

Misura e Compensazione Volumetrica o Diagonale per passi.

Confronto tra i Risultati ottenuti con l'uso del Metodo Vettoriale ed il metodo tradizionale

Gianmarco Liotto

Optodyne Laser Metrology srl
Via Veneto,5 20881-Bernareggio (MB)
tel. 039 6093618 optodyne@optodyne.it

Sunto

Per ottenere una migliore precisione di posizionamento di una macchina utensile è importante la misura dell'errore volumetrico, che ingloba gli errori di posizionamento lineare, gli errori geometrici di rettilineità e di perpendicolarità di tutti e tre gli assi e gli errori di deformazione o cedimento. La verifica del comportamento dinamico completa il quadro delle informazioni

Con la nuova generazione di CNC è possibile ottenere macchine di qualità più elevata a prezzi anche inferiori utilizzando le compensazioni software a condizione che gli errori siano ripetibili e facilmente misurabili. Di seguito è descritto un nuovo metodo per la misura dell'errore volumetrico di una macchina utensile a controllo numerico CNC o di una macchina di misura a coordinate cartesiane.

Contrariamente alle misure effettuate con un interferometro laser di tipo tradizionale, il metodo vettoriale misura gli errori vettoriali che sono: l'errore di posizionamento lineare, l'errore di rettilineità verticale e di rettilineità orizzontale piuttosto che il solo errore di posizionamento. Possono anche essere misurati gli errori angolari e gli errori dovuti alle flessioni (di non rigidità). Quindi sono misurati gli errori volumetrici ed usati per compensare gli errori ripetibili della macchina. Sono descritti il concetto base, brevemente la teoria e gli errori di misura, la verifica sperimentale con grafici dei risultati.

I. Introduzione

Le prestazioni, o in altri termini la precisione di una macchina utensile CNC, sono commisurate agli errori lineari di posizionamento, agli errori di rettilineità, agli errori angolari ed agli errori di elasticità. Una misurazione completa di questi errori è molto lunga e complessa. La misurazione diagonale del corpo macchina è raccomandata dagli standard internazionali quali ISO 230 ed ASME B5.54 per una rapida verifica della precisione volumetrica. Questo perché la misura diagonale è sensibile a tutte le componenti di errore. Comunque se gli errori misurati eccedono le specifiche, con la semplice misura diagonale non si hanno sufficienti informazioni per identificare le sorgenti di errore ed effettuare la loro compensazione.

La caratterizzazione del movimento di una macchina è molto complessa. Per ogni asse di movimento, ci sono 6 gradi di libertà e quindi 6 errori: lineare in X, di rettilineità nelle direzioni Y e Z, angoli di rollio, beccheggio ed imbardata. Per una macchina a 3 assi ci sono 18 errori più 3 di quadratura totale 21 errori. La precisione di una macchina può essere migliorata con la misurazione di tutti questi errori e con la loro compensazione, a condizione che la macchina sia ripetibile.

La tecnica di misurazione vettoriale o in altre parole il metodo di *misurazione diagonale per passi* può misurare tutti questi errori volumetrici usando un LDDM Laser Doppler Displacement Meter ovvero un laser interferometro di nuova generazione a singolo raggio e singola apertura capace di utilizzare in modo semplice uno specchio piano come bersaglio di misura.

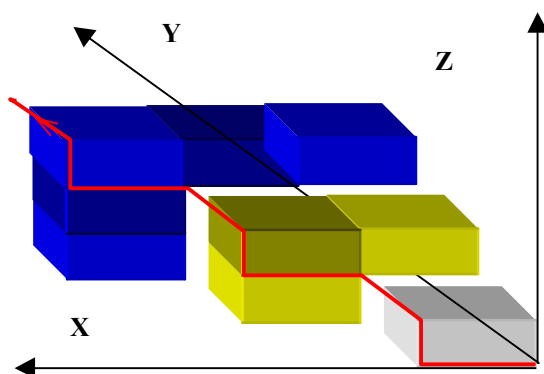
II. CONCETTI BASE DELLA MISURA DIAGONALE

1. Misura diagonale

Il metodo di misura diagonale è raccomandato per un rapido esame delle prestazioni di posizionamento e di geometria della macchina in tutte le sue componenti. Si tratta di misurare lungo le 4 diagonali la precisione di posizionamento mediante un interferometro laser. Un riflettore viene applicato solidale al mandrino ed illuminato dal raggio laser che è stato allineato lungo la diagonale della macchina, per esempio dallo spigolo in basso a destra (X=0 Y=0 Z=0 denominato NNN) allo spigolo in alto a sinistra (Xmax. Ymax. Zmax. denominato PPP) del volume di lavoro della macchina. Viene misurata la posizione a zero e ad ogni incremento dei tre assi, che vengono mossi contemporaneamente per raggiungere la nuova posizione lungo la diagonale. La precisione della posizione di ogni posizione lungo la diagonale dipende dalla precisione di posizionamento dei tre assi, ma anche e soprattutto dalla geometria. Per cui è un buon metodo per verificare la precisione di una macchina, ma non fornisce sufficienti informazioni per determinare la sorgente degli errori.

2. Misura diagonale per passi

Il nuovo metodo di misura vettoriale o *metodo di misurazione diagonale per passi* si differenzia dal metodo tradizionale per il fatto che ogni asse viene mosso singolarmente ed il dato di posizione viene raccolto dopo ogni singolo movimento degli assi X poi Y ed infine Z. Per cui può essere separato l'errore di posizione dovuto al posizionamento di ogni singolo asse. I dati raccolti possono essere processati come errori della proiezione dello spostamento di ogni singolo asse lungo la direzione della diagonale. Per cui possono essere determinati sia gli errori di posizionamento sia quelli di rettilineità di ognuno dei tre assi.



Schema della misura diagonale per passi.

Il volume di lavoro è idealmente diviso in parallelepipedi elementari.

3. Teoria

Per un approfondimento sulla teoria del metodo vettoriale, modello e formule rimandiamo alla seguente pubblicazione: Volumetric Error Measurement and Compensation using the Vector Method, Part 1: Basic Theory - Charles P. Wang –Optodyne, Inc. 1180 Mahalo Place Compton, CA90220 USA tel 310-635-7481

Il documento può essere scaricato all'indirizzo WWW.OPTODYNE.COM

III. VERIFICA SPERIMENTALE

1. Macchine misurate

L'intervento di misurazione è stato effettuato su due macchine JOBS-LINKS COMPACT 5AX , presso lo stabilimento di Piacenza. Sono state prese in considerazione due macchine dello stesso tipo, la prima delle due è stata verificata nelle sue prestazioni geometriche che sono state riscontrate in tolleranza, e compensata per l'errore di posizionamento lineare ed è stata misurata la precisione di posizionamento volumetrico. La seconda macchina che era priva di compensazioni è stata misurata col metodo Vettoriale o misura diagonale per passi con il quale sono stati misurati gli errori ed automaticamente generate le 24 tabelle che hanno permesso la compensazione globale della macchina. La successiva verifica è stata effettuata utilizzando il metodo tradizionale con assi interpolati lungo le diagonali come nella verifica precedente.

Sono state effettuate anche misure di controllo statistico, dinamico di interpolazione circolare e per sollecitazione a gradino, nonché misure geometriche di rettilineità.

2. Strumentazione utilizzata

Nella misura *diagonale convenzionale* la traiettoria del bersaglio riflettore è una linea retta per cui è possibile usare un bersaglio catadiottrico che può tollerare uno spostamento laterale di 5mm. Nella misura *diagonale per passi* il movimento è alternativamente lungo l'asse X, poi lungo l'asse Y e lungo l'asse Z per poi ripetersi fino al raggiungimento dello spigolo opposto (una spezzata a gradini). La traiettoria del bersaglio riflettore non è una linea retta ed il movimento laterale è piuttosto grande. Per cui non è possibile usare un interferometro tradizionale che non può tollerare uno spostamento laterale così grande. Si è utilizzato un laser a singolo raggio e singola apertura basato sull'effetto Doppler che può essere usato sia con un normale riflettore catadiottrico che con uno specchio piano come bersaglio. Si può notare che con uno specchio piano come bersaglio, gli spostamenti paralleli allo specchio non spostano il raggio laser e non alterano la sua distanza dalla sorgente e quindi non influenzano la misura. Per cui viene misurato solo lo spostamento lungo la direzione del raggio laser e permessa una forte deviazione laterale del bersaglio.

Il sistema di calibrazione Laser Doppler Displacement Meter (LDDM) OPTODYNE modello MCV500 è un laser interferometro di nuova generazione basato sull'effetto Doppler e a singolo raggio, per cui la luce riflessa dallo specchio bersaglio rientra nella stessa apertura dalla quale viene emessa. Il sistema è completato da uno specchio di rinvio per indirizzare il raggio in diagonale.

Come bersaglio sulla parte mobile sono stati utilizzati un prisma catadiottrico diametro 12mm ed uno specchio piano di 75 X 100 mm come bersaglio. Per effettuare le misure di coordinamento dinamico o Laser /Ballbar è stato utilizzato uno specchio piano di 150mm di larghezza.

Il retroriflettore per la misura dinamica a gradini è un prisma catadiottrico di piccole dimensioni, 4mm di diametro, applicato con materiale collante anelastico. Per l'acquisizione automatica dei dati, il calcolo degli errori e la generazione delle tabelle di compensazione è stato usato il software Optodyne LDDM Versione 2.43.

IV. Misure di verifica sulla prima macchina per mezzo della diagonale continua

1. Preparazione alla Misura

La macchina è stata misurata lungo le 4 diagonali ottenute per mezzo di passi di avanzamento interpolati sui tre assi, come descritto precedentemente. Il Laser è stato montato sulla tavola e per mezzo dello specchio di allineamento, il raggio è stato diretto lungo la diagonale. Lo specchio catadiottrico è stato montato sul mandrino, come illustrato nella figura 1. La macchina è stata programmata per muovere il mandrino partendo da uno spigolo per arrivare allo spigolo opposto. Sono state usate tutte le compensazioni di passo già inserite nel controllo numerico. Il raggio laser è stato allineato parallelo alla direzione di movimento diagonale. La tolleranza tipica di allineamento è minore di 0,25 m Radianti o 1mm sulla distanza di 4 metri.

2. Collezione ed analisi dei dati di precisione volumetrica

L'errore di posizionamento è stato misurato per mezzo di un laser Doppler (LDDM) a singola apertura. Sono state misurate la temperatura e la pressione dell'aria per compensare la variazione della velocità della luce, e la temperatura del materiale per la compensazione della espansione termica del materiale.

I dati sono stati acquisiti automaticamente dal software LDDM ad ogni fermata della macchina.

I dati di errore sono stati analizzati per mezzo del software LDDM. Cliccando su *4-diagonal* nella sezione di analisi e richiamando i 4 file di dati errore sulle diagonali. Sono stati generati i grafici riassuntivi dell'errore volumetrico della macchina che sono riportati nella fig. 6.

3 Errori di misura diagonale continua

La precisione del sistema di misura laser è elevata, migliore di 1ppm, le sorgenti di errore tipiche sono: errori di allineamento o errore di coseno, errori dovuti alla misura della temperatura e della pressione. Nella misura diagonale bisogna tenere in considerazione gli errori tipici della misura interferometrica:

Errore di allineamento dello specchio piano: dipende dall'angolo di disallineamento dello specchio e dalla lunghezza del passo. L'errore può essere abbastanza grande ma è costante e non cumulativo per cui viene rimosso dal software.

Errore dovuto all'errore angolare della macchina: Lo specchio di misura potrebbe non essere nel centro di rotazione della macchina e può generare un errore elevato. Si possono determinare gli angoli di rotazione cambiando le sequenze di misura aumentando leggermente la complessità della misura. I dati di rotazione eventualmente calcolati non possono comunque essere usati per la correzione dalla maggior parte di controlli per macchina utensile.

4 Budget di errore per la misura diagonale continua

Le variabili in gioco sono le seguenti:

Controllo temperatura	0,1°C
Controllo pressione	0,5 mBar
Corsa totale	4 m
Percorso morto	10 mm
Angolo di tilt (rotazione)	20 μ Radianti
Angolo di disallineamento	0,5 mRadianti

Coefficiente di espansione	12 μ / m / C°
Abbe offset	50mm
Errore di lunghezza d'onda laser	1 μ m /m

Ne risultano quindi i seguenti errori:

Compensazione temp Aria	1ppm x 4m x 0,1 °C = 0,4 μ m
Compensazione pressione Aria	0,3 ppm X4m X0,5mBar = 0,6 μ m
Espansione materiale	12 μ / m / C° x 4m x 0,1 °C = 4,8 μ m
Percorso morto	1ppm x100 mm x 0,1°c = 0,01 μ m
Errore di Abbe	0,05m x 20 μ Radianti = 2 μ m
Errore di coseno	0,5 ² mRad. /2 x 4m = 0,5 μ m
Errore lunghezza d'onda	1ppm x 4m = 4 μ m

L'errore totale o l'incertezza di misura il seguente:

$$E = \sqrt{0,4^2 + 0,6^2 + 4,8^2 + 0,01^2 + 2^2 + 0,5^2 + 4^2} = 5,1 \mu\text{m} \quad \text{o} \quad 1,3 \mu\text{m/m}$$

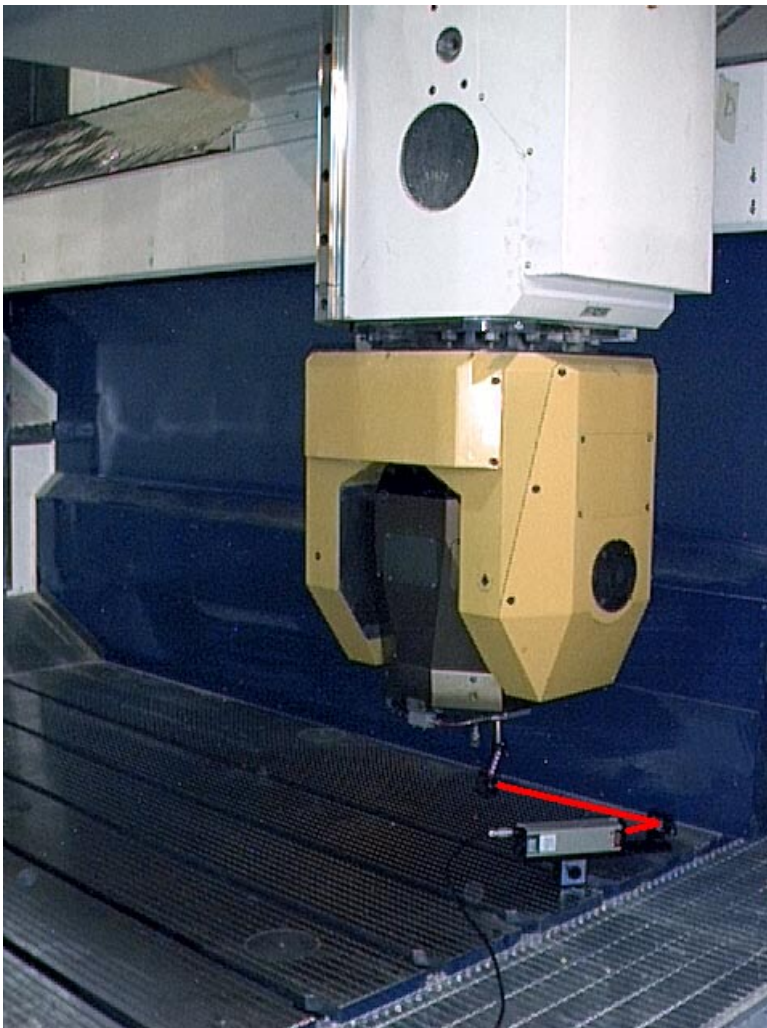


Fig 1-Macchina sotto misura con il laser sul pianale e lo specchio sul mandrino.

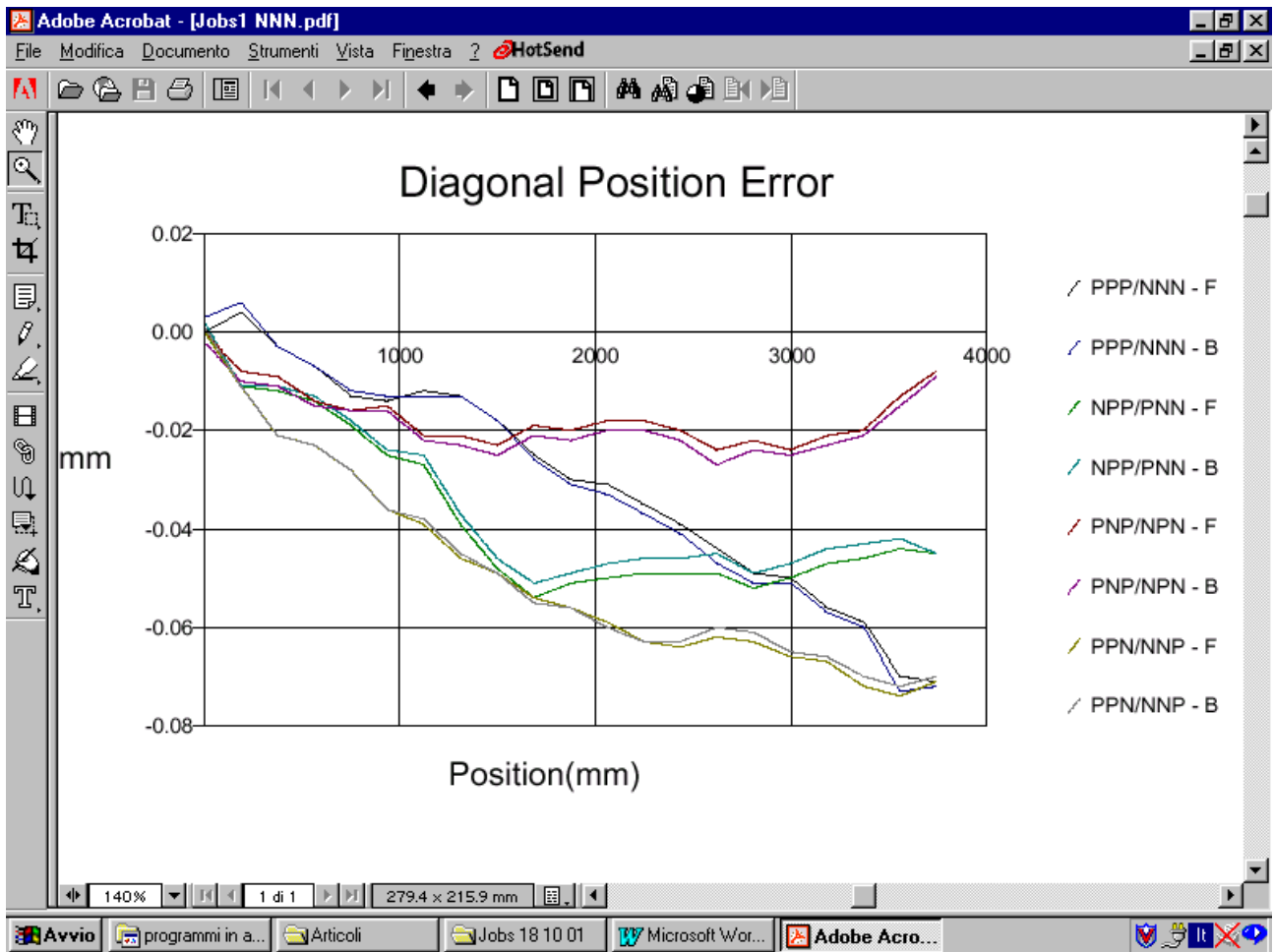


Fig 2 Errore di posizione Volumetrico relativo alle 4 diagonali

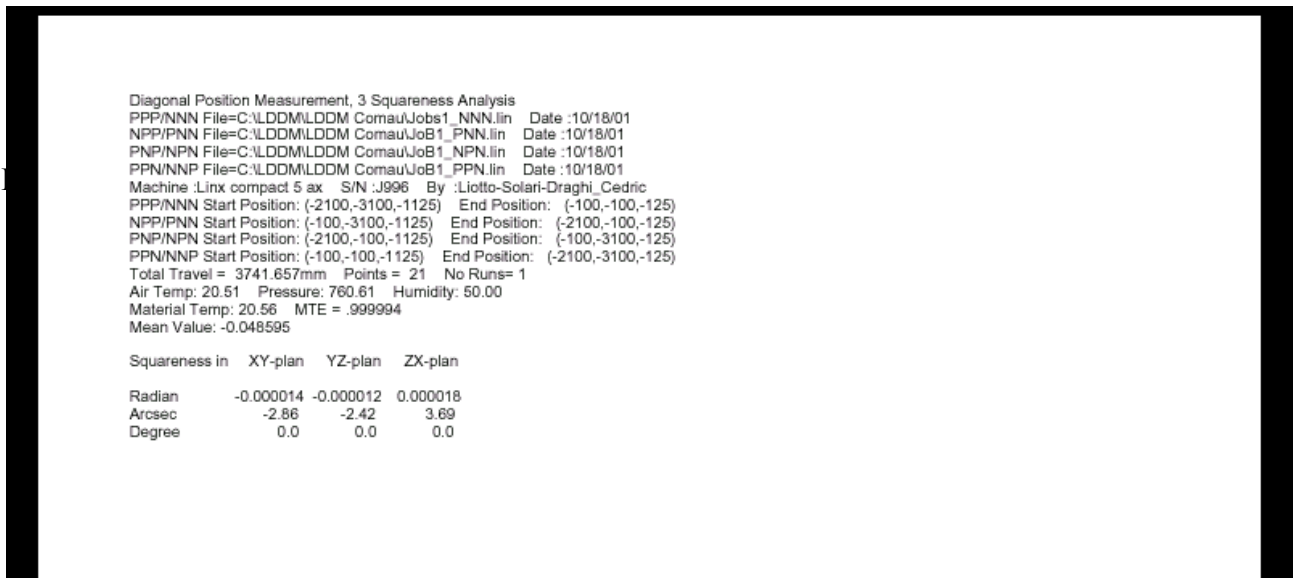


Fig. 3 Errore di squadra

dalla lunghezza delle diagonali viene ricavato con elevata precisione e su tutta la corsa l'errore di squadra

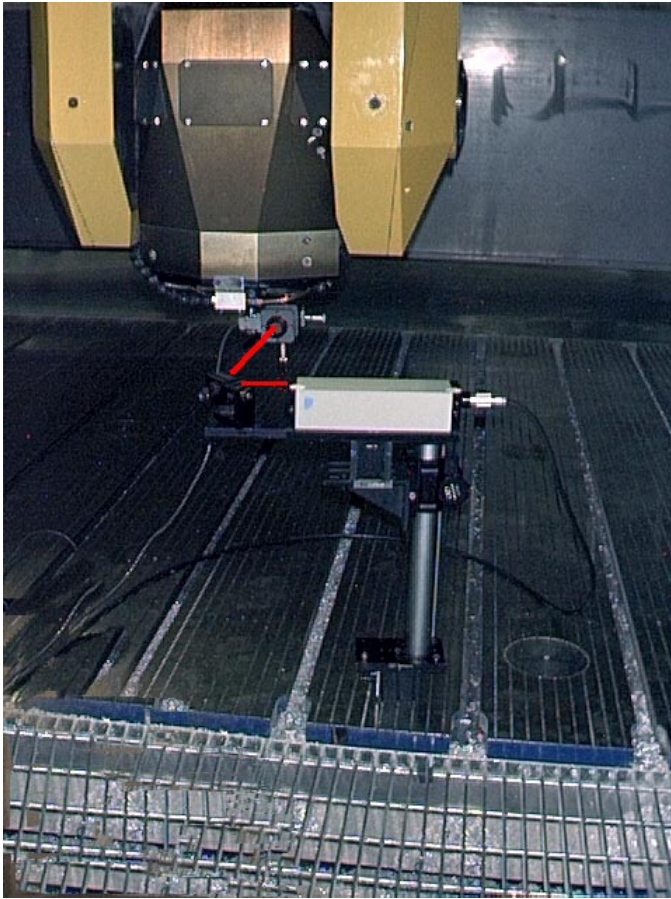
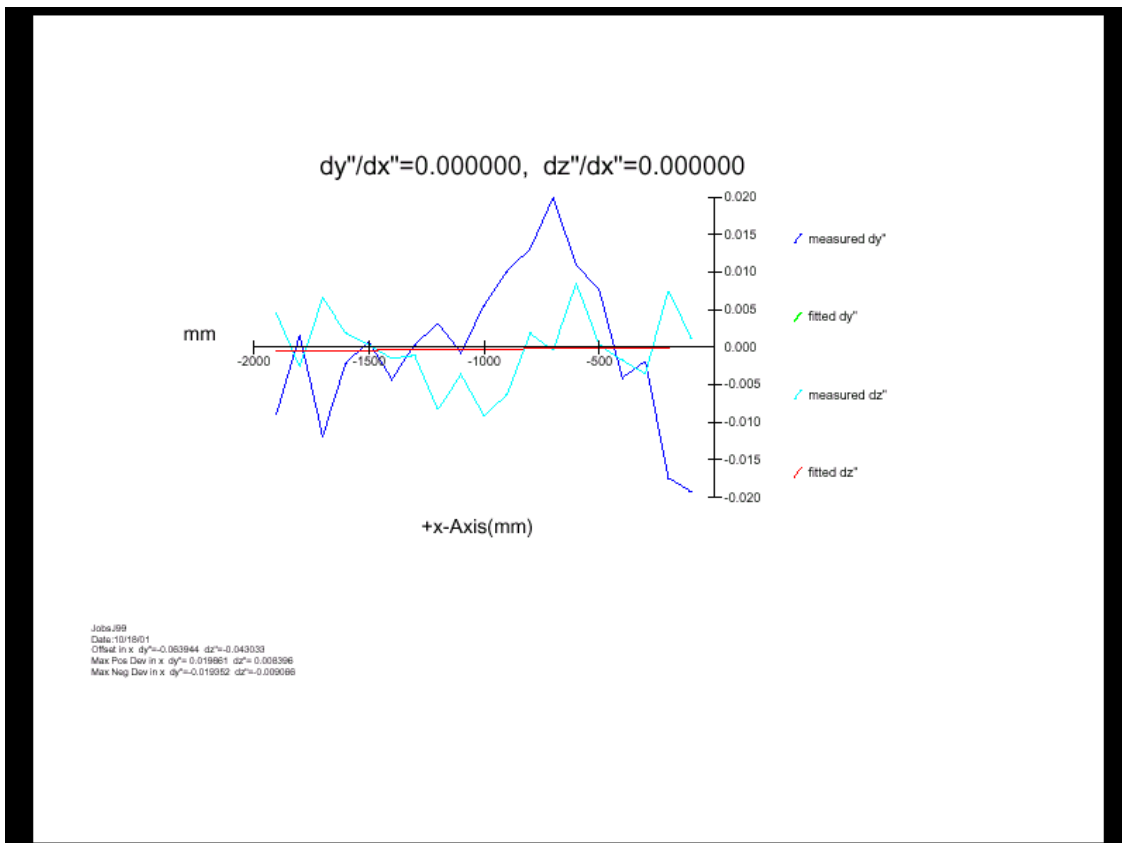


Fig 4 MISURA della
RETTILINEITA'
lungo l'asse X
nelle direzioni perpendicolari
Y e Z contemporaneamente.

Fig 5 sotto
GRAFICO DELLA RETTILINEITA'
Asse X
deviazioni verso Y o rettilineità
orizzontale , blu scuro e
verso Z , rett. Verticale colore azzurro



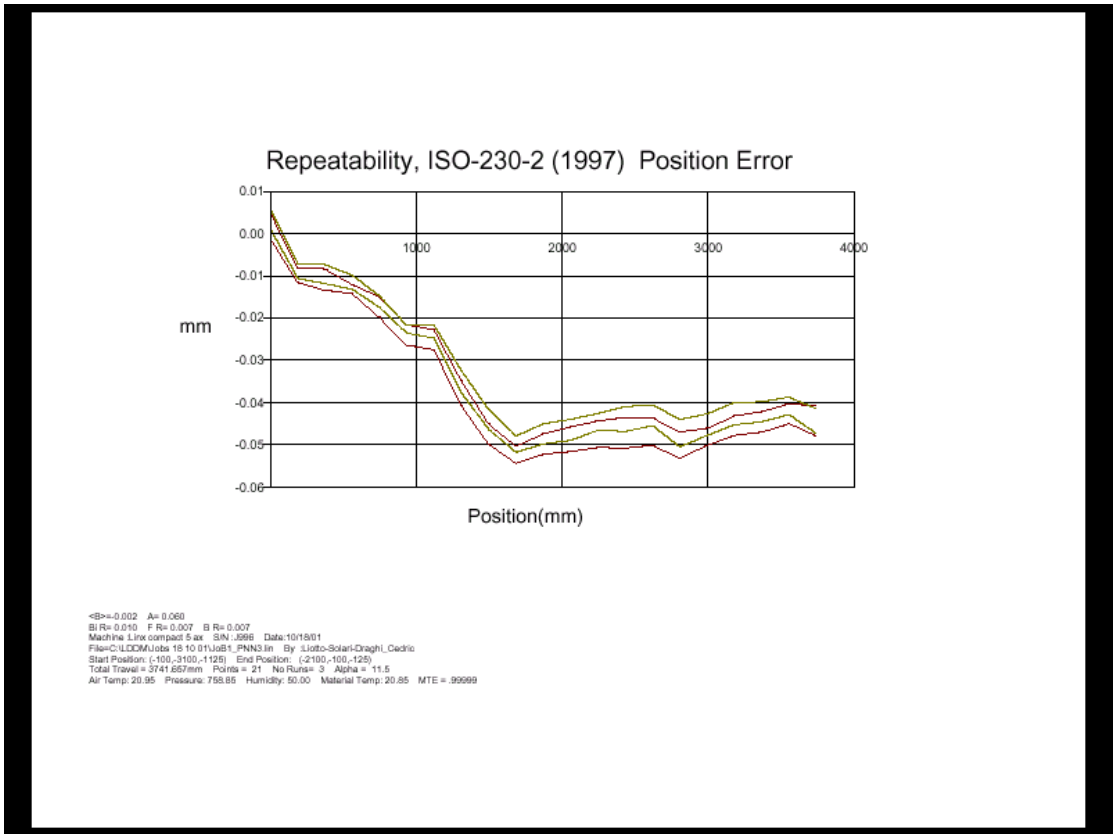
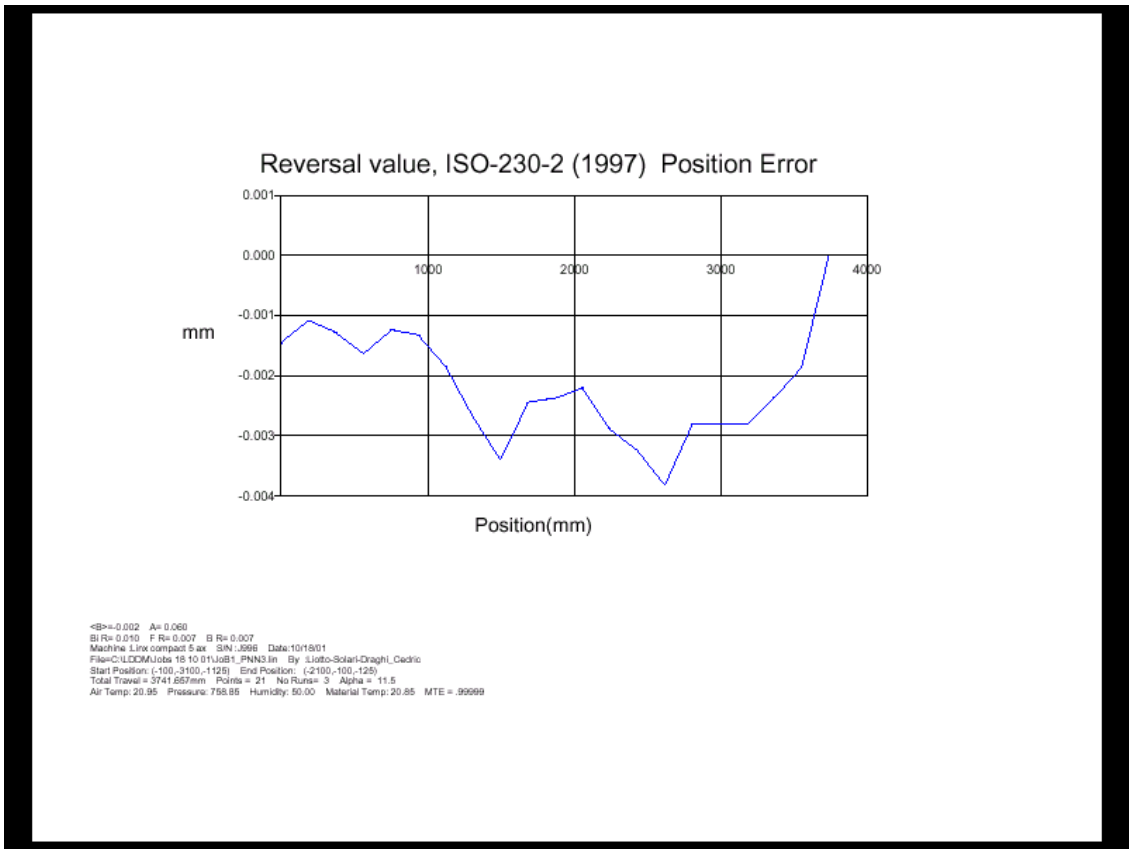


FIG 5 Misura statistica effettuata sulla diagonale PNN effettuata 3 volte in ogni direzione. ed analizzata secondo la ISO230 con deviazione 2 sigma.
 Fig 6 Errore di inversione lungo tutti punti della diagonale



V. Misure e compensazione per mezzo del metodo Vettoriale o per Passi

1. Preparazione alla misura

La macchina è stata misurata lungo le 4 diagonali ottenute per mezzo di passi di avanzamento sequenziale come descritto precedentemente. Il Laser è stato montato sulla tavola e per mezzo dello specchio di allineamento, il raggio è stato diretto lungo la diagonale . Lo specchio piano è stato montato sul mandrino con la faccia perpendicolare allo specchio, come illustrato nella figura . 7

La macchina è stata programmata per muovere il mandrino partendo da uno spigolo per arrivare allo spigolo opposto. Sono state rimosse tutte le compensazioni dal controllo numerico. Il raggio laser è stato allineato parallelo alla direzione di movimento diagonale. La tolleranza tipica di allineamento è minore di 0,25 m Radianti o 1 mm sulla distanza di 4metri.

3. Sistema di misura

L'errore di posizionamento è stato misurato per mezzo di un laser Doppler (LDDM) a singola apertura. Sono state misurate la temperatura e la pressione dell'aria per compensare la variazione della velocità della luce, e la temperatura del materiale per la compensazione della espansione termica del materiale.

4. Collezione ed analisi dei dati di errore volumetrico

I dati sono stati acquisiti automaticamente dal software LDDM ad ogni fermata della macchina.

I dati di errore sono stati analizzati per mezzo del software LDDM. Cliccando su *4-diagonal* nella sezione di analisi e richiamando i 4 file di dati errore sulle diagonali, sono stati calcolati gli errori relativi ad ogni asse, sotto forma di tabelle e grafici fig. 10, 11 e 12 . Sono stati generati anche i grafici riassuntivi dell'errore volumetrico della macchina non compensata che sono riportati nella fig. 8.

5. Generazione delle tabelle di compensazione

Al termine dell'analisi di errore a cui provvede in modo semplice il software Windows LDDM sono state generate automaticamente le 24 tabelle di errore bidirezionale ed il file di compensazione .SAG che è stato caricato nel controllo numerico per mezzo di un floppy disk.

Le 24 tabelle di compensazione di 41 punti l'una per un totale di 984 punti sono relative a :

No 3 tabelle di compensazione lineare per X,YeZ;

No 6 tabelle, (2 per ogni asse) per la rettilineità degli assi ortogonali ad ogni asse;

No 3 tabelle per la compensazione dell'asse gantry;

Tutte le tabelle vengono ripetute per il ritorno

Qui di seguito un esempio di una parte del file di compensazione

```
%_N_NC_CEC_INI
CHANDATA(1)
$AN_CEC[0,0]=0.0000
$AN_CEC[0,1]=+0.0001
$AN_CEC[0,2]=+0.0000
.....
$AN_CEC[0,37]=-0.0019
$AN_CEC[0,38]=-0.0016
$AN_CEC[0,39]=-0.0025
$AN_CEC[0,40]=-0.0037
$AN_CEC_INPUT_AXIS[0]=(AX1)
$AN_CEC_OUTPUT_AXIS[0]=(AX1)
$AN_CEC_STEP[0]=+50.0000
$AN_CEC_MIN[0]=-2100.0000
$AN_CEC_MAX[0]=-100.0000
$AN_CEC_DIRECTION[0]=1
```

```

$AN_CEC_MULT_BY_TABLE[0]=0
$AN_CEC_IS_MODULO[0]=0
$AN_CEC[1,0]=+0.0008
$AN_CEC[1,1]=+0.0006
$AN_CEC[1,2]=+0.0007
$AN_CEC[1,3]=+0.0007
$AN_CEC[1,4]=+0.0029
.....
.....

$AN_CEC[23,33]=-0.0021
$AN_CEC[23,34]=-0.0041
$AN_CEC[23,35]=-0.0053

$AN_CEC[23,36]=-0.0056
$AN_CEC[23,37]=-0.0060
$AN_CEC[23,38]=-0.0061
$AN_CEC[23,39]=-0.0084
$AN_CEC[23,40]=-0.0085
$AN_CEC_INPUT_AXIS[23]=(AX3)
$AN_CEC_OUTPUT_AXIS[23]=(AX10)
$AN_CEC_STEP[23]=+25.0000
$AN_CEC_MIN[23]=-1125.0000
$AN_CEC_MAX[23]=-125.0000
$AN_CEC_DIRECTION[23]=-1
$AN_CEC_MULT_BY_TABLE[23]=0
$AN_CEC_IS_MODULO[23]=0
M17

```

5. Verifica della compensazione

La verifica della validità della compensazione è stata effettuata per mezzo di 4 misure diagonali di tipo tradizionale secondo la norma B5.54, ref. 4 (oppure ISO 230) con le compensazioni del controllo attivate. I risultati, nella stessa scala utilizzata prima della compensazione, sono riportati nel grafico di fig.9

6. Errori di misura nella misura per passi

La precisione del sistema di misura laser è elevata, migliore di 1ppm, le sorgenti di errore tipiche sono: errori di allineamento o errore di coseno, errori dovuti alla misura della temperatura e della pressione. Nella misura diagonale bisogna tenere in considerazione altri errori che sono tipici della misura vettoriale:

Errore di allineamento dello specchio piano: dipende dall'angolo di disallineamento dello specchio e dalla lunghezza del passo. L'errore può essere abbastanza grande ma è costante e non cumulativo per cui viene rimosso dal software.

Errore dovuto all'errore angolare della macchina: Lo specchio di misura potrebbe non essere nel centro di rotazione della macchina e può generare un errore elevato. Si possono determinare gli angoli di rotazione cambiando le sequenze di misura aumentando leggermente la complessità della misura. I dati di rotazione eventualmente calcolati non possono comunque essere usati per la correzione dalla maggior parte di controlli per macchina utensile.

7. Budget di errore nella misura per passi

Le variabili in gioco sono le seguenti:

Controllo temperatura	0,1°C
Controllo pressione	0,5 mBar
Corsa totale	3,3 m
Percorso morto	100 mm
Angolo di tilt (rotazione)	50 μ Radianti
Angolo di disallineamento	0,5 mRadianti
Coefficiente di espansione	12 μ / m / C°
Abbe offset	50mm
Errore di lunghezza d'onda laser	1 μ m /m

Ne risultano quindi i seguenti errori:

Compensazione temp Aria	$1\text{ppm} \times 4\text{m} \times 0,1\text{ }^\circ\text{C} = 0,4\text{ }\mu\text{m}$
Compensazione pressione Aria	$0,3\text{ ppm} \times 4\text{ m} \times 0,5\text{mBar} = 0,6\text{ }\mu\text{m}$
Espansione materiale	$12\text{ }\mu / \text{m} / \text{C}^\circ \times 4\text{ m} \times 0,1\text{ }^\circ\text{C} = 4,8\text{ }\mu\text{m}$
Percorso morto	$1\text{ppm} \times 100\text{ mm} \times 0,1^\circ\text{c} = 0,01\text{ }\mu\text{m}$
Errore di Abbe	$0,05\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{ Radianti} = 5\text{ }\mu\text{m}$
Errore di coseno	$0,5^2\text{ mRad.} / 2 \times 4\text{ m} = 0,36\mu\text{m}$
Errore lunghezza d'onda	$1\text{ppm} \times 4\text{ m} = 4\text{ }\mu\text{m}$

L'errore totale o l'incertezza di misura il seguente:

$$E = \sqrt{0,4^2 + 0,6^2 + 4,8^2 + 0,01^2 + 5^2 + 0,36^2 + 4^2} = 8,04\text{ }\mu\text{m} \quad \text{o} \quad 2\text{ }\mu\text{m/m}$$

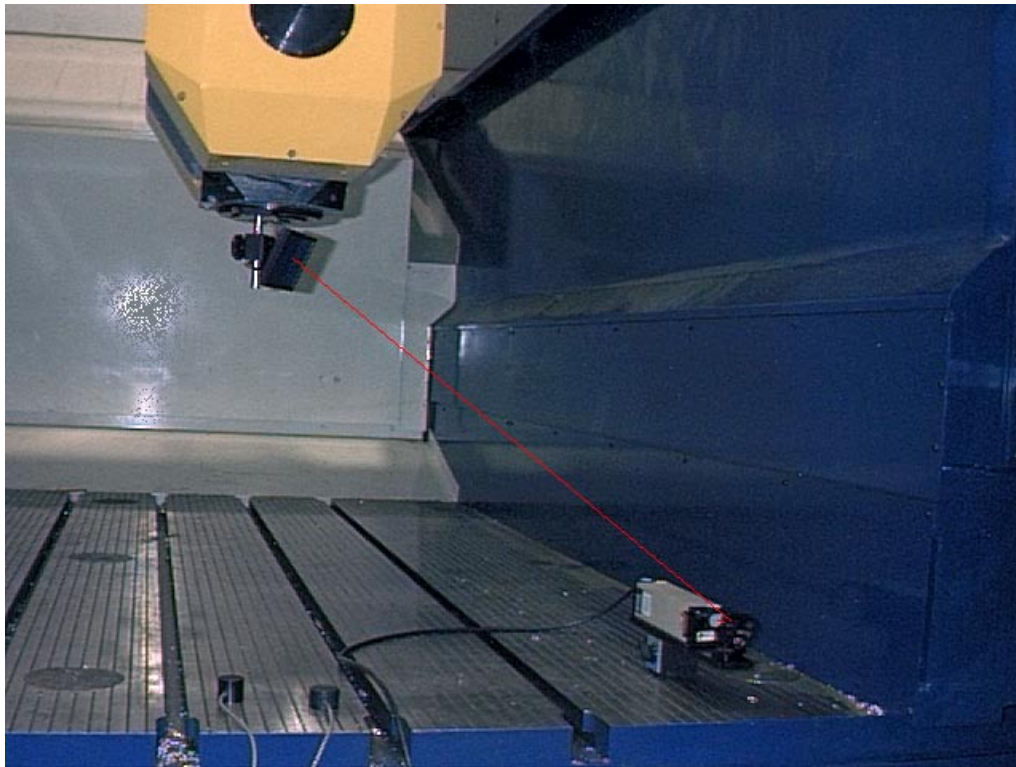


Fig . 7 Misura diagonale per passi con specchio piano sul mandrino e laser sulla tavola.

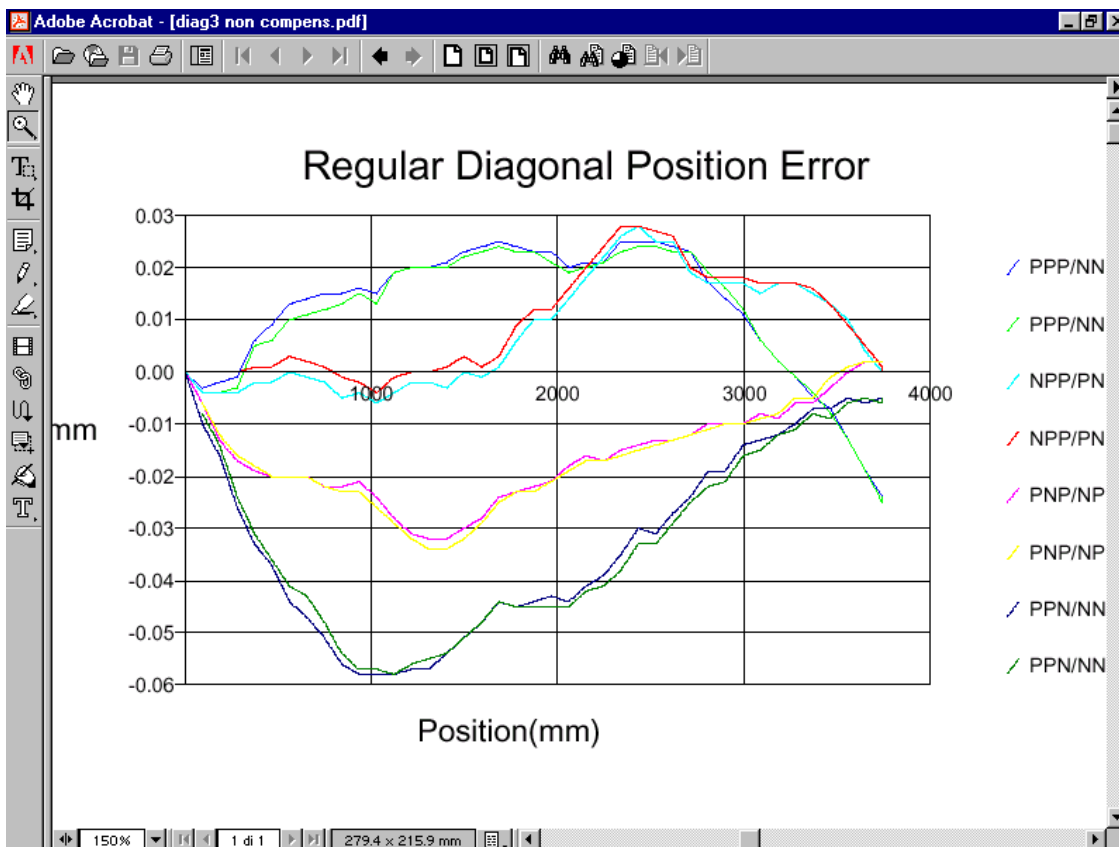
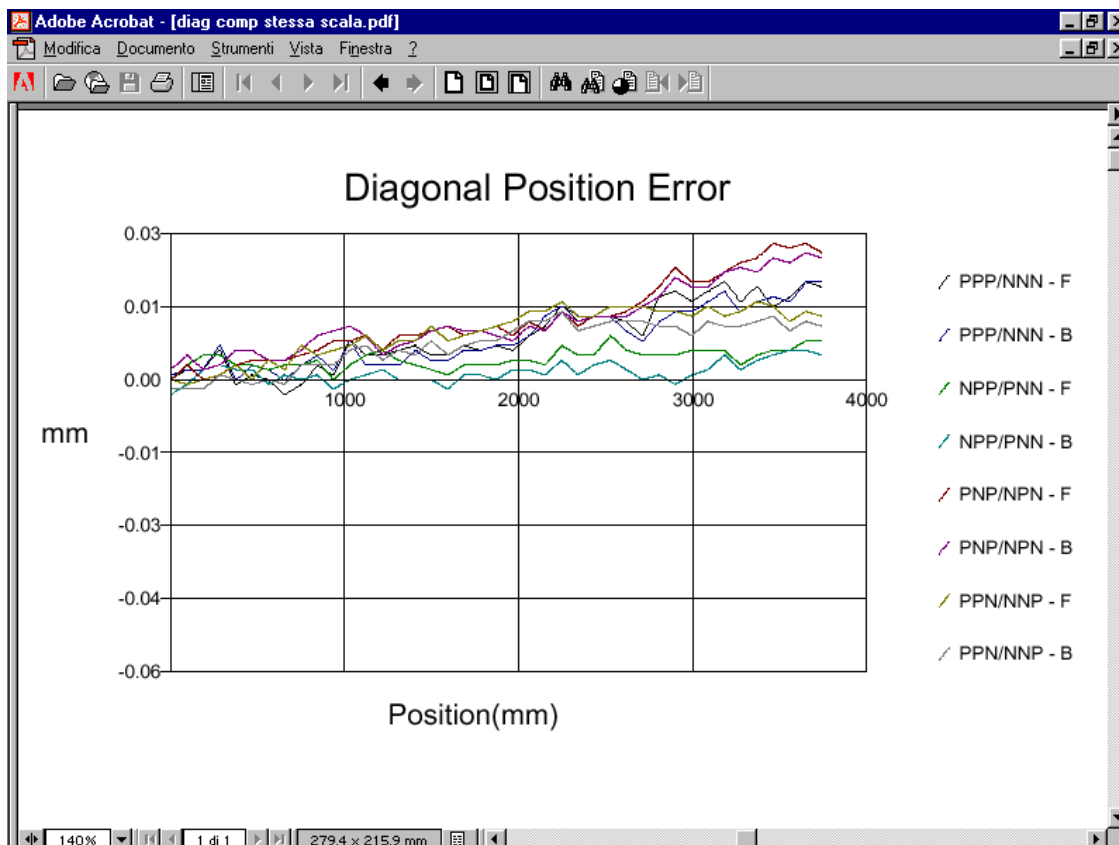


Fig 8 Errore di posizionamento diagonale prima della compensazione . L'errore totale è circa 90 micron.

Fig 9 sotto Errore di posizionamento dopo la compensazione (stessa scala) L'errore totale si è ridotto a 30 micron .



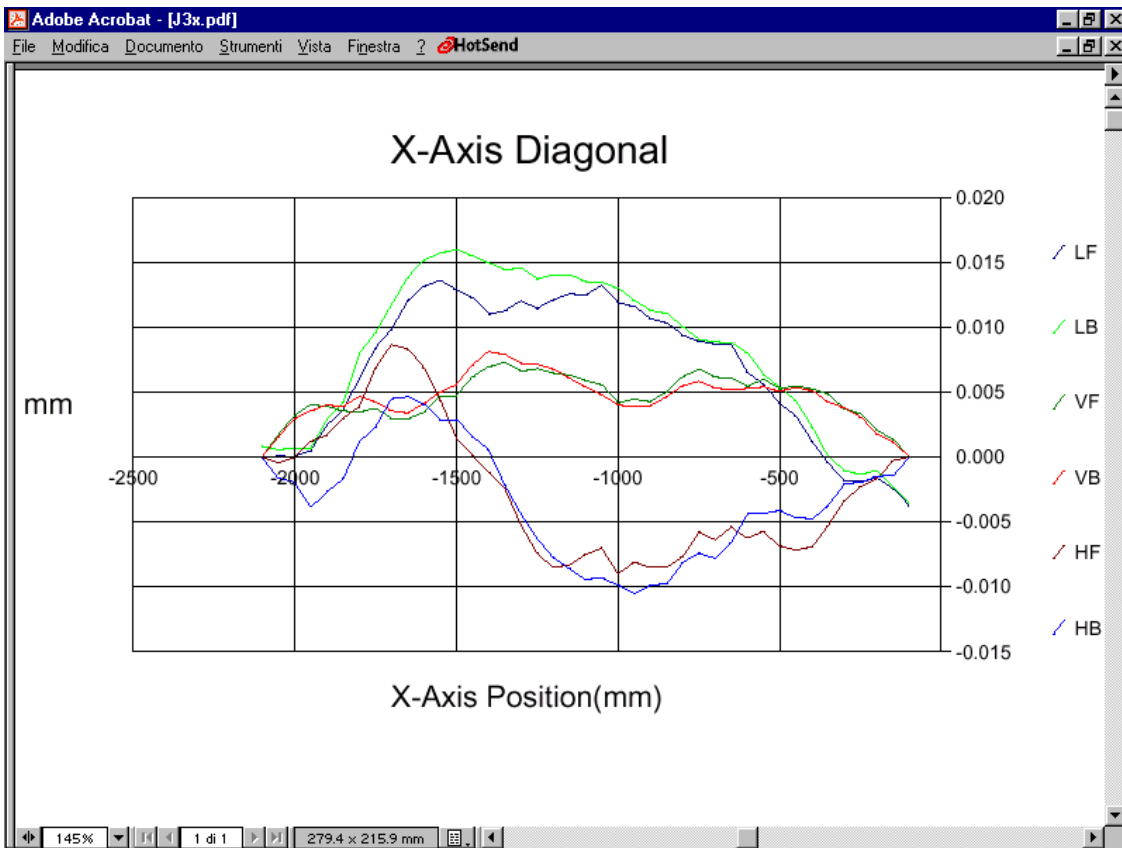
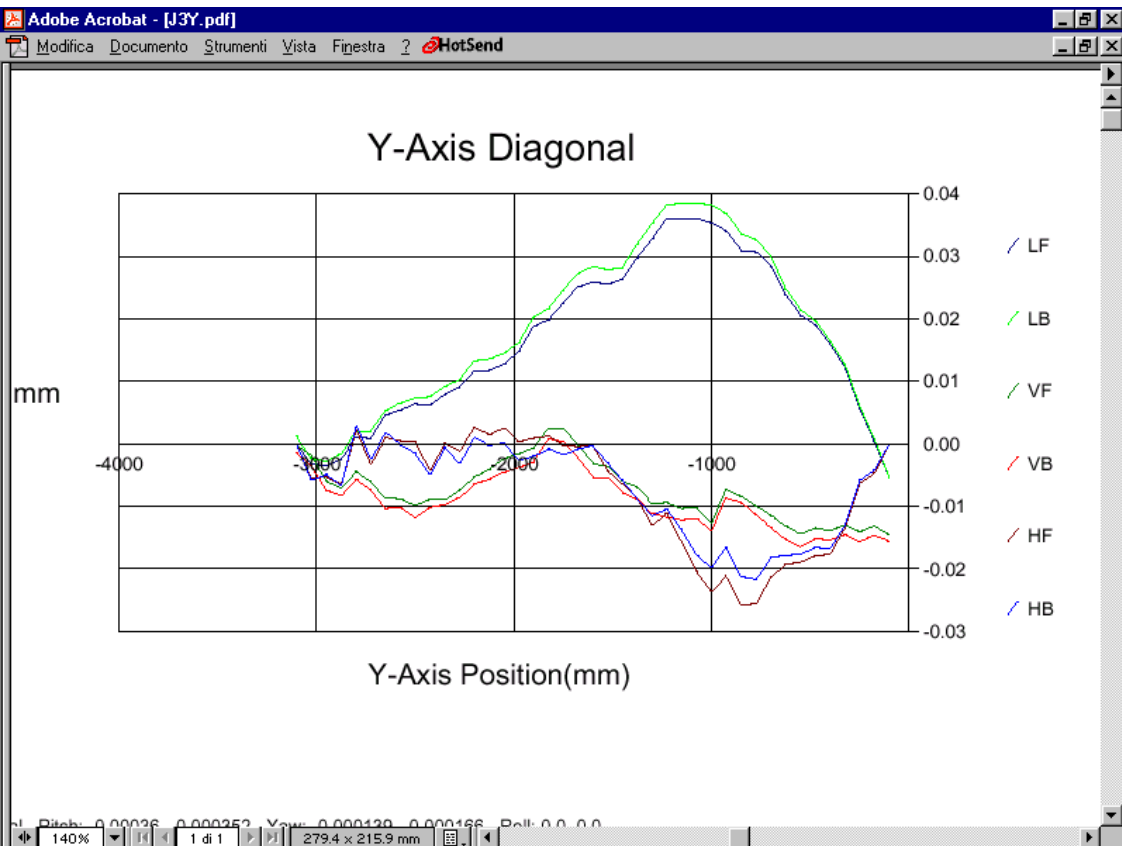


Fig 10 (sopra) errori sull'asse X; le curve superiori sono l'errore di posizionamento lineare, le curve centrali l'errore di rettilineità verso Y e le curve inferiori sono l'errore verso Z
 Fig 11(sotto) errori sull'asse Y, la curva superiore è l'errore di posizionamento lineare, la curve verde e rossa, l'errore di rettilineità verso X e le curve marrone blu l'errore verso Z



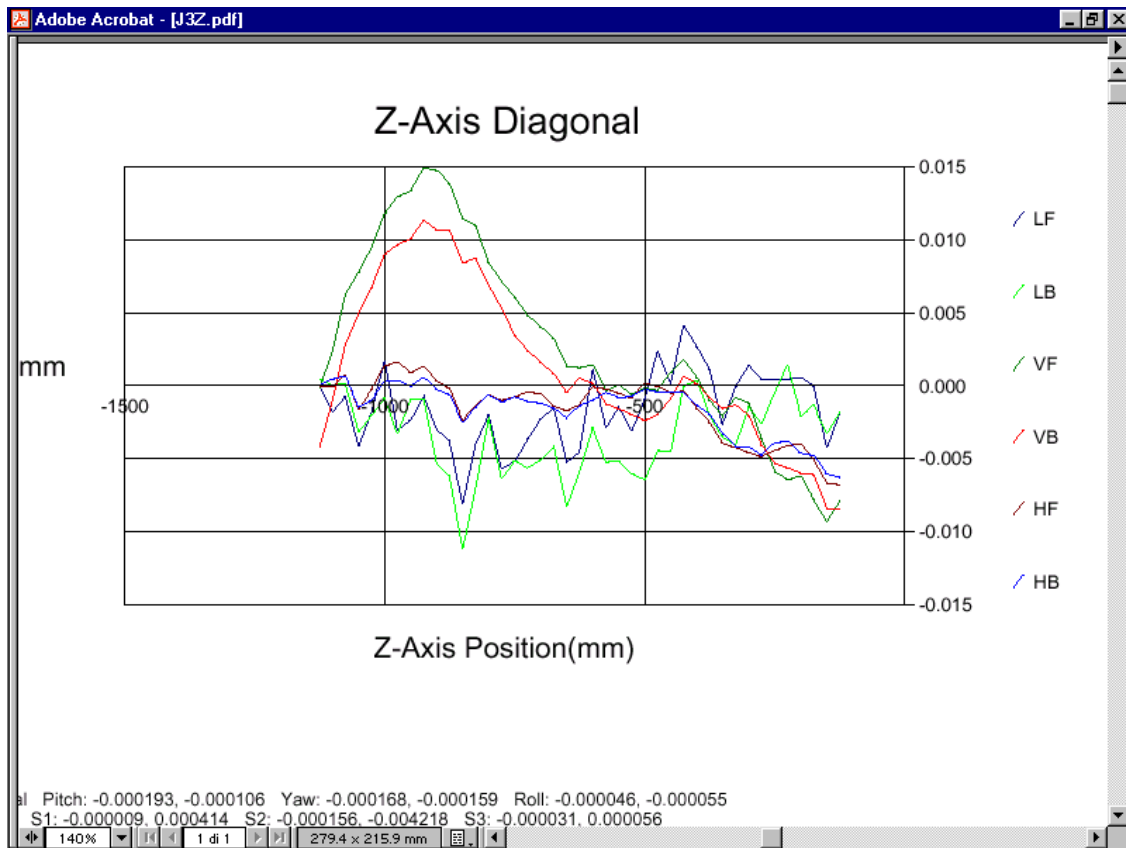
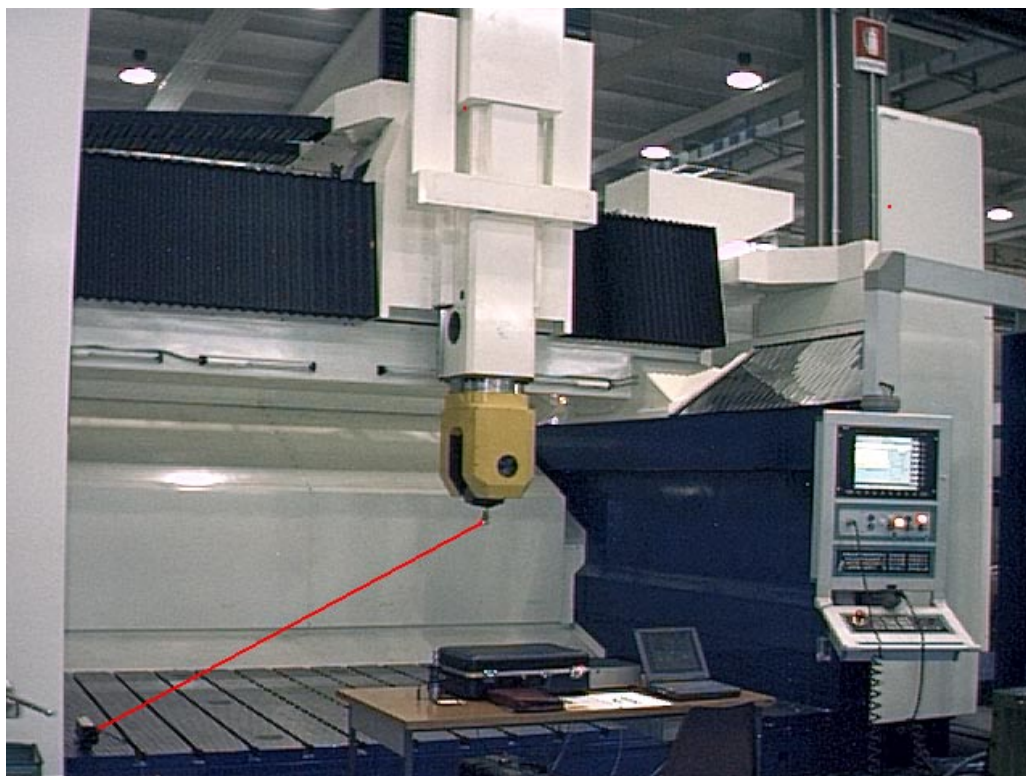


Fig 12 errori relativi all'asse Z LF ed LB sono l'errore lineare, VF e VB sono l'errore di rettilineità in direzione di X e HF ed HB sono l'errore di rettilineità in direzione Y.

Fig 13 Misura di verifica con misura diagonale continua, ovvero tutti gli assi si muovono in maniera coordinata per seguire la diagonale.



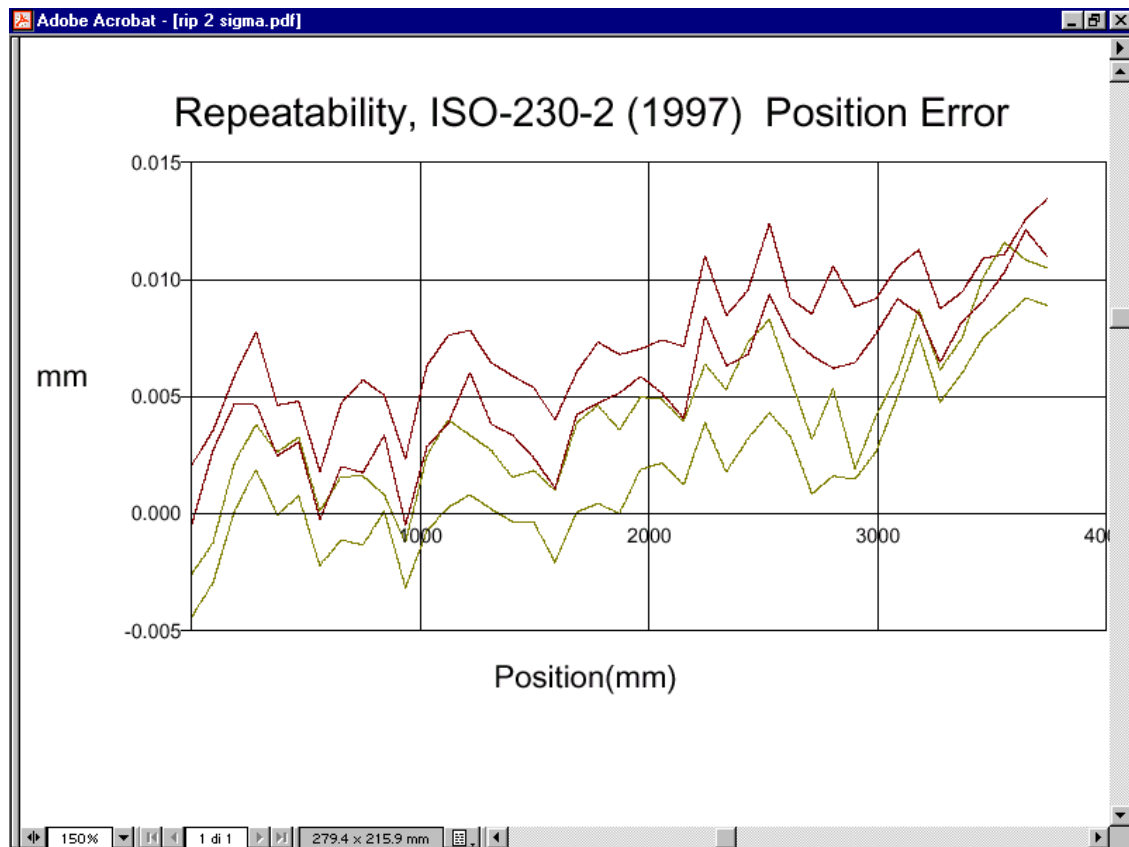


Fig. 14 errore statistico di ripetibilità ottenuto con 3 corse bidirezionali ed elaborazione secondo la ISO-230-2 del 1997 la traccia rossa è la media $+ e - 2$ sigma per la corsa avanti. la traccia gialla $+e- 2$ sigma per la corsa di ritorno

VI. MISURE DINAMICHE AD ECCITAZIONE SINUSOIDALE

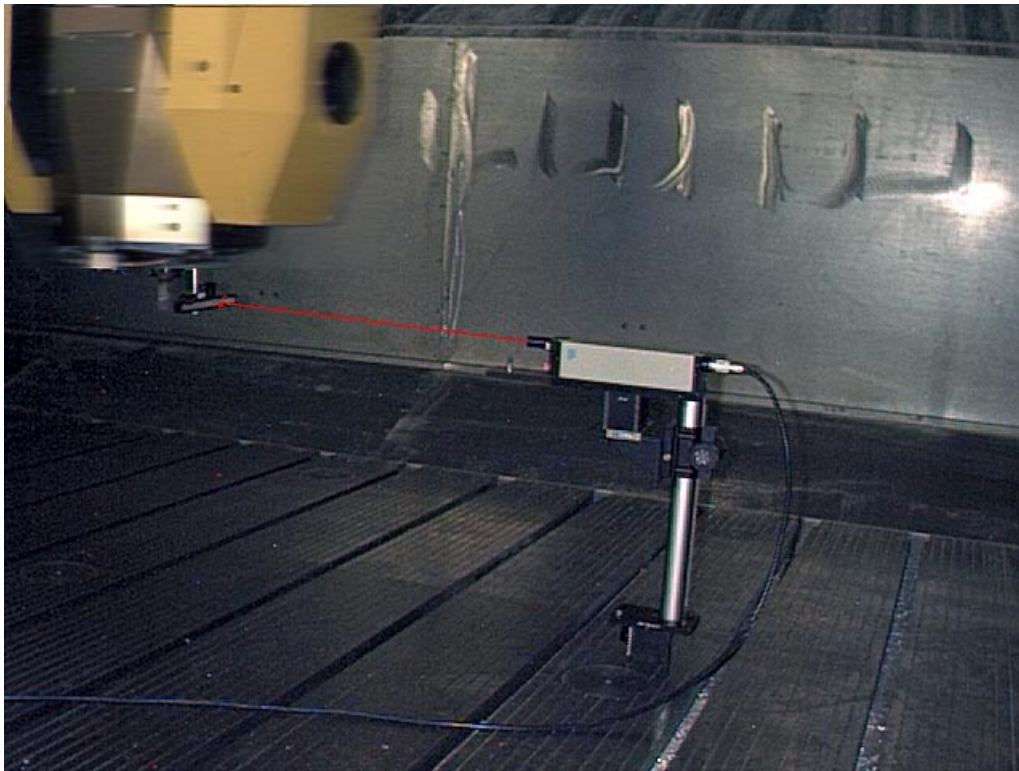
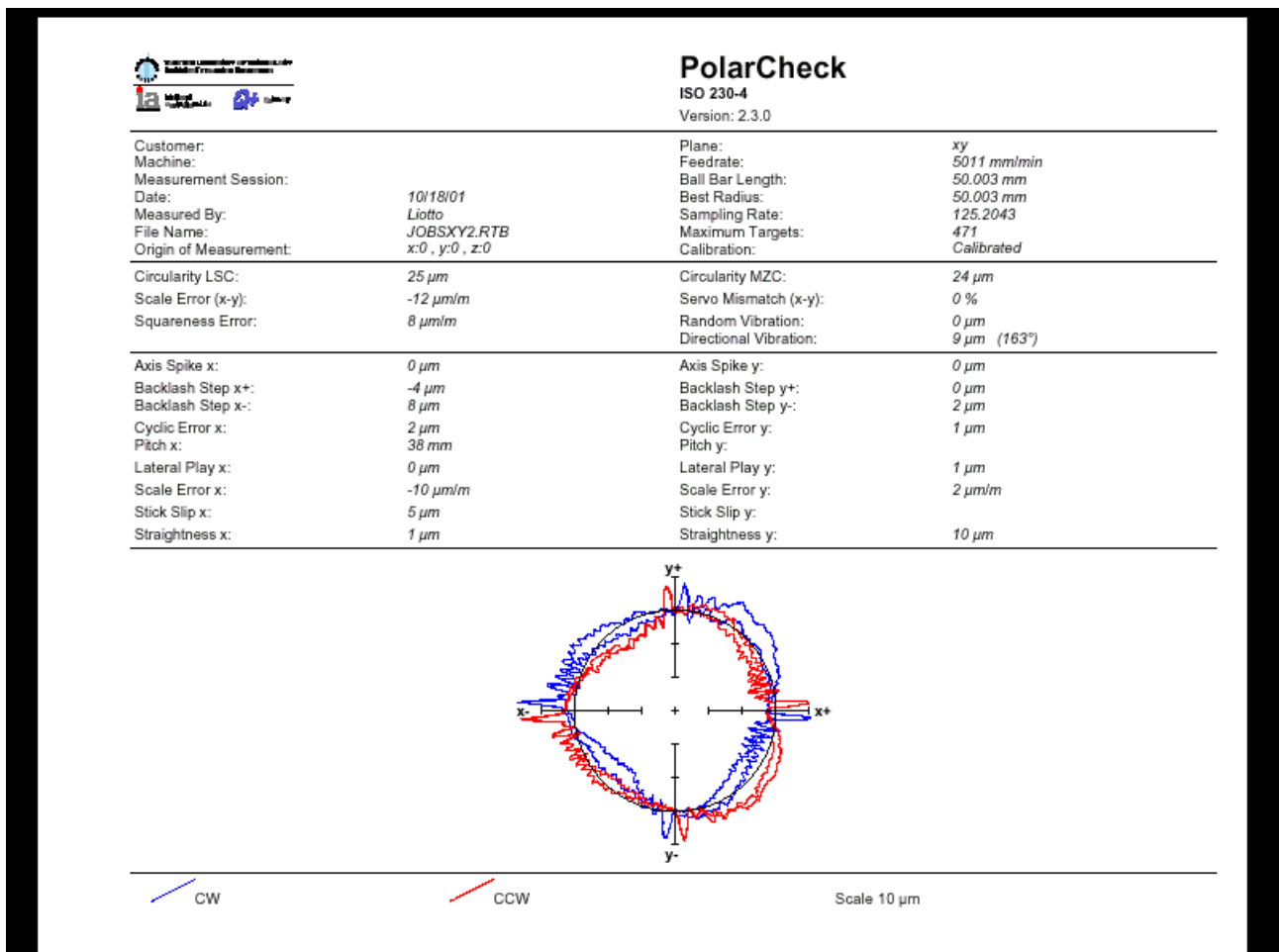


Fig. 15 Misura di interpolazione circolare Laser Ballbar sul piano XY velocità 50000 diam 50mm
 Fig. 16 Tavola riassuntiva dei risultati della prova del cerchio



GRAFICI DI ANALISI ARMONICA RELATIVI AD UNA ECCITAZIONE SINUSOIDALE
(misure effettuate con laser ballbar ed elaborate per errore dinamico)

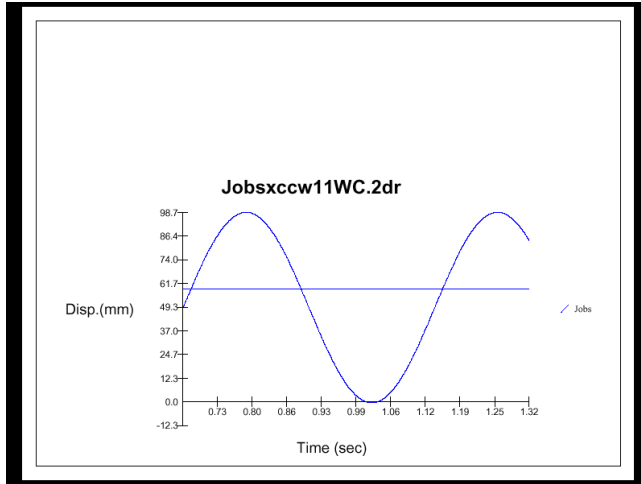


Fig.17 POSIZIONE
non si rilevano
distorsioni visibili

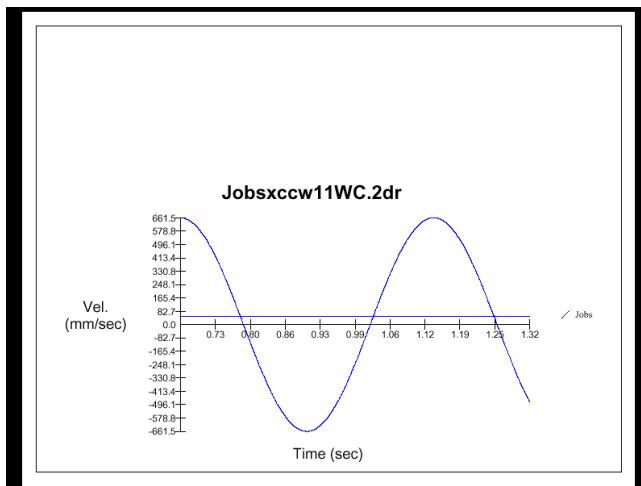


Fig.18 VELOCITA'
non si rilevano
distorsioni visibili

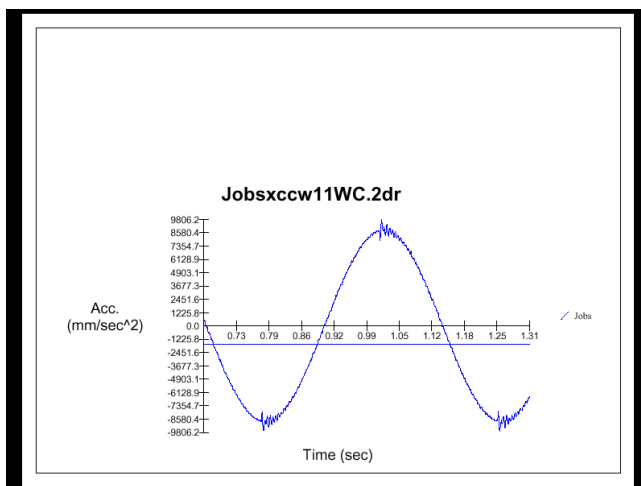


Fig19
ACCELERAZIONE
la forma rimane
sinusoidale, per cui
l'azionamento è tarato in
modo corretto. Si notano
delle piccole oscillazioni
al cambiamento di
direzione dovute a Jerk.

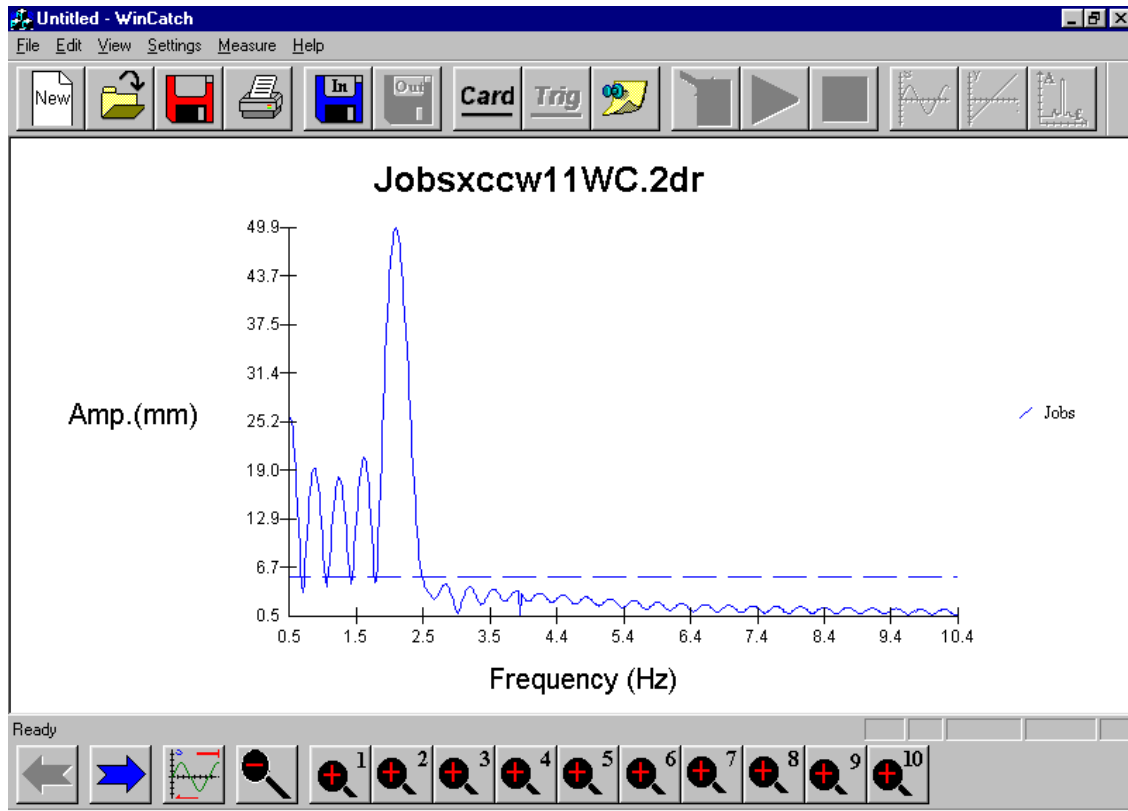


Fig 20 Frequenza dalla misura della laser Ballbar . La presenza di una sola frequenza, quella di rotazione(non si nota la presenza di seconda o della terza armonica) significa distorsione quasi nulla ne distorsioni armoniche del movimento degli assi. Questa raffigurazione nel dominio delle frequenze riassume con buona approssimazione i risultati delle tre figure precedenti.

VII. MISURE DINAMICHE CON SOLLECITAZIONE A GRADINO

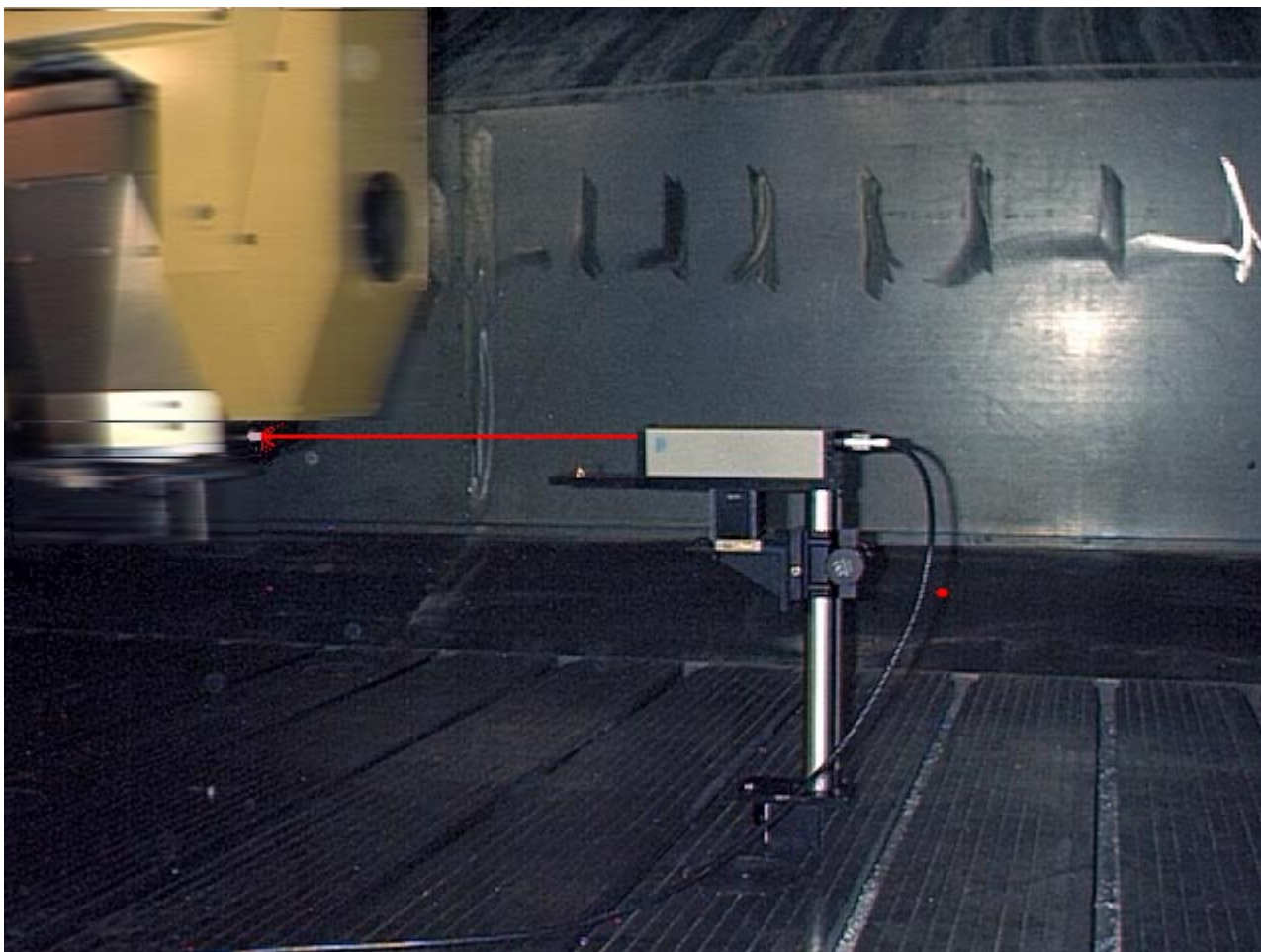


Fig 21 misura di spostamento a gradino con l'uso di una specchio di 3mm di diametro per annullare le vibrazione di eventuali supporti. Spostamento 1m lungo Y feed 50m/min

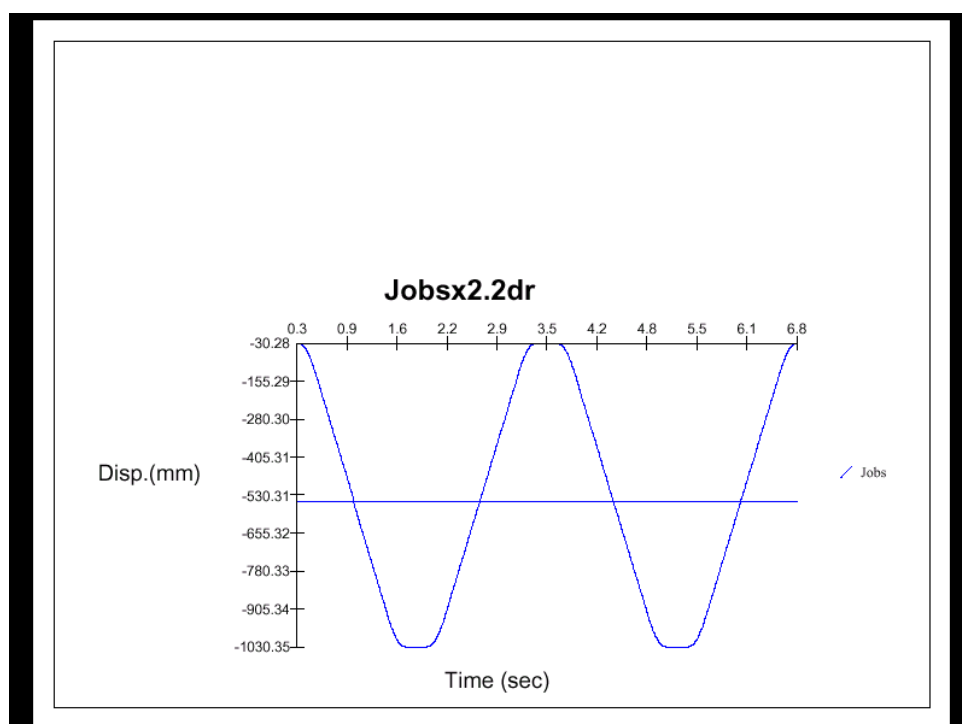


Fig.22
Grafico di
posizione
acquisito
dinamicam
ente con
1000
campioni al
secondo

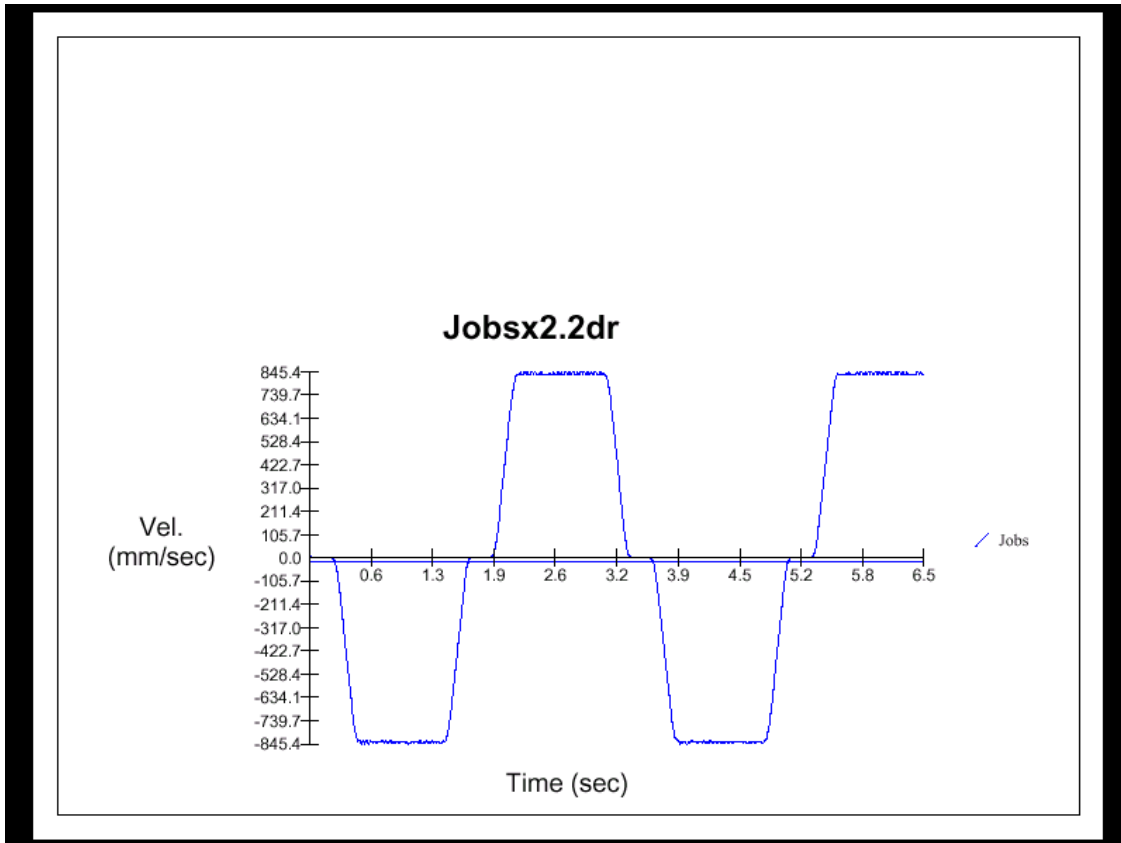
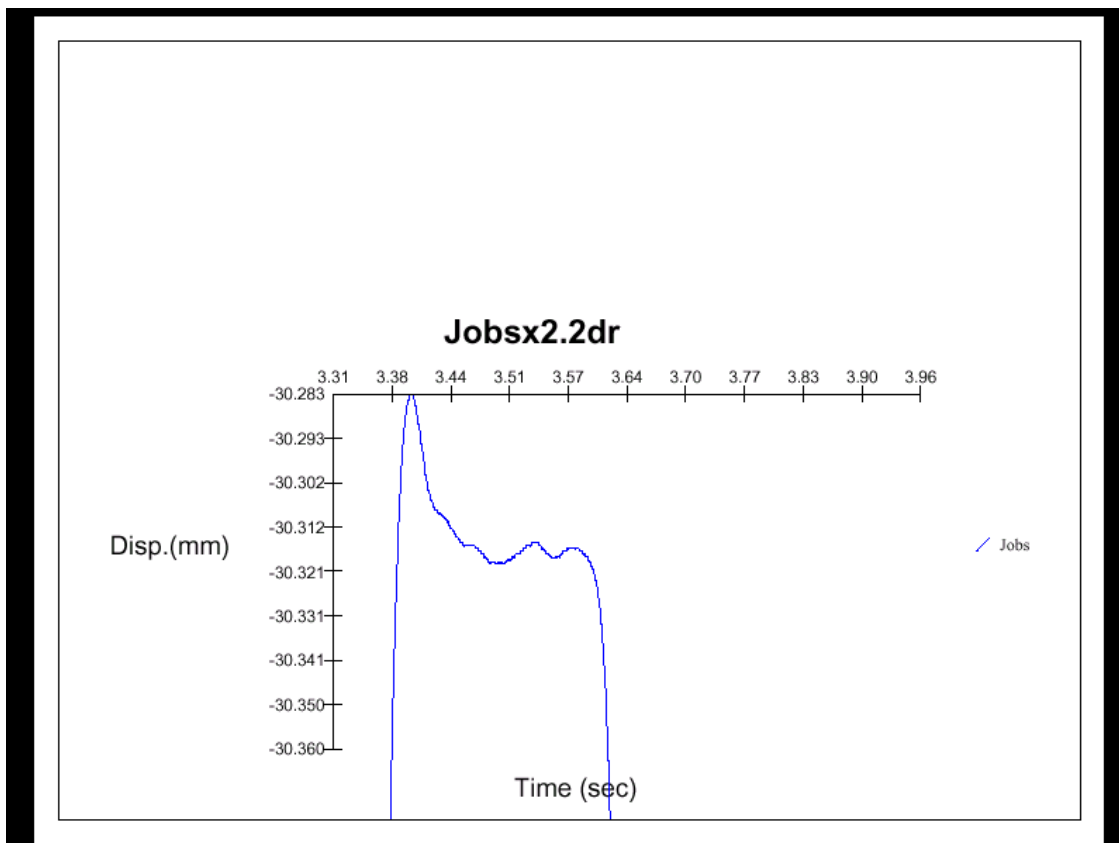


Fig 23 grafico di velocità

Fig 24 grafico di posizionamento con sollecitazione a gradino con sovraelongazione e fermata



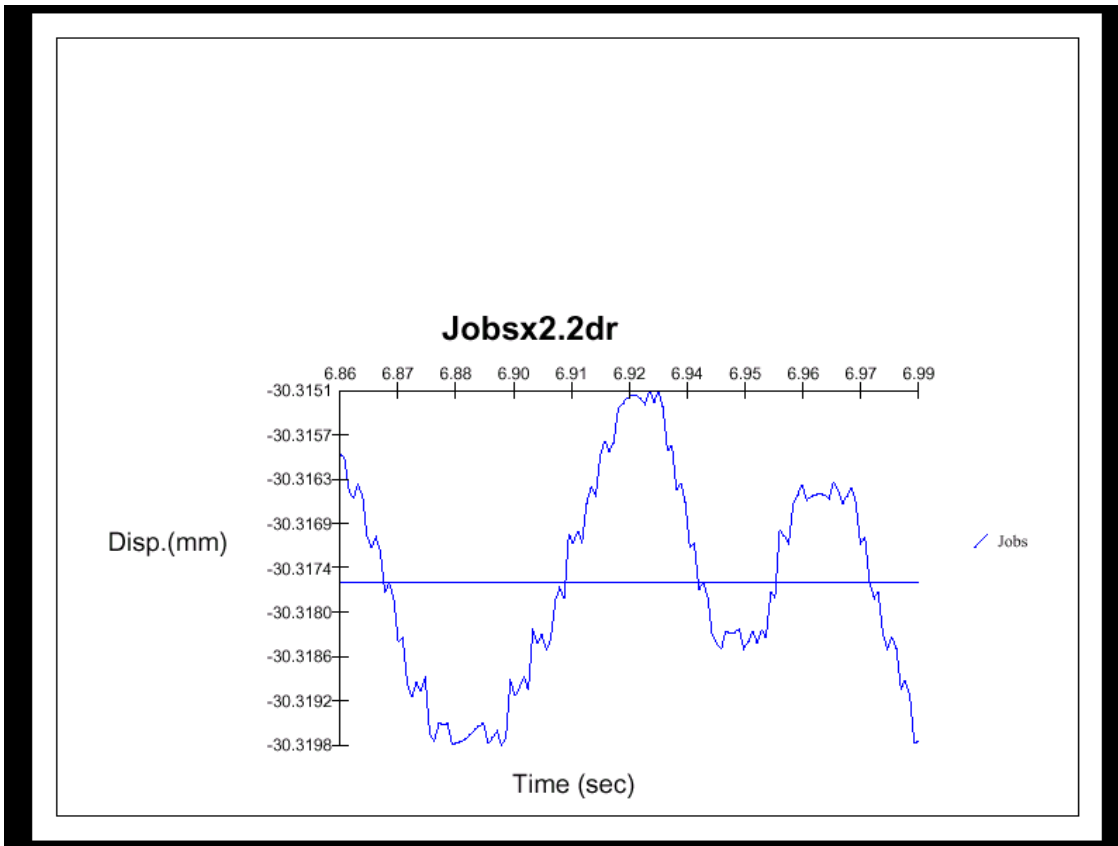
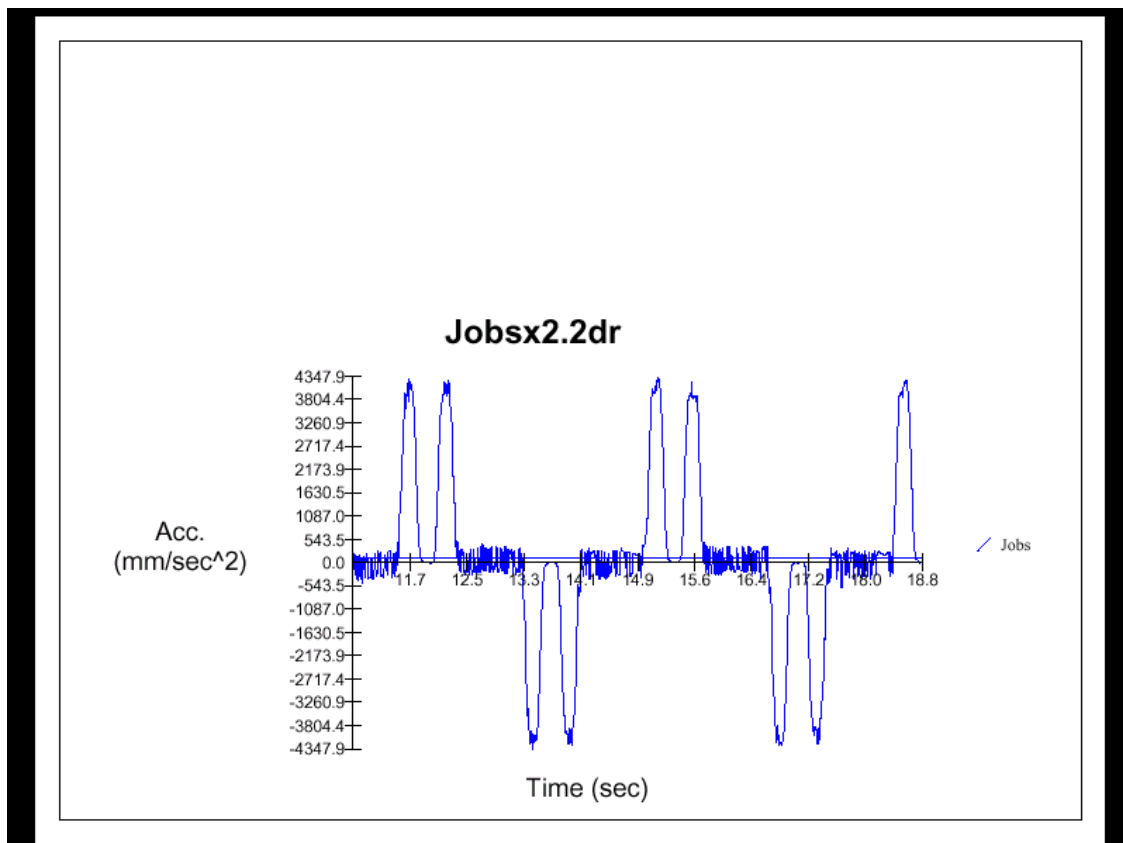


Fig 25 Grafico di posizione durante la fermata zoom X1000

Fig 26 accelerazione durante la fase di spostamento a gradino . Si può notare che i due picchi successivi , rispettivamente di frenata e accelerazione si superano 0,4 g.



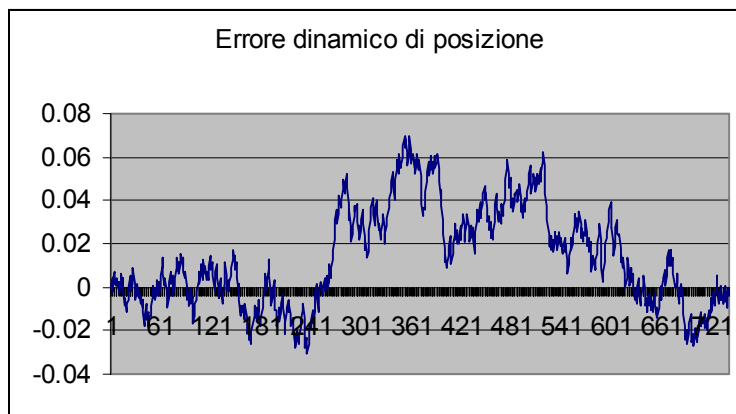


Fig. 27 errore di inseguimento per movimento a velocità uniforme. Scala in mm e milli secondi

VIII. Risultati e conclusioni

Le misure effettuate sulla prima macchina hanno evidenziato un errore volumetrico di 80 micron dovuti principalmente ad errori di squadra, di 12,14 e 18 $\mu\text{m}/\text{m}$ rispettivamente per XY, XZ ed YZ e di rettilineità ad esempio lungo X è stata misurata una rettilineità verticale (dz) di 20 micron ed una rettilineità orizzontale (dy) di 40 micron.

I dati raccolti confermano che con il metodo Vettoriale è stato possibile migliorare notevolmente la precisione volumetrica di una macchina di dimensioni relativamente grandi, con un volume di lavoro di 6 m cubi e certificarne le prestazioni. Il tutto viene svolto in sole 4/8 ore contro le 24/30 ore impiegate con i metodi tradizionali. e senza errori dovuti all'introduzione manuale dei dati nelle tabelle di compensazione.

IX. Riferimenti e bibliografia

- 1-An American National Standard ASME B5.54-1992 (1992)
- 2-Charles P. Wang A Laser Vector measurement Technique ..., Part 1: Basic Theory Rev.Scientific Instrument-Oct. 2000 – (2000)
- 3-G. Liotto and C.P.Wang “ Laser Doppler Displacement Meter (LDDM) allow new diagonal measurement for large aspect ratio machine tool easily and accurately”, Proceedings of LAMDAMAP International Conference of Laser Metrology and Machine Performance, Huddersfield, West Yorkshire England, 15-17 Luglio, 1997