto. Poiché i valori sono stati ritenuti quasi sempre comparabili, anche passando ad un'area di scansione minore, quale quella ottenuta con ottiche

MV320, per le quali il numero di viste 3D acquisite è aumentato notevolmente rispetto le ottiche MV700, le misure risultano essere riproducibili. Si ricorda, inoltre, che inizialmente è stato ipotizzato che misure strettamente dipendenti dal montaggio delle viste dell'oggetto avrebbero potuto risentire in particolar modo della variazione della condizione al contorno, verificando, in seguito, che ciò è risultato valido solo per i calibri, misure di ingombro complessivo. In breve, a conferma di quanto affermato in precedenza, le misure sono riproducibili.

Per quanto riguarda la *ripetibilità*, questa è stata definita come la valutazione della concordanza dei risultati nel caso in cui le condizioni siano mantenute inalterate. Riferendosi quindi alle singole serie di misura, che si ricorda essere in tutto quattro, due con area di scansione di 700 mm² e due con area di 320 mm², rispettivamente con e senza marker, il range di variazione dei valori è risultato leggermente maggiore per le misure rilevate senza l'impiego di marcatori. Si conclude che la condizione di assenza dei marker rende il processo meno ripetibile.

4.4 Difficoltà del processo di acquisizione senza marker

Durante l'acquisizione senza utilizzo dei marker sono state riscontrate non poche difficoltà, che nel complesso hanno comportato una notevole dilatazione del tempo totale di acquisizione.

Queste possono essere così riassunte:

1. tempo prolungato della singola scansione

Il processo di allineamento ed unione delle viste si svolge contemporaneamente alla fase di scansione del particolare, per cui richiede una notevole potenza di calcolo da parte delle risorse hardware e software responsabili del monitoraggio. In assenza dei marker, il software è costretto ad allineare le varie viste 3D esclusivamente tramite best-fit, non essendo in grado di individuare riferimenti specifici. Il maggior impiego di risorse comporta un dilatamento del tempo complessivo di scansione, che, in alcuni casi, è risultato essere più che raddoppiato, rispetto quello misurato per il componente provvisto di marker. Ad esempio, per ottiche MV700 in presenza dei marker è stato richiesto un tempo medio di acquisizione di 10 minuti, contro i 19 minuti richiesti in loro assenza. Il divario è aumentato enormemente con ottiche MV320, dove è ormai chiaro che il numero di viste legate è di molto maggiore.

2. complesso allineamento di tutte le viste

Maggiore è la complessità della vista, minore è il tempo richiesto per il suo allineamento, poiché il software è in grado di individuare un maggior numero di elementi di riferimento per un montaggio in fitting di forma. Ne deriva che, in caso di viste semplificate, il tempo di ricerca della configurazione che restituisca la minor deviazione possibile aumenta notevolmente. Tale effetto è stato osservato principalmente durante le serie di acquisizioni con area di scansione di 320 mm². Infatti, il maggior numero di viste acquisite ha comportato una consistente maggiorazione del tempo di ricalcolo dovuto all'allineamento delle viste pre-acquisite per ogni vista aggiunta.

3. necessità di allineamento manuale di alcune viste

Nel momento in cui il processo precedentemente descritto non è andato a buon fine, il software, che non ha potuto contare su un sistema di riferimento fornito dai marker, in questo caso assenti, ha attuato allineamenti errati oppure ha lasciato viste non allineate, come mostrato in Figura 26.

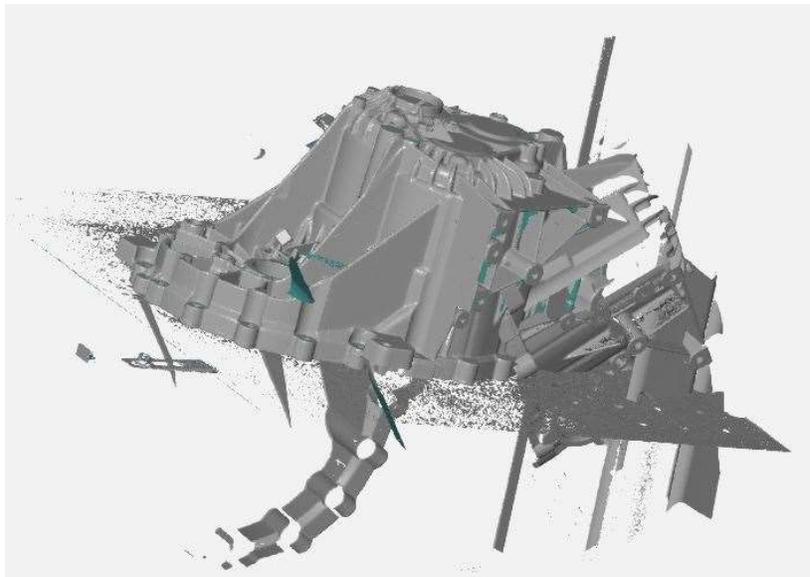


Figura 26: errore di allineamento di una delle viste 3D

In alcuni casi quindi, soprattutto per acquisizioni con ottiche MV320, è stato necessario procedere ad un allineamento manuale delle viste non allineate automaticamente dal software.

In Tabella 29, è possibile osservare in quali acquisizioni l'allineamento di tutte le viste 3D componenti l'oggetto è risultato positivo (o negativo) al termine del processo. Se per le ottiche MV320 ne è scaturito un trend del tutto casuale, per le ottiche MV700 è stato riscontrato un trend diviso in due parti.

Tabella 29: allineamento complessivo delle viste con differenti aree di scansione

Acquisizione senza marker	Allineamento complessivo con ottiche MV700	Allineamento complessivo con ottiche MV320
1	riuscito	non riuscito
2	riuscito	non riuscito
3	riuscito	non riuscito
4	riuscito	riuscito
5	riuscito	riuscito
6	riuscito	riuscito
7	riuscito	riuscito
8	riuscito	riuscito
9	riuscito	riuscito
10	non riuscito	riuscito
11	non riuscito	non riuscito
12	non riuscito	riuscito
13	non riuscito	non riuscito
14	non riuscito	riuscito
15	non riuscito	riuscito

5 Conclusioni

Con un mondo industriale in costante progresso ed un'economia che evolve con ritmi serrati senza alcuna direzione privilegiata, diventa proibito restare ancorati alle tradizioni. La crescente esigenza di innovazione ha comportato il diffondersi di metodi di produzione basati su nuove tecnologie, che possano garantire alle imprese un elevato grado di efficienza e competitività.

L'acquisizione digitale di oggetti fisici tridimensionali rientra a tutti gli effetti tra quei metodi innovativi che permettono ad un'azienda di essere al passo coi tempi e di raggiungere alti standard qualitativi. In particolare, i dispositivi di acquisizione non a contatto di tipo ottico sono caratterizzati da tempi di processo estremamente ridotti ed un grado di accuratezza crescente, tendendo a sostituire progressivamente le tradizionali macchine di misura a contatto.

È ormai chiaro che ciascuna casa produttrice ha sviluppato un sistema ottico che sfrutta una differente tecnologia, mantenendo come fine comune il corretto legamento delle differenti viste 3D ottenute durante la fase di acquisizione. Tra questi, i sistemi della GOM prediligono l'utilizzo dei marcatori, ottenendo elevati gradi di precisione e stabilità delle misure. L'attività sperimentale ha avuto quindi l'obiettivo di realizzare un'analisi critica nei confronti dell'utilizzo di tali elementi, suddividendo in quattro parti la fase di scansione. Sono stati raccolti dati utili che permettessero di valutare la variazione di misure, scelte in modo opportuno, nel caso in cui si operasse in presenza ed in assenza dei marker ed impiegando due aree di scansione differenti rispettivamente di 700 e 320 mm², così che gli elementi valutati restassero immutati.

Da un attento confronto dei risultati, i valori ottenuti sono stati ritenuti del tutto comparabili, tranne per le misure inerenti alle dimensioni complessive del particolare, ovvero i calibri. Inoltre, è stato osservato un range di variazione lievemente maggiore per le misure attuate sul gear-box senza marcatori. Da tali considerazioni, il processo di scansione con e senza marker è stato ritenuto *riproducibile*, ma le singole serie di misura senza marcatori sono state considerate *poco ripetibili*. Come già precisato, tale effetto è derivato da una geometria del componente particolarmente complessa, la quale ha permesso al software di poter operare, in fase di montaggio delle viste, con grande efficienza, sebbene le scansioni siano state legate soltanto con un fattore di forma. Questo perché una geometria maggiormente articolata, quale quella dell'oggetto in esame, presenta numerosi dettagli costituenti elementi di riferimento in grado di guidare il

software nelle fasi di allineamento ed unione, rispetto una geometria semplice o assialsimmetrica. In quest'ultimo caso in particolare, la creazione di un sistema di riferimento tramite l'impiego di marker adesivi è fondamentale e non può essere esclusa.

Unitamente a quanto appena esposto, non poche sono state le difficoltà riscontrate nell'operare senza elementi adesivi di riferimento. Tempo prolungato della singola scansione, complesso allineamento di tutte le viste e necessità di allineamento manuale di alcune viste sono tutti fattori che hanno provocato una *dilatazione del tempo di acquisizione*, effetto che non può essere trascurato in un odierno mondo industriale in cui la competitività a livello globale è un elemento caratterizzante e decisivo per un'azienda.

In conclusione, ne deriva che lavorare senza marker è possibile e può risultare particolarmente utile per superfici delicate o facilmente deformabili, su cui non è possibile applicare alcun tipo di pressione o far aderire alcuna tipologia di adesivo costituente un riferimento, a patto che si tratti di geometrie multiformi e ricche di particolari, in grado di fornire al software di lavoro le opportune indicazioni per un corretto processo di unione delle numerose viste componenti l'oggetto tridimensionale. In caso contrario, la presenza dei marker risulta fondamentale, in quanto, restituendo errori di allineamento inferiori al centesimo di millimetro, garantisce standard di precisione metrologica equiparabili a quelli delle tradizionali macchine di misura a contatto, quali CMM e bracci articolati.

6 Bibliografia

- [1] G. Negri, «La Quarta Rivoluzione Industriale: sintesi di un cambiamento strutturale,» OggiScienza - la ricerca e i suoi protagonisti, 2017. [Online]. Available: <https://oggiscienza.it/2017/01/20/quarta-rivoluzione-industriale-innovazione/>.
- [2] «Industria 4.0 - Guida alla Quarta Rivoluzione Industriale,» Osservatori.net - digital innovation, [Online]. Available: https://blog.osservatori.net/it_it/industria-4-0-quarta-rivoluzione-industriale.
- [3] M. Martorelli, «Reverse Engineering,» *Manuale militare americano MIL-HDBH-115-ME*.
- [4] «Reverse Engineering,» Wikipedia - L'enciclopedia libera, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Reverse_engineering.
- [5] «Controllo della Qualità,» *Norma ISO 9000 ed. 2000*.
- [6] «Nuvola di punti,» Wikipedia - L'Enciclopedia libera, [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Nuvola_di_punti.
- [7] B. Michele, «Luce strutturata,» XRAYCONSULT - Soluzioni tecnologiche X-RAY, [Online]. Available: <https://www.xrayconsult.it/nota-ls.html>.
- [8] L. Bornaz, «Laser Scanner,» Wikipedia - L'enciclopedia libera, 20 Giugno 2019. [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Laser_scanner.
- [9] «Best-fit - Enciclopedia online,» Treccani, La Cultura Italiana, [Online]. Available: <http://www.treccani.it/enciclopedia/best-fit/>.
- [10] «Introduzione alla metrologia a coordinate,» HEXAGON, Manufacturing Intelligence, [Online]. Available: <https://www.hexagonmi.com/it-IT/solutions/technical-resources/metrology-101/intro-to-coordinate-metrology>.
- [11] «Carl Zeiss (azienda),» Wikipedia - L'enciclopedia libera, [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Carl_Zeiss_%28azienda%29.

- [12] ZEISS Group, [Online]. Available: <https://www.zeiss.it/corporate/home.html>.
- [13] V-GER - Competence in 3D Scanning, [Online]. Available: <https://www.vger.eu/>.
- [14] FARO, [Online]. Available: <https://www.faro.com/it-it>.
- [15] GOM, [Online]. Available: <https://www.gom.com/it.html>.
- [16] «Riproducibilità,» Wikipedia - L'enciclopedia libera, [Online]. Available: <https://it.wikipedia.org/wiki/Riproducibilit%C3%A0>.

7 Appendice

Si riportano, a titolo di esempio, i grafici relativi al trend statistico delle misure rilevate con area di scansione di 700 mm², precisando che ognuno di questi è rispettivamente scalato rispetto l'ordine di grandezza delle misure stesse. In altre parole, la costruzione di ogni grafico non segue una scala unica di riferimento.

Risultati del tutto analoghi sono stati ottenuti con la differente area di scansione di 320 mm².

7.1 Ottiche MV700, marker presenti

7.1.1 Controllo di forma

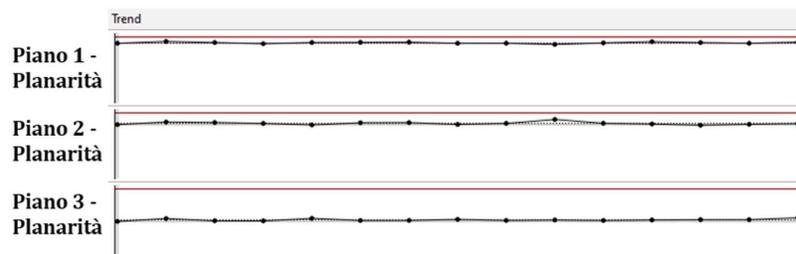


Figura 27: tolleranza di planarità, ottiche MV700, marker presenti

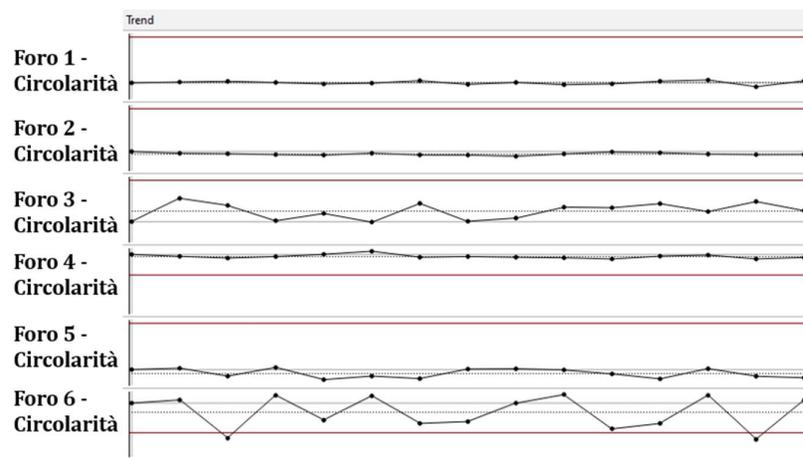


Figura 28: tolleranza di circolarità, fori 1-6, ottiche MV700, marker presenti

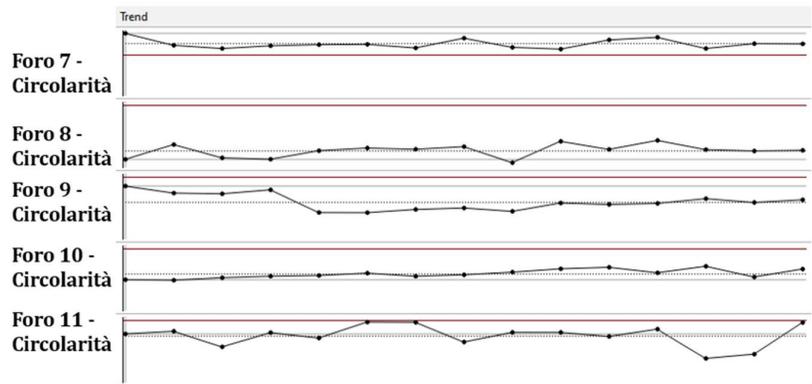


Figura 29: tolleranza di circolarità, fori 7-11, ottiche MV700, marker presenti

7.1.2 Controllo di posizione

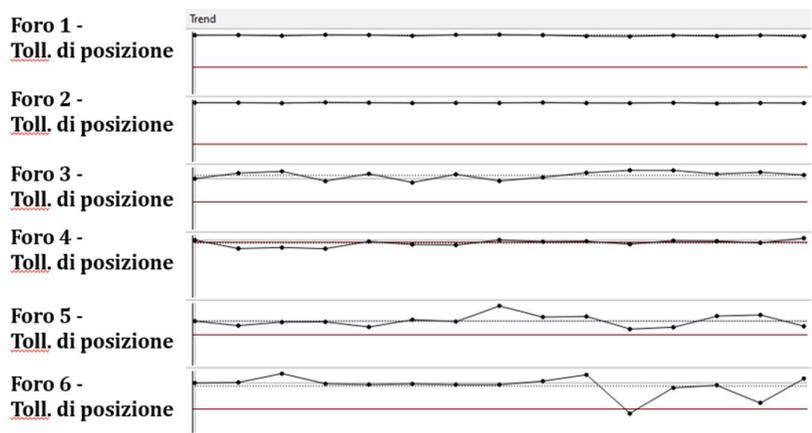


Figura 30: tolleranza di posizione, fori 1-6, ottiche MV700, marker presenti

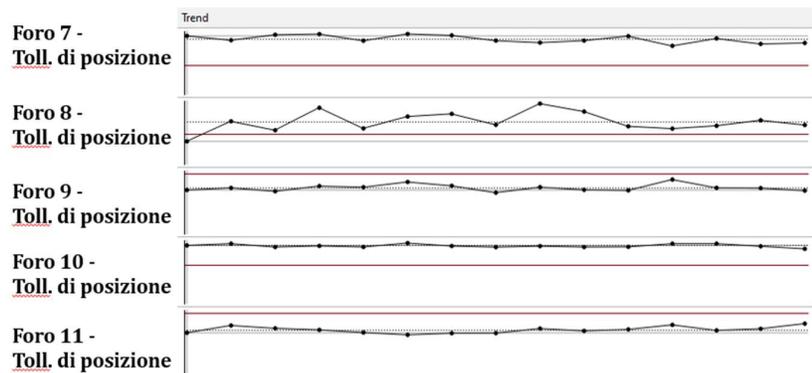


Figura 31: tolleranza di posizione, fori 7-11, ottiche MV700, marker presenti

7.1.3 Calibri

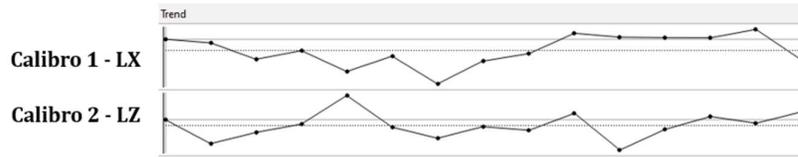


Figura 32: ingombro complessivo, ottiche MV700, marker presenti

7.1.4 Punti di volume

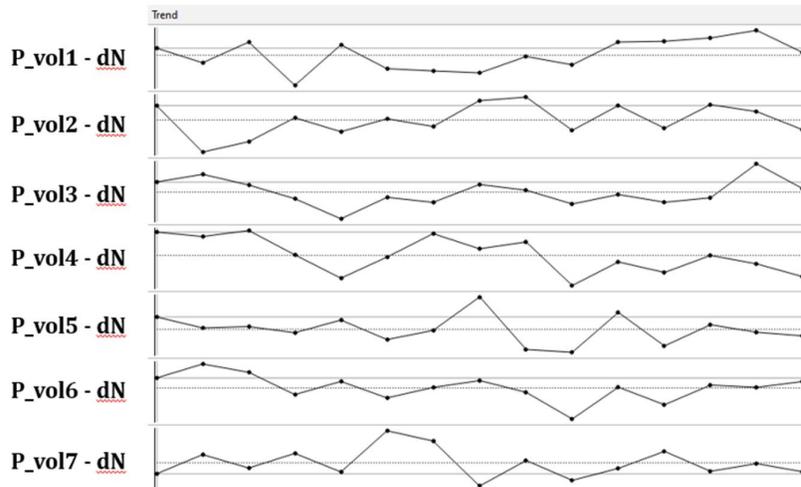


Figura 33: punti di volume, ottiche MV700, marker presenti

7.1.5 Fori: coordinate del centro

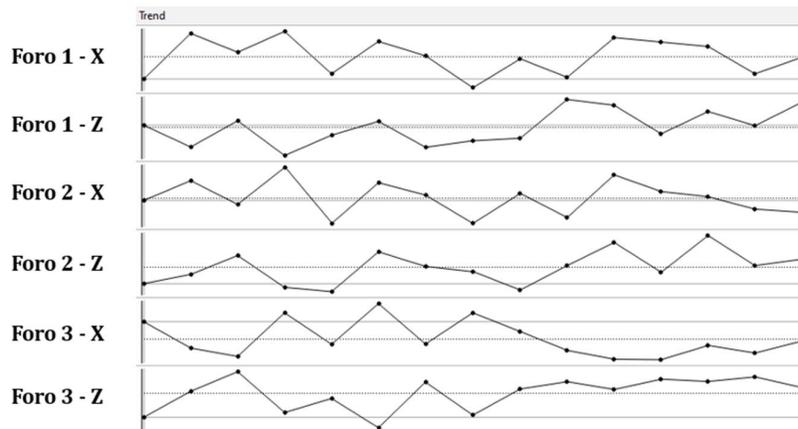


Figura 34: fori 1-3, coordinate del centro, ottiche MV700, marker presenti

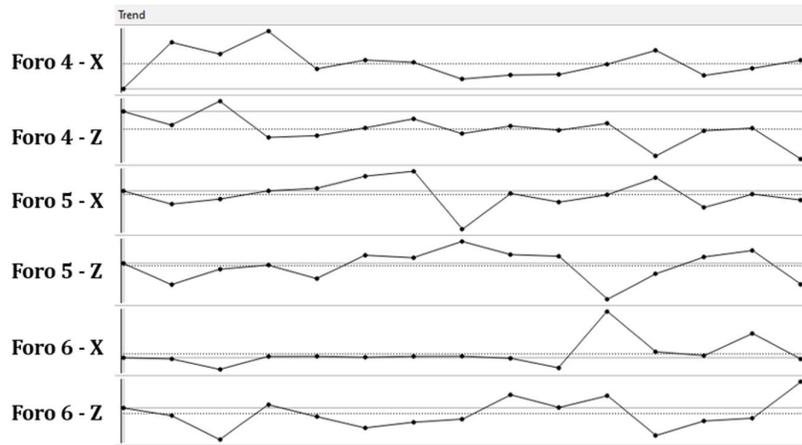


Figura 35: fori 4-6, coordinate del centro, ottiche MV700, marker presenti

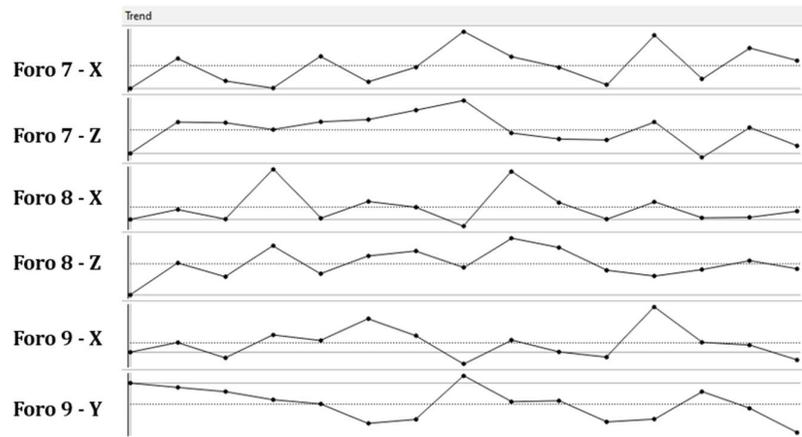


Figura 36: fori 7-9, coordinate del centro, ottiche MV700, marker presenti

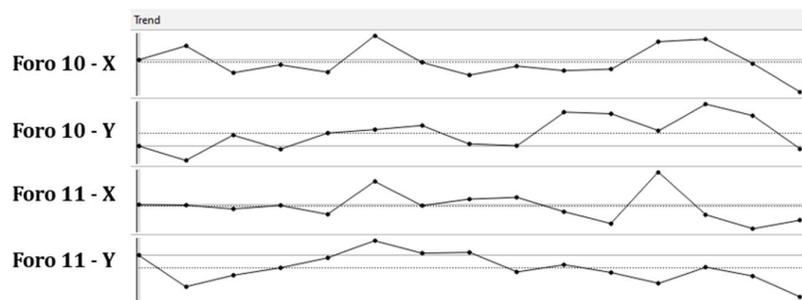


Figura 37: fori 10-11, coordinate del centro, ottiche MV700, marker presenti

7.1.6 Fori: misura del diametro

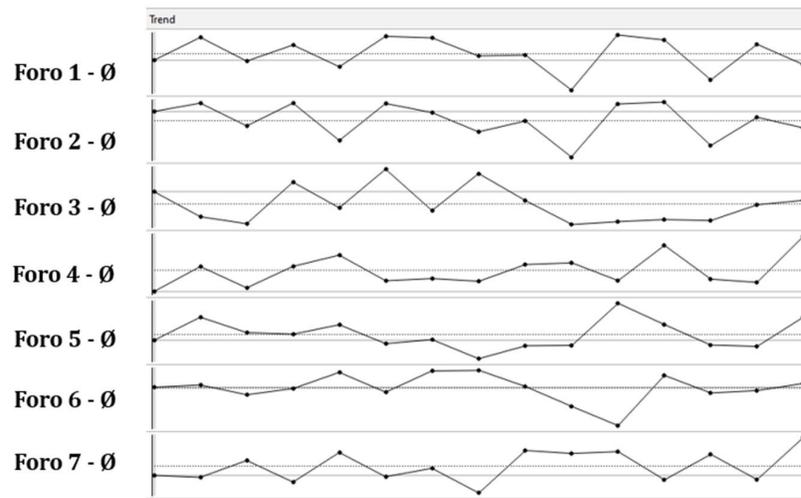


Figura 38: fori 1-7, misura del diametro, ottiche MV700, marker presenti

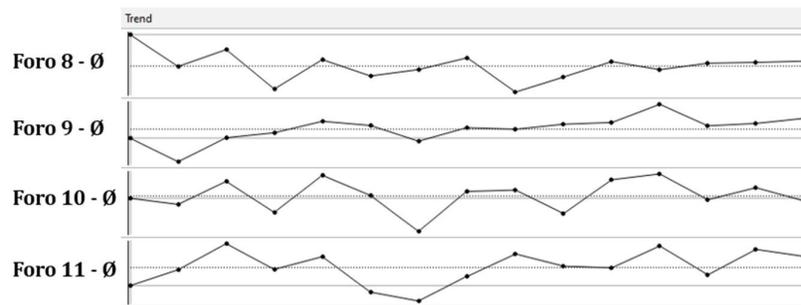


Figura 39: fori 8-11, misura del diametro, ottiche MV700, marker presenti

7.2 Ottiche MV700, marker assenti

7.2.1 Controllo di forma

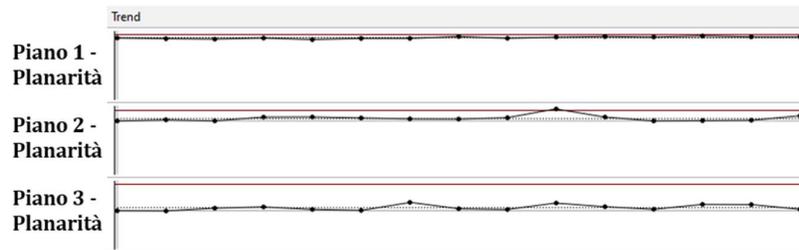


Figura 40: tolleranza di planarità, ottiche MV700, marker assenti

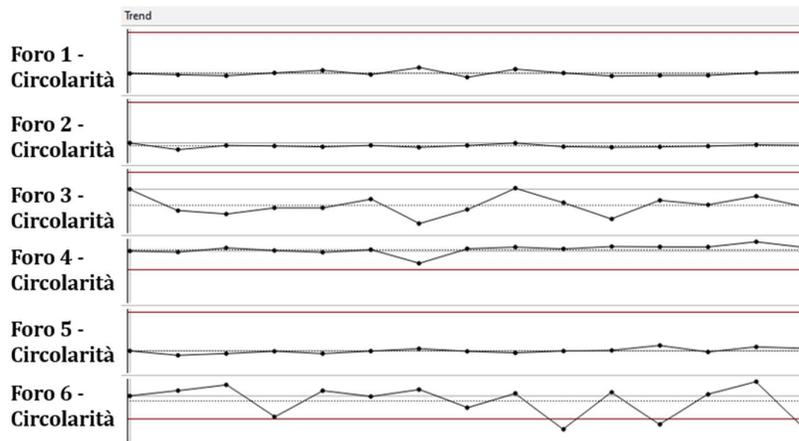


Figura 41: tolleranza di circolarità, fori 1-6, ottiche MV700, marker assenti

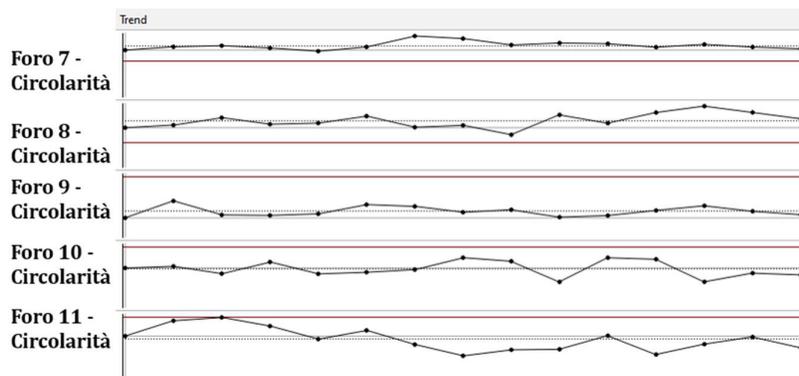


Figura 42: tolleranza di circolarità, fori 7-11, ottiche MV700, marker assenti

7.2.2 Controllo di posizione

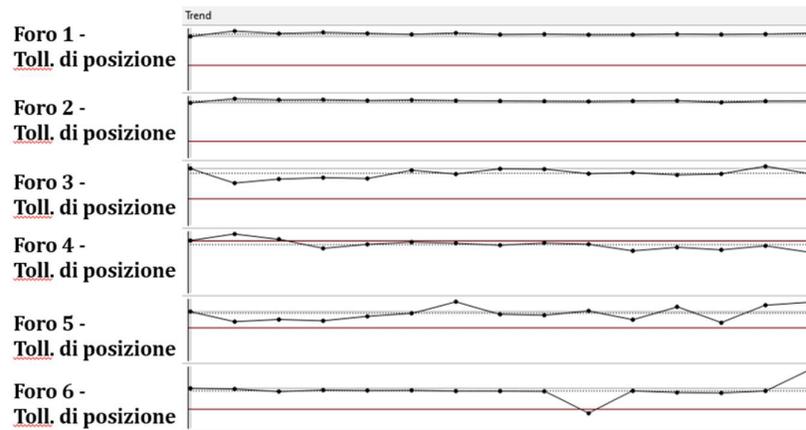


Figura 43: tolleranza di posizione, fori 1-6, ottiche MV700, marker assenti

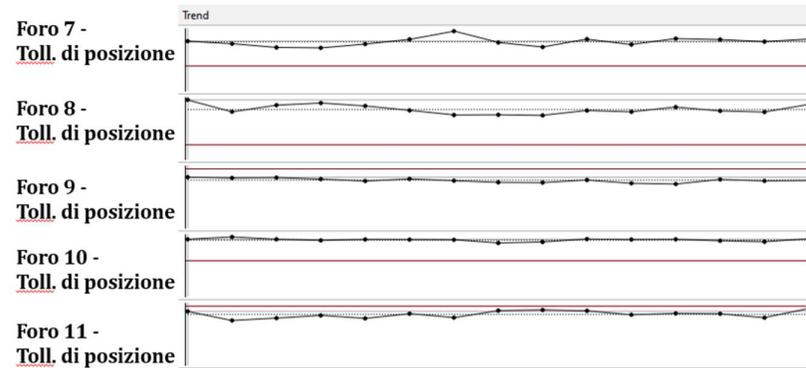


Figura 44: tolleranza di posizione, fori 7-11, ottiche MV700, marker assenti

7.2.3 Calibri

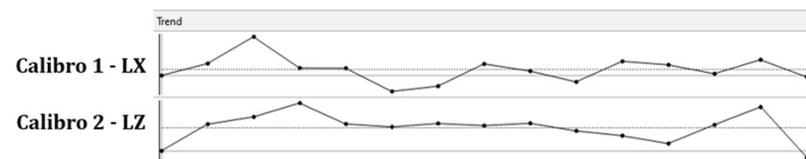


Figura 45: ingombro complessivo, ottiche MV700, marker assenti

7.2.4 Punti di volume

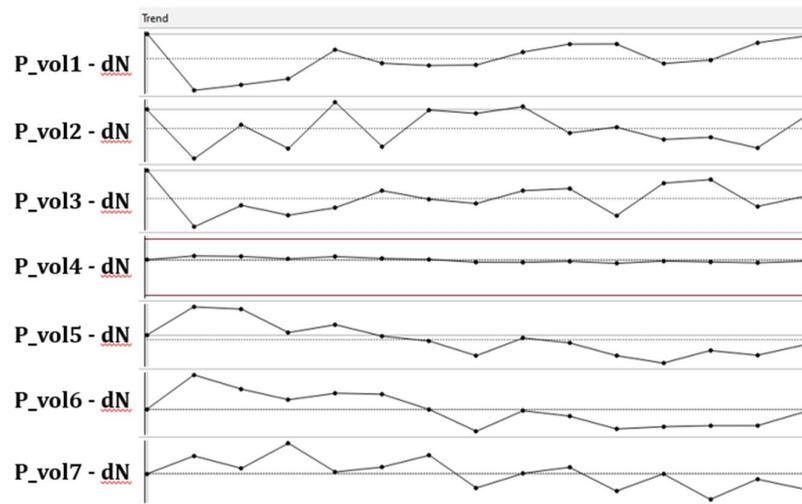


Figura 46: punti di volume, ottiche MV700, marker assenti

7.2.5 Fori: coordinate del centro

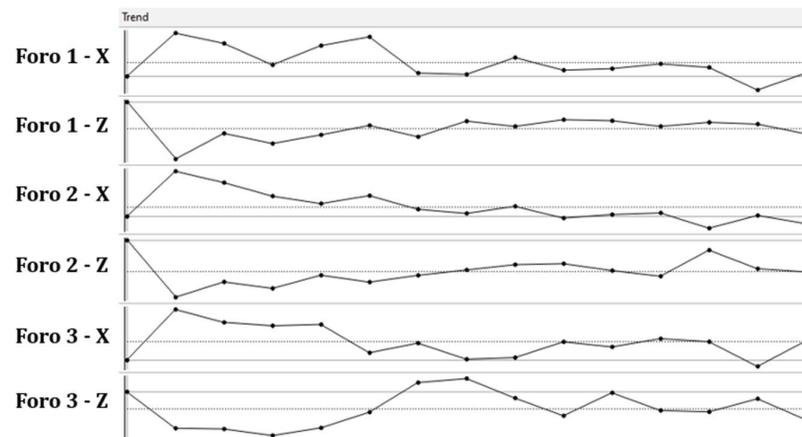


Figura 47: fori 1-3, coordinate del centro, ottiche MV700, marker assenti

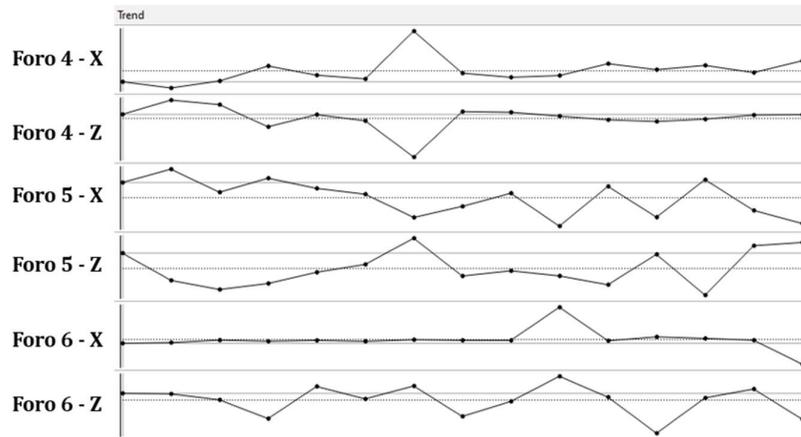


Figura 48: fori 4-6, coordinate del centro, ottiche MV700, marker assenti

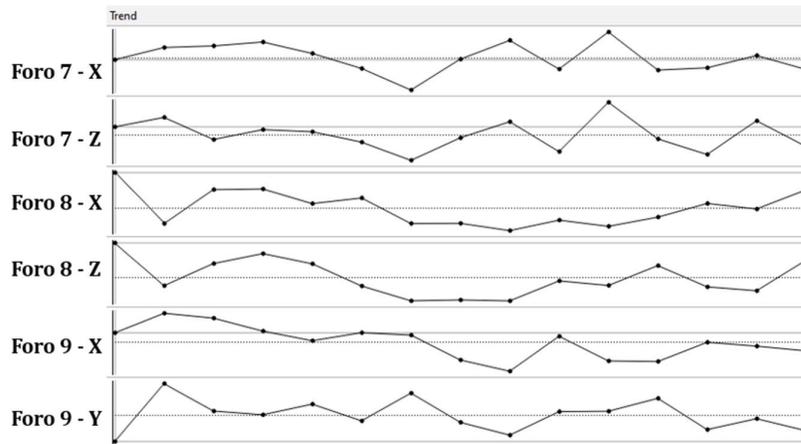


Figura 49: fori 7-9, coordinate del centro, ottiche MV700, marker assenti

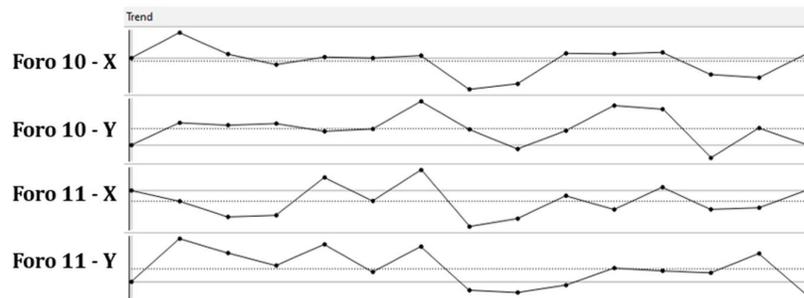


Figura 50: fori 10-11, coordinate del centro, ottiche MV700, marker assenti

7.2.6 Fori: misura del diametro

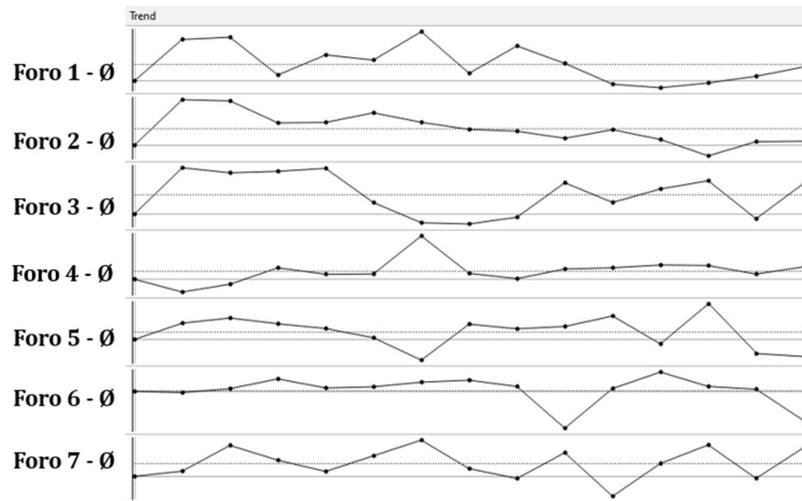


Figura 51: fori 1-7, misura del diametro, ottiche MV700, marker assenti

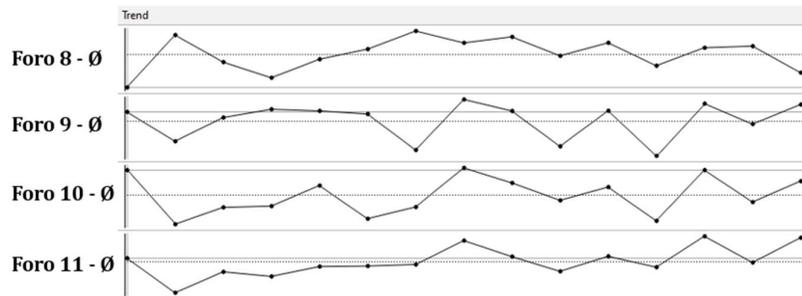


Figura 52: fori 8-11, misura del diametro, ottiche MV700, marker assenti