

POLITECNICO DI TORINO



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Laurea Magistrale

Ripetibilità di posizionamento di una macchina automatica
a sonde mobili per il collaudo di schede elettroniche

Candidato:

Gabriele Gaida

Relatore:

Prof. Massimo Sorli

Correlatore:

Prof. Andrea Demartin

Ottobre 2020

Ringraziamenti

Ringrazio infinitamente il personale della S.E.I.C.A. per la collaborazione e il sostegno mostrato nel corso di tutta la mia attività presso l'azienda.

In particolare ringrazio l'ingegnere Carlo Perucca che con grande passione per il suo lavoro mi ha fatto conoscere e visitare l'azienda, il direttore dell'ufficio in cui sono stato inserito, l'ingegnere Andrea Salto che mi ha permesso di conoscere per la prima volta da vicino il mondo del lavoro, l'ingegnere Giovanni Pisano con il quale ho definito le linee guida della mia attività di tirocinio, che si è occupato di mettere a mia disposizione le macchine su cui condurre lo studio e di coordinare il personale di supporto al mio lavoro.

Un grazie di cuore all'ingegnere Daniela Papetti che mi ha dedicato molto tempo con infinita pazienza e disponibilità, che mi ha dato consigli preziosi e suggerimenti pratici sulle scelte importanti fatte durante il percorso e che mi ha guidato passo dopo passo nell'utilizzo dei sistemi automatici usati in azienda.

Indice

Introduzione	6
Descrizione del sistema	7
Introduzione allo studio di ripetibilità	10
Sonde	11
Sondino capacitivo	13
Gioco della sonda	13
Scelta del tipo di sonda	13
Calibrazione del sistema	14
Pressione e rapidità di posizionamento	19
Montaggio della sonda	20
Fissaggio della scheda su macchina manuale	21
Fissaggio della scheda su macchina automatica	22
Caratterizzazione delle schede	24
Sistema di misura: StarLite 200	24
Misurazione delle piste di calibrazione	29
Valutazione dell'errore del processo di fabbricazione delle schede OVP	34
Definizione delle coordinate "vere" dei punti	37
Punti di posizionamento	37
Punti di prova	39
Coordinate rispetto ai fiducial FD5 e FD6	40
Coordinate dei fiducial FD5 e FD6	41
Coordinate dei punti rispetto al sistema	42
Scelta della testa (sonda) sul lato top della scheda	43
Coordinate della sonda 4	43
File ASCII	44
Griglia dei comandi e conversione dei file ASCII	46
Esecuzione delle prove di posizionamento	48
1. Carico della scheda	48
2. Impostazione della pressione esercitata dalla sonda sulla scheda	48
3. Esclusione delle teste	49
4. Allineamento dei fiducial	49
5. Esecuzione della prova	49
Immagini delle impronte visualizzate su StarLite 200	53

Analisi delle impronte su Solidworks.....	58
Definizione di ripetibilità di posizionamento	61
Risultati	63
Piste di calibrazione verticali, ripetibilità lungo y	63
Piste di calibrazione verticali, ripetibilità lungo x	66
Piste di calibrazione orizzontali, ripetibilità lungo x	70
Piste di calibrazione orizzontali, ripetibilità lungo y	73
Ripetibilità di posizionamento del sistema	77
Ripetibilità di posizionamento massima del sistema.....	77
Valutazione dei risultati ottenuti	78
Ripetibilità di posizionamento reale del sistema.....	81
Definizione di precisione (accuratezza) di posizionamento	82
Precisione e Risoluzione di StarLite 200	82
Precisione della macchina in prova	83
Piste di calibrazione verticali, precisione lungo y	84
Piste di calibrazione verticali, precisione lungo x	86
Piste di calibrazione orizzontali, precisione lungo x	89
Piste di calibrazione orizzontali, precisione lungo y	92
Precisione di posizionamento del sistema	95
Precisione di posizionamento massima del sistema	95
Valutazione dei risultati ottenuti	95
Indagine sulla precisione di posizionamento.....	95
Effetto della macchina usata.....	97
Effetto di StarLite 200, posizione e orientamento della scheda.....	98
Range, media, deviazione standard e distribuzione normale di probabilità.....	100
Applicazione al caso di studio	101
Precisione di posizionamento, famiglia di quote 8, 9 e 10	105
Confronto tra i valori di precisione	107
Conclusioni	108
Bibliografia.....	113

Introduzione

Lo scopo della tesi è la determinazione di alcune caratteristiche statiche come la ripetibilità di posizionamento lungo gli assi lineari x e y e la precisione di posizionamento di una delle sonde di una macchina a sonde mobili per il controllo automatico di schede elettroniche. La macchina studiata è la Flying Probe Tester Pilot 4D V8 prodotta dalla S.E.I.C.A, con sede a Strambino (TO).

Per raggiungere questi obiettivi si segue un approccio sperimentale. Inizialmente vengono rilevate alcune quote sulle schede elettroniche messe a disposizione dall'azienda (si esegue una caratterizzazione delle schede). Queste misure sono considerate esatte in quanto effettuate tramite uno strumento ad elevata risoluzione; esse costituiscono dunque i valori "veri" o di riferimento. Con i dati ottenuti si definiscono una serie di punti in cui il sistema dovrà posizionarsi; le coordinate di tali punti sono espresse in x e y rispetto a riferimenti specifici presenti sulle schede. Le coordinate realmente raggiunte dalla sonda possono poi essere rilevate a seguito del posizionamento tramite un'analisi della scheda ad alta risoluzione in modo da cogliere gli effettivi punti di posizionamento, individuabili per la presenza di un'impronta lasciata dalla sonda. Tutta l'analisi è riferita ad una sola delle otto sonde presenti nel sistema. Adattando i concetti di ripetibilità di posizionamento e di precisione di posizionamento per i robot al caso in studio, si esegue un'elaborazione dei dati ottenuti confrontando le coordinate di riferimento dei punti scelti con quelle effettivamente raggiunte dal sistema che è soggetto ad errori statici di posizionamento.

In particolare, a questo scopo l'azienda ha messo a disposizione dieci schede elettroniche campione, normalmente impiegate per la calibrazione della macchina, appartenenti a due lotti distinti, il sistema di misura tridimensionale ottico manuale StarLite 200, di cui si riportano i principi di funzionamento base utili ai fini dello studio effettuato e necessario per definire i "valori veri" delle quote di interesse, una macchina Flying Probe Tester Pilot 4D V8 automatica sulla quale condurre le prove di posizionamento e una manuale per acquisire tutte le conoscenze necessarie ai fini di questo studio.

Le caratteristiche statiche della macchina, quali quelle cercate, sono fortemente influenzate dagli errori statici; in particolare, se si confrontano errori dinamici ed errori statici, questi ultimi hanno una maggiore influenza nel posizionamento finale della sonda. Essi sono riconducibili a imperfezioni, giochi e all'usura delle parti dovute al funzionamento del sistema. A differenza degli errori dinamici, gli errori statici non dipendono dai modi di vibrare del sistema ovvero dalla sua massa e dalla sua rigidità.

L'attività di tirocinio è stata fondamentale per disporre degli strumenti di misura, per ottenere una certa familiarità con le macchine disponibili (versione manuale e automatica) e con le varie procedure come quella di fissaggio della scheda elettronica sulla macchina manuale e automatica, la calibrazione, il rilevamento dei dati, l'utilizzo del sistema di misura StarLite 200.

Descrizione del sistema

Flying Probe Tester Pilot 4D V8 è un sistema di collaudo a sonde mobili per schede elettroniche. La macchina è caratterizzata da un'architettura verticale per ridurre l'effetto di imbarcamenti e vibrazioni delle schede da collaudare e da otto sonde mobili: quattro operano su un lato della scheda e quattro sul lato opposto. La numerazione delle sonde avviene secondo lo schema della *figura 1*, in cui si osserva il sistema dall'alto.

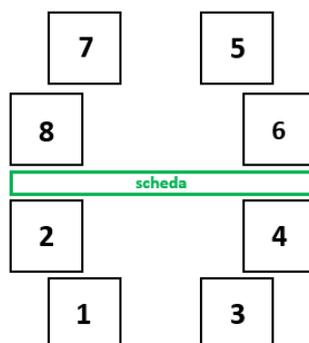


Figura 1 - Numerazione delle otto sonde mobili

Ciascuna sonda si muove nel volume di lavoro secondo le coordinate cartesiane x , y e z che corrispondono rispettivamente all'asse orizzontale, quello verticale e alla direzione perpendicolare al piano su cui si trova la scheda.

L'attuazione del sistema consente la traslazione della sonda lungo gli assi x e y tramite motori sincroni a magneti permanenti (uno per ognuno degli assi) direttamente collegati a viti a ricircolo di sfere. Il motore è costituito da un rotore a magneti permanenti e da uno statore con avvolgimenti percorsi da corrente in modo da generare un campo magnetico rotante. Le correnti vengono generate in forma sinusoidale trifase a partire da un bus in continua. La commutazione della corrente circolante negli avvolgimenti dello statore, e quindi la variazione dell'orientamento del campo magnetico da essi generato, avviene elettronicamente. Ciò comporta una minore resistenza meccanica, elimina la possibilità che si formino scintille al crescere della velocità di rotazione, e riduce notevolmente la necessità di manutenzione periodica rispetto al motore con collettore a lamelle e spazzole.



Figura 2 - Azionamento asse x

Lungo l'asse z, perpendicolare al piano della scheda, il movimento della sonda è garantito da un motore lineare che a differenza degli assi x e y non richiede la trasformazione del moto da rotativo a lineare. La soluzione adottata, costruita internamente all'azienda, prevede una configurazione a U. I motori lineari a magneti permanenti (PMLM) garantiscono una maggiore precisione rispetto ai motori rotativi e ciò è da ricondurre al fatto che non è richiesta una trasformazione del moto. Vengono impiegati per applicazioni ad alta velocità.

In particolare, i motori lineari a U (*Figura 3*) sono ampiamente utilizzati in operazioni che richiedono fluidità di movimento. I campi magnetici generati dai magneti permanenti affacciati sui due lati interni della pista interagiscono con i campi elettromagnetici prodotti dall'armatura alimentata in tensione per produrre un movimento lineare.

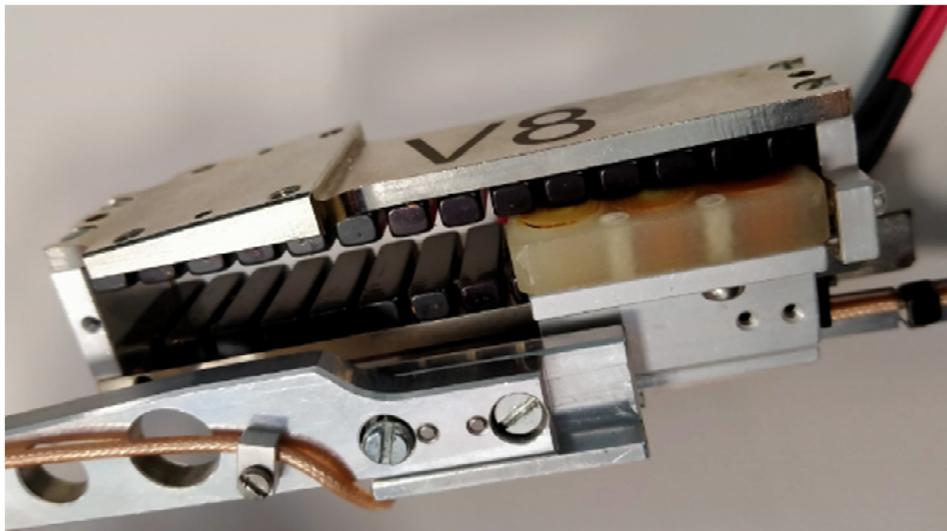


Figura 3 - Esempio di motore lineare

Il motore rende possibile lo spostamento lungo l'asse z della sonda costituita da un ago e vincolata all'estremità libera di elemento rigido, come si può osservare nella *figura 4*.

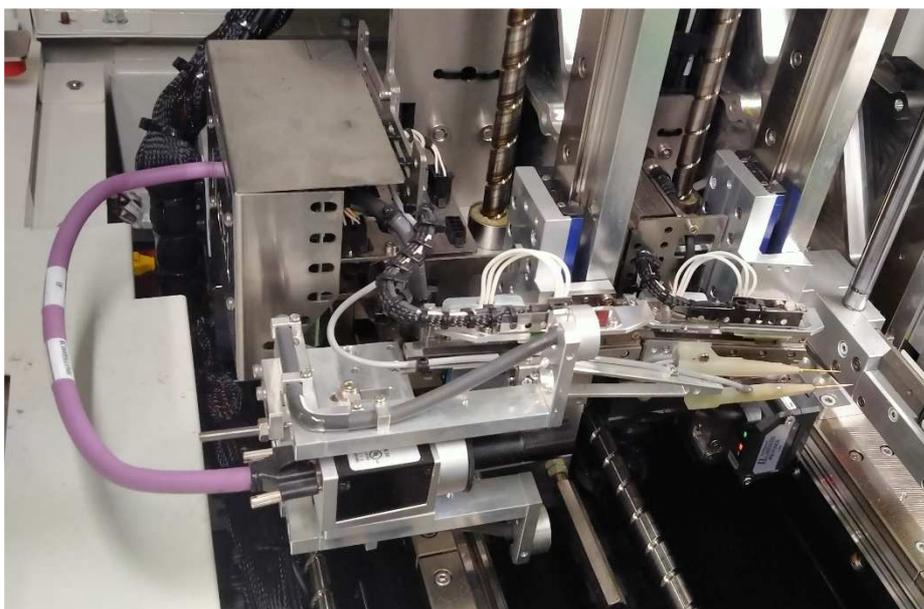


Figura 4 - Motore lineare asse z

Azionamenti e Controllo

In totale ci sono 7 azionamenti su ciascun lato della macchina; considerando il lato su cui sono presenti le sonde da 1 a 4, i primi quattro controllano insieme gli assi x e y delle quattro sonde presenti su quel lato, i rimanenti tre controllano z_1 , z_3 e l'ultimo z_2 e z_4 contemporaneamente. Esistono degli assi opzionali per la verifica dei led e per il sondino capacitivo.

Dal momento che le 8 sonde presenti nel sistema sono simili tra loro, esso può essere descritto con un singolo sistema di riferimento e quindi relativamente ad una singola sonda. L'azionamento della sonda è simile lungo le coordinate X e Y e può essere modellizzato per ciascuna di esse tramite tre anelli concentrici di posizione, di velocità e di corrente. Lo schema a blocchi semplificato corrispondente è mostrato nella figura 5 (coordinata x):

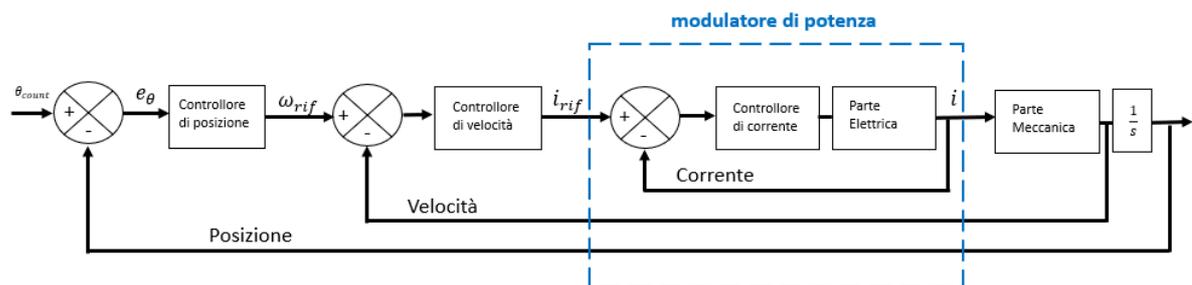


Figura 5 - Schema a blocchi generale

L'anello di corrente è quello più interno (modulatore di potenza) e consente il controllo della coppia applicata alla vite a ricircolo di sfere. La gestione della potenza nel motore viene effettuata mediante la tecnica SVPWM (Space Vector PWM) secondo la teoria del FOC (Field Oriented Control). L'anello di velocità e di posizione sono concentrici rispetto al primo e garantiscono la regolazione della velocità e della posizione rispettivamente.

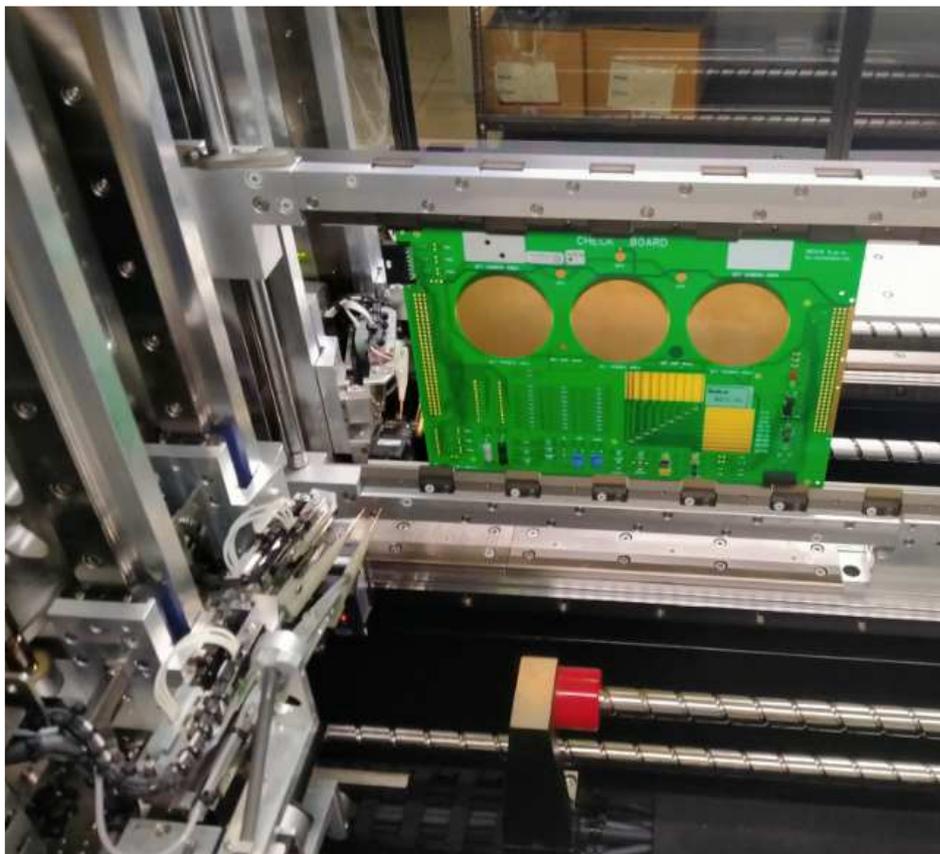
Il controllo è di tipo PID. I feedback di posizione lungo gli assi x e y sono misurati tramite **encoder** incrementale collocati in corrispondenza dei motori brushless. L'encoder è usato sia per avere un'informazione relativa alla posizione raggiunta che per conoscere la velocità di rotazione del motore. La posizione lungo z è misurata tramite **riga ottica** incrementale.

Introduzione allo studio di ripetibilità

La scelta del tipo di sonda così come tutti i settaggi relativi alla procedura di calibrazione e all'esecuzione delle prove di posizionamento è finalizzata alla visualizzazione ottimale delle impronte sulle schede. Di norma invece, i vari parametri del sistema e di board vengono regolati in modo da ridurre al minimo l'impronta della sonda sulla scheda in quanto la finalità è l'esecuzione di misure di natura elettrica.

Tutte le parti mobili installate sulle teste di misura di un sistema a sonde mobili devono essere calibrate periodicamente e in caso di sostituzione di parti (come ad esempio le sonde) al fine di garantire le migliori prestazioni.

La procedura di calibrazione prevede la rilevazione da parte della macchina di una serie di punti su una check board (indicata anche con la sigla OVP, Operational Verification Procedure con riferimento alla procedura di calibrazione). Per gli assi x e y la rilevazione è fatta lungo una serie di piste poste verticalmente e orizzontalmente mentre per l'asse z essa avviene lungo il perimetro del disco di rame centrale della scheda OVP, visibile nella *figura 6*, relativa alla fase iniziale della procedura di calibrazione.



*Figura 6 - Fase iniziale della calibrazione
(macchina manuale)*

Sonde

Un dato caratteristico della sonda è il diametro della sua punta [1], espresso in mils, millesimo di pollice ($1 \text{ mils} = 0,0254 \text{ mm}$). I diametri delle punte hanno dimensioni standard e ciascun tipo di sonda è impiegato per specifiche funzioni e in base al tipo di scheda controllata. In generale, il costruttore di queste sonde dichiara una durata delle stesse pari ad alcuni milioni di tocchi, oltre ai quali è necessaria la sostituzione [1].

Le sonde da tre mils leggere ad esempio, sono normalmente impiegate per fare reverse engineering; data una scheda di cui non si conoscono gli schemi circuitali e i componenti presenti, tramite questo tipo di sonda se ne rileva la geometria in termini di coordinate x,y e z (la funzione della sonda è dunque simile a quella di un tastatore). Inoltre, applicando delle tensioni in una serie di punti della scheda è possibile rilevare i relativi andamenti delle correnti e sovrapponendo gli andamenti ottenuti in punti diversi della scheda si può per confronto, definire le piste presenti su di essa perché punti appartenenti alla stessa pista (quindi non isolati l'uno rispetto all'altro ma cortocircuitati) hanno un andamento molto simile. In questo modo oltre alla geometria si ottengono informazioni anche sugli schemi elettrici che caratterizzano la scheda.

Come si può osservare nella figura 7, la sonda da 3 Mils riporta inciso sullo stelo il suo codice identificativo. Queste sonde hanno una molla interna che ha la funzione di smorzare l'urto della punta contro la scheda. La particolare geometria della sonda riduce gli effetti di flessione prodotti dal contatto tra la sonda e la scheda da collaudare.



Figura 7 -Sonda da 3Mils leggera

Altri tipi di sonda comunemente impiegati sono riportati nelle immagini successive (Figure 8, 9, 10 e 12). La sonda da 3 Mils Strong (Figura 8) è più resistente rispetto alle corrispondenti sonde leggere. Ci sono poi le sonde con punta piramidale (Figura 9), a corona (Figura 10) e le sonde da 6 mils (Figura 12).

Le sonde con punta a corona (denominate "crown") hanno la punta suddivisa in quattro parti distinte come a formare una corona (Figura 11).



Figura 8 - Sonda da 3 Mils strong



Figura 9 - Sonda con punta piramidale



Figura 10 - Sonda con punta a corona (Crown)

Nella figura *figura 11* a sinistra viene riportato un ingrandimento della punta a corona, ottenuto durante una procedura di calibrazione effettuata su V8 manuale, in cui sono distinguibili le quattro estremità differenti che la caratterizzano. Uno schizzo della stessa punta, ottenuto dal catalogo della casa costruttrice [1] è invece visibile nella stessa *figura 11* a destra.

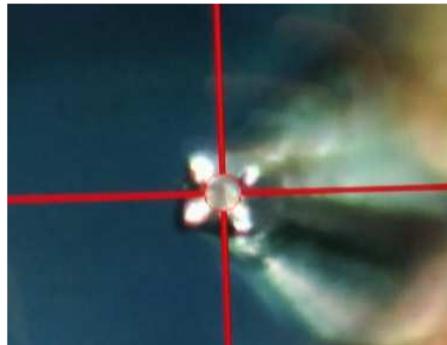


Figura 11 - Sonda con punta a corona, dettaglio della corona



Figura 12 - Sonda da 6 Mils

Sondino capacitivo



Il sondino capacitivo (*figura 13*) si distingue dalle altre sonde per la sua estremità piatta e per il fatto che il suo scopo è unicamente quello di effettuare misure di capacità su circuiti integrati. Applicando una piccola tensione sul chip per non danneggiarlo (tra la massa e un pin sulla scheda ad esempio), tramite la sonda capacitiva si può misurare la capacità del componente per determinate condizioni.

La misura è effettuata sul case del componente.

Se le condizioni rimangono costanti, per schede che devono essere uguali ci si aspettano valori di capacità costanti sui chip corrispondenti. Il confronto da una scheda all'altra viene effettuato per similitudine.

Figura 13 - Sondino capacitivo

Gioco della sonda

A causa del gioco inevitabile tra lo stelo e la punta (inevitabile affinché questa possa rientrare comprimendo la molla interna al contatto con la scheda), l'estremità della sonda può subire effetti di flessione allontanandosi dalla condizione ideale di verticalità rispetto al piano della scheda. Il fornitore delle sonde fornisce a catalogo [1] il diagramma della *figura 14* che mostra l'effetto di questo gioco. La condizione ottimale corrispondente a gioco minimo è rappresentata dal cerchio più piccolo con un diametro pari a *50 micron*. Nella *figura 14* le misure sono espresse in millimetri e in pollici tra parentesi.

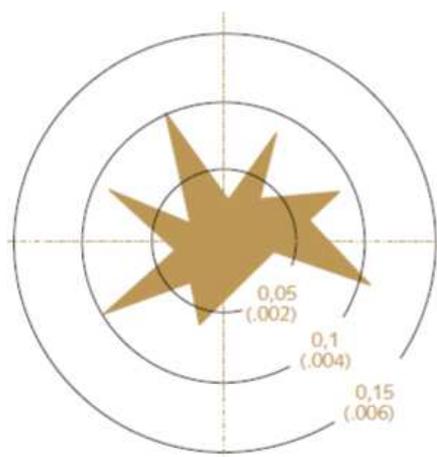


Figura 14 – Gioco della sonda

Scelta del tipo di sonda

Per poter osservare con chiarezza la traccia lasciata dalla sonda sulla scheda con il suo posizionamento è conveniente impiegare sonde da tre mils strong, più resistenti rispetto alle altre. Questo tipo di sonda garantisce infatti la presenza di una impronta ben definita sulla scheda in corrispondenza del punto di contatto. Le sonde scelte per l'esecuzione delle prove di posizionamento sono prelevate da magazzino e montate sulla macchina. A seguito della sostituzione delle sonde viene eseguita la calibrazione in modo da ottenere la precisione e la ripetibilità dichiarate da S.E.I.C.A.

Calibrazione del sistema

Per la calibrazione si usa il software VIVA, disponibile sul calcolatore integrato nella macchina, nella configurazione *System Library*, raggiungibile tramite il menu a tendina in alto a sinistra nella schermata principale dell'ambiente VIVA (Figura 15).

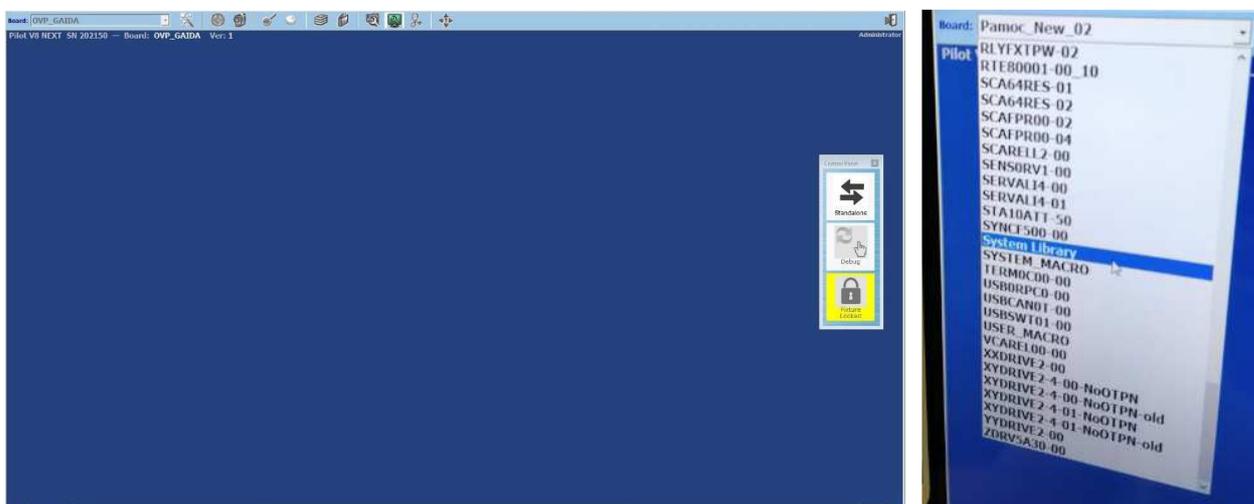


Figura 15 - Schermata principale dell'ambiente VIVA (sinistra) e menu a tendina "Board" (destra)

La calibrazione riguarda l'intero sistema quindi ogni aspetto ad essa collegato viene regolato mediante la configurazione del sistema, agendo tramite la relativa finestra "System Configuration", raggiungibile a partire dalla schermata principale di VIVA. In particolare, nella parte alta della schermata principale di VIVA (Figura 16) si distinguono due possibili alternative: la configurazione di sistema (System Configuration) riquadrata in rosso e la configurazione di scheda (Board Configuration) riquadrata in blu.



Figura 16 – Barra delle configurazioni in VIVA

Dalla finestra della configurazione di sistema si passa alla sezione "Calibrations", per l'avvio della calibrazione (Figura 17). In questa sezione è necessario indicare quali sonde sono state sostituite perché in questo modo viene azzerato il relativo contatore che tiene conto dei tocchi effettuati. Il numero dei tocchi effettuati per ogni sonda è utile per fare una stima dello stato di usura dei probe e prevedere con anticipo una loro sostituzione. La sostituzione della sonda avviene anche qualora la macchina flying probe non sia usata secondo le avvertenze riportate nel manuale operatore e pertanto la sua punta risulti piegata a seguito di un urto oppure di un posizionamento rapido effettuato in corrispondenza di un foro.

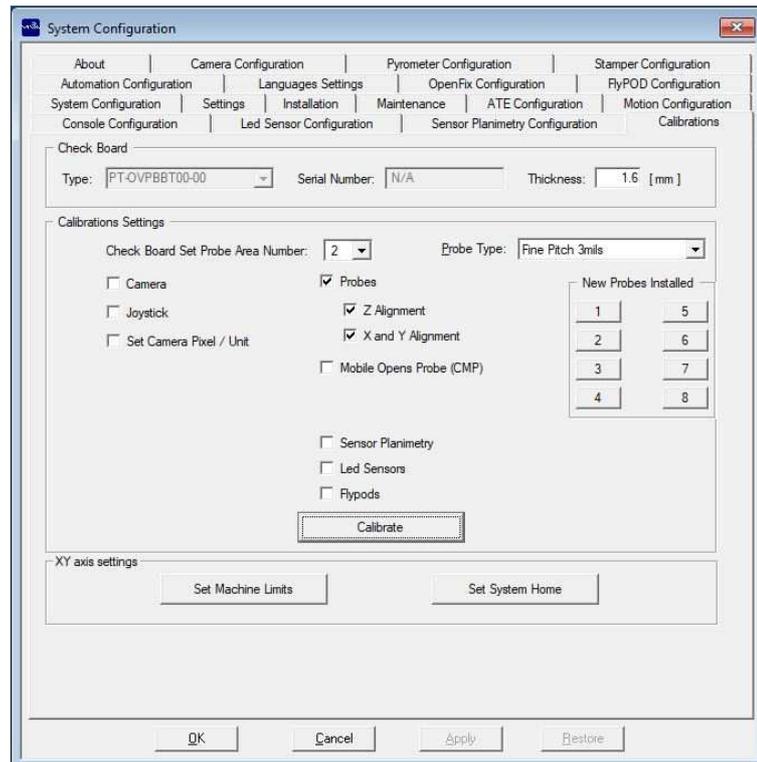


Figura 17 - Finestra per l'avvio della calibrazione

In particolare, nella sezione “New Probes Installed” della finestra “Calibrations”, prima dell’avvio della calibrazione vengono indicate le sonde che sono state sostituite in modo da azzerare il relativo contatore dei tocchi. Come esempio è stata sostituita inizialmente solo la sonda della testa 6 in modo da osservare l’azzeramento del relativo contatore nella finestra “Maintenance” (Figura 18).

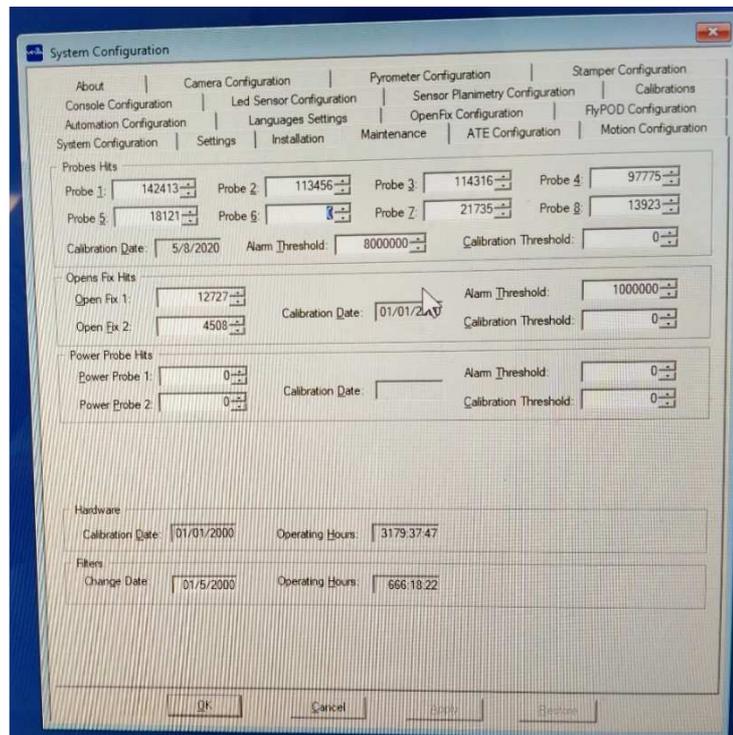


Figura 18 - Contatori dei tocchi delle sonde, azzeramento contatore sonda della testa 6

Con riferimento alla *figura 17*, nella finestra per l'avvio della calibrazione si devono indicare anche il tipo di sonda usata ("Probe Type") e gli assi su cui la calibrazione deve essere effettuata ("Probes"). Il numero 2 indicato nella sezione "Check Board Set Probe Area Number" si riferisce al cerchio centrale delle schede OVP. Le schede OVP sono standard, hanno sempre tre cerchi per cui indicando 2 si fa riferimento sempre al cerchio centrale mentre con 1 e 3 si farebbe riferimento a cerchi diversi a seconda di come la scheda viene orientata nel volume di lavoro. È possibile anche effettuare la calibrazione relativa al sondino capacitivo e al sensore di planarità.

Premendo "Calibrate" il programma richiede l'inserimento della scheda nella macchina (fissaggio della scheda) e la successiva chiusura delle porte come sicurezza. Un secondo messaggio chiede conferma che la direzione lungo la quale si trova la sonda 1 sia all'interno del cerchio di rame centrale (*Figura 19*). Se così non fosse, essendo il posizionamento iniziale della scheda nella macchina a discrezione dell'operatore, si può effettuare un aggiustamento della posizione manualmente tramite joystick da tastiera come mostrato nella *figura 20*.



Figura 19 - Messaggio per l'allineamento dell'asse della sonda 1 con il cerchio centrale dell'OVP



Figura 20 - Allineamento della sonda 1 con il disco centrale della scheda OVP (inizio calibrazione)

All'avvio della calibrazione, partendo con la prima sonda fino ad arrivare all'ottava, si rilevano una serie di punti lungo le piste in rame presenti sulla check board in direzione x e y per calibrare i rispettivi assi e una serie di punti lungo il perimetro del cerchio centrale per calibrare l'asse z. I punti rilevati vengono infine confrontati con un'immagine ad alta risoluzione

ottenuta tramite fotocamera. L'allineamento tra i riferimenti e le immagini ad alta risoluzione viene effettuato manualmente tramite mouse o tastiera, su entrambi i lati della scheda (top e bottom), nella direzione x e nella direzione y. Si riportano le immagini relative all'allineamento lato top (Figure 21 e 22).

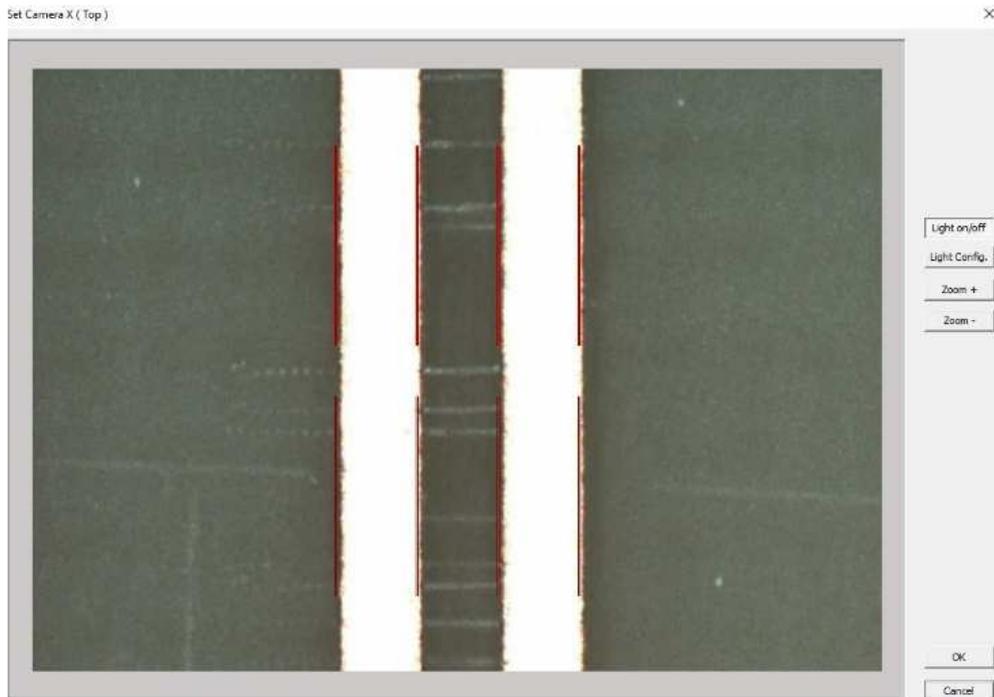


Figura 21 - Allineamento dei riferimenti con le immagini ad alta risoluzione X-front

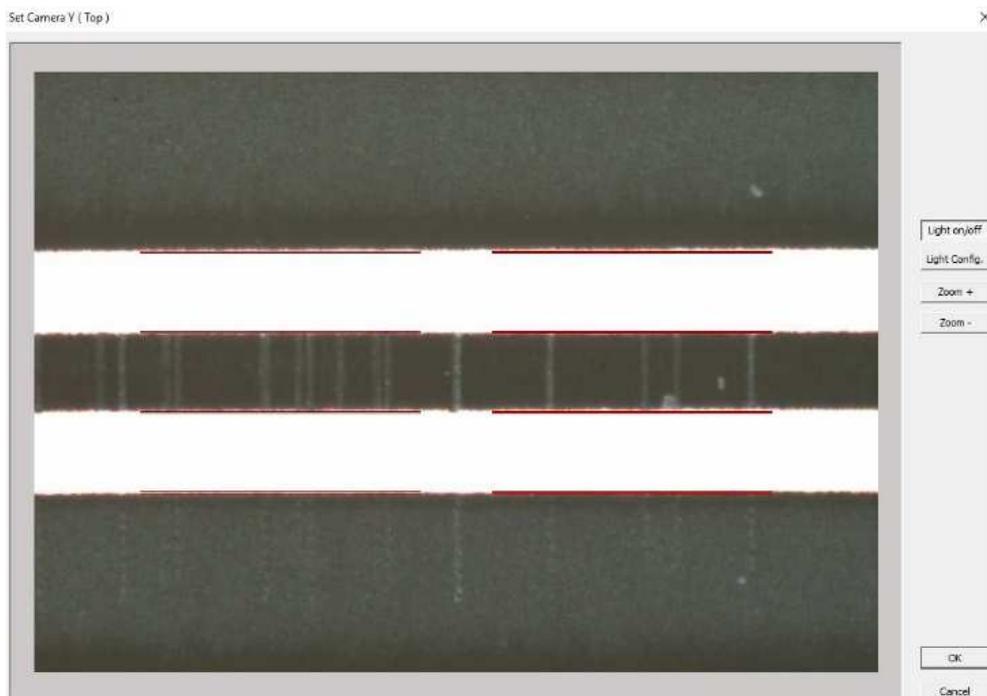


Figura 22 - Allineamento dei riferimenti con le immagini ad alta risoluzione Y-front

Sulla testa 1 si trova la telecamera lato front, ovvero quella che riprende la scheda sul lato superiore mentre sulla testa 5 si trova la telecamera rear che riprende la scheda sul lato inferiore. La procedura di calibrazione prevede anche un allineamento tra l'estremità della sonda, fotografata dalla fotocamera presente sul lato opposto e un riferimento (*Figura 23*).

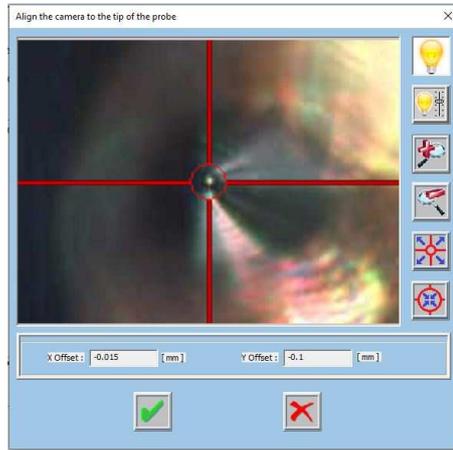


Figura 23 - Completamento della calibrazione

Pressione e rapidità di posizionamento

Un altro aspetto da considerare per avere un'impronta ben definita, oltre al tipo di sonda, è la pressione esercitata dalla sonda nel contatto. Essa può essere regolata agendo sulla quota z a cui l'estremità della sonda deve posizionarsi rispetto al piano della scheda che si trova a quota zero. Scegliendo un valore di z negativo si richiede alla sonda di raggiungere una coordinata al di sotto della superficie della scheda. Non essendo questo possibile, il contatto tra la scheda e la punta della sonda provoca un accorciamento della molla in essa presente, accorciamento che garantisce l'azione di una certa pressione, tanto maggiore quanto più grande in valore assoluto risulta la quota z di posizionamento richiesta.

La regolazione della pressione è un parametro di "Board" ovvero è legata alla singola scheda e non al sistema; per questa ragione si deve partire dalla finestra relativa alla scheda, denominata "Board Configuration" (icona riquadrata in blu nella precedente *figura 16*).

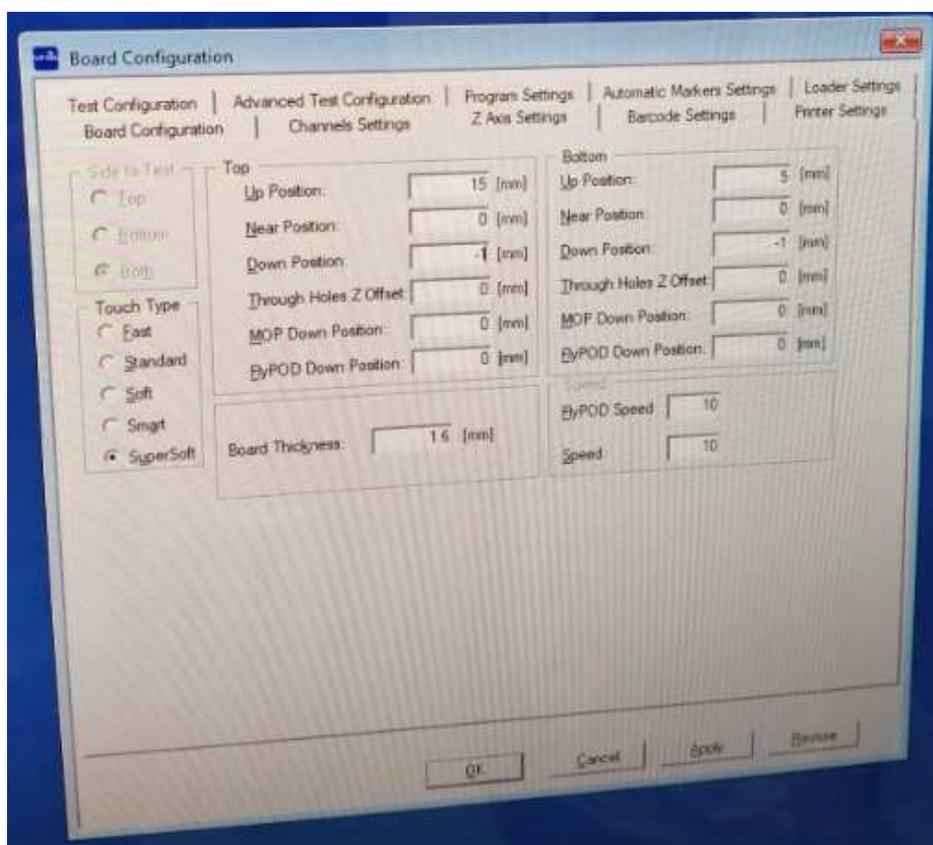


Figura 24 - Regolazione della pressione esercitata dalla sonda sulla scheda

La regolazione della quota z ("Down Position", *figura 24*), può essere effettuata in modo indipendente sul lato top e sul lato bottom della scheda. In particolare, siccome i punti in cui vengono effettuati i posizionamenti nel caso in studio sono solo sul lato top della scheda, si imposta un valore di z negativo solo nella sezione "Top".

Inoltre, influisce sulla visibilità dell'impronta anche la rapidità con la quale si effettua l'avvicinamento della sonda alla scheda. Normalmente il sistema lavora nella modalità "Fast" che garantisce un'ottimizzazione dei tempi di lavoro senza compromettere la bontà delle

misurazioni effettuate (c'è il tempo necessario affinché ci sia una corretta rilevazione della tensione sulla scheda nel punto di interesse senza perdita di informazione).

Per garantire una migliore definizione dell'impronta nella sezione "Touch Type" del "Board Configuration", si sceglie invece la modalità "SuperSoft". Inoltre, al fine di aumentare ulteriormente l'effetto di incisione della scheda da parte della sonda, le varie prove di posizionamento sono effettuate nella modalità step by step e tra un posizionamento e l'altro si attende un lasso di tempo pari a circa cinque secondi.

Montaggio della sonda

Nel caso in esame la sostituzione delle sonde è avvenuta per impiegare quelle scelte al fine di ottenere un'impronta ottimale sulle schede. In generale invece, la sostituzione periodica delle sonde avviene poiché l'ago della sonda di misura è soggetto ad un'usura progressiva nel tempo. La sostituzione della sonda avviene tramite chiave dinamometrica (*Figura 25*). Come accennato in precedenza, la sostituzione di una sonda o di tutte e otto le sonde presenti sulla macchina comporta la calibrazione del sistema.



Figura 25 - Strumento per avvitare e svitare le sonde

L'utilizzo della chiave dinamometrica combinato alla presenza di una filettatura all'estremità dello stelo delle sonde, garantisce che essa siano montate tutte allo stesso modo nelle rispettive sedi.

Fissaggio della scheda su macchina manuale

Il fissaggio della scheda in posizione verticale all'interno della macchina avviene portando manualmente a battuta la scheda su uno dei due binari predisposti, uno superiore mobile e uno inferiore fisso (Figura 26). Tramite tre pulsanti (Figura 27), in corrispondenza della postazione dell'operatore, si può ad esempio vincolare la scheda in corrispondenza del bordo superiore al binario superiore (pulsante upper), si trasla verso il basso il binario, si blocca la scheda in corrispondenza del suo bordo inferiore (pulsante lower) e infine si blocca lo spostamento del binario superiore tramite il terzo pulsante (pulsante adjust). Il posizionamento manuale della scheda all'interno della area di test può essere effettuato a piacere, se necessario è possibile utilizzare un riferimento a sinistra della area di test per posizionare la scheda sempre nello stesso punto.

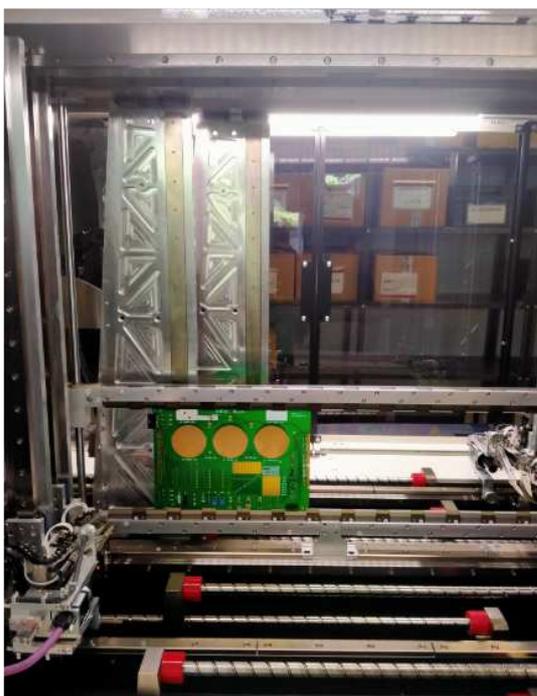


Figura 26 - Fissaggio della check board



Figura 27 - Pulsanti per il fissaggio della scheda su V8 manuale

Fissaggio della scheda su macchina automatica

La gestione del sistema automatico avviene tramite un elaboratore integrato che prevede un monitor e un display touch posto al disotto di esso (simile al sistema manuale).

La prima operazione da eseguire sulla macchina automatica per lavorare con schede tutte uguali (nel caso in esame sono tutte schede OVP) è la regolazione della distanza tra i binari; la macchina automatica ha un binario inferiore fisso e uno superiore mobile che viene regolato in modo automatico tramite calcolatore.

Con riferimento alla *figura 28* la regolazione dei binari si effettua con le ante chiuse premendo “Standalone” sul monitor superiore nella sezione “Control Panel” della schermata principale di VIVA, poi premendo “Debug” sul display inferiore e infine premendo “Homing degli assi” nella parte alta del monitor superiore (riquadro giallo nella *figura 28*). Una volta completata la procedura di homing, si aprono le ante, si preme prima su “Rail Homing” e poi su “Rail Menu” sul display inferiore. Nella finestra che compare a video si inserisce tramite tastiera l’altezza della scheda che nel caso in esame è pari a 160 mm (scheda OVP). Cliccando su “Go to Rail Position” il sistema regola il binario superiore portandolo all’altezza desiderata.



Figura 28 - Regolazione automatica dei binari

La scheda viene caricata in modo manuale e in posizione verticale nel sistema attraverso uno sportello posto a sinistra della macchina (*Figura 29*). Tramite un joystick e un nastro trasportatore viene trasferita nel punto in cui viene effettuato il bloccaggio. Il pulsante “open/close” sul display riportato nell’immagine precedente (*Figura 28*) consente di aprire e chiudere i binari (la gestione dei binari superiore e inferiore è contemporanea a differenza della macchina manuale) mentre con il pulsante “Stopper Override” si gestisce un riferimento che consente il posizionamento della scheda sempre nello stesso punto. La scheda viene scaricata aprendo i binari, disattivando il riferimento che ne consente un posizionamento definito e usando il joystick.

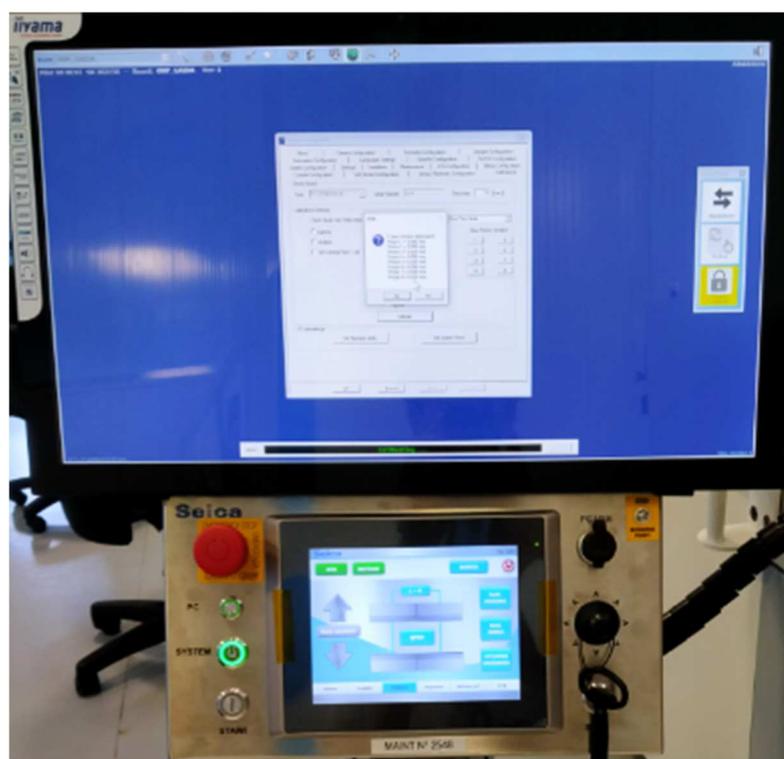
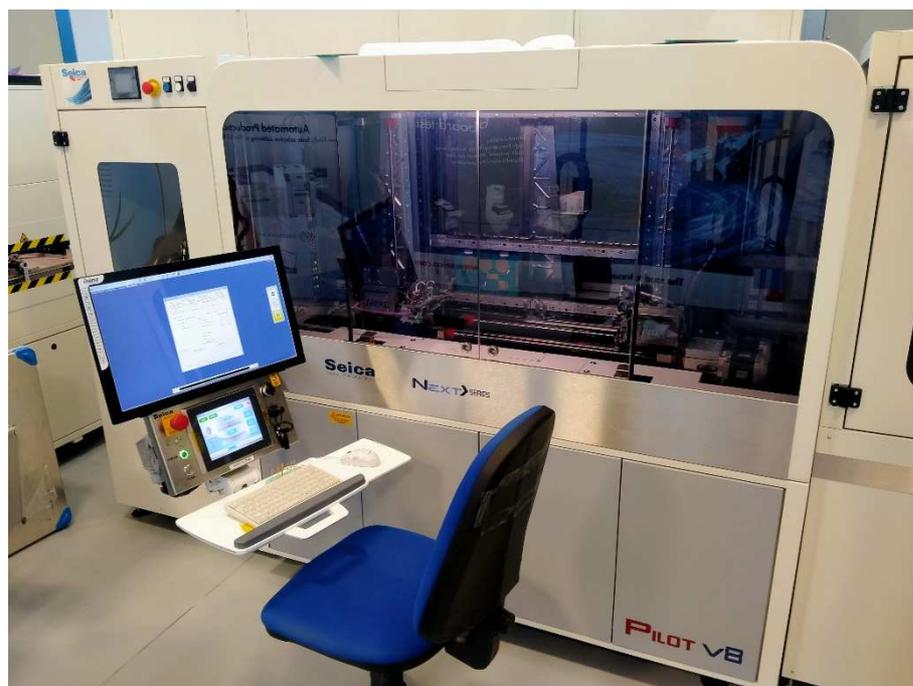


Figura 29 – In alto: Flying Probe Tester Pilot 4D V8 automatico, a sinistra delle ante in vetro si vede lo sportello in cui si inseriscono le schede. In basso: dettaglio di monitor e display touch

Caratterizzazione delle schede

Si definiscono le dimensioni caratteristiche di dieci schede usate per la calibrazione del V8 (check board). Le schede vengono numerate da 1 a 10 e appartengono a due lotti differenti (le prime cinque sono del febbraio 2019 mentre le restanti del febbraio 2020). Identificando la distanza tra le piste di calibrazione degli assi x e y delle varie schede si può fare in primo luogo un confronto tra schede. Le differenze riscontrate sono riconducibili ai processi di fabbricazione. Le misurazioni sono effettuate tramite il sistema di misura StarLite 200.

Sistema di misura: StarLite 200



Figura 30 - Sistema di misura tridimensionale ottico manuale StarLite 200

Dopo aver effettuato la numerazione delle schede check board da 1 a 10 si procede all'osservazione di ognuna attraverso il sistema di osservazione e misura ad alta risoluzione StarLite 200 per una serie di rilevazioni (*Figura 30*). StarLite 200 è un sistema di misura tridimensionale ottico. Il sistema è dotato di una base di granito su cui poggiano i carrelli dell'asse x e y che vengono azionati manualmente. Anche il terzo asse z viene regolato manualmente per ottenere una messa a fuoco di massima. La scheda viene posizionata sul piano di appoggio in vetro (*Figura 31*).

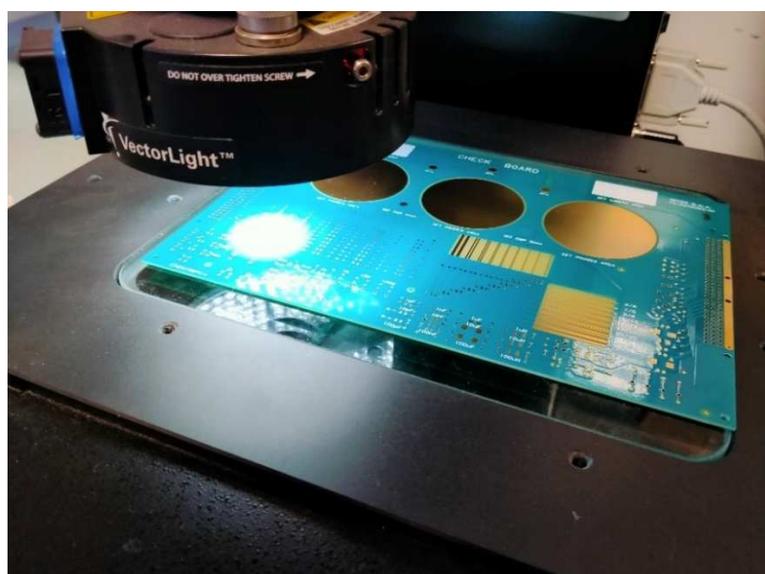


Figura 31 - Posizionamento dell'OVP sul piano di osservazione

Il software integrato automatico Misure-X consente di effettuare misure e rilevare geometrie; in particolare, avvalendosi dei sistemi di illuminazione, di cui si regolano intensità e angolazione, e agendo sull'ingrandimento si mettono in evidenza geometrie e contorni delle superfici in modo che il software, tramite il sensore *Feature Finder*, li riconosca agevolmente quando indicati con il mouse. Per rilevare archi o circonferenze si devono indicare tre punti, per rilevare tratti di bordi rettilinei si indica il primo punto e poi si traccia una retta. Il software riconosce automaticamente i bordi [2].

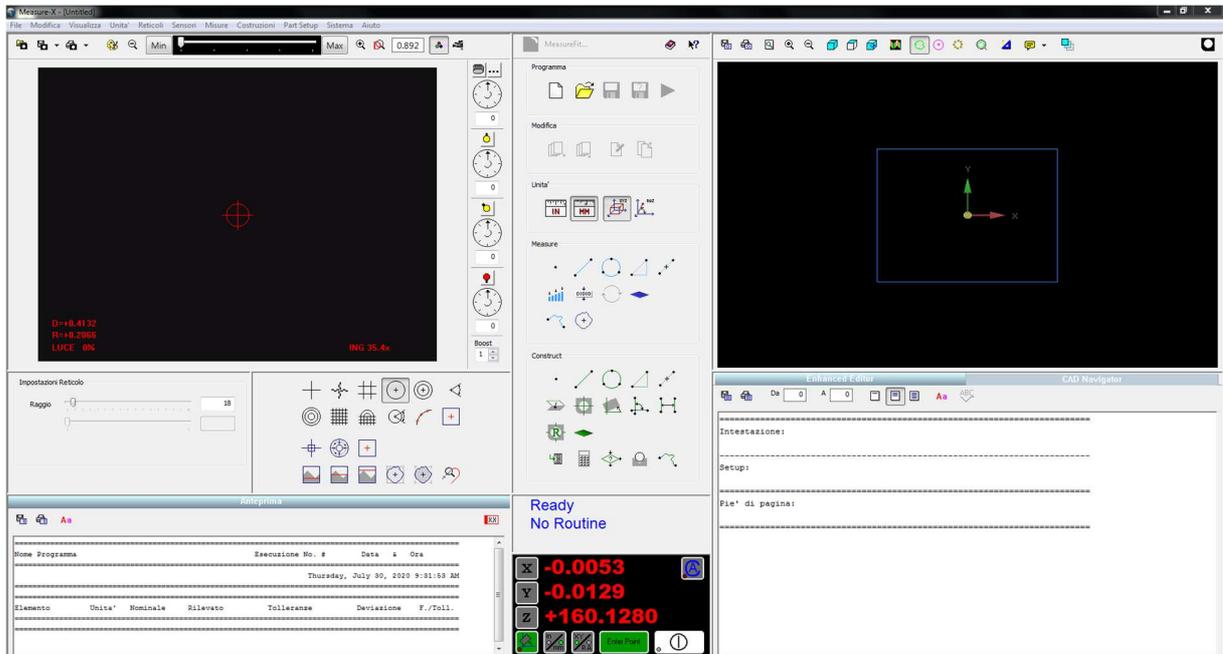


Figura 32 - Software Misure-X

Nella parte sinistra dello schermo è possibile vedere l'ingrandimento del punto che si sta osservando mentre a destra si vedono gli archi, le circonferenze e i tratti di retta che sono memorizzati man mano (figura 32). È importante memorizzare dei riferimenti per poter fare un confronto tra schede. A questo scopo si riportano dei punti, detti "fiducial" (figure 33 e 34) le cui posizioni relative sono fisse sui due lati della scheda. Lo spostamento manuale effettuato lungo gli assi x e y della tavola si riproduce in tempo reale in entrambe le porzioni dello schermo. La posizione raggiunta viene indicata con l'aggiornamento progressivo delle coordinate x,y e z riportate a video e riportate in basso nella parte centrale della precedente figura 32.

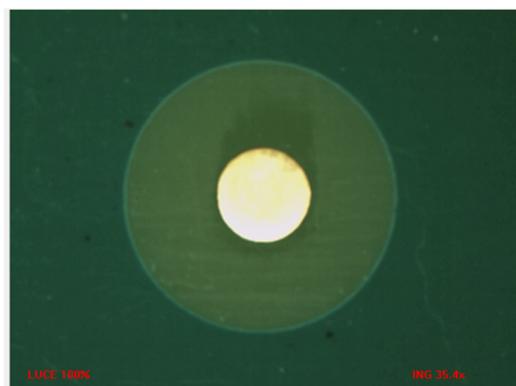


Figura 33 - Ingrandimento 35.4x di un punto "Fiducial"

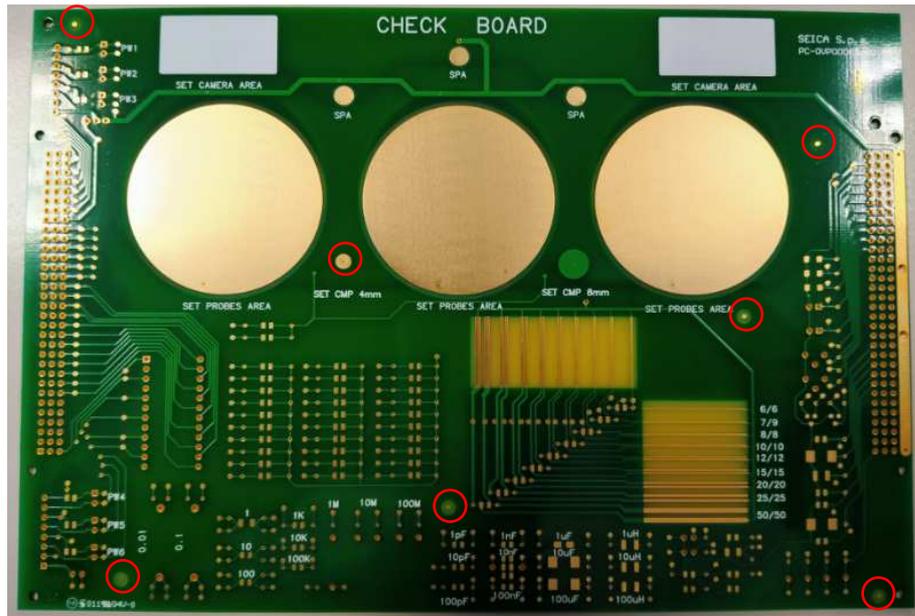


Figura 34 - Identificazione dei punti fiducial

Per mettere in risalto i bordi di fori passanti è utile spegnere la luce di Front che illumina direttamente la superficie con asse parallelo a z e regolare la luce di Profilo, posta sotto la tavola di vetro come si può osservare nelle immagini 35.4x della figura 35.

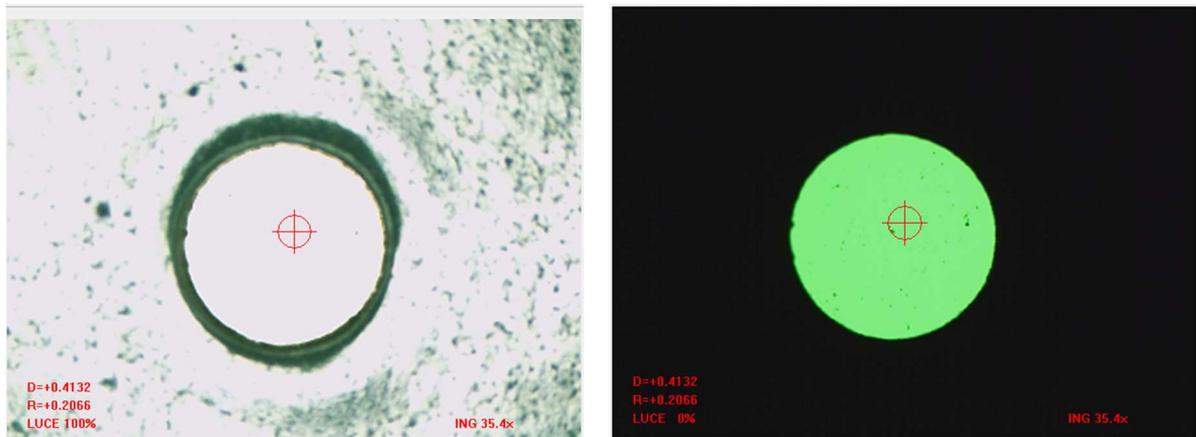


Figura 35 - Rilevamento di un foro passante con la luce di profilo

Un altro accorgimento utile per agevolare la rilevazione dei contorni consiste nell'utilizzo delle impostazioni avanzate della luce di Front, che consentono di modificare l'intensità e l'incidenza della luce per settori o per porzioni di essi [2].



Figura 36 -
Ingrandimento pista di calibrazione 10/10

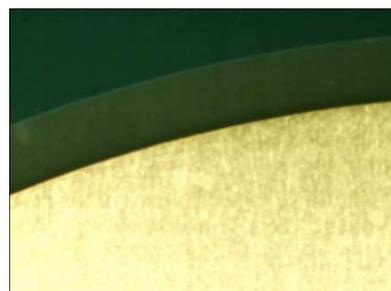


Figura 37 - Ingrandimento disco centrale

Una volta completata la rilevazione è possibile esportare (figura 38) il file prodotto in formato .dxf che può essere successivamente aperto e modificato in Solidworks come un normale schizzo in formato .SLDDRW (Solidworks Drawing Document, figura 39). In questo modo si possono ottenere le quote di interesse, tramite il comando “Quota intelligente”. Nella fase di conversione si deve specificare l’unità dei dati (le quote sono riportate in mm, le cifre riportate sono quattro dopo il millimetro) e la dimensione del foglio (A4 per cui i disegni sono in scala 1:1). Un esempio del processo di conversione dei file e il relativo schizzo sono riportati di seguito (figure 38, 39 e 40).

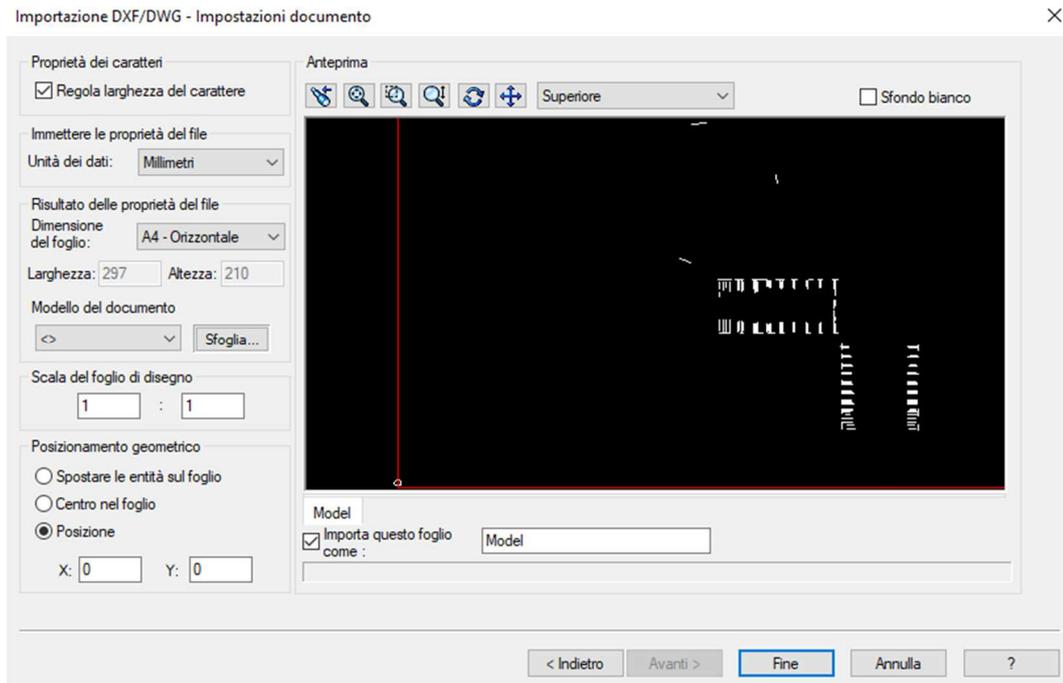


Figura 38 - Conversione del documento all’apertura del file .dxf in Solidworks

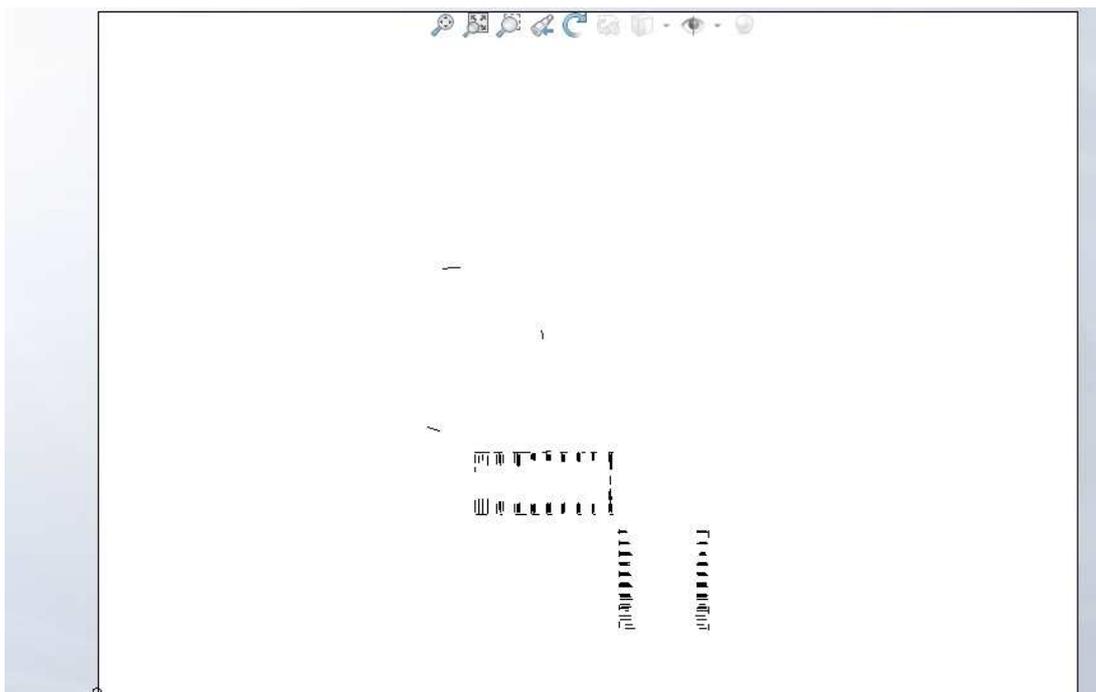


Figura 39 - Documento convertito e aperto in Solidworks

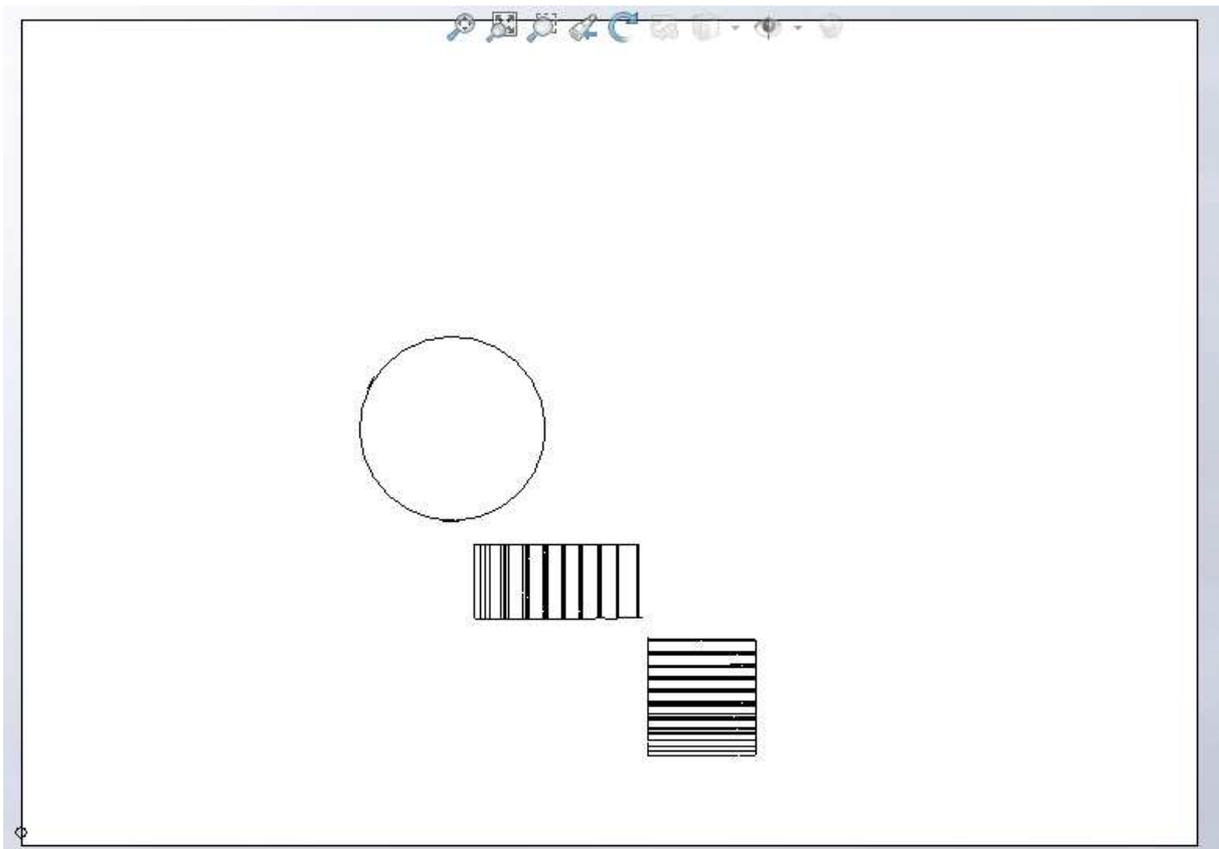


Figura 40 - Esempio di schizzo in Solidworks dopo una prima rielaborazione

Misurazione delle piste di calibrazione

Le geometrie di interesse sono quelle rilevanti nella fase di calibrazione; vengono memorizzati tre archi da cui è possibile definire la circonferenza tangente comune che corrisponde al disco centrale della scheda OVP, il cui profilo viene percorso dalla sonda per la calibrazione dell'asse z. È importante rendere fissi i tratti di arco memorizzati prima di imporre la condizione di tangenza con la circonferenza tracciata nello schizzo di Solidworks per evitare errori. In questo modo si può ottenere il diametro del disco centrale.

Tramite la memorizzazione di una serie di segmenti verticali e orizzontali in corrispondenza delle piste di calibrazione degli assi x e y si ottengono i riferimenti da cui ottenere le corrispondenti quote di interesse. Le piste di calibrazione e i rispettivi codici identificativi sono riportati nella *figura 41*. Nella *figura 42* si riporta come esempio lo schizzo relativo alla scheda 3, con l'indicazione delle quote. Tutte le quote sono lato top.

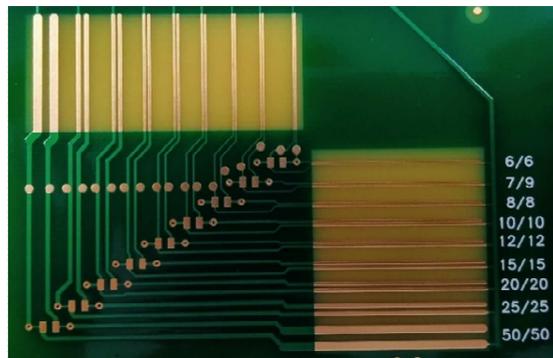


Figura 41 - Piste di calibrazione

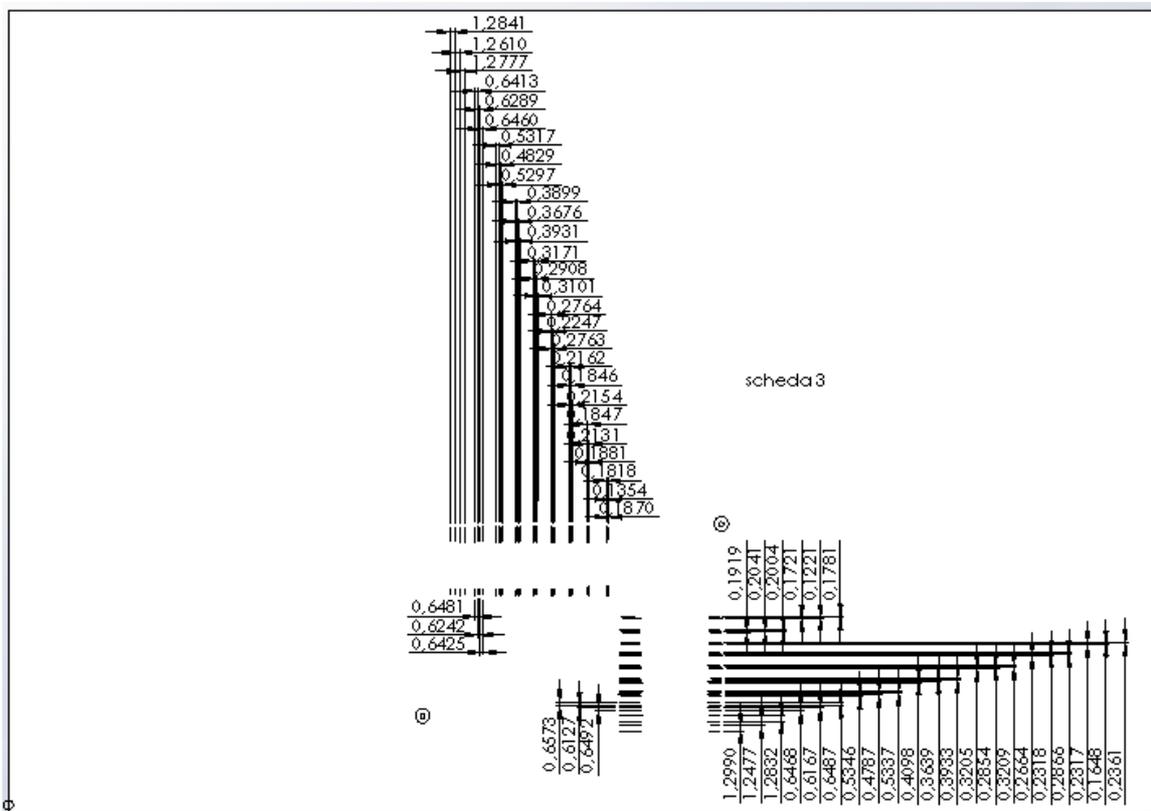
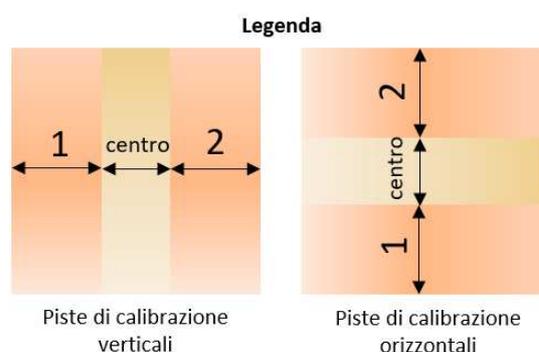


Figura 42 - Schizzo scheda 3, lato top

Per ogni scheda, oltre al diametro del cerchio centrale, per ogni famiglia di piste si riportano tre quote: la prima, indicata con "1", si riferisce allo spessore della prima pista, la seconda, indicata con "2", indica lo spessore della seconda pista e una terza, indicata con "centro" indica la distanza che separa le due piste secondo la *legenda della tabella 1*. Come si può osservare dalla *figura 42*, le quote vengono indicate a partire dal lato alto delle piste di calibrazione verticali e dal lato destro delle piste di calibrazione orizzontali, ovvero nei punti in cui è stata effettuata la misura. Le varie quote vengono riorganizzate in tabelle come quella riportata di seguito, riferita alla scheda 3 (*tabella 1*).

scheda 3					
diametro (mm)		50,8666			
piste verticali (mm)		piste orizzontali (mm)			
50/50	1	1,2841	50/50	1	1,2990
	centro	1,2610		centro	1,2477
	2	1,2777		2	1,2832
25/25	1	0,6413	25/25	1	0,6468
	centro	0,6289		centro	0,6167
	2	0,6460		2	0,6487
20/20	1	0,5317	20/20	1	0,5346
	centro	0,4829		centro	0,4787
	2	0,5297		2	0,5337
15/15	1	0,3899	15/15	1	0,4098
	centro	0,3676		centro	0,3639
	2	0,3931		2	0,3933
12/12	1	0,3171	12/12	1	0,3205
	centro	0,2908		centro	0,2854
	2	0,3101		2	0,3209
10/10	1	0,2764	10/10	1	0,2664
	centro	0,2247		centro	0,2318
	2	0,2763		2	0,2866
8/8	1	0,2162	8/8	1	0,2317
	centro	0,1846		centro	0,1648
	2	0,2154		2	0,2361
7/9	1	0,1847	7/9	1	0,1919
	centro	0,2131		centro	0,2041
	2	0,1881		2	0,2004
6/6	1	0,1818	6/6	1	0,1721
	centro	0,1354		centro	0,1221
	2	0,1870		2	0,1781

Tabella 1 - Quote scheda 3



Volendo inizialmente effettuare un confronto tra le quote corrispondenti delle diverse schede, si riportano i dati in diagrammi a dispersione. In questo modo si può osservare l'andamento delle misure effettuate sulle diverse schede e fare delle prime considerazioni. Come esempio si riportano di seguito i risultati ottenuti per le piste 50/50, 12/12 e 25/25.

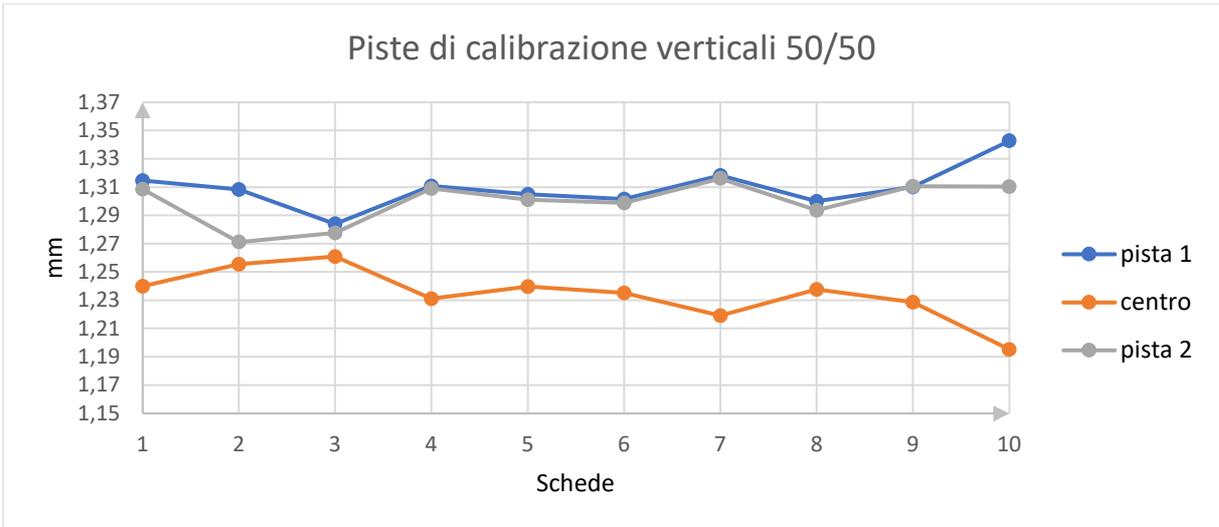


Grafico 1 – Quote piste di calibrazione verticali 50/50

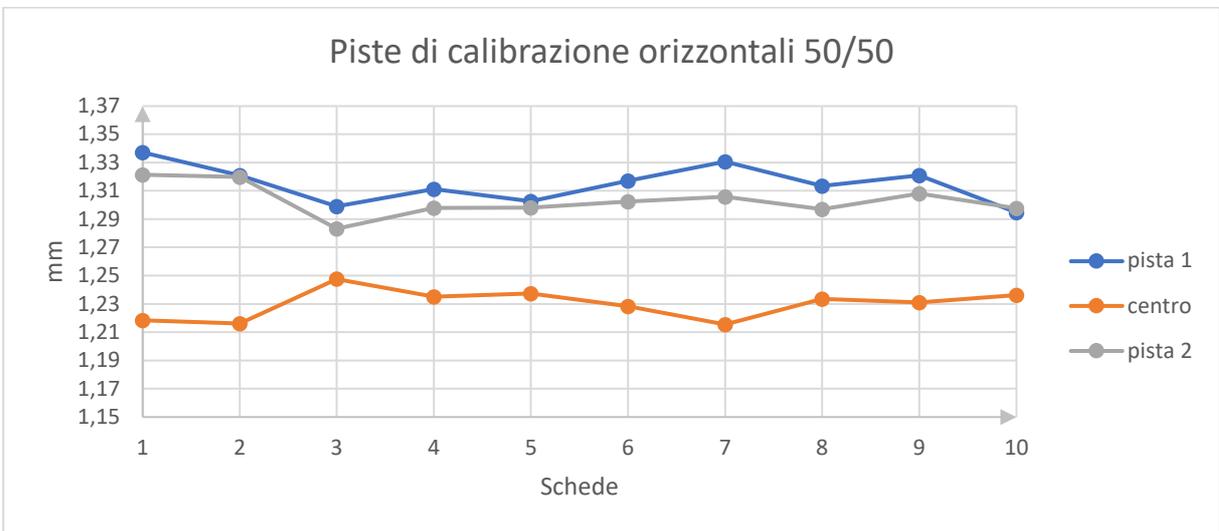


Grafico 2 – Quote piste di calibrazione orizzontali 50/50

	50/50 verticale (mm)		
schede	1	centro	2
1	1,3146	1,2399	1,3086
2	1,3083	1,2555	1,2712
3	1,2841	1,261	1,2777
4	1,3109	1,231	1,3091
5	1,3049	1,2397	1,3010
6	1,3015	1,2351	1,2988
7	1,3183	1,2192	1,3162
8	1,2999	1,2376	1,2936
9	1,3102	1,2287	1,3106
10	1,3428	1,1952	1,3104

Tabella 2 – Dati piste 50/50 verticali

	50/50 orizzontale (mm)		
schede	1	centro	2
1	1,3372	1,2184	1,3214
2	1,3208	1,2161	1,3198
3	1,2990	1,2477	1,2832
4	1,3112	1,2350	1,2978
5	1,3026	1,2373	1,2981
6	1,3171	1,2283	1,3024
7	1,3307	1,2155	1,3058
8	1,3134	1,2334	1,2969
9	1,3210	1,2310	1,3081
10	1,2948	1,2362	1,2976

Tabella 3 – Dati piste 50/50 orizzontali

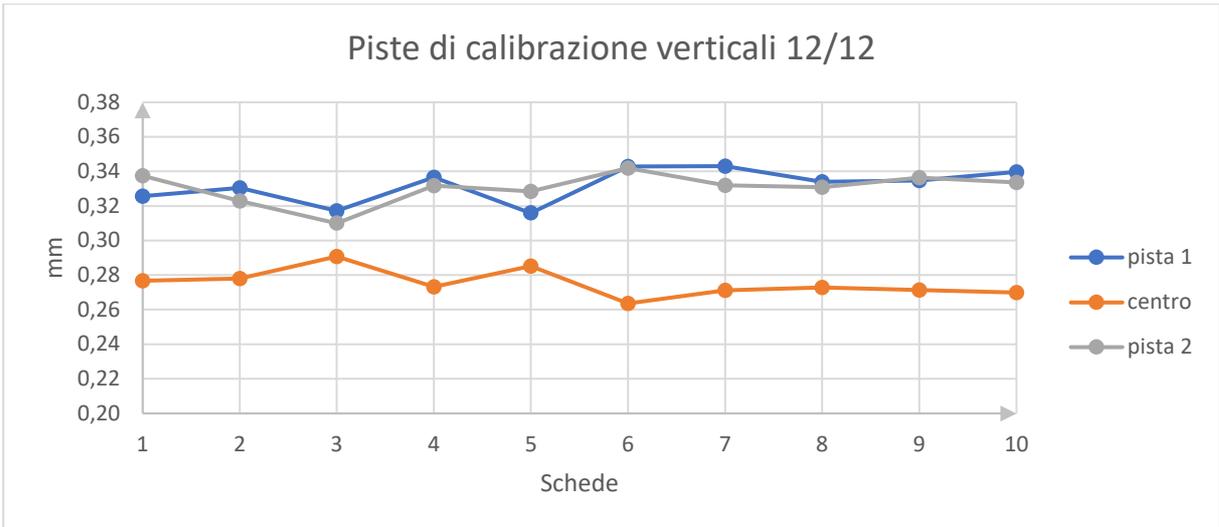


Grafico 3 – Quote piste di calibrazione verticali 12/12

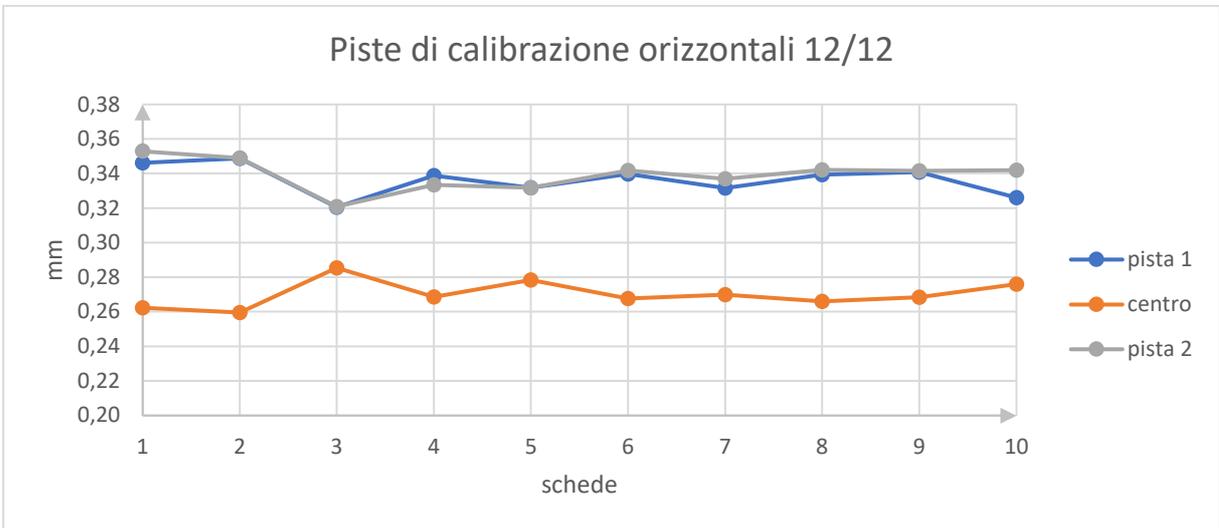


Grafico 4 – Quote piste di calibrazione orizzontali 12/12

	12/12 verticale (mm)		
schede	1	centro	2
1	0,3257	0,2767	0,3374
2	0,3305	0,278	0,3229
3	0,3171	0,2908	0,3101
4	0,3366	0,2732	0,3317
5	0,3160	0,2852	0,3284
6	0,3428	0,2636	0,3420
7	0,3431	0,2712	0,3319
8	0,3339	0,2728	0,3309
9	0,3347	0,2714	0,3363
10	0,3397	0,2699	0,3337

Tabella 4 – Dati piste 12/12 verticali

	12/12 orizzontale (mm)		
schede	1	centro	2
1	0,3461	0,2623	0,3529
2	0,3488	0,2595	0,3489
3	0,3205	0,2854	0,3209
4	0,3388	0,2686	0,3334
5	0,3317	0,2784	0,3317
6	0,3397	0,2677	0,3418
7	0,3315	0,2698	0,3370
8	0,3393	0,2660	0,3421
9	0,3408	0,2683	0,3415
10	0,3260	0,2760	0,3419

Tabella 5 – Dati piste 12/12 orizzontali

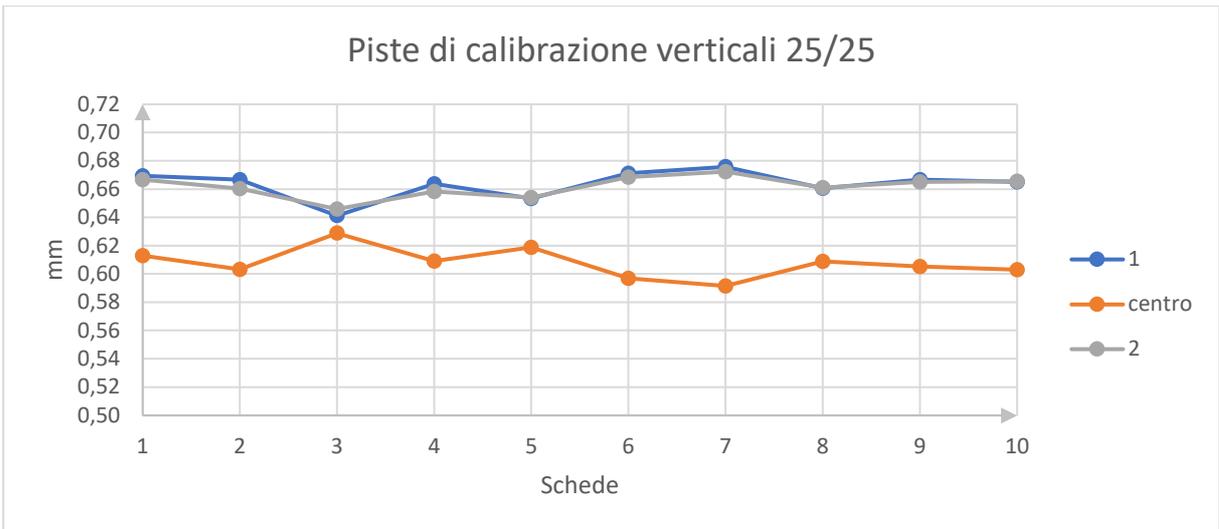


Grafico 5 – Quote piste di calibrazione verticali 25/25

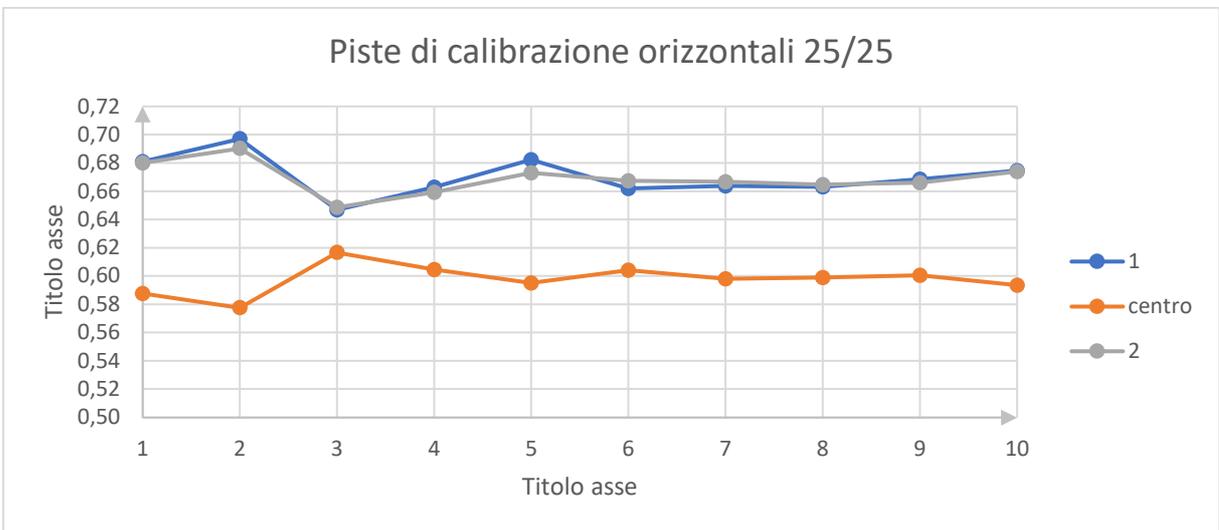


Grafico 6 – Quote piste di calibrazione orizzontali 25/25

25/25 verticale (mm)			
schede	1	centro	2
1	0,6693	0,6130	0,6668
2	0,6666	0,6032	0,6603
3	0,6413	0,6289	0,6460
4	0,6637	0,6091	0,6583
5	0,6534	0,6189	0,6540
6	0,6711	0,5969	0,6684
7	0,6759	0,5915	0,6724
8	0,6606	0,6089	0,6610
9	0,6667	0,6053	0,6650
10	0,6652	0,6030	0,6656

Tabella 6 – Dati piste 25/25 verticali

25/25 orizzontale (mm)			
schede	1	centro	2
1	0,6808	0,5876	0,6801
2	0,6971	0,5776	0,6903
3	0,6468	0,6167	0,6487
4	0,6628	0,6045	0,6591
5	0,6822	0,5950	0,6729
6	0,6620	0,6042	0,6674
7	0,6638	0,5981	0,6666
8	0,6631	0,5990	0,6647
9	0,6685	0,6006	0,6660
10	0,6745	0,5934	0,674

Tabella 7 – Dati piste 25/25 orizzontali

Non si osservano particolari differenze tra le prime cinque schede e le restanti cinque appartenenti a lotti differenti (rispettivamente febbraio 2019 e febbraio 2020).

Valutazione dell'errore del processo di fabbricazione delle schede OVP

Un risultato atteso consiste nel fatto che le quote corrispondenti su schede diverse hanno valori diversi per via degli errori inevitabilmente introdotti dai processi di fabbricazione. Questi errori possono essere quantificati sapendo ad esempio che la sigla 25/25 si riferisce alla larghezza teorica della pista espressa in mils. Teoricamente quindi sia la larghezza delle piste denominate 25/25 che la distanza che le separa (indicata prima con "centro") deve essere pari a 25 mils (ovvero 0,635 mm). In realtà questo non si verifica in quanto osservando i precedenti grafici (*grafici da 1 a 6*) si vede che la distanza che separa le piste è sempre minore rispetto al loro spessore. Ciò è da ricondurre, come accennato precedentemente, al processo produttivo delle piste, ottenute depositando chimicamente il materiale conduttore sui supporti predisposti che definiscono dimensioni e posizione teoriche delle piste di calibrazione. Il materiale conduttore depositato sporge rispetto a questi supporti per cui di fatto le piste di calibrazione risultano sempre più larghe rispetto alla distanza che le separa.

Con riferimento alle piste 25/25 ad esempio, si possono ottenere i diagrammi successivi in cui si evidenzia la differenza tra il valore medio e il valore teorico della larghezza delle piste di calibrazione (Pista 1 e 2) o della distanza che le separa (Centro).

In questi diagrammi si può osservare che tutte le misure rilevate oscillano rispetto al valore medio entro $\pm 2\sigma$ (dove σ è la deviazione standard [3]); inoltre per le piste di calibrazione verticali, la differenza media tra il valore teorico e il valore medio vale 0,0274 mm mentre per le piste di calibrazione orizzontali è 0,0355 mm.

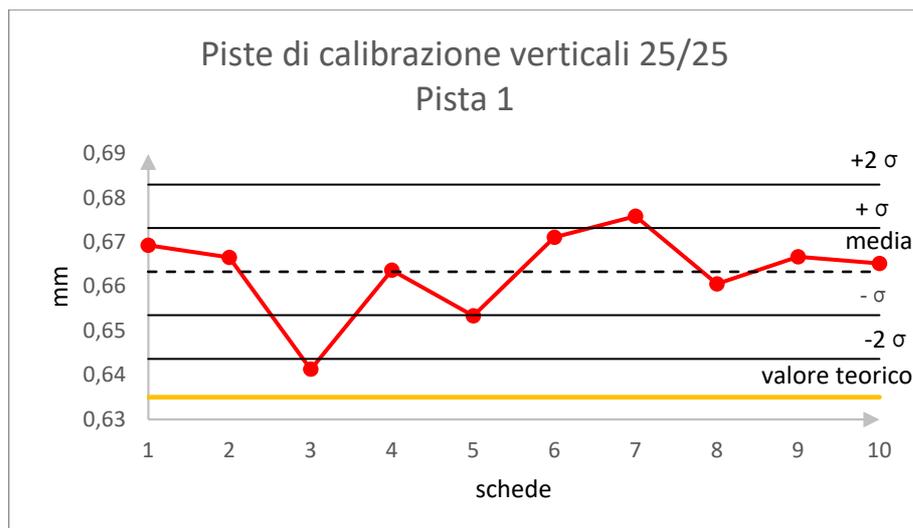


Diagramma 1 – Pista 1, verticale 25/25

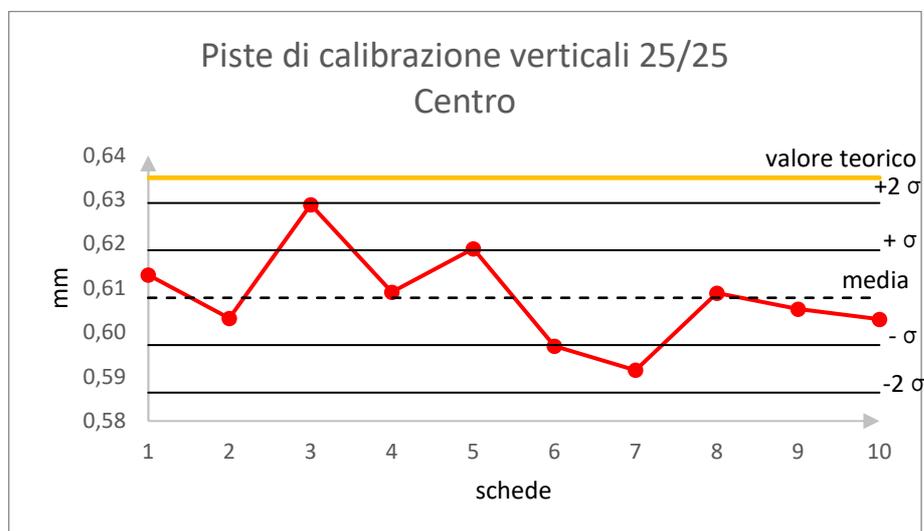


Diagramma 2 - Centro, verticale 25/25

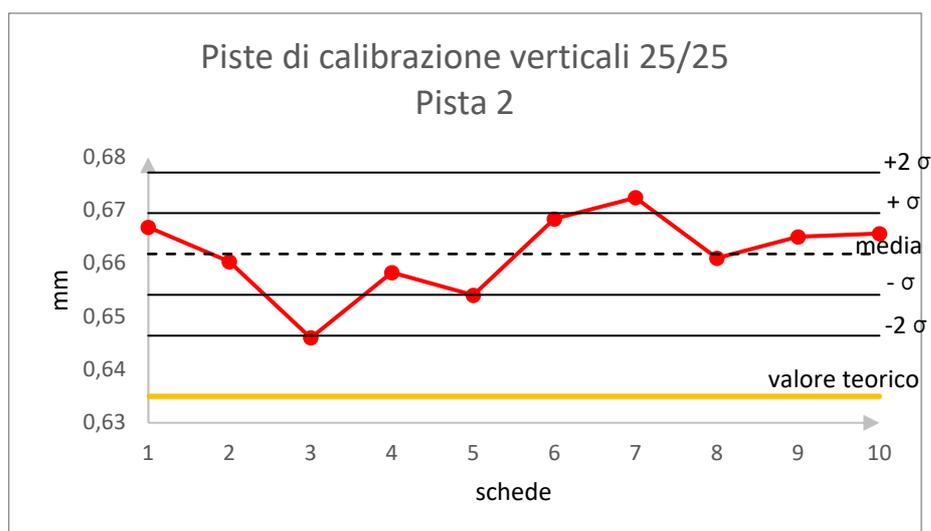


Diagramma 3 – Pista 2, verticale 25/25

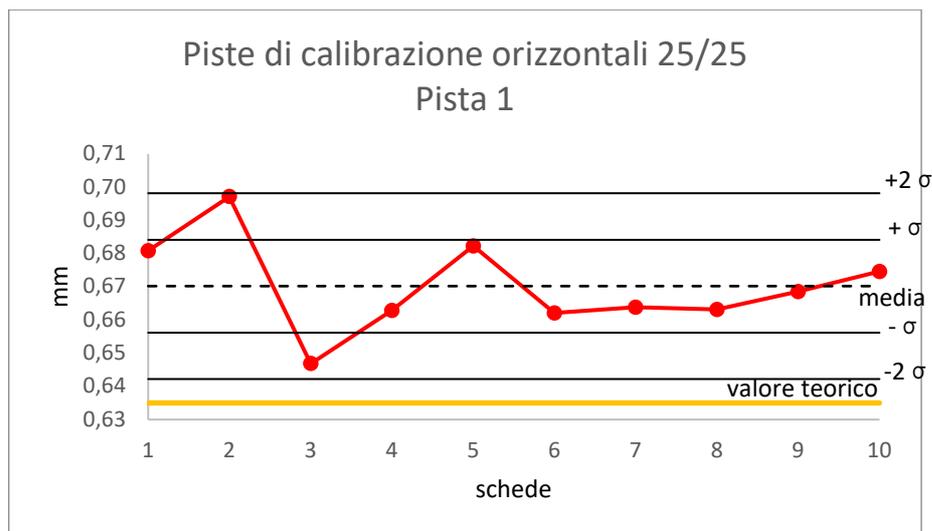


Diagramma 4 – Pista 1, orizzontale 25/25

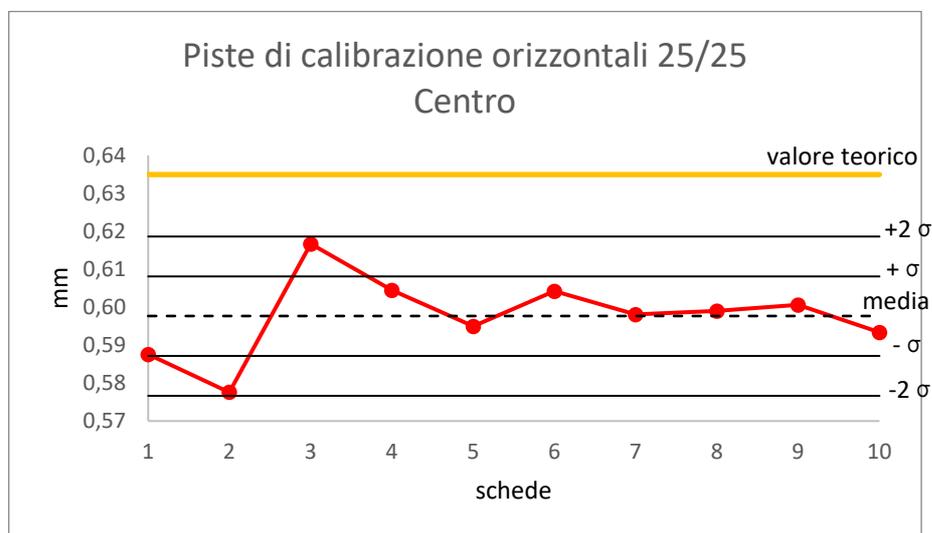


Diagramma 5 – Centro, orizzontale 25/25

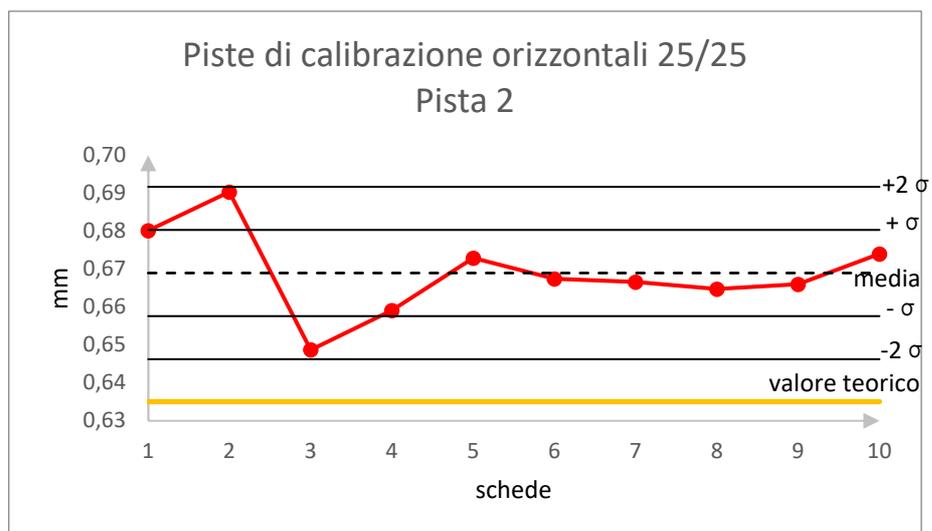


Diagramma 6 - Pista 2, orizzontale 25/25

Definizione delle coordinate “vere” dei punti

Attraverso la caratterizzazione delle schede è possibile definire le coordinate “vere” dei punti in cui una delle otto sonde del sistema deve posizionarsi. Questi punti sono scelti per ogni scheda in modo tale da trovarsi in corrispondenza delle piste di calibrazione verticali e orizzontali identificate dal codice 25/25. La scelta di questo tipo di piste, su cui viene condotto tutto lo studio, deriva dal fatto che la calibrazione della macchina viene eseguita su di esse. La caratterizzazione delle dieci schede consente di conoscere con esattezza la geometria di ciascuna e risalire dunque alle coordinate esatte dei punti in cui deve essere effettuato il posizionamento per ognuna delle schede.

Le misure effettuate tramite il sistema di misura ottico StarLite costituiscono i valori di riferimento o valori veri, considerati esatti, con cui confrontare i risultati ottenuti direttamente dalla macchina. Il valore vero non è conoscibile in senso assoluto poiché la determinazione esatta della quantità fisica che deve essere misurata è impossibile.

Con il termine valore vero si indica dunque un valore di riferimento che è considerato sufficientemente preciso o accurato (precisione e accuratezza sono sinonimi) per il fine della misura stessa. Nello specifico, occorre che il valore vero di riferimento sia scelto con una precisione migliore di $\frac{1}{4}$ della precisione nominale della macchina in prova [4] (ottimo se la differenza fosse di un ordine di grandezza). Per verificare di essere in queste condizioni si esprimono nel seguito i valori di precisione di StarLite 200 e della macchina in prova (precisione misurata).

Punti di posizionamento

I riferimenti presenti sulla scheda OVP, detti fiducial, sono numerati da 1 a 6. La porzione della scheda OVP di interesse è quella corrispondente alle piste di calibrazione verticali e orizzontali riportata nella *figura 43*. Quest’area è delimitata da una coppia di riferimenti cerchiati in rosso nella *figura 43*, corrispondenti al fiducial 5, in basso a sinistra e al fiducial 6 in alto a destra. Rispetto a questi due punti di riferimento vengono espresse le coordinate in cui viene effettuato il posizionamento di una delle otto sonde della macchina.

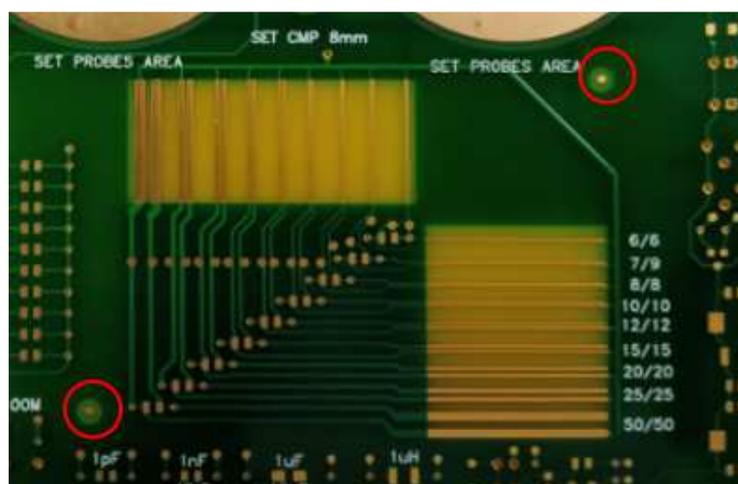


Figura 43 - Piste di calibrazione, identificazione dei fiducial FD5 e FD6

Con riferimento allo schema di *figura 44*, relativo alle piste di calibrazione 25/25 su cui è condotto lo studio, sono indicati 12 punti in corrispondenza della parte superiore delle piste di calibrazione verticali e 12 punti in corrispondenza della parte destra delle piste di calibrazione orizzontali. I punti sono posizionati in quella parte delle piste 25/25 dove è stata effettuata la caratterizzazione della scheda e in cui si conoscono i valori considerati esatti delle diverse quote.

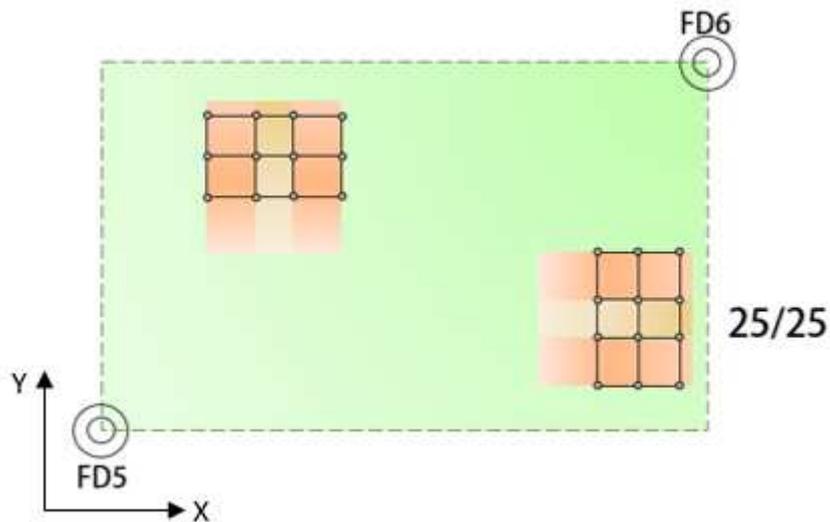


Figura 44 - Definizione dei punti in cui si effettua il posizionamento

Le coordinate di questi punti sono in parte vincolate alla caratterizzazione delle schede e in parte sono state scelte arbitrariamente. I punti devono trovarsi in corrispondenza delle piste di calibrazione per cui le coordinate x dei punti relativi alle piste di calibrazione verticali e le coordinate y dei punti relativi alle piste di calibrazione orizzontali corrispondono alle quote ottenute con la caratterizzazione delle schede. Le coordinate y dei punti relativi alle piste di calibrazione verticali e le coordinate x dei punti relativi alle piste di calibrazione orizzontali sono invece scelte arbitrariamente. In generale, la disposizione dei punti è tale da determinare una griglia che agevola l'identificazione delle impronte lasciate dalla sonda a seguito dei posizionamenti.

Punti di prova

Per ognuna delle dieci schede, oltre ai punti già descritti, vengono scelti altri due punti sempre in corrispondenza delle piste di calibrazione 25/25, necessari come punti di prova per effettuare una coppia di posizionamenti preliminari su ciascuna scheda al fine di verificare la corretta definizione della procedura di posizionamento. Questi punti sono scelti in basso sulle piste di calibrazione verticali e a sinistra sulle piste di calibrazione orizzontali.

Il posizionamento della sonda sulla scheda può essere osservato direttamente sulla macchina tramite la telecamera presente a bordo; gli strumenti forniti dal software della macchina consentono di regolare l'intensità della luce che illumina il punto di interesse, variare l'ingrandimento e la saturazione/contrasto per osservare meglio l'estremità della sonda.

Nelle *figure 45 e 46* sono riportati due esempi relativi ai posizionamenti in corrispondenza dei punti di prova.

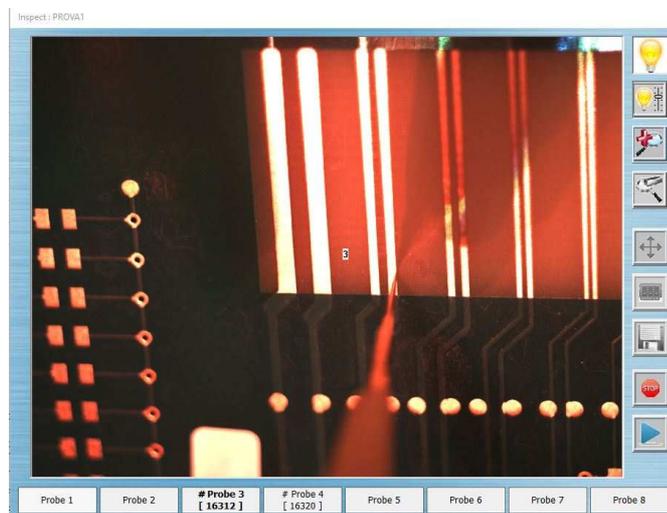


Figura 45 - Esempio di punto di prova, piste 25/25 verticali

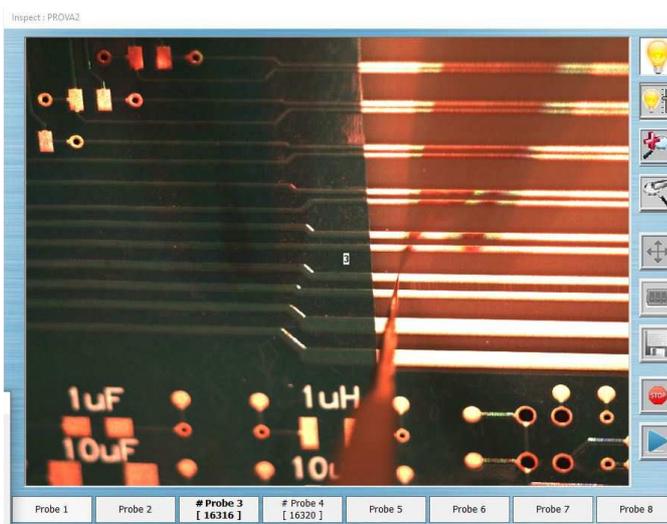


Figura 46 - Esempio di punto di prova, piste 25/25 orizzontali

Coordinate rispetto ai fiducial FD5 e FD6

Come esempio si riportano le coordinate dei punti in cui viene effettuato il posizionamento di una delle otto sonde e le coordinate dei punti di prova relativamente alla scheda 4, riferite ai fiducial FD5 e FD6.

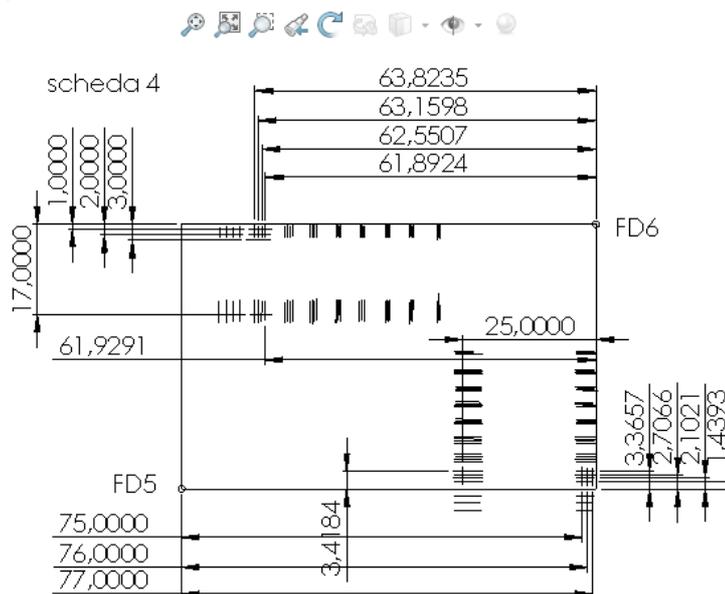


Figura 47 - Coordinate scheda 4

Come si può osservare dalla *figura 47*, ci sono quote intere e quote con 4 cifre dopo la virgola, tutte espresse in millimetri; le prime, uguali per tutte le schede, sono scelte arbitrariamente ma comunque in modo tale da restare entro la zona in cui si conosce con esattezza la distanza tra le piste di calibrazione della scheda mentre le seconde sono determinate dalle misure effettuate tramite StarLite 200 (caratterizzazione della scheda). I risultati delle misurazioni relativi alle dieci schede sono riportati nella *tabella 8*.

	Schede									
Quote intere	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	63,828	63,814	63,815	63,823	63,812	63,844	63,838	63,843	63,834	63,820
2	63,158	63,147	63,174	63,159	63,158	63,173	63,162	63,182	63,167	63,155
3	62,545	62,544	62,545	62,550	62,540	62,576	62,570	62,573	62,562	62,552
75	61,878	61,884	61,899	61,892	61,886	61,908	61,898	61,912	61,897	61,886
76	3,538	3,491	3,506	3,365	3,813	3,536	3,426	3,207	3,438	3,621
77	2,858	2,800	2,857	2,706	3,140	2,868	2,758	2,542	2,772	2,947
	2,271	2,223	2,241	2,102	2,545	2,264	2,161	1,943	2,171	2,353
	1,590	1,526	1,594	1,439	1,862	1,602	1,497	1,280	1,503	1,679

Tabella 8 - Caratterizzazione delle 10 schede (tutte le quote sono espresse in mm)

Anche in questo caso, come si osserva nel paragrafo relativo alla misurazione delle piste di calibrazione, ci sono alcune differenze tra quote corrispondenti su schede diverse. Inoltre, dalle misurazioni eseguite con StarLite 200, le quote sono espresse in millimetri con quattro cifre dopo la virgola ma il software VIVA lavora con sole tre cifre dopo la virgola per cui si esegue un troncamento.

Coordinate dei fiducial FD5 e FD6

Le coordinate dei fiducial FD5 e FD6 sono ricavate dal file .CAD della scheda OVP che è unico. Quando sulla macchina viene caricata una scheda OVP, il software VIVA della macchina fa riferimento alla geometria CAD della scheda per cui il fiducial FD5 e il fiducial FD6 per la macchina hanno specifiche coordinate. Prima di eseguire qualsiasi prova sulla scheda si effettua un allineamento tra i fiducial della scheda e i corrispondenti riferimenti della macchina. In particolare, in questo caso i fiducial sui quali si effettua l'allineamento sono quelli che delimitano l'area in cui sono presenti le piste di calibrazione, FD5 e FD6.

Aperto in VIVA il file CAD della scheda OVP si ottiene quanto riportato nella *figura 48* successiva relativamente al lato top della scheda.

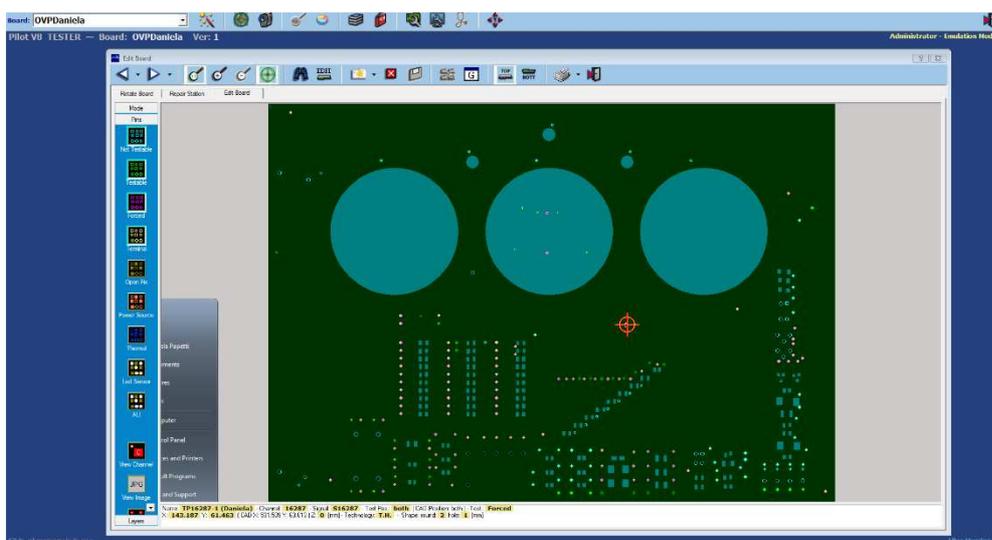


Figura 48 - CAD dell'OVP in VIVA10, lato top

Nella porzione in basso a sinistra sono indicate le informazioni relative al punto che viene selezionato con il mouse sulla scheda. Nella *figura 49* si fa riferimento al fiducial 5, selezionato sulla scheda OVP, del quale sono indicate le coordinate CAD.



Figura 49 - Coordinate CAD del fiducial 5

Posizionandosi con il mouse sul fiducial FD6 analogamente a quanto fatto con il fiducial FD5, si ottengono le relative coordinate CAD. Le coordinate dei due fiducial di interesse sono riportate nella tabella successiva.

FD5		FD6	
X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)
498,25	19,2	575,65	69,45

Tabella 9 - Coordinate di FD5 e FD6

Coordinate dei punti rispetto al sistema

Conoscendo le coordinate dei punti di posizionamento e dei punti di prova rispetto ai fiduciali FD5 e FD6 e le coordinate degli stessi fiduciali secondo il file .CAD cui fa riferimento il sistema, è possibile definire la posizione di tutti i punti in cui la sonda effettua il posizionamento dal punto di vista del sistema per ciascuna delle dieci schede.

Come esempio nella *tabella 10* si riportano le coordinate dei punti di posizionamento calcolate per la scheda 4, espresse in mm. Nella *tabella 11* si riportano invece le coordinate dei punti di prova sempre della scheda 4.

Scheda 4					
Punti di posizionamento					
	piste 25/25 verticali			piste 25/25 orizzontali	
	X (mm)	Y (mm)		X (mm)	Y (mm)
1	511,827	68,450	13	573,250	22,565
2	512,491	68,450	14	573,250	21,906
3	513,100	68,450	15	573,250	21,302
4	513,758	68,450	16	573,250	20,639
5	511,827	67,450	17	574,250	22,565
6	512,491	67,450	18	574,250	21,906
7	513,100	67,450	19	574,250	21,302
8	513,758	67,450	20	574,250	20,639
9	511,827	66,450	21	575,250	22,565
10	512,491	66,450	22	575,250	21,906
11	513,100	66,450	23	575,250	21,302
12	513,758	66,450	24	575,250	20,639

Tabella 10 - Coordinate dei punti di posizionamento (mm), scheda 4

Scheda 4		
Punti di prova		
	X (mm)	Y (mm)
1	513,7210	52,4500
2	513,0640	52,4500
3	512,4470	52,4500
4	511,7860	52,4500
5	550,6500	22,6180
6	550,6500	21,9530
7	550,6500	21,3450
8	550,6500	20,6870

Tabella 11 - Coordinate dei punti di prova (mm), scheda 4

Scelta della testa (sonda) sul lato top della scheda

Tutti i posizionamenti vengono effettuati sul lato top della scheda da un'unica sonda in modo da eliminare la variabile introdotta dalla presenza di molte sonde nello studio di ripetibilità di posizionamento del sistema. Sul lato top sono disponibili le sonde da 1 a 4; si decide di escludere l'utilizzo delle sonde 1 e 2 e di lavorare con le sonde 3 e 4. In particolare, la sonda della testa 3 effettua i vari posizionamenti secondo le coordinate dei punti espresse rispetto al sistema, diverse per ciascuna scheda, mentre la sonda della testa 4 rimane fissa in un punto, uguale per ciascuna delle dieci schede. La scelta della sonda 3 non è casuale ma dipende dal fatto che il suo asse, rispetto a quello delle altre sonde disponibili sul lato top, è più vicino alla perpendicolare al piano della scheda per cui sono ridotti al minimo gli effetti di flessione della sonda.

Coordinate della sonda 4

La macchina è concepita per effettuare misure elettriche sulle schede elettroniche tipicamente impiegando una coppia di sonde. Per questa ragione le prove di posizionamento vengono concepite come test elettrici in cui una sonda rimane fissa in un punto, che costituisce il riferimento di ground, mentre l'altra esegue i posizionamenti richiesti.

Volendo condurre lo studio di precisione e ripetibilità sulla sonda 3, risulta necessario indicare il punto in cui la sonda 4 rimane fissa ad ogni posizionamento. Normalmente lo scopo è verificare la continuità elettrica tra i punti in cui si posizionano le sonde mentre invece in questo caso il risultato del test elettrico è irrilevante.

Le coordinate raggiunte e mantenute dalla sonda 4 nel corso di tutte le prove sono scelte arbitrariamente in modo tale che l'ottimizzazione eseguita dal sistema circa l'utilizzo delle quattro sonde disponibili sul lato top della scheda per il raggiungimento delle coordinate predefinite non comporti l'utilizzo di sonde differenti dalla 3 e della 4. In ogni caso, all'inizio di ciascuna prova di posizionamento si effettua l'esclusione delle teste 1 e 2, si impone che i vari punti siano raggiunti dalla sonda 3 mentre la sonda 4 rimanga fissa nelle coordinate riportate dalla *tabella 12*.

x	580,650
y	59,450

Tabella 12 - Coordinate sonda 4

File ASCII

La scheda OVP, come ogni altra scheda che debba essere sottoposta a un collaudo, è associata ad un file ASCII in cui sono contenute tutte le informazioni relative ai punti che devono essere testati. In base ai componenti presenti sulla scheda e ai punti di interesse principali, il programmatore definisce le coordinate in cui si posizionano le sonde, importando il file .CAD della scheda, per eseguire i test elettrici richiesti nella fase di collaudo. Dei vari punti, all'interno del file, si specificano le coordinate x e y e alcune informazioni, descritte di seguito con riferimento al file ASCII della scheda 4 di cui si riporta un estratto (*figura 51*).

Nella colonna **SIGNAL** tramite un codice si riporta l'informazione relativa al tipo di componente che si sta testando per cui ad esempio con C si indica il condensatore, con L l'induttanza e con R la resistenza. Nella colonna **POS** con la lettera T si indica che il punto si trova sul lato top della scheda (con B sarebbe invece sul lato bottom), nella colonna **TECN** con la lettera S si indica che la posizione del punto è superficiale, ovvero si trova sulla superficie della scheda (in alternativa si usa la lettera T per specificare che si tratta di un foro, "Through Hole"). Nella colonna **TEST** si usa la lettera F per indicare che il posizionamento è forzato (in alternativa si usa la lettera N). Nella colonna **PAD** si indicano il raggio e l'altezza del foro nel caso in cui la tecnologia sia Through Hole altrimenti solo il raggio.

Partendo dal file ASCII normalmente impiegato per una scheda OVP, si aggiungono in coda le informazioni relative ai punti che devono essere raggiunti (righe rosse, blu e verdi dell'estratto del file riportato nella *figura 51*). Ognuna delle dieci schede richiede la scrittura di un file ASCII differente; i vari punti sono associati a canali identificati attraverso numeri progressivi. Ogni punto ha un suo canale, differente da ogni altro all'interno dello stesso file. Da una scheda all'altra variano le informazioni relative alle coordinate dei punti mentre vengono mantenute costanti tutte le altre. I canali associati ai punti di posizionamento sono riportati nella *figura 50*.

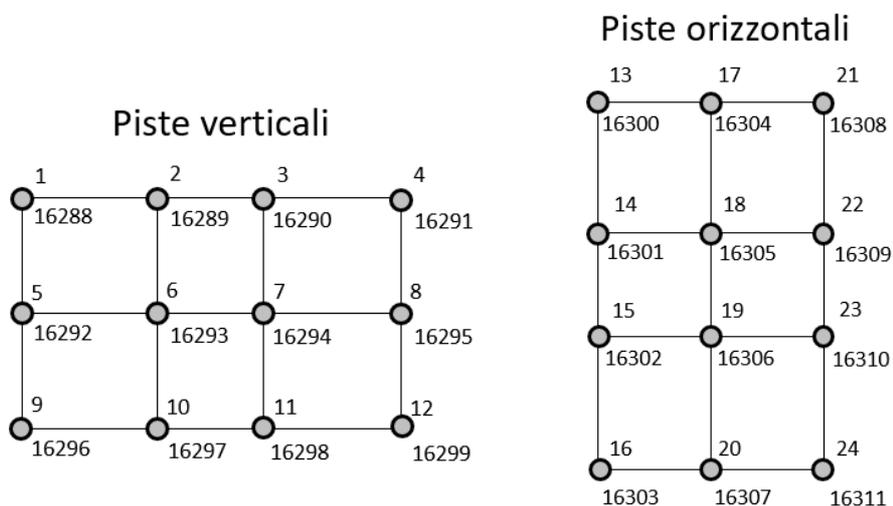


Figura 50 - Canali dei punti di posizionamento

I punti in cui si effettua il posizionamento sono 24 e i corrispondenti canali sono identificati da numeri a 5 cifre progressivi da 16288 a 16311. Oltre a questi, nel file ASCII si riportano gli 8 punti di prova con canali da 16312 a 16319 e il punto fisso in cui si posiziona la sonda 4 identificato con il canale 16320 (*figura 51*).

* SIGNAL	COMPONENT	PIN	X	Y	PAD	POS	TECN	TEST	CHANNEL	USER
"C1_1-1"	"TP5101"	1	496.950	12.900	R50H2	T	S	F	5101	253
[...]										
"L2_5-1"	"TP6109"	1	540.170	6.500	R50H2	T	S	F	6109	254
[...]										
"R46_35-1"	"TP14621"	1	455.700	11.000	R50H2	B	S	F	14621	239
[...]										
"S16288"	"TP16288"	1	511.827	68.450	R19	T	T	F	16288	
"S16289"	"TP16289"	1	512.491	68.450	R19	T	T	F	16289	
"S16290"	"TP16290"	1	513.100	68.450	R19	T	T	F	16290	
"S16291"	"TP16291"	1	513.758	68.450	R19	T	T	F	16291	
"S16292"	"TP16292"	1	511.827	67.450	R19	T	T	F	16292	
"S16293"	"TP16293"	1	512.491	67.450	R19	T	T	F	16293	
"S16294"	"TP16294"	1	513.100	67.450	R19	T	T	F	16294	
"S16295"	"TP16295"	1	513.758	67.450	R19	T	T	F	16295	
"S16296"	"TP16296"	1	511.827	66.450	R19	T	T	F	16296	
"S16297"	"TP16297"	1	512.491	66.450	R19	T	T	F	16297	
"S16298"	"TP16298"	1	513.100	66.450	R19	T	T	F	16298	
"S16299"	"TP16299"	1	513.758	66.450	R19	T	T	F	16299	
"S16300"	"TP16300"	1	573.250	22.565	R19	T	T	F	16300	
"S16301"	"TP16301"	1	573.250	21.906	R19	T	T	F	16301	
"S16302"	"TP16302"	1	573.250	21.302	R19	T	T	F	16302	
"S16303"	"TP16303"	1	573.250	20.639	R19	T	T	F	16303	
"S16304"	"TP16304"	1	574.250	22.565	R19	T	T	F	16304	
"S16305"	"TP16305"	1	574.250	21.906	R19	T	T	F	16305	
"S16306"	"TP16306"	1	574.250	21.302	R19	T	T	F	16306	
"S16307"	"TP16307"	1	574.250	20.639	R19	T	T	F	16307	
"S16308"	"TP16308"	1	575.250	22.565	R19	T	T	F	16308	
"S16309"	"TP16309"	1	575.250	21.906	R19	T	T	F	16309	
"S16310"	"TP16310"	1	575.250	21.302	R19	T	T	F	16310	
"S16311"	"TP16311"	1	575.250	20.639	R19	T	T	F	16311	
"S16312"	"TP16312"	1	513.721	52.450	R19	T	T	F	16312	
"S16313"	"TP16313"	1	513.064	52.450	R19	T	T	F	16313	
"S16314"	"TP16314"	1	512.447	52.450	R19	T	T	F	16314	
"S16315"	"TP16315"	1	511.786	52.450	R19	T	T	F	16315	
"S16316"	"TP16316"	1	550.650	22.618	R19	T	T	F	16316	
"S16317"	"TP16317"	1	550.650	21.953	R19	T	T	F	16317	
"S16318"	"TP16318"	1	550.650	21.345	R19	T	T	F	16318	
"S16319"	"TP16319"	1	550.650	20.687	R19	T	T	F	16319	
"S16320"	"TP16320"	1	580.650	59.450	R20	T	T	F	16320	

Figura 51 - File ASCII, scheda 4

Come accennato precedentemente, da una scheda all'altra solo mantenute fisse la posizione (lato top), la tecnologia e il tipo di test (posizionamento forzato in modo da favorire la generazione di un'impronta da parte della sonda). Per quanto riguarda la tecnologia si sceglie "Through Hole" ma non si riportano raggio e altezza del foro, indicando solo il primo pari a 19 Mils (circa 0,5 mm).

All'interno del file ASCII sono contenute anche le informazioni relative alla posizione dei fiducial (figura 52), lette inizialmente direttamente dal file CAD della scheda OVP.

FILE	FILE	X	Y	TECN	TEST	CHANNEL	USER		
"FD3"	"FD3"	1	397.850	148.250	R50H2	T	T	F	323
"FD4"	"FD4"	1	610.750	-3.700	R50H2	T	T	F	324
"FD5"	"FD5"	1	498.250	19.200	R50H2	T	T	F	325
"FD6"	"FD6"	1	575.650	69.450	R50H2	T	T	F	326
"GND CAS2"	"OFIX 07M"	3	470.300	83.700	X10	T	S	N	613 251

Figura 52 - Coordinate dei fiducial nel file ASCII

Griglia dei comandi e conversione dei file ASCII

Una volta completata la scrittura di tutti e dieci i file ASCII si procede con la conversione del primo file. L'operatore, a partire dal file ASCII genera un file .xml che viene importato in VIVA per la creazione della griglia del programma che la macchina deve eseguire. La griglia è generata in modo automatico ma l'operatore può personalizzarla sulla base delle sue esigenze usando le informazioni che sono state importate. Nel caso in studio sono utili solo le informazioni relative alle righe aggiunte in coda al file ASCII standard.

Si riporta come esempio la schermata di VIVA relativa alla scheda 10. Nella *figura 53* la griglia, già completata, è nella parte in alto a sinistra del video.

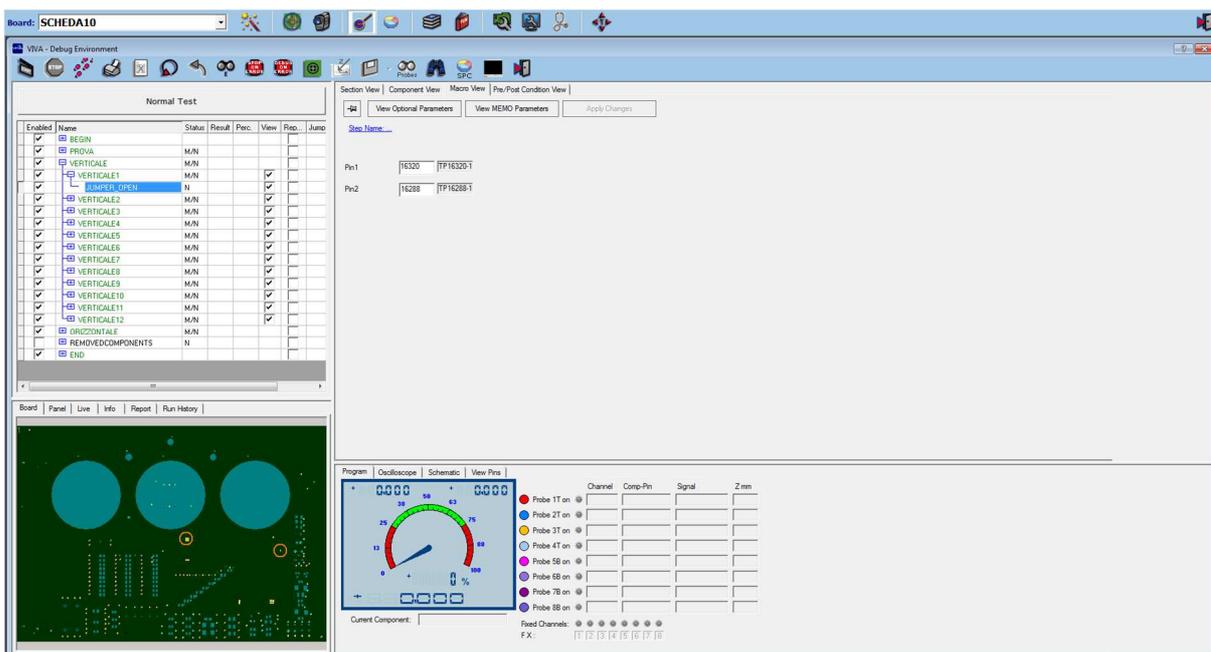


Figura 53 - Schermata di VIVA, griglia del programma da eseguire sulla macchina

Nella griglia l'operatore indica tutte le coppie dei punti da raggiungere, espressi tramite i rispettivi canali. Il primo punto è sempre uguale (canale 16320), raggiunto sempre della sonda 4, il secondo punto varia di volta in volta e viene raggiunto dalla sonda 3. I punti sono identificati come pin come si può osservare nella *figura 54*, ingrandimento della *figura 53*.



Figura 54 - Definizione di una coppia di punti nella griglia

Nella *figura 55* si osserva che tutti i posizionamenti sono identificati dalla macchina come operazioni "Jumper Open" nel senso che la macchina mantenendo fissa la sonda 4, sposta di volta in volta la sonda 3 e verifica che le coppie di punti siano isolate tra loro (verifica non significativa ai fini di questo studio). Prima di effettuare i posizionamenti, la sonda 3 viene posizionata su due punti di prova in corrispondenza della parte in basso delle piste verticali e

della parte sinistra delle piste orizzontali 25/25. I vari posizionamenti possono essere effettuati uno alla volta nell'ambito della singola prova sulla singola scheda, azionando il sistema tra un posizionamento e l'altro tramite tastiera, nella modalità *step by step*. La griglia del programma prevede la suddivisione tra piste orizzontali e verticali, nell'ambito delle quali i vari posizionamenti sono numerati secondo la numerazione attribuita ai punti nella precedente *figura 50*.

Enabled	Name	Status	Result	Perc.	View	Rep...	Jump
<input checked="" type="checkbox"/>	BEGIN						
<input checked="" type="checkbox"/>	PROVA	M/N					
<input checked="" type="checkbox"/>	VERTICALE	M/N					
<input checked="" type="checkbox"/>	VERTICALE1	M/N			<input checked="" type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/>	JUMPER_OPEN	N			<input checked="" type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/>	VERTICALE2	M/N			<input checked="" type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/>	VERTICALE3	M/N			<input checked="" type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/>	VERTICALE4	M/N			<input checked="" type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/>	VERTICALE5	M/N			<input checked="" type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/>	VERTICALE6	M/N			<input checked="" type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/>	VERTICALE7	M/N			<input checked="" type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/>	VERTICALE8	M/N			<input checked="" type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/>	VERTICALE9	M/N			<input checked="" type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/>	VERTICALE10	M/N			<input checked="" type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/>	VERTICALE11	M/N			<input checked="" type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/>	VERTICALE12	M/N			<input checked="" type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/>	ORIZZONTALE	M/N			<input checked="" type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/>	REMOVEDCOMPONENTS	N					
<input checked="" type="checkbox"/>	END						

Figura 55 - Griglia dei comandi

L'utilizzo dei canali consente di mantenere fissa la griglia in quanto la natura dei posizionamenti sulle dieci schede è simile; ciascun canale è di volta in volta associato una coordinata che varia da una scheda all'altra sulla base della geometria CAD riportata nel file ASCII. Una volta definita dunque la griglia dei comandi relativa alla scheda 1 è possibile mantenere fissa tale griglia e importare di volta in volta le informazioni dei file ASCII delle altre schede. In questo modo per ognuna delle schede si ottiene una cartella compressa (*figura 56*) contenente il programma che la macchina deve eseguire.

 SCHEDA1_{1}	06/08/2020 15:26	Cartella compressa	2.130 KB
 SCHEDA2_{1}	06/08/2020 16:31	Cartella compressa	2.028 KB
 SCHEDA3_{1}	06/08/2020 16:48	Cartella compressa	2.027 KB
 SCHEDA4_{1}	06/08/2020 16:58	Cartella compressa	2.026 KB
 SCHEDA5_{1}	06/08/2020 17:09	Cartella compressa	2.027 KB
 SCHEDA6_{1}	06/08/2020 17:19	Cartella compressa	2.027 KB
 SCHEDA6_{2}	06/08/2020 17:29	Cartella compressa	2.095 KB
 SCHEDA7_{1}	06/08/2020 17:35	Cartella compressa	2.090 KB
 SCHEDA8_{1}	06/08/2020 17:42	Cartella compressa	2.027 KB
 SCHEDA9_{1}	06/08/2020 17:54	Cartella compressa	2.029 KB
 SCHEDA10_{1}	06/08/2020 18:00	Cartella compressa	2.026 KB

Figura 56 - Cartelle compresse contenente i programmi da eseguire sulla macchina

Esecuzione delle prove di posizionamento

La prova di posizionamento della sonda 3 nei punti predefiniti consiste in cinque fasi successive che devono essere ripetute per ognuna delle dieci schede. Le fasi sono:

- 1) Carico della scheda
- 2) Impostazione della pressione esercitata dalla sonda sulla scheda
- 3) Esclusione delle teste
- 4) Allineamento dei fiducial
- 5) Esecuzione della prova

1. Carico della scheda

Il carico della scheda sul V8 automatico avviene secondo la procedura descritta nel paragrafo “Fissaggio della scheda su macchina automatica”. Usando la funzione dello “*Stopper Override*” le schede sono fissate sempre nella stessa posizione.

2. Impostazione della pressione esercitata dalla sonda sulla scheda

Per impostare la pressione esercitata dalla sonda sulla scheda si agisce sul parametro “*Down Position*” della sezione “Top” del “Board Configuration”. Proprio poiché la pressione esercitata dalla sonda è un parametro di Board, ovvero associato alla scheda, esso deve essere impostato per ognuna delle dieci schede. Come descritto nel paragrafo “Pressione e rapidità di posizionamento”, il parametro “*Down Position*” corrisponde alla quota z a cui deve posizionarsi la sonda rispetto al piano della scheda.

Il parametro z viene impostato pari a $-1,5\text{ mm}$. In particolare, con questo valore si garantisce la presenza dell'impronta della sonda sulla scheda nel punto in cui viene effettuato il posizionamento. La prova sulla scheda 1 è ripetuta con valori crescenti di z a partire da -1 mm fino ad arrivare a -2 mm con un incremento di $-0,5\text{ mm}$. Di volta in volta si osserva quanto l'impronta lasciata risulta definita tramite un monocolo (figura 57), non potendo osservare immediatamente l'impronta sul sistema di misura StarLite 200. Come si può osservare nel seguito, la variazione della quota z non influisce in modo significativo sulla posizione dell'impronta.



Figura 57 – Monocolo per l’osservazione delle impronte

3. Esclusione delle teste

Per evitare che il posizionamento in corrispondenza dei punti di interesse sia effettuato da una qualsiasi delle quattro teste presenti sul lato top della scheda (teste da 1 a 4) secondo un'ottimizzazione dei tempi operata in automatico dalla macchina, è necessario imporre per ognuna delle schede che il posizionamento sia effettuato dalla testa 3 e che la testa 4 si mantenga nelle coordinate prestabilite per ognuna delle operazioni "Jumper Open" effettuate. L'esclusione delle teste si opera selezionando con il mouse i punti fissati direttamente sul CAD della scheda e spuntando le teste che devono essere escluse.

4. Allineamento dei fiducial

Come accennato in precedenza, la macchina fa riferimento al file CAD della scheda OVP per cui è necessario un allineamento tra i fiducial della scheda e i corrispondenti riferimenti della macchina. In particolare, in questo caso i fiducial sui quali si effettua l'allineamento sono quelli che delimitano l'area in cui sono presenti le piste di calibrazione, FD5 e FD6. Per le varie prove si è optato per un allineamento manuale benché la macchina possa eseguirlo in modo automatico. L'allineamento viene effettuato dall'operatore tramite la visualizzazione a schermo dell'immagine della scheda ripresa con una telecamera e dei riferimenti circolari che vengono allineati ai fiducial tramite frecce da tastiera. Questo introduce un errore umano che si può quantificare in 2 o 3 pixel, circa 10 o 15 micron.

Come si può osservare successivamente, la variazione dello zoom di traslazione con il quale viene visualizzata l'immagine ripresa dalla telecamera e con il quale si effettua l'allineamento non influisce in modo significativo sulla posizione dell'impronta. Tutti gli allineamenti sono effettuati con zoom di traslazione pari a 1:1.

Anche la coppia di fiducial scelti per effettuare l'allineamento non influisce significativamente sulla posizione dell'impronta lasciata dalla sonda, come si può vedere successivamente dall'analisi delle impronte condotta sulla scheda 3.

5. Esecuzione della prova

Dalla griglia dei comandi si avvia la prova in modo tale che ciascun posizionamento sulle piste verticali e orizzontali possa essere effettuato in modo indipendente premendo la barra spaziatrice sulla tastiera (modalità *step by step*). Tra un posizionamento e l'altro si attendono cinque secondi per aumentare la definizione dell'impronta sulla scheda.

Prima di effettuare le prove sulle dieci schede, si effettuano dei posizionamenti sulla scheda 1 in corrispondenza delle piste di calibrazione verticali 8/8 e 10/10 e si osservano le impronte tramite il sistema di misura StarLite 200. Lo scopo è verificare che le impronte siano effettivamente visibili con i parametri selezionati, prima di condurre le dieci prove. Di seguito si riportano le *figure 58 e 59* con la vista frontale e dall'alto delle sonde 3 e 4 posizionate in corrispondenza delle piste verticali 8/8 e 10/10. La *figura 60* mostra invece ciò che si può osservare direttamente con la telecamera sulla macchina.

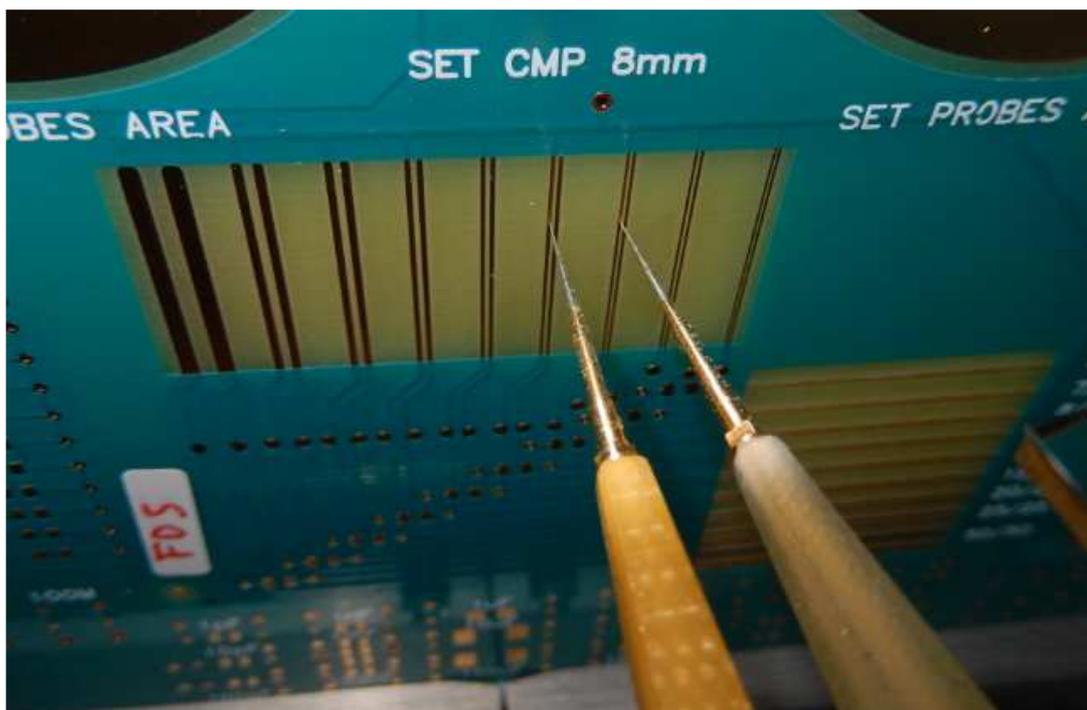


Figura 58 – Prove di posizionamento su piste verticali 8/8 e 10/10, vista frontale

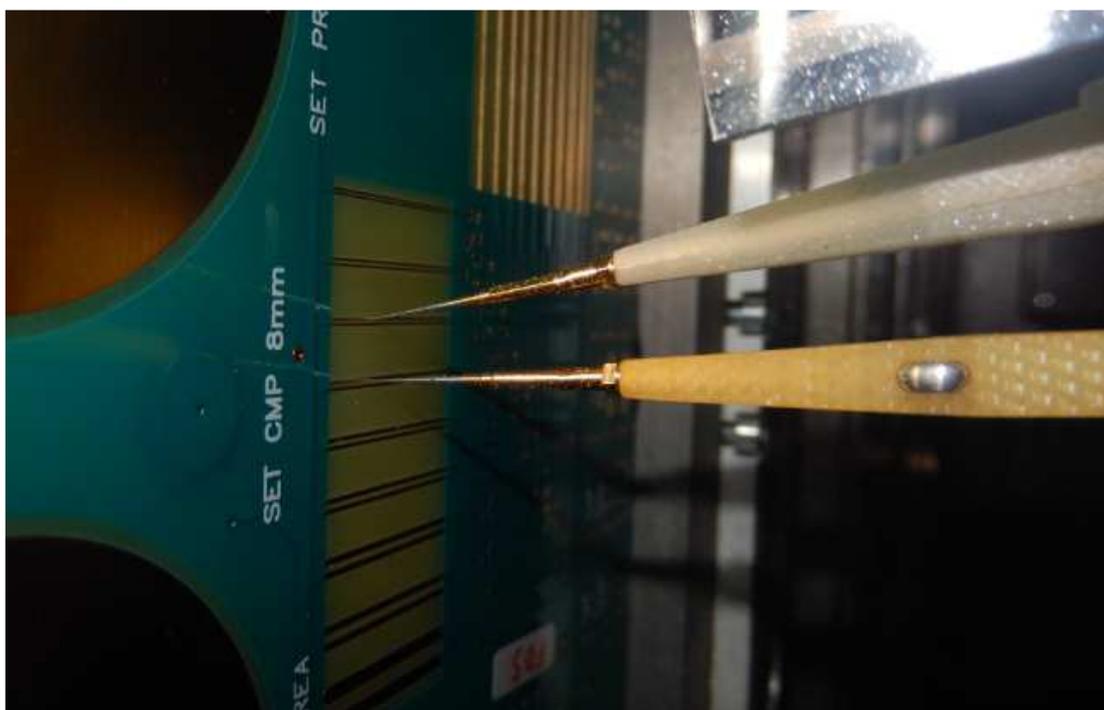


Figura 59 – Prove di posizionamento su piste verticali 8/8 e 10/10, vista dall'alto



Figura 60 – Immagine rilevata con la telecamera sulla pista verticale 10/10

Usando il sistema di misura StarLite 200 con ingrandimento 276x e variando opportunamente l'intensità e l'orientamento della luce è possibile mettere in evidenza le impronte lasciate dalle sonde sulle piste di calibrazione. Le immagini osservate con StarLite 200 sono riportate nelle figure 61 e 62.

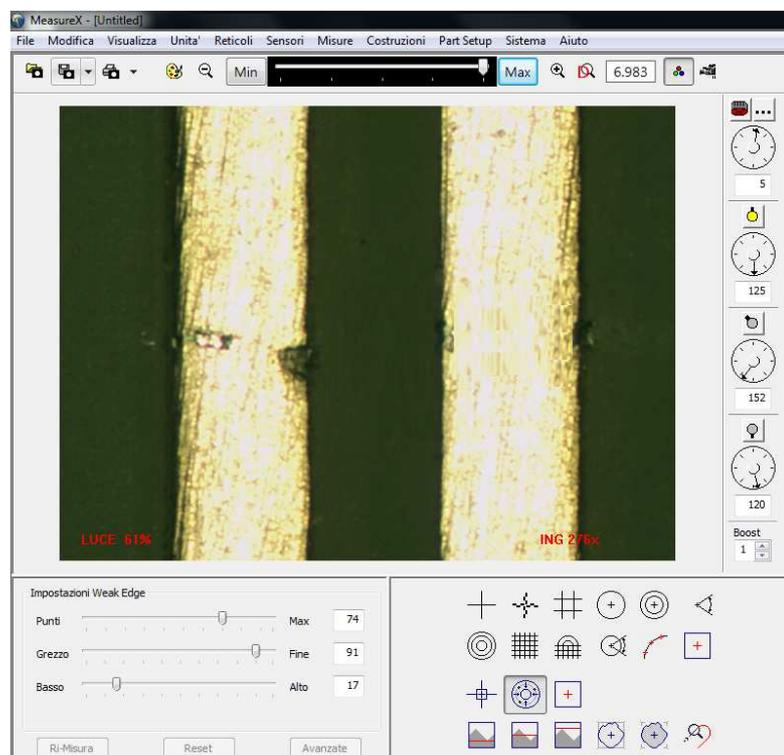


Figura 61 – Posizionamenti su pista 8/8

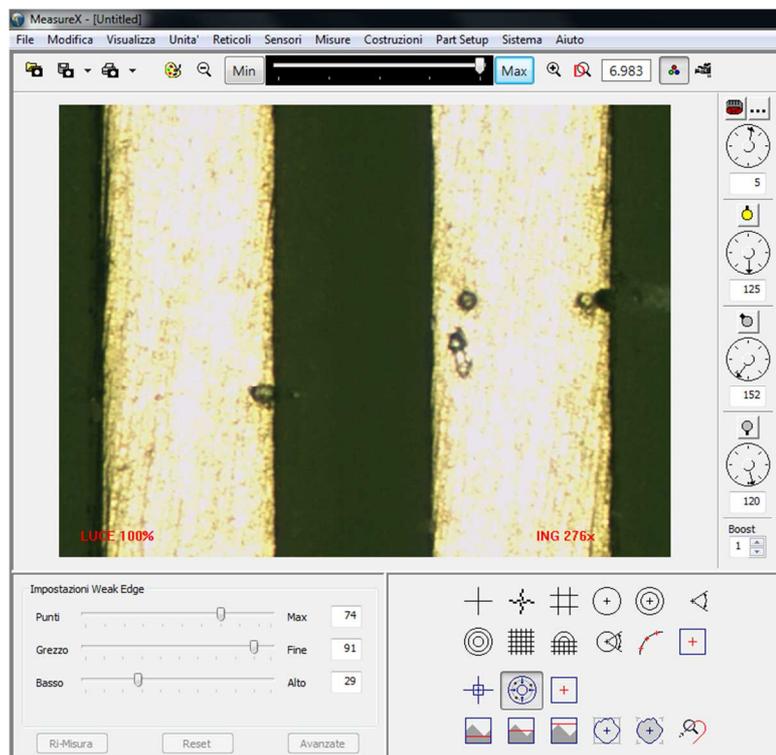


Figura 62 – Posizionamenti su pista 10/10

Dalle immagini si osservano delle geometrie circolari dai contorni più o meno definiti, rilevabili come cerchi sul sistema ottico di misura StarLite 200, in corrispondenza dei bordi delle piste di calibrazione o appena all'interno.

Prima di effettuare le prove sul V8 automatico viene verificato il corretto funzionamento di uno dei programmi generati su un V8 manuale, in modo da accertarsi che la scrittura del file ASCII sia corretta e che la conversione del file .xml sia andata a buon fine.

Immagini delle impronte visualizzate su StarLite 200

Si riportano di seguito una serie di immagini che rappresenta la casistica delle impronte osservate sulle schede tramite il sistema di misura ottico StarLite 200. Gli ingrandimenti sono tutti 276x, di volta in volta vengono variati intensità luminosa, orientamento della luce, saturazione e contrasto per mettere meglio in evidenza le impronte e renderle così rilevabili dal sensore Feature Finder. Tutti i punti dovrebbero cadere in corrispondenza del bordo delle piste di calibrazione (tra la pista e l'isolante).

Il fatto che i punti di posizionamento siano stati fissati secondo una configurazione a griglia facilita la ricerca delle impronte poiché individuata l'impronta corrispondente al punto 1 sul sistema di misura ottico StarLite 200, si possono trovare le altre impronte tramite semplici traslazioni (non è necessaria la combinazione di traslazioni verticali e orizzontali del piano su cui poggia la scheda)

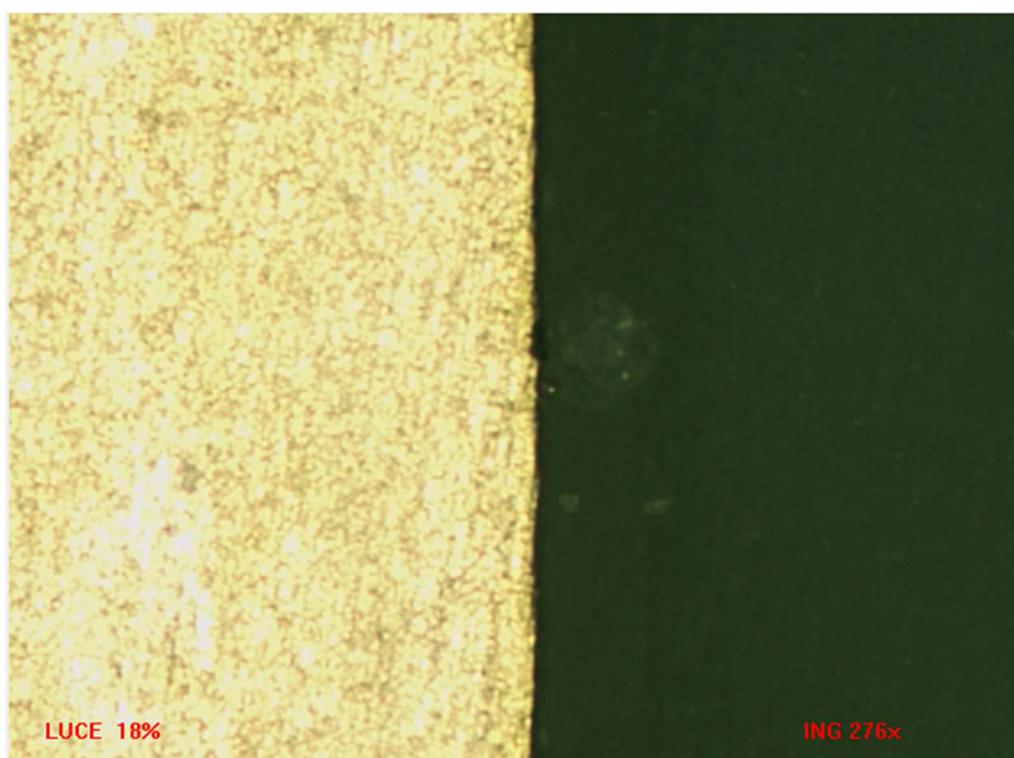


Figura 63 - Scheda 1, punto 4

L'impronta relativa al punto 4 della scheda 1 cade nell'isolante ed è di forma circolare (figura 63). Osservando accuratamente il punto in cui si trova l'impronta si distinguono chiaramente almeno tre cerchi di colore verde biancastro, evidenziati nell'ulteriore ingrandimento (figura 64), con bordo di colore rosso, blu e verde.

In realtà le prove effettuate sulla scheda 1 sono cinque per cui ci sono cinque impronte: la prima con "Down Position" pari a -1 mm , la seconda con "Down Position" pari a $-1,5\text{ mm}$, la terza con "Down Position" pari a -2 mm , la quarta con allineamento dei fiducial effettuato con zoom 1:1, la quinta con allineamento dei fiducial effettuato con ingrandimento x2.

Dalla *figura 64* si osserva dunque quanto già riportato nel paragrafo intitolato “Esecuzione delle prove di posizionamento”: sia il valore del “Down Position” che lo zoom impiegato nell’allineamento dei fiducial non influiscono in modo significativo sulla posizione dell’impronta che per la scheda 1 è identificata dal cerchio di bordo giallo entro il quale ricadono le altre due impronte non distinguibili chiaramente.

Da notare che la piccola variabilità osservata nella posizione dell’impronta al variare del parametro “Down Position” è dovuta alla combinazione della variazione della pressione esercitata e del gioco introdotto dalla sonda (paragrafo “Gioco della sonda”).

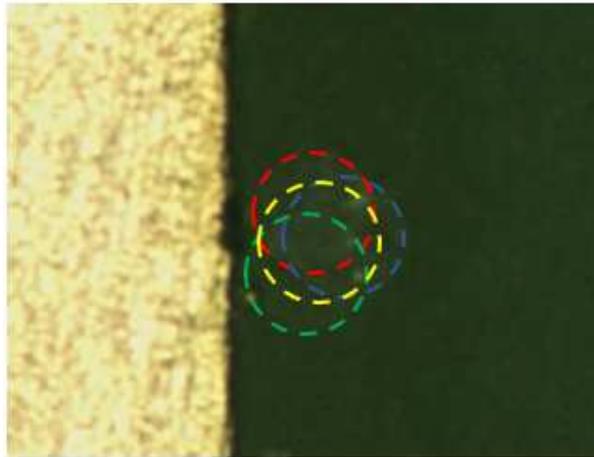


Figura 64 - Dettaglio Scheda 1, punto 4

Nella *figura 65* si osservano le impronte lasciate dalla sonda sulla scheda 2 in corrispondenza dei punti 1 e 2. Oltre ad una valutazione della posizione delle singole impronte e possibile fare una valutazione anche della posizione relativa delle impronte relativamente alla coordinata y. Il punto 1, a sinistra, cade in corrispondenza del bordo tra la pista di calibrazione e l’isolante, leggermente all’interno della pista di calibrazione. Il punto 2, a destra, cade nell’isolante e la sua coordinata y non coincide con quella del punto 1, anche se i punti richiesti sono tra loro allineati. Il punto 2 è più a destra della linea tra pista di calibrazione e isolante rispetto al punto 1, che almeno per la coordinata x si trova sicuramente prossimo alla posizione richiesta.

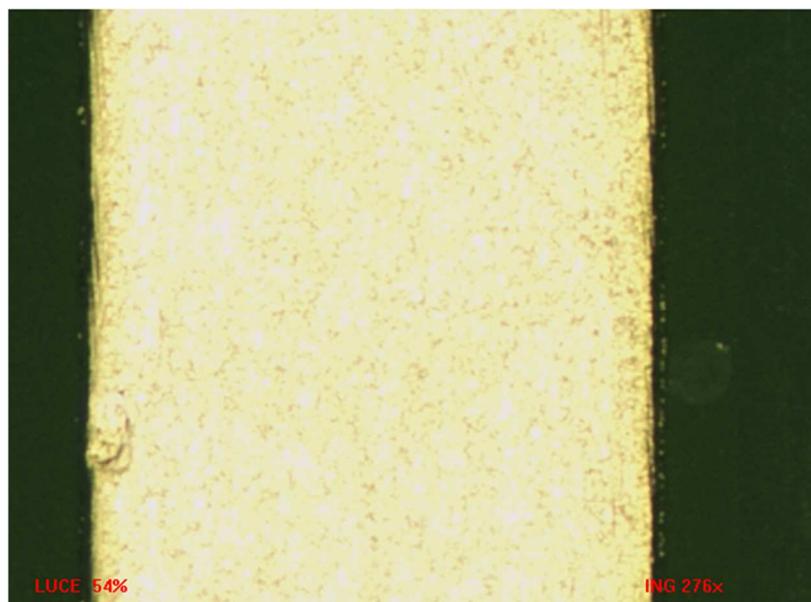


Figura 65 - Scheda 2, punti 1 e 2

Il punto 8 della scheda 2, la cui impronta è visibile nella *figura 66*, si trova almeno per quanto riguarda la coordinata x, nella posizione richiesta. Dall'immagine non si possono invece fare delle valutazioni circa la sua coordinata y. L'impronta lasciata dalla sonda è ben visibile sul rame della pista di calibrazione mentre è difficile cogliere la parte dell'impronta sull'isolante nell'ingrandimento 276x. Per rilevare l'impronta si fa dunque riferimento alla traccia presente sulla pista di calibrazione, identificata dal un bordo scuro.

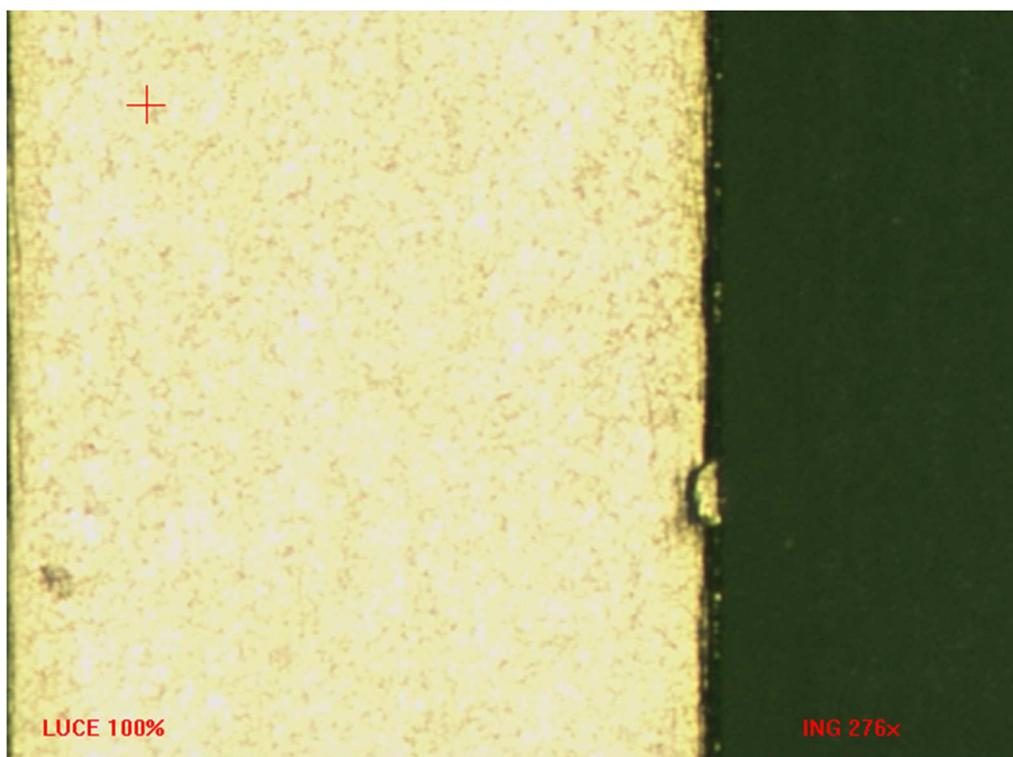


Figura 66 - Scheda 2, punto 8

Come già accennato, in generale se le impronte lasciate dalla sonda sulla scheda si trovano sull'isolante, ovvero nella parte della scheda tra le due piste di calibrazione, la rilevazione da parte del sensore Feature Finder del sistema ottico di misura StarLite 200 delle stesse risulta più difficile rispetto al caso in cui le impronte si trovino sul rame delle piste di calibrazione.

In particolare, l'impronta presente sull'isolante è generalmente ben visibile nell'ingrandimento 276x ma essendo normalmente sbiadita (*Figura 65* – Scheda 2, punti 1 e 2) il suo bordo non viene rilevato dal sensore di StarLite 200. Sono pertanto necessari alcuni accorgimenti per aumentare la visibilità del bordo dell'impronta da parte del sensore Feature Finder tra cui la conversione dell'immagine in bianco e nero e la massimizzazione dell'intensità luminosa. Un esempio di questo viene riportato nella *figura 68*, relativa al punto 10 della scheda 2. Aumentando molto l'intensità luminosa, l'isolante che è di colore verde, diventa grigio scuro nell'immagine in bianco e nero mentre il rame di colore giallo chiaro, diventa grigio chiaro, quasi bianco.

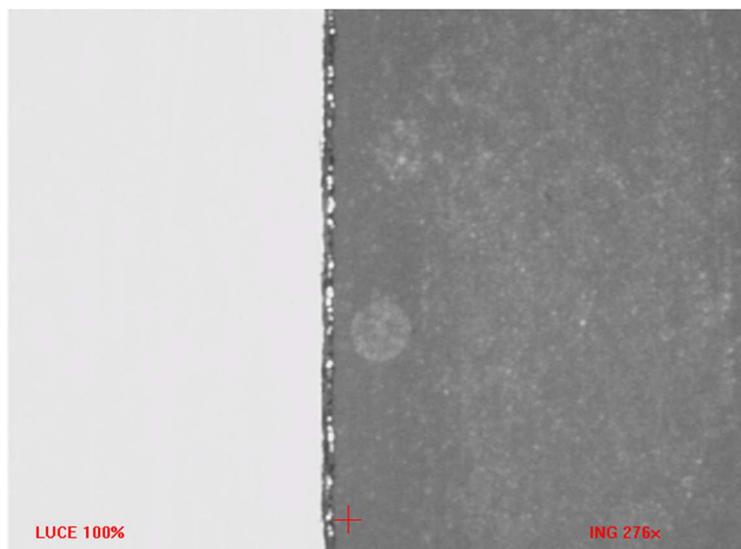


Figura 68 - Scheda 2, punto 10 – impronta nell'isolante

Nella *figura 69* si vede un esempio di impronta lasciata dalla sonda su una pista di calibrazione orizzontale (Scheda 3, punto 21). L'impronta è ben visibile ma il suo perimetro non è ben definito; essa viene rilevata come un cerchio, indicando tre punti in corrispondenza del suo bordo.

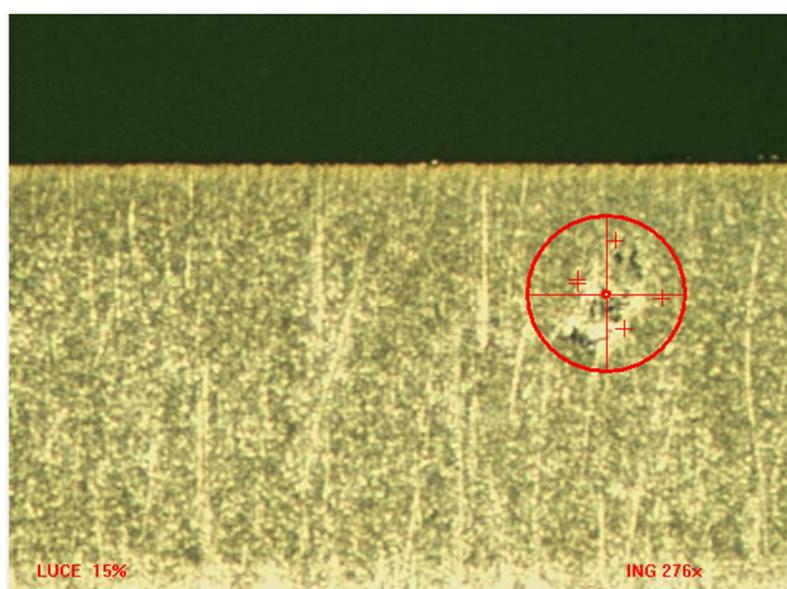


Figura 69 - Scheda 3, punto 21 – impronta sulla pista di calibrazione

Osservando la *figura 70* si vedono, in particolare in corrispondenza dei punti di posizionamento sull'isolante, due impronte sovrapposte: una è quella relativa ai posizionamenti effettuati a seguito di un allineamento dei fiducial FD1 in basso a sinistra e FD2 in alto destra sulla scheda con i riferimenti della macchina, la seconda è relativa ai posizionamenti effettuati a seguito di un allineamento dei fiducial FD5 e FD6 con i riferimenti della macchina. Dall'immagine osserva dunque quanto già riportato nel paragrafo intitolato "Esecuzione delle prove di posizionamento": la scelta dei fiducial sui quali effettuare l'allineamento della macchina non influisce significativamente sul posizionamento della sonda.

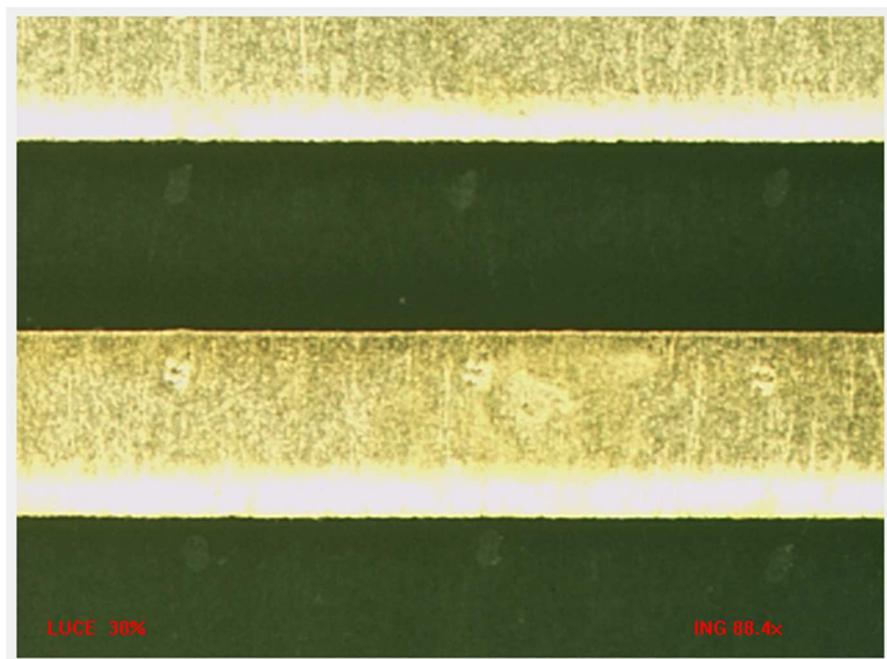


Figura 70 - Scheda 3, piste di calibrazione orizzontali 25/25

Nella *figura 71* relativa al punto 10 della scheda 5, si osserva la rilevazione dell'impronta come un cerchio a partire dall'indicazione di tre punti posti sul suo bordo. L'impronta si trova nell'isolante per cui si ricorre alla conversione in bianco e nero.

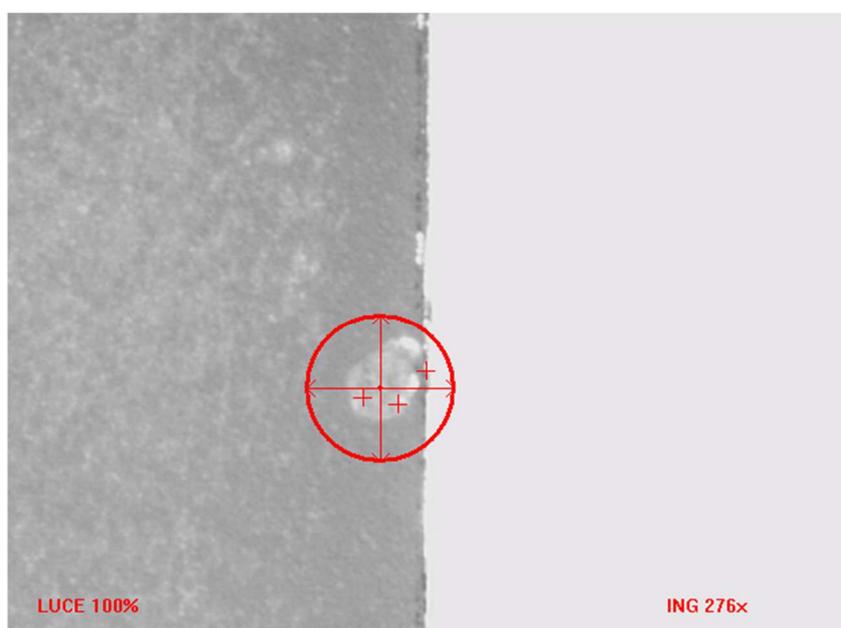


Figura 71 - Scheda 5, punto 10 – impronta nell'isolante

Nelle immagini precedenti la circonferenza rossa corrisponde all'identificazione dell'impronta come un cerchio da parte del sensore Feature Finder. Il centro di tale cerchio coincide con il centro dell'impronta e viene preso come riferimento rispetto al quale si valuta l'effettivo posizionamento della sonda.

Analisi delle impronte su Solidworks

Per ciascuna delle dieci schede vengono rilevate le impronte lasciate dalla sonda secondo le modalità descritte nel paragrafo “Immagini delle impronte visualizzate su StarLite 200”. Nei file .dxf prodotti, sono rilevate anche le posizioni dei fiducial FD5 e FD6 in modo che successivamente sia possibile misurare tutte le quote di interesse e effettuare un confronto.

Con la conversione dei file .dxf ottenuti su StarLite 200 in file .SLDDRW (Solidworks Drawing Document) si ottiene il risultato visibile nella *figura 72* con riferimento alla scheda 4.

In alto a destra e in basso a sinistra ci sono i fiducial, rispettivamente FD6 e FD5. In alto a sinistra e in basso a destra sono invece visibili le impronte lasciate dalla sonda, rilevate come circonferenze. Se ne riporta un ingrandimento di seguito (*figura 73*).

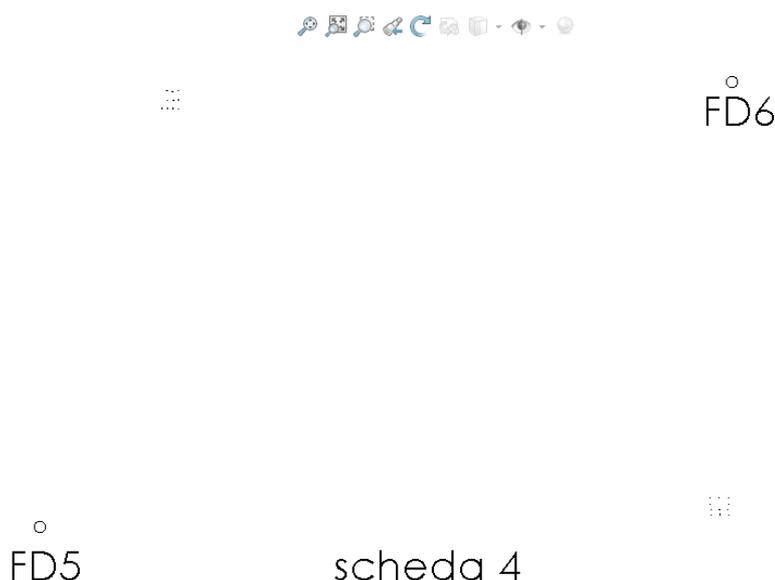


Figura 72 - Solidworks, rilevazione delle impronte sulla scheda 4

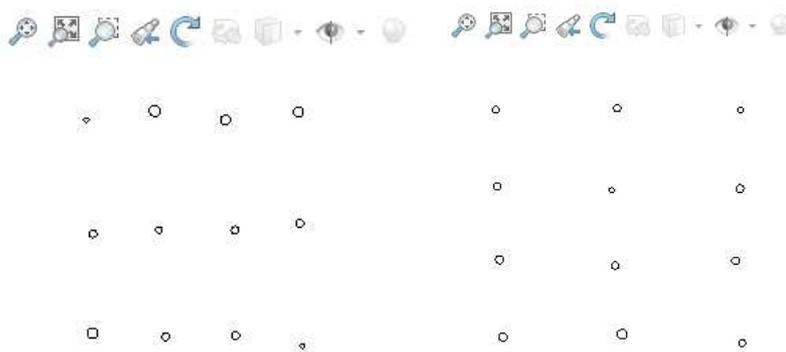


Figura 73 - Solidworks, rilevamento delle impronte sulle piste di calibrazione verticali (sx) e orizzontali (dx), scheda 4

Su ogni scheda vengono rilevate le quote x e y, rispetto ai fiducial FD5 e FD6 di ciascun punto. Queste quote corrispondono a quelle definite nel paragrafo “Coordinate rispetto ai fiducial FD5 e FD6”; è necessario che ci sia una corrispondenza tra le quote fissate in partenza per definire le coordinate “vere” dei punti di posizionamento e quelle misurate in questa fase affinché sia possibile effettuare un confronto.

Come esempio si riporta il caso relativo alla scheda 4. Il procedimento seguito per ognuna delle dieci schede è descritto dalle immagini successive (figure 74, 75, 76 e 77). Per la scheda 4 le coordinate "vere" sono quelle della figura 74 (già mostrate in precedenza).

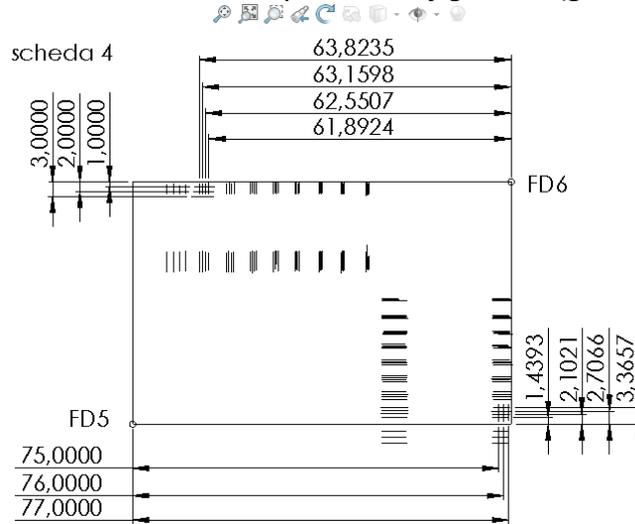


Figura 74 - Scheda 4, coordinate "vere"

Le coordinate "vere" vengono rinominate, secondo lo schema di figura 75, per agevolare il confronto tra le quote corrispondenti. Per le dieci schede alcune quote "vere" sono sempre uguali (ad esempio le quote "1", "2" e "3") mentre altre quote "vere" variano secondo i dati ottenuti dalla caratterizzazione delle schede (ad esempio le quote "4", "5", "6" e "7").

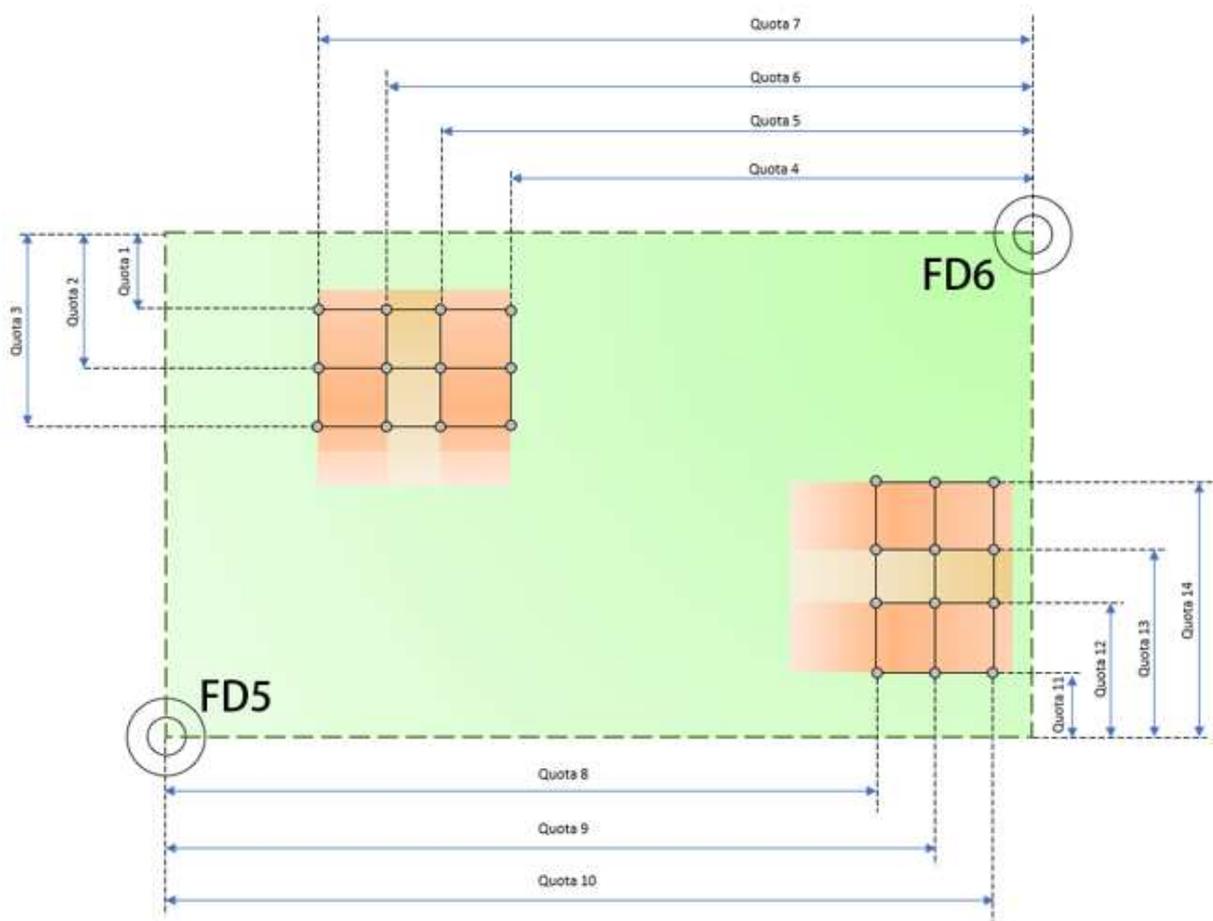


Figura 75 – Schema delle quote "vere" rinominate

Le quote misurate tramite Solidworks con riferimento alle impronte rilevate, per la scheda 4 sono riportate nella *figura 76*. Per ogni impronta, identificata in Solidworks tramite un cerchio che ne delimita il perimetro, si indicano le coordinate x e y del centro rispetto ai fiducial FD5 e FD6.

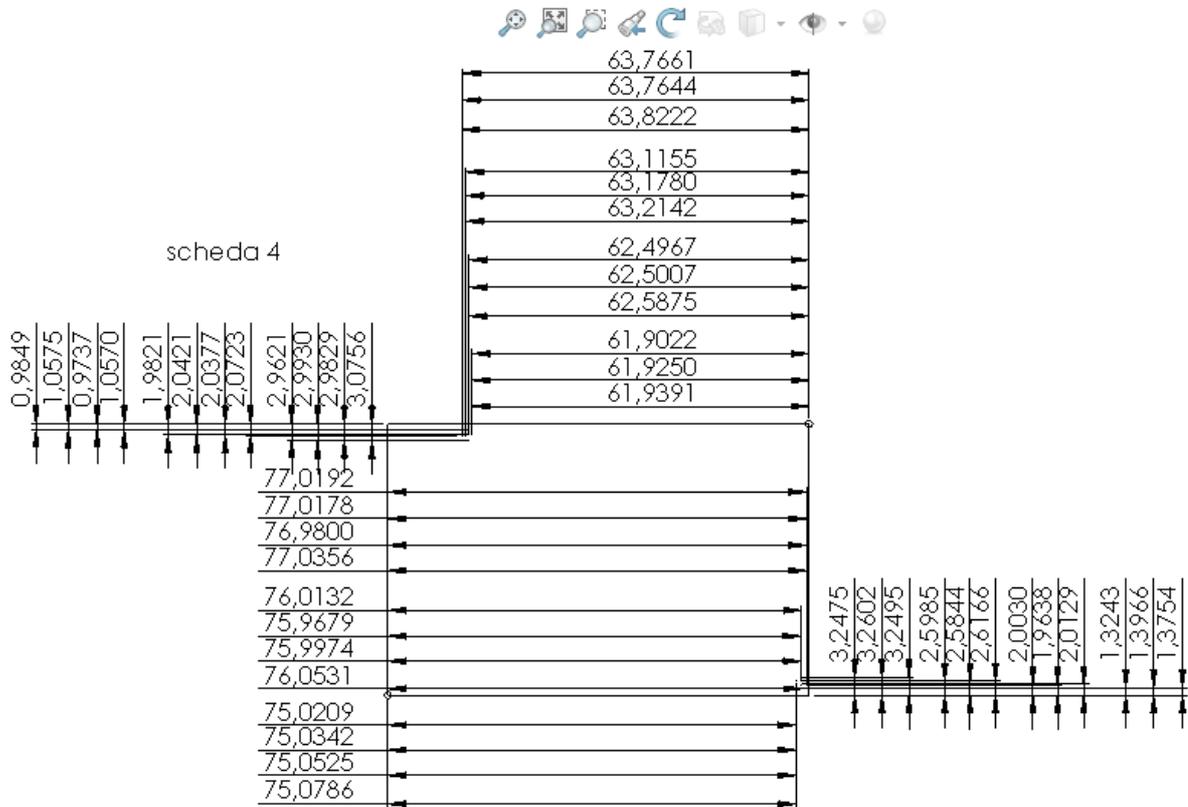


Figura 76 – Misurazione delle quote relative alle impronte, scheda 4

La corrispondenza tra le quote “vere” e quelle relative alle impronte è mostrata dalla *figura 77*. Tale corrispondenza rende possibile il confronto.

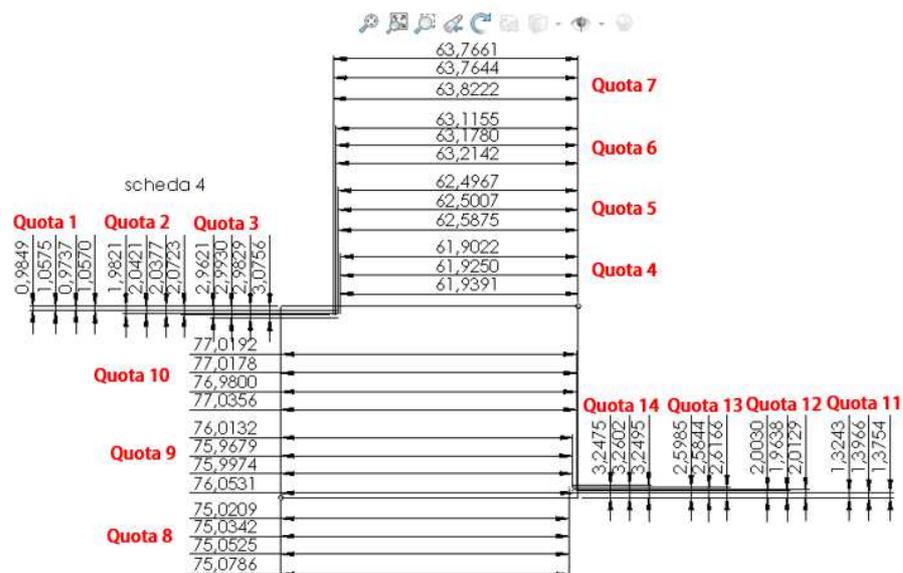


Figura 77 - “Confronto tra quote “vere” e posizioni effettive delle impronte

Definizione di ripetibilità di posizionamento

La ripetibilità è la capacità della macchina di riprodurre lo stesso output a fronte di un input costante [4]. In questo caso si richiede alla macchina il posizionamento ripetuto (che corrisponde all'input costante) ad una stessa quota in corrispondenza della linea che separa le piste di calibrazione dall'isolante. Come si osserva con la caratterizzazione delle schede OVP, quote corrispondenti su schede diverse hanno valori diversi (risultato atteso); per ottenere un risultato significativo si esegue dunque la ripetizione delle misure sulle piste delle dieci schede OVP a disposizione.

In generale, per un robot la ripetibilità di posizionamento di un sistema nello spazio viene espressa come il raggio di una sfera contenente tutte le posizioni realmente raggiunte dato un set di posizionamento. Ad esempio (figura 78), il punto teorico da raggiungere è $N = (x, y, z)$. I punti realmente raggiunti a seguito di ripetuti posizionamenti costituiscono una nuvola che può essere circonscritta da una sfera, avente raggio R pari alla ripetibilità del sistema [5].

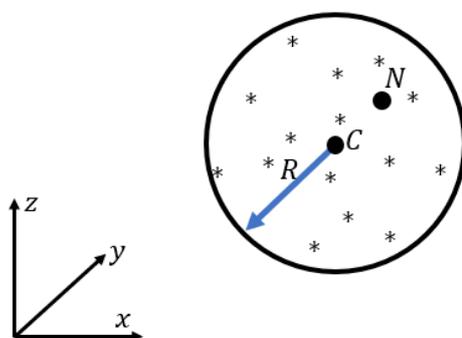


Figura 78 – Ripetibilità di posizionamento di un robot nel volume

Adattando il concetto di ripetibilità di posizionamento nello spazio di un robot al caso in studio, si ottiene la definizione della ripetibilità di posizionamento della macchina relativamente all'asse x e all'asse y descritta qualitativamente nella figura 79.

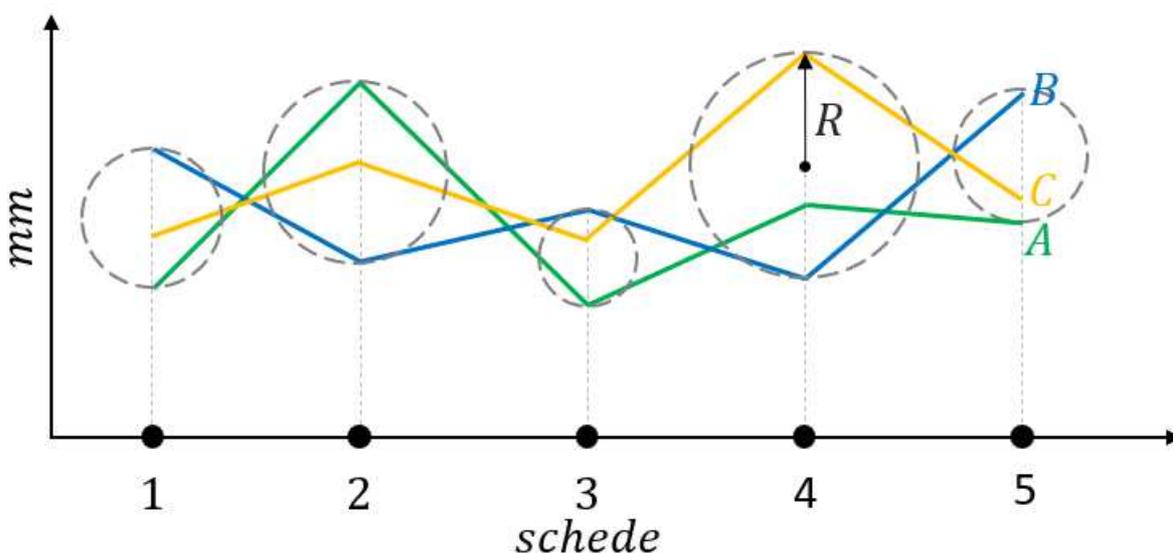


Figura 79 – Ripetibilità di posizionamento lungo l'asse x o y, riferita ad una quota di interesse

Gli andamenti rappresentati dalle rette spezzate, indicati con le lettere maiuscole si riferiscono alle quote misurate a seguito dei posizionamenti effettuati dalla macchina a partire dalle impronte lasciate dalla sonda. Con la lettera "A" ad esempio ci si riferisce alla prima misura effettuata su ognuna delle schede. Con la lettera "B" la seconda e così via. Alla fine della campagna di misurazioni dunque, sono disponibili le varie misure ripetute della stessa quota per ciascuna scheda. Si riporta come esempio il caso della quota 1 per la prima scheda (*figura 80*).

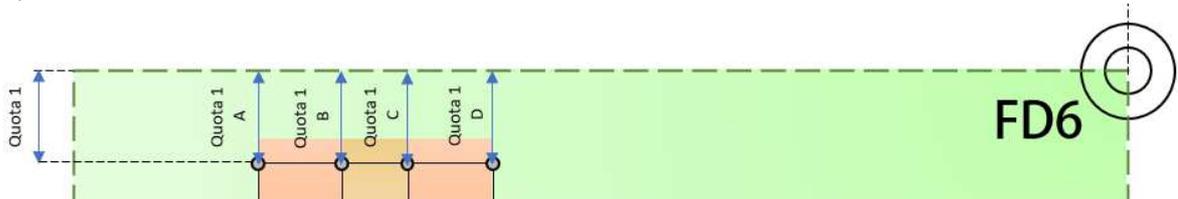


Figura 80 – misure ripetute della quota 1

Nell'ambito della singola quota, per ogni scheda è possibile individuare il valore massimo e il valore minimo delle misure effettuate e definire la circonferenza passante per essi; il raggio della più grande circonferenza trovata (nell'esempio quella corrispondente alla scheda 4) rappresenta la ripetibilità della macchina, indicata con R , lungo un determinato asse e per una determinata quota. C'è quindi una corrispondenza tra la definizione di ripetibilità di posizionamento normalmente impiegata per i robot che hanno uno spazio di lavoro tridimensionale e quella adottata per la macchina in studio che effettua i posizionamenti su un piano (quello su cui si trova la scheda).

Risultati

Piste di calibrazione verticali, ripetibilità lungo y

Quota 1

Con riferimento alla tabella 13, per ogni scheda la quota 1 è stata misurata quattro volte a partire dalle impronte corrispondenti ai punti 1, 2, 3 e 4. Le misure effettuate sono identificate con la lettera maiuscola A, B, C e D. Per poter cogliere in modo più efficace il significato dei dati essi sono riportati nel grafico 7.

Quota 1							
Schede	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	MAX (mm)	MIN (mm)	R (mm)
1	1,2106	1,1876	1,1952	1,2584	1,2584	1,1876	0,0354
2	0,9376	0,8820	0,9626	0,8868	0,9626	0,8820	0,0403
3	1,0172	1,0097	1,0296	0,9421	1,0296	0,9421	0,0438
4	0,9849	1,0575	0,9737	1,0570	1,0575	0,9737	0,0419
5	0,9463	0,9357	1,0178	0,9403	1,0178	0,9357	0,0411
6	1,0341	0,9263	1,0224	0,9396	1,0341	0,9263	0,0539
7	0,8512	0,9189	0,8458	0,9069	0,9189	0,8458	0,0366
8	0,9057	0,9986	0,8909	0,9634	0,9986	0,8909	0,0539
9	0,9907	1,0081	0,9526	0,9772	1,0081	0,9526	0,0555
10	0,7257	0,7973	0,7157	0,7806	0,7973	0,7157	0,0408

Tabella 13 – Dati relativi alla quota 1

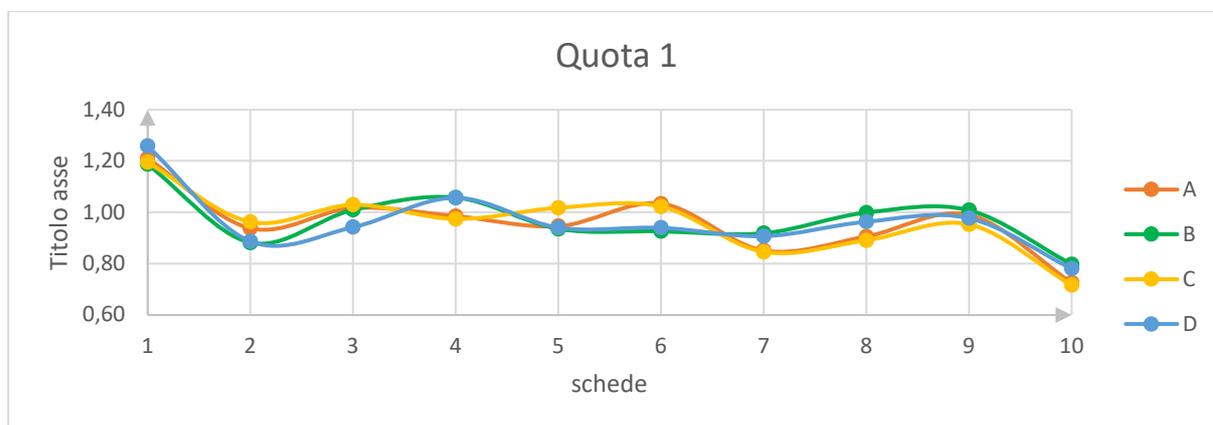


Grafico 7 – Ripetibilità di posizionamento quota 1

Quota 2

Con riferimento alla tabella 14, per ogni scheda la quota 2 è stata misurata quattro volte a partire dalle impronte corrispondenti ai punti 5, 6, 7 e 8. Le misure effettuate sono identificate con la lettera maiuscola A, B, C e D. Per poter cogliere in modo più efficace il significato dei dati essi sono riportati nel grafico 8.

Quota 2							
Schede	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	MAX (mm)	MIN (mm)	R (mm)
1	2,2514	2,2988	2,2711	2,2125	2,2988	2,2125	0,0432
2	1,9447	1,9456	1,9649	1,9242	1,9649	1,9242	0,0204
3	2,0213	2,0132	2,0247	1,9680	2,0247	1,9680	0,0284
4	1,9821	2,0421	2,0377	2,0723	2,0723	1,9821	0,0451
5	1,9727	1,9565	1,9958	1,9681	1,9958	1,9565	0,0197
6	2,0045	1,9834	1,9992	1,9809	2,0045	1,9809	0,0118
7	1,8514	1,9131	1,9013	1,9395	1,9395	1,8514	0,0441
8	1,9179	1,9813	1,9736	1,9735	1,9813	1,9179	0,0317
9	1,9533	2,0036	2,0045	2,0029	2,0045	1,9533	0,0256
10	1,7318	1,7851	1,7732	1,7824	1,7851	1,7318	0,0267

Tabella 14 – Dati relativi alla quota 2

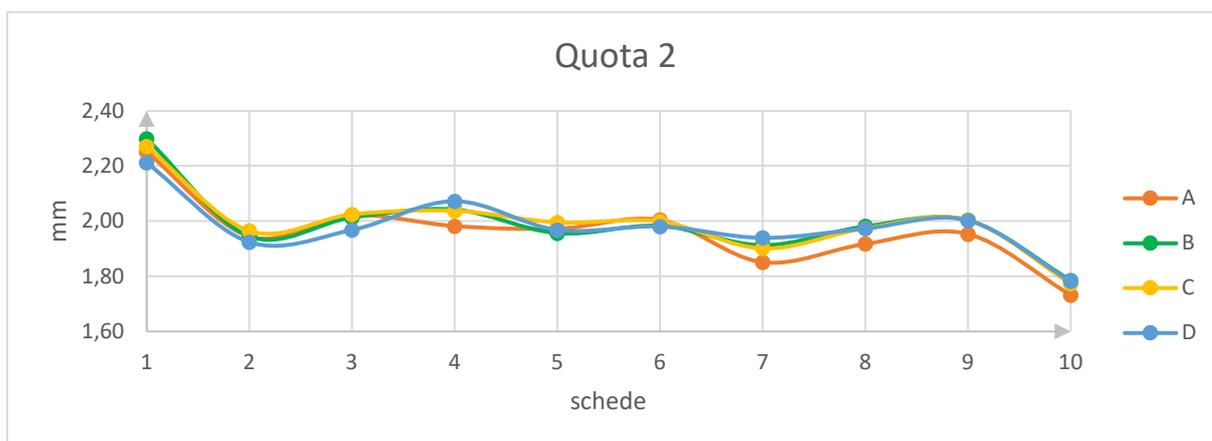


Grafico 8 – Ripetibilità di posizionamento quota 2

Quota 3

Con riferimento alla tabella 15, per ogni scheda la quota 3 è stata misurata quattro volte a partire dalle impronte corrispondenti ai punti 9, 10, 11 e 12. Le misure effettuate sono identificate con la lettera maiuscola A, B, C e D. Per poter cogliere in modo più efficace il significato dei dati essi sono riportati nel grafico 9.

Quota 3							
Schede	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	MAX (mm)	MIN (mm)	R (mm)
1	3,2186	3,2330	3,2388	3,2130	3,2388	3,2130	0,0129
2	2,9075	2,8869	2,8604	2,9483	2,9483	2,8604	0,0440
3	2,9966	2,9549	2,9516	3,0017	3,0017	2,9516	0,0251
4	2,9621	2,9930	2,9829	3,0756	3,0756	2,9621	0,0568
5	2,9210	2,9031	2,9157	2,9767	2,9767	2,9031	0,0368
6	2,9213	2,9320	2,9685	2,9893	2,9893	2,9213	0,0340
7	2,8915	2,8757	2,8886	2,9150	2,9150	2,8757	0,0393
8	2,9798	2,9345	2,9320	2,9069	2,9798	2,9069	0,0365
9	2,9927	2,9920	2,9359	2,9763	2,9927	2,9359	0,0284
10	2,7774	2,7315	2,7143	2,7169	2,7774	2,7143	0,0316

Tabella 15 – Dati relativi alla quota 3

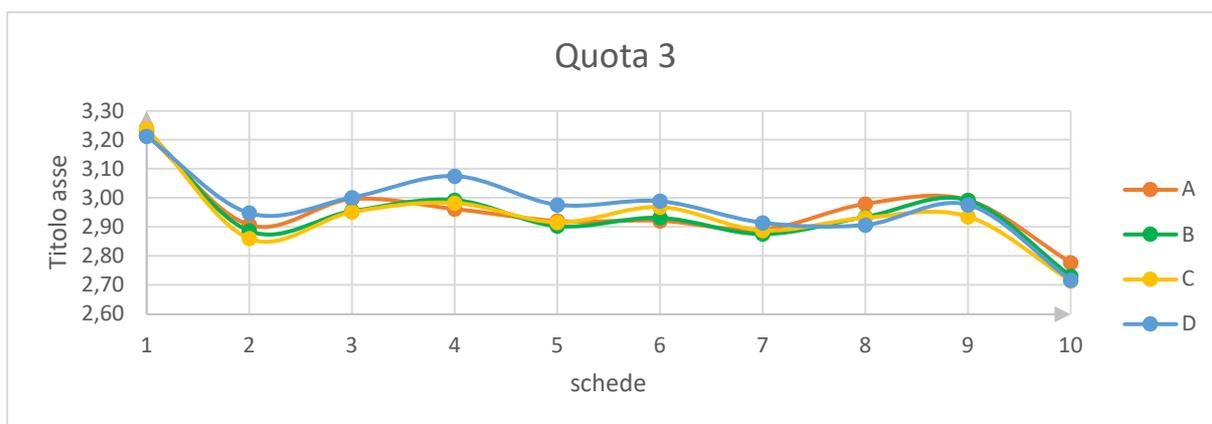


Grafico 9 – Ripetibilità di posizionamento quota 3

Le quote 1, 2 e 3 si riferiscono alla ripetibilità di posizionamento del sistema lungo l'asse y e sulle piste di calibrazione verticali. La ripetibilità di posizionamento del sistema lungo la coordinata y per le piste di calibrazione verticali corrisponde al massimo valore del parametro R tra quelli ottenuti per le quote 1, 2 e 3. I valori massimi di R nell'ambito delle singole quote sono evidenziati in azzurro nelle rispettive tabelle.

Il più grande tra i valori trovati risulta $R_{yv} = 0,0568 \text{ mm}$.

Piste di calibrazione verticali, ripetibilità lungo x

Quota 4

Con riferimento alla tabella 16, per ogni scheda la quota 4 è stata misurata tre volte a partire dalle impronte corrispondenti ai punti 4, 8 e 12. Le misure effettuate sono identificate con la lettera maiuscola A, B e C. Per poter cogliere in modo più efficace il significato dei dati essi sono riportati nel grafico 10.

Quota 4						
Schede	A (mm)	B (mm)	C (mm)	MAX (mm)	MIN (mm)	R (mm)
1	61,8337	61,8470	61,7752	61,8470	61,7752	0,0359
2	61,8484	61,9014	61,8899	61,9014	61,8484	0,0265
3	61,8560	61,8512	61,8571	61,8571	61,8512	0,0030
4	61,9022	61,9250	61,9391	61,9391	61,9022	0,0185
5	61,8476	61,9171	61,9200	61,9200	61,8476	0,0362
6	61,9549	61,9874	61,9504	61,9874	61,9504	0,0185
7	61,9316	61,9374	61,9369	61,9374	61,9316	0,0029
8	61,9348	61,9494	61,9567	61,9567	61,9348	0,0109
9	61,9145	61,9425	61,9414	61,9425	61,9145	0,0140
10	61,8623	61,9050	61,8860	61,9050	61,8623	0,0214

Tabella 16 – Dati relativi alla quota 4

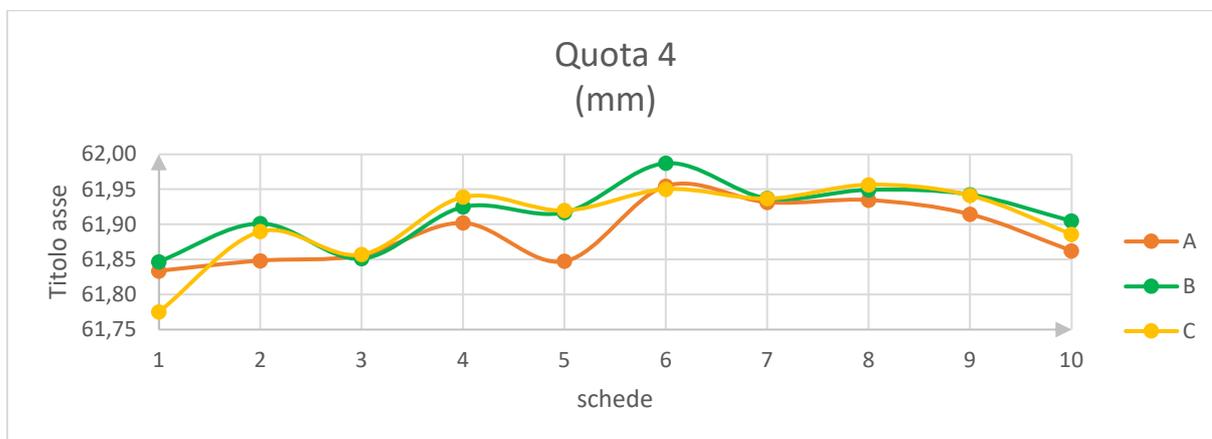


Grafico 10 – Ripetibilità di posizionamento quota 4

Quota 5

Con riferimento alla tabella 17, per ogni scheda la quota 5 è stata misurata tre volte a partire dalle impronte corrispondenti ai punti 3, 7 e 11. Le misure effettuate sono identificate con la lettera maiuscola A, B e C. Per poter cogliere in modo più efficace il significato dei dati essi sono riportati nel grafico 11.

Quota 5						
Schede	A (mm)	B (mm)	C (mm)	MAX (mm)	MIN (mm)	R (mm)
1	62,5316	62,5052	62,5000	62,5316	62,5000	0,0158
2	62,4842	62,4939	62,5366	62,5366	62,4842	0,0262
3	62,4834	62,4859	62,5921	62,5921	62,4834	0,0543
4	62,4967	62,5007	62,5875	62,5875	62,4967	0,0454
5	62,4901	62,4621	62,5801	62,5801	62,4621	0,0590
6	62,5975	62,5439	62,6579	62,6579	62,5439	0,0570
7	62,5258	62,5279	62,6153	62,6153	62,5258	0,0448
8	62,5297	62,5245	62,6298	62,6298	62,5245	0,0526
9	62,5126	62,5171	62,6223	62,6223	62,5126	0,0549
10	62,4772	62,4725	62,5714	62,5714	62,4725	0,0495

Tabella 17 – Dati relativi alla quota 5

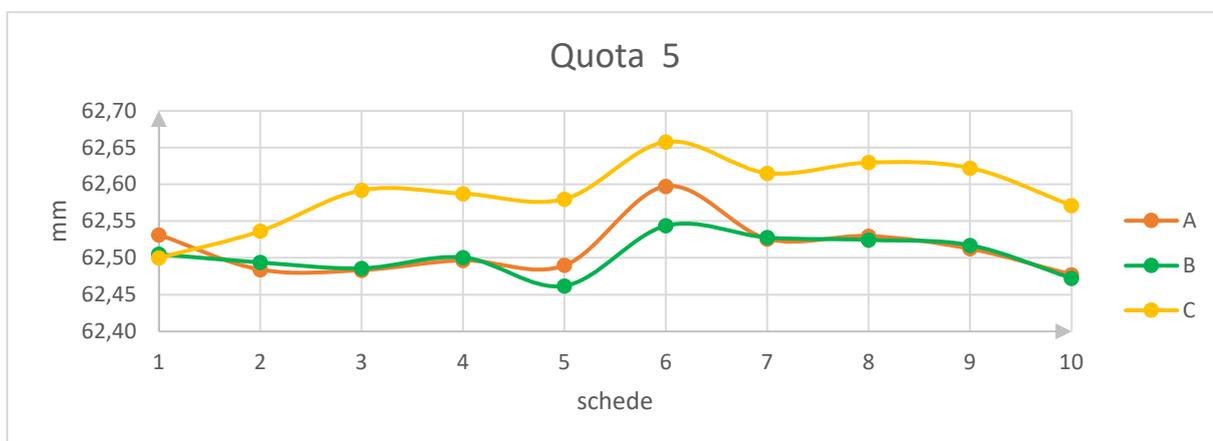


Grafico 11 – Ripetibilità di posizionamento quota 5

Quota 6

Con riferimento alla tabella 18, per ogni scheda la quota 6 è stata misurata tre volte a partire dalle impronte corrispondenti ai punti 2, 6 e 10. Le misure effettuate sono identificate con la lettera maiuscola A, B e C. Per poter cogliere in modo più efficace il significato dei dati essi sono riportati nel grafico 12.

Quota 6						
Schede	A (mm)	B (mm)	C (mm)	MAX (mm)	MIN (mm)	R (mm)
1	63,1721	63,1785	63,1675	63,1785	63,1675	0,0055
2	63,1391	63,2937	63,1219	63,2937	63,1219	0,0859
3	63,1185	63,1237	63,1994	63,1994	63,1185	0,0404
4	63,1155	63,1780	63,2142	63,2142	63,1155	0,0494
5	63,1461	63,1852	63,1906	63,1906	63,1461	0,0223
6	63,2054	63,2235	63,2228	63,2235	63,2054	0,0091
7	63,1216	63,1974	63,2029	63,2029	63,1216	0,0406
8	63,1471	63,2168	63,2188	63,2188	63,1471	0,0358
9	63,1180	63,1905	63,2129	63,2129	63,1180	0,0474
10	63,1046	63,1156	63,1773	63,1773	63,1046	0,0364

Tabella 18 – Dati relativi alla quota 6

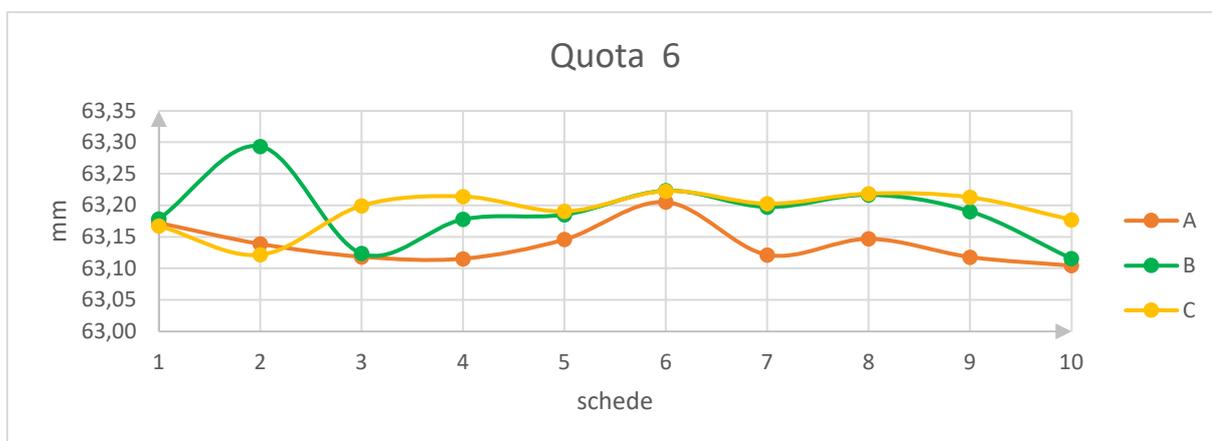


Grafico 12 – Ripetibilità di posizionamento quota 6

Quota 7

Con riferimento alla tabella 19, per ogni scheda la quota 7 è stata misurata tre volte a partire dalle impronte corrispondenti ai punti 1, 5 e 9. Le misure effettuate sono identificate con la lettera maiuscola A, B e C. Per poter cogliere in modo più efficace il significato dei dati essi sono riportati nel grafico 13.

Quota 7						
Schede	A (mm)	B (mm)	C (mm)	MAX (mm)	MIN (mm)	R (mm)
1	63,7627	63,7771	63,8273	63,8273	63,7627	0,0323
2	63,7560	63,7625	63,8065	63,8065	63,7560	0,0252
3	63,7563	63,7434	63,8448	63,8448	63,7434	0,0507
4	63,7661	63,7644	63,8222	63,8222	63,7644	0,0289
5	63,7500	63,7857	63,8493	63,8493	63,7500	0,0496
6	63,8024	63,8722	63,8718	63,8722	63,8024	0,0349
7	63,7767	63,8682	63,8828	63,8828	63,7767	0,0531
8	63,8037	63,7869	63,8726	63,8726	63,7869	0,0428
9	63,7945	63,7771	63,8601	63,8601	63,7771	0,0415
10	63,7407	63,7194	63,7652	63,7652	63,7194	0,0229

Tabella 19 – Dati relativi alla quota 7

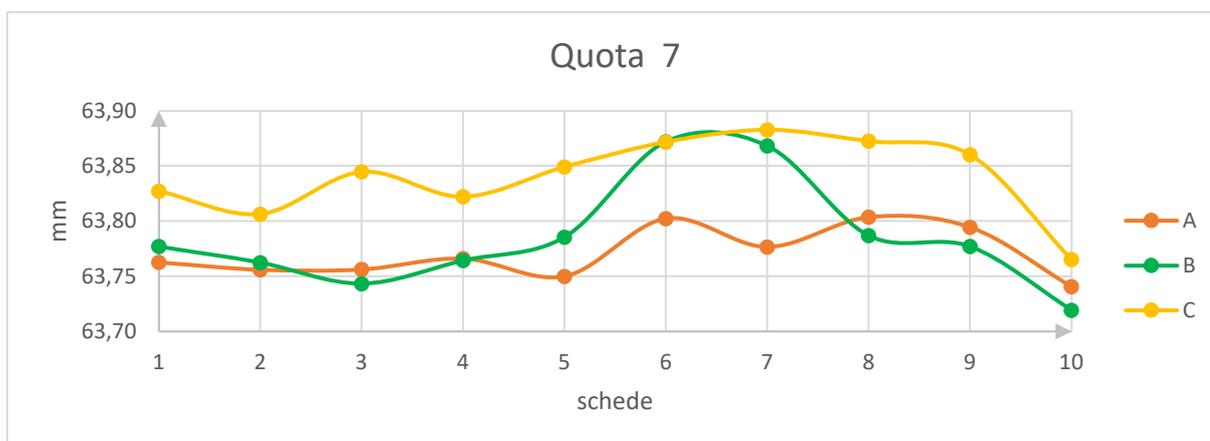


Grafico 13 – Ripetibilità di posizionamento quota 7

Le quote 4, 5, 6 e 7 si riferiscono alla ripetibilità di posizionamento del sistema lungo l'asse x sulle piste di calibrazione verticali. La ripetibilità di posizionamento del sistema lungo la coordinata x per le piste di calibrazione verticali corrisponde al massimo valore del parametro R tra quelli ottenuti per le quote 4, 5, 6 e 7. I valori massimi di R nell'ambito delle singole quote sono evidenziati in azzurro nelle rispettive tabelle. Il più grande tra i valori trovati risulta $R_{xv} = 0,0859 \text{ mm}$ (maggiore rispetto al caso precedente).

Piste di calibrazione orizzontali, ripetibilità lungo x

Quota 8

Con riferimento alla tabella 20, per ogni scheda la quota 8 è stata misurata quattro volte a partire dalle impronte corrispondenti ai punti 13, 14, 15 e 16. Le misure effettuate sono identificate con la lettera maiuscola A, B, C e D. Per poter cogliere in modo più efficace il significato dei dati essi sono riportati nel grafico 14.

Quota 8							
Schede	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	MAX (mm)	MIN (mm)	R (mm)
1	75,0605	75,0467	75,0197	75,0783	75,0783	75,0197	0,0293
2	75,0330	75,0081	75,0024	75,0620	75,0620	75,0024	0,0298
3	75,0266	74,9941	75,0269	75,1057	75,1057	74,9941	0,0558
4	75,0209	75,0342	75,0525	75,0786	75,0786	75,0209	0,0289
5	75,0223	75,0063	75,0182	75,1068	75,1068	75,0063	0,0503
6	75,0459	75,0591	75,0680	75,1136	75,1136	75,0459	0,0339
7	75,0190	75,0140	75,0189	75,0716	75,0716	75,0140	0,0288
8	75,0569	75,0440	75,0520	75,1101	75,1101	75,0440	0,0331
9	75,0653	75,0226	75,0593	75,0931	75,0931	75,0226	0,0353
10	75,0265	74,9842	75,0231	75,0710	75,0710	74,9842	0,0434

Tabella 20 – Dati relativi alla quota 8

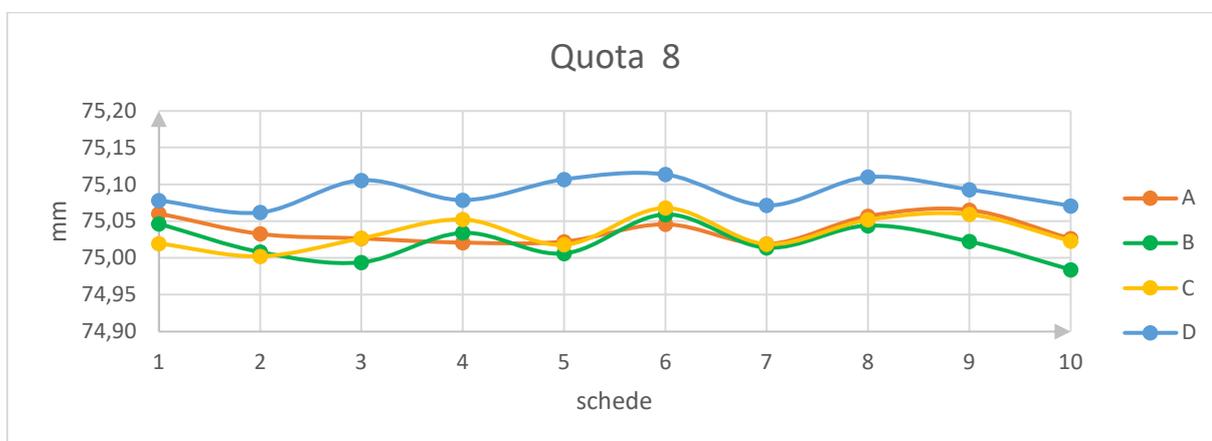


Grafico 14 – Ripetibilità di posizionamento quota 8

Quota 9

Con riferimento alla tabella 21, per ogni scheda la quota 9 è stata misurata quattro volte a partire dalle impronte corrispondenti ai punti 17, 18, 19 e 20. Le misure effettuate sono identificate con la lettera maiuscola A, B, C e D. Per poter cogliere in modo più efficace il significato dei dati essi sono riportati nel grafico 15.

Quota 9							
Schede	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	MAX (mm)	MIN (mm)	R (mm)
1	76,0934	76,0462	7,0587	76,0709	76,0934	76,0462	0,0472
2	75,9945	75,9931	76,0029	76,0311	76,0311	75,9931	0,0380
3	76,0135	76,0394	76,0132	75,9652	76,0394	75,9652	0,0371
4	76,0132	75,9679	75,9974	76,0531	76,0531	75,9679	0,0426
5	76,0158	75,9460	76,0227	76,0953	76,0953	75,9460	0,0746
6	76,0461	75,9844	76,0437	76,0652	76,0652	75,9844	0,0404
7	76,0015	75,9991	76,0289	76,0404	76,0404	75,9991	0,0413
8	76,0339	75,9772	76,0294	76,0778	76,0778	75,9772	0,0503
9	76,0566	76,0459	76,0477	76,0805	76,0805	76,0459	0,0346
10	76,0397	76,0176	76,0279	76,0642	76,0642	76,0176	0,0466

Tabella 21 – Dati relativi alla quota 9

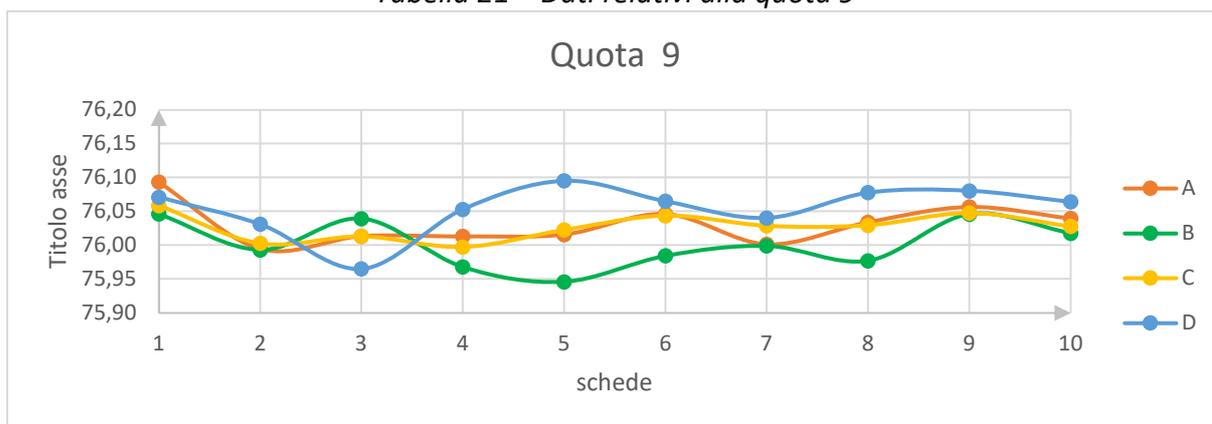


Grafico 15 – Ripetibilità di posizionamento quota 9

Quota 10

Con riferimento alla tabella 22, per ogni scheda la quota 10 è stata misurata quattro volte a partire dalle impronte corrispondenti ai punti 21, 22, 23 e 24. Le misure effettuate sono identificate con la lettera maiuscola A, B, C e D. Per poter cogliere in modo più efficace il significato dei dati essi sono riportati nel grafico 16.

Quota 10							
Schede	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	MAX (mm)	MIN (mm)	R (mm)
1	77,0327	77,0070	77,0062	77,0233	77,0327	77,0062	0,0132
2	77,0081	77,0045	76,9836	77,0067	77,0081	76,9836	0,0123
3	77,0416	76,9993	76,9929	77,0001	77,0416	76,9929	0,0243
4	77,0192	77,0178	76,9800	77,0356	77,0356	76,9800	0,0278
5	77,0391	77,0112	76,9553	77,0295	77,0391	76,9553	0,0419
6	77,0317	77,0505	77,0097	77,1189	77,1189	77,0097	0,0546
7	76,9898	77,0131	76,9616	77,0064	77,0131	76,9616	0,0257
8	77,0521	77,0345	77,0082	77,0442	77,0521	77,0082	0,0219
9	77,0452	77,0399	77,0144	77,0551	77,0551	77,0144	0,0204
10	76,9852	77,0278	76,9564	77,0097	77,0278	76,9564	0,0357

Tabella 22 – Dati relativi alla quota 10

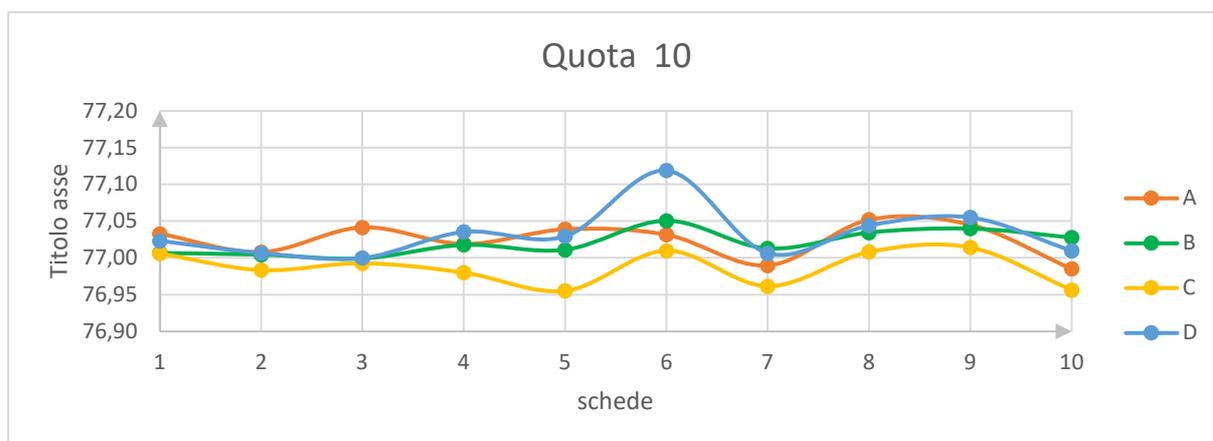


Grafico 16 – Ripetibilità di posizionamento quota 10

Le quote 8, 9 e 10 si riferiscono alla ripetibilità di posizionamento del sistema lungo l'asse x sulle piste di calibrazione orizzontali. La ripetibilità di posizionamento del sistema lungo la coordinata x per le piste di calibrazione orizzontali corrisponde al massimo valore del parametro R tra quelli ottenuti per le quote 8, 9 e 10. I valori massimi di R nell'ambito delle singole quote sono evidenziati in azzurro nelle rispettive tabelle. Il più grande tra i valori trovati risulta $R_{x0} = 0,0746 \text{ mm}$.

Piste di calibrazione orizzontali, ripetibilità lungo y

Quota 11

Con riferimento alla tabella 23, per ogni scheda la quota 11 è stata misurata tre volte a partire dalle impronte corrispondenti ai punti 16, 20 e 24. Le misure effettuate sono identificate con la lettera maiuscola A, B e C. Per poter cogliere in modo più efficace il significato dei dati, essi sono riportati nel grafico 17.

Quota 11						
Schede	A (mm)	B (mm)	C (mm)	MAX (mm)	MIN (mm)	R (mm)
1	1,7811	1,7184	1,8597	1,8597	1,7184	0,0707
2	1,3152	1,3405	1,3259	1,3405	1,3152	0,0127
3	1,4919	1,4940	1,4983	1,4983	1,4919	0,0032
4	1,3243	1,3966	1,3754	1,3966	1,3243	0,0362
5	1,6492	1,6800	1,6266	1,6800	1,6266	0,0267
6	1,4922	1,4360	1,4884	1,4922	1,4360	0,0281
7	1,2279	1,2829	1,2668	1,2829	1,2279	0,0275
8	1,0976	1,1546	1,1217	1,1546	1,0976	0,0285
9	1,3280	1,3708	1,3408	1,3708	1,3280	0,0214
10	1,2941	1,2957	1,2575	1,2957	1,2575	0,0191

Tabella 23 – Dati relativi alla quota 11

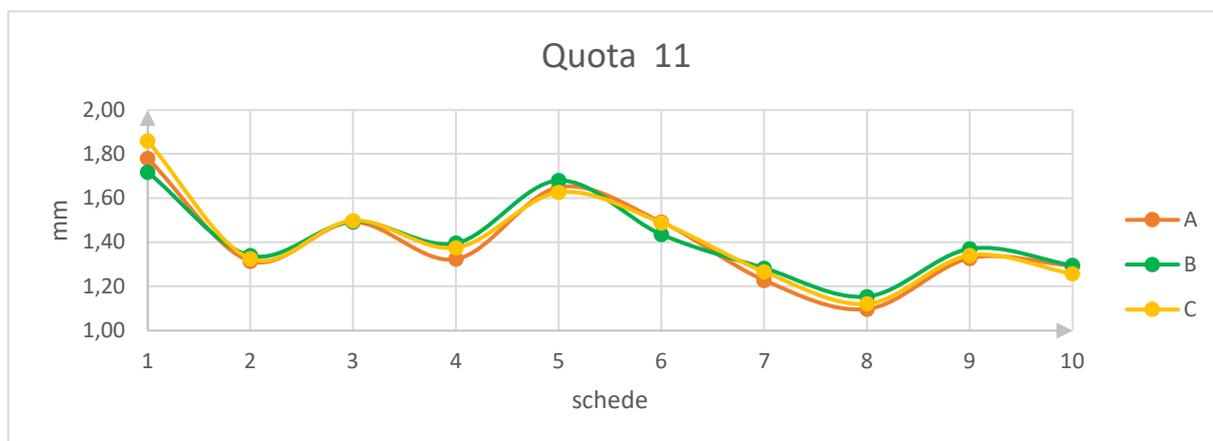


Grafico 17 – Ripetibilità di posizionamento quota 11

Quota 12

Con riferimento alla tabella 24, per ogni scheda la quota 12 è stata misurata tre volte a partire dalle impronte corrispondenti ai punti 15, 19 e 23. Le misure effettuate sono identificate con la lettera maiuscola A, B e C. Per poter cogliere in modo più efficace il significato dei dati essi sono riportati nel grafico 18.

Quota 12						
Schede	A (mm)	B (mm)	C (mm)	MAX (mm)	MIN (mm)	R (mm)
1	2,3987	2,4170	2,4382	2,4382	2,3987	0,0198
2	1,9868	1,9719	1,9979	1,9979	1,9719	0,0130
3	2,0906	2,0959	2,1116	2,1116	2,0906	0,0105
4	2,0030	1,9638	2,0129	2,0129	1,9638	0,0246
5	2,3316	2,3346	2,3057	2,3346	2,3057	0,0145
6	2,0698	2,0956	2,0841	2,0956	2,0698	0,0129
7	1,8732	1,8823	1,9027	1,9027	1,8732	0,0148
8	1,7309	1,7633	1,7535	1,7633	1,7309	0,0162
9	1,9465	1,9835	1,9977	1,9977	1,9465	0,0256
10	1,9196	1,9070	1,8962	1,9196	1,8962	0,0117

Tabella 24 – Dati relativi alla quota 12

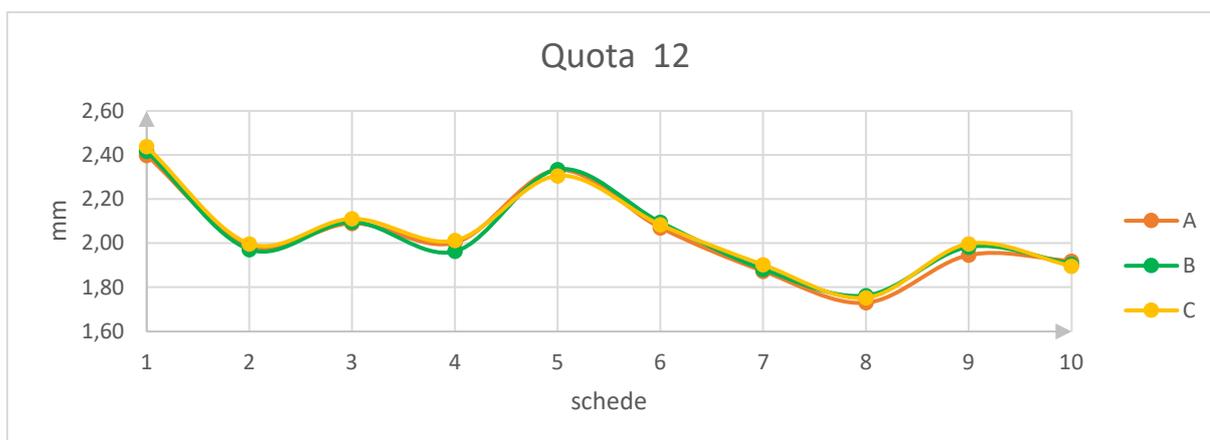


Grafico 18 – Ripetibilità di posizionamento quota 12

Quota 13

Con riferimento alla tabella 25, per ogni scheda la quota 13 è stata misurata tre volte a partire dalle impronte corrispondenti ai punti 14, 18 e 22. Le misure effettuate sono identificate con la lettera maiuscola A, B e C. Per poter cogliere in modo più efficace il significato dei dati essi sono riportati nel grafico 19.

Quota 13						
Schede	A (mm)	B (mm)	C (mm)	MAX (mm)	MIN (mm)	R (mm)
1	3,0022	3,0234	3,0101	3,0234	3,0022	0,0106
2	2,5798	2,5623	2,5580	2,5798	2,5580	0,0109
3	2,6846	2,7340	2,7141	2,7340	2,6846	0,0247
4	2,5985	2,5844	2,6166	2,6166	2,5844	0,0161
5	2,9066	2,9082	2,8833	2,9082	2,8833	0,0124
6	2,6800	2,6850	2,7014	2,7014	2,6800	0,0107
7	2,4828	2,4889	2,4857	2,4889	2,4828	0,0031
8	2,3578	2,3440	2,3606	2,3606	2,3440	0,0083
9	2,5868	2,5810	2,5978	2,5978	2,5810	0,0084
10	2,5044	2,4911	2,5187	2,5187	2,4911	0,0138

Tabella 25 – Dati relativi alla quota 13

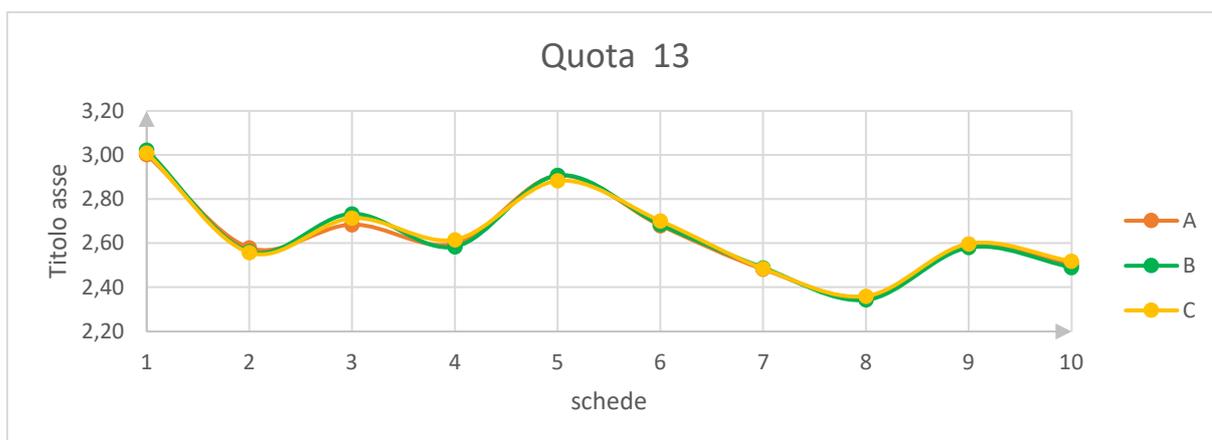


Grafico 19 – Ripetibilità di posizionamento quota 13

Quota 14

Con riferimento alla tabella 26, per ogni scheda la quota 14 è stata misurata tre volte a partire dalle impronte corrispondenti ai punti 13, 17 e 21. Le misure effettuate sono identificate con la lettera maiuscola A, B e C. Per poter cogliere in modo più efficace il significato dei dati, essi sono riportati nel grafico 20.

Quota 14						
Schede	A (mm)	B (mm)	C (mm)	MAX (mm)	MIN (mm)	R (mm)
1	3,7126	3,7412	3,7321	3,7412	3,7126	0,0143
2	3,2249	3,2063	3,2535	3,2535	3,2063	0,0236
3	3,3634	3,3491	3,3451	3,3634	3,3451	0,0091
4	3,2475	3,2602	3,2495	3,2602	3,2475	0,0064
5	3,5779	3,6108	3,5669	3,6108	3,5669	0,0219
6	3,3630	3,3809	3,3689	3,3809	3,3630	0,0090
7	3,1192	3,1402	3,1607	3,1607	3,1192	0,0207
8	3,0108	3,0404	3,0068	3,0404	3,0068	0,0168
9	3,2333	3,2493	3,2756	3,2756	3,2333	0,0212
10	3,1752	3,2021	3,1601	3,2021	3,1601	0,0210

Tabella 26 – Dati relativi alla quota 14

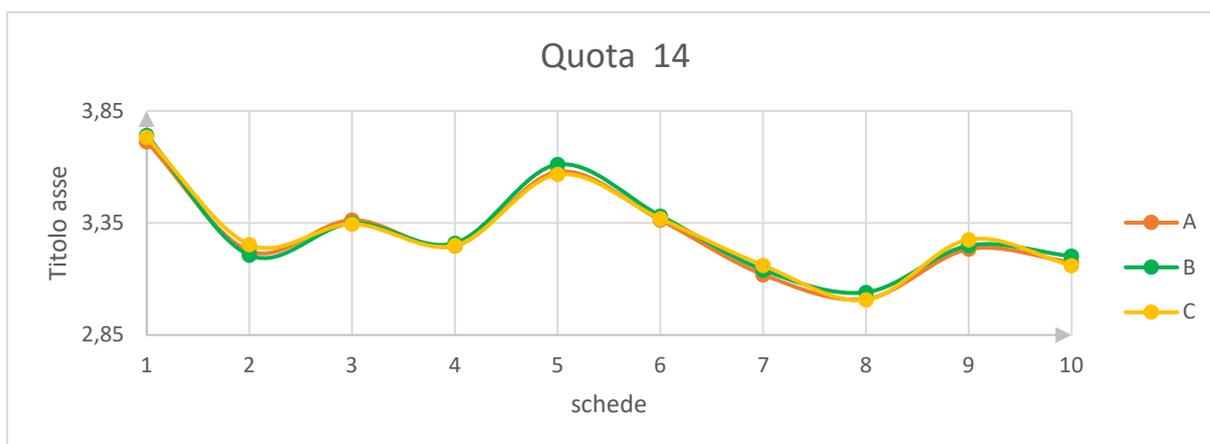


Grafico 20 – Ripetibilità di posizionamento quota 14

Le quote 11, 12, 13 e 14 si riferiscono alla ripetibilità di posizionamento del sistema lungo l'asse y e sulle piste di calibrazione orizzontali. La ripetibilità di posizionamento del sistema lungo la coordinata y per le piste di calibrazione orizzontali corrisponde al massimo valore del parametro R tra quelli ottenuti per le quote 11, 12, 13 e 14. I valori massimi di R nell'ambito delle singole quote sono evidenziati in azzurro nelle rispettive tabelle. Il più grande tra i valori trovati risulta $R_{y0} = 0,0707 \text{ mm}$.

Ripetibilità di posizionamento del sistema

Ripetibilità di posizionamento massima del sistema

Si riporta di seguito una tabella riassuntiva (*tabella 27*) in cui sono indicati i massimi valori della ripetibilità di posizionamento del sistema lungo gli assi x e y per le piste di calibrazione 25/25 verticali e orizzontali su cui sono state effettuate le prove.

Ripetibilità di posizionamento massima, piste 25/25	
$R_{xv} : \pm 0,0859 \text{ mm}$	$R_{xo} : \pm 0,0746 \text{ mm}$
$R_{yv} : \pm 0,0568 \text{ mm}$	$R_{yo} : \pm 0,0707 \text{ mm}$

Tabella 27 – Ripetibilità di posizionamento massima del sistema, valutazione preliminare (valori massimi)

R_{xv} : ripetibilità di posizionamento lungo x, piste di calibrazione verticali

R_{yv} : ripetibilità di posizionamento lungo y, piste di calibrazione verticali

R_{xo} : ripetibilità di posizionamento lungo x, piste di calibrazione orizzontali

R_{yo} : ripetibilità di posizionamento lungo y, piste di calibrazione orizzontali

I valori riportati nella *tabella 27* corrispondono a quelli massimi ottenuti e derivano dalla diretta applicazione della definizione di ripetibilità di posizionamento adottata per il caso in studio. In particolare, non si tengono in considerazione le possibili distrazioni nella rilevazione delle misure, errori umani o altri fattori casuali e incidenti sulla rilevazione delle quote, per cui è opportuno osservare gli andamenti completi della ripetibilità di posizionamento escludendo i dati che maggiormente si discostano dal valore medio. I risultati riassunti nella *tabella 27* rappresentano dunque solo una valutazione preliminare della ripetibilità di posizionamento.

Valutazione dei risultati ottenuti

I risultati ottenuti relativamente alla ripetibilità di posizionamento sono in linea con le attese. Escludendo infatti le rarissime eccezioni rappresentate dalla quota 6 sulla scheda 2, dalla quota 9 sulla scheda 5 e dalla quota 11 sulla scheda 1 si ottiene complessivamente un valore massimo della ripetibilità di posizionamento del sistema tra i cinque e i sei centesimi di millimetro (tra i 50 e i 60 micron) sia sull'asse x che sull'asse y. Tale valore si dimezza se si considerano i valori medi degli andamenti riportati (Figure 81, 82, 83 e 84).

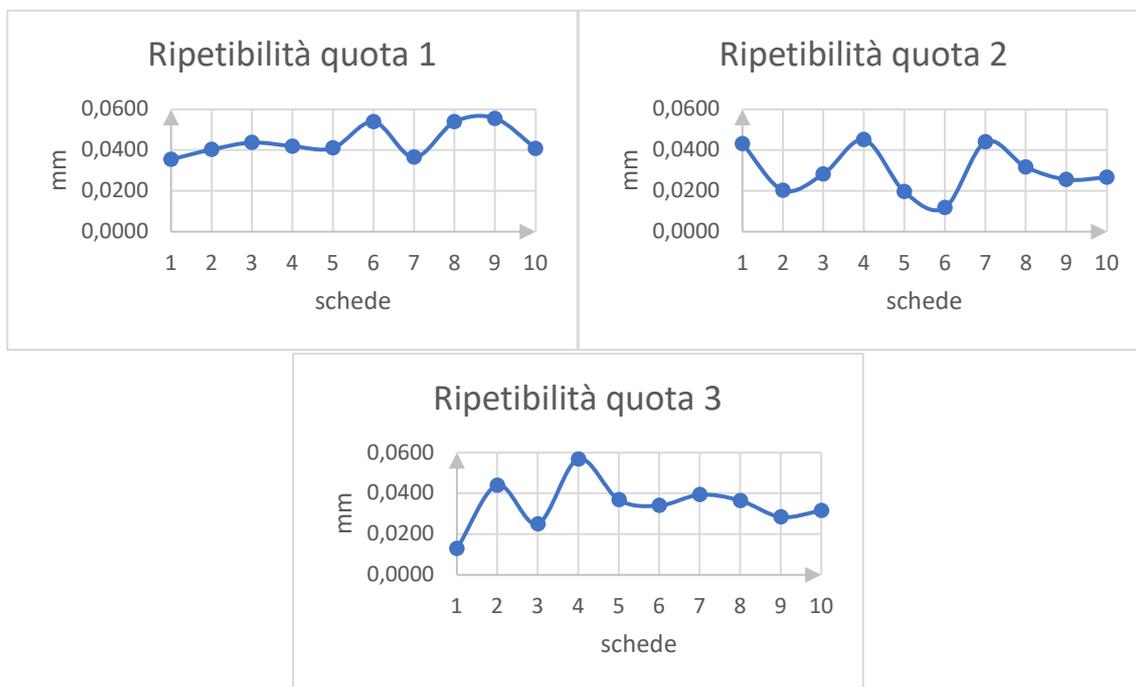


Figura 81 – Ripetibilità di posizionamento lungo y, piste di calibrazione verticali 25/25

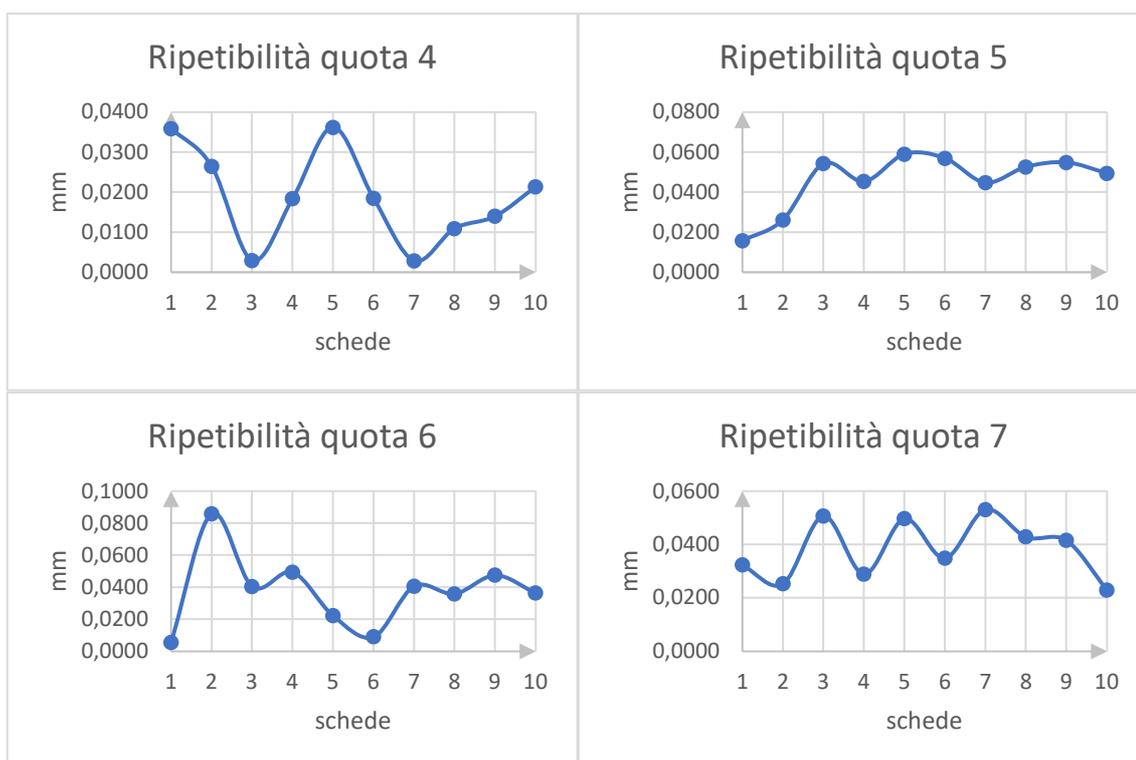


Figura 82 – Ripetibilità di posizionamento lungo x, piste di calibrazione verticali 25/25

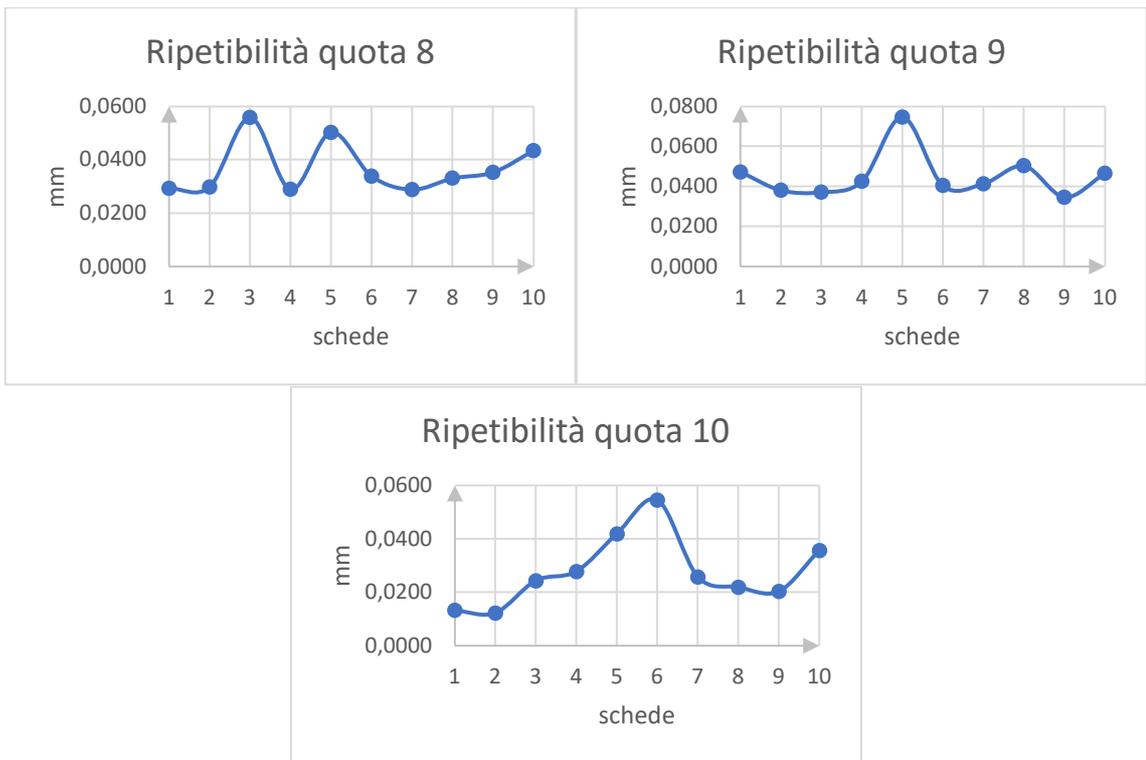


Figura 83 – Ripetibilità di posizionamento lungo x, piste di calibrazione orizzontali 25/25

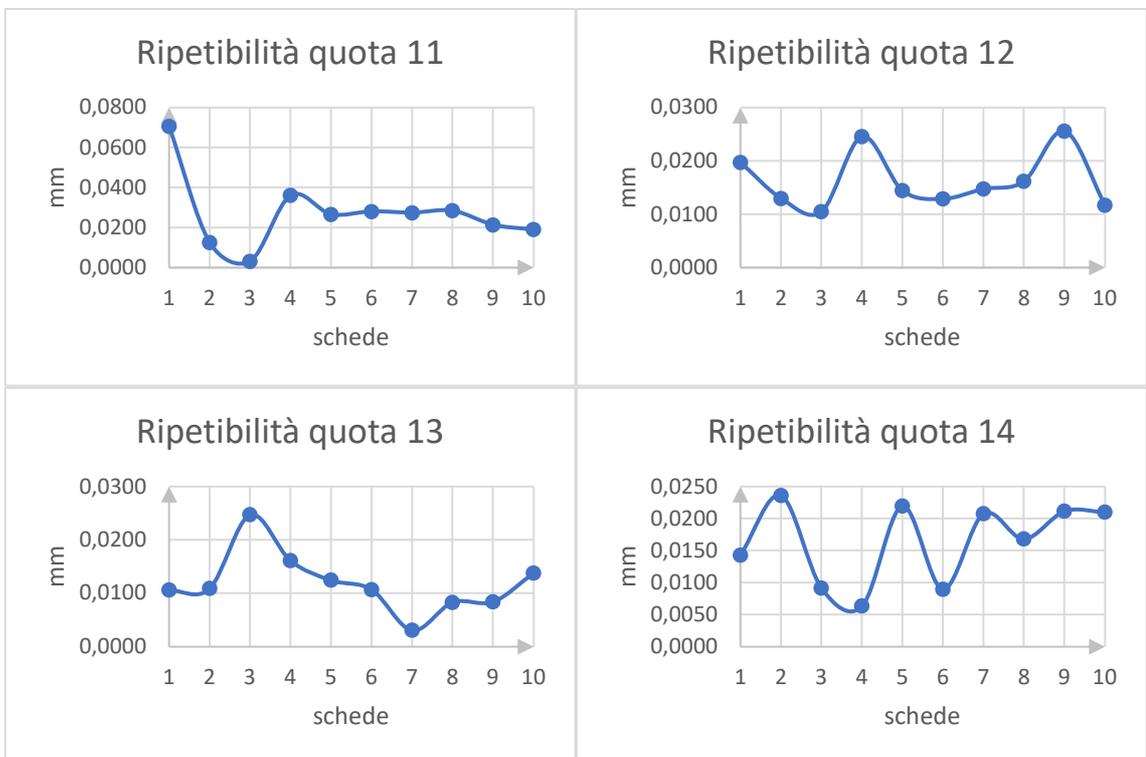


Figura 84 – Ripetibilità di posizionamento lungo y, piste di calibrazione orizzontali 25/25

Ripetibilità di posizionamento															
		Quote (mm)													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Schede	1	0,0354	0,0432	0,0129	0,0359	0,0158	0,0055	0,0323	0,0293	0,0472	0,0132	0,0707	0,0198	0,0106	0,0143
	2	0,0403	0,0204	0,0440	0,0265	0,0262	0,0859	0,0252	0,0298	0,0420	0,0123	0,0127	0,0130	0,0109	0,0236
	3	0,0438	0,0284	0,0251	0,0030	0,0543	0,0404	0,0507	0,0558	0,0371	0,0243	0,0032	0,0105	0,0247	0,0091
	4	0,0419	0,0451	0,0568	0,0185	0,0454	0,0494	0,0289	0,0289	0,0426	0,0278	0,0362	0,0246	0,0161	0,0064
	5	0,0411	0,0197	0,0368	0,0362	0,0590	0,0223	0,0496	0,0503	0,0746	0,0419	0,0267	0,0145	0,0124	0,0219
	6	0,0539	0,0118	0,0340	0,0185	0,0570	0,0091	0,0349	0,0339	0,0404	0,0546	0,0281	0,0129	0,0107	0,0090
	7	0,0366	0,0441	0,0393	0,0029	0,0448	0,0406	0,0531	0,0288	0,0413	0,0257	0,0275	0,0148	0,0031	0,0207
	8	0,0539	0,0317	0,0365	0,0109	0,0526	0,0358	0,0428	0,0331	0,0503	0,0219	0,0285	0,0162	0,0083	0,0168
	9	0,0555	0,0256	0,0284	0,0140	0,0549	0,0474	0,0415	0,0353	0,0346	0,0204	0,0214	0,0256	0,0084	0,0212
	10	0,0408	0,0267	0,0316	0,0214	0,0495	0,0364	0,0229	0,0434	0,0466	0,0357	0,0191	0,0117	0,0138	0,0210
Max		0,0539	0,0451	0,0568	0,0362	0,0590	0,0859	0,0531	0,0558	0,0746	0,0546	0,0707	0,0256	0,0247	0,0236
Media		0,0463	0,0296	0,0345	0,0188	0,0459	0,0373	0,0382	0,0368	0,0453	0,0278	0,0274	0,0163	0,0119	0,0164
Media Depurata							0,0319			0,0420		0,0226			

Tabella 28 – Risultati della ripetibilità di posizionamento (mm)

Nella tabella 28 per ognuna delle quote di interesse sono riportati i corrispondenti valori di ripetibilità di posizionamento calcolati per ognuna delle schede. I dati, espressi in millimetri, sono gli stessi usati per tracciare gli andamenti dei precedenti grafici (Figure 80, 81, 82 e 83).

Nella riga “Max” sono indicati i valori massimi di ripetibilità trovati, tenendo conto anche di quelli considerati anomali (evidenziati in arancione nella tabella). Nella riga “Media” ci sono invece i valori medi di ripetibilità, nettamente minori rispetto a quelli massimi della riga precedente. Infine, nella riga “Media Depurata” si riportano i valori medi di ripetibilità calcolati escludendo i dati anomali ove presenti.

I risultati relativi a media e media depurata mostrati nella Tabella 28 si possono riassumere nella tabella 29 in cui sono indicate anche le corrispondenti famiglie di quote tra parentesi:

Ripetibilità di posizionamento, piste 25/25 (valori depurati)	
$R_{xv} : \pm 0,0459 \text{ mm}$ (4, 5, 6 e 7)	$R_{xo} : \pm 0,0420 \text{ mm}$ (8, 9 e 10)
$R_{yv} : \pm 0,0463 \text{ mm}$ (1, 2 e 3)	$R_{yo} : \pm 0,0226 \text{ mm}$ (11, 12, 13 e 14)

Tabella 29 – Ripetibilità di posizionamento del sistema, valori depurati (media, media depurata)

R_{xv} : ripetibilità di posizionamento lungo x, piste di calibrazione verticali

R_{yv} : ripetibilità di posizionamento lungo y, piste di calibrazione verticali

R_{xo} : ripetibilità di posizionamento lungo x, piste di calibrazione orizzontali

R_{yo} : ripetibilità di posizionamento lungo y, piste di calibrazione orizzontali

Ripetibilità di posizionamento reale del sistema

Per ottenere i valori reali di ripetibilità di posizionamento del sistema è necessario sottrarre ai valori depurati della precedente *tabella 29* il gioco della sonda, definito nel paragrafo “Gioco della sonda” e quantificato in $\pm 25 \text{ micron}$. Mettendo da parte la ripetibilità di posizionamento lungo y per le piste di calibrazione orizzontali (R_{yo}), per la quale sono stati ottenuti valori non in linea con le attese, si possono riassumere i risultati come segue.

Ripetibilità di posizionamento, piste 25/25 (valori reali)	
$R_{xv} : \pm 0,0209 \text{ mm}$ (4, 5, 6 e 7)	$R_{xo} : \pm 0,0170 \text{ mm}$ (8, 9 e 10)
$R_{yv} : \pm 0,0213 \text{ mm}$ (1, 2 e 3)	

Tabella 29 – Ripetibilità di posizionamento del sistema, valori reali

R_{xv} : ripetibilità di posizionamento lungo x, piste di calibrazione verticali

R_{yv} : ripetibilità di posizionamento lungo y, piste di calibrazione verticali

R_{xo} : ripetibilità di posizionamento lungo x, piste di calibrazione orizzontali

In conclusione, si può dunque affermare che la ripetibilità di posizionamento del sistema sia in media di $\pm 20 \text{ micron}$; nel considerare questo dato è necessario tenere conto del fatto che esso deriva da un'indagine condotta su una sola macchina e che quindi può ritenersi confermato il valore medio di ripetibilità di posizionamento dichiarato in fase di redazione delle specifiche di progetto.

Definizione di precisione (accuratezza) di posizionamento

Precisione e Risoluzione di StarLite 200

Dal manuale del sistema ottico di misura StarLite [2] è possibile ottenere le informazioni relative alla sua risoluzione. La risoluzione si riferisce al numero di cifre significative (ovvero che si trovano alla destra della virgola) che il sistema visualizza nelle misure e nei report.

La risoluzione massima è pari a sei cifre significative. Le impostazioni predefinite prevedono quattro cifre significative per le quote espresse in millimetri (tutti i dati sono stati espressi in questo modo). La risoluzione di StarLite 200 è $R_{StarLite} = 0,0001 \text{ mm}$.

A partire dalla risoluzione dello strumento di misura si può risalire alla sua precisione che idealmente è pari alla metà della risoluzione [5]. Si può motivare questo con riferimento alla *figura 85*; si desidera rilevare il punto centrale posto in corrispondenza di un profilo; il software di riconoscimento automatico Misure-X registra in realtà il punto n oppure il punto $n - 1$. La precisione di StarLite 200 è dunque è $P_{StarLite} = 0,00005 \text{ mm}$.

$$R_{StarLite} = 0,0001 \text{ mm}$$
$$P_{StarLite} = 0,00005 \text{ mm}$$

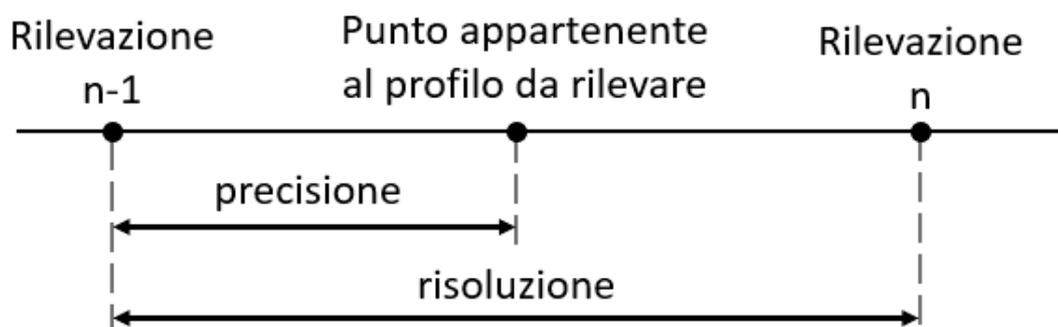


Figura 85 – Precisione di StarLite 200

Precisione della macchina in prova

La precisione della macchina in prova è riportata come precisione misurata sperimentalmente. Facendo riferimento alla *figura 85*, per una determinata quota di riferimento è possibile ottenere il valore della precisione di posizionamento, indicata con P , come l'errore massimo tra il valore vero e le quote misurate a partire dalle impronte lasciate della sonda sulle schede.

Nell'esempio della *figura 86* la curva in rosso rappresenta i valori "veri" della "Quota 5", misurati nella fase di caratterizzazione delle schede OVP tramite il sistema di misura ottico StarLite 200. Come per lo studio condotto sulla ripetibilità di posizionamento, gli andamenti rappresentati dalle rette spezzate, indicati con le lettere maiuscole si riferiscono alle quote misurate a seguito dei posizionamenti effettuati dalla macchina a partire dalle impronte lasciate dalla sonda. Si usano rette spezzate per le quote misurate a partire dalle impronte e una curva per i valori "veri" in modo da ricordare la diversa natura delle misure. Il valore della precisione è in questo caso ottenuto in corrispondenza della scheda 2.

Un risultato atteso è che la ripetibilità sia minore (quindi migliore) della precisione ($R < P$).

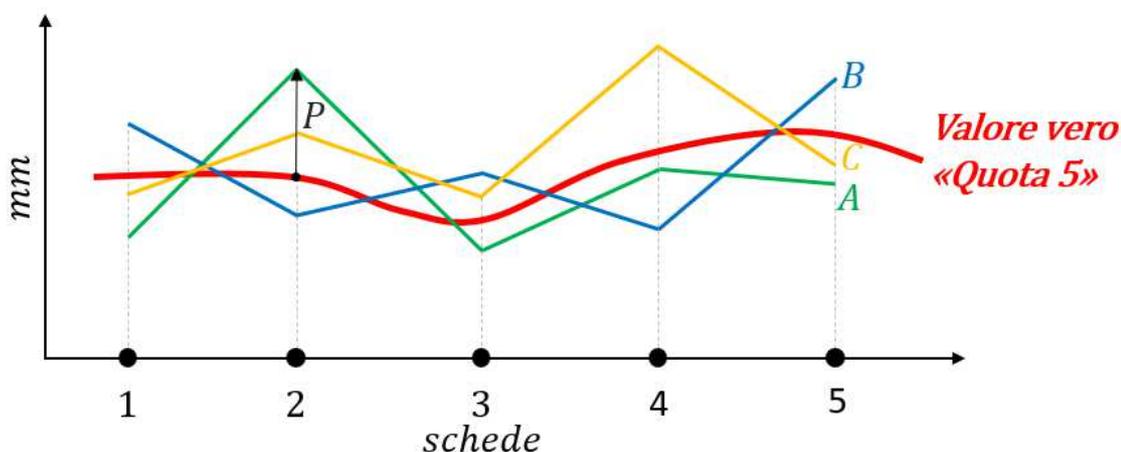


Figura 86 – Precisione di posizionamento lungo l'asse x o y

Ognuna delle quote misurate a partire dalle impronte lasciate dalla sonda sulle schede viene sottratta in valore assoluto al valore vero della quota corrispondente. In questo modo è possibile ottenere la precisione (accuratezza) associata al singolo posizionamento (A, B, C e D) sulla singola scheda e la precisione complessiva dei posizionamenti lungo gli assi x e y in modo simile a quanto già fatto per la ripetibilità di posizionamento.

In particolare, si tratta di interpretare in modo diverso da quanto fatto fino a questo momento i dati già disponibili, per ottenere un'informazione aggiuntiva. In questo caso nei grafici sono indicati anche i valori veri delle quote rispetto a cui viene calcolata la precisione di posizionamento.

Piste di calibrazione verticali, precisione lungo y

Quota 1										
schede	val. vero (mm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	precisione singoli posizionamenti (mm)				P (mm)
1	1	1,2106	1,1876	1,1952	1,2584	0,2106	0,1876	0,1952	0,2584	0,2584
2	1	0,9376	0,882	0,9626	0,8868	0,0624	0,1180	0,0374	0,1132	0,1180
3	1	1,0172	1,0097	1,0296	0,9421	0,0172	0,0097	0,0296	0,0579	0,0579
4	1	0,9849	1,0575	0,9737	1,0570	0,0151	0,0575	0,0263	0,0570	0,0575
5	1	0,9463	0,9357	1,0178	0,9403	0,0537	0,0643	0,0178	0,0597	0,0643
6	1	1,0341	0,9263	1,0224	0,9396	0,0341	0,0737	0,0224	0,0604	0,0737
7	1	0,8512	0,9189	0,8458	0,9069	0,1488	0,0811	0,1542	0,0931	0,1542
8	1	0,9057	0,9986	0,8909	0,9634	0,0943	0,0014	0,1091	0,0366	0,1091
9	1	0,9907	1,0081	0,9526	0,9772	0,0093	0,0081	0,0474	0,0228	0,0474
10	1	0,7257	0,7973	0,7157	0,7806	0,2743	0,2027	0,2843	0,2194	0,2843

Tabella 30 – Precisione di posizionamento quota 1

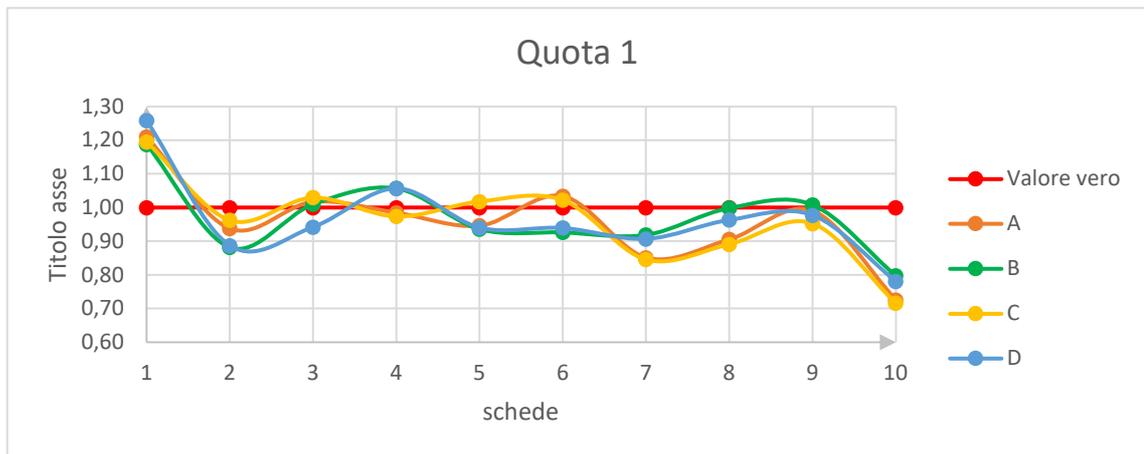


Grafico 21 – Precisione di posizionamento quota 1

Quota 2										
schede	val. vero (mm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	precisione singoli posizionamenti (mm)				P (mm)
1	2	2,2514	2,2988	2,2711	2,2125	0,2514	0,2988	0,2711	0,2125	0,2988
2	2	1,9447	1,9456	1,9649	1,9242	0,0553	0,0544	0,0351	0,0758	0,0758
3	2	2,0213	2,0132	2,0247	1,9680	0,0213	0,0132	0,0247	0,0320	0,0320
4	2	1,9821	2,0421	2,0377	2,0723	0,0179	0,0421	0,0377	0,0723	0,0723
5	2	1,9727	1,9565	1,9958	1,9681	0,0273	0,0435	0,0042	0,0319	0,0435
6	2	2,0045	1,9834	1,9992	1,9809	0,0045	0,0166	0,0008	0,0191	0,0191
7	2	1,8514	1,9131	1,9013	1,9395	0,1486	0,0869	0,0987	0,0605	0,1486
8	2	1,9179	1,9813	1,9736	1,9735	0,0821	0,0187	0,0264	0,0265	0,0821
9	2	1,9533	2,0036	2,0045	2,0029	0,0467	0,0036	0,0045	0,0029	0,0467
10	2	1,7318	1,7851	1,7732	1,7824	0,2682	0,2149	0,2268	0,2176	0,2682

Tabella 31 – Precisione di posizionamento quota 2

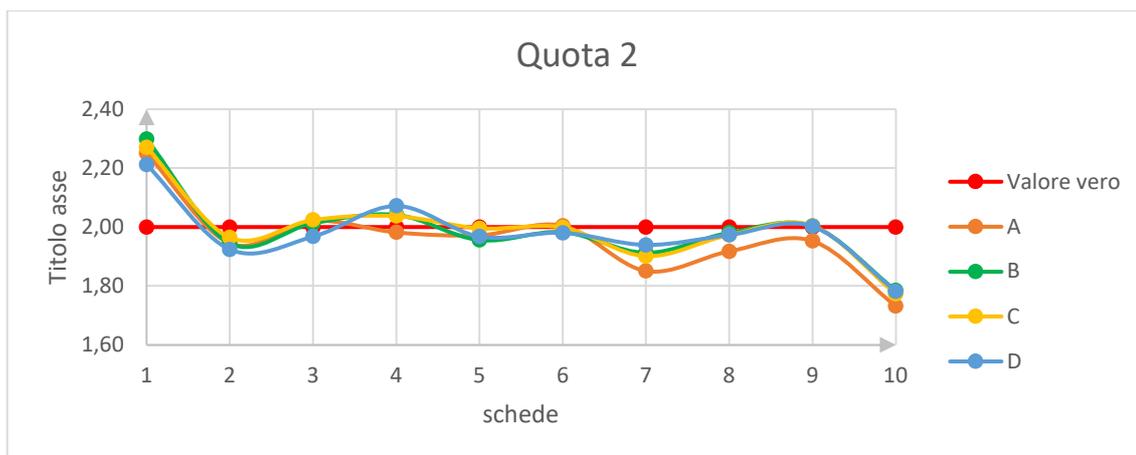


Grafico 22 – Precisione di posizionamento quota 2

Quota 3										
schede	val. vero (mm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	precisione singoli posizionamenti (mm)				P (mm)
1	3	3,2186	3,233	3,2388	3,2130	0,2186	0,2330	0,2388	0,2130	0,2388
2	3	2,9075	2,8869	2,8604	2,9483	0,0925	0,1131	0,1396	0,0517	0,1396
3	3	2,9966	2,9549	2,9516	3,0017	0,0034	0,0451	0,0484	0,0017	0,0484
4	3	2,9621	2,9930	2,9829	3,0756	0,0379	0,0070	0,0171	0,0756	0,0756
5	3	2,9210	2,9031	2,9157	2,9767	0,0790	0,0969	0,0843	0,0233	0,0969
6	3	2,9213	2,9320	2,9685	2,9893	0,0787	0,0680	0,0315	0,0107	0,0787
7	3	2,8915	2,8757	2,8886	2,9150	0,1085	0,1243	0,1114	0,0850	0,1243
8	3	2,9798	2,9345	2,9320	2,9069	0,0202	0,0655	0,0680	0,0931	0,0931
9	3	2,9927	2,9920	2,9359	2,9763	0,0073	0,0080	0,0641	0,0237	0,0641
10	3	2,7774	2,7315	2,7143	2,7169	0,2226	0,2685	0,2857	0,2831	0,2857

Tabella 32 – Precisione di posizionamento quota 3

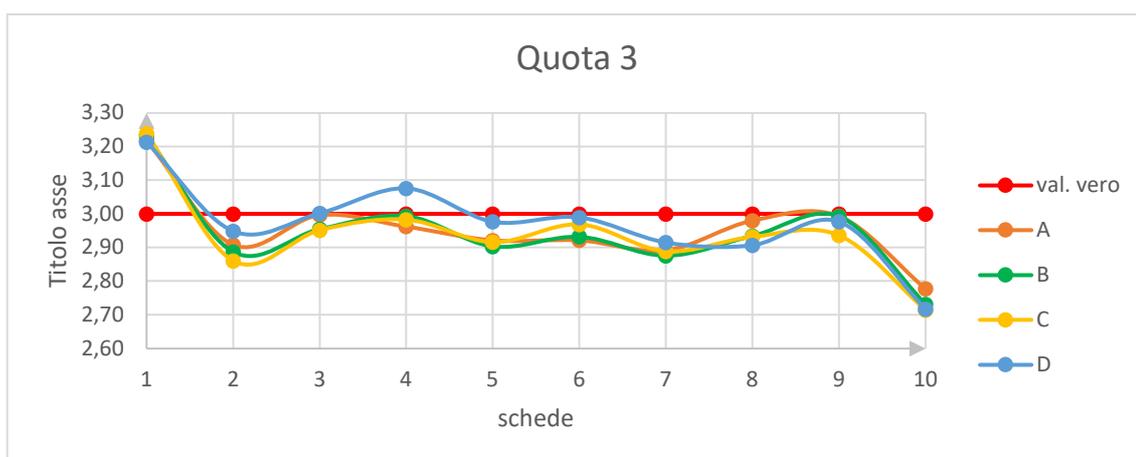


Grafico 23 – Precisione di posizionamento quota 3

Le quote 1, 2 e 3 si riferiscono al posizionamento della sonda lungo l'asse y in corrispondenza delle piste di calibrazione verticali. La precisione di posizionamento corrisponde a $P_{yv} = 0,2988 \text{ mm}$ (valore massimo tra quelli che esprimono la precisione di posizionamento relativa alle singole quote, evidenziati in azzurro nelle rispettive tabelle).

Dai grafici si osserva che le quote misurate a partire dalle impronte lasciate dalla sonda si distribuiscono attorno al valore "vero" con oscillazioni contenute ad eccezione delle schede 1 e 10. Le quote 1, 2 e 3 misurate a partire dalle impronte lasciate dalla sonda sulla scheda 1 sono sempre molto maggiori rispetto al valore "vero" mentre sulla scheda 10 sono sempre molto minori.

Piste di calibrazione verticali, precisione lungo x

Quota 4								
schede	val. vero (mm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	precisione singoli posizionamenti (mm)			P (mm)
1	61,8789	61,8337	61,8470	61,7752	0,0452	0,0319	0,1037	0,1037
2	61,8842	61,8484	61,9014	61,8899	0,0358	0,0172	0,0057	0,0358
3	61,8996	61,8560	61,8512	61,8571	0,0436	0,0484	0,0425	0,0484
4	61,8924	61,9022	61,9250	61,9391	0,0098	0,0326	0,0467	0,0467
5	61,8860	61,8476	61,9171	61,9200	0,0384	0,0311	0,0340	0,0384
6	61,9080	61,9549	61,9874	61,9504	0,0469	0,0794	0,0424	0,0794
7	61,8983	61,9316	61,9374	61,9369	0,0333	0,0391	0,0386	0,0391
8	61,9129	61,9348	61,9494	61,9567	0,0219	0,0365	0,0438	0,0438
9	61,8971	61,9145	61,9425	61,9414	0,0174	0,0454	0,0443	0,0454
10	61,8869	61,8623	61,9050	61,8860	0,0246	0,0181	0,0009	0,0246

Tabella 33 – Precisione di posizionamento quota 4

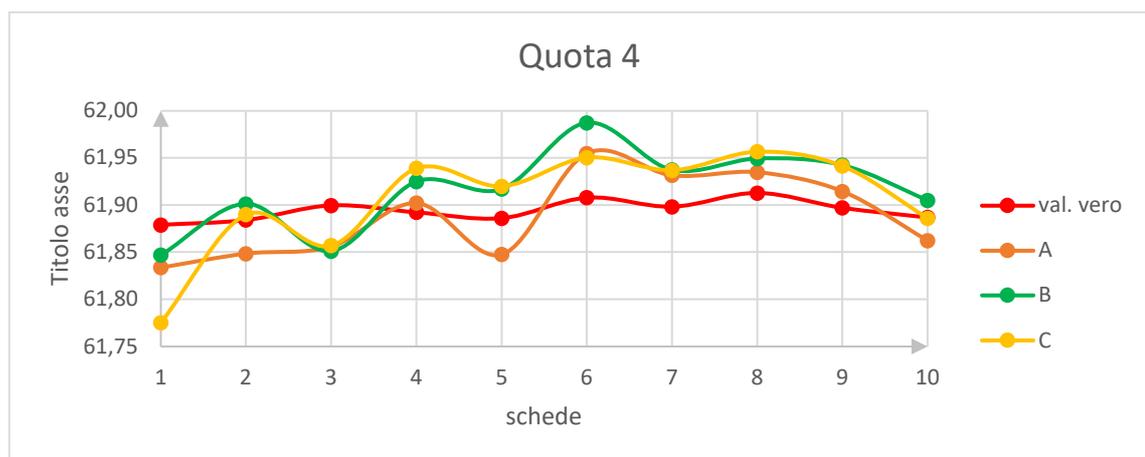


Grafico 24 – Precisione di posizionamento quota 4

Quota 5								
schede	val. vero (mm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	precisione singoli posizionamenti (mm)			P (mm)
1	62,5457	62,5316	62,5052	62,5000	0,0141	0,0405	0,0457	0,0457
2	62,5445	62,4842	62,4939	62,5366	0,0603	0,0506	0,0079	0,0603
3	62,5456	62,4834	62,4859	62,5921	0,0622	0,0597	0,0465	0,0622
4	62,5507	62,4967	62,5007	62,5875	0,0540	0,0500	0,0368	0,0540
5	62,5400	62,4901	62,4621	62,5801	0,0499	0,0779	0,0401	0,0779
6	62,5764	62,5975	62,5439	62,6579	0,0211	0,0325	0,0815	0,0815
7	62,5707	62,5258	62,5279	62,6153	0,0449	0,0428	0,0446	0,0449
8	62,5739	62,5297	62,5245	62,6298	0,0442	0,0494	0,0559	0,0559
9	62,5621	62,5126	62,5171	62,6223	0,0495	0,0450	0,0602	0,0602
10	62,5525	62,4772	62,4725	62,5714	0,0753	0,0800	0,0189	0,0800

Tabella 34 – Precisione di posizionamento quota 5

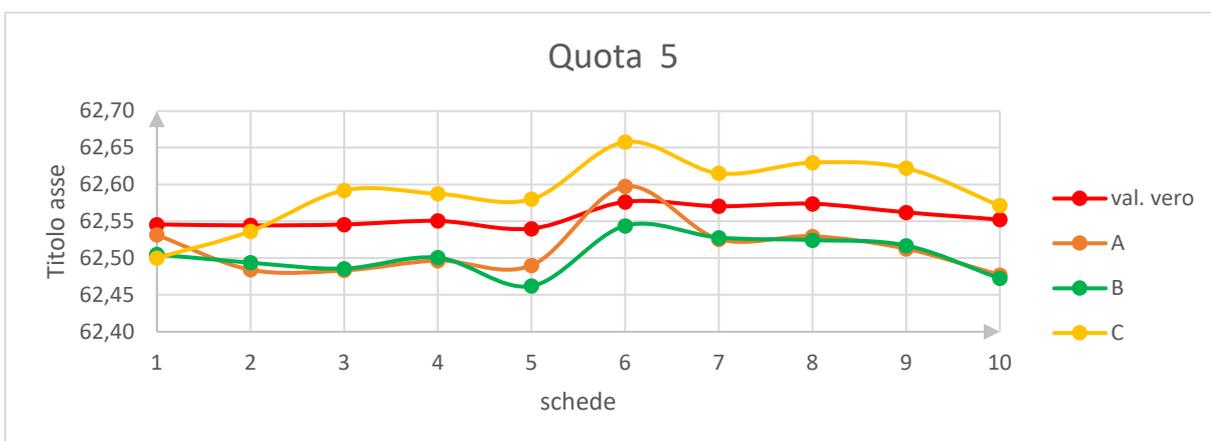


Grafico 25 – Precisione di posizionamento quota 5

Quota 6								
schede	val. vero (mm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	precisione singoli posizionamenti (mm)			P (mm)
1	63,1587	63,1721	63,1785	63,1675	0,0134	0,0198	0,0088	0,0198
2	63,1477	63,1391	63,2937	63,1219	0,0086	0,1460	0,0258	0,1460
3	63,1745	63,1185	63,1237	63,1994	0,0560	0,0508	0,0249	0,0560
4	63,1598	63,1155	63,1780	63,2142	0,0443	0,0182	0,0544	0,0544
5	63,1589	63,1461	63,1852	63,1906	0,0128	0,0263	0,0317	0,0317
6	63,1733	63,2054	63,2235	63,2228	0,0321	0,0502	0,0495	0,0502
7	63,1622	63,1216	63,1974	63,2029	0,0406	0,0352	0,0407	0,0407
8	63,1828	63,1471	63,2168	63,2188	0,0357	0,0340	0,0360	0,0360
9	63,1674	63,1180	63,1905	63,2129	0,0494	0,0231	0,0455	0,0494
10	63,1555	63,1046	63,1156	63,1773	0,0509	0,0399	0,0218	0,0509

Tabella 35 – Precisione di posizionamento quota 6

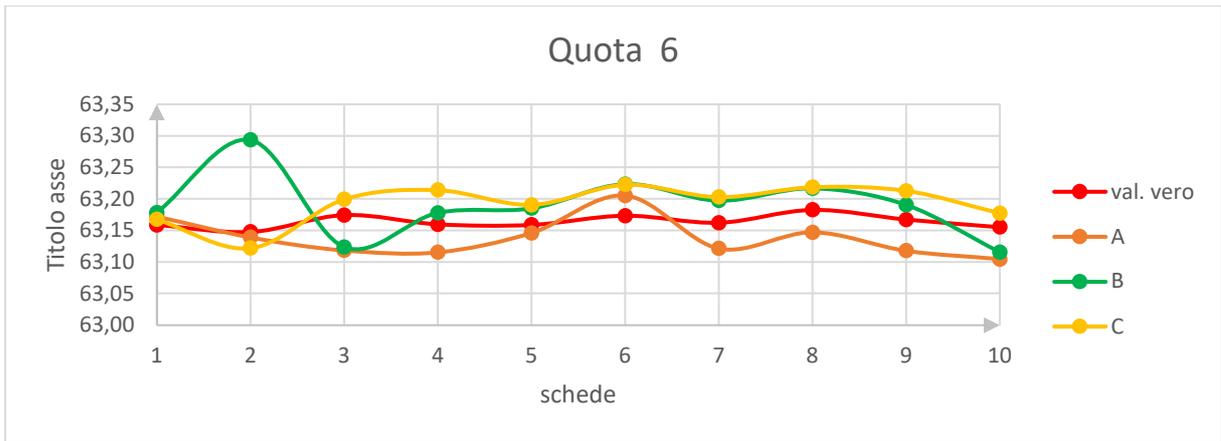


Grafico 26 - Precisione di posizionamento quota 6

Quota 7

schede	val. vero (mm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	precisione singoli posizionamenti (mm)			P (mm)
1	63,8280	63,7627	63,7771	63,8273	0,0653	0,0509	0,0007	0,0653
2	63,8143	63,7560	63,7625	63,8065	0,0583	0,0518	0,0078	0,0583
3	63,8158	63,7563	63,7434	63,8448	0,0595	0,0724	0,0290	0,0724
4	63,8235	63,7661	63,7644	63,8222	0,0574	0,0591	0,0013	0,0591
5	63,8123	63,7500	63,7857	63,8493	0,0623	0,0266	0,0370	0,0623
6	63,8444	63,8024	63,8722	63,8718	0,0420	0,0278	0,0274	0,0420
7	63,8381	63,7767	63,8682	63,8828	0,0614	0,0301	0,0447	0,0614
8	63,8434	63,8037	63,7869	63,8726	0,0397	0,0565	0,0292	0,0565
9	63,8341	63,7945	63,7771	63,8601	0,0396	0,0570	0,0260	0,0570
10	63,8207	63,7407	63,7194	63,7652	0,0800	0,1013	0,0555	0,1013

Tabella 36 – Precisione di posizionamento quota 7

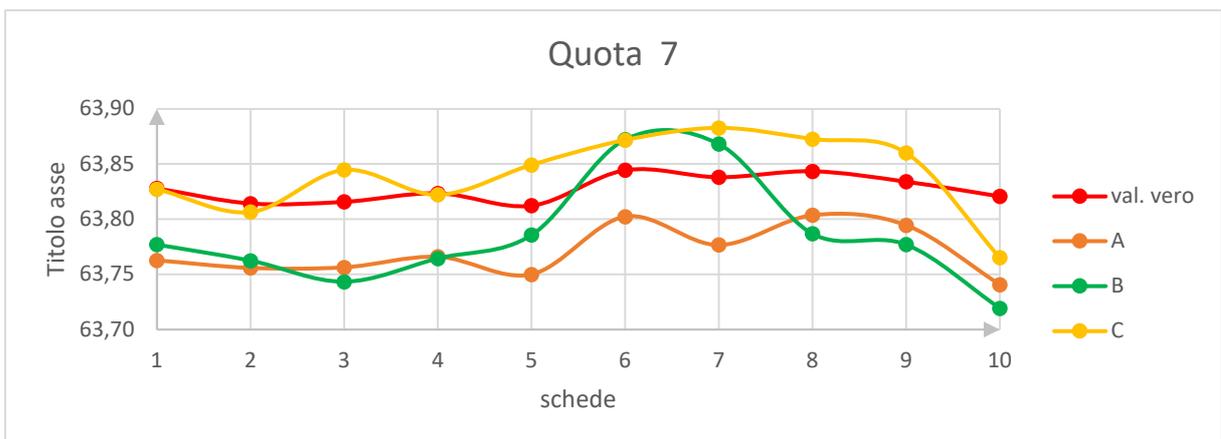


Grafico 27 - Precisione di posizionamento quota 7

Le quote 4, 5, 6 e 7 si riferiscono al posizionamento della sonda lungo l'asse x in corrispondenza delle piste di calibrazione verticali. La precisione di posizionamento è $P_{xv} = 0,1460 \text{ mm}$ (valore massimo tra quelli che esprimono la precisione di posizionamento relativa alle singole quote, evidenziati in azzurro nelle rispettive tabelle).

Dai grafici si osserva che le quote misurate a partire dalle impronte lasciate dalla sonda si distribuiscono uniformemente attorno al valore "vero". L'unico valore che appare anomalo rispetto agli altri è quello corrispondente alla misura B della quota 6 sulla scheda 2.

Piste di calibrazione orizzontali, precisione lungo x

Quota 8										
schede	val. vero (mm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	precisione singoli posizionamenti (mm)				P (mm)
1	75	75,0605	75,0467	75,0197	75,0583	0,0605	0,0467	0,0197	0,0583	0,0605
2	75	75,0330	75,0081	75,0024	75,0420	0,0330	0,0081	0,0024	0,0420	0,0420
3	75	75,0266	74,9941	75,0269	75,0236	0,0266	0,0059	0,0269	0,0236	0,0269
4	75	75,0209	75,0342	75,0525	75,0486	0,0209	0,0342	0,0525	0,0486	0,0525
5	75	75,0223	75,0063	75,0182	75,1068	0,0223	0,0063	0,0182	0,0168	0,0223
6	75	75,0459	75,0591	75,0680	75,0636	0,0459	0,0591	0,0680	0,0636	0,0680
7	75	75,0190	75,0140	75,0189	75,0112	0,0190	0,0140	0,0189	0,0112	0,0190
8	75	75,0569	75,0440	75,0520	75,0501	0,0569	0,0440	0,0520	0,0501	0,0569
9	75	75,0453	75,0226	75,0502	75,0531	0,0453	0,0226	0,0502	0,0531	0,0531
10	75	75,0265	74,9842	75,0231	75,0310	0,0265	0,0158	0,0231	0,0310	0,0310

Tabella 37 – Precisione di posizionamento quota 8

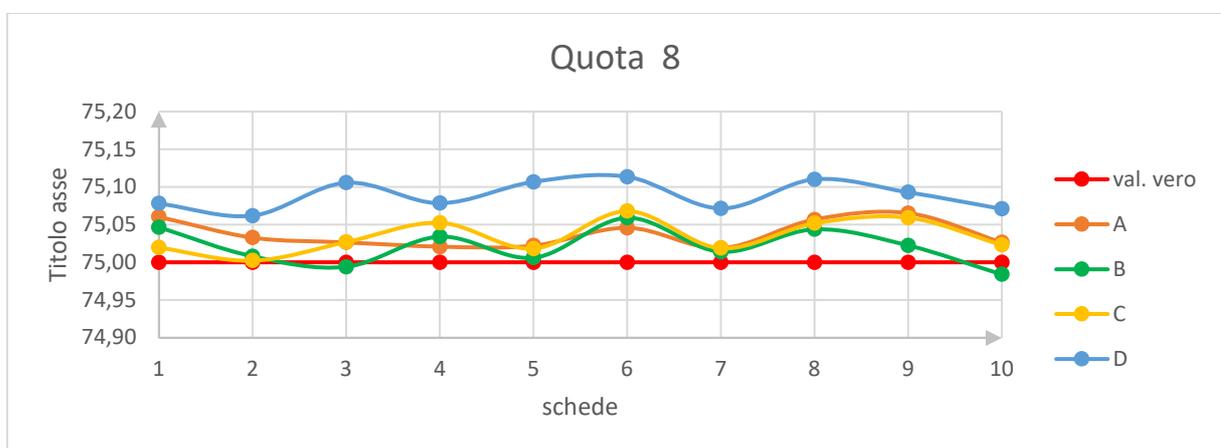


Grafico 28 – Precisione di posizionamento quota 8

Quota 9										
schede	val. vero (mm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	precisione singoli posizionamenti (mm)				P (mm)
1	76	76,0934	76,0462	76,0587	76,0709	0,0934	0,0462	0,0587	0,0709	0,0934
2	76	75,9945	75,9931	76,0029	76,0311	0,0055	0,0069	0,0029	0,0311	0,0311
3	76	76,0135	76,0394	76,0132	75,9652	0,0135	0,0394	0,0132	0,0348	0,0394
4	76	76,0132	75,9679	75,9974	76,0531	0,0132	0,0321	0,0026	0,0531	0,0531
5	76	76,0158	75,9460	76,0227	76,0953	0,0158	0,0540	0,0227	0,0953	0,0953
6	76	76,0461	75,9844	76,0437	76,0652	0,0461	0,0156	0,0437	0,0652	0,0652
7	76	76,0015	75,9991	76,0289	76,0404	0,0015	0,0009	0,0289	0,0404	0,0404
8	76	76,0339	75,9772	76,0294	76,0778	0,0339	0,0228	0,0294	0,0778	0,0778
9	76	76,0566	76,0459	76,0477	76,0805	0,0566	0,0459	0,0477	0,0805	0,0805
10	76	76,0397	76,0176	76,0279	76,0642	0,0397	0,0176	0,0279	0,0642	0,0642

Tabella 38 – Precisione di posizionamento quota 9

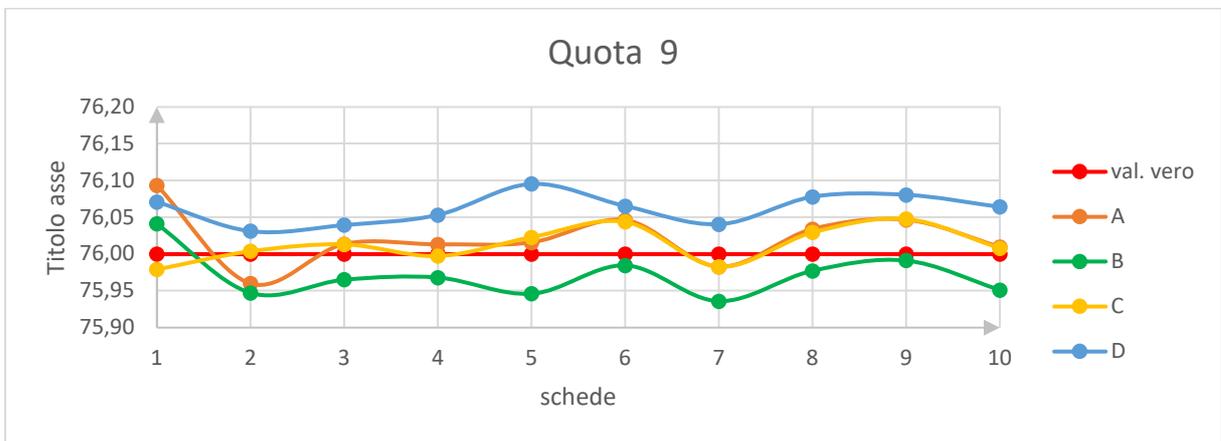


Grafico 29 – Precisione di posizionamento quota 9

Quota 10										
schede	val. vero (mm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	precisione singoli posizionamenti (mm)				P (mm)
1	77	77,0327	77,0070	77,0062	77,0233	0,0327	0,0070	0,0062	0,0233	0,0327
2	77	77,0081	77,0045	76,9836	77,0067	0,0081	0,0045	0,0164	0,0067	0,0164
3	77	77,0416	76,9993	76,9929	77,0001	0,0416	0,0007	0,0071	0,0001	0,0416
4	77	77,0192	77,0178	76,9800	77,0356	0,0192	0,0178	0,0200	0,0356	0,0356
5	77	77,0391	77,0112	76,9553	77,0295	0,0391	0,0112	0,0447	0,0295	0,0447
6	77	77,0317	77,0505	77,0097	77,1189	0,0317	0,0505	0,0097	0,1189	0,1189
7	77	76,9898	77,0131	76,9616	77,0064	0,0102	0,0131	0,0384	0,0064	0,0384
8	77	77,0521	77,0345	77,0082	77,0442	0,0521	0,0345	0,0082	0,0442	0,0521
9	77	77,0452	77,0399	77,0144	77,0551	0,0452	0,0399	0,0144	0,0551	0,0551
10	77	76,9852	77,0278	76,9564	77,0097	0,0148	0,0278	0,0436	0,0097	0,0436

Tabella 39 – Precisione di posizionamento quota 10

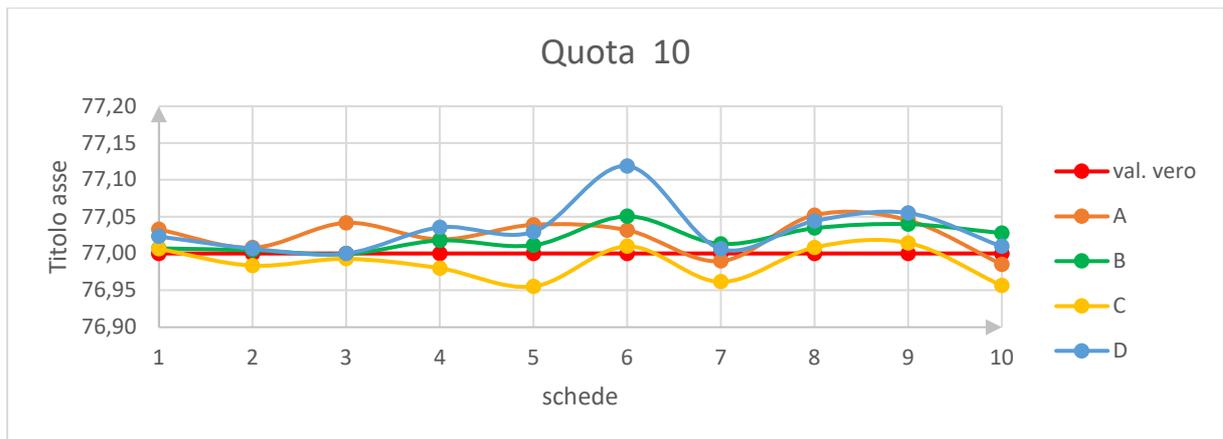


Grafico 30 – Precisione di posizionamento quota 10

Le quote 8, 9 e 10 si riferiscono al posizionamento della sonda lungo l'asse x in corrispondenza delle piste di calibrazione orizzontali. La precisione di posizionamento è $P_{xo} = 0,1189 \text{ mm}$ (valore massimo tra quelli che esprimono la precisione di posizionamento relativa alle singole quote, evidenziati in azzurro nelle rispettive tabelle).

Dai grafici si osserva che le quote misurate a partire dalle impronte lasciate dalla sonda si distribuiscono principalmente al di sopra del valore "vero". Questo significa che i punti in cui la sonda si è effettivamente posizionata sono più a destra di quelli richiesti (ovvero più a destra del set).

Piste di calibrazione orizzontali, precisione lungo y

Quota 11								
schede	val. vero (mm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	precisione singoli posizionamenti (mm)			P (mm)
1	1,5903	1,7811	1,7184	1,8597	0,1908	0,1281	0,2694	0,2694
2	1,5260	1,3152	1,3405	1,3259	0,2108	0,1855	0,2001	0,2108
3	1,5944	1,4919	1,4940	1,4983	0,1025	0,1004	0,0961	0,1025
4	1,4393	1,3243	1,3966	1,3754	0,1150	0,0427	0,0639	0,1150
5	1,8629	1,6492	1,6800	1,6266	0,2137	0,1829	0,2363	0,2363
6	1,6021	1,4922	1,4360	1,4884	0,1099	0,1661	0,1137	0,1661
7	1,4970	1,2279	1,2829	1,2668	0,2691	0,2141	0,2302	0,2691
8	1,2807	1,0976	1,1546	1,1217	0,1831	0,1261	0,1590	0,1831
9	1,5031	1,3280	1,3708	1,3408	0,1751	0,1323	0,1623	0,1751
10	1,6792	1,2941	1,2957	1,2575	0,3851	0,3835	0,4217	0,4217

Tabella 40 – Precisione di posizionamento quota 11

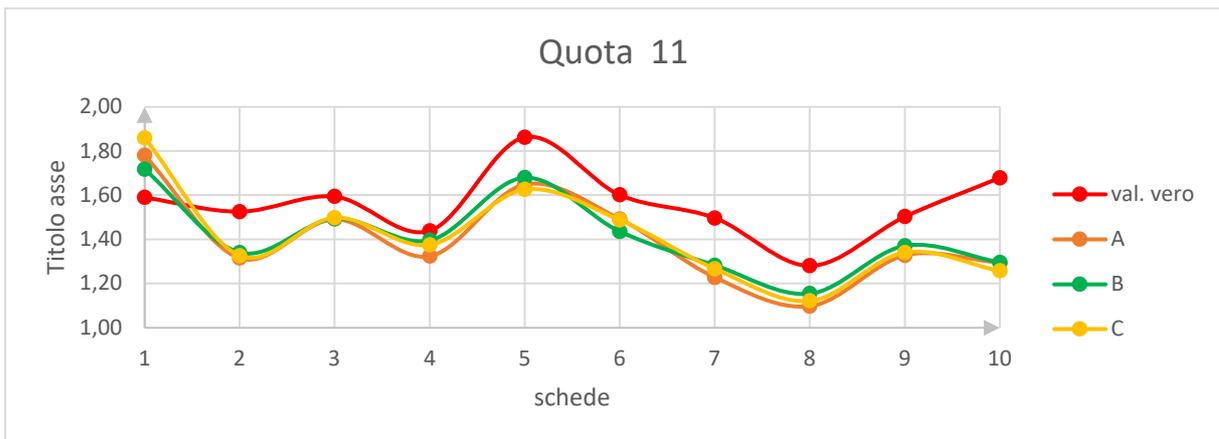


Grafico 31 – Precisione di posizionamento quota 11

Quota 12								
schede	val. vero (mm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	precisione singoli posizionamenti (mm)			P (mm)
1	2,2711	2,3987	2,4170	2,4382	0,1276	0,1459	0,1671	0,1671
2	2,2231	1,9868	1,9719	1,9979	0,2363	0,2512	0,2252	0,2512
3	2,2412	2,0906	2,0959	2,1116	0,1506	0,1453	0,1296	0,1506
4	2,1021	2,0030	1,9638	2,0129	0,0991	0,1383	0,0892	0,1383
5	2,5451	2,3316	2,3346	2,3057	0,2135	0,2105	0,2394	0,2394
6	2,2641	2,0698	2,0956	2,0841	0,1943	0,1685	0,1800	0,1943
7	2,1611	1,8732	1,8823	1,9027	0,2879	0,2788	0,2584	0,2879
8	1,9438	1,7309	1,7633	1,7535	0,2129	0,1805	0,1903	0,2129
9	2,1716	1,9465	1,9835	1,9977	0,2251	0,1881	0,1739	0,2251
10	2,3537	1,9196	1,9070	1,8962	0,4341	0,4467	0,4575	0,4575

Tabella 41 – Precisione di posizionamento quota 12

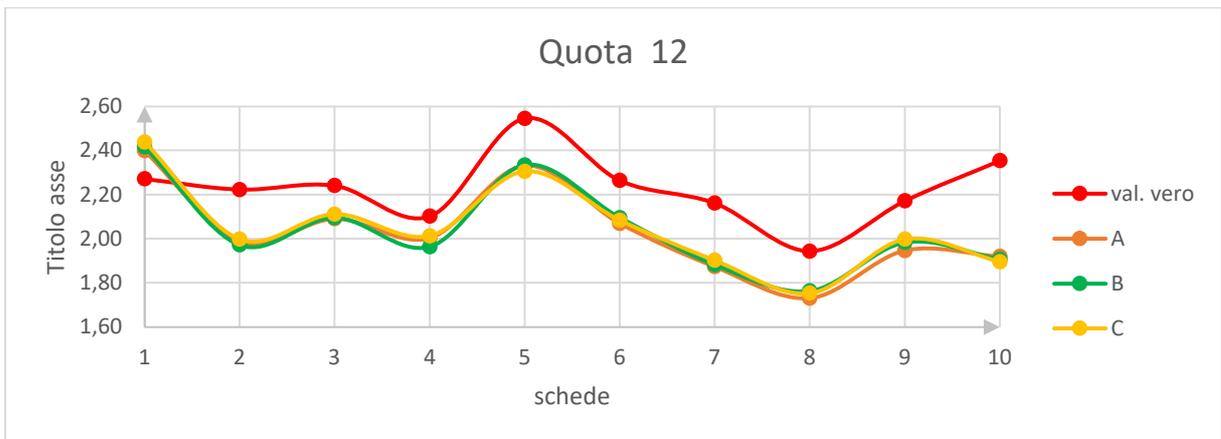


Grafico 32 – Precisione di posizionamento quota 12

Quota 13								
schede	val. vero (mm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	precisione singoli posizionamenti (mm)			P (mm)
1	2,8587	3,0022	3,0234	3,0101	0,1435	0,1647	0,1514	0,1647
2	2,8007	2,5798	2,5623	2,5580	0,2209	0,2384	0,2427	0,2427
3	2,8579	2,6846	2,7340	2,7141	0,1733	0,1239	0,1438	0,1733
4	2,7066	2,5985	2,5844	2,6166	0,1081	0,1222	0,0900	0,1222
5	3,1401	2,9066	2,9082	2,8833	0,2335	0,2319	0,2568	0,2568
6	2,8683	2,6800	2,6850	2,7014	0,1883	0,1833	0,1669	0,1883
7	2,7586	2,4828	2,4889	2,4857	0,2758	0,2697	0,2729	0,2758
8	2,5428	2,3578	2,3440	2,3606	0,1850	0,1988	0,1822	0,1988
9	2,7722	2,5868	2,5810	2,5978	0,1854	0,1912	0,1744	0,1912
10	2,9471	2,5044	2,4911	2,5187	0,4427	0,4560	0,4284	0,4560

Tabella 41 – precisione di posizionamento quota 13

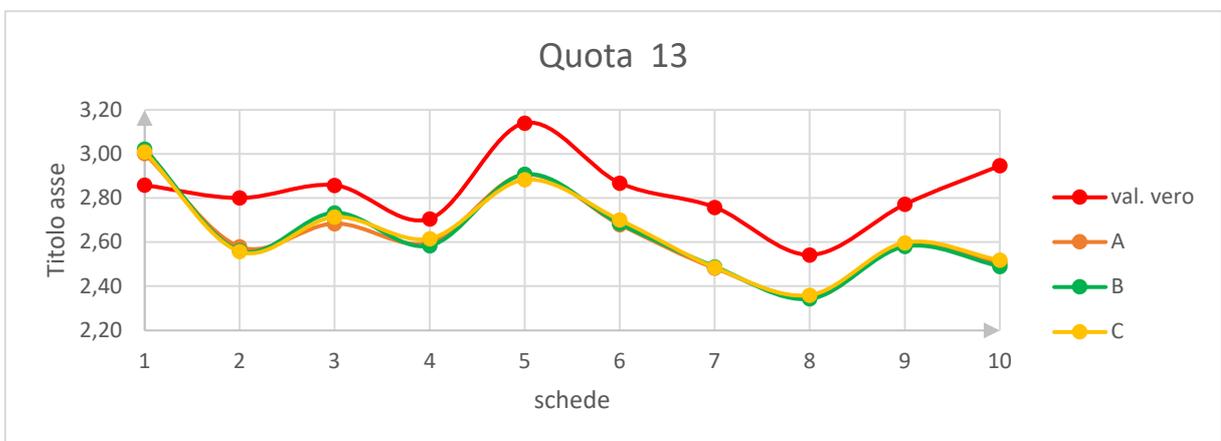


Grafico 33 – Precisione di posizionamento quota 13

Quota 14								
schede	val. vero (mm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	precisione singoli posizionamenti (mm)			P (mm)
1	3,5388	3,7126	3,7412	3,7321	0,1738	0,2024	0,1933	0,2024
2	3,4910	3,2249	3,2063	3,2535	0,2661	0,2847	0,2375	0,2847
3	3,5066	3,3634	3,3491	3,3451	0,1432	0,1575	0,1615	0,1615
4	3,3657	3,2475	3,2602	3,2495	0,1182	0,1055	0,1162	0,1182
5	3,8130	3,5779	3,6108	3,5669	0,2351	0,2022	0,2461	0,2461
6	3,5357	3,3630	3,3809	3,3689	0,1727	0,1548	0,1668	0,1727
7	3,4261	3,1192	3,1402	3,1607	0,3069	0,2859	0,2654	0,3069
8	3,2075	3,0108	3,0404	3,0068	0,1967	0,1671	0,2007	0,2007
9	3,4382	3,2333	3,2493	3,2756	0,2049	0,1889	0,1626	0,2049
10	3,6211	3,1752	3,2021	3,1601	0,4459	0,4190	0,4610	0,4610

Tabella 43 – Precisione di posizionamento quota 14

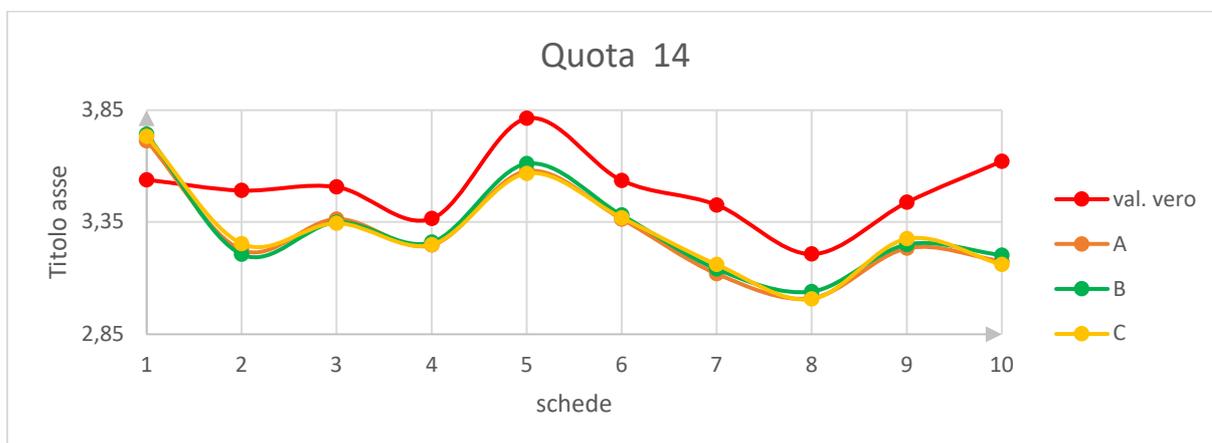


Grafico 34 – Precisione di posizionamento quota 14

Le quote 11, 12, 13 e 14 si riferiscono al posizionamento della sonda lungo l'asse y in corrispondenza delle piste di calibrazione orizzontali. La precisione di posizionamento corrisponde a $P_{y0} = 0,4610 \text{ mm}$ (valore massimo tra quelli che esprimono la precisione di posizionamento relativa alle singole quote, evidenziati in azzurro nelle rispettive tabelle).

Dai grafici si osserva che le quote misurate a partire dalle impronte lasciate dalla sonda si distribuiscono tutte molto al di sotto del valore "vero". Questo significa che i punti in cui la sonda si è effettivamente posizionata sono più in basso di quelli richiesti (ovvero più in basso del set); ciò ha una conseguenza diretta nella definizione della precisione del sistema.

Precisione di posizionamento del sistema

Precisione di posizionamento massima del sistema

Si riporta di seguito una tabella riassuntiva (*tabella 44*) in cui sono indicati i valori massimi della precisione di posizionamento del sistema lungo gli assi x e y per le piste di calibrazione 25/25 verticali e orizzontali su cui sono state effettuate le prove. Come per la ripetibilità di posizionamento, si fa inizialmente riferimento ai valori massimi trovati.

Precisione di posizionamento massima, piste 25/25	
$P_{xv}: \pm 0,1460mm$	$P_{xo}: \pm 0,1189 mm$
$P_{yv}: \pm 0,2988 mm$	$P_{yo}: \pm 0,4610 mm$

Tabella 44 – Precisione di posizionamento del sistema, valutazione preliminare (valori massimi)

P_{xv} : precisione di posizionamento lungo x, piste di calibrazione verticali

P_{yv} : precisione di posizionamento lungo y, piste di calibrazione verticali

P_{xo} : precisione di posizionamento lungo x, piste di calibrazione orizzontali

P_{yo} : precisione di posizionamento lungo y, piste di calibrazione orizzontali

Valutazione dei risultati ottenuti

Per quanto riguarda la precisione di posizionamento, diversamente dalle attese, pur escludendo i valori più alti (e quindi peggiori), si ottengono valori elevati soprattutto in corrispondenza delle piste di calibrazione orizzontali. Ciò è particolarmente visibile dagli andamenti dei *grafici 31, 32, 33 e 34* che non rispecchiano la reale precisione di posizionamento del sistema. In questi grafici le quote misurate sono sempre molto diverse dal valore “vero” ottenuto con la caratterizzazione delle schede pertanto si fa riferimento ad essi per la successiva indagine sulla precisione di posizionamento.

Indagine sulla precisione di posizionamento

In generale, le impronte lasciate dalla sonda sulle schede in corrispondenza delle piste di calibrazione orizzontali si trovano ad una coordinata y minore rispetto a quella richiesta (*figure 87, 88 e 89*, ingrandimenti 88,4x). Questo può significare che le coordinate y dei punti di posizionamento ottenute dalla caratterizzazione delle schede e usate per indicare alla macchina dove posizionarsi sono minori di quelle che avrebbero portato la sonda esattamente sulla linea tra l’isolante e la pista in rame.

Nella *figura 87* relativa alla scheda 2 ad esempio si vedono particolarmente bene le impronte lasciate dalla sonda sull’isolante (parte verde della scheda). Un risultato molto simile è stato ottenuto anche sulle altre schede (*figura 88*). Le impronte sulle piste in rame possono essere osservate riducendo opportunamente l’intensità luminosa (coefficiente relativo all’ intensità luminosa pari a 1) come si può vedere dalle immagini relative alla scheda 3 (*Figura 89*).

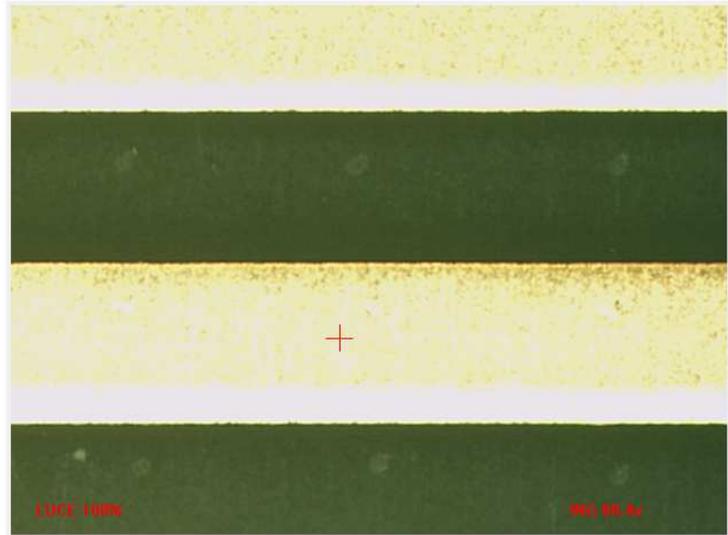


Figura 87 – Scheda 2, piste di calibrazione orizzontali 25/25, ingrandimento 88,4x

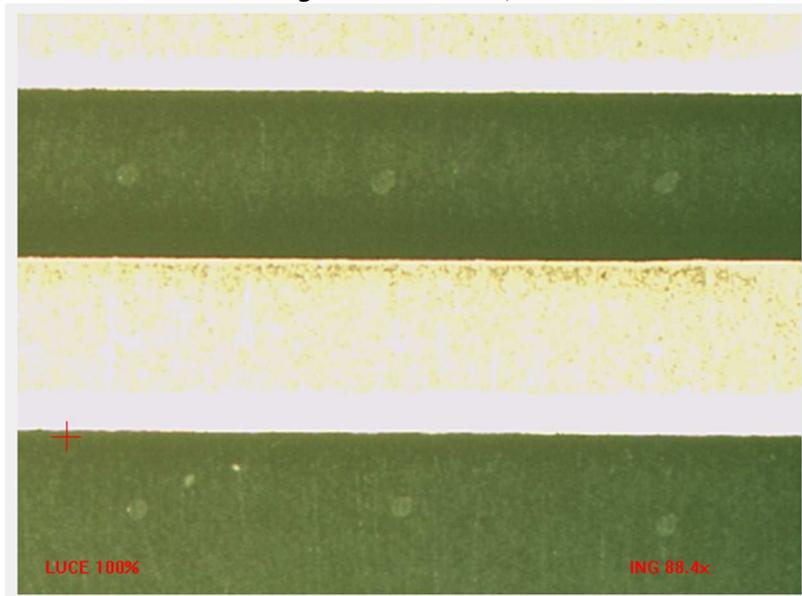


Figura 88 – Scheda 4, piste di calibrazione orizzontali 25/25, ingrandimento 88,4x

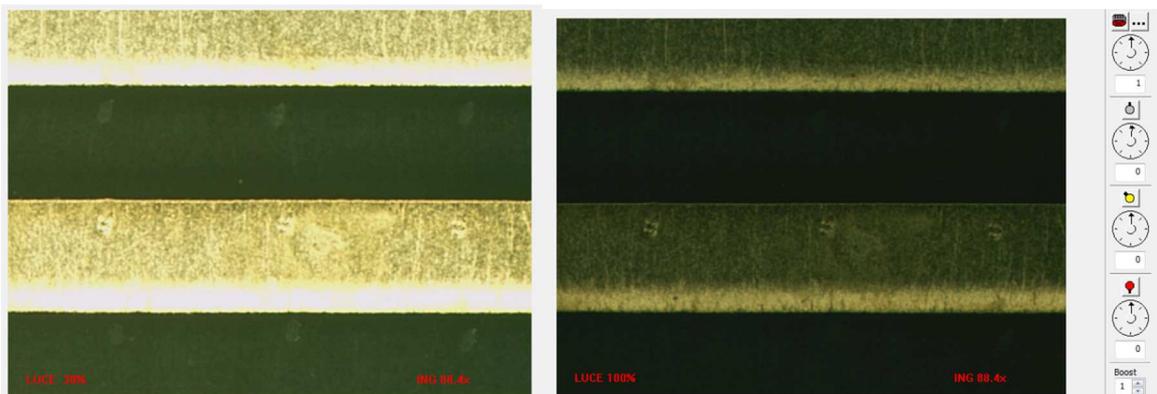


Figura 89 – Scheda 3, piste di calibrazione orizzontali 25/25, ingrandimento 88,4x

Effetto della macchina usata

Per studiare le cause che hanno determinato uno scostamento tra la posizione attesa delle impronte e quella ottenuta, si effettua in primo luogo una nuova prova sulla scheda 2 utilizzando gli stessi dati che hanno determinato le impronte visibili nella *figura 87*, ma su una macchina differente da quella già usata, non più automatica ma manuale, in modo da osservare la posizione delle impronte nei due casi e fare un confronto diretto.

Da notare che l'unico aspetto variato dalla prima alla seconda prova eseguita sulla scheda 2 è il tipo di macchina, dal momento che la board, ovvero il programma ottenuto a partire dal file ASCII con i posizionamenti della scheda 2 è stata salvata in occasione della prima prova e poi usata anche per la seconda senza la variazione di alcun parametro.

Le impronte lasciate dalla sonda della macchina automatica sulla scheda 2 sono visibili nell'ingrandimento della *figura 90*. La stessa zona della scheda 2 è riportata anche nella *figura 91* ma a seguito di una prova eseguita su macchina manuale a parità di board e di scheda OVP usata per la calibrazione. Le impronte cerchiato in rosso sono quelle lasciate dalla macchina automatica mentre quelle cerchiato in verde sono state lasciate dalla macchina manuale.

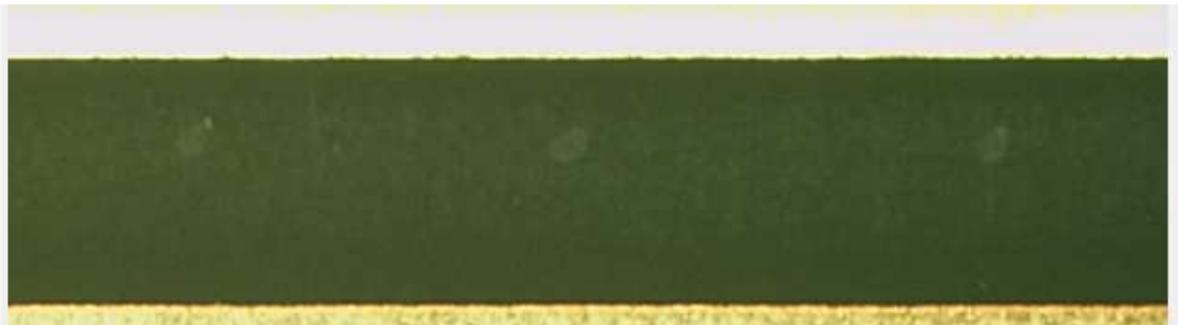


Figura 90 – Impronte sulla scheda 2, macchina automatica

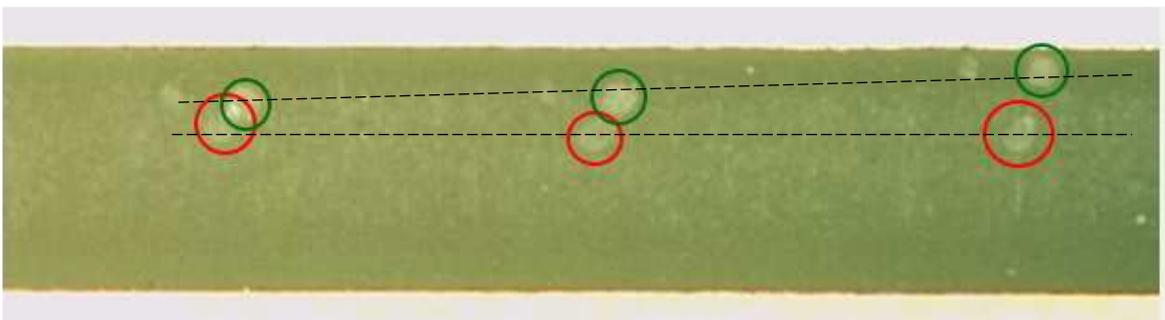


Figura 91– Impronte sulla scheda 2, macchina automatica (impronte cerchiato in rosso) e macchina manuale (impronte cerchiato in verde) a parità di board e di scheda OVP usata per la calibrazione.

Effetto di StarLite 200, posizione e orientamento della scheda

Si effettua un confronto tra le coordinate usate per scrivere i file ASCII ed effettuare il posizionamento della sonda e quelle ottenute da successive nuove caratterizzazioni delle schede per escludere che si tratti di un errore dovuto all'utilizzo del sistema StarLite 200 come possibili effetti ottici (che si possono in realtà escludere a priori visto che l'obiettivo del sistema di visione è fisso ed è la tavola a traslare) o effetti introdotti dalle guide su cui la tavola trasla. Questa verifica viene effettuata prima di ogni altra, vista l'immediata disponibilità del sistema di misura.

Si prende come esempio la scheda 1. Nella *figura 92* a sinistra si riportano i dati usati per definire le coordinate "vere" dei punti mentre a destra ci sono i dati relativi ad una successiva nuova caratterizzazione della stessa scheda. I valori delle quote corrispondenti variano dalla prima alla seconda caratterizzazione, fatte a distanza di alcuni giorni l'una dall'altra, di una quantità compresa tra i 10 e i 20 micron.

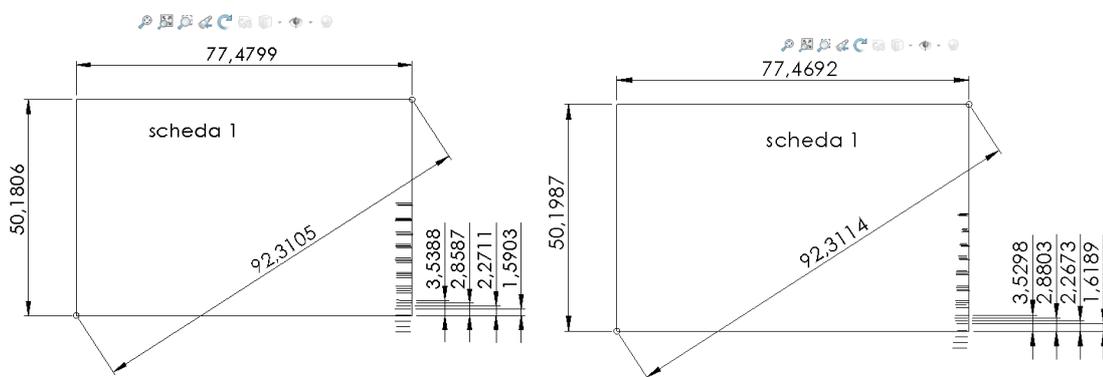


Figura 92 – Verifica delle misure ottenute con StarLite 200 sulla scheda 1

Per verificare che la posizione della scheda sul piano di lavoro di StarLite 200 non influisca sulle misurazioni rilevate, si posiziona la scheda in modo che le piste di calibrazione orizzontali si trovino nell'area in cui durante le precedenti misurazioni erano presenti le piste di calibrazione verticali sulle quali si sono ottenuti risultati di precisione migliori. La posizione decentrata della scheda sul piano di lavoro è mostrata nella *figura 93*.



Figura 93 – Scheda in posizione decentrata

Con un posizionamento decentrato della scheda, le quote relative a due caratterizzazioni successive differiscono ancora di 10 o 20 micron (come il caso con scheda centrata della *figura 91*). Queste differenze, con scheda centrata e decentrata, dunque non sono sicuramente imputabili alla posizione della scheda ma piuttosto al suo orientamento oltre che ad altri fattori come la temperatura dell'ambiente o l'attenzione dell'operatore.

In particolare, per quanto riguarda l'orientamento della scheda sul piano di lavoro di StarLite 200, nella fase preliminare di misurazione si realizza, per ciascuna scheda, un allineamento tra la griglia di riferimento del software Misure-X visualizzabile a schermo e un riferimento considerato rettilineo della scheda; di fatto si cerca la condizione di parallelismo e di perpendicolarità tra la griglia visualizzata dal software e le piste di calibrazione oggetto di misura. Tale condizione è raggiungibile ruotando manualmente di piccoli angoli la scheda sul piano e comporta l'assunzione della condizione di perpendicolarità tra le piste di calibrazione verticali e orizzontali, non sempre perfettamente verificata. La valutazione della condizione ottimale di allineamento è a discrezione di chi effettua la misura. Questo fatto comporta sicuramente l'introduzione di una differenza tra i valori di una stessa quota rilevati a seguito di successivi posizionamenti della scheda sul piano di misura. Ad esempio, con una piccola rotazione oraria della scheda l'acquisizione dei fiducial di interesse passa dalle posizioni rappresentate in rosso (quelle corrette, con scheda allineata) a quelle nere (*figura 94*).

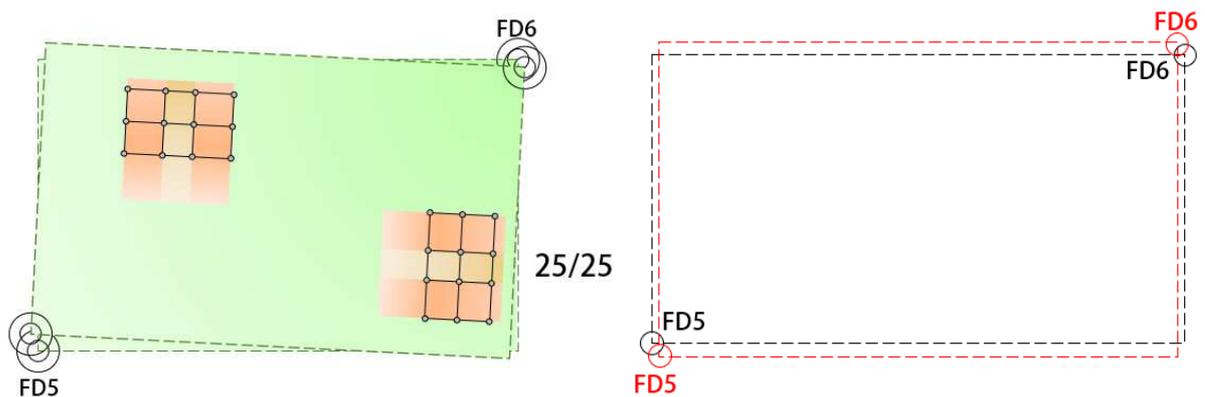


Figura 94 – Effetto dell'orientamento della scheda sul piano di StarLite 200

Range, media, deviazione standard e distribuzione normale di probabilità

Se si considera ad esempio una quota “vera” definita nella fase di caratterizzazione delle schede, l’obiettivo è avere un **valore medio** delle varie misure ottenute a partire dalle impronte lasciate dalla sonda sulla scheda quanto più possibile vicino a quello “vero”. La differenza inevitabilmente osservata tra il valore “vero” della grandezza di interesse e il valore medio può essere definita tramite il **bias**. [6]

Il **valore medio** si esprime come media aritmetica:

$$\mu = \frac{\sum x_i}{N} \quad (\text{media aritmetica})$$

x_i : misurazione i -esima

N : numero di misurazioni effettuate

Il **bias** è la differenza, in valore assoluto, tra il valore medio delle misure rilevate e il valore “vero” (Figura 95). Il bias si esprime come:

$$b = |x_v - \mu| \quad (\text{bias})$$

x_v : valore “vero”

μ : media aritmetica

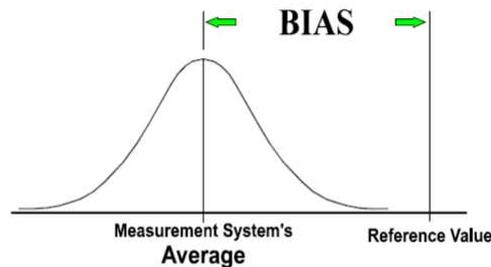


Figura 95 – Rappresentazione grafica del bias

Gli strumenti più comunemente impiegati per esprimere la tolleranza rispetto al valore medio sono il **range** e la **deviazione standard** (scarto quadratico medio).

Il **range** è la differenza tra il valore maggiore e quello minore osservati nei dati ed è lo strumento con il quale si sono fatte le valutazioni preliminari per ottenere i valori di ripetibilità e precisione di posizionamento. Il range si esprime come:

$$r = x_{max} - x_{min} \quad (\text{range})$$

x_{max} : valore massimo rilevato

x_{min} : valore minimo rilevato

Dal momento che con il range non si tengono in considerazione i dati compresi tra gli estremi, la **deviazione standard** si usa con l’obiettivo di misurare il livello di deviazione rispetto al valore atteso: la deviazione standard mostra come i dati sono distribuiti attorno al valore medio.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (\text{deviazione standard o scarto quadratico medio})$$

x_i : misurazione i -esima

μ : media aritmetica

N : numero di misurazioni effettuate

La media μ e la deviazione standard σ sono i due parametri necessari alla definizione della distribuzione normale di probabilità [7]. Una distribuzione si dice normale se la maggior parte dei punti sono distribuiti attorno al valore medio. Il grafico della distribuzione è simmetrico e ha una forma a campana, nota come campana di Gauss; la sua espressione è la seguente:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{distribuzione normale})$$

La simmetria della curva è rispetto al valore medio e le due code si estendono a \pm infinito senza mai toccare l'asse orizzontale. L'area sottesa dalla curva è pari a 1.

Applicazione al caso di studio

Si applicano i concetti di media, deviazione standard e distribuzione normale di probabilità al caso in studio concentrando l'attenzione sulle famiglie di quote 1, 2, 3 e 8, 9, 10 delle quali si conosce il valore "vero" scelto arbitrariamente e uguale per tutte le schede. Il valore "vero" delle altre quote invece cambia da una scheda all'altra per cui non si avrebbe un numero sufficientemente ampio di misure per poter essere significativo.

Si calcolano la media, la deviazione standard, il bias (*tabella 45*) e si traccia l'andamento delle distribuzioni normali di probabilità a partire dalle misurazioni effettuate sulle impronte lasciate dalla sonda sulle schede (*grafici 35, 36 e 37*) per la famiglia di quote 1, 2 e 3.

	Valore "vero" (mm)	Media μ (mm)	Deviazione Standard σ (mm)	Bias (mm)
Quota 1	1	0,9642	0,1168	0,0358
Quota 2	2	1,9831	0,1196	0,0169
Quota 3	3	2,9448	0,1200	0,0552

Tabella 45, famiglia di quote 1,2 e 3

Lo stesso procedimento è seguito per la famiglia di quote 8, 9 e 10. Si calcolano media, deviazione standard, il bias della famiglia di misurazioni (*Tabella 46*) e si tracciano gli andamenti delle distribuzioni normali di probabilità (*Grafici 38, 39 e 40*).

	Valore "vero" (mm)	Media μ (mm)	Deviazione Standard σ (mm)	Bias (mm)
Quota 8	75	75,0456	0,0330	0,0456
Quota 9	76	76,0285	0,0351	0,0285
Quota 10	77	77,0162	0,0302	0,0162

Tabella 46, famiglia di quote 8, 9 e 10

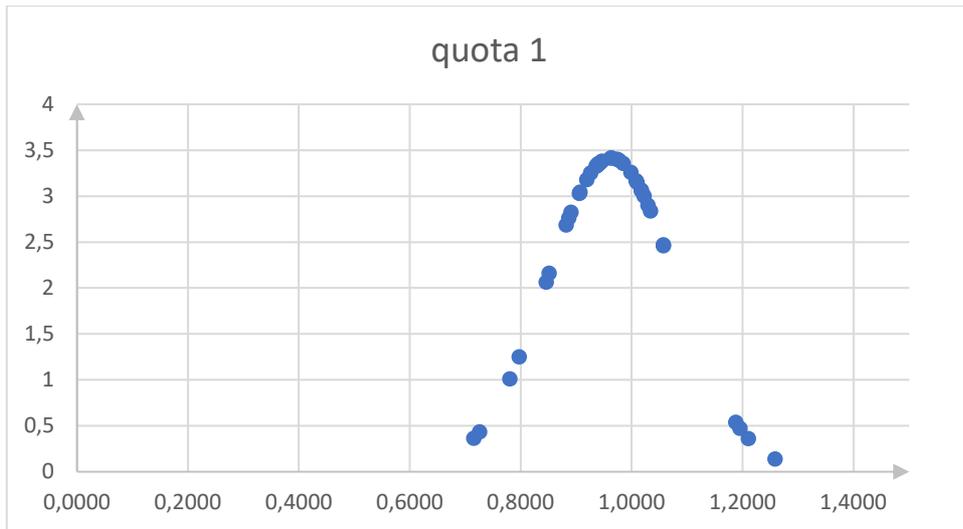


Grafico 35 – quota 1, valore “vero”: 1 mm

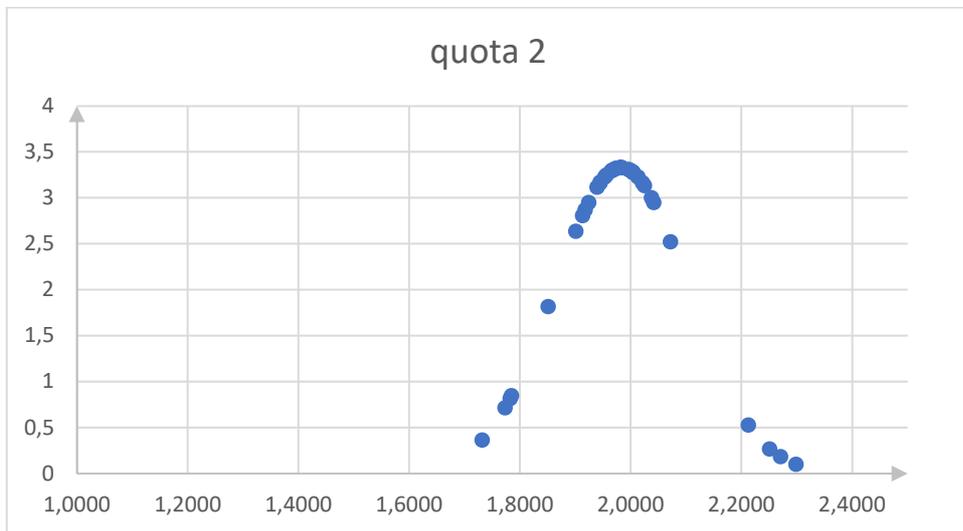


Grafico 36 – quota 2, valore “vero”: 2 mm

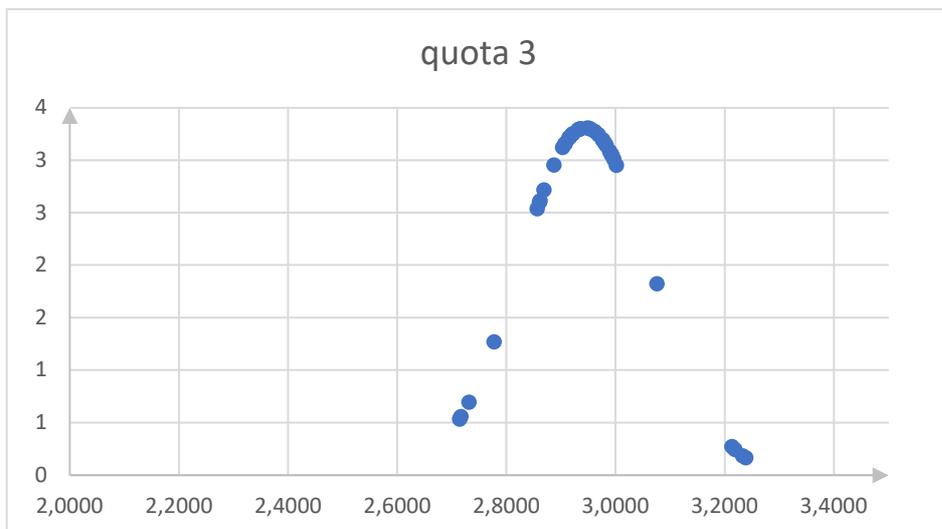


Grafico 37 – quota 3, valore “vero”: 3 mm

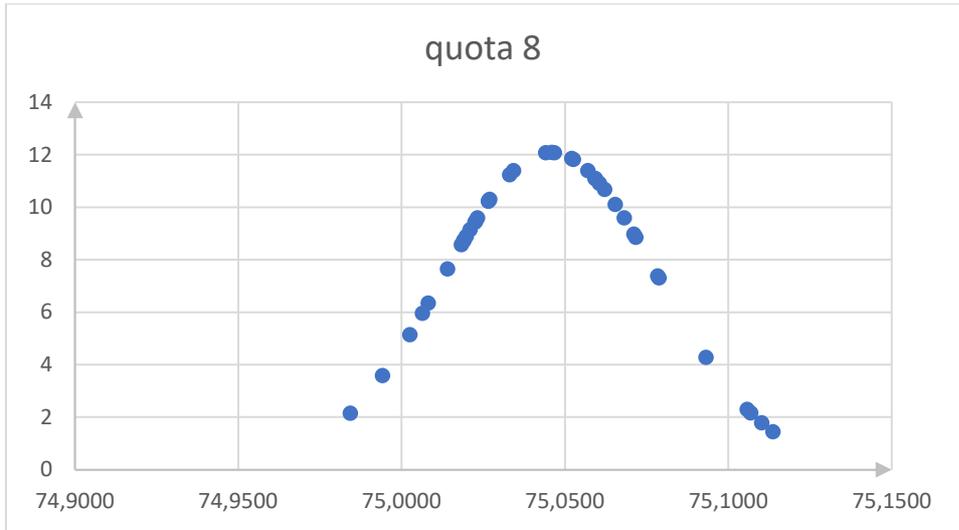


Grafico 38 – quota 8, valore “vero”: 75 mm

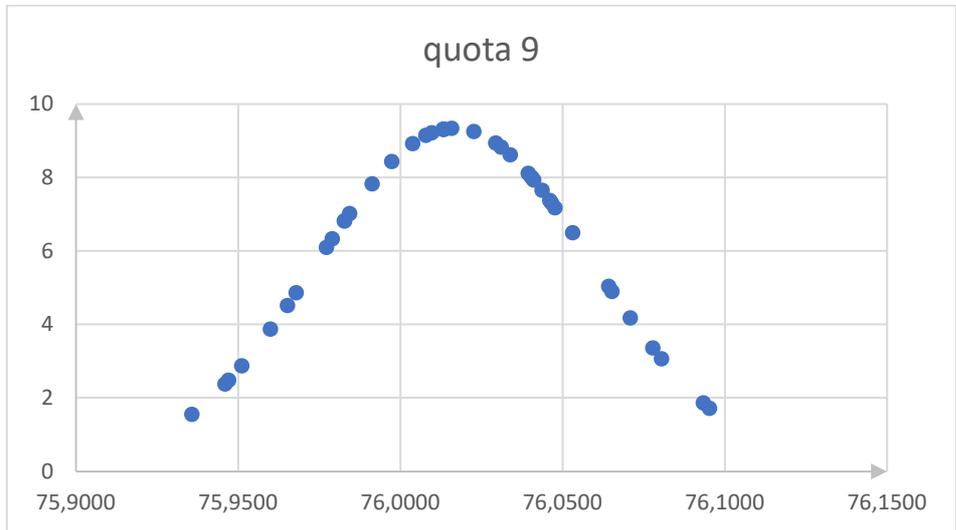


Grafico 39– quota 9, valore “vero”: 76 mm

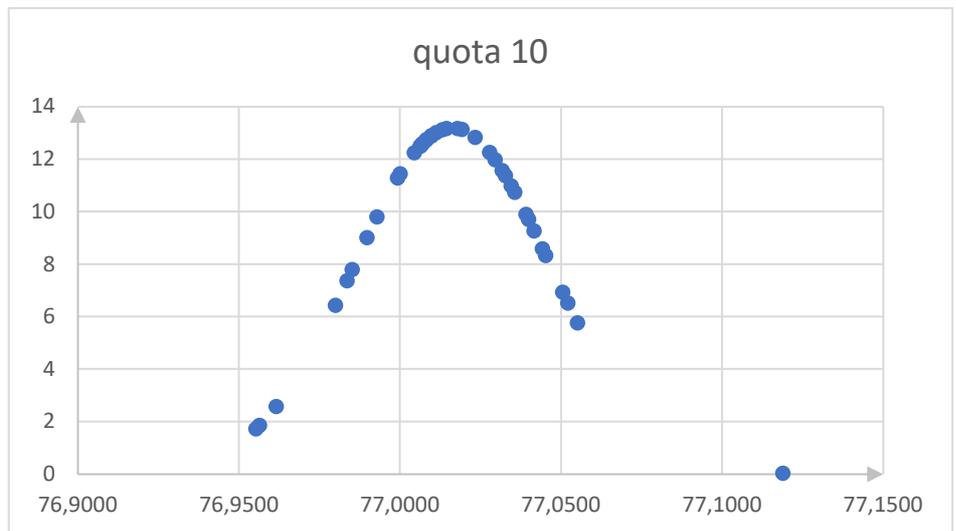


Grafico 40 – quota 10, valore “vero”: 77 mm

Confrontando le due famiglie di curve di Gauss si osserva che:

- Le quote 1, 2 e 3 hanno una maggiore deviazione standard rispetto alle quote 8, 9 e 10; la differenza è di un ordine di grandezza quindi la campana delle quote 1, 2 e 3 ha una base molto più larga rispetto a quella che caratterizza l'altra famiglia di curve.
- I punti sulle curve di Gauss delle quote 1, 2 e 3 sono concentrati in corrispondenza dell'estremità della punta della curva mentre nel caso delle quote 8, 9 e 10 i punti relativi alle varie misurazioni sono distribuiti abbastanza uniformemente lungo tutta la campana.
- Per le quote 1, 2 e 3, il valore medio è leggermente minore di quello "vero", mentre per le quote 8, 9 e 10 vale il contrario.
- Per quanto riguarda il bias, se si guarda il valore medio si ottengono cifre confrontabili (stesso ordine di grandezza) per le due famiglie di curve, come mostrato nella successiva *tabella 47*:

Bias			
Famiglia di quote 1,2 e 3 (mm)		Famiglia di quote 8, 9 e 10 (mm)	
Quota 1	0,0358	Quota 8	0,0456
Quota 2	0,0169	Quota 9	0,0285
Quota 3	0,0552	Quota 10	0,0162
media	0,0359	media	0,0301

tabella 47, confronto tra i valori di bias

Si riportano di seguito (*tabella 49*) i risultati già visti, relativi alla ripetibilità di posizionamento del sistema per fare un confronto con i valori di deviazione standard trovati; la famiglia di quote 1, 2 e 3 ha una maggiore deviazione standard rispetto alla famiglia di quote 8, 9 e 10 quindi ci si aspetta che il valore di ripetibilità corrispondente sia maggiore, così come già si è potuto osservare nei precedenti paragrafi.

Ripetibilità di posizionamento	
<i>Famiglia di quote 4, 5, 6 e 7</i> $R_{xy} = 0,0459 \text{ mm}$	<i>Famiglia di quote 8, 9 e 10</i> $R_{x0} = 0,0420 \text{ mm}$
<i>Famiglia di quote 1,2 e 3</i> $R_{yv} = 0,0463 \text{ mm}$	<i>Famiglia di quote 11, 12, 13 e 14</i> $R_{y0} = 0,0226 \text{ mm}$

Tabella 49 – Ripetibilità di posizionamento del sistema, risultati definitivi (media, media depurata)

Confrontando i valori di bias e di deviazione standard (quindi di ripetibilità di posizionamento) delle due famiglie si possono fare le considerazioni riassunte nella *figura 96*.

In essa si tiene conto del fatto che il bias delle due famiglie di quote è dello stesso ordine di grandezza, accettabile e pari a circa 30 micron mentre la deviazione standard varia di un ordine di grandezza da una famiglia all'altra; questa differenza suggerisce che le misure relative alla famiglia di quote 8, 9 e 10 sono maggiormente rispondenti alla realtà e quindi più affidabili, sia in termini di ripetibilità che di precisione di posizionamento, mentre le misure relative alla famiglia di quote 1, 2 e 3, più disperse, sono affette da errori probabilmente introdotti nella procedura di rilevazione delle quote. Ai fini della precisione di posizionamento è dunque significativo considerare i risultati ottenuti per la famiglia di quote 8, 9 e 10.

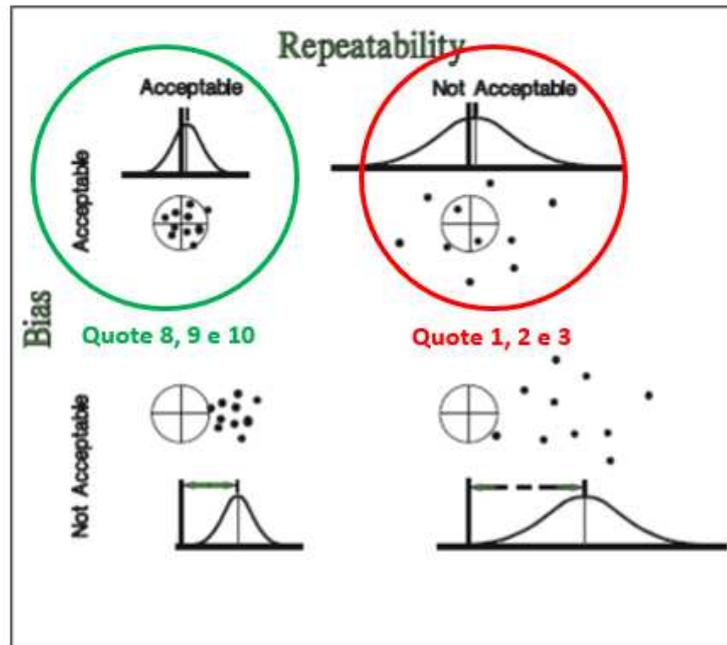


Figura 96 – Relazione tra bias e ripetibilità di posizionamento [4], confronto tra le due famiglie di quote (1,2,3 e 8,9,10).

Precisione di posizionamento, famiglia di quote 8, 9 e 10

Nei paragrafi precedenti si è potuto osservare che il valore massimo della precisione di posizionamento per la famiglia di quote 8, 9 e 10 è pari a $P_{x0} = 0,1189 \text{ mm}$; dagli andamenti riportati nei grafici della figura 97 si può notare come questo valore, riscontrato tra le misure corrispondenti alla quota 10, sia anomalo rispetto agli altri della stessa quota.

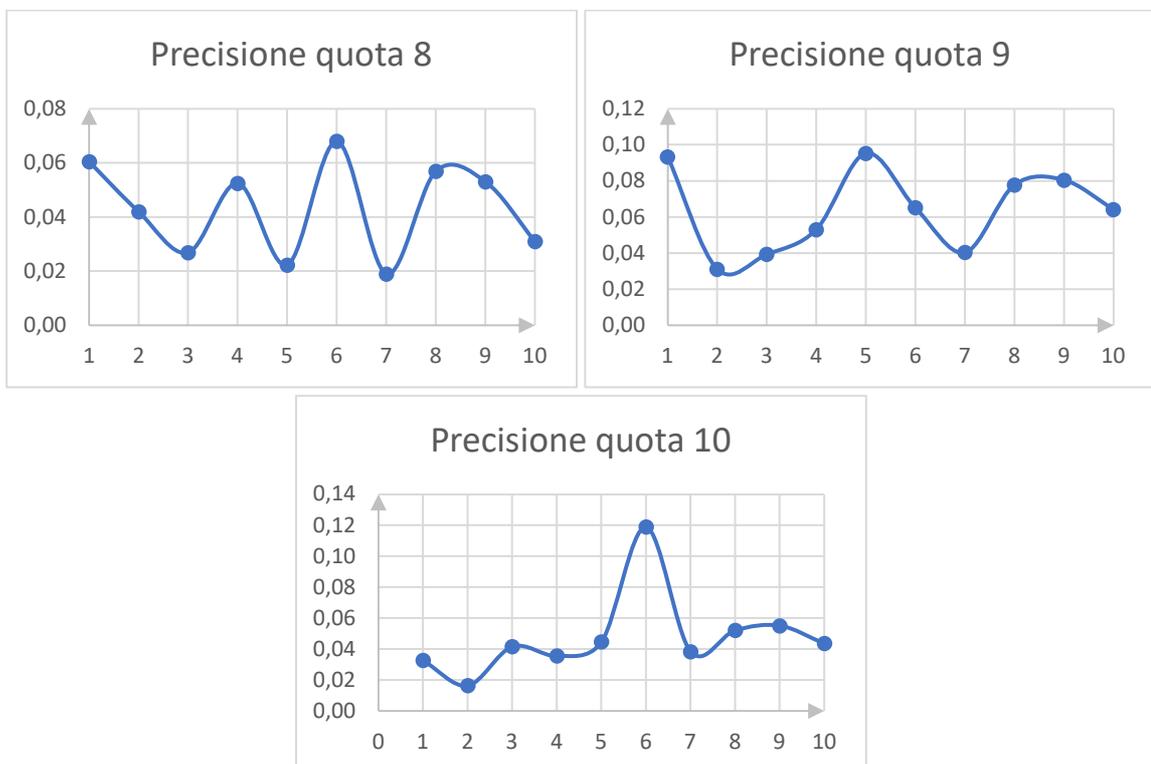


Figura 97 – Precisione di posizionamento lungo x, piste di calibrazione orizzontali 25/25

Similmente a quanto già fatto per lo studio di ripetibilità di posizionamento, nella *tabella 50* per ognuna delle quote di interesse sono riportati i corrispondenti valori di precisione di posizionamento calcolati per ognuna delle schede. I dati, espressi in millimetri, sono gli stessi usati per tracciare gli andamenti dei precedenti grafici (*Figura 97*).

		Precisione di posizionamento		
		Quote (mm)		
		8	9	10
Schede	1	0,0605	0,0934	0,0327
	2	0,0420	0,0311	0,0164
	3	0,0269	0,0394	0,0416
	4	0,0525	0,0531	0,0356
	5	0,0223	0,0953	0,0447
	6	0,0680	0,0652	0,1189
	7	0,0190	0,0404	0,0384
	8	0,0569	0,0778	0,0521
	9	0,0531	0,0805	0,0551
	10	0,0310	0,0642	0,0436
Max		0,0680	0,0953	0,1189
Media		0,0432	0,0640	0,0479
Media Depurata				0,0400

Tabella 50 – Risultati relativi alla precisione di posizionamento (mm)

Nella riga “Max” sono indicati i valori massimi di precisione trovati, tenendo conto anche di quelli considerati anomali (evidenziati in arancione nella tabella). Nella riga “Media” ci sono invece i valori medi di precisione, minori rispetto a quelli massimi della riga precedente. Infine, nella riga “Media Depurata” si riportano i valori medi di ripetibilità calcolati escludendo i dati anomali ove presenti (quota 10). A partire da questi dati si può concludere che la precisione di posizionamento lungo l’asse x per le piste di calibrazione orizzontali è circa $\pm 0,05 \text{ mm}$ ($\pm 50 \text{ micron}$).

Questo risultato deve essere interpretato tenendo conto dei vari fattori che incidono sulla precisione del sistema e alla luce di alcune importanti considerazioni; nel corso di tutto lo studio si è visto ad esempio che la variazione di parametri come il “Down Position”, lo zoom e i fiducial scelti nella fase allineamento preliminare della scheda con i riferimenti della macchina incidono sulla posizione dell’impronta di qualche micron. L’allineamento dei fiducial invece, essendo effettuato dall’operatore per confronto tra i riferimenti della macchina visualizzati a schermo e quelli della scheda, comporta un errore di qualche pixel, corrispondente a circa $\pm 10 \text{ micron}$. Anche l’orientamento della scheda sul sistema di misura ottico StarLite 200 influisce di una quantità pari a qualche decina di micron (tra i 10 e i 20 micron). Da notare che l’effetto legato all’uso di StarLite 200 è duplice perché in una prima fase è stato usato per la caratterizzazione delle schede e successivamente per la rilevazione delle impronte; tuttavia, la variabilità introdotta dal sistema di misura e che incide sulla definizione della precisione del sistema viene in parte annullata effettuando le

valutazioni di precisione sulla famiglia di quote 8, 9 e 10 che ha mostrato un contenuto valore di deviazione standard. Si è esclusa dalle valutazioni la famiglia di quote 1, 2 e 3 che ha una deviazione standard maggiore e riconducibile ad un utilizzo non ottimale del sistema di misura StarLite 200. A tutto ciò si aggiunge la meccanica e la rigidità del sistema, a partire dal gioco dell'estremità della sonda, inevitabile affinché la punta possa rientrare nello stelo schiacciando la molla quando si trova a contatto con la scheda e quantificato in ± 25 micron. Tenendo conto di tutti questi fattori e del fatto che l'intera analisi è stata condotta su una singola macchina (quindi una specifica meccanica) può ritenersi confermato il valore medio di precisione di posizionamento dichiarato in fase di redazione delle specifiche di progetto.

Confronto tra i valori di precisione

Come accennato all'inizio, lo studio delle caratteristiche statiche di un sistema, come la ripetibilità di posizionamento o la precisione statica richiede che il valore vero, cioè il valore della grandezza di interesse preso come riferimento sia scelto con una precisione migliore di $\frac{1}{4}$ della precisione nominale della macchina in prova [4]. La condizione ottimale è quella per cui la differenza di precisione è pari ad un ordine di grandezza. Per verificare di essere in queste condizioni si riportano per un confronto i valori di precisione di StarLite 200 e della macchina in prova (precisione misurata).

Nel paragrafo "Precisione e Risoluzione di StarLite 200" la precisione di StarLite 200 viene indicata come $P_{\text{StarLite}} = 0,00005$ mm. La precisione (misurata) di posizionamento del sistema definita nel paragrafo precedente è molti ordini di grandezza superiore rispetto alla prima. Questo fatto garantisce che lo strumento di misura ottico utilizzato è compatibile con i fini di questo studio.

Conclusioni

Partendo dai concetti di ripetibilità e precisione di posizionamento di un robot viene messa a punto una procedura sperimentale che consente di raccogliere dati e informazioni utili relativamente alle caratteristiche statiche di una delle otto sonde presenti sul Flying Probe Tester Pilot 4D V8, un sistema automatico di collaudo di schede elettroniche, prodotto da S.E.I.C.A. con sede a Strambino (TO). Per lo studio dei vari step di questa attività sperimentale e per l'esecuzione delle prove di posizionamento è stata fondamentale l'attività di tirocinio svolta in azienda.

Il sistema oggetto di studio ha un'architettura verticale per ridurre l'effetto di imbarcamenti e vibrazioni delle schede da collaudare ed è caratterizzato da otto sonde mobili: quattro operano su un lato della scheda e quattro sul lato opposto, per l'esecuzione di test elettrici. Tutta l'analisi di ripetibilità e precisione di posizionamento è condotta su una sola di queste sonde per eliminare l'ulteriore variabile rappresentata dalla sonda scelta. Tra le possibili alternative viene scelta la numero 3 per via della sua posizione e del suo orientamento nel volume di lavoro; essa risulta meno inclinata delle altre rispetto alla perpendicolare al piano della scheda, pertanto sono minimizzati gli effetti di flessione al contatto.

Lo studio di ripetibilità e precisione di posizionamento si suddivide in tre fasi principali. Nella prima parte del lavoro si stabiliscono le coordinate che la sonda deve raggiungere su ognuna delle dieci schede OVP, normalmente impiegate per effettuare la calibrazione del sistema. A questo scopo è necessaria, in primo luogo, la caratterizzazione delle schede che consente di conoscere le quote caratteristiche di ciascuna scheda, considerate esatte in quanto determinate con uno strumento ad elevata risoluzione, il sistema ottico di misura StarLite 200 e con Solidworks (il software di StarLite 200 produce dei file .dxf che possono essere aperti e convertiti in schizzi di Solidworks, in cui si possono fare modifiche e rilevare quote). La caratterizzazione delle schede oltre ad essere fondamentale per definire le coordinate che il sistema deve raggiungere, consente di quantificare la differenza tra le diverse schede introdotta dal processo produttivo. Il secondo passo consiste nel combinare le informazioni ottenute dalla caratterizzazione con le coordinate dei fiducial presenti sulle schede. Ciò è indispensabile in quanto nella fase preliminare delle prove di posizionamento si effettua un allineamento tra il sistema e la scheda, facendo riferimento proprio ai fiducial. Una volta note le coordinate che la sonda deve raggiungere (ovvero le coordinate di riferimento o coordinate "vere" con le quali confrontare successivamente i risultati del posizionamento) si elaborano i file contenenti queste informazioni e necessari per la creazione delle board, ovvero dei programmi che il sistema deve eseguire.

I punti in cui è richiesto il posizionamento sono 24 per ogni scheda e sono posti in corrispondenza delle piste di calibrazione 25/25 presenti sulle schede OVP, in quanto queste piste sono quelle usate per effettuare la calibrazione del sistema. I punti sono 12 in corrispondenza delle piste di calibrazione verticali e 12 in corrispondenza delle piste di calibrazione orizzontali e sono disposti a formare una griglia 4x3. Questa disposizione agevola notevolmente l'individuazione delle impronte lasciate dalla sonda sulle schede e consente di definire 14 quote di interesse suddivise in quattro famiglie (*Figura 98*) su cui condurre la successiva analisi di ripetibilità e precisione.

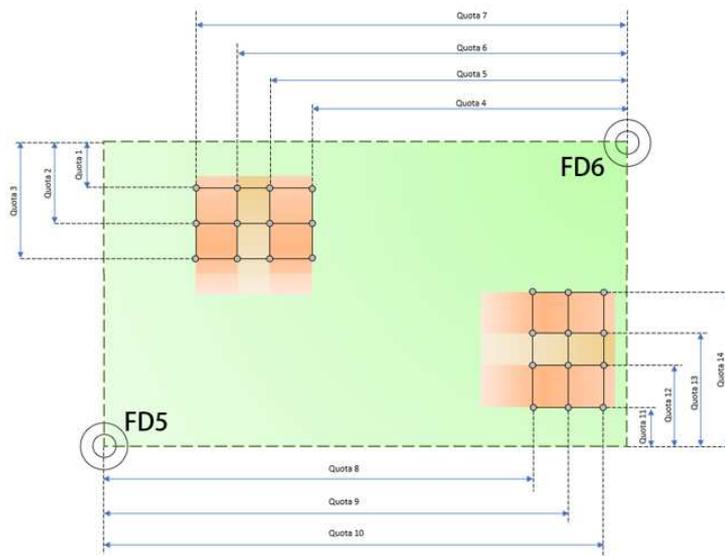


Figura 98 – Disposizione dei punti e le quattro famiglie di quote

La seconda fase costituisce la parte centrale dello studio consiste nell'esecuzione delle prove di posizionamento sul sistema V8 automatico. Dopo aver sostituito le sonde presenti sul sistema con quelle ottimali ai fini di questa attività ed aver effettuato la calibrazione con la scheda 1, si effettuano le prove, sostituendo di volta in volta le varie schede nel volume di lavoro e eseguendo le board precedentemente preparate. L'aspetto determinante nell'esecuzione di queste prove di posizionamento e più in generale alla base dell'intera attività svolta consiste nel fatto che i vari parametri del sistema e di board vengono regolati al fine di aumentare al massimo la definizione dell'impronta lasciata sulle schede della sonda per osservare il punto effettivamente raggiunto in un secondo momento. Questa finalità si discosta da quella per cui il sistema è stato realizzato, in quanto normalmente si desidera effettuare misure di natura elettrica riducendo al minimo l'impatto delle misurazioni sulle schede. Nell'ottica di poter osservare con chiarezza le impronte lasciate dalla sonda sulle schede, nel corso di tutta l'attività si fanno alcune scelte mirate:

- si sceglie di impiegare sonde da 3 mils del tipo strong che incidono maggiormente la superficie della scheda rispetto agli altri tipi (parametro di sistema).
- si aumenta la pressione esercitata dalla sonda sul piano della scheda agendo sul parametro "Down Position" che viene settato a -1,5 mm (parametro di Board).
- si regola la velocità di avvicinamento della sonda alla scheda, scegliendo la modalità "SuperSoft" tra quelle disponibili (parametro di Board).
- si eseguono le prove nella configurazione *Step-by-Step* eseguendo un posizionamento alla volta nell'ambito della stessa prova e attendendo tra un posizionamento e l'altro circa cinque secondi.

La prova di posizionamento nei punti predefiniti consiste in cinque fasi successive che devono essere ripetute per ognuna delle dieci schede. Le fasi sono:

- Carico della scheda nel sistema
- Impostazione della pressione esercitata dalla sonda sulla scheda
- Esclusione delle teste, per garantire che sia sempre la sonda 3 a posizionarsi nei punti richiesti e sia dunque evitata l'ottimizzazione automatica dei tempi operata dal sistema.
- Allineamento tra i fiducial della scheda e i riferimenti della macchina
- Esecuzione della prova

La terza fase consiste nella individuazione delle impronte e nell'elaborazione dei dati ottenuti. Osservando per mezzo del sistema di misura ottico StarLite 200 con ingrandimenti fino a 276x le impronte lasciate dalla sonda sulle dieci schede si misurano le coordinate dei punti effettivamente raggiunti. Per agevolare l'acquisizione della posizione delle varie impronte si regolano l'intensità e l'incidenza dei fasci di luce di StarLite 200 e altri parametri come la saturazione o il contrasto. In questo modo ad esempio la luce può essere più o meno riflessa dalle impronte sulle piste in rame. Per rilevare le impronte sull'isolante è opportuno passare alla modalità di acquisizione in bianco e nero.

Le coordinate dei punti effettivamente raggiunti vengono confrontate con quelle di riferimento misurate in partenza. Con gli stessi dati si possono effettuare alcune valutazioni sia in termini di ripetibilità che di precisione di posizionamento, riassunte di seguito.

Ripetibilità di posizionamento

Per ciascuna delle 14 quote di interesse si realizza un diagramma come quello della *figura 99* in cui la quota viene misurata più volte per ciascuna delle dieci schede. La ripetibilità di posizionamento corrisponde al raggio della circonferenza più grande individuata.

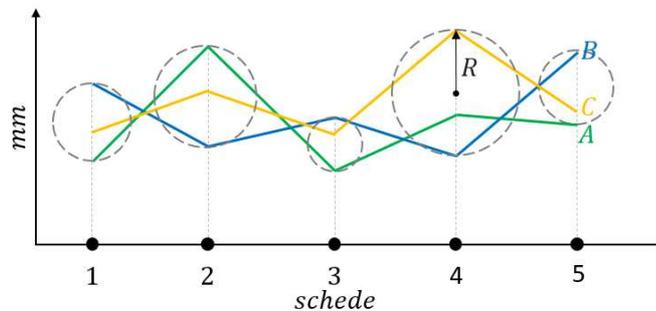


Figura 99 – Ripetibilità di posizionamento

I risultati ottenuti sono riassunti nella *tabella 51*; nel considerare i valori trovati è necessario tenere in considerazione alcuni aspetti rilevanti:

- I risultati sono stati calcolati innanzitutto come valori medi tra quelli trovati escludendo per ciascuna famiglia di quote i valori di ripetibilità anomali. Inoltre, da questi è stato sottratto il gioco introdotto dalla sonda quantificato in $\pm 25 \mu m$ secondo il catalogo della casa costruttrice. La scelta di eliminare il contributo della sonda nella definizione della ripetibilità di posizionamento del sistema dipende dal fatto che essa è un elemento sostituibile della macchina, per cui cambiando tipo di sonda cambia la ripetibilità del sistema.
- La ripetibilità di posizionamento lungo y per le piste di calibrazione orizzontali non è stata riportata in quanto il valore trovato si discosta molto dagli altri.
- L'indagine è stata condotta su una sola macchina e quindi può ritenersi confermato il valore medio di ripetibilità di posizionamento dichiarato in fase di redazione delle specifiche di progetto e pari a $\pm 10 \mu m$.

Ripetibilità di posizionamento, piste 25/25	
$R_{xv} : \pm 20,9 \mu m$	$R_{xo} : \pm 17,0 \mu m$
$R_{yv} : \pm 21,3 \mu m$	

Tabella 51 – Ripetibilità di posizionamento del sistema

R_{xv} : ripetibilità di posizionamento lungo x, piste di calibrazione verticali

R_{yv} : ripetibilità di posizionamento lungo y, piste di calibrazione verticali

R_{xo} : ripetibilità di posizionamento lungo x, piste di calibrazione orizzontali

Precisione di posizionamento

Come per l'analisi condotta sulla ripetibilità di posizionamento per ciascuna delle 14 quote di interesse si realizza un diagramma come quello della *figura 100* in cui la quota viene misurata più volte per ciascuna delle dieci schede. In questo caso si aggiunge anche il valore di riferimento o valore "vero"; esso è costante oppure variabile a seconda della famiglia di quote considerata. La precisione di posizionamento corrisponde al più grande errore in valore assoluto tra il valore "vero" e le misure rilevate.

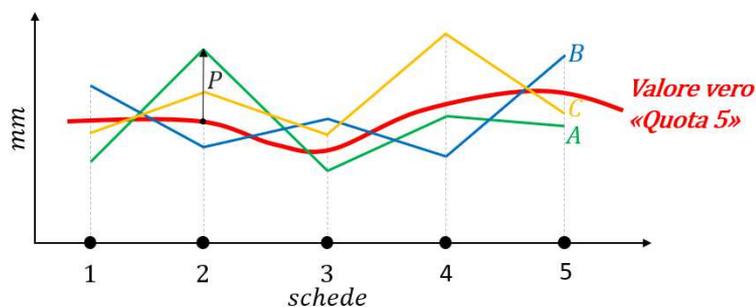


Figura 100 – Precisione di posizionamento

Per quanto riguarda la precisione di posizionamento i risultati ottenuti in prima battuta non sono in linea con le attese, soprattutto relativamente alle piste di calibrazione orizzontali in corrispondenza delle quali si osserva un netto scostamento tra i punti in cui è richiesto il posizionamento e quelli effettivamente raggiunti dalla sonda.

Al fine di indagare le ragioni di questi risultati si è svolta un'indagine di carattere statistico basata sulla valutazione di parametri quali il bias e la deviazione standard delle famiglie di quote 1, 2 e 3 e 8, 9 e 10 delle quali si conosce il valore "vero" scelto arbitrariamente e uguale per tutte le schede. Il valore "vero" delle altre quote invece cambia da una scheda all'altra per cui non si avrebbe un numero sufficientemente ampio di misure per poter essere significativo ai fini di questa indagine. Le valutazioni fatte hanno portato ad attribuire una maggiore affidabilità alle misure relative alla famiglia 8, 9 e 10 associata ad una precisione di $\pm 50 \mu m$.

Questo risultato deve essere interpretato tenendo conto dei vari fattori che incidono sulla precisione del sistema e alla luce di alcune importanti considerazioni:

- si tratta di un valore medio tra quelli trovati ed è stato ottenuto escludendo i valori di precisione anomali della famiglia 8, 9 e 10.
- nel corso di tutto lo studio si è visto che la variazione di parametri come il "Down Position", lo zoom e i fiducial scelti nella fase allineamento preliminare della scheda con i riferimenti della macchina incidono sulla posizione dell'impronta di qualche micron.
- L'allineamento dei fiducial essendo effettuato dall'operatore per confronto tra i riferimenti della macchina visualizzati a schermo e quelli della scheda, comporta un errore di qualche pixel, corrispondente a circa ± 10 micron.
- Anche l'orientamento della scheda sul sistema di misura ottico StarLite 200 influisce di una quantità compresa tra i 10 e i 20 micron. Da notare che l'effetto legato all'uso di StarLite 200 è duplice perché in una prima fase è stato usato per la caratterizzazione delle schede e successivamente per la rilevazione delle impronte; tuttavia, la variabilità introdotta dal sistema di misura e che incide sulla definizione della precisione del sistema viene in parte annullata effettuando le valutazioni di precisione esclusivamente sulla famiglia di quote 8, 9 e 10 che ha mostrato un contenuto valore di deviazione standard. Si è esclusa dalle valutazioni

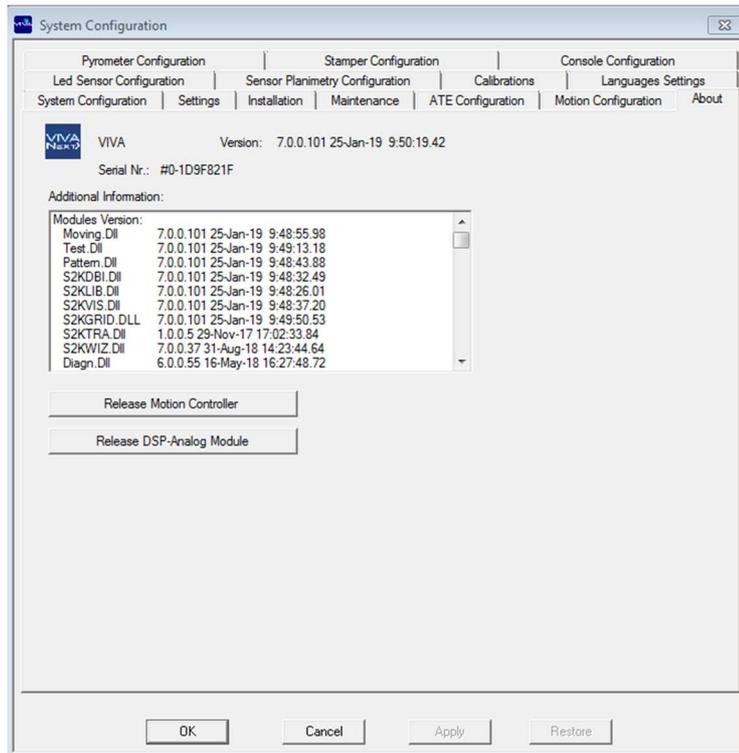
la famiglia di quote 1, 2 e 3 che ha una deviazione standard maggiore e riconducibile ad un utilizzo non ottimale del sistema di misura.

- Come per la ripetibilità di posizionamento si aggiunge il gioco dell'estremità della sonda, inevitabile affinché la punta possa rientrare nello stelo schiacciando la molla quando si trova a contatto con la scheda e quantificato in ± 25 *micron*.

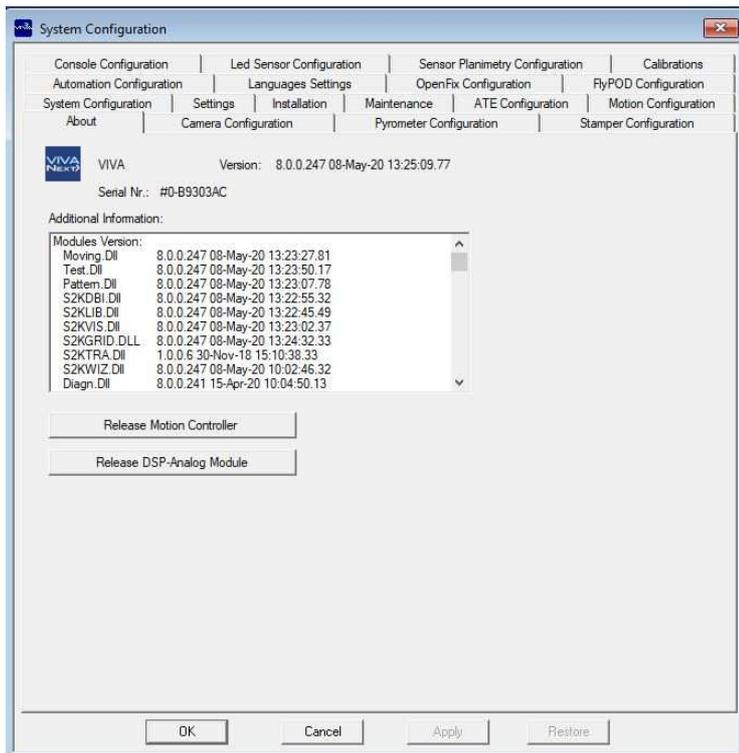
Tenendo conto di tutti questi fattori e del fatto che l'intera analisi è stata condotta su una singola macchina (quindi una specifica meccanica) può ritenersi confermato il valore medio di precisione di posizionamento dichiarato in fase di redazione delle specifiche di progetto e pari a ± 20 μm .

Bibliografia

- [1] Ingun, test probes – “Catalogo 25.3”, 78467 Konstanz, Germany
- [2] Quality Vision International – “Measure-X, Training Workbook”, febbraio 2012 – Quality Vision International Inc. – New York, USA
- [3] Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, and General Motors Corporation – “MEASUREMENT SYSTEMS ANALYSIS, Reference Manual”, IV edizione, giugno 2010, USA
- [4] M.Sorli, G.Quaglia – “Meccatronica, le basi della meccatronica, struttura dei dispositivi di attuazione controllata, caratteristiche statiche e dinamiche degli strumenti”, 2017 – EPICS s.a.s – Torino.
- [5] L.Iuliano, Slide del corso “Sistemi integrati di produzione”, A.A 2019 – 2020, Politecnico di Torino, Torino.
- [6] Issa Bass – “Six Sigma Statistics with EXCEL and MINITAB”, 2007 – Mc Graw Hill, USA
- [7] Semyon G. Rabinovich – “Evaluating Measurement Accuracy, a practical approach”, II edizione, 2013 – Springer – Cleveland Hts, OH, USA



Software Viva, versione 7



Software Viva, versione 8 (usato per le prove)