

# **INFLUENZA DEGLI EFFETTI ATMOSFERICI SULLE MISURE DI RETTILINEITÀ E PLANARITÀ E DRASTICA RIDUZIONE DEGLI ERRORI TRAMITE L'USO DI VENTILATORI**

## **Sunto**

Le misure di rettilineità risentono in modo molto marcato dell'influenza dell'aria, che a causa delle variazioni di temperatura, genera degli strati o dei vortici che si comportano da lente per il raggio laser. La deviazione dalla rettilineità è un disturbo che rende a volte difficile operare con i sistemi ottici e laser. Vengono trattate qui Di seguito le cause che provocano il fenomeno di disturbo ed una sua quantificazione e i metodi pratici per limitarne od azzerarne gli effetti. Sono esposti esempi pratici di soluzioni risultate positive su campi operativi di decine di metri.

**BOZZA 15-01-2010**

# INDICE

1. INFLUENZA DEGLI EFFETTI ATMOSFERICI.....	PAG.3
1.1 TURBOLENZA.....	PAG.3
1.2 STRATIFICAZIONE, generalità.....	PAG.3
1.3 LA RIFRAZIONE O STRATIFICAZIONE, analisi dettagliata.....	PAG.4
2. CASO PRATICO DELLA MISURA DI PLANARITA' O RETTILINEITA'.....	PAG.5
3. RIDURRE GLI EFFETTI ATMOSFERICI CON I VENTILATORI.....	PAG.6
3.1 VENTILATORI CONSIGLIATI.....	PAG.6
4. SMORZAMENTO ELETTRONICO.....	PAG.7
5. CONSIDERAZIONI SULLA PRECISIONE.....	PAG.7
6. ESEMPLI SULL'USO DI VENTILATORI.....	PAG.8

# 1. INFLUENZA DEGLI EFFETTI ATMOSFERICI

La prestazione di un sistema laser è affetto da turbolenza nell'atmosfera. La precisione di un sistema, tra il laser e il sensore in condizioni tipiche di officina è di 2.5  $\mu\text{m}$  per una distanza di 3m. Questa precisione può essere abbassata di un fattore di 2 in inverno quando l'aria è fredda e densa, e può crescere di un fattore di 2 in estate quando l'aria è calda, umida e non così densa (altri valori riportati dalla letteratura sono: 60  $\mu\text{m}$  per 6m e 360  $\mu\mathit{m}$  per 20m di percorso).

## 1.1 TURBOLENZA

Una turbolenza è causata da sacche di aria ad una temperatura leggermente più alta o più bassa che quando attraversano il raggio laser agiscono come deboli lenti, causandone una leggera inclinazione. Questo provoca un effetto angolare; più è lontano il sensore, maggiore è l'effetto. E' simile allo "sfarfallio" che può essere visto d'estate sopra una calda strada asfaltata.

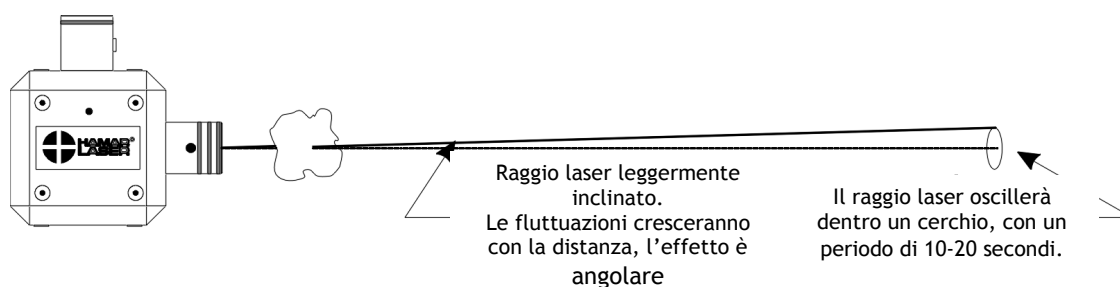


Fig. 1 *Turbolenza*

Le variazioni dinamiche della densità dell'aria lungo il percorso ottico tra il trasmettitore e il ricevitore generano variazioni nella direzione e nella velocità di propagazione del raggio laser e producono letture instabili ed erratiche. Si ritiene che, in un determinato ambiente, l'ampiezza della fluttuazione aumenti approssimativamente con  $D^{3/2}$  per una distanza di misura  $D$ .

Non è possibile stimare a priori l'ampiezza del disturbo sulla lettura provocato dalla turbolenza: essa deve essere misurata in loco.

## 1.2 STRATIFICAZIONE , generalità

Un altro effetto è causato dal gradiente di temperatura verticale, o rifrazione. In un ambiente chiuso la temperatura dell'aria è più calda più vicino al soffitto rispetto al livello del pavimento. Questa condizione può spostare il raggio laser verso il basso anche di 0.2mm in 12 m ad una temperatura dell'ambiente di 10°C . Lo stesso fenomeno accade con attrezzature ottiche o teodoliti. L'effetto si presenta solamente quando l'aria in un laboratorio è davvero immobile e può essere riconosciuto da un improvviso spostamento nella lettura verticale del sensore quando, per esempio, viene aperta una porta o viene creata una leggera brezza. Solitamente quando sono presenti errori del gradiente verticale, la turbolenza è molto leggera.

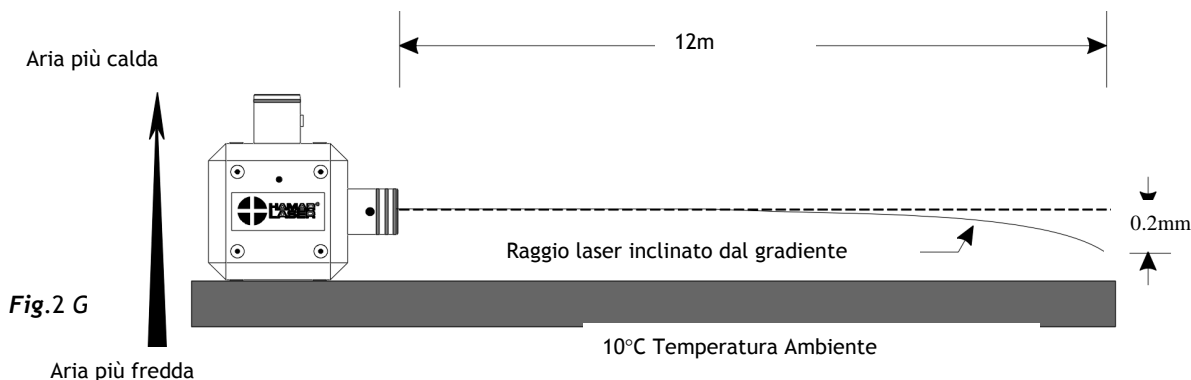


Fig.2 G

**Nota:** La turbolenza ha un'oscillazione con una durata di 10 o 20 secondi ritornando al valore precedente, e quando è presente si effettua un'accurata lettura facendo la media tra il limite alto e quello basso delle fluttuazioni.

### 1.3 LA RIFRAZIONE o STRATIFICAZIONE, analisi dettagliata

Per misurazioni realizzate in ambiente di officina, l'approssimazione per la quale si considera che i raggi luminosi si propagano in linea retta, a velocità costante, non è valida.

In ambiente reale, un raggio di luce (ed anche il raggio laser) percorrerà lo spazio tra A e B seguendo una traiettoria curva, mostrata schematicamente in Figura 4, ad una velocità  $c' < c$ . Se non si apportassero correzioni, la posizione apparente di B sarebbe in B', con un errore di misura e.

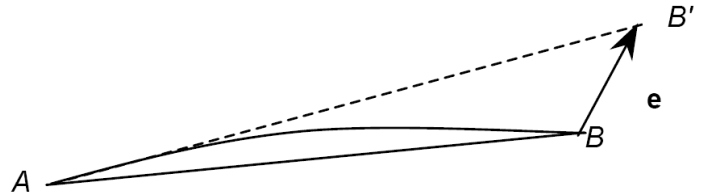


Figura 3 – Errore di rifrazione e

Se l'indice di rifrazione dell'aria ambiente  $n(r,t)$  fosse noto in funzione della posizione e del tempo, il percorso ottico del raggio potrebbe essere calcolato e l'errore e potrebbe essere corretto. In pratica, la conoscenza dell'indice di rifrazione su volumi di lavoro importanti è normalmente molto limitata e questo pone un limite alla riduzione dell'incertezza di misura in applicazioni metrologiche.

Per esempio, per un raggio che propaghi nella direzione X, l'effetto principale è, in prima approssimazione, una rifrazione proporzionale ai gradienti  $\partial n / \partial y$  e  $\partial n / \partial z$  ortogonali alla direzione di propagazione.

Considerando questi gradienti ragionevolmente costanti lungo la traiettoria del raggio, lo scostamento del raggio dalla linea retta è parabolico e l'errore di rifrazione accumula quadraticamente.



Il termine dominante è dovuto al gradiente di temperatura  $\Delta = dT/dz$ . Per un gradiente di  $1\text{ }^\circ\text{C/m}$ , l'errore di rifrazione sarà prossimo a 4,6 mm per una distanza di 100 m. Nel caso generale occorre tener conto anche dei gradienti orizzontali.

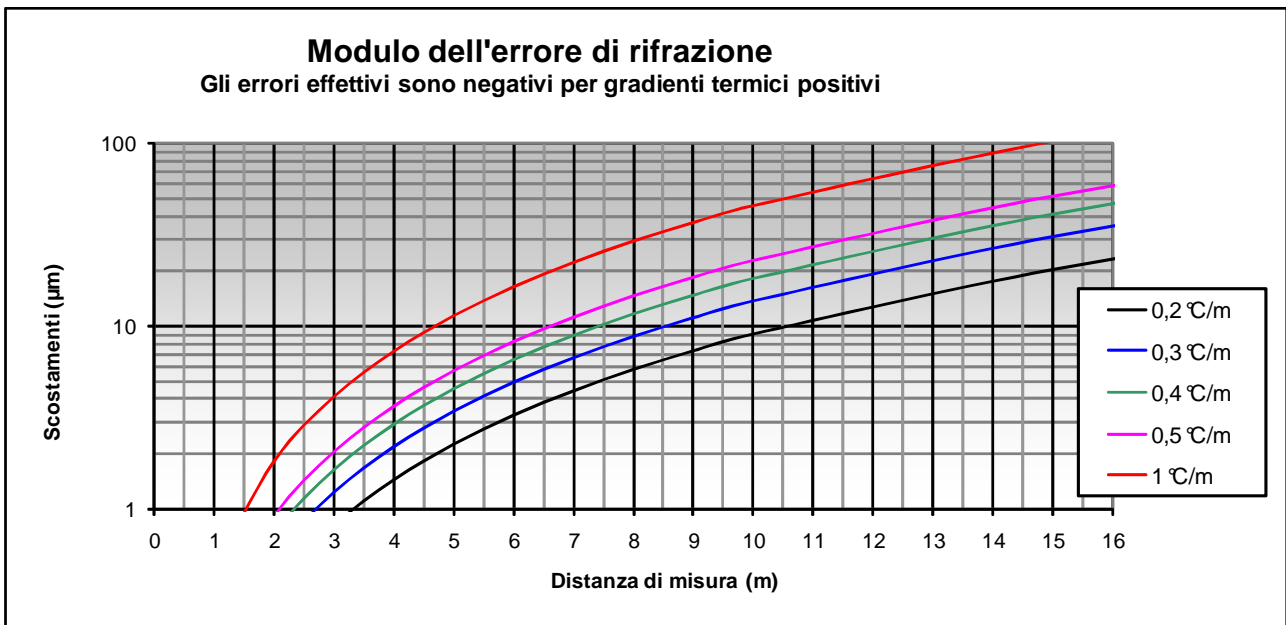


Figura 5 – Rappresentazione grafica dell'errore di rifrazione per differenti gradienti termici



Nel caso specifico, tenendo conto del riscaldamento per irraggiamento, il gradiente termico stimato è di  $0,2\text{ }^\circ\text{C/m}$ . La formula da utilizzare per il calcolo dell'errore di rifrazione è la seguente:

$$e = 4600 \cdot (D/100)^2 \cdot \Delta \quad (3)$$

dove  $D$  è la distanza di misura in metri e  $\Delta$  è il gradiente termico in  $^\circ\text{C/m}$

## 2 CASO PRATICO DELLA MISURA DI PLANARITA' O RETTILINEITA'

Gli errori di curvatura del raggio laser che attraversa un ambiente con aria stratificata si applicano completamente solo alle misure di pendenza rispetto all'orizzonte (piano a gravità costante). Il raggio laser è alla partenza parallelo al piano di gravità costante ma al termine della traiettoria subisce una deviazione, che è la deviazione rispetto al piano di gravità costante, altrimenti detto errore di puntamento.

Nel caso di misurazione di errore di rettilineità o planarità l'unica componente che disturba la misura è la curvatura del raggio non la sua pendenza, che viene cancellata dall'allineamento e/o dal calcolo del piano medio. In altre parole la quantità che disturba è solo la freccia dell'arco parabolico .

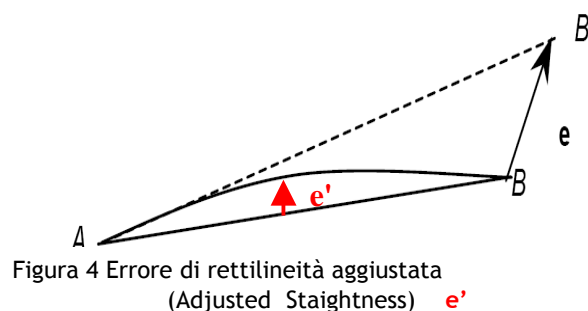


Figura 4 Errore di rettilineità aggiustata (Adjusted Straightness)  $e'$

La formula approssimata di calcolo dell'errore è la seguente:

$$e' = 4600 \cdot \left[ \left( \frac{D}{2/100} \right)^2 - \frac{1}{2} \left( \frac{D}{100} \right)^2 \right] \mu \quad [3a]$$

per cui applicando la formula ai valori del grafico di Fig 5 abbiamo i seguenti risultati:

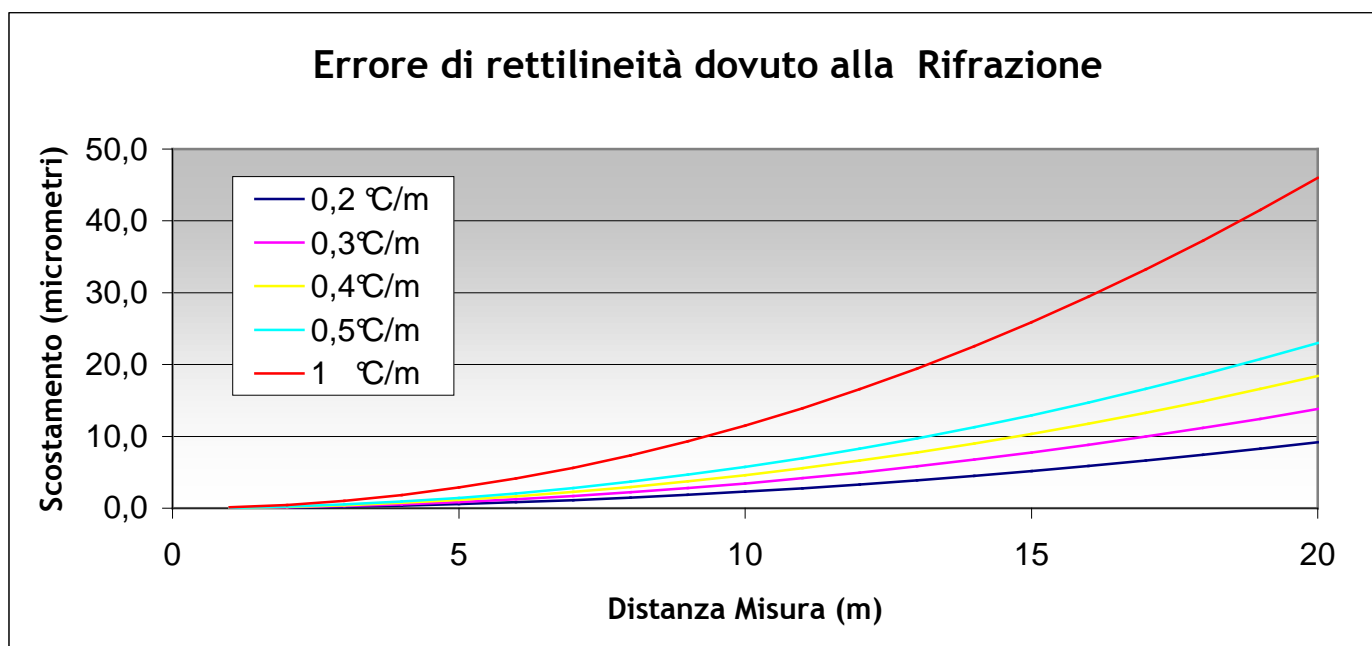


Figura 5 – Rappresentazione grafica dell'errore di rettilineità dovuto alla rifrazione per differenti gradienti termici

La letteratura specializzata Sconsiglia l'uso di ventilatori ad alta velocità e alto volume di spostamento disposti trasversalmente rispetto al percorso ottico. Il movimento trasversale dell'aria non provoca, in principio, alterazioni nella direzione del raggio ma, spostando masse d'aria che possono avere temperature diverse – dovute a eventuali gradienti termici spaziali – si possono provocare alterazioni locali della direzione di propagazione del raggio. Tali alterazioni possono, a loro volta, essere influenzate dalle variazioni di flusso provocate dall'interazione tra i componenti della macchina in movimento ed i ventilatori stessi.

Le misurazioni devono essere ripetute e, per ogni singolo punto di misura, deve essere calcolata la media delle letture ottenute. Per la stima dell'incertezza di misura, il disturbo dovuto alla turbolenza verrà incluso nella componente associata alla ripetibilità di misura.

### 3. RIDURRE GLI EFFETTI ATMOSFERICI CON I VENTILATORI

Come già detto, non è possibile stimare a priori l'ampiezza del disturbo sulla lettura provocato dalla turbolenza: essa deve essere misurata in loco e devono essere poste in atto azioni che tendano a minimizzarla tra e quali si annoverano:

- riduzione della velocità di scansione;
- aumento del numero di integrazioni;
- eliminazione di disturbi periodici e casuali come: (i) l'accensione e lo spegnimento dei ventilatori del sistema di condizionamento dell'ambiente, (ii) l'effetto di eventuali ventilatori a bordo macchina, (iii) l'apertura e chiusura di portoni in prossimità del volume di misura;
- la miscelazione dell'aria ambiente per mezzo di ventilatori orientati parallelamente al percorso compreso tra l'emettitore ed il ricevitore.
- L'acquisizione del singolo dato di misura tendenzialmente mediato sull'intervallo osservato dell'oscillazione.

Il metodo principale per l'eliminazione del gradiente di Temperatura verticale e per ridurre le fluttuazioni causate dalla turbolenza è quello di posizionare un ventilatore dietro il sensore di modo che l'aria vada diretta verso il laser. Quando i ventilatori vengono usati con la regolazione situata sul lettore, sistemato nella posizione "responso lento", gli effetti della turbolenza possono essere ridotti fino a un fattore di 10 e il gradiente di temperatura può essere eliminato.

**Nota:** quando viene richiesta la massima precisione del sistema è estremamente importante usare sia i ventilatori che lo smorzamento elettronico.

In estate, quando si lavora con una precisione 0.025mm su 6m, non sono necessari l'uso dei ventilatori e dello smorzamento elettronico. L'uso dei ventilatori sarà comunque necessario se si lavora con precisioni di 0.002mm. In inverno i ventilatori sono sempre necessari.

#### 3.1 VENTILATORI CONSIGLIATI

Vengono consigliati due tipi di ventilatori. Il meno costoso e più consigliato è il comune ventilatore rettangolare da finestra disponibile nei grandi magazzini o in un negozio di accessori elettrici.

Questo tipo di ventilatore è in grado di generare un cilindro d'aria, invece che un cono d'aria prodotto da ventilatori più costosi,

*Fig.6 Uso di ventilatori*

e produce il massimo rimescolamento di aria.

Un solo ventilatore a finestra può essere utilizzato ad una distanza di circa 7,5m. Maggiore è la distanza coinvolta maggiore sarà il numero di ventilatori da usare e da posizionare come mostrato in fig.

L'uso dei ventilatori migliorerà sempre la precisione delle letture ad eccezione di quando si utilizzerà un tipo di ventilatore sbagliato o quando non si userà un numero sufficiente di ventilatori.

Se la turbolenza peggiora con l'uso del ventilatore, sono necessari più ventilatori.

Il secondo tipo di ventilatore, particolarmente pratico, è il grande ventilatore da uffici. Questi ventilatori sono solitamente efficaci a 15m o più ma non sono trasportabili come i ventilatori a finestra.

I ventilatori oscillanti con pale arrotondate ed i ventilatori da ufficio non lavorano bene.

La letteratura specializzata sconsiglia l'uso di ventilatori ad alta velocità e alto volume di spostamento disposti trasversalmente rispetto al percorso ottico. Il movimento trasversale dell'aria non provoca, in

principio, alterazioni nella direzione del raggio ma, spostando masse d'aria che possono avere temperature diverse - dovute a eventuali gradienti termici spaziali - si possono provocare alterazioni locali della direzione di propagazione del raggio. Tali alterazioni possono, a loro volta, essere influenzate dalle variazioni di flusso provocate dall'interazione tra i componenti della macchina in movimento ed i ventilatori stessi.

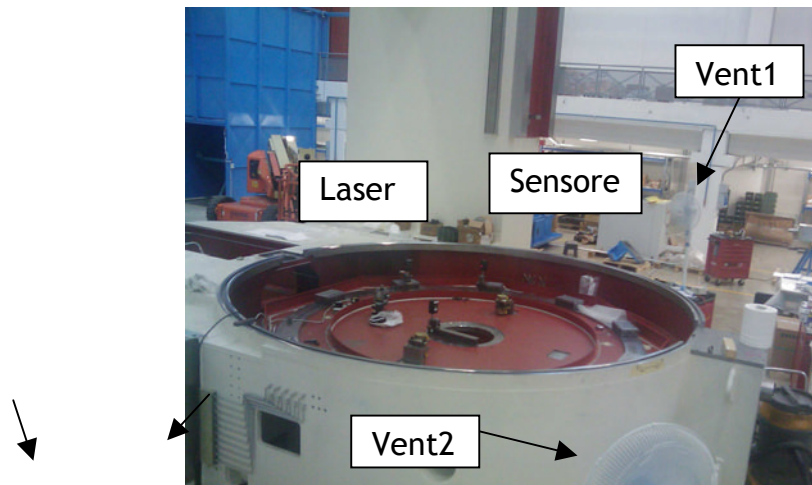
## **4. SMORZAMENTO ELETTRONICO**

Lo smorzamento elettronico implica aggiustamenti del regolatore posto sul display. Normalmente, tutti gli allineamenti vengono eseguiti con i regolatori settati su "risponso veloce". Quando viene impostato su "risponso lento", smorzamento addizionale, o media elettronica, si riducono sostanzialmente le intensità delle fluttuazioni causate dalla turbolenza dell'aria. Appena viene impostato il "risponso lento", le letture cambieranno lentamente e bisogna aspettare alcuni secondi prima di leggere la misura dopo uno spostamento (10-20sec.). Le fluttuazioni possono essere ancora presenti, ma saranno ridotte fortemente. Prendere le letture osservando i limiti e facendone la media. Questa procedura funziona per le turbolenze, ma non ha effetto sul gradiente di temperatura verticale.

## **5. CONSIDERAZIONI SULLA PRECISIONE**

Le misurazioni devono essere ripetute e, per ogni singolo punto di misura, deve essere calcolata la media delle letture ottenute. Per la stima dell'incertezza di misura, il disturbo dovuto alla turbolenza verrà incluso nella componente associata alla ripetibilità di misura.

## 6. ESEMPI DELL'USO DI VENTILATORI



*Fig. 7 - Ralla di un tornio verticale,  
Raschiatura tasche di sostentamento idrostatico*





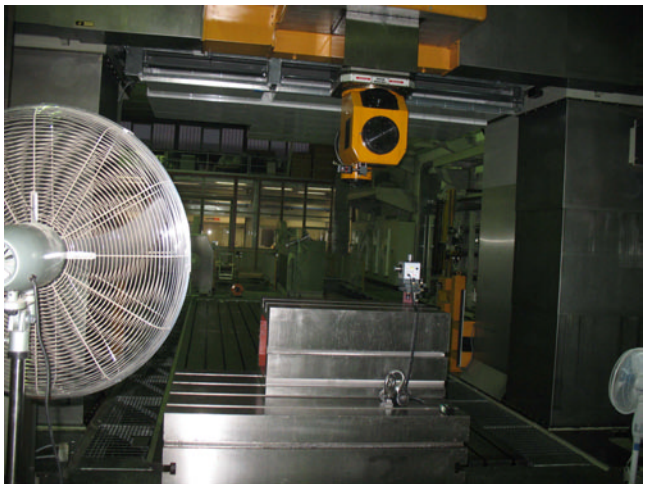
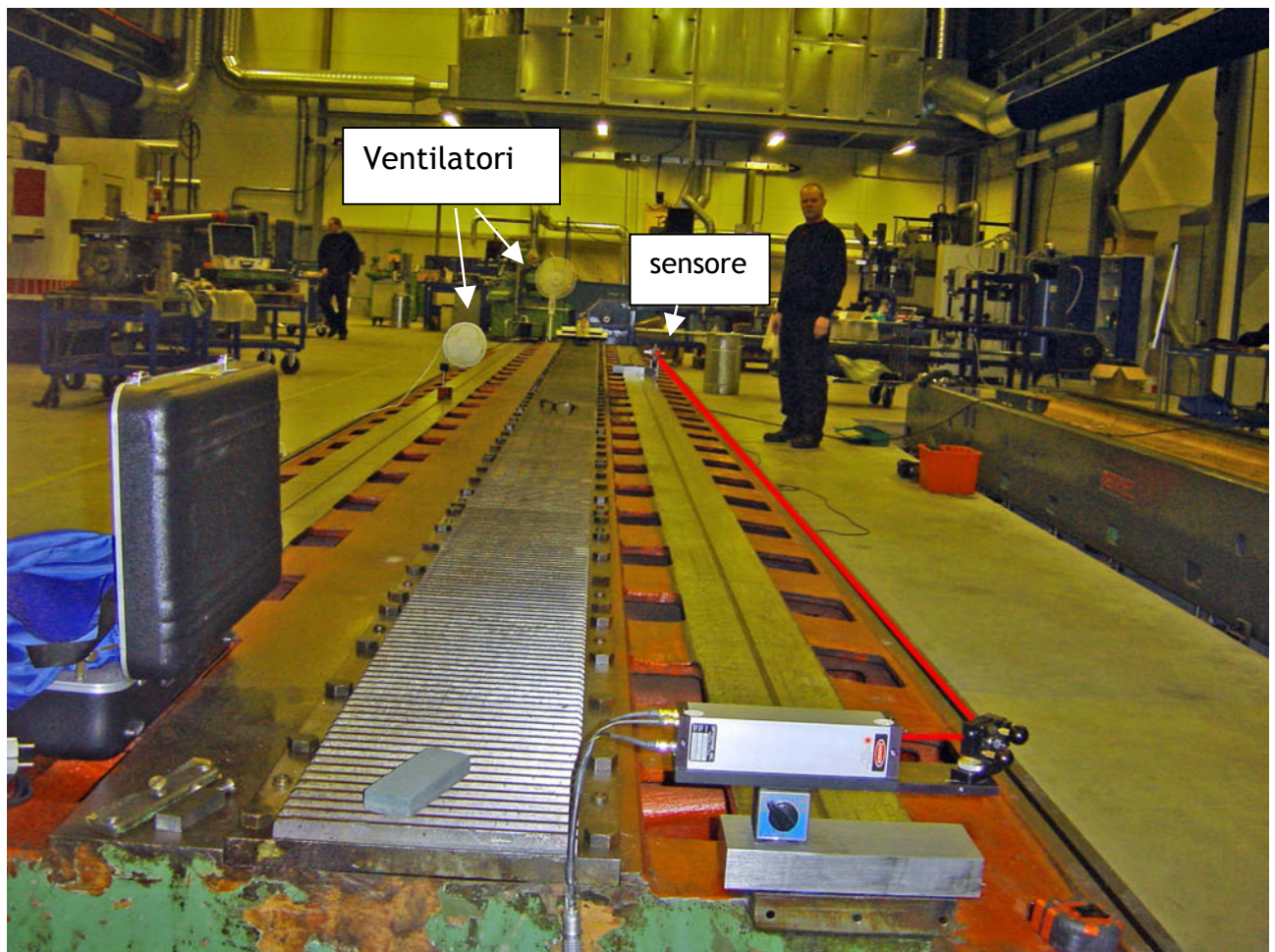


Fig. 8 - Misura della Planarità e rettilineità su grandi macchine utensili



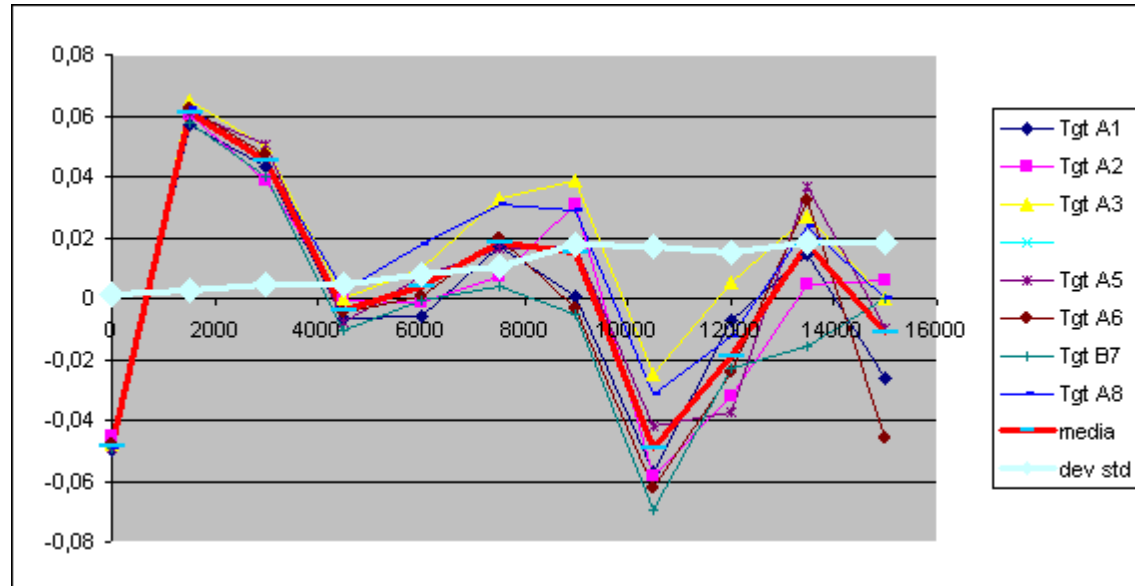
**Fig9** - Lavorazione di bancale  $L= 30m$  Un ventilatore è posto oltre la corsa massima ed uno più piccolo è posto a metà corsa. I ventilatori sono posti in modo che l'operatore non interrompa il flusso.

## Esempi di misurazione di aria senza ventilatori

CORSE 15m 14-5-2008 file : 8corse

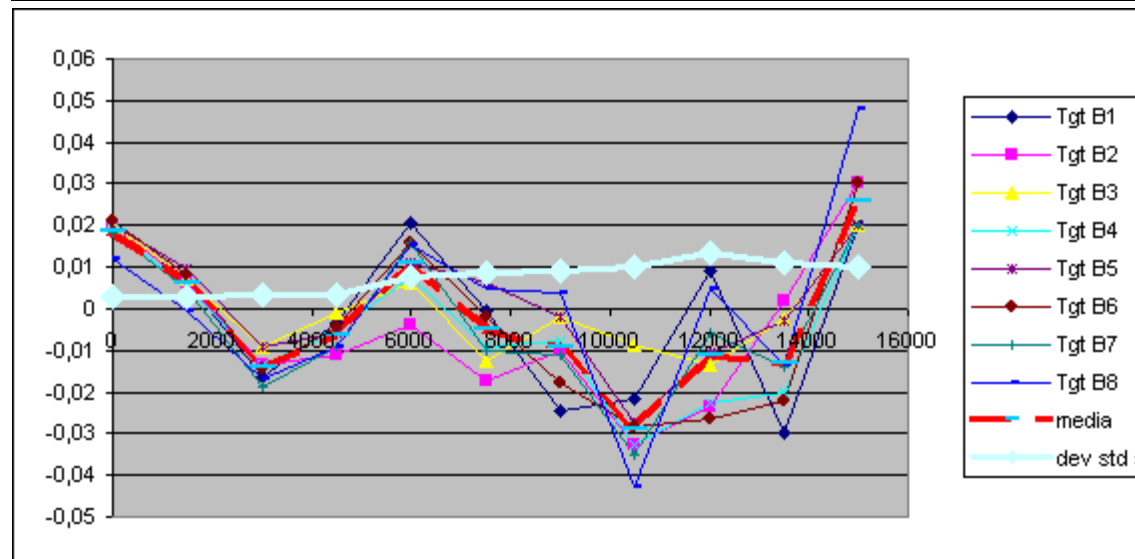
Numero campioni per misura: campioni 20

dist	dev std s	dev std s
0	0,002	0,003
1500	0,003	0,003
3000	0,005	0,003
4500	0,005	0,003
6000	0,008	0,008
7500	0,011	0,008
9000	0,018	0,009
10500	0,017	0,010
12000	0,015	0,013
13500	0,018	0,011
15000	0,019	0,010
MAX s	0,019	0,013



Misura effettuata a varie distanze con Continuo spostamento del sensore .

Si nota una variabilità più elevata all'aumentare della distanza



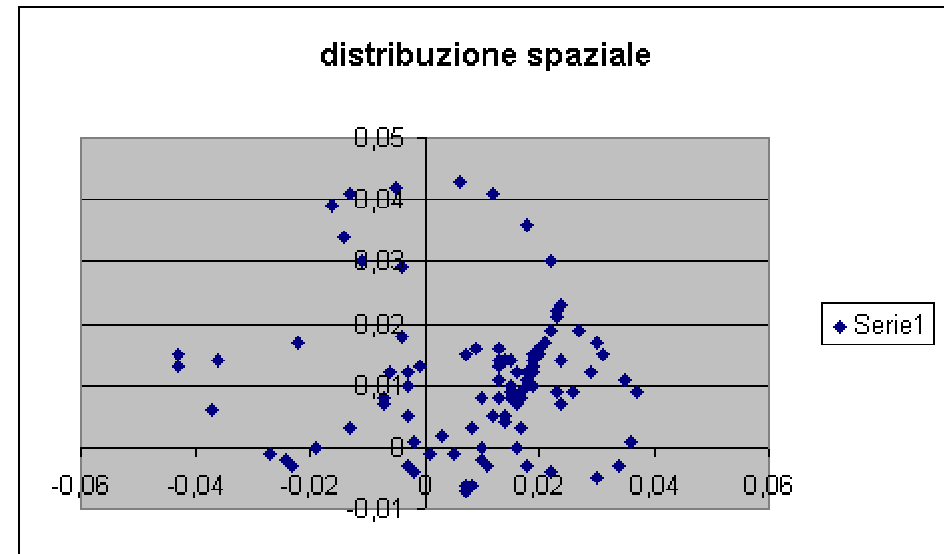
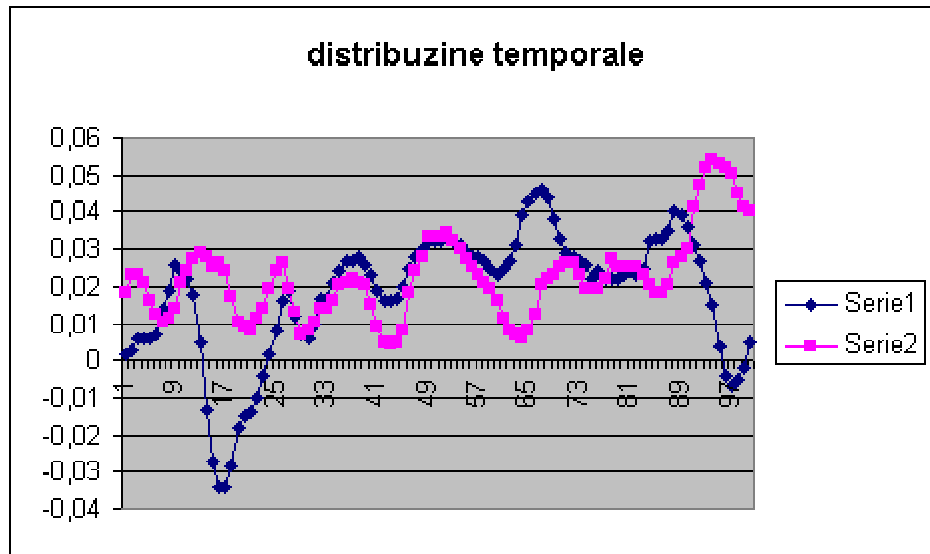
100 dati 15 minuti ( 9 secondi a campione)  
 distanza 15m senza medie  
 TARGETs Fermi

Descrizione prova:  
 due sensori sono fissi a 90° uno con l'altro  
 Piano orizzontale e piano verticale

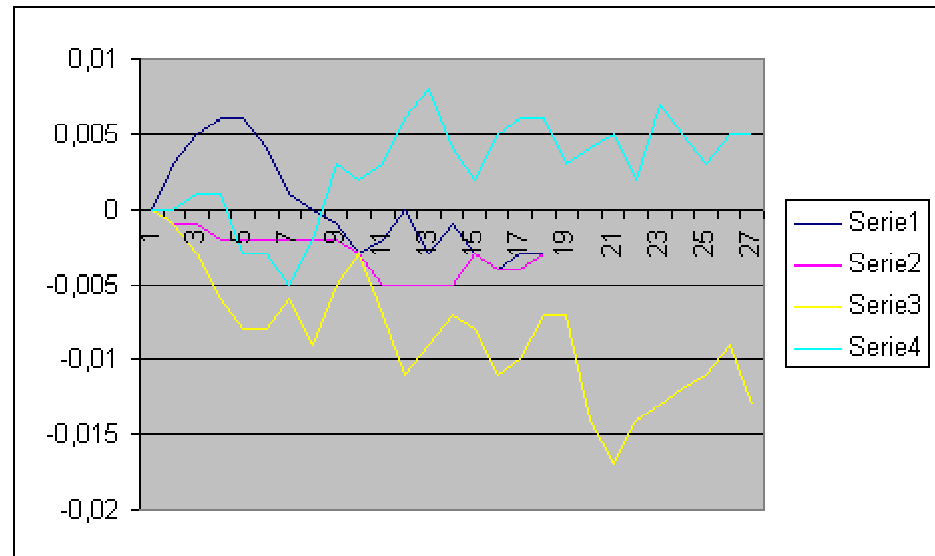
Distanza 15m

	tgA	tgB
media	0,009	0,011
dev std	0,017	0,011
frequenza	120 sec	

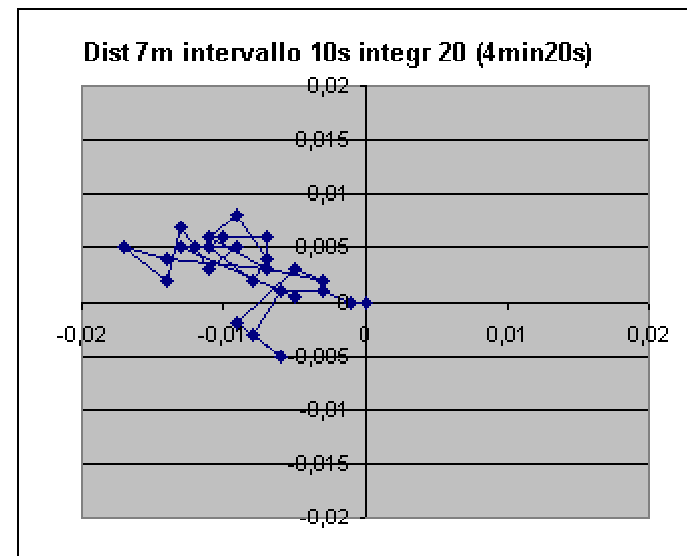
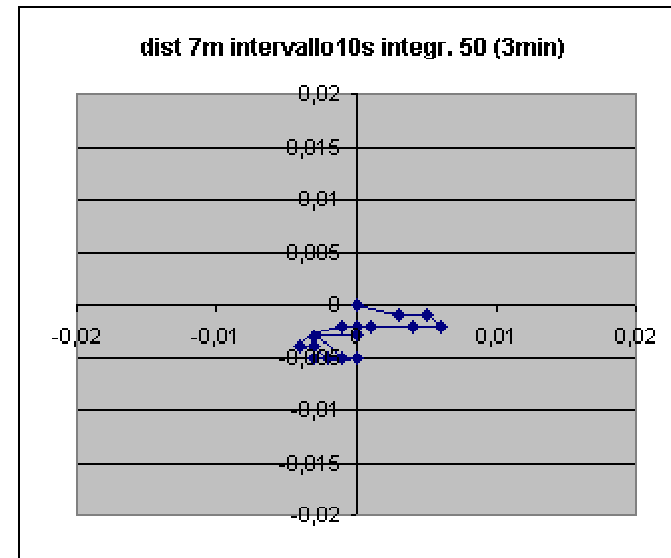
Note: Le posizioni orizzontale e verticale cambiano in maniera quasi sinusoidale per mantenere un valore medio costante.  
 Si nota anche una deviazione lenta, dovuta probabilmente alla stratificazione



	int 50	int20		
	Tgt A	Tgt B	Tgt A	Tgt B
media	2,866	-0,354	-0,020	0,015
dev std	0,003	0,002	0,004	0,003
freq 35 sec				

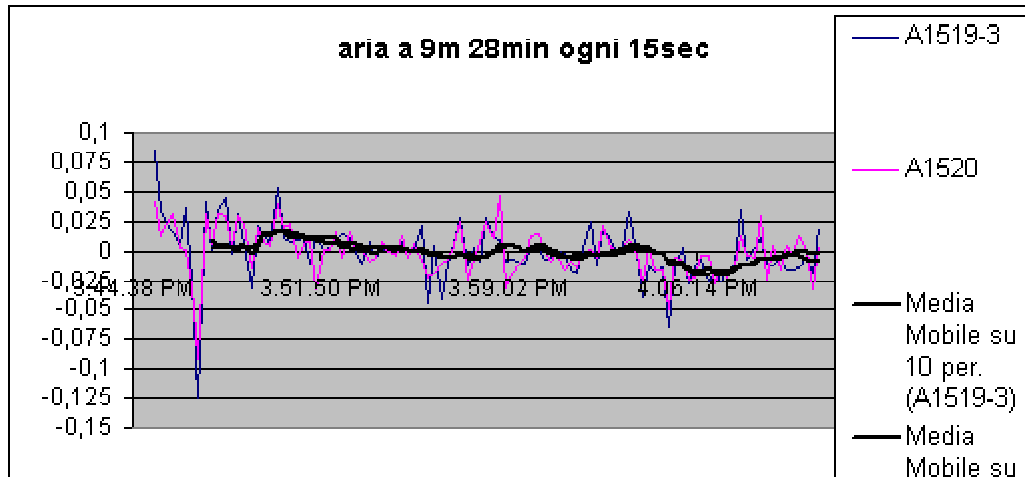


Periodo più veloce , 35 secondi i



<b>MEDIA</b>	-0,136	00,000	0,000	0,000
<b>STD dev s</b>	0,041	0,000	0,044	0,024

OFFSET -9,086 5,079 -0,777 2,5063



o si ottengono valori più stabili

