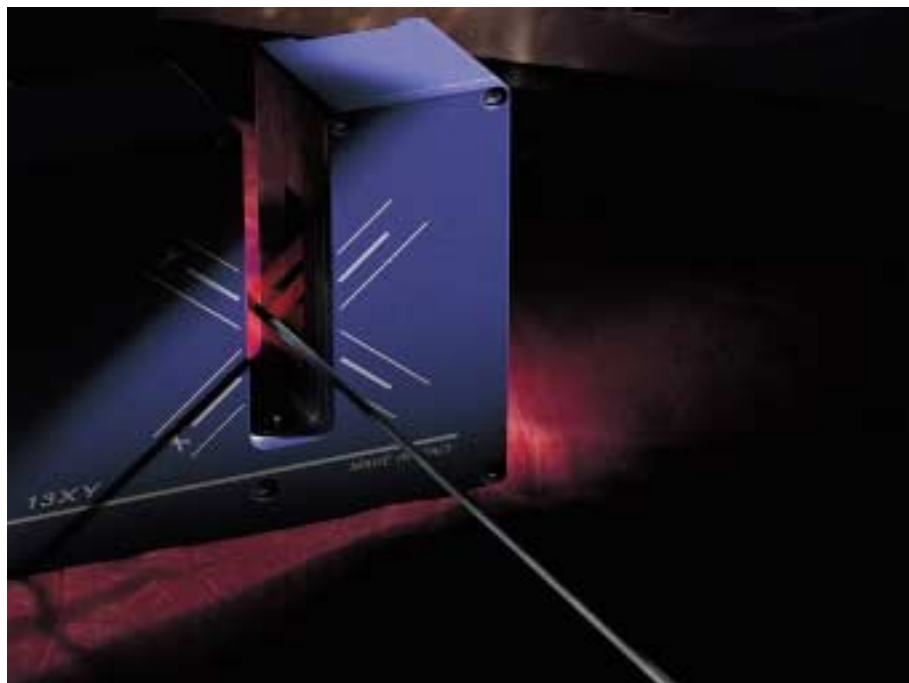


Presentato alla Conferenza Internazionale  
**WIRES & CABLES**  
FIRENZE, 4 - 5 Ottobre 1995

**AEROEL**



## **La misurazione in continuo del diametro del filo d'acciaio destinato a steel-cord.**

### **SOMMARIO:**

- I vantaggi della misura del diametro in continuo
- Il sistema Wireline per la misura in linea
- Risultati significativi raggiunti in Pirelli

**A. Spizzamiglio - Aeroel - Italia**



## 1 - Introduzione

Le crescenti esigenze di migliorare la qualità del filo e nel contempo di contenere, se non ridurre, i costi di fabbricazione sono indubbiamente dettate dalla necessità di mantenere una posizione di leadership o di introdurre nuovi elementi di vantaggio competitivo nei confronti di un'emergente concorrenza.

Gli strumenti di misura necessari a mantenere sotto controllo i vari parametri che caratterizzano il filo e che ne determinano, in fin dei conti, la qualità sono oggi un elemento fondamentale per l'analisi del processo produttivo e per la sua conseguente ottimizzazione.

È infatti evidente che qualsiasi operazione di ottimizzazione di un processo passa prima attraverso una fase di analisi e quest'ultima deve partire dalle misurazioni effettuate sul prodotto, in continuo o su campioni: in assenza di dati attendibili, qualsiasi intervento è ovviamente impossibile.

Molti strumenti di misura poi, da elemento passivo, adatto al solo monitoraggio del processo (per l'analisi e la certificazione), si trasformano anche in elementi attivi, in quanto i risultati delle loro misurazioni determinano delle azioni di controllo (feed-back) o comunque degli interventi (automatici quando possibile, o manuali) sul processo stesso, al fine di migliorarne la resa.

Si consideri che in tal caso, azioni correttive basate su dati falsati da misurazioni errate o inattendibili possono, paradossalmente, produrre un effetto contrario a quello desiderato: dunque l'affidabilità delle misurazioni è elemento fondamentale.

Esiste oggi un'ampia gamma di strumenti adatti a misurare diversi parametri del filo; per la maggior parte, dato il tipo di grandezza da misurare, essi si prestano a misurazioni da laboratorio o comunque fuori linea (metallografi, durometri, macchine di trazione, ecc.).

In tal caso il procedimento di analisi che determinerà il successivo intervento sul processo sarà di tipo statistico, basato sull'elaborazione di misure effettuate su campioni (S.P.C. Statistical Process Control)

Altri parametri invece possono essere misurati in continuo, direttamente a bordo macchina (on-line): e' questo il caso del diametro del filo, misurabile oggi con grande accuratezza da strumenti ottici di diverso tipo disponibili sul mercato.

Nel seguito si analizzeranno le tematiche relative a questo tipo di strumenti, in particolare calibri laser a scansione, facendo specifico riferimento all'applicazione per la misura del filo di acciaio destinato a steel-cord.

## 2 - I vantaggi della misurazione del diametro in continuo

La misurazione in continuo del diametro del filo, oltre che espandere a dismisura il numero di campioni sui quali viene effettuata l'analisi, rende possibile il controllo in tempo reale della produzione. L'immediato arresto della trafila prima di superare le tolleranze dimensionali programmate consente di produrre un filo esente da difetti di diametro. Si ottiene così la garanzia assoluta che la totalità del prodotto fornito al cliente rientra nella specifica, annullando qualsiasi rischio di reso o di reclamo. La variabilità del diametro finale del filo dipende in gran parte, com'è noto, dall'usura della filiera, che determina un progressivo aumento di diametro; i limiti di tolleranza imposti sul diametro determinano, assieme agli altri parametri di trafilatura, la durata della filiera.

Questa, a sua volta, non è un parametro noto a priori con assoluta certezza: anche immaginando di mantenere costanti tutte le condizioni di trafilatura (velocità, riduzione, lubrificazione, ecc.) filiere dello stesso tipo si usureranno in modo analogo ma non identico, dando luogo ad una caratteristica curva di distribuzione gaussiana, definita da una durata media e da una deviazione standard. (Fig. 1)

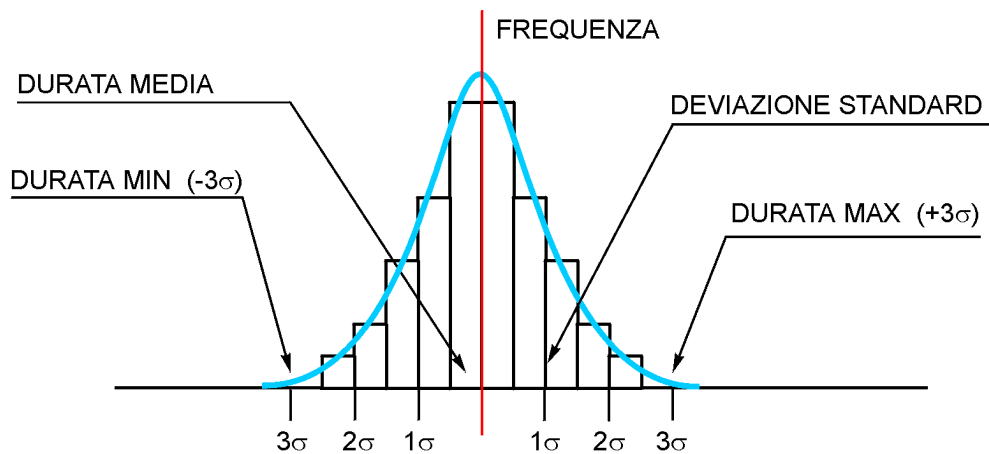


Fig. 1 - Durata della trafila, tonnellate

È allora chiaro che i tre obiettivi di

1. **progressiva riduzione delle tolleranze** dimensionali, per l'acquisizione di nuovi vantaggi competitivi;
2. **produzione a scarto zero**, per la garanzia di qualità del prodotto;
3. **massima utilizzazione delle filiere**, per l'economia del processo;

sono inconciliabili, se si prescinde dal controllo continuo di diametro o, quanto meno, da un controllo molto frequente.

È evidente che solo il monitoraggio continuo può determinare con assoluta precisione il limite di utilizzazione di ciascuna filiera, garantendo nel contempo che non vi sia alcun rischio di trafilare filo fuori tolleranza.

Naturalmente la scelta tra un sistema di controllo in continua ed un campionamento manuale dipende essenzialmente dalla frequenza di controllo necessaria a garantire il rispetto delle tolleranze. È allora evidente che il controllo continuo si rende necessario quando le considerazioni precedenti e le specifiche condizioni di lavoro richiedono un campionamento così frequente da risultare incompatibile con le esigenze produttive o troppo gravoso dal punto di vista di impiego del personale.

Nel caso in cui si producano bobine di peso rilevante (100 - 200 Kg.), essendo possibile verificare il diametro solo alla fine della bobina, a trafila ferma, e data una durata tipica della filiera oscillante tra un minimo di 400 Kg ed un massimo di 800 Kg, è assolutamente indispensabile il monitoraggio in continuo; sarebbe altrimenti intollerabile il rischio di dover scartare un'intera bobina per non conformità di diametro, relativa anche solo alla parte terminale della bobina stessa! Tuttavia, anche nel caso in cui il ridotto peso delle bobine (15 - 30 Kg) consenta di campionare manualmente il diametro con frequenza sufficientemente elevata da garantire il rispetto delle tolleranze sul 100% del prodotto (e comunque limitare l'eventuale scarto ad una sola bobina), considerazioni di economicità rendono ugualmente interessante l'utilizzo di misuratori di diametro in linea.

Si pensi, ad esempio, che una bobina da 15 Kg. di filo da 0,30 mm, trafilato a circa 20 m/s, viene prodotta in circa 20 minuti: questo tempo corrisponde allora all'intervallo di controllo di diametro, operazione per la quale è necessario calcolare almeno un minuto/uomo, tempo indispensabile per azzerare il calibro sul tampone, mettere in posizione il filo, effettuare la misura di diametro e di ovalizzazione (ruotando il calibro), annotare il risultato, riporre il micrometro.

Nell'arco di un anno, considerando una produzione su 16 ore/giorno ed una media di 250 giorni lavorativi/anno le operazioni di controllo diametro su una trafila assommano ad almeno 200 ore/uomo! Naturalmente, in entrambe i casi, indipendentemente dal peso finale delle bobine, il controllo automatico di diametro risulta essere indispensabile se si vogliono utilizzare macchine trafilatrici con cambio automatico delle bobine di raccolta.

Alle considerazioni di cui sopra, vanno poi aggiunti ulteriori e determinanti vantaggi derivanti dalla misura in linea in rapporto ad un campionamento manuale:

- **Oggettività e riproducibilità dei risultati.** In tutte le misurazioni manuali esiste sempre una componente soggettiva legata all'abilità dell'operatore: i sistemi automatici sono per contro totalmente esenti da questo tipo di errore e forniscono dati oggettivi e riproducibili.
- **Maggior precisione.** Normalmente è molto difficile ottenere precisioni migliori di  $\pm 2 \mu\text{m}$  con sistemi manuali: i migliori misuratori di diametro laser consentono invece di superare questo limite si spingono fino a  $\pm 0,2 / \pm 0,5 \mu\text{m}$ . nella gamma di diametri di interesse per quest'applicazione, tra 0,1 ed 1 mm. circa.
- **Raccolta dati e tracciabilità della produzione.** Quest'aspetto diventa sempre più importante, specialmente in considerazione della crescente diffusione dei Sistemi di Certificazione della Qualità. I misuratori di diametro in linea si prestano ad essere facilmente integrati in reti di raccolta dati, sia esistenti che da implementare, con il risultato di rendere disponibile, in tempo reale e senza ulteriori costi, il dato relativo all'evoluzione del diametro del filo prodotto da ogni trafila ed all'interno di ogni singola bobina. In particolare

quest'ultima possibilità, di "marcare" ogni bobina con il valore del diametro effettivo del filo, consente di selezionare bobine con diametri differenziati, seppure all'interno del campo di tolleranza. Questa funzione può risultare particolarmente utile in cordatura, volendo ottenere corde con pesi / metro più uniformi di quanto sarebbe possibile fare accoppiando i singoli fili in modo casuale. Si consideri ad esempio una corda ad n fili, di diametro  $\Phi$ : se la tolleranza sul diametro di ogni filo è  $\Delta\Phi$ , la conseguente variazione percentuale di area (e dunque di peso/metro) sarà:

$$100 * \frac{\Delta A}{A} = 100 * 2 * \left( \frac{\Delta\Phi}{\Phi} \right) * n$$

Ad esempio, una corda costituita da 3 fili da 0,30 mm, con tolleranza  $\pm 0,003$  mm avrà una tolleranza finale sul peso/metro di  $\pm 6$  %.

È chiaro che un accoppiamento "intelligente" di fili a diametro differenziato consente di ridurre notevolmente questa tolleranza, anche se tale procedimento può introdurre qualche ulteriore complicazione nella gestione della produzione e del magazzino.

Le valutazioni di convenienza economica e di ritorno dell'investimento necessario ad equipaggiare le trafale sono diretta conseguenza di quanto precedentemente esposto, unitamente a considerazioni di tipo gestionale e produttivo, che possono essere anche molto differenziate, riflettendo la specificità di ogni Azienda.

È tuttavia facilmente comprensibile che, in ogni caso, sono da considerarsi fattori fondamentali, ai fini della scelta finale, sia il costo unitario degli strumenti di misura che la loro effettiva capacità ad operare nella realtà produttiva in modo da garantire il raggiungimento degli obiettivi preposti.

### **3 - Il sistema WIRELINE per la misura in linea**

In passato erano proprio questi due ultimi aspetti, costo e caratteristiche specifiche degli apparecchi disponibili sul mercato, a scoraggiare un'applicazione su vasta scala della misura di diametro in linea su trafilato per filo sottile destinato allo steel-cord.

L'AEROEL, Azienda operante nel settore delle misure di diametro a laser dal 1980, ha raccolto questa sfida e da alcuni ha concentrato parte delle sue risorse progettuali nello sviluppo di un calibro laser con caratteristiche specifiche per l'impiego in trafilatura ed in particolare su trafilato a bagno per la produzione di filo d'acciaio destinato a steel-cord. I risultati non si sono fatti attendere e già nella primavera del 1992 erano disponibili i primi Sistemi Laser WIRELINE, che sono stati utilizzati per la sperimentazione sul campo e le prove di accettazione presso importanti produttori europei di steel-cord, tra i quali menzioniamo la Soc. Pneumatici Pirelli, negli stabilimenti di Figline Valdarno (I) e Merzig (D).

#### **3.1 - Descrizione generale e principio di funzionamento**

Il sistema WIRELINE si compone sostanzialmente di un calibro laser ALS12XY<sup>1</sup>, di un'unità elettronica tipo IBU e del software applicativo installato all'interno dell'unità stessa. (Fig. 2)

Il calibro ALS12XY utilizza il principio classico della misura ottica a scansione. Un sottile raggio laser emesso dal trasmettitore esplora ad alta velocità il campo di misura, ed intercetta il filo da controllare, proiettandone l'ombra verso il ricevitore. Misurando la durata dell'ombra ed essendo nota la velocità del raggio laser, è possibile determinare con molta precisione il diametro del filo. (Fig. 3)

Il trasmettitore è disegnato in modo da generare 2 fasci laser incrociati a 90°, per misurare il filo lungo

2 direzioni ortogonali, X e Y, così da poter valutare anche l'eventuale ovalizzazione del prodotto.

Poiché il sistema ottico del trasmettitore genera raggi laser sensibilmente paralleli, la lettura del diametro non è influenzata dalla posizione del filo, purché quest'ultimo si trovi all'interno del campo di misura (13 x 13 mm).

Gli impulsi di luce ed ombra raccolti dal ricevitore sono trasformati in segnale elettrico e trasmessi ad un'unità elettronica separata, tipo IBU, dove un microprocessore provvede ad elaborare il segnale per ricavarne i diametri lungo gli assi X e Y.

L'unità elettronica consente poi la visualizzazione delle misure e la programmazione delle tolleranze, genera i segnali d'allarme, elabora la statistica di bobina e si interfaccia, tramite linea seriale, a computer esterni e/o reti di raccolta dati.

#### **3.2 - Aspetti tecnologici qualificanti**

Pur non essendo questa la sede adatta per una descrizione dettagliata del Sistema WIRELINE, per la quale si rimanda il lettore interessato alla documentazione tecnica specifica, riteniamo indispensabile sottolineare alcune fondamentali ed innovative caratteristiche del calibro ALS12XY che ne hanno, di fatto, reso possibile l'applicazione su vasta scala sulle trafilature per filo steel-cord.

##### **3.2.1 - Perché la misura su due assi?**

Apparentemente in contrasto con l'esigenza di mantenere il costo del calibro entro limiti accettabili, questa caratteristica si è rivelata di fondamentale importanza.

È certamente noto che ogni filo è affetto da un'ovalizzazione, più o meno marcata in funzione di possibili imperfezioni o disallineamenti della filiera; pertanto una corretta misurazione dimensionale del filo non può a priori prescindere da tale aspetto. Infatti, una lettura di diametro in tolleranza lungo un solo asse non garantisce che la dimensione del filo, misurato su tutti i 180°, sia in tolleranza.

<sup>1</sup> Attualmente nei sistemi WIRELINE il nuovo calibro laser biasse ALS13XY sostituisce il precedente ALS12XY

L'applicazione in linea, su vasta scala, del controllo di diametro nell'Industria del Filo Smaltato permette di migliorare l'efficienza del processo e la qualità del prodotto.



Fig. 2: Il sistema Wireline

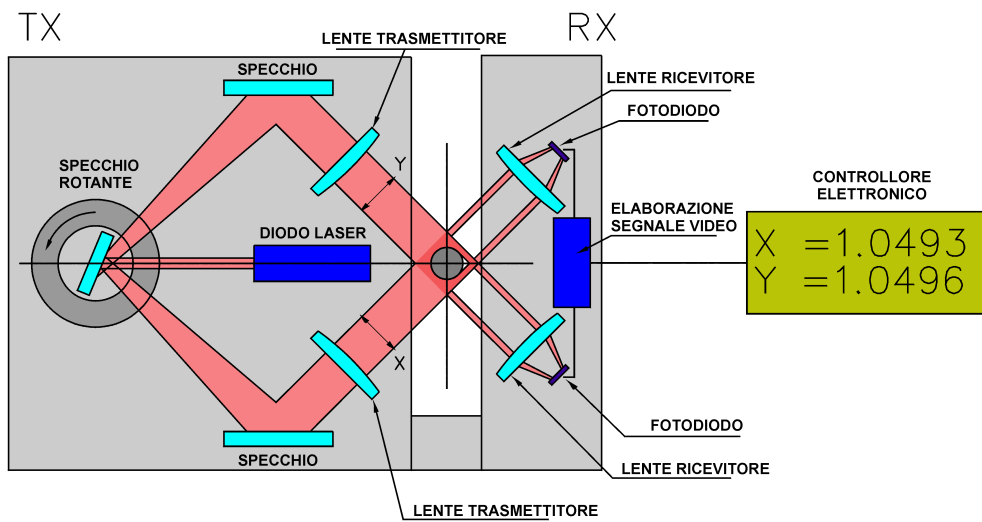


Fig. 3: Principio di funzionamento

Disporre di due misure anziché di una sola costituisce già di per sé un'enorme vantaggio e consente di aumentare le probabilità di rilevare correttamente un'eventuale ovalizzazione fuori specifica. È tuttavia noto che, anche con 2 misurazioni a 90°, non si ha la certezza che, a qualsiasi angolo di torsione, sia possibile misurare l'ovalizzazione, espressa come differenza

$$\Phi_{\max} - \Phi_{\min}$$

Quello che invece forse non tutti sanno è che, utilizzando le due misure X ed Y prese a 90° una dall'altra è possibile calcolare un diametro medio  $\frac{(X+Y)}{2}$  che risulta praticamente indipendente dall'angolo di torsione e che per di più consente di calcolare con ottima approssimazione l'area della sezione (ipotizzata di forma ellittica), almeno fino a che l'ovalizzazione si mantiene entro valori non eccessivi e dunque in reali condizioni operative.

Allora, poiché in definitiva la caratteristica fondamentale del filo è la sua resistenza meccanica, che è proporzionale all'area della sezione, ecco che la misurazione biasse fornisce direttamente e con la massima precisione il parametro che la determina, ovvero il diametro medio del filo, indipendentemente dal valore dell'ovalizzazione e dall'angolo di torsione!

Infatti, utilizzando per il calcolo dell'area il diametro medio misurato da un calibro a fasci incrociati, ovvero il valore  $\frac{(X+Y)}{2}$ , si può dimostrare che

l'errore percentuale di valutazione dell'area,

$$\frac{\Delta A}{A} * 100, \text{ può variare, in funzione della rotazione}$$

della sezione, tra un minimo ed un massimo dati dalla seguente relazione:

$$\left[ \left( \frac{1}{4\lambda} \right) * (\lambda + 1)^2 - 1 \right] * 100 \leq \frac{(\Delta A)}{A} * 100 \leq \left[ \left( \frac{1}{2\lambda} \right) * (1 + \lambda^2) - 1 \right] * 100$$

essendo

$$\lambda = \frac{\Phi_{\max}}{\Phi_{\min}} = 1 - \frac{\Delta\Phi}{\Phi_{\max}}$$

$\Delta\Phi$  = ovalizzazione della sezione.

Al contrario, nel caso in cui si utilizzi una sola misura per il calcolo dell'area, l'errore di valutazione è compreso entro i seguenti limiti:

$$(\lambda - 1) * 100 \leq \frac{\Delta A}{A} * 100 \leq \left( \frac{1}{\lambda} - 1 \right) * 100$$

Si consideri ad esempio un filo di diametro medio pari a 0,20 mm, ma affetto da 0,002 mm di ovalizzazione, così che il diametro della sezione vari tra 0,199 e 0,201 mm.

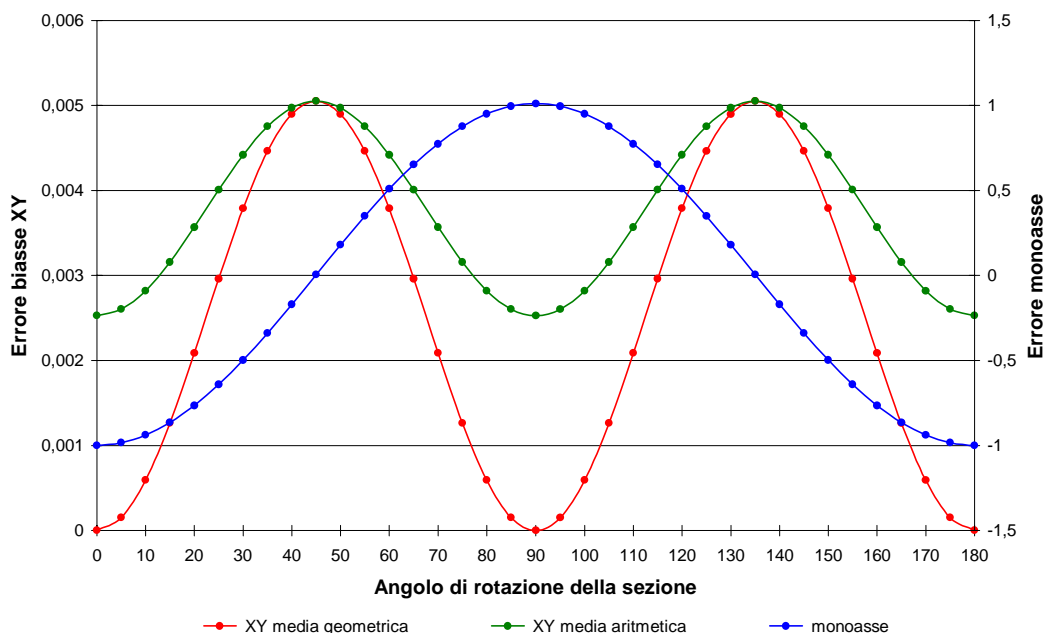
Ebbene, essendo  $\lambda = 0,99$ , l'errore che si commetterebbe nella valutazione dell'area utilizzando una sola misura di diametro oscilla entro  $\pm 1\%$ , in funzione dell'orientamento della sezione! Utilizzando il calibro a fasci incrociati, l'errore di valutazione dell'area risulta invece praticamente nullo ed in ogni caso compreso entro  $+ 0,0025\%$  e  $+ 0,005\%$ ! (Fig. 4)

È chiaro che, con l'obiettivo di ridurre di qualche punto percentuale la dispersione finale del peso/metro della corda, non è possibile utilizzare strumenti di misura a singolo asse, che di per sé e per la natura propria del filo da misurare, anche se precisi nella misura di diametro, non riescono tuttavia a garantire una sufficiente accuratezza nella successiva valutazione dell'area della sezione.



Fig. 4 - ERRORE % MISURA AREA

$$L = D_{\max} / D_{\min} = 0,99$$



### 3.2.2 - Accuratezza di misura in condizioni operative

Un altro aspetto estremamente importante, se non fondamentale, da valutare nella scelta del calibro, è la sua precisione ed affidabilità nelle reali condizioni operative in cui esso si verrà a trovare una volta installato sulla trafila, a valle della filiera e prima della bobina di raccolta.

Infatti, dato che la funzione dello strumento è quella di misurare il diametro del filo per verificare che il suo valore sia compreso entro tolleranze di alcuni micron, tipicamente  $\pm 5 \mu\text{m}$ , la massima incertezza di misura accettabile dovrebbe essere inferiore a  $\pm 0,5 \mu\text{m}$ , ovvero 1/10 dell'intervallo di tolleranza.

La precisione di misura è a sua volta determinata da numerosi fattori, alcuni caratteristici del calibro, quali ripetibilità e linearità, altri invece fortemente dipendenti dalle condizioni operative nelle quali il calibro stesso si verrà a trovare, come ad esempio la presenza di polvere, le variazioni di temperatura ambiente, la velocità e la vibrazione del filo.

### Linearità

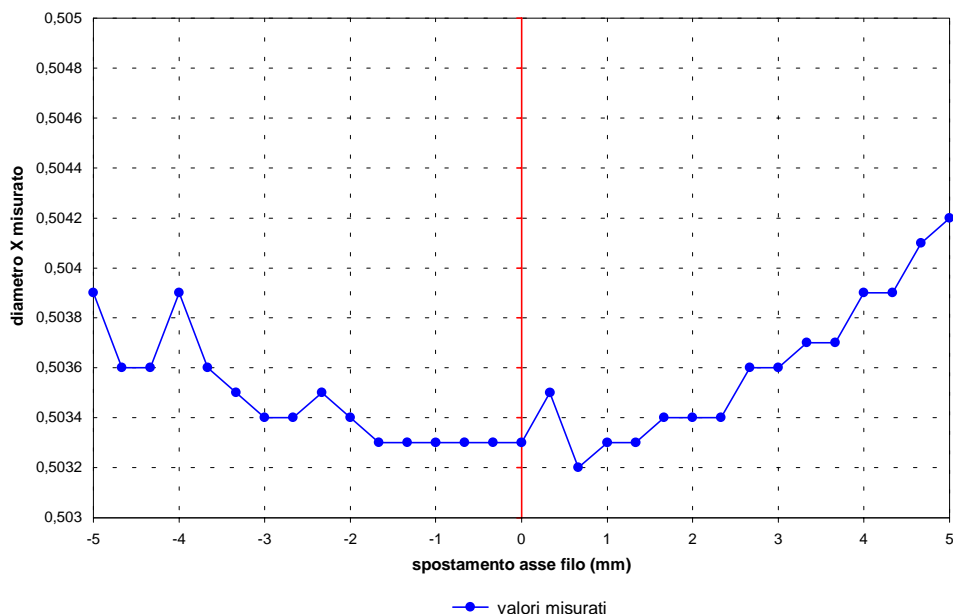
Il primo tipo di errore è definito come lo scostamento massimo tra la misura reale e quella rilevata dal calibro, quando il diametro del filo varia tra il minimo ed il massimo valore specificato e/o quando l'asse del filo stesso si sposta in un punto qualsiasi all'interno del campo di misura specificato; questo errore è di tipo sistematico e, dipendendo da imperfezioni ed aberrazioni della catena ottica, in generale varia da calibro a calibro. (Fig. 5)

Poiché nell'applicazione steel-cord la gamma di diametri da misurare è molto ristretta, tipicamente tra 0,15 e 0,75 mm, e l'asse del filo risulta mediamente centrato nel campo di misura (a meno della vibrazione, di cui tratteremo nel seguito) l'errore di non linearità è praticamente inesistente. È tuttavia importante sapere che, in ogni caso, in tutti i nostri calibri ALS12XY l'errore di non linearità è compensato quasi interamente grazie ad una tecnica di linearizzazione elettronica, basata su di una "mappa degli errori" rilevata, calibro per calibro, durante il processo di fabbricazione e registrata in una memoria elettronica inserita nell'unità di controllo.



**Fig. 5 - LINEARITA' VERTICALE ASSE X**

Diametro nominale 0.0500 mm



Ogni misurazione viene corretta in real-time, in funzione del diametro letto e della posizione del filo all'interno del campo di misura, secondo la specifica tabella presente in memoria.

### Ripetibilità

La ripetibilità è invece data dal massimo scostamento riscontrato su di un numero sufficientemente elevato di misure relative allo stesso campione di filo, effettuate nelle medesime condizioni.<sup>2</sup> Questo errore esiste in tutti gli strumenti di misura e diventa evidente quando si aumenta progressivamente la risoluzione di misura: in pratica l'effetto più vistoso è l'instabilità dell'ultima cifra del display! Negli scanner laser l'errore di non ripetibilità è dovuto a numerosi micro-errori e disuniformità (velocità di rotazione, errori numerici di troncamento, rumore elettronico, ecc.) che, sommandosi in modo casuale ad ogni misura, danno luogo a questo tipo di instabilità. La tecnologia costruttiva e specifiche soluzioni

<sup>2</sup> Poiché i risultati di una serie numerosa di misure sono distribuiti lungo una curva di Gauss (distribuzione normale), la ripetibilità è definita in termini statistici, ovvero viene dichiarato l'intervallo di scostamento,  $\pm \epsilon$ , entro il quale sono contenuti il 99,73% (valore "a  $\pm 3\sigma$ ") o il 95,46% (valore "a  $\pm 2\sigma$ ") dei rilievi. Il numero di misure è maggiore

progettuali consentono di minimizzare questi effetti: è vero allora che la ripetibilità di misura è un parametro che, oltre ad essere determinante ai fini della possibilità applicativa, ben si presta ad essere utilizzato come un indice della "eccellenza" di uno strumento.

In ogni caso, è possibile migliorare ulteriormente la ripetibilità semplicemente considerando, come risultato finale, la media di numerose misure: è intuitivo immaginare che le variazioni di segno opposto si annullano ed il valor medio si stabilizza.<sup>3</sup> Nel caso del calibro ALS12XY, che effettua 200 misure al secondo (100 sull'asse X e 100 sull'asse Y), la non ripetibilità della singola misura (a  $\pm 3\sigma$ ) è di  $\pm 3 \mu\text{m}$ : tale valore si riduce a  $\pm 0,3 \mu\text{m}$  considerando la media su 100 misure, corrispondente ad un tempo di media di 1 secondo e potrebbe ulteriormente ridursi a  $\pm 0,2 \mu\text{m}$  portando il tempo di media a 2 secondi. (Fig. 6)

di 100.

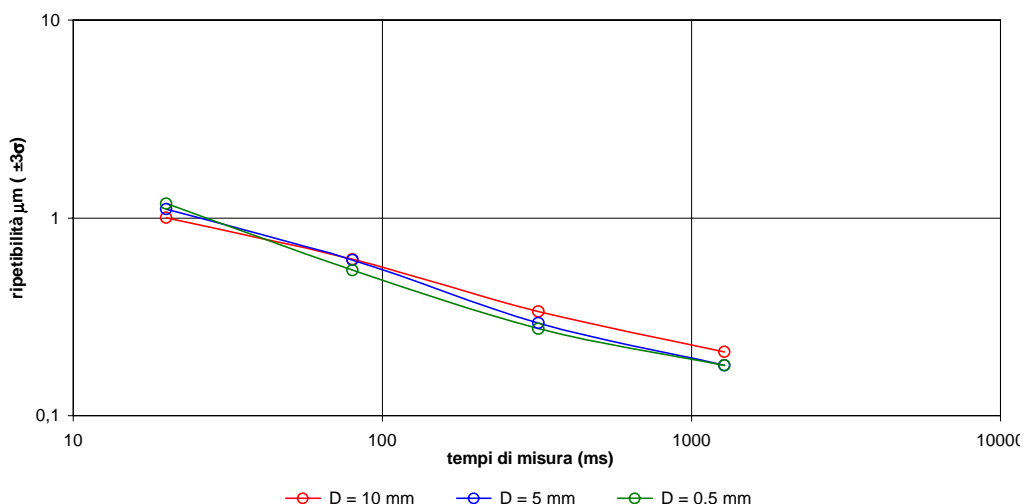
<sup>3</sup> Considerando il valor medio relativo ad una serie di n misure, la ripetibilità migliora secondo la formula seguente:

$$\epsilon_{(n)} = \epsilon * \left(\frac{1}{n}\right)^{\frac{1}{2}}$$

essendo n il numero di misure inserite nella media,  $\epsilon$  la ripetibilità delle misure "singole" ed  $\epsilon_{(n)}$  la ripetibilità delle misure mediate.

L'applicazione in linea, su vasta scala, del controllo di diametro nell'Industria del Filo Smaltato permette di migliorare l'efficienza del processo e la qualità del prodotto.

**FIG. 6 - RIPETIBILITA' DI MISURA (X+Y)/2**  
CALIBRO ALS12XY/100/A



L'unico "inconveniente" derivante da questa necessità è costituito dal fatto che, dovendo misurare del filo in rapido movimento (da 8 a 25 m/s), il valore letto risulta essere il diametro medio del filo lungo un tratto più o meno lungo, determinato dal prodotto tra la velocità del prodotto ed il tempo di media.

Nella specifica applicazione su trafilato, questo fatto è sicuramente accettabile: si ricordi infatti che lo scopo della misurazione è quello di verificare l'usura della filiera, che si produce in tempi relativamente lunghi e certo in modo da non produrre alcuna variazione di diametro nell'arco di qualche decina di metri.

### Autocalibrazione permanente

Quanto detto fino ad ora si adatta molto bene a descrivere quella che potremmo definire come "non-ripetibilità a breve termine" (che si manifesta cioè nell'arco di alcune ore) ma non definisce chiaramente quella che si potrebbe chiamare "non-ripetibilità a lungo termine" (dopo giorni, mesi, anni di funzionamento).

La stabilità a lungo termine di uno strumento di misura, sebbene facile da definirsi (basterebbe specificare l'intervallo di prova) è in realtà difficile e costosa da verificarsi sperimentalmente, calibro per

calibro, richiedendo ovviamente tempi molto lunghi.<sup>4</sup> Inoltre il risultato, per molti strumenti, potrebbe rivelarsi spiacevole e mettere in luce errori di misura a lungo termine inaccettabili e non coerenti con le necessità applicative.

Allora, per aggirare il problema lo si affronta da un altro punto di vista e si stabilisce di ricalibrare o tarare periodicamente lo strumento su tamponi di riferimento, in modo da azzerare periodicamente l'errore di misura (la "deriva") e riportarsi nella condizione iniziale. Ma naturalmente il problema, cacciato dalla porta, si ripresenta puntualmente alla finestra: qual è l'intervallo di ricalibrazione che garantisce che, tra due successive tarature, lo strumento rimanga entro i limiti di non-ripetibilità specificati? Anche in questi termini, la risposta alla domanda è molto difficile. Infatti in molti casi, visto che è in ogni caso necessario procedere alla ricalibrazione periodica dello strumento, vale la pena di utilizzare questa procedura anche per azzerare anche altri errori che, pur non dovuti propriamente alla instabilità del calibro stesso, sono nel frattempo insorti a causa di variate condizioni ambientali (es. temperatura ambiente) o di impiego (sporizia sulle lenti) e dunque dipendono dalle specifiche condizioni di utilizzo.

<sup>4</sup> Ci si chiede allora : a che cosa serve dare delle definizioni e fornire delle conseguenti specifiche che non possono essere verificate nella pratica quotidiana ?

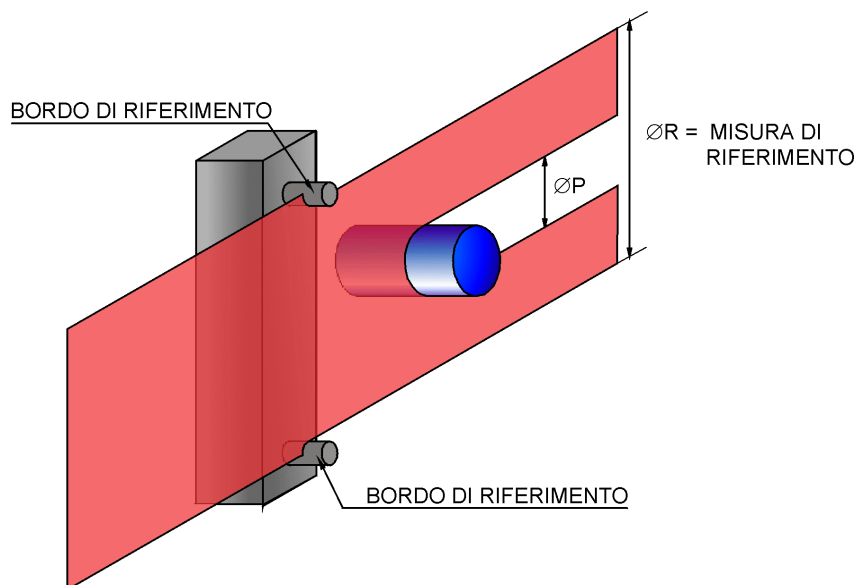


Fig. 7 - Il sistema di autocalibrazione

Allora si demanda all'utilizzatore finale la responsabilità di stabilire l'intervallo di ricalibrazione, in funzione del suo specifico ambiente operativo. Per ovviare a questo tipo di problemi, il calibro ALS12XY utilizza un innovativo sistema di autocalibrazione, che garantisce la calibrazione permanente dello strumento ed annulla ogni deriva di misura, sia a breve che a lungo termine. Si tratta in particolare di un vero e proprio riferimento meccanico<sup>5</sup>, equivalente ad un tampone in acciaio, inserito nel calibro alla fine di tutta la catena ottica, in modo da essere misurato ad ogni scansione, assieme al filo da misurare. (Fig. 7) La misura del filo viene costantemente confrontata con quella del tampone, di dimensione nota: in questo modo si procede automaticamente alla ricalibrazione dello strumento 200 volte al secondo! Ovviamente è inutile ripetere esattamente la stessa operazione con un altro tampone esterno: una tale procedura potrebbe eventualmente essere necessaria solo al momento dell'installazione, per "accordare", una volta per tutte, la lettura del calibro con i tamponi dell'utente<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> Trattasi in particolare di 2 spine cilindriche poste, a distanza nota, su una base in acciaio.

<sup>6</sup> Misurando con lo stesso calibro diversi tamponi certificati, si possono rilevare delle differenze anche di 0,5 µm tra i vari valori, a causa dell'incertezza di misura ammessa dall'Ente Certificatore (normalmente ±0,25 µm).

### Insensibilità alla temperatura ambiente

Il particolare sistema di autocalibrazione basato su tampone in acciaio consente inoltre di compensare completamente l'errore di misura dovuto a variazioni di temperatura ambiente: il riferimento nel calibro ed il filo da misurare, avendo lo stesso coefficiente di dilatazione lineare, saranno soggetti alla stessa dilatazione proporzionale e la lettura del calibro non cambierà al variare della temperatura ambiente. Si può infatti dimostrare che la variazione di diametro totale letta dal calibro  $\frac{\Delta\Phi}{\Phi_0}$  è la somma di due contributi, una dovuta alla dilatazione vera e propria del filo e l'altra, di segno opposto, legata alla dilatazione del riferimento nel calibro:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi_0} \cong \alpha_f * (T_f - T_0) - \alpha_r * (T_a - T_0)$$

essendo:

$\alpha_f$  = coefficiente di dilatazione termica del filo

$\alpha_r$  = coefficiente di dilatazione termica del riferimento interno

$T_f$  = temperatura del filo

$T_a$  = temperatura ambiente

$T_0$  = temperatura di riferimento, 20 °C

Poiché  $\alpha_f \cong \alpha_r$ , la formula precedente può semplificarsi e diventa:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi_0} \cong \alpha_f * (T_f - T_a)$$

Dunque l'errore di lettura è proporzionale al coefficiente di dilatazione termica del filo  $\alpha_f$  ed alla differenza tra la temperatura del filo  $T_f$  e la temperatura ambiente  $T_a$ .

Il solo errore legato in qualche modo alla temperatura dipende dal fatto che, a causa del riscaldamento durante la trafilatura, il filo si trova normalmente ad una temperatura superiore alla temperatura ambiente.

Considerando che per l'acciaio  $\alpha \cong 11 * 10^{-6}$  si vede che, anche ipotizzando un riscaldamento del filo di ben 100 °C, la variazione di diametro  $\Delta\Phi$  sarebbe dell'ordine di  $0,001 * \Phi$ , ovvero 1  $\mu\text{m}$  per un filo da 1 mm e di 0,3  $\mu\text{m}$  per un filo da 0,3 mm.

Inoltre, poiché il riscaldamento del filo dipende dalle caratteristiche del processo (diametro, riduzione, velocità, lubrificazione, ecc.), è facile comprendere che questo tipo di errore è da considerarsi, per ogni tipo di filo, alla stregua di una costante di cui è facile tener conto nella programmazione del diametro nominale e delle tolleranze. (fig.8)

## Immunità allo sporco

Una delle maggiori difficoltà incontrate durante lo sviluppo del calibro ALS12XY è stata sicuramente la ricerca di una valida soluzione per rendere il calibro immune all'effetto di polvere od altra sporcizia depositata sulle finestre ottiche.

È noto infatti che il punto debole di tutti gli strumenti ottici è costituito dalla loro inevitabile sensibilità alla sporcizia ed in generale a qualsiasi agente contaminante (polvere, goccioline d'acqua e olio, ecc.) che, depositandosi sulle finestre ottiche determina progressivo decadimento del segnale fino ad un totale "oscuramento" dello strumento.

Ed è proprio la trafilatura una degli ambienti meno adatti all'utilizzo di strumenti ottici in genere, a causa della presenza di polvere o spray di lubrificante all'uscita dell'ultima filiera, proprio in corrispondenza del misuratore di diametro.

In particolare nelle trafilature a bagno questo spray di lubrificante misto a particelle di metallo viene trascinato dal filo e proiettato contro il calibro laser che, necessariamente per ragioni di spazio, dev'essere montato proprio in prossimità dell'ultima filiera.

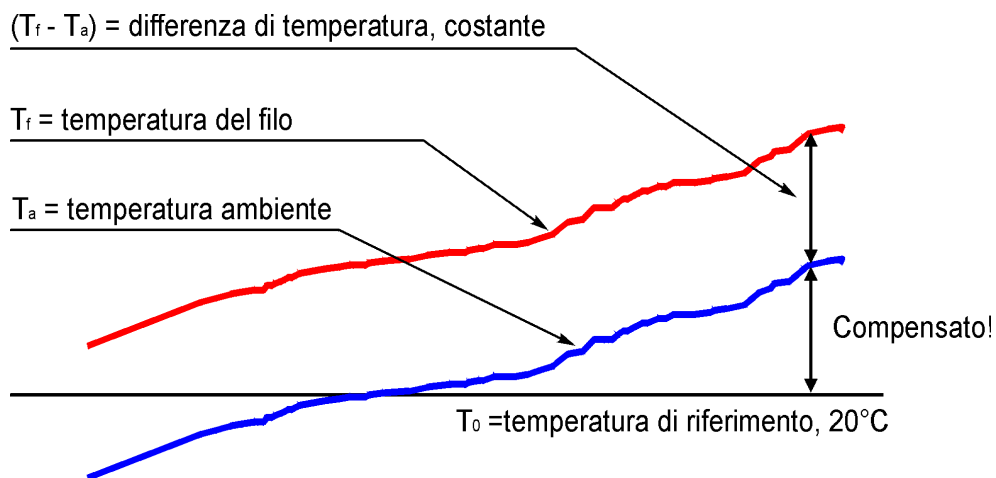


Fig. 8 - Insensibilità ai cambiamenti della temperatura ambiente

Vani si sono rivelati tutti i tentativi di utilizzare schermi meccanici e, d'altra parte, l'adozione di barriere pneumatiche alimentate ad aria compressa, dato l'elevato numero di calibri da installare, avrebbe costituito un notevole aggravio di costi per l'utente, sia in fase di installazione (tubazioni, filtri, ecc.) che durante la gestione corrente (consumo d'aria, manutenzione filtri, ecc.).

Infatti le barriere pneumatiche ad aria compressa, per essere efficaci, debbono essere alimentate continuamente, con aria assolutamente secca e priva d'olio, ottenibile solo dopo un filtraggio con filtri ad alte prestazioni (prefiltri e filtri a carbone attivo), molto costosi e soggetti a periodica manutenzione (cambio delle cartucce). L'utilizzo, anche temporaneo, di aria non perfettamente pulita, determina una velocissima contaminazione delle finestre ottiche e peggiora drasticamente la situazione.

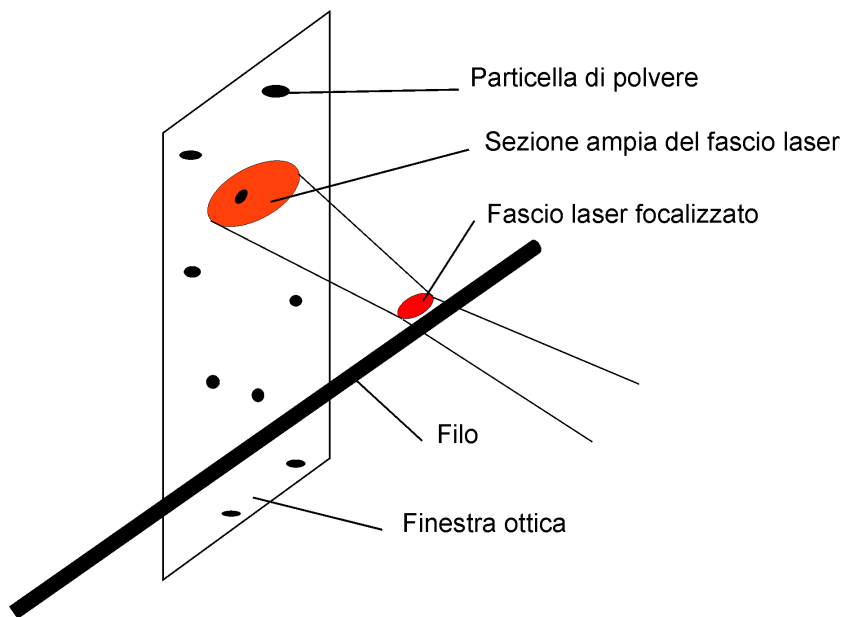
Così, invece di affidarsi a sistemi di protezione pneumatici, si è deciso di affrontare questo problema già nella fase di sviluppo del calibro, orientando il progetto ottico ed elettronico in modo tale da ottenere un calibro con spiccata immunità alla polvere.

Questa caratteristica è stata ottenuta grazie alla combinazione sinergica di due fattori.

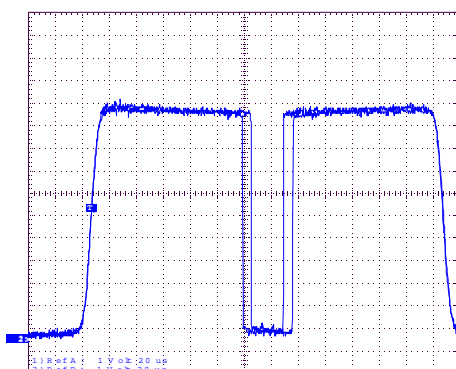
1) Lo schema ottico del calibro è congegnato in modo tale da produrre uno spot laser di forma ellittica ed a larga area sulle finestre ottiche, focalizzandolo invece in corrispondenza del filo. Singoli granelli di polvere o goccioline di emulsione presenti sulle finestre, essendo di area molto piccola rispetto allo spot laser, provocano un'attenuazione solo parziale dell'intensità totale del segnale, proporzionale al rapporto area particella/area spot laser.

Anche una serie numerosa di granelli di polvere, pur provocando un'attenuazione sensibile del segnale, non darà comunque luogo a brusche variazioni di intensità durante la scansione. (Fig. 9)

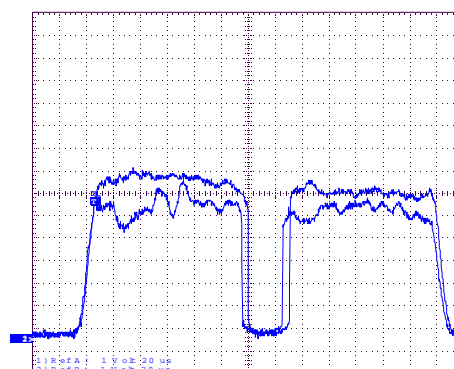
2) È stata messa a punto ed adottata una nuova ed innovativa tecnica di elaborazione elettronica del segnale ottico (segnale "video") che consente di determinare correttamente la durata dell'ombra del filo (e dunque il suo diametro), anche a partire da un segnale fortemente distorto ed attenuato dalla polvere.



**Fig. 9: Schema ottico**



Segnale video con calibro pulito  
Valore misurato = 2,0000 mm



Segnale video con calibro sporco  
Valore misurato = 1,9996 mm

Fig. 10 - Registrazione del segnale video durante un test effettuato per provare l'immunità allo sporco

Inoltre, risultato oltremodo apprezzabile, questa stessa tecnica, per sua specifica caratteristica circuitale, fa in modo che, in presenza di contaminazione eccessiva, non vi possano essere misure incerte o erronee ma piuttosto venga segnalata una condizione di errore di misura, che richiede l'intervento dell'operatore per la pulizia del calibro.

Grazie a queste specifiche caratteristiche è stato possibile installare i calibri sulle trafilature, senza alcun bisogno di protezioni ad aria compressa, garantendo un intervallo di pulizia minimo di 10 giorni, senza alcun rischio di errore apprezzabile determinato dallo sporco. (Fig. 10)

### Insensibilità a velocità e vibrazione del filo

Un altro aspetto da considerare attentamente nell'applicazione specifica è l'influenza della velocità e della vibrazione del filo sulla precisione di misura. Per quanto riguarda il primo effetto, come già spiegato in precedenza, esso si traduce solamente nel fatto che il diametro letto dallo strumento risulterà essere il valor medio lungo un tratto di filo dipendente dalla velocità di trafilatura e dal tempo di media (tipicamente trattasi di 10-20 m per 1 sec. di media). Poiché il diametro varia con molta lentezza, si può concludere che la velocità di scorrimento del filo non avrà alcun effetto sulla misurazione.

Diverso e più complesso è invece l'effetto della vibrazione del filo.

In generale la vibrazione può dar luogo a tre tipi di errori concomitanti che analizzeremo separatamente nel seguito.

#### 1) Errore di non linearità,

dovuto allo spostamento dell'asse del filo: durante il tempo di media il filo si trova in posizioni diverse all'interno del campo di misura.

Poiché il calibro può essere affetto da un errore di non linearità, a diverse posizioni possono corrispondere diversi valori misurati: l'errore massimo dipende ovviamente dall'entità dello spostamento e dalla linearità del calibro. A priori quest'errore può essere anche dello stesso segno, pur per spostamenti simmetrici rispetto al centro campo. Dunque nell'arco del tempo di media, ogni singola misura effettuata fuori centro potrebbe essere affetta da errore e la loro sommatoria potrebbe dare un risultato non nullo, introducendo un errore anche nella lettura del diametro medio. La sola possibilità per contenere questo tipo di errore è di ridurre la non linearità del calibro entro limiti accettabili e/o ridurre l'ampiezza della vibrazione.

Per il calibro ALS12XY, ed il campo di diametri di nostro interesse, quest'errore, all'interno di un campo di 5x5 mm, risulta inferiore a  $\pm 0,5\mu\text{m}$ , riducendosi ulteriormente a  $\pm 0,2\mu\text{m}$  in un campo di 2 x 2 mm. D'altra parte è generalmente possibile ridurre l'ampiezza della vibrazione e limitarla a qualche millimetro, semplicemente guidando il filo prima e dopo il calibro, con due apposite pulegge. In pratica questa componente di errore indotto da vibrazione è stato limitato a  $\pm 0,2\mu\text{m}$ .

### 2) Errore dovuto all'inclinazione dell'asse del filo.

La vibrazione del filo determina una variazione dell'inclinazione dell'asse lungo il filo stesso, tra le due pulegge di guida. Tuttavia, poiché normalmente l'oscillazione avviene sull'armonica fondamentale, posizionando il calibro a metà tra le due pulegge, l'asse del filo non si inclina. Inoltre, poiché questo tipo di errore è proporzionale all'inverso del coseno dell'angolo di inclinazione, esso si mantiene molto piccolo per piccoli angoli, quali quelli determinati da un'oscillazione di modesta ampiezza.

### 3) Errore dovuto alla composizione di velocità.

La vibrazione genera una componente di velocità perpendicolare all'asse del filo e giacente sul piano di vibrazione, il quale a sua volta può variare in modo casuale. La componente di questa "velocità di vibrazione" lungo la direzione di movimento del raggio laser (direzione di scansione), si combina con la velocità di scansione del raggio laser stesso (molto alta ma non infinita).

Questo effetto di composizione di velocità dà luogo, sulla singola misurazione, ad errori di misura che possono essere sia positivi che negativi, a seconda delle reciproche direzioni delle velocità che si compongono, secondo la seguente formula:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi} = \frac{\left(\frac{V_0}{V_L}\right)}{\left(1 \pm \frac{V_0}{V_L}\right)} \cong \left(\frac{V_0}{V_L}\right)$$

essendo:

$V_0$  = componente della velocità di oscillazione lungo la direzione di scansione

$V_L$  = velocità del raggio laser, pari a 65 m/s per il calibro ALS12XY

A sua volta, ipotizzando un'oscillazione armonica, il valore di picco della velocità di vibrazione è dato dalla:

$$(V_0)_{\max} = A_0 * f_0 * \pi$$

essendo:

$A_0$  = ampiezza totale (picco - picco) dell'oscillazione

$f_0$  = frequenza di vibrazione, Hz

Dalle formule precedenti si può ad esempio calcolare che, per una vibrazione a 20 Hz, di ampiezza totale 4 mm ( $\pm 2$  mm) e per un diametro del filo di 0,5 mm, il massimo errore possibile, per una singola misura, risulta essere, nel peggiore dei casi, ben  $\pm 2\mu\text{m}$ . Fortunatamente questo tipo di errore è di segno opposto nei due semiperiodi di oscillazione: è allora intuitivo comprendere che una media, effettuata su di un numero sufficientemente grande di misurazioni, porterà ad una cancellazione quasi totale dell'errore sul diametro medio. E questo è vero sia nel caso in cui la frequenza di scansione risulti più alta della frequenza di oscillazione e la media comprenda alcuni cicli di oscillazione, sia nel caso opposto in cui la frequenza di scansione risulti più bassa della frequenza di oscillazione, poiché nella media verranno incluse misure effettuate a diversi angoli di fase ed affette da errori di segno opposto.



L'unica situazione sfavorevole si avrebbe in corrispondenza di una perfetta uguaglianza tra le due frequenze o le loro armoniche: caso quanto mai improbabile, dato che anche un battimento tra frequenze assai prossime è caratterizzato comunque da una variazione lenta ma continua dell'angolo di fase che darebbe luogo, anche se in un tempo di media più lungo, a misure di segno opposto che nella sommatoria si annullano.

Quanto sopra esposto può essere calcolato tradotto in termini quantitativi dalla seguente formula:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi} \cong \pm\alpha * \left( A * f_s * \frac{\pi}{V_L} \right) * G(n, \omega) = \pm\alpha * 0,058 * G(n, \omega)$$

essendo:

$\alpha$  = ampiezza dell'oscillazione (picco - picco),  
 espressa in frazione del campo di misura ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )  
 A = campo di misura del calibro (12 mm)

$V_L$  = velocità del raggio laser (65 m/s)

n = numero di scansioni di media

$\omega = \frac{f_o}{f_s}$  = rapporto tra frequenza oscillazione e

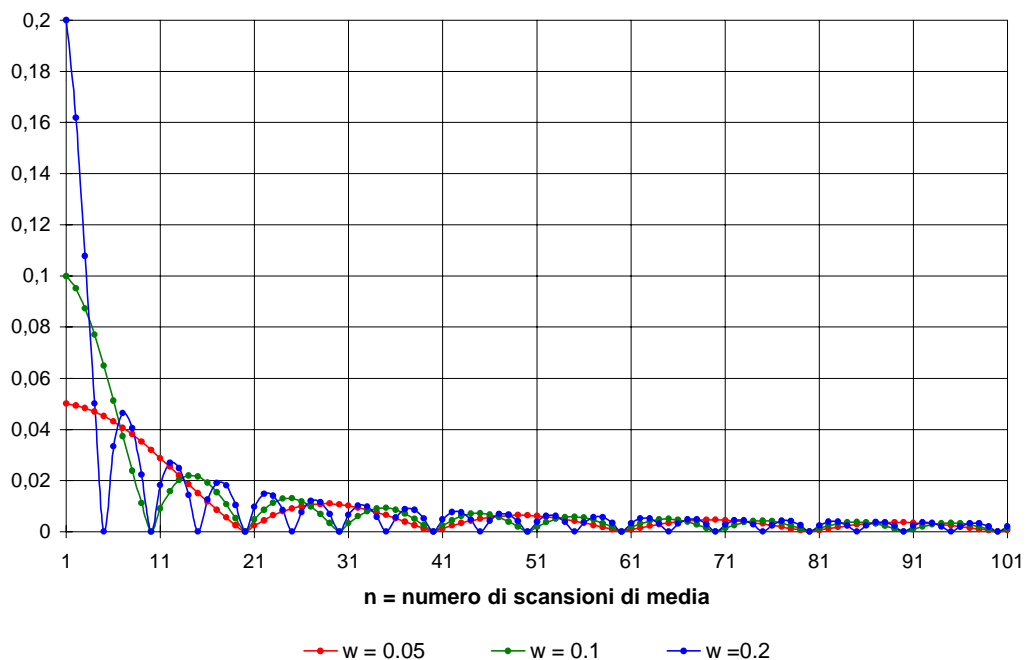
frequenza di scansione (100 Hz)

G (n,  $\omega$ ) = funzione di n ed  $\omega$

La funzione G (n,  $\omega$ ) non può essere espressa in termini analitici ma solo calcolata numericamente; nella allegata figura (Fig. 11) si riportano gli andamenti di questa funzione calcolata per alcuni valori di  $\omega$ , in funzione del numero di scansioni incluse nella media.

Ad esempio nel caso di  $\omega = 0,2$ , corrispondente ad una frequenza di vibrazione di 20 Hz., anche considerando un'ampiezza pari all'intero campo di misura, ovvero  $\alpha = 1$ , si trova che già una media di 20 scansioni limita il massimo errore  $\Delta\Phi/\Phi$  a  $\pm 0,0011$ , cioè circa  $\pm 0,5 \mu\text{m}$  per un filo da 0,5 mm.; se poi si estende la media a 100 scansioni, tale errore si riduce a meno di  $\pm 0,1 \mu\text{m}$

**Fig. 11 - FUNZIONE G( $\omega$ ,n)**



#### **4 - Risultati significativi ottenuti in Pirelli**

Da quanto precedentemente esposto, emerge chiaramente il fatto che il calibro ALS12XY rappresenta oggi una valida risposta alle richieste di misurazione di diametro in linea, provenienti da un sempre crescente numero di trafilatori di filo per steel-cord.

Ad ulteriore riprova ed a titolo di conferma "sperimentale", ottenuta sul campo, citiamo con piacere alcuni significativi risultati ottenuti in Pirelli, grazie ad un uso esteso dei ns. Sistemi Wireline, installati, dal 1992 ad oggi su oltre 130 trafilati per filo sottile, da 0,15 a 0,75 mm.

- 1) E' stato possibile ridurre la tolleranza sul diametro del filo da  $\pm 0,007$  mm a  $\pm 0,004$  mm.
- 2) Si è reso possibile l'impiego di macchine trafilatrici con cambio automatico della bobina di raccolta, con conseguente miglioramento dell'utilizzo del tempo/uomo di circa il 30 %.
- 3) È stato completamente eliminato lo scarto per non conformità del diametro.
- 4) È stato possibile ridurre la variabilità del peso/metro della cordicella (steel-cord) dal  $\pm 6$  % al  $\pm 3$  %.

- 5) Si è resa possibile la raccolta dati in tempo reale e la loro conseguente elaborazione automatica con computer collegati direttamente ai Sistemi di misura.
- 6) Gli strumenti installati si sono dimostrati affidabili al 100%

In conclusione si può dire che il misuratore di diametro installato direttamente in linea è un elemento importante per aumentare le possibilità competitive delle Aziende produttrici di filo trafilato, oltre che elemento fondamentale per il controllo di qualità al 100%.

Naturalmente per ottenere dei risultati che corrispondano alle aspettative è indispensabile usare calibri con un grado di eccellenza elevato e concepiti per funzionare correttamente anche in ambienti generalmente sfavorevoli al loro impiego.

#### **5 - Ringraziamenti**

Si ringraziano gli ingegneri Rocchi, Bulletti, Trinci e Massai della Società Pneumatici Pirelli per i loro consigli e la fattiva collaborazione durante la fase di sperimentazione e messa in servizio dei calibri laser a Figline Valdarno ed a Merzig.

Si ringrazia inoltre l'ing. Cipparrone per le preziose informazioni fornite a corredo e completamento di questa relazione.