



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

**VALIDAZIONE DI UN SENSORE
INTERFEROMETRICO PER L'ACQUISIZIONE
DI PROFILI GEOMETRICI IN CONDIZIONI
DI RIDOTTA ACCESSIBILITÀ**

**VALIDATION OF AN INTERFEROMETRIC SENSOR FOR THE ACQUISITION OF
GEOMETRIC PROFILES IN REDUCED ACCESSIBILITY CONDITIONS**

Tesi di Laurea di:

Giorgio Zoppi

Relatore:

Prof. Paolo Castellini

Correlatore:

Ing. Saverio Zitti

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

Indice

Capitolo 1 - Introduzione	1
1.1 Scopo della tesi.....	1
1.2 Descrizione delle specifiche condizioni di misura	2
1.3 Possibili strumenti adatti analizzati	5
1.4 Attuali modalità di misurazione del componente.....	8
1.5 Controllo automatico	10
Capitolo 2 - Materiali e metodi	13
2.1 Descrizione del sensore	13
2.2 Descrizione del setup di misura.....	16
2.3 Misure con profilometro e CMM	17
2.4 Richieste espresse per le misure da effettuare	19
2.5 Descrizione delle misure lato fine	23
2.6 Descrizione delle misure lato grande	25
2.7 Descrizioni dello script.....	27
2.7.1 Allineamento orizzontale	29
2.7.2 Individuazione dei punti di interesse per le misure	31
Capitolo 3 - Risultati	34
3.1 Considerazioni principali sulle capacità del sensore	34

3.2	Confronto con le misure del profilometro e della CMM.....	37
3.3	Ripetibilità delle misure	41
Capitolo 4 - Considerazioni su errori di misura attuali e possibili		48
4.1	Analisi dell'errore di coassialità tra sonda e componente	48
4.2	Errore di ostacolo alla ricezione	51
Capitolo 5 - Conclusioni.....		54
5.1	Considerazioni finali	54
5.2	Possibili miglioramenti.....	55

Elenco delle figure

Figura 1.1 - Disegno 3D del componente: intero e sezione	2
Figura 1.2 – Disegno tecnico sezione e relativi dettagli.....	3
Figura 2.1 – Sensore interferometrico CHRocodile 2 IT 1300	13
Figura 2.2 - Disegno tecnico della sonda	15
Figura 2.3 - Componente campione in misurazione.....	17
Figura 2.4 – Misure con profilometro su pezzo campione	18
Figura 2.5 – Sezione trasversale in misurazione	20
Figura 2.6 - Confronto del profilo con la relativa qualità di ricezione	22
Figura 2.7 – Macro-imperfezione lato fine.....	24
Figura 2.8 – Micro-imperfezioni lato fine	25
Figura 2.9 – Profilo lato grande.....	26
Figura 2.10 – Profilo semplificato successivo all’individuazione dei punti di interesse	33
Figura 3.1 - Zone non campionate nella parte inferiore di un gradino.....	36
Figura 3.2 - Grafici di confronto tra misure profilometro e sensore	38
Figura 3.3 - Grafico di confronto tra misure CMM e sensore.....	40
Figura 3.4 - Distribuzione distanze radiali relative al diametro Ø15,5 mm.....	42
Figura 3.5 - Studio CgCgk di una misura assiale	45
Figura 3.6 - Studio CgCgk di una misura radiale	46
Figura 4.1 – Confronto misure radiali con disallineamento in Y su diversi diametri	49
Figura 4.2 – Errore di ostacolo alla ricezione.....	52

Elenco delle tabelle

Tabella 2.1 - Estratto scheda tecnica	14
Tabella 2.2 - Estratto scheda tecnica	21
Tabella 3.1 - Incertezze estese del confronto con profilometro e CMM.....	40
Tabella 3.2 - Parametri statistici delle misure	43

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Scopo della tesi

La presente tesi descrive lo studio effettuato sulle misure eseguite mediante il sensore interferometrico a punto Precitec CHRocodile 2 IT 1300, con l'ausilio di una particolare sonda ancora in fase di prototipazione, su un componente metallico tornito prodotto dalla Zannini S.p.a. di Castelfidardo (AN). Queste sono state effettuate in un banco di prova dell'azienda produttrice del sensore: Precitec Optronik GmbH, nella sede principale tedesca, su commissione dell'azienda Zannini stessa.

Lo scopo è quello di verificare le potenzialità dello strumento nell'acquisizione di profili geometrici complessi in condizioni di ridotta accessibilità. Il tutto deve essere eseguito in maniera completamente automatica, nell'ottica di implementazione dello strumento in una stazione di misura automatizzata.

Lo studio è stato condotto principalmente mediante uno script appositamente realizzato, scritto in linguaggio di programmazione Python, con l'impiego di alcune note librerie utilitarie. La validazione del sensore avverrà sia da un punto di vista di ripetibilità delle misure, che da quello di confronto con le misure effettuate sui medesimi componenti mediante il profilometro meccanico e la macchina di misura a coordinate (CMM) del controllo qualità Zannini.

1.2 Descrizione delle specifiche condizioni di misura

Il componente analizzato rappresenta il caso di studio che ha messo in moto l'estesa ricerca, da parte del comitato tecnico Zannini, di uno strumento che fosse in grado di svolgere le funzioni che saranno descritte in questo capitolo. Tuttavia, l'interesse dell'azienda nel presente progetto ricade ben oltre la misurazione del singolo componente qui analizzato. Infatti, molti pezzi nell'ambito della torneria di precisione presentano lavorazioni difficilmente accessibili da parte di molti strumenti di misura, a maggior ragione se completamente automatici.

Le misure del componente oggetto di analisi, per le quali si è svolta la ricerca di un appropriato strumento di misura automatico, sono di due tipologie: lunghezze assiali e diametri, entrambe appartenenti a lavorazioni interne. Di seguito viene riportato il disegno 3D del componente, sia dell'intero che della sezione assiale. La regione di interesse, contenente le lavorazioni appena citate, è quella visibile nella metà sinistra della sezione. Le quote di ingombro del componente sono: lunghezza 76 mm, diametro esterno massimo 32 mm.

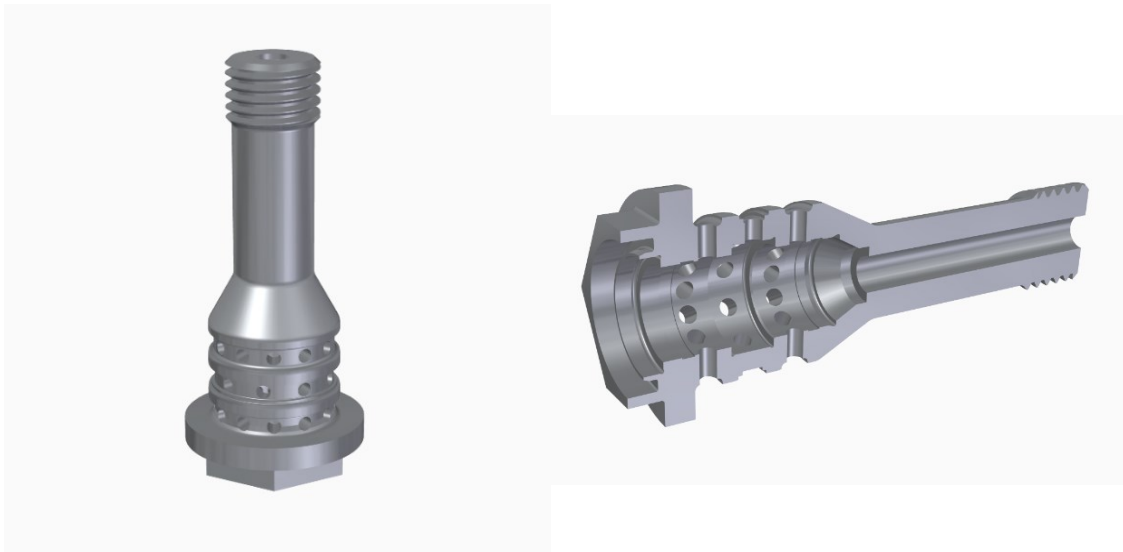


Figura 1.1 - Disegno 3D del componente: intero e sezione

Viene ora riportato il disegno tecnico della sezione di tale regione con due relativi dettagli di interesse. Le misure che verranno effettuare sono evidenziate.

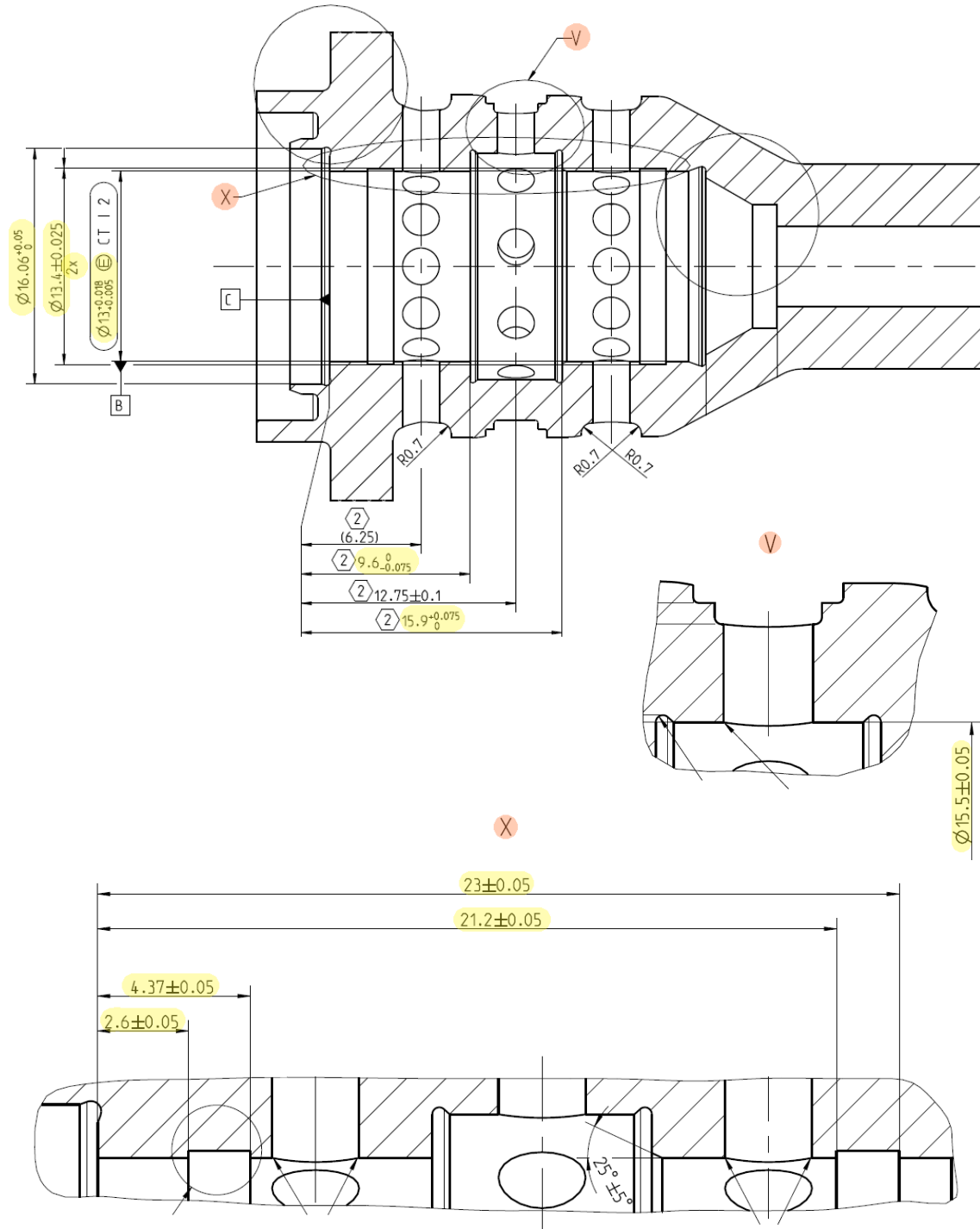


Figura 1.2 – Disegno tecnico sezione e relativi dettagli

Un aspetto importante da sottolineare è come queste lavorazioni siano fisicamente raggiungibili dall'esterno solamente mediante un foro di diametro $\varnothing 13$ mm, come è osservabile dal disegno. Questa condizione di ridotta accessibilità comporta un'elevata difficoltà nell'effettuare misure per molti strumenti.

L'idea alla base della ricerca è stata quella di individuare uno strumento il cui funzionamento assomigliasse a quello di un profilometro. In questo modo sarà possibile estrapolare dal profilo le lunghezze assiali richieste e le differenze di raggi relative ai cambi di diametro.

L'utilizzo di un effettivo profilometro meccanico è stato escluso da subito data l'inevitabile lentezza che ne caratterizza le rilevazioni di profili e soprattutto l'inadeguatezza nell'operare in tali condizioni, aggravate maggiormente dall'inclinazione che occorrerebbe applicare al componente per un ottimale utilizzo dello strumento. In particolare, le condizioni di ridotta accessibilità hanno portato, dopo una rapida analisi, ad escludere tutti i possibili strumenti di misura a contatto, in favore di strumenti di misura senza contatto.

I profilometri laser, per la scansione di profili 2D o 3D, sono una tecnologia già affermata e in rapido miglioramento. Il problema che, però, accomuna questi strumenti, per quanto riguarda un loro utilizzo nell'applicazione di interesse, è legato alle dimensioni. Infatti, anche considerando i modelli più compatti, questi non sono assolutamente ideati per lavorare all'interno di una zona ristretta come quella in esame. Un riferimento per questa categoria di strumenti può essere dato dalla Serie LJ-X8000 di Keyence [1]. Non esistendo ad oggi disponibile in commercio un profilometro laser di tali dimensioni contenute, l'unica alternativa è quella di individuare uno strumento di misura ottico che, invece, rispetti questi vincoli dimensionali e valutare le prestazioni di un suo utilizzo indiretto come profilometro, ovviamente assistito da un idoneo sistema di movimentazione.

L'unico strumento a contatto che fa eccezione a quanto detto, il quale è stato tenuto marginalmente in considerazione, è la CMM: tecnologia già implementata in passato dall'azienda in particolari stazioni di misura automatiche e utilizzata quotidianamente per gli ordinari controlli qualità. Seppur questo strumento possieda un'elevata precisione, è però altrettanto vero che i medio-elevati tempi necessari per svolgere le misurazioni lo rendono fortemente inadatto ad essere utilizzato in un'isola automatica che presenti numerose stazioni di misura, come è il caso di quella che sarebbe necessaria per il componente in questione e che rappresenta in generale il caso più comune. Inoltre, effettuare misure di lunghezze assiali e diametrali comporta necessariamente l'utilizzo di tastatori differenti, incrementando ulteriormente i tempi di misura. Per questo motivo, la CMM è stata considerata come una pura alternativa secondaria, al più plausibile nel caso in cui si riesca a trovare uno strumento ottico che permetta di effettuare solo una delle due tipologie di misure necessarie, lasciando l'altra a questo strumento.

1.3 Possibili strumenti adatti analizzati

Tenuto conto delle considerazioni elencate finora, le uniche tipologie di strumenti di misura scaturite dalla ricerca sono: sensori interferometrici a punto, sensori cromatici confocali e sonde boroscopiche.

Per iniziare, si descrive brevemente quest'ultima alternativa. Una sonda boroscopica è costituita da una fotocamera a 360° con illuminatore, ideata appositamente per rilevazioni interne. In particolare, la sonda presa in considerazione è la OptoEngineering PCBPN013-WG [2]. Questa ha un diametro esterno di 7 mm, quindi è utilizzabile per il componente in analisi. L'idea per la possibile implementazione di tale strumento vede l'utilizzo combinato di un asse

mobile controllato, per la sua movimentazione, e l'impiego di un software di misura su immagini, come ad esempio Merlic o Halcon, prodotti MVTec [3] già utilizzati dall'azienda, che possa campionare le coordinate assiali, fornite dall'asse mobile, in corrispondenza dei cambi di diametro delle lavorazioni interne. In questo modo si otterrebbero le misure assiali di interesse mentre è ovviamente impossibile, con una tale tecnologia, effettuare qualunque misura radiale di profondità, ovvero ottenere misure assolute di diametri interni o una loro differenza. Tale carenza, seppur fortemente sgradita, potrebbe eventualmente essere compensata, come già accennato, dall'aggiuntivo utilizzo di una CMM, con elevato incremento dei tempi di misurazione e dei costi. Oltre a questo, il motivo principale che ha portato all'esclusione dello strumento dalle opzioni plausibili per l'applicazione richiesta, è la distorsione sferica che caratterizza le immagini a 360° da esso acquisite. Infatti, qualora la sezione trasversale in corrispondenza di un cambio di diametro non coincida perfettamente con la sezione trasversale mediana della fotocamera durante la campionatura dell'immagine, si otterrebbe una distorsione della coordinata assiale che la caratterizza, difficilmente compensabile con un algoritmo matematico.

Per quanto riguarda i sensori cromatici confocali, questi risultano essere precisi e adatti in termini di dimensioni per operare nelle condizioni di ridotta accessibilità richieste. Uno studio relativo a tali sensori è già stato svolto in passato dall'azienda Zannini in collaborazione con l'Università Politecnica delle Marche e altre aziende [4]. In particolare, il sensore cromatico confocale utilizzato è il Micro-Epsilon IFS 2402/90-10. L'esito finale dello studio portò ad escludere l'utilizzo del sensore per problemi di compensazione termica che inducevano degli errori non controllabili nelle misure.

L'unica opzione ad oggi rimasta, secondo le ricerche effettuate, risiede nell'utilizzo di un sensore interferometrico a punto. Questa tipologia di sensori è ampiamente diffusa e affermata, sia per singole misure puntuali di distanza che per l'ottenimento di profili bidimensionali effettuando misure in linea, mediante traslazione del sensore o del componente. Infatti, l'elevata frequenza di campionamento e la ridotta risoluzione laterale, garantiscono l'acquisizione di profili molto dettagliati in modo estremamente rapido. In generale, però, anche tale tipologia di strumenti risulta inadeguata per l'applicazione designata a causa, ancora una volta, delle dimensioni eccessive. L'elemento fondamentale che ha portato a considerare questa categoria di sensori, nello specifico quelli realizzati dall'azienda Precitec, è la possibilità di utilizzare tali strumenti con l'ausilio di una vasta gamma di sonde appositamente sviluppate. Tali sonde sono connesse al sensore mediante un supporto che prende il nome di "reference box", posto a valle delle lenti di uscita del fascio luminoso. All'interno delle sonde è presente un sistema di specchi che permettono, a seconda del modello, una particolare curvatura del fascio luminoso. Tra queste, è stata individuata una sonda, ancora in fase di prototipazione e non disponibile sul mercato, che permettesse una curvatura a 90° del raggio e con dimensioni adeguate ad operare nella zona di ridotta accessibilità interessata. In realtà, le sue dimensioni, approfondite nel capitolo 2.1, risultano sorprendentemente inferiori a quanto necessario, aprendo la strada all'utilizzo del sensore con tale sonda in condizioni di accessibilità ancora più critiche.

Utilizzare una sonda che curvi il fascio luminoso significa, inevitabilmente, incrementare la risoluzione assiale e soprattutto laterale del sensore. Infatti, quest'ultima è definita principalmente dal diametro del fascio luminoso: aggiungere superfici di riflessione non può che aumentare la diffusione del raggio, incrementandone il diametro e, quindi, aumentando la risoluzione laterale dello

strumento. Anche la risoluzione assiale subirà degli incrementi ma questi risultano meno significativi essendo tale risoluzione intrinsecamente molto inferiore rispetto a quella laterale, in accordo con il fatto che l'utilizzo primario del sensore si limita alla misurazione di distanze lungo la direzione del fascio luminoso. L'aumento della risoluzione laterale si ripercuote sull'incertezza delle misure di distanze lungo un piano perpendicolare al fascio luminoso, ovvero le distanze assiali del componente. Infatti, per queste misure si ha in realtà un utilizzo del sensore in maniera indiretta: mediante successive misurazioni di distanza lungo la direzione del fascio luminoso si possono determinare i punti del profilo in cui sono presenti variazioni di altezza, quindi gli estremi di un'eventuale misura assiale del componente, ma la risoluzione effettiva che caratterizza tale misura dipende dalla risoluzione laterale del sensore. Insieme a questa occorre poi considerare la risoluzione spaziale dell'encoder che gestisce il movimento dell'asse mobile su cui è posizionata la sonda e gli errori di ricezione del sensore in corrispondenza dei cambi di diametro, problematica ampiamente discussa nel capitolo 4.2. Nell'analisi dei dati, scaturiti dalle misure di prova, verrà pertanto posta particolare attenzione sull'incertezza che caratterizza le misure assiali del componente, per la quale ci si aspetta un valore molto maggiore rispetto alle incertezze relative alle misure radiali.

1.4 Attuali modalità di misurazione del componente

Vengono ora descritte le modalità attualmente utilizzate all'interno dell'azienda Zannini per effettuare il controllo al 100% della maggior parte delle misure del componente. Seppur la conoscenza di queste non sia importante in modo diretto ai fini dello studio, si vuole mettere in evidenza come l'analisi di determinate lavorazioni in condizioni di ridotta accessibilità costituisca un ostacolo per la

realizzazione di un controllo automatico, che si traduce nella necessità di impiegare personale in un compito altamente ripetitivo ma in cui una singola distrazione può compromettere l'intero lavoro. Da qui l'enorme necessità di individuare uno strumento consono ad effettuare tali misure, che sia inoltre conforme con le caratteristiche che uno strumento implementabile in una stazione automatizzata deve soddisfare. Nel seguente capitolo verranno descritte le più importanti tra queste caratteristiche e verranno motivate le ragioni di un controllo sul 100% dei pezzi per alcuni determinati prodotti, il quale viene eseguito, nella quasi totalità dei casi, in maniera completamente automatica.

Il controllo del componente viene attualmente effettuato dall'azienda in maniera manuale, seppur con l'impiego di un micrometro ottico che permette di misurare tutte le dimensioni esterne in un'unica scansione, semplificando di molto il lavoro. Il problema principale si pone in corrispondenza delle misure delle lavorazioni interne precedentemente citate. Infatti, per queste l'azienda non possiede ad oggi un'opzione tecnologica che ne permetta una misurazione automatica, motivo della mancata realizzazione di un'isola automatizzata dedicata al controllo del componente. Le misure delle lunghezze assiali relative a tali lavorazioni vengono attualmente effettuate a mano, mediante un comparatore con punta a 90°, la quale permette di rilevare le altezze dei diversi cambi di diametro interni al componente, con ovvie difficoltà per l'operatore che deve movimentare l'estremità dello strumento in una zona dove non ha di fatto visibilità per via del ridotto diametro Ø13 mm di accesso. Le misure diametrali interne, invece, sono effettuate sempre manualmente mediante un comparatore a bracci, ad eccezione del diametro Ø13 mm che, essendo il minore e quello caratterizzato dalla tolleranza più stretta, è l'unico misurato mediante un alesometro a sfere.

1.5 Controllo automatico

In ogni settore di industria il controllo qualità è divenuto importante tanto quanto la produzione. In passato, nell'ambito della produzione meccanica di massa, si poteva sentir parlare di PPM: Parts Per Million, riferendosi al numero di campioni difettosi ammessi per ogni milione di unità prodotte. Per avere un riferimento, una buona produzione poteva vantare tale parametro compreso tra 30 e 50 circa. Oggigiorno vengono sempre meno utilizzati dei simili indicatori e la produzione deve, nella maggior parte dei casi, essere garantita al 100%, senza eccezioni.

Trattandosi quindi di un settore industriale a tutti gli effetti, il controllo qualità ha subito una forte automazione già dalla terza rivoluzione industriale, con l'impiego di computer, robot e strumenti di misura digitali. L'avvento dell'industria 4.0, oltre ad un'automazione più profonda, ha portato con sé l'interconnessione tra gli elementi di automazione, mediante l'utilizzo, la manipolazione e l'immagazzinamento di dati [5]. Maggiore è la complessità di un componente meccanico e più strumenti dovranno collaborare tra loro per garantire un corretto e completo controllo. La soluzione che viene solitamente utilizzata è quella di progettare un'isola di controllo automatico, ovvero un ambiente di lavoro quanto più compatto possibile, che comprenda tutti gli strumenti necessari per effettuare le misure e per elaborare i dati da esse scaturiti. All'interno dell'isola il componente viene movimentato in maniera automatizzata attraverso successive stazioni di controllo, solitamente mediante un sistema di posizionamento rotante. Ciascuna stazione ospita in genere un solo strumento di misura. Le operazioni di immissione ed estrazione del componente dall'isola possono essere effettuate a mano da un operatore o più comunemente da un braccio antropomorfo che fa parte dell'isola stessa.

Gli strumenti di misura utilizzati in questi sistemi devono possedere caratteristiche ben definite e sono pertanto appositamente scelti o realizzati. Alcune delle caratteristiche fondamentali richieste sono:

- ingombro ridotto: una caratteristica richiesta alle isole automatizzate è sicuramente la compattezza, la quale permette a queste strutture di essere facilmente trasportate e ubicate all'interno delle aziende. Il vincolo principale a cui le dimensioni di ingombro minimo devono sottostare è quello imposto dai singoli ingombri degli strumenti, i quali devono pertanto essere più compatti possibile, senza ovviamente che questo determini una carenza nelle prestazioni;
- rapidità: data la struttura, precedentemente descritta, di controllo successivo basato su stazioni in serie che lavorano contemporaneamente, il tempo ciclo è sostanzialmente dettato dallo strumento di misura più lento, determinando un certo tempo di inutilizzo degli altri strumenti prima dell'avanzamento alla stazione successiva. Questo rende la rapidità degli strumenti utilizzati una caratteristica fondamentale;
- output digitale di qualità: oggi quasi tutti gli strumenti di misura risultano essere digitali e dotati, oltre che di un'interfaccia per la lettura istantanea della misura da parte dell'operatore, di un'uscita che permetta la comunicazione di questa ad un computer o ad una scheda apposita. Questa comunicazione è essenziale per il funzionamento dell'isola automatizzata e deve pertanto essere istantanea e affidabile. Risultano inoltre poco adatti strumenti con un output digitale di tipo puramente booleano, ovvero che esprimano il solo esito della misura rispetto alle tolleranze date, con un semplice output di 0 o 1. Sono da preferire strumenti che, assieme

all'informazione di esito, forniscano i valori completi relativi alla misura effettuata e che quindi permettano di evidenziare i motivi di un eventuale esito negativo;

- assenza di blocchi strumento: molti degli strumenti di misura utilizzati in queste applicazioni richiedono necessariamente un contatto con il componente in misurazione. Dato che la movimentazione di questi strumenti è completamente automatizzata, ad ogni contatto è associato un potenziale rischio di rottura o di incastro dello strumento, specialmente se presenti difetti di lavorazione sui pezzi da misurare. Tali rischi vengono calcolati in fase di progettazione e gli strumenti di misura scelti devono essere tali da impedire quanto più possibile blocchi o rotture nel caso in cui essi si verificano. Inoltre, questi rischi sono pressoché nulli utilizzando uno strumento di misura senza contatto.

I moderni strumenti di misura senza contatto, prevalentemente ottici, soddisfano, in genere, le caratteristiche appena elencate. Questa tecnologia porta con sé enormi vantaggi, tra cui: svincolarsi dalle dimensioni fisiche del componente misurato, possibilità di rilevazioni su corpi in movimento, nessuna interferenza sulla misura dovuta al contatto e maggior potenzialità di automazione del processo di misura.

Capitolo 2

Materiali e metodi

2.1 Descrizione del sensore

Il sensore interferometrico a punto soggetto dello studio è il CHRocodile 2 IT 1300, di cui viene riportata un'immagine e un estratto della scheda tecnica contenente le informazioni più rilevanti. In particolare, tutte le informazioni elencate sono comuni alla famiglia di sensori CHRocodile 2 IT, mentre i diversi modelli possiedono un range di misura in aria differente. La scelta è ricaduta sul modello 1300 in quanto capace di misurare la massima distanza radiale di interesse, pari a 8030 μm .

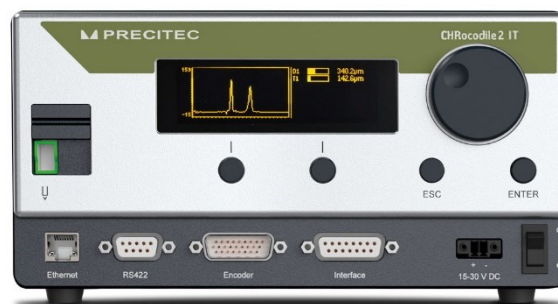


Figura 2.1 – Sensore interferometrico CHRocodile 2 IT 1300

Frequenza massima	70 kHz
Range di misura in aria	114 - 10500 μm
Risoluzione assiale	31,5 nm
Risoluzione laterale	14,0 μm
Tecnologia	Interferometrica
Interfaccia utilizzata	Ethernet
Sorgente luminosa	SLD Red
Dimensioni	220 mm x 110 mm x 127 mm
Peso	2 kg

Tabella 2.1 - Estratto scheda tecnica

Come è possibile notare, la frequenza di campionamento massima del sensore è molto elevata e questo permette, se necessario, una scansione estremamente rapida, a discapito di una piccola perdita di precisione dovuta all'elevata dinamicità delle misure. Nell'analisi effettuata si è scelta una velocità ridotta per l'asse automatico di movimento, pari a 7 mm/s, che permette di scansionare il profilo di interesse, avente un'estensione approssimata di 55 mm, in 7,8 secondi. Per fare un esempio di caso limite verso il quale ci si potrebbe spingere con questo sensore, misurare il profilo appena indicato con un punto di campionatura ogni 1 μm , raggiungendo la massima velocità longitudinale che lo permetta in accordo con la massima frequenza del sensore, ovvero 70 mm/s, richiederebbe solamente 0,78 secondi.

La risoluzione laterale, relativa non al solo sensore ma all'utilizzo combinato con la sonda, risulta largamente superiore rispetto a quella assiale. Questo aspetto, su cui si è già posto l'accento in fase introduttiva, determina la criticità dell'utilizzo

del sensore come profilometro. Per determinare questa risoluzione, il test standard effettuato dal team Precitec è stato quello di misurare il cambiamento di intensità del fascio di luce di ritorno, passando da una superficie altamente riflettente, in argento, ad una poco riflettente, in vetro opaco, alla stessa quota. Il valore della risoluzione laterale è dato dalla distanza percorsa a partire dal 95% di intensità (in cui si può considerare tutto il raggio sulla superficie riflettente) al 5% (in cui si può considerare tutto il raggio sul vetro opaco).

Il sensore è collegato alla reference box mediante un cavo di fibra ottica. Questa consente di alloggiare una tra le sonde Precitec disponibili, ideate per permettere varie applicazioni. Come già espresso, la particolare sonda utilizzata è attualmente in fase di prototipazione e non è ancora disponibile sul mercato. Ne viene comunque riportato il codice prodotto: 5006420. Questa consente la curvatura del fascio luminoso di 90° e risulta adatta ad operare nella zona interna del componente.

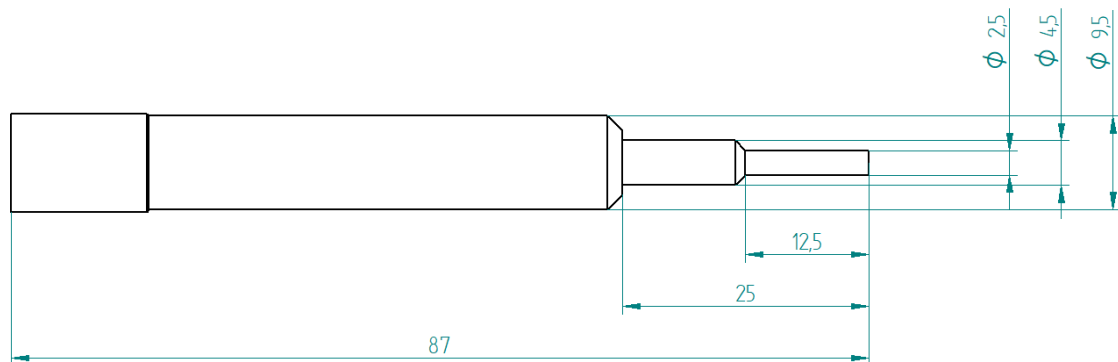


Figura 2.2 - Disegno tecnico della sonda

Come già accennato, le dimensioni diametrali della sonda sono in realtà molto inferiori rispetto al diametro Ø13 mm di accesso alla zona di interesse. Rassicurati però dal team Precitec per quanto riguarda l'assenza di un ulteriore incremento della risoluzione laterale in funzione delle dimensioni della sonda scelta, in quanto

tale incremento è puramente dipendente dalla necessaria curvatura di 90°, si è optato per la sonda con diametro più contenuto possibile. Questo ha permesso anche l'accesso all'altro lato del componente, attraverso un foro di diametro Ø5,5 mm, e la possibilità di effettuare, in tale zona, un'ulteriore prova che riguarda l'uso del sensore come rugosimetro, approfondito nel capitolo 2.5. Inoltre, tali dimensioni permettono di assicurare una maggiore flessibilità di impiego della sonda su componenti diversi in futuro anche per l'applicazione principale studiata.

2.2 Descrizione del setup di misura

Il setup di misura utilizzato e che verrà descritto in questo capitolo, è stato allestito dal team Precitec addetto, nei laboratori della sede principale dell'azienda, in Germania.

La reference box, la quale connette il sensore alla sonda, è stata montata su un sistema a due assi mobili, il quale consente lo spostamento bidimensionale nel piano orizzontale. Il movimento di tali assi è gestito dagli encoder della macchina. Il posizionamento verticale, invece, il quale non necessita di variazioni dinamiche, può essere eseguito manualmente mediante regolazione del morsetto nell'apposita asta graduata verticale collegata al sistema mobile.

Il componente è stato bloccato su una morsa fissata ad un piano di riscontro in granito. La lavorazione esagonale esterna, presente all'estremità di accesso alla zona di interesse del componente, ha facilitato la riproduzione del fissaggio adoperato nella morsa del profilometro, il che consentirà un confronto più veritiero delle misure effettuate. In realtà, mentre la morsa del profilometro è parte dello strumento, cosa che permette un centraggio trasversale assoluto, la morsa utilizzata in questo setup non possiede nessun riferimento rispetto all'asse mobile. Per tale

motivo, il centraggio trasversale è stato effettuato mediante una scansione trasversale del componente, al fine di individuare il punto minimo della sezione, al quale corrisponderà il centro. Quello del centraggio del componente e degli errori ad esso associati è un problema che verrà ripreso nel capitolo 4.1. L'eventuale inclinazione dell'asse del componente rispetto al piano di misura orizzontale non costituisce un problema in quanto verrà poi compensata matematicamente nello script di misura.

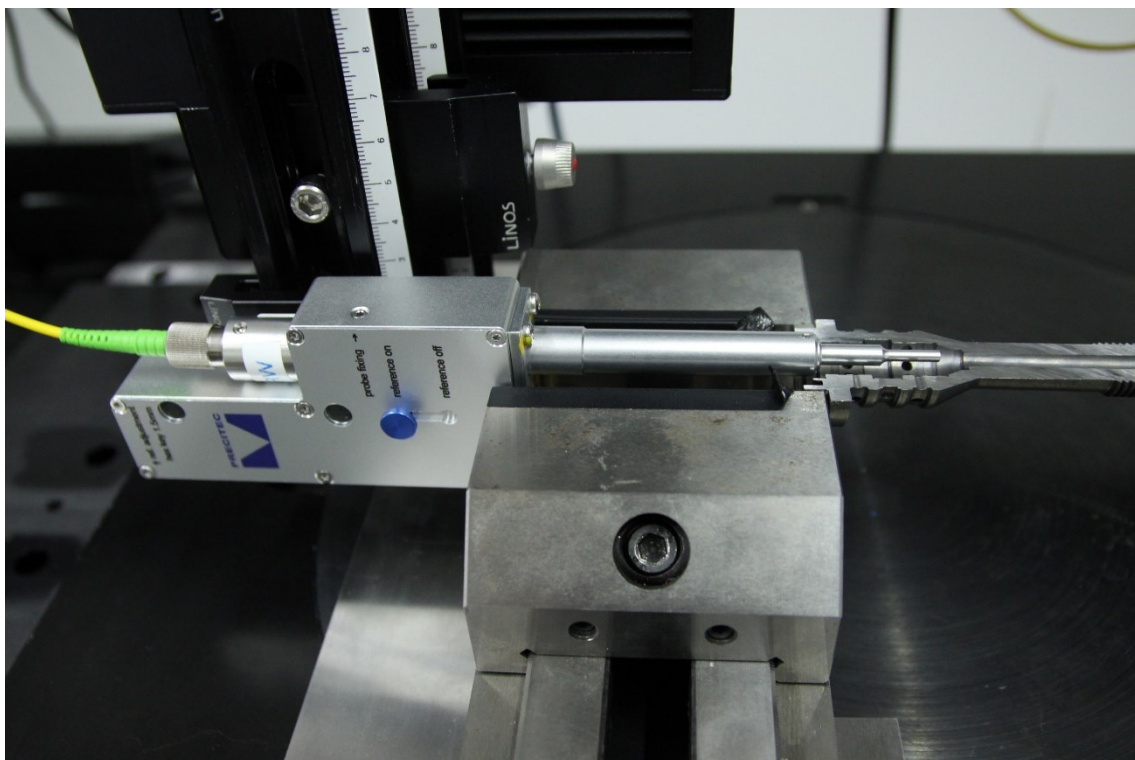


Figura 2.3 - Componente campione in misurazione

2.3 Misure con profilometro e CMM

Come anticipato in fase introduttiva, i componenti campione, in numero pari a 5, sono stati misurati con il profilometro meccanico e la CMM del controllo qualità Zannini, per poi essere inviati al team Precitec competente allo scopo di essere

misurati con il sensore in analisi. In particolare, questi sono stati, nell'ordine, numerati, misurati con la CMM per ottenere i diametri interni ed in seguito tagliati a metà per poter permettere l'acquisizione delle misure assiali con il profilometro.

- CMM utilizzata: Mitutoyo Crysta Apex S574;
- profilometro utilizzato: Mitutoyo CV-3200.

La seguente figura mostra il risultato della misura effettuata mediante il profilometro su uno dei cinque pezzi campione. Dato l'utilizzo del sensore interferometrico come profilometro, ci si aspetta un simile risultato a seguito dell'elaborazione dei dati mediante lo script.

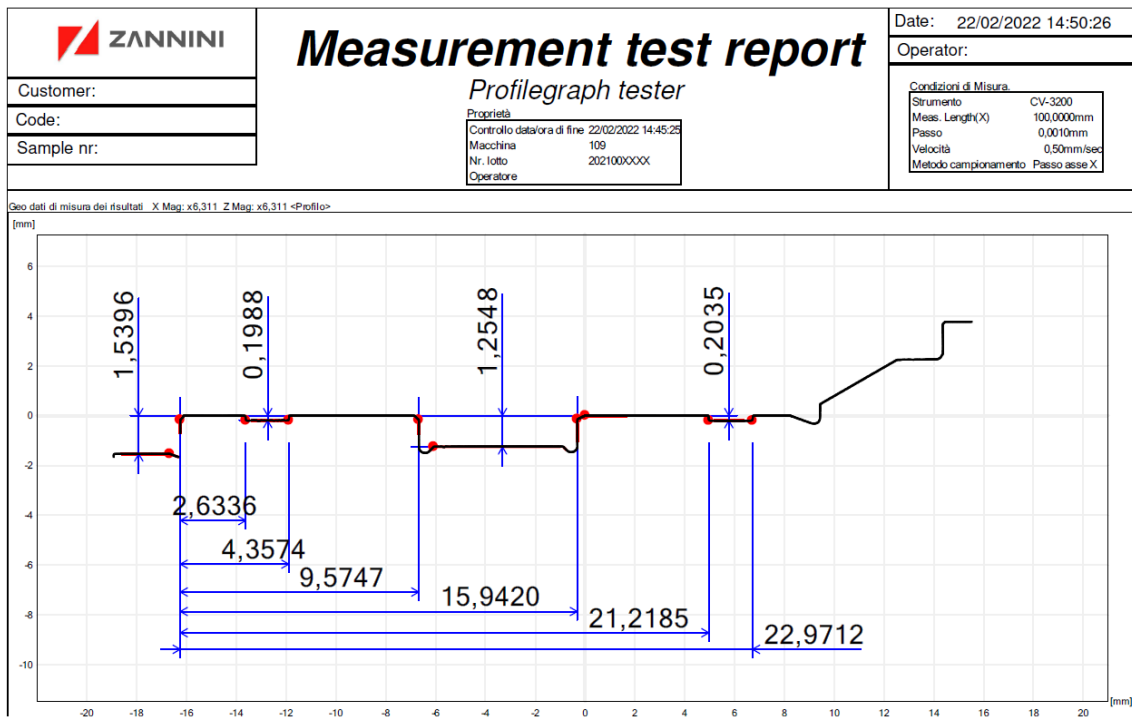


Figura 2.4 – Misure con profilometro su pezzo campione

2.4 Richieste espresse per le misure da effettuare

Le richieste espresse nei confronti del team Precitec addetto per le misure in analisi sono state le seguenti:

- passo di campionatura assiale di $0,5\ \mu\text{m}$: valore ritenuto più che sufficiente dal confronto con la risoluzione laterale dello strumento, pari a $14\ \mu\text{m}$;
- scansionare 3 volte uno stesso profilo, senza movimenti trasversali, per 4 dei componenti misurati. Queste saranno utilizzate per effettuare il confronto tra le misure del sensore e quelle eseguite internamente dall'azienda. Avere a disposizione più misure dello stesso profilo permette di assicurarsi che queste non siano affette da errori accidentali;
- scansionare 50 profili paralleli, distanziati di $1\ \mu\text{m}$ ciascuno, per un determinato componente specificato. I valori medi di questi profili verranno utilizzati allo stesso scopo di confronto tra misure precedentemente esposto, mentre saranno tutti utilizzati per ottenere le misure utili allo studio di ripetibilità. Il motivo della richiesta di spostamento trasversale è legato alla volontà di verificare l'errore indotto nelle misure radiali in corrispondenza di un non perfetto allineamento della sonda al componente: situazione che potrebbe verificarsi nella stazione di controllo automatico. Questo aspetto viene ripreso nel capitolo 4.1, dove sono inoltre riportati i calcoli teorici relativi all'errore che uno disallineamento trasversale contenuto all'interno di $0,1\ \text{mm}$ produrrebbe. I profili paralleli scansionati andranno a comporre una topografia 3D di una piccola porzione centrale di superficie interna. Da questa è possibile ricavare il profilo in corrispondenza del minimo della superficie,

corrispondente all'ipotetico profilo ideale da analizzare per non costituire alcuna fonte di errore nelle misure radiali.

Per completezza e dato che le ridotte dimensioni della sonda lo hanno permesso, il componente è stato misurato, internamente, da entrambi i lati, nonostante l'interesse dello studio rimanga focalizzato sulle lavorazioni della metà interna descritta, che da ora verrà indicata come lato grande, mentre l'altra come lato fine. Non è stato possibile ottenere un profilo interno unico a causa della minore lunghezza della sonda rispetto a quella del componente, pertanto sono state effettuate due misurazioni distinte.

Una volta eseguite le misure, il team Precitec ha provveduto ad inviare all'azienda i relativi dati. Per ciascun lato di ogni componente sono state fornite due tabelle, relative a distanza misurata e qualità. Ciascuna tabella presenta tre colonne, le quali esprimono rispettivamente le direzioni X, Y, Z (o qualità di ricezione nella seconda tabella) ortogonali tra loro, riportate graficamente in figura e poi dettagliate.

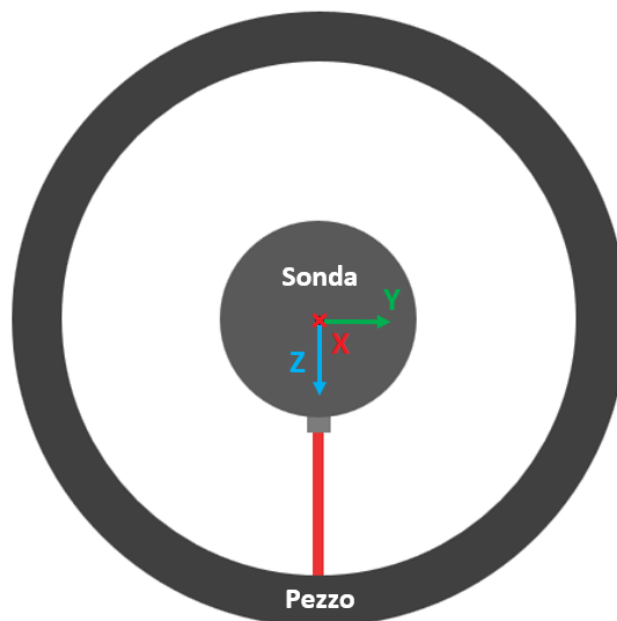


Figura 2.5 – Sezione trasversale in misurazione

- direzione X: direzione di moto della sonda durante la misurazione, coincidente con la direzione assiale del componente. Corsa di 55 mm nel lato grande e 23 mm nel lato fine, con passo di campionatura di 0,5 μm , gestito dall'encoder incrementale dell'asse mobile;
- direzione Z / qualità di ricezione: direzione della distanza misurata o la sua qualità, a seconda della tabella;
- direzione Y: direzione trasversale perpendicolare a Z, in cui sono stati effettuati gli spostamenti di 1 μm per i 50 profili paralleli.

X	Y	Z	X	Y	Quality
0,000000	0,000000	0,751322	0.00000	0.00000	0.1219415
0,000500	0,000000	0,747547	0.00050	0.00000	0.2303221
0,001000	0,000000	0,747640	0.00100	0.00000	0.2710310
0,001500	0,000000	0,747568	0.00150	0.00000	0.2630472
0,002000	0,000000	0,747691	0.00200	0.00000	0.2529323
0,002500	0,000000	0,747696	0.00250	0.00000	0.2437640
0,003000	0,000000	0,747692	0.00300	0.00000	0.2385907
0,003500	0,000000	0,747702	0.00350	0.00000	0.2301596
0,004000	0,000000	0,747674	0.00400	0.00000	0.2232299
0,004500	0,000000	0,747615	0.00450	0.00000	0.2155580
0,005000	0,000000	0,747582	0.00500	0.00000	0.2113770
0,005500	0,000000	0,747617	0.00550	0.00000	0.2020134
0,006000	0,000000	0,747607	0.00600	0.00000	0.1974375
0,006500	0,000000	0,747536	0.00650	0.00000	0.1898041
0,007000	0,000000	0,747606	0.00700	0.00000	0.1821127
0,007500	0,000000	0,747483	0.00750	0.00000	0.1723628
0,008000	0,000000	0,747436	0.00800	0.00000	0.1648633
0,008500	0,000000	0,747493	0.00850	0.00000	0.1588025
0,009000	0,000000	0,747587	0.00900	0.00000	0.1506120
0,009500	0,000000	0,747502	0.00950	0.00000	0.1427685
0,010000	0,000000	0,747629	0.01000	0.00000	0.1372644
0,010500	0,000000	0,747700	0.01050	0.00000	0.1258734
0,011000	0,000000	0,747791	0.01100	0.00000	0.1189422
0,011500	0,000000	0,747858	0.01150	0.00000	0.1104391
0,012000	0,000000	0,747802	0.01200	0.00000	0.1013774
0,012500	0,000000	0,747956	0.01250	0.00000	0.0931258
0,013000	0,000000	0,747896	0.01300	0.00000	0.0839465
0,013500	0,000000	*	0.01350	0.00000	0.0000000
0,014000	0,000000	*	0.01400	0.00000	0.0000000
0,014500	0,000000	*	0.01450	0.00000	0.0000000
0,015000	0,000000	*	0.01500	0.00000	0.0000000

Tabella 2.2 - Estratto scheda tecnica

Le misure effettuate mediante lo script si basano sui valori contenuti nella tabella della distanza misurata. La tabella della qualità esprime, invece, l'intensità del fascio luminoso al ricevitore, in ogni punto campionato, espressa con un valore compreso tra 0 e 1.

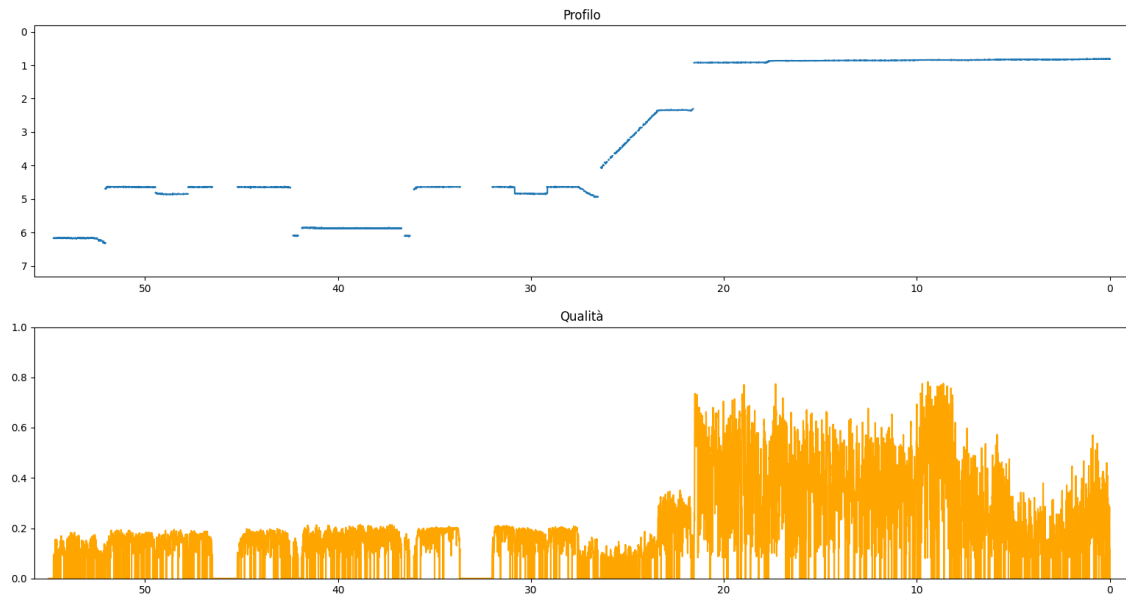


Figura 2.6 - Confronto del profilo con la relativa qualità di ricezione

Numerosi sono i punti con qualità di ricezione nulla, ovvero punti in cui il fascio luminoso riflesso dal pezzo non giunge al ricevitore, a cui corrisponde ovviamente una misura della distanza mancante ed indicata nella rispettiva tabella con un asterisco. Un altro aspetto che è possibile osservare dal precedente grafico è il miglioramento della qualità per i tratti più elevati, ovvero più vicini alla sonda del sensore in fase di campionatura.

2.5 Descrizione delle misure lato fine

L'ispezione all'interno del lato fine, eseguita per 23 mm fino circa al massimo inserimento possibile della sonda, riguarda di fatto un solo tratto cilindrico di diametro $\varnothing 5,5$ mm costante. Il sensore è stato utilizzato in questo caso come rugosimetro senza contatto, al fine di determinare l'entità di due micro e macro-imperfezioni consapevolmente concesse in fase di lavorazione per velocizzare la produzione e, ovviamente, congruenti con le specifiche di disegno, le quali vanno però costantemente monitorate.

La macro-imperfezione di lavorazione è facilmente visibile nella scansione del profilo. Questa è dovuta all'oscillazione della punta da foro, fatta avanzare con grande velocità e che presenta un'elevata snellezza data dal rapporto tra la considerevole lunghezza del foro e il suo diametro ridotto di 5,5 mm. L'imperfezione si ripete con uno schema periodico di lunghezza pari circa a 4,7 mm e può essere apprezzata qualitativamente anche a occhio nudo. La differenza tra i valori massimo e minimo rilevata all'interno del periodo è poco meno di 11 μm , ritenuta accettabile finché contenuta entro i 16 μm . Gli improvvisi salti di valori, che si notano distintamente rispetto all'andamento ondulatorio, e ancor più facilmente apprezzabili nella figura di dettaglio della micro-imperfezione che verrà mostrata in seguito, sono da attribuire ad una riflessione distorta del fascio luminoso in corrispondenza di irregolarità superficiali particolarmente acute.

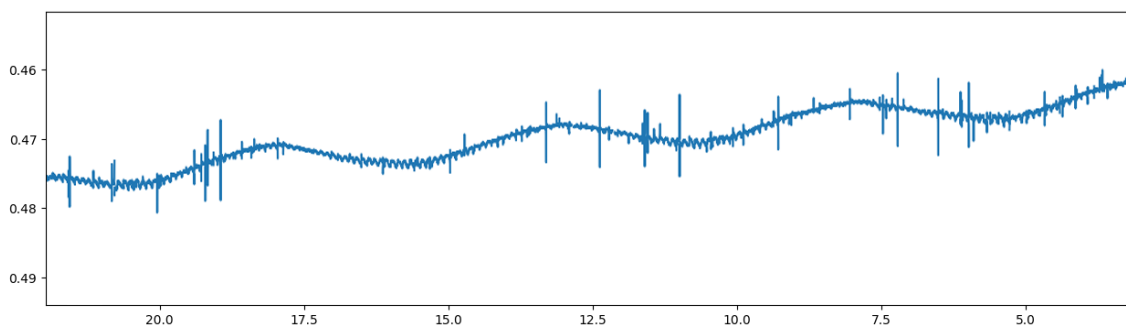


Figura 2.7 – Macro-imperfezione lato fine

Entrando ancor più nel dettaglio, è possibile osservare le micro-imperfezioni di lavorazione che caratterizzano il lato fine del componente, anch'esse dovute all'elevata velocità di avanzamento della punta. Queste sono apprezzabili al microscopio e si manifestano come una spirale di passo infinitesimo. Dal profilo misurato con il sensore interferometrico si ottiene la lunghezza del periodo con cui si ripetono, pari a $110\ \mu\text{m}$, con una differenza media dei valori massimo e minimo di $3\ \mu\text{m}$. Considerando l'entità della macro-ondulazione della superficie, comunque accettabile da specifiche di disegno, questo difetto è sicuramente secondario ma è in ogni caso necessario tenerlo sotto controllo. Inoltre, il corretto rilevamento di questo noto difetto microscopico mette in risalto le potenzialità del sensore in analisi.

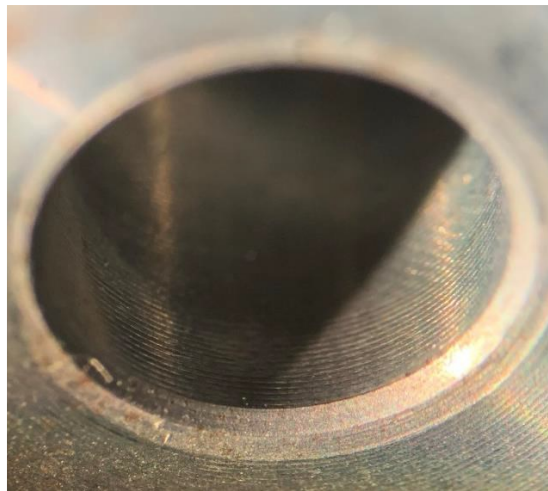
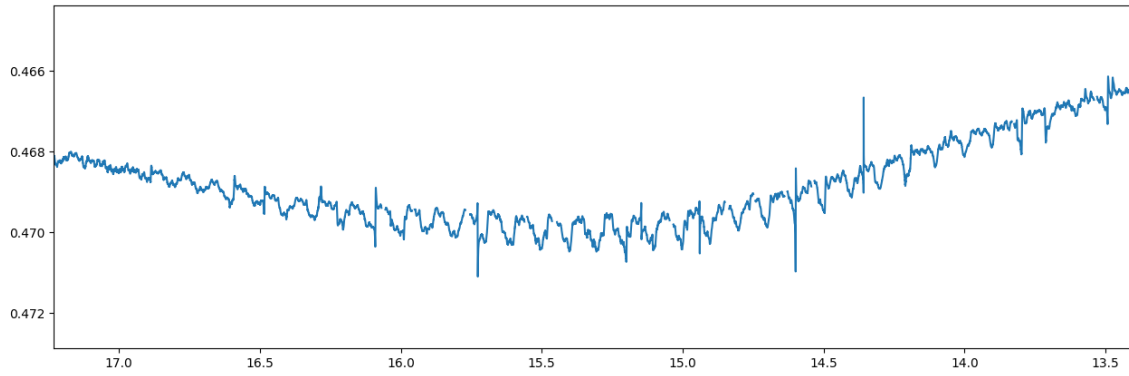


Figura 2.8 – Micro-imperfezioni lato fine

2.6 Descrizione delle misure lato grande

L'utilizzo prefissato per il sensore in analisi è quello di profilometro senza contatto, piuttosto che un uso come rugosimetro. Le misure di interesse per tale impiego, descritte in fase introduttiva, si trovano tutte nel lato grande del componente, il quale è stato esaminato per una lunghezza assiale di 55 mm. Segue un profilo bidimensionale del lato grande.

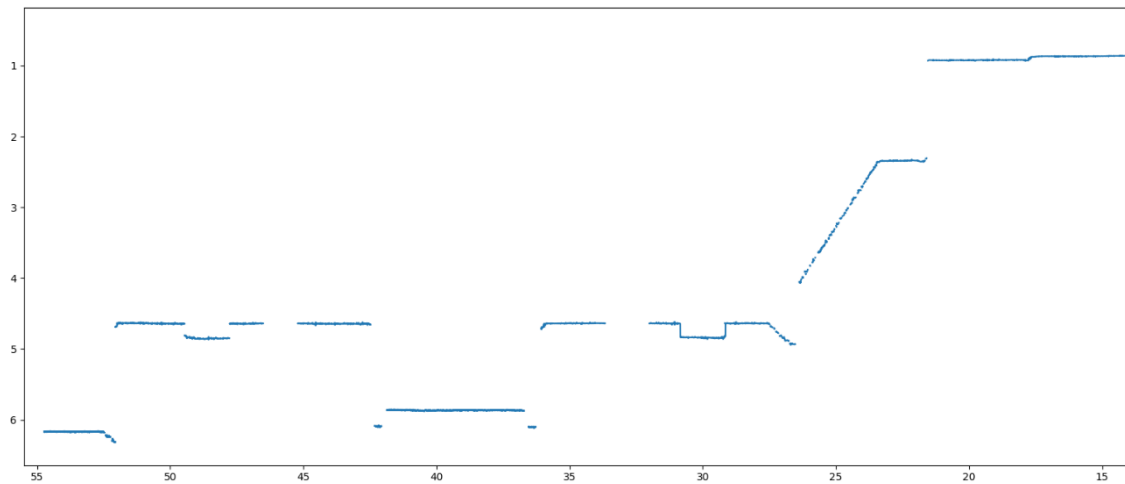


Figura 2.9 – Profilo lato grande

Come già introdotto, la misura diretta dei diametri risulta impossibile su un profilo bidimensionale. Pertanto, l'idea di utilizzo del sensore nella futura isola di controllo automatico vede, in ogni caso, la misurazione del diametro $\varnothing 13$ mm con un alesometro a sfere. Tale misura necessiterebbe comunque l'impiego di uno strumento meccanico data la strettissima tolleranza. Successivamente sarebbe possibile ottenere gli altri diametri sommando il doppio della rispettiva differenza di raggio da tale diametro, ottenuta dal profilo scansionato. Quello appena descritto non è sicuramente un metodo preferenziale per la misura di un diametro. Si ha infatti una misura relativa che vede la somma di più incertezze a partire da quella, seppur ridotta, del diametro $\varnothing 13$ mm, a cui si aggiunge il doppio dell'incertezza sulla differenza di raggi. Inoltre, l'unico riferimento che si ha per definire la misura del diametro di una generica sezione trasversale è il corrispondente punto presente nel profilo bidimensionale scansionato. Considerare un unico punto per definire un diametro determinerebbe un rischio troppo elevato di errori accidentali legati alla rugosità in corrispondenza del punto stesso, il che obbliga a considerare una media delle ordinate dei profili per tratti a diametro costante. Per campionare l'intero diametro di una sezione trasversale ed ottenerne così una misura più

veritiera occorrerebbe prevedere la rotazione completa del sensore o del componente, opzione per il momento non tenuta in considerazione.

2.7 Descrizioni dello script

Lo script Python, utilizzato per analizzare le misure, è stato realizzato prevalentemente in una sola classe, contenente tutte le funzioni necessarie. Oltre alla classe principale, sono state create due ulteriori classi oggetto, ciascuna delle quali necessaria ad immagazzinare informazioni sugli elementi primitivi essenziali per la misura, ovvero punti e segmenti. Senza scendere in aspetti tecnici della programmazione, verranno di seguito descritte le modalità e le principali funzioni con cui i dati sono stati elaborati. Il codice sorgente dello script è visionabile e scaricabile su GitHub [6].

Le librerie utilizzate nella creazione dello script sono:

- Numpy: probabilmente la libreria Python più conosciuta, necessaria per qualunque calcolo di carattere più scientifico rispetto alle operazioni di base. In questo caso, la libreria è stata utilizzata prevalentemente per operazioni con le matrici;
- Matplotlib: altra libreria Python largamente nota e utilizzata che comprende numerose funzioni per ottenere grafici, anche interattivi con possibilità di zoom, spostamenti e selezioni, a partire da dati in forma vettoriale o matriciale;
- Pandas: potente libreria che permette di trattare quantitativi ingenti di dati, ideata principalmente per applicazioni di machine learning ma utilizzabile in generale per l'analisi dati. Grazie all'ottimizzazione di questa libreria è

possibile eseguire agevolmente operazioni di selezione condizionata e di rimodellamento su enormi tabelle di dati che, altrimenti, richiederebbero tempi molto lunghi e rischierebbero, nella maggior parte dei casi, di fallire per l'esaurirsi della memoria RAM (out of memory error).

Lo script si apre con l'importazione dei dati in formato CSV, formato prediletto per l'utilizzo della libreria Pandas, già suddivisi in un file per ciascun componente misurato. Il contenuto di queste tabelle dati è già stato discusso nel dettaglio in precedenza. Come i tradizionali programmi di misura automatica, anche il presente script necessita di un profilo di riferimento del componente su cui siano individuati i punti e i segmenti di interesse, così da permettere all'algoritmo di individuare i corrispettivi elementi sui successivi profili analizzati. Il profilo di riferimento qui utilizzato corrisponde in realtà ad un insieme di punti caratterizzanti il profilo effettivo. In particolare, essi sono tutti punti estremali di segmenti orizzontali, necessari per svolgere le misure. Questi rappresentano, a seconda dei casi, un riferimento singolo per misure assiali o la coppia di estremi di segmenti con stessa ordinata teorica Z , corrispondenti a superfici a diametro costante sul profilo bidimensionale. Per selezionare questi punti si è scelta arbitrariamente una scansione del componente tra quelle disponibili ed è stato eseguito un picking manuale dei punti, per poi salvarli, attivando la voce iniziale "pickPoints". Successivamente le coordinate estrapolate sono state associate nello script ai rispettivi oggetti di punti o segmenti. Tali oggetti non sono altro che contenitori di parametri, tra cui le coordinate appena menzionate, le quali rappresentano però un puro riferimento della posizione dei punti di interesse nel profilo campione. Sarà compito dell'apposito algoritmo, descritto in seguito, individuare i punti corrispondenti sui profili effettivi da analizzare.

La funzione principale dello script è quella definita di scansione, la quale necessita di un solo argomento: la Y di interesse. Così facendo, si prende in considerazione un solo profilo bidimensionale, corrispondente alla coordinata Y indicata, riproducendo il funzionamento di un profilometro. A seconda degli utilizzi, tale funzione può essere impiegata singolarmente, ad esempio per lo studio dettagliato e la visualizzazione grafica di un profilo, o mediante iterazione su Y successive, per calcoli di valori medi o per ottenere parametri statistici utili allo studio della ripetibilità. Queste opzioni di utilizzo dello script sono gestite mediante dei semplici parametri iniziali di tipo boolean.

2.7.1 Allineamento orizzontale

Il primo passaggio fondamentale, all'interno della funzione di scansione, è la rotazione del profilo fino ad un corretto allineamento orizzontale. Questa operazione viene eseguita anche mediante il software del profilometro meccanico, individuando una retta, solitamente data dall'interpolazione dei punti appartenenti a più segmenti, che viene imposta orizzontale, determinando la conseguente rotazione di tutto il profilo. Seppur un sensore interferometrico necessiti di una superficie di misura quanto più possibile perpendicolare al fascio luminoso emesso, ciò non esclude lievi inclinazioni dovute a errori di fissaggio del componente, in generale di ridotta entità ma sempre presenti. Non eseguire un'operazione di allineamento del profilo rispetto al sistema cartesiano utilizzato per le misure significherebbe considerare le proiezioni delle effettive lunghezze, ottenendo una distorsione della realtà.

Per l'allineamento del profilo sono stati presi in considerazione due segmenti corrispondenti a proiezioni di superfici di diametro $\varnothing 13$ mm, caratterizzate da

tolleranze molto strette ed eseguite con lo stesso alesatore, in un'unica corsa, pertanto attendibili come riferimento orizzontale. I punti di questi segmenti sono poi stati inseriti all'interno di una funzione Numpy di interpolazione lineare mediante il metodo dei minimi quadrati. La funzione restituisce due valori, corrispondenti al coefficiente angolare e all'ordinata all'origine della retta interpolante. Di interesse è il solo coefficiente angolare, corrispondente per definizione alla tangente dell'angolo θ formato dalla retta con l'asse delle ascisse. È quindi possibile risalire con facilità al valore di tale angolo, il quale esprime l'errore di inclinazione della retta presa come riferimento rispetto all'orizzontale. Non è possibile conoscere a priori il segno dell'angolo, in quanto un setup che cerchi un allineamento del componente misurato quanto più possibile orizzontale potrebbe presentare un errore di inclinazione verso l'alto o verso il basso. Nonostante ciò, le formule riportate in seguito sono comunque valide indipendentemente dal segno, dato che rotazione e angolo sono stati presi con verso concorde, nello specifico con verso antiorario. Definito l'angolo θ , l'angolo θ' di cui è necessario ruotare il profilo per ottenerne l'allineamento orizzontale desiderato corrisponde al suo opposto:

$$\theta' = -\theta$$

La matrice di rotazione antioraria che permette di ricavare le nuove coordinate (x', z') del profilo allineato, a partire da quelle originarie (x, z) , è la seguente:

$$\begin{bmatrix} x' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta' & -\sin \theta' \\ \sin \theta' & \cos \theta' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix}$$

2.7.2 Individuazione dei punti di interesse per le misure

Una volta eseguito l'allineamento, occorre procedere con la scansione effettiva, nella quale l'algoritmo dovrà individuare i punti di interesse utilizzando i riferimenti specificati sul profilo campione. Ricordando che tali punti sono tutti estremi di segmenti orizzontali, si è prima lavorato ad una serie di funzioni in grado di isolare quanto più possibile questa tipologia di punti, così che risulti più facile in seguito individuare quali di questi corrispondono a quelli desiderati.

Per iniziare, tutti i punti caratterizzati da una coordinata Z mancante, ovvero quelli che presentano il carattere "*", sono stati scartati. Le coordinate X e Z dei restanti punti del grafico sono state raccolte in due vettori separati, aventi ovviamente lo stesso numero di elementi. Successivamente il vettore Z è stato duplicato e alla sua copia, che verrà indicata da ora come Z' , è stata eseguita un'operazione di shift degli elementi di un posto. A questo punto è stato possibile applicare una potente funzione Numpy di selezione condizionale al vettore Z , definita come "where". Questa funzione seleziona gli indici degli elementi di un vettore che rispettano una condizione data [7]. In questo caso, la condizione imposta richiede che il valore $z \in Z$ interessato sia compreso in un intervallo di $\pm 0,1$ mm rispetto al valore z' avente stesso indice nel vettore traslato Z' . Così facendo, si richiede alla funzione di selezionare gli indici di tutti quei punti la cui differenza di ordinata rispetto a quella del punto scansionato precedente, contenuta allo stesso indice nel vettore Z' , superi in modulo $0,1$ mm. In altre parole, verranno selezionati tutti gli indici corrispondenti ai punti di vertice dei gradini con altezza superiore a $0,1$ mm. Il valore $0,1$ mm è stato scelto in maniera tale da risultare sufficientemente grande per non considerare variazioni di ordinata date dalle micro-irregolarità superficiali e sufficientemente ridotto per permettere di rilevare correttamente anche le

lavorazioni delle piccole gole presenti. In questo modo i punti selezionati corrisponderanno esattamente agli estremi di ciascun segmento orizzontale.

Una volta individuati questi punti significativi, che saranno un numero drasticamente inferiore rispetto ai 110000 che caratterizzano un profilo completo del lato grande, risulta facile realizzare un algoritmo di selezione basato sui punti del profilo campione. Tenendo presente, infatti, che tutte le scansioni sono state effettuate senza variare il setup di fissaggio, i reali punti estremali dei segmenti orizzontali, individuati nel profilo in esame con il metodo appena descritto, risulteranno discostati di poco rispetto ai corrispondenti sul profilo campione. Pertanto, è sufficiente che l'algoritmo verifichi, per ogni punto campione, quale tra i punti estremali raccolti si trovi all'interno di un'area circolare centrata nel punto stesso, caratterizzata da un raggio sufficientemente elevato. Si noti come le precedenti operazioni siano state indispensabili per applicare un algoritmo di sola vicinanza tra i punti. Senza una selezione preventiva qualunque raggio ragionevolmente grande imposto per l'area circolare di controllo attorno ad un punto campione sarebbe risultato in una selezione multipla. Sarebbe inoltre impensabile imporre un raggio nullo, o comunque eccessivamente piccolo, in quanto questo equivarrebbe a richiedere che ciascun profilo presenti i punti estremali dei segmenti orizzontali di interesse localizzati esattamente alle stesse coordinate.

Ottenuti quindi i punti e i segmenti necessari è possibile procedere con i calcoli effettivi delle misure. Per quanto riguarda i segmenti orizzontali, il valore delle ordinate dei punti che li compongono è stato imposto pari al loro valore medio. Così facendo la lunghezza assiale del segmento rimane inalterata e si migliora il riferimento utile per ottenere le differenze di raggi, evitando errori locali che potrebbero interessare singoli punti. Viene di seguito riportato il grafico di ciò che

effettivamente lo script ricava in seguito a tutte le operazioni descritte finora, su cui poi sarà semplice andare ad operare. Le misure assiali di interesse sono state ottenute mediante semplice differenza tra le ascisse dei rispettivi punti di riferimento mentre le differenze di raggi sono state ottenute come differenza delle ordinate mediate dei segmenti orizzontali

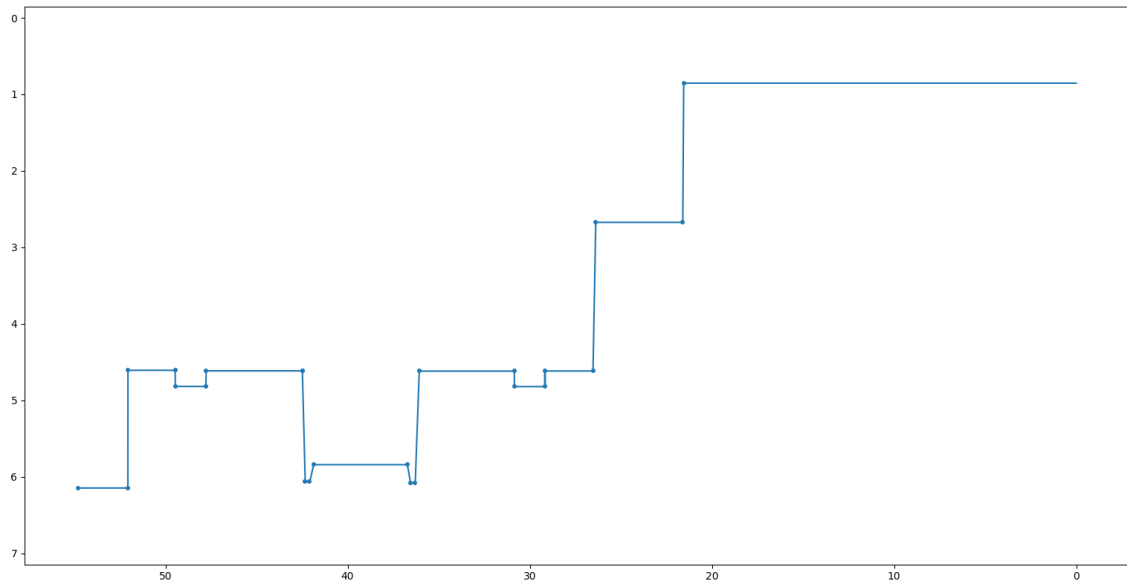


Figura 2.10 – Profilo semplificato successivo all'individuazione dei punti di interesse

Capitolo 3

Risultati

3.1 Considerazioni principali sulle capacità del sensore

Vengono qui riportate le principali considerazioni emerse dalle misure effettuate, anche a seguito di più confronti con il team Precitec addetto. Tali risultati non sono da considerare come relativi al solo sensore interferometrico in analisi ma piuttosto alle prestazioni complessive del setup impiegato, compresa la particolare sonda, e delle modalità di misura descritte:

- come evidente dalle tabelle dati e dai rispettivi grafici, non è possibile campionare la totalità dei punti previsti. Questo limite è ben noto nell'utilizzo di qualsiasi sistema di misura ottico per la distanza. Ciò che occorre analizzare è l'estensione di questi vuoti e la frequenza con cui si presentano. Gli intervalli di valori mancanti appartenenti a superfici piane che sono stati osservati possiedono un'estensione al di sotto di 10 μm , tranne dei rari casi in cui, comunque, non vengono superati i 15 μm . La frequenza con cui si verificano è bassa, il che rende questo risaputo errore accettabile;
- le considerazioni sono completamente diverse se si analizzano i valori mancanti su superfici inclinate. Infatti, non è possibile tracciare un profilo con elevata continuità per superfici inclinate non debolmente, smussi inclusi. Nonostante i valori campionati in tali zone risultino abbastanza coerenti tra

loro, ovvero interpolabili per ricostruire lo spigolo inclinato, la scarsa quantità di punti ottenibili rende impossibile individuare con precisione il punto estremo di questi spigoli qualora essi terminino con una superficie verticale. L'esempio più comune di questa situazione è dato da uno spigolo vivo smussato in corrispondenza di un cambio di diametro. Per dare un'idea numerica della carenza di valori rilevati in tali condizioni, si consideri la ben visibile superficie conica interna localizzata circa a metà del componente, la quale rappresenta la superficie inclinata interna di gran lunga più estesa. I punti campionati nel corrispondente segmento del profilo bidimensionale estrapolato rappresentano il solo 51% della totalità dei punti teorici che ne coprono l'estensione. Questo notevole limite del sensore esclude alcune possibili misure che riguardino direttamente o indirettamente superfici inclinate. Preso atto di questo, si è comunque deciso di proseguire con i successivi passi della validazione, dato che il componente in questione non presenta quote di interesse relative a superfici inclinate interne o per cui queste costituiscano un punto estremo di riferimento. Alcuni problemi potrebbero insorgere con gli smussi, anche se tutti quelli interni al componente presentano un'estensione piuttosto limitata;

- per quanto riguarda l'utilizzo del sensore come rugosimetro senza contatto nel lato fine, le imperfezioni di misura, su cui si è posto l'accento in precedenza, non consentono di applicare in maniera diretta parametri di rugosità basati sui picchi maggiori e le valli minori rispetto al valore medio, come R_z e R_{max} . Occorre prima, invece, applicare un filtro che elimini i punti caratterizzati da salti di valore eccessivi rispetto a quelli adiacenti;

- si ipotizzi ora, con riferimento ad un generico profilo del lato grande scansionato, un comune gradino a 90°, caratterizzato da due segmenti orizzontali e uno verticale che ne congiunge gli estremi. Questo si presenta con molta frequenza in profili bidimensionali di componenti torniti, in quanto è ciò che si osserva in corrispondenza di un cambio di diametro. In questa condizione, il sensore non riesce a campionare i punti estremali del segmento orizzontale inferiore. L'intervallo di valori mancanti in queste zone arriva a 0,2 mm e questo è dovuto all'errore di ostacolo alla ricezione che caratterizza l'utilizzo del sensore interferometrico come profilometro, discusso dettagliatamente nel capitolo 4.2. Come consigliato dal team Precitec, sono stati utilizzati i punti estremali dei segmenti orizzontali superiori come riferimenti per le misure assiali, in cui tale errore non sussiste. I valori di incertezza su tali misure, ottenuti dal confronto con le misure effettuate con il profilometro e discussi dettagliatamente nel seguente capitolo, seppur non ottimali, confermano la bontà di tale operazione, specialmente se si considera il confronto numerico con l'estensione delle zone non campionate.

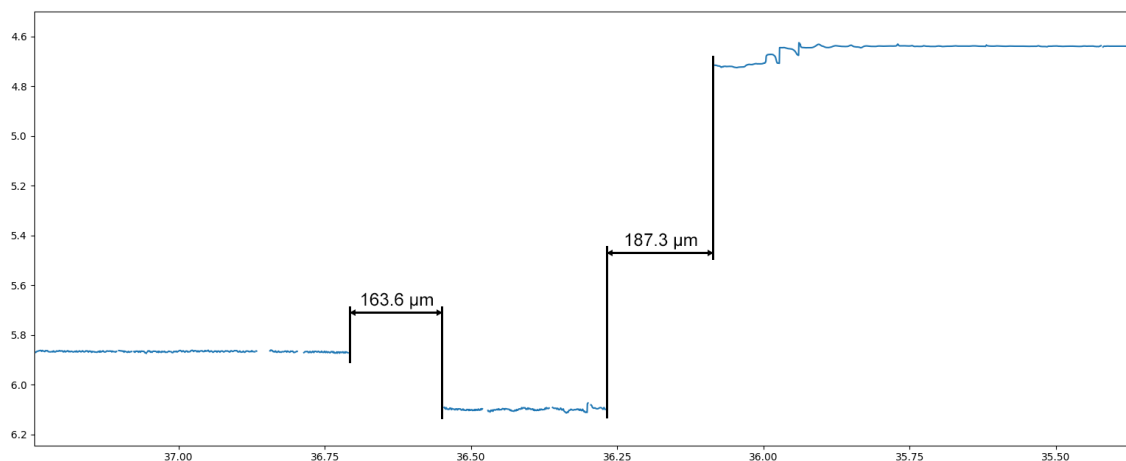


Figura 3.1 - Zone non campionate nella parte inferiore di un gradino

3.2 Confronto con le misure del profilometro e della CMM

Nel presente studio, i valori delle misure ottenute con il profilometro e la CMM del controllo qualità Zannini vengono considerati come i valori convenzionalmente veri delle misure, ovvero assunti come riferimento. Il confronto tra le misure effettuate mediante il sensore e quest'ultime si pone lo scopo di determinare il "bias", ovvero una descrizione della deviazione delle misure effettuate su uno stesso componente rispetto ai valori veri [8]. Il confronto è stato condotto tramite regressione lineare con il metodo dei minimi quadrati. In questo modo è possibile definire i parametri della retta interpolante e di conseguenza ottenere una misura dell'incertezza dello strumento, passando per la varianza. Affinché il metodo di interpolazione lineare per la determinazione dell'incertezza possa essere utilizzato, occorre che le accuratezze del profilometro e della CMM siano di almeno un ordine di grandezza inferiore rispetto a quella del sensore.

Per quanto riguarda il sensore, è possibile considerare, in prima approssimazione, l'ordine di grandezza delle due accuratezze, rispettivamente riferite alle due tipologie di misure effettuate, pari a quello delle relative risoluzioni. La CMM utilizzata possiede un'accuratezza dichiarata di 1,7 μm . Quella del profilometro è, invece, di 1,2 μm . Dal confronto tra le due accuratezze relative al sensore con quelle dei due strumenti si ottiene che il metodo è correttamente applicabile per le misure assiali ma è improprio per quelle radiali. Tenuto conto di questo, il metodo è comunque stato applicato a quest'ultime per i due seguenti motivi:

- dato l'utilizzo del sensore interferometrico come profilometro, il profilometro meccanico stesso risulta essere il migliore strumento per poter ottenere misure dirette delle differenze di raggi, destinate al confronto;

- non si è interessati a verificare la ridotta risoluzione assiale indicata nella scheda tecnica del sensore, bensì è sufficiente, per l'applicazione futura, che questa rientri nell'ordine dei micron, ovvero lo stesso dei due strumenti utilizzati per le misure radiali: condizione comunque non consona per la taratura di uno strumento ma accettabile per la validazione.

Le misure del profilometro sono state poste sull'asse delle ascisse mentre quelle del sensore sull'asse delle ordinate. Per ogni profilo scansionato sono stati realizzati due grafici, con le rispettive rette interpolanti: uno per le misure assiali e l'altro per quelle radiali. Questa distinzione, che permetterà di ottenere due incertezze distinte, è necessaria dato l'utilizzo differente che viene fatto del sensore per acquisirle. Di seguito sono riportati i due grafici, con le rispettive equazioni delle rette interpolanti, relativi ad uno dei componenti campione misurati.

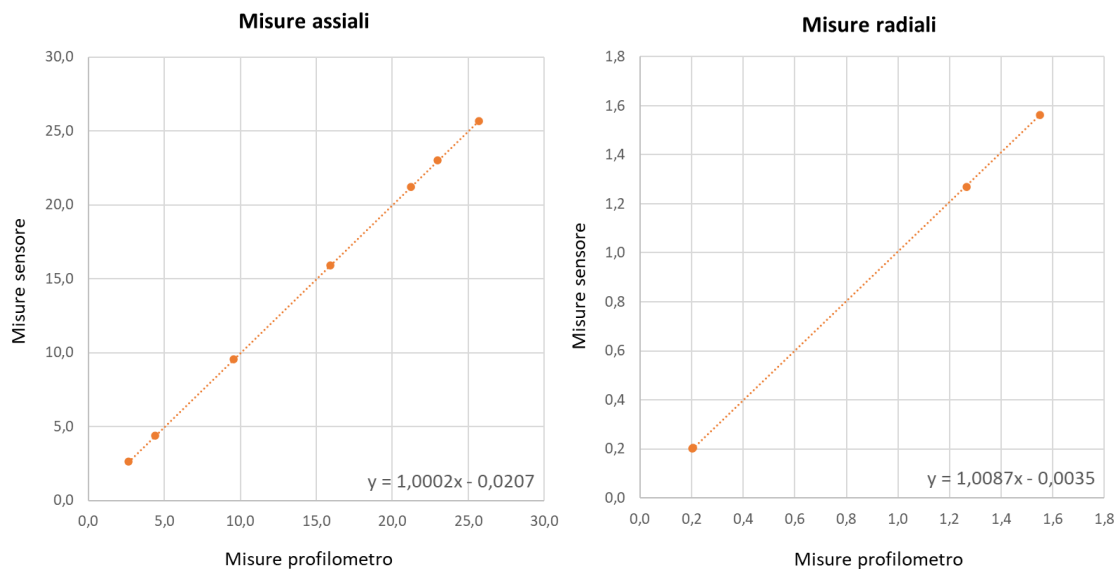


Figura 3.2 - Grafici di confronto tra misure profilometro e sensore

Come è possibile osservare dall'equazione della retta interpolante relativa alle misure assiali, il sensore presenta, per questa tipologia di misure, una buona linearità ma tende, in generale, a sottostimarne i valori. Questo è dovuto all'elevata risoluzione laterale che non permette di campionare perfettamente il punto estemale degli spigoli, costringendo l'utilizzo dell'ultimo punto campionato su questi come riferimento per la misura, escludendone di fatto una piccola porzione.

Per quanto riguarda il confronto con le misure effettuate mediante la CMM, il procedimento adottato è simile. Dato che l'utilizzo del sensore come profilometro restituisce esclusivamente le misure delle differenze di raggio, e non gli effettivi diametri, le misure dei diametri sono state ottenute indirettamente come somma del doppio dei Δr al valore del diametro $\varnothing 13$ mm misurato per lo specifico componente con la CMM stessa. Questo metodo indiretto ricalca l'utilizzo futuro previsto per il sensore, già discusso precedentemente, in cui il diametro $\varnothing 13$ mm verrebbe misurato mediante un alesometro a sfere, per poi ottenere gli altri mediante somma del doppio dei rispettivi Δr . Per ottenere una misura diretta dei diametri occorrerebbe prevedere una rotazione della sonda o del componente, il che porterebbe ad altri studi approfonditi, esclusi però da quello attuale. Successivamente, i diametri calcolati sono stati confrontati con quelli ottenuti mediante la CMM, con le stesse modalità di regressione lineare descritte per il profilometro. Viene anche qui riportato il grafico relativo alle misure dello stesso pezzo campione, con la rispettiva equazione della retta interpolante.

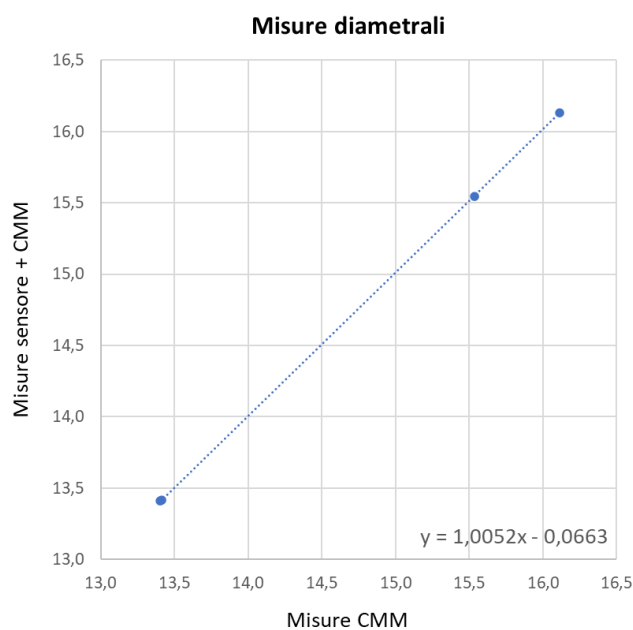


Figura 3.3 - Grafico di confronto tra misure CMM e sensore

A questo punto è possibile calcolare la varianza e quindi la deviazione standard delle misure effettuate dal sensore, moltiplicata infine per un fattore di copertura pari a 2 per ottenere l'incertezza estesa. Nella seguente tabella ne vengono riportati i valori relativi ai 5 componenti misurati e i valori medi, suddivisi per le due prove.

Incertezze estese			
Componente	Misure assiali	Misure radiali	Misure diametrali
1	0,0238	0,0089	0,0093
2	0,0296	0,0052	0,0093
3	0,0248	0,0066	0,0094
4	0,0329	0,0081	0,0053
5	0,0204	0,0083	0,0098
Media	0,0263	0,0074	0,0086

Tabella 3.1 - Incertezze estese del confronto con profilometro e CMM

3.3 Ripetibilità delle misure

Oltre ad avere un confronto con le misure ottenute mediante il profilometro e la CMM, un ulteriore obiettivo della presente analisi è quello di stabilire l'incertezza nella ripetibilità delle misure da parte del sensore, con riferimento alle due tipologie di misura effettuate: assiali e radiali. Ciò che ci si aspetta è, ancora una volta, un'incertezza molto minore nella seconda tipologia, dato l'utilizzo più consono del sensore e data la media delle ordinate effettuata sui segmenti orizzontali, grazie alla quale è possibile ridurre le fonti di errori provenienti da micro-irregolarità locali, operazione non possibile invece per quanto riguarda i punti di riferimento delle misure assiali.

Per iniziare, è di interesse stabilire se i valori delle misure effettuate sui 50 profili del pezzo campione destinato alla verifica di ripetibilità assumano una distribuzione normale, come è logico aspettarsi. Si noti come, in realtà, 50 valori di una misura ripetuta costituiscano un numero piuttosto esiguo come campione statistico ma che questo è il numero di valori che verranno poi utilizzati per valutare i parametri C_g e C_{gk} , di grande interesse da parte dell'azienda Zannini. Questi rientrano tra i parametri statistici dello studio MSA ("Measurement System Analysis"), il quale rappresenta lo standard per determinare l'affidabilità di uno strumento di misura proposto della norma ISO/TS 16949, specifica per il settore automotive, relativa alle più generali ISO 9000 [9]. Il C_g e il C_{gk} esprimono, rispettivamente, una misura della precisione e dell'accuratezza dello strumento. Nonostante ciò, si è comunque deciso di affrontare un preliminare studio statistico più tradizionale, il quale servirà comunque per avvalorare o mettere in dubbio i risultati dello studio $C_g C_{gk}$.

Per ciascuna misura l'intervallo di valori compreso tra massimo e minimo è stato suddiviso in 10 classi di appartenenza di uguale ampiezza, numero così scelto in modo da poter apprezzare l'eventuale distribuzione gaussiana con un minimo di risoluzione, seppur ciascuna classe sarà caratterizzata da una piccola quantità di valori. Viene in seguito mostrata la distribuzione ottenuta per la distanza radiale relativa all'importante diametro $\varnothing 15,5$ mm, la cui media è circa pari a 1,2568 mm. Da questa è possibile confermare, con sufficiente certezza, come tale distribuzione sia effettivamente normale, nonostante la scarsità di dati disponibili.

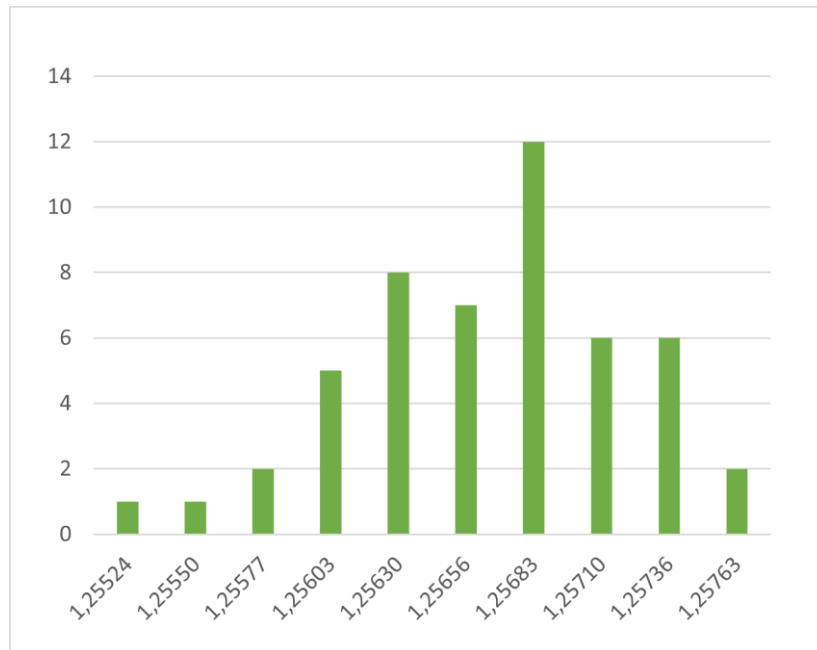


Figura 3.4 - Distribuzione distanze radiali relative al diametro $\varnothing 15,5$ mm

A questo punto si è proceduto con la valutazione della deviazione standard per tutti i 10 gruppi di misure di interesse, ottenuta mediante lo script in modo agevole grazie all'apposita funzione Numpy. Queste sono state poi moltiplicate per un fattore di copertura pari a 2 per ottenere l'incertezza estesa. Ne vengono riportati i valori nella seguente tabella, insieme alla differenza tra valore massimo e minimo.

Quest'ultimo valore può essere utile per mettere in evidenza la presenza di errori accidentali su singole misure.

Distanze assiali						
	2,6 (±0,05)	4,37 (±0,05)	9,6 (+0;-0,075)	15,9 (+0,075;-0)	21,2 (±0,05)	23 (±0,05)
Valore Medio	2,6258	4,3259	9,5920	15,9504	21,2110	22,9262
Dev. Standard	0,0312	0,0222	0,0282	0,0278	0,0301	0,0258
Max - Min	0,1290	0,1045	0,1405	0,1435	0,1155	0,1290
Incertezza Estesa	0,0625	0,0445	0,0565	0,0556	0,0602	0,0517

Differenze di raggio relative ai diametri				
	∅ 13,4 (±0,025) (1)	∅ 15,5 (±0,05)	∅ 13,4 (±0,025) (2)	∅ 16,06 (+0,05;-0)
Valore Medio	0,2110	1,2268	0,1999	1,5366
Dev. Standard	0,0007	0,0006	0,0006	0,0005
Max - Min	0,0029	0,0027	0,0028	0,0016
Incertezza Estesa	0,0013	0,0011	0,0012	0,0010

Tabella 3.2 - Parametri statistici delle misure

Come era stato previsto, le incertezze relative alle misure radiali risultano molto inferiori rispetto a quelle delle misure assiali, differendo addirittura di un ordine di grandezza. Analizzandone i valori si conclude che:

- l'incertezza delle misure radiali è considerabile largamente ammissibile. Infatti, dal confronto tra il valore medio di incertezza estesa, pari a 1,15 μm , moltiplicato per 2 per ottenere quella sul diametro, e l'intervallo di tolleranza più piccolo tra i diametri di interesse, pari a 0,05 mm, si ottiene un'incertezza relativa del 4,6%. Tale valore risulta ampiamente accettabile in quanto circa la metà del valore massimo di incertezza relativa consentito nell'ambito di

strumenti di misura industriali, pari a 10%. Le differenze tra massimo e minimo dei valori di queste misure non evidenziano particolari eccezioni rispetto a quanto si evince dall'incertezza estesa;

- l'incertezza delle misure assiali risulta essere, invece, molto elevata. Il valore medio delle incertezze estese di queste misure costituisce, infatti, un'incertezza relativa media del 50% rispetto all'intervallo di tolleranza più stretto. Questo rende lo strumento completamente incompatibile con l'accuratezza richiesta per lo scopo. Inoltre, il confronto tra incertezza estesa e differenza tra massimo e minimo mette in evidenza una maggiore inaffidabilità per misure singole, correndo il rischio di possibili errori accidentali più accentuati. Questo risulta essere un forte limite per l'implementazione concepita per il sensore. Infatti, il tempo di scansione del lato grande necessario per ottenere un'adeguata risoluzione è pari circa a 7 secondi. Tale valore è già limitante per i ritmi di una normale stazione di controllo automatico, rendendo quindi impossibile pensare di raddoppiarlo per eseguire una seconda scansione che rafforzi la solidità delle misure della prima.

Per concludere, è stato eseguito lo studio CgCgk mediante foglio normato, per ciascuna delle 10 misure effettuate sul pezzo campione designato, ripetute 50 volte. In seguito vengono riportati e poi commentati i fogli relativi all'esito sulla misura assiale $9,6 (+0;-0,075)$ mm e la misura radiale $1,23 (\pm 0,025)$ mm, relativa al diametro $\varnothing 15,5$ mm, come rappresentative delle due rispettive tipologie di misure effettuate con il sensore.

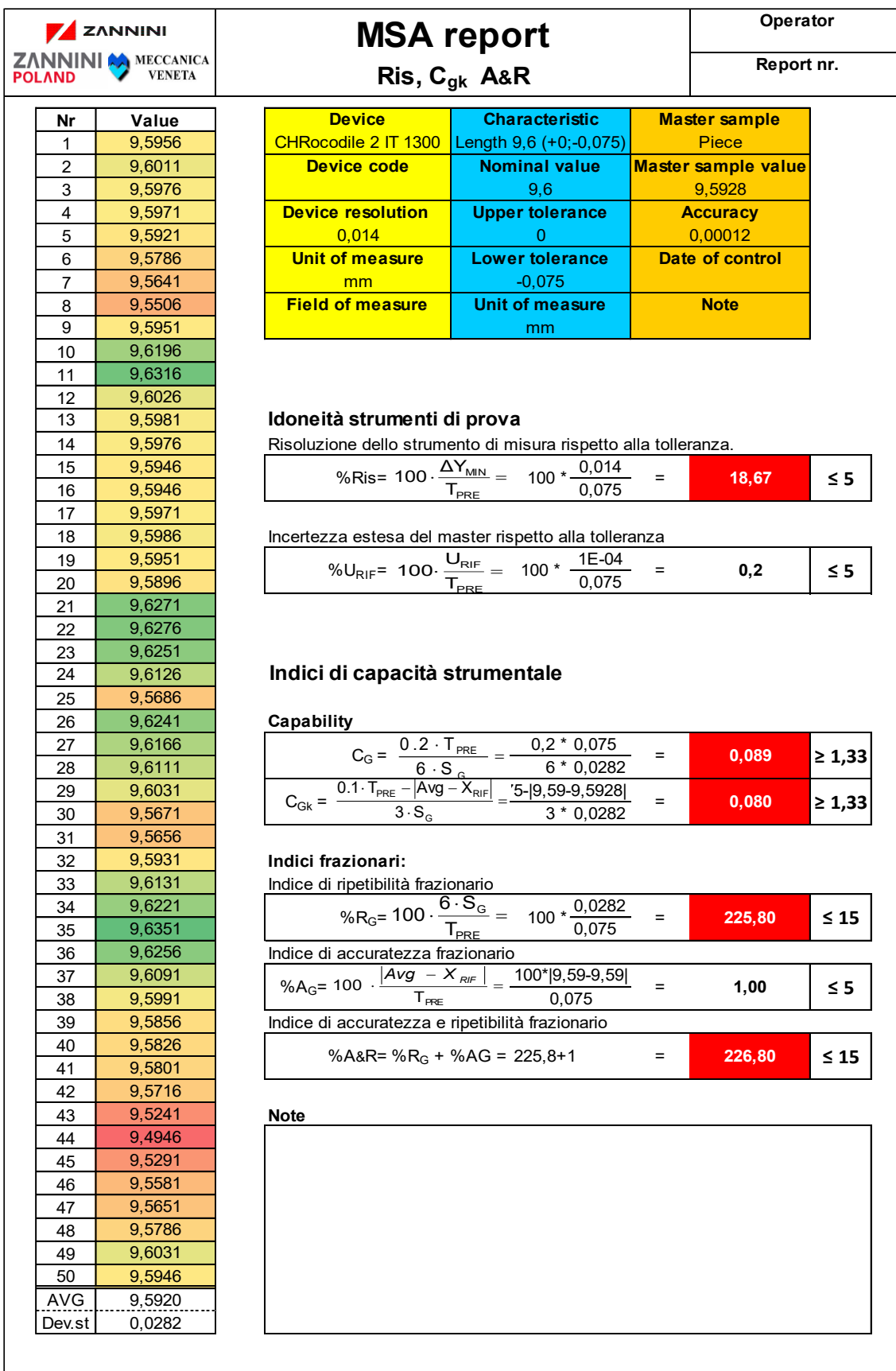


Figura 3.5 - Studio C_gC_{gk} di una misura assiale


		<h1>MSA report</h1> <h2>Ris, C_{gk} A&R</h2>		Operator Report nr.																																																																																																																																																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nr</th> <th>Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1,2266</td></tr> <tr><td>2</td><td>1,2268</td></tr> <tr><td>3</td><td>1,2269</td></tr> <tr><td>4</td><td>1,2265</td></tr> <tr><td>5</td><td>1,2266</td></tr> <tr><td>6</td><td>1,2268</td></tr> <tr><td>7</td><td>1,2269</td></tr> <tr><td>8</td><td>1,2267</td></tr> <tr><td>9</td><td>1,2265</td></tr> <tr><td>10</td><td>1,2259</td></tr> <tr><td>11</td><td>1,2274</td></tr> <tr><td>12</td><td>1,2276</td></tr> <tr><td>13</td><td>1,2268</td></tr> <tr><td>14</td><td>1,2269</td></tr> <tr><td>15</td><td>1,2275</td></tr> <tr><td>16</td><td>1,2271</td></tr> <tr><td>17</td><td>1,2269</td></tr> <tr><td>18</td><td>1,2270</td></tr> <tr><td>19</td><td>1,2270</td></tr> <tr><td>20</td><td>1,2266</td></tr> <tr><td>21</td><td>1,2263</td></tr> <tr><td>22</td><td>1,2263</td></tr> <tr><td>23</td><td>1,2263</td></tr> <tr><td>24</td><td>1,2266</td></tr> <tr><td>25</td><td>1,2265</td></tr> <tr><td>26</td><td>1,2262</td></tr> <tr><td>27</td><td>1,2261</td></tr> <tr><td>28</td><td>1,2259</td></tr> <tr><td>29</td><td>1,2265</td></tr> <tr><td>30</td><td>1,2277</td></tr> <tr><td>31</td><td>1,2262</td></tr> <tr><td>32</td><td>1,2276</td></tr> <tr><td>33</td><td>1,2273</td></tr> <tr><td>34</td><td>1,2252</td></tr> <tr><td>35</td><td>1,2255</td></tr> <tr><td>36</td><td>1,2262</td></tr> <tr><td>37</td><td>1,2266</td></tr> <tr><td>38</td><td>1,2274</td></tr> <tr><td>39</td><td>1,2269</td></tr> <tr><td>40</td><td>1,2269</td></tr> <tr><td>41</td><td>1,2271</td></tr> <tr><td>42</td><td>1,2278</td></tr> <tr><td>43</td><td>1,2276</td></tr> <tr><td>44</td><td>1,2279</td></tr> <tr><td>45</td><td>1,2276</td></tr> <tr><td>46</td><td>1,2273</td></tr> <tr><td>47</td><td>1,2271</td></tr> <tr><td>48</td><td>1,2270</td></tr> <tr><td>49</td><td>1,2269</td></tr> <tr><td>50</td><td>1,2265</td></tr> <tr><td>AVG</td><td>1,2268</td></tr> <tr><td>Dev.st</td><td>0,0006</td></tr> </tbody> </table>		Nr	Value	1	1,2266	2	1,2268	3	1,2269	4	1,2265	5	1,2266	6	1,2268	7	1,2269	8	1,2267	9	1,2265	10	1,2259	11	1,2274	12	1,2276	13	1,2268	14	1,2269	15	1,2275	16	1,2271	17	1,2269	18	1,2270	19	1,2270	20	1,2266	21	1,2263	22	1,2263	23	1,2263	24	1,2266	25	1,2265	26	1,2262	27	1,2261	28	1,2259	29	1,2265	30	1,2277	31	1,2262	32	1,2276	33	1,2273	34	1,2252	35	1,2255	36	1,2262	37	1,2266	38	1,2274	39	1,2269	40	1,2269	41	1,2271	42	1,2278	43	1,2276	44	1,2279	45	1,2276	46	1,2273	47	1,2271	48	1,2270	49	1,2269	50	1,2265	AVG	1,2268	Dev.st	0,0006	<table border="1"> <tr> <td>Device</td> <td>Characteristic</td> <td>Master sample</td> </tr> <tr> <td>CHRcodile 2 IT 1300</td> <td>Radial Length 1,23 (±0,025)</td> <td>Piece</td> </tr> <tr> <td>Device code</td> <td>Nominal value</td> <td>Master sample value</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1,23</td> <td>1,2257</td> </tr> <tr> <td>Device resolution</td> <td>Upper tolerance</td> <td>Accuracy</td> </tr> <tr> <td>0,0000315</td> <td>0,025</td> <td>0,00012</td> </tr> <tr> <td>Unit of measure</td> <td>Lower tolerance</td> <td>Date of control</td> </tr> <tr> <td>mm</td> <td>-0,025</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Field of measure</td> <td>Unit of measure</td> <td>Note</td> </tr> <tr> <td></td> <td>mm</td> <td></td> </tr> </table> <p>Idoneità strumenti di prova Risoluzione dello strumento di misura rispetto alla tolleranza.</p> <table border="1"> <tr> <td>$\%Ris = 100 \cdot \frac{\Delta Y_{MIN}}{T_{PRE}} = 100 \cdot \frac{3E-05}{0,05} =$</td> <td>0,06</td> <td>≤ 5</td> </tr> </table> <p>Incertezza estesa del master rispetto alla tolleranza</p> <table border="1"> <tr> <td>$\%URIF = 100 \cdot \frac{U_{RIF}}{T_{PRE}} = 100 \cdot \frac{1E-04}{0,05} =$</td> <td>0,2</td> <td>≤ 5</td> </tr> </table> <p>Indici di capacità strumentale</p> <p>Capability</p> <table border="1"> <tr> <td>$C_G = \frac{0,2 \cdot T_{PRE}}{6 \cdot S_G} = \frac{0,2 \cdot 0,05}{6 \cdot 0,0006} =$</td> <td>2,900</td> <td>≥ 1,33</td> </tr> <tr> <td>$C_{Gk} = \frac{0,1 \cdot T_{PRE} - Avg - X_{RIF} }{3 \cdot S_G} = \frac{15 \cdot 1,23 - 1,2257 }{3 \cdot 0,0006} =$</td> <td>2,260</td> <td>≥ 1,33</td> </tr> </table> <p>Indici frazionari:</p> <p>Indice di ripetibilità frazionario</p> <table border="1"> <tr> <td>$\%R_G = 100 \cdot \frac{6 \cdot S_G}{T_{PRE}} = 100 \cdot \frac{0,0006}{0,05} =$</td> <td>6,90</td> <td>≤ 15</td> </tr> </table> <p>Indice di accuratezza frazionario</p> <table border="1"> <tr> <td>$\%A_G = 100 \cdot \frac{ Avg - X_{RIF} }{T_{PRE}} = \frac{100 \cdot 1,23 - 1,23 }{0,05} =$</td> <td>2,21</td> <td>≤ 5</td> </tr> </table> <p>Indice di accuratezza e ripetibilità frazionario</p> <table border="1"> <tr> <td>$\%A\&R = \%R_G + \%A_G = 6,9 + 2,21 =$</td> <td>9,10</td> <td>≤ 15</td> </tr> </table> <p>Note</p> <div style="border: 1px solid black; height: 100px; width: 100%;"></div>				Device	Characteristic	Master sample	CHRcodile 2 IT 1300	Radial Length 1,23 (±0,025)	Piece	Device code	Nominal value	Master sample value		1,23	1,2257	Device resolution	Upper tolerance	Accuracy	0,0000315	0,025	0,00012	Unit of measure	Lower tolerance	Date of control	mm	-0,025		Field of measure	Unit of measure	Note		mm		$\%Ris = 100 \cdot \frac{\Delta Y_{MIN}}{T_{PRE}} = 100 \cdot \frac{3E-05}{0,05} =$	0,06	≤ 5	$\%URIF = 100 \cdot \frac{U_{RIF}}{T_{PRE}} = 100 \cdot \frac{1E-04}{0,05} =$	0,2	≤ 5	$C_G = \frac{0,2 \cdot T_{PRE}}{6 \cdot S_G} = \frac{0,2 \cdot 0,05}{6 \cdot 0,0006} =$	2,900	≥ 1,33	$C_{Gk} = \frac{0,1 \cdot T_{PRE} - Avg - X_{RIF} }{3 \cdot S_G} = \frac{15 \cdot 1,23 - 1,2257 }{3 \cdot 0,0006} =$	2,260	≥ 1,33	$\%R_G = 100 \cdot \frac{6 \cdot S_G}{T_{PRE}} = 100 \cdot \frac{0,0006}{0,05} =$	6,90	≤ 15	$\%A_G = 100 \cdot \frac{ Avg - X_{RIF} }{T_{PRE}} = \frac{100 \cdot 1,23 - 1,23 }{0,05} =$	2,21	≤ 5	$\%A\&R = \%R_G + \%A_G = 6,9 + 2,21 =$	9,10	≤ 15
Nr	Value																																																																																																																																																																	
1	1,2266																																																																																																																																																																	
2	1,2268																																																																																																																																																																	
3	1,2269																																																																																																																																																																	
4	1,2265																																																																																																																																																																	
5	1,2266																																																																																																																																																																	
6	1,2268																																																																																																																																																																	
7	1,2269																																																																																																																																																																	
8	1,2267																																																																																																																																																																	
9	1,2265																																																																																																																																																																	
10	1,2259																																																																																																																																																																	
11	1,2274																																																																																																																																																																	
12	1,2276																																																																																																																																																																	
13	1,2268																																																																																																																																																																	
14	1,2269																																																																																																																																																																	
15	1,2275																																																																																																																																																																	
16	1,2271																																																																																																																																																																	
17	1,2269																																																																																																																																																																	
18	1,2270																																																																																																																																																																	
19	1,2270																																																																																																																																																																	
20	1,2266																																																																																																																																																																	
21	1,2263																																																																																																																																																																	
22	1,2263																																																																																																																																																																	
23	1,2263																																																																																																																																																																	
24	1,2266																																																																																																																																																																	
25	1,2265																																																																																																																																																																	
26	1,2262																																																																																																																																																																	
27	1,2261																																																																																																																																																																	
28	1,2259																																																																																																																																																																	
29	1,2265																																																																																																																																																																	
30	1,2277																																																																																																																																																																	
31	1,2262																																																																																																																																																																	
32	1,2276																																																																																																																																																																	
33	1,2273																																																																																																																																																																	
34	1,2252																																																																																																																																																																	
35	1,2255																																																																																																																																																																	
36	1,2262																																																																																																																																																																	
37	1,2266																																																																																																																																																																	
38	1,2274																																																																																																																																																																	
39	1,2269																																																																																																																																																																	
40	1,2269																																																																																																																																																																	
41	1,2271																																																																																																																																																																	
42	1,2278																																																																																																																																																																	
43	1,2276																																																																																																																																																																	
44	1,2279																																																																																																																																																																	
45	1,2276																																																																																																																																																																	
46	1,2273																																																																																																																																																																	
47	1,2271																																																																																																																																																																	
48	1,2270																																																																																																																																																																	
49	1,2269																																																																																																																																																																	
50	1,2265																																																																																																																																																																	
AVG	1,2268																																																																																																																																																																	
Dev.st	0,0006																																																																																																																																																																	
Device	Characteristic	Master sample																																																																																																																																																																
CHRcodile 2 IT 1300	Radial Length 1,23 (±0,025)	Piece																																																																																																																																																																
Device code	Nominal value	Master sample value																																																																																																																																																																
	1,23	1,2257																																																																																																																																																																
Device resolution	Upper tolerance	Accuracy																																																																																																																																																																
0,0000315	0,025	0,00012																																																																																																																																																																
Unit of measure	Lower tolerance	Date of control																																																																																																																																																																
mm	-0,025																																																																																																																																																																	
Field of measure	Unit of measure	Note																																																																																																																																																																
	mm																																																																																																																																																																	
$\%Ris = 100 \cdot \frac{\Delta Y_{MIN}}{T_{PRE}} = 100 \cdot \frac{3E-05}{0,05} =$	0,06	≤ 5																																																																																																																																																																
$\%URIF = 100 \cdot \frac{U_{RIF}}{T_{PRE}} = 100 \cdot \frac{1E-04}{0,05} =$	0,2	≤ 5																																																																																																																																																																
$C_G = \frac{0,2 \cdot T_{PRE}}{6 \cdot S_G} = \frac{0,2 \cdot 0,05}{6 \cdot 0,0006} =$	2,900	≥ 1,33																																																																																																																																																																
$C_{Gk} = \frac{0,1 \cdot T_{PRE} - Avg - X_{RIF} }{3 \cdot S_G} = \frac{15 \cdot 1,23 - 1,2257 }{3 \cdot 0,0006} =$	2,260	≥ 1,33																																																																																																																																																																
$\%R_G = 100 \cdot \frac{6 \cdot S_G}{T_{PRE}} = 100 \cdot \frac{0,0006}{0,05} =$	6,90	≤ 15																																																																																																																																																																
$\%A_G = 100 \cdot \frac{ Avg - X_{RIF} }{T_{PRE}} = \frac{100 \cdot 1,23 - 1,23 }{0,05} =$	2,21	≤ 5																																																																																																																																																																
$\%A\&R = \%R_G + \%A_G = 6,9 + 2,21 =$	9,10	≤ 15																																																																																																																																																																

Figura 3.6 - Studio C_gC_{gk} di una misura radiale

Il Cg e il Cgk sono stati ottenuti con le apposite formule normate, riportate nella finestra “Capability”. Affinché la precisione e l’accuratezza dello strumento risultino idonei secondo la norma, si richiede che i valori dei due parametri siano maggiori, o al più uguali, a 1,33. Come è possibile notare dai report, le misure radiali soddisfano ampiamente tali condizioni mentre quelle assiali non rientrano nei parametri prestabiliti. Ovviamente tali considerazioni si estendono anche ai valori ottenuti per tutte le altre misure di ciascuna delle due tipologie. Questi risultati sono confermati dalle incertezze estese calcolate precedentemente. Nel foglio sono inoltre riportati gli indici frazionari di ripetibilità e accuratezza, utilizzati nello studio statistico che prende il nome di “A&R”, il quale rappresenta un’espressione alternativa dello studio CgCgk e conferma, ancora una volta, i risultati ottenuti. Si evidenzia infine che il foglio relativo alla misura assiale mostra un’ulteriore casella rossa relativa all’elevata risoluzione dello strumento di misura rispetto all’intervallo di tolleranza, pari percentualmente al 18,67%. Questo limite del sensore, utilizzato con l’ausilio della sonda descritta, era già ovviamente noto dalla sola lettura della scheda tecnica, quindi sarebbe stato possibile trascurarlo se l’esito degli studi statistici normati fosse risultato positivo.

Capitolo 4

Considerazioni su errori di misura attuali e possibili

4.1 Analisi dell'errore di coassialità tra sonda e componente

Verrà ora analizzato il possibile errore riguardante le misure di differenza dei raggi dovuto alla non perfetta coassialità tra sonda e componente. In particolare, tale errore è dovuto alla sola non-coassialità lungo la direzione trasversale Y, mentre il posizionamento della sonda lungo la direzione di misura Z rimane arbitrario poiché non influente, anzi si preferisce avvicinarla, entro certi limiti, alla superficie del componente da misurare, al fine di incrementare la qualità di ricezione.

Come precedentemente evidenziato, campionare un qualsiasi altro punto sulla circonferenza che non corrisponda al punto di minimo porta ad una sottostima della distanza radiale effettiva. È altrettanto vero che tale distanza radiale non è rilevante come misura assoluta ma soltanto come differenza rispetto ad un'altra e che uno spostamento qualsiasi della sonda lungo la direzione Y, rispetto al punto minimo, interesserebbe entrambe le distanze radiali. Questo però non lascerebbe inalterata la loro differenza in quanto, a parità di spostamento trasversale, si ha una maggiore riduzione della distanza radiale misurata quanto minore è il diametro della

circonferenza in analisi, come mostrato nella seguente figura con circonferenze di esempio.

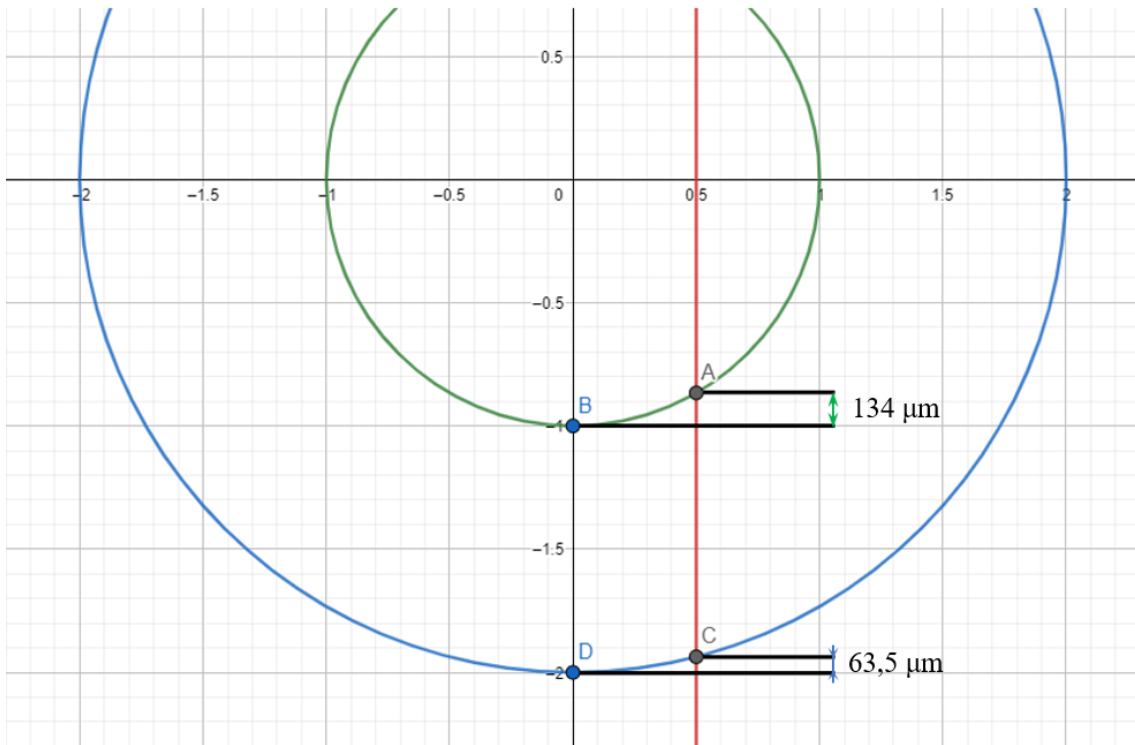


Figura 4.1 – Confronto misure radiali con disallineamento in Y su diversi diametri

Dato che una generica misura di differenza dei raggi riguarda necessariamente punti su circonferenze con diametri differenti, la mancata coassialità lungo la direzione Y tra sonda e componente determinerebbe, in definitiva, un erroneo aumento del valore di tale misura.

Pertanto, nella possibile installazione futura della sonda all'interno di un'isola automatizzata, il centraggio di questa rispetto alla sede del componente in misurazione richiederà una particolare cura progettuale e costruttiva. Ciò non significa certamente che si possa garantire la perfetta coassialità, specialmente nelle condizioni di lavoro altamente dinamiche con cui si opera in tale ambiente.

Al fine di stimare l'errore provocato da un disallineamento della sonda lungo la direzione Y, ci si pone nelle peggiori condizioni plausibili e quindi maggiormente cautelative. In particolare:

- si suppone uno spostamento della sonda lungo tale direzione di 0,1 mm: disallineamento molto elevato e difficilmente raggiungibile data la precisione delle isole di controllo realizzate dall'azienda;
- si considera la sola sottostima che risulta nella misura radiale del diametro $\varnothing 13$ mm: diametro di riferimento per tutte le differenze di raggi di interesse e il minore tra quelli coinvolti, quindi il più soggetto all'errore in analisi. In questo modo si trascura l'effetto dell'errore sull'altra misura radiale coinvolta nella differenza. In realtà, come già espresso, considerando anche l'effetto di sottostima del valore di quest'ultima, di entità minore ma presente, si avrebbe una parziale compensazione dell'errore, che si preferisce trascurare per rimanere in ottica cautelativa.

La (1) rappresenta l'equazione di una generica circonferenza di raggio r centrata nell'origine, che descrive idealmente una sezione del componente. Nella (2) la formula precedente viene invertita, esplicitando il valore assoluto di y , che rappresenta la misura radiale effettuata. Il modulo deve essere mantenuto in quanto la misura è relativa ad una distanza, quindi mai negativa, e, inoltre, la sua direzione e il suo verso sono stati così scelti per similitudine con il setup di misura utilizzato ma risultano completamente arbitrari. Successivamente vengono sostituiti i valori del raggio r della circonferenza presa in esame, pari a 6,5 mm, e il valore di x , una volta nullo per ottenere la misura radiale effettiva e una volta di 0,1 mm per calcolare il suo valore sottostimato limite.

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (1)$$

$$f(x) = |y(x)| = \sqrt{r^2 - x^2} \quad (2)$$

$$y_1 = f(0) = 6,5 \text{ mm}$$

$$y_2 = f(0,1) = 6,4992 \text{ mm}$$

Eseguendo la differenza tra i due valori si ottiene che un disallineamento limite tra sonda e componente in misurazione di 0,1 mm lungo la direzione Y costituisce un errore di misura sulla distanza radiale del diametro $\varnothing 13$ mm di 0,8 μm . Questo verrà inoltre parzialmente compensato in fase di calcolo di ciascun Δr dall'errore influenzante l'altro raggio considerato. Tale deviazione è ritenibile più che accettabile considerando le tolleranze richieste.

4.2 Errore di ostacolo alla ricezione

Un sensore interferometrico utilizza per il suo funzionamento un fascio di luce coerente che può essere idealizzato geometricamente come un cilindro fine, il cui diametro di base è ipotizzabile circa pari alla risoluzione laterale dello strumento: 14 μm . Questo ingombro determina una data incertezza sulle misure laterali. Tali misure sono state effettuate prendendo come riferimento, in maniera obbligata, i punti estremali dei segmenti superiori campionati in corrispondenza dei cambi di diametro, ovvero dei cambi di altezza nel profilo bidimensionale. Infatti, come precedentemente mostrato, i segmenti che si trovano nella parte inferiore di questi gradini, quindi più lontani dalla sonda, presentano intervalli di valori mancanti agli estremi che possono arrivare ad una lunghezza di 0,2 mm: valori assolutamente incompatibili con le tolleranze delle misure assiali di interesse e non giustificabili dal solo ingombro del fascio luminoso, il quale è di un ordine di grandezza

inferiore. Il motivo della mancata campionatura di questi punti è da ricercare nel fenomeno di diffusione della luce, noto anche con il nome di “scattering”: quando il fascio di luce viene riflesso dalla superficie del componente, caratterizzata da una certa rugosità, questo non assume la stessa forma di origine ma viene riemesso in molte direzioni che presentano un angolo non nullo rispetto a quella del raggio uscente dalla sonda. Questo porta ad avere, in corrispondenza di grandi cambi di altezza, una porzione della luce riflessa che intercetta la parete verticale del componente misurato, impedendone la ricezione. Questo riduce l’intensità della luce che giunge al rilevatore e, qualora questa non fosse sufficiente, il corrispondente punto non viene campionato (qualità nulla), come avviene in questi intervalli di valori mancanti. In aggiunta, il fenomeno dello scattering aumenta con la distanza percorsa in aria, rendendo più plausibile la mancata campionatura di un punto molto distante dalla sonda, rispetto a quello che è il fondo scala.

L’estensione degli intervalli di valori mancanti è confrontabile per salita e discesa di uno stesso cambio di diametro, quindi il verso di moto del sensore durante la misurazione non è influente. Nello svolgimento del presente studio non è stata individuata una modalità di misura utile a far fronte a questo errore e, quindi, per campionare correttamente le zone inferiori dei cambi di altezza.

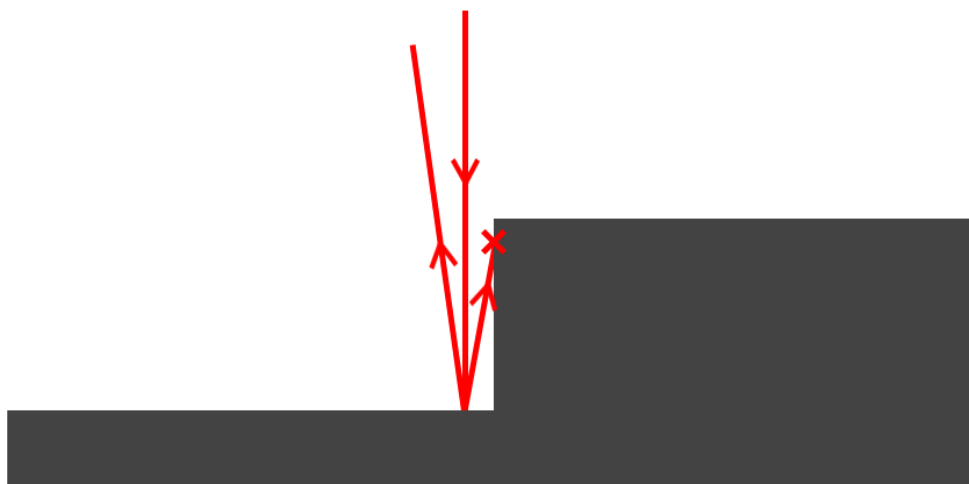


Figura 4.2 – Errore di ostacolo alla ricezione

Un simile errore viene riscontrato anche nell'utilizzo del profilometro meccanico, a causa dell'ingombro della punta metallica. Questa impedisce allo strumento di seguire perfettamente il profilo, producendo un errore nella misura. In particolare, non si avranno zone di punti mancanti ma, anziché ottenere il profilo effettivo caratterizzato da due segmenti orizzontali e uno verticale, i due segmenti orizzontali appariranno congiunti da uno obliquo, con stessa inclinazione della superficie laterale della punta metallica. La modalità con cui si agisce per correggere tale errore è quella di inclinare il componente da entrambi i lati, eseguendo due scansioni. Per ciascuno dei due lati di inclinazione si favorirà il corretto tracciamento di uno dei due vertici, aumentando invece l'errore sull'altro. Le scansioni vengono poi sovrapposte mediante un'opportuna procedura via software, ottenendo un unico profilo completo e correttamente tracciato. Agendo in questo caso con la stessa modalità utilizzata per il profilometro meccanico, si trasformerebbero tutte le superfici idealmente perpendicolari al fascio luminoso in superfici inclinate, introducendo un ulteriore problema, di portata ampiamente maggiore, data l'impossibilità del sensore interferometrico di campionare adeguatamente punti su superfici inclinate.

Capitolo 5

Conclusioni

5.1 Considerazioni finali

In questo capitolo verranno espone le considerazioni finali relative allo studio effettuato. Si ricorda che, come già sottolineato nel capitolo dei risultati, queste non sono da intendere come relative al solo sensore interferometrico Precitec CHRocodile 2 IT 1300 ma piuttosto alle prestazioni complessive derivanti da un suo utilizzo con la particolare sonda citata, mediante il setup e le modalità di misura descritti in precedenza.

Gli studi di ripetibilità e quelli relativi al confronto tra le misure effettuate mediante il sensore e con i due strumenti del controllo qualità Zannini hanno mostrato risultati coerenti tra loro. Tenuto conto di questi, viene di seguito riassunto quanto emerso, in definitiva, per le due differenti tipologie di misure effettuate:

- lo strumento può essere utilizzato per misurare distanze radiali in modo efficace, a condizione che le rispettive coordinate radiali dei segmenti interessati siano mediate da un software, allo scopo di eliminare errori dovuti a micro-irregolarità locali;
- lo strumento non può essere utilizzato, con il setup di misura attuale, per misurare adeguatamente le distanze assiali di interesse dello studio.

Generalizzando, questo setup non risulta consono per qualunque misura assiale presenti una tolleranza dell'ordine di grandezza dei centesimi. Al contrario, il setup analizzato può essere preso in forte considerazione, dati i numerosi vantaggi descritti, qualora si intendano misurare distanze laterali di lavorazioni difficilmente accessibili, il cui intervallo di tolleranza sia di alcuni decimi. Nel seguente capitolo verranno discussi alcuni possibili miglioramenti da apportare al setup di misura attuale allo scopo di ridurre l'incertezza di tali misure. Queste modifiche non sono state applicate nel presente studio in quanto non concordi con l'applicazione prevista per il sensore.

Infine, durante lo studio è stato verificato come lo script Python sviluppato costituisca uno strumento utile ed affidabile per effettuare misure su profili bidimensionali generici, a partire da un profilo campione su cui eseguire il picking dei punti di riferimento. Questo rappresenta uno strumento adatto ad un uso puramente sperimentale e non produttivo. Inoltre, in base agli specifici utilizzi, potrebbe richiedere alcune modifiche, prevalentemente dove indicato dai commenti riportati nel codice. Uno dei maggiori vantaggi risiede nel formato di lettura dati utilizzato: il CSV, il quale rappresenta uno standard universalmente noto, adottabile in molti strumenti di misura come formato di esportazione dati.

5.2 Possibili miglioramenti

Vengono ora esposti alcuni possibili miglioramenti da applicare al setup di misura, allo scopo di ridurre l'incertezza per le misure assiali e quindi poter utilizzare adeguatamente lo strumento anche per effettuare quest'ultime. Come già anticipato, queste modifiche non sono state effettivamente applicate e quindi

verificate in quanto incompatibili con l'utilizzo previsto per il sensore da parte dell'azienda. Tuttavia, le informazioni presentate in seguito potrebbero risultare utili per migliorare le prestazioni del sensore se questo venisse implementato in un banco di misura con caratteristiche differenti.

In primo luogo, è consigliabile mantenere la sonda statica e movimentare il componente per ottenere la scansione dei profili. Questo è dovuto all'elevata snellezza che caratterizza la sonda utilizzata, data dal rapporto tra lunghezza e diametro, la quale ne può determinare un'oscillazione continua quando questa è posta in movimento. Seppur tale possibile oscillazione risulti di entità limitata, questa interessa soprattutto la sua estremità, in cui si ha l'emissione e la ricezione del fascio luminoso. Pertanto, l'errore provocato su una misura con tolleranza ridotta risulta decisamente rilevante. Movimentando adeguatamente il componente, invece, qualora questo non presenti una forma particolarmente allungata, non vengono in generale riscontrati problemi legati all'oscillazione. Tale soluzione risulta difficilmente applicabile alla tipologia di isola di controllo automatico prevista per il componente in questione, ovvero con struttura a stazioni di misura consecutive e movimentazione mediante tavola rotante: scelta dettata dalla numerosità delle misure da effettuare e in cui, in ciascuna stazione, vengono movimentati necessariamente gli strumenti di misura e non i componenti.

Un ulteriore accorgimento è quello di scansionare molteplici volte gli stessi profili, al fine di conferire maggiore solidità alle misure e compensare, così, l'incertezza non eccellente riscontrata nelle misure assiali. L'elevata frequenza di campionamento del sensore favorisce la velocità di scansione, il cui aumento, entro certi limiti, non influenza la qualità delle misure.

Bibliografia

- [1] <https://www.keyence.it/products/measure/laser-2d/lj-x8000/>
- [2] <https://www.opto-e.it/products/boroscopic-probe-PCBPN013-WG>
- [3] <https://www.mvtec.com/>
- [4] P. Chiariotti, M. Fitti, P. Castellini, S. Zitti, M. Zannini e N. Paone, "High-Accuracy Dimensional Measurement of Cylindrical Components by an Automated Test Station Based on Confocal Chromatic Sensor," *2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT*, 2018
- [5] A. Filannino, Relatore: Prof.ssa Maria Isabella Leone, "L'Industria 4.0 e la Smart Factory sostenibile", Tesi di Laurea Università Luiss Guido Carli, 2019
- [6] <https://github.com/grgzpp/2dProfileMeasure>
- [7] Numpy documentation – Where function:
<https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.where.html>
- [8] National Institute of Standards and Technology - Bias and Accuracy:
<https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/mpc/section1/mpc113.htm>
- [9] ISO/TS 16949: Standard di qualità nel settore Automotive