

Prove estensimetriche su componenti

Th. Bortolamedi – La.T.I.F. Trento

L'estensimetria è a tutt'oggi una delle migliori tecniche non distruttive utilizzate per rilevare sperimentalmente gli stati tensionali di componenti meccanici. Negli anni questa tecnica ha raggiunto un notevole livello di perfezionamento con l'introduzione di nuovi materiali per gli estensimetri e di acquisitori molto stabili e compatti. Il controllo mediante estensimetri elettrici è uno strumento concreto e versatile che fornisce le necessarie informazioni per determinare lo stato di sollecitazione in zone critiche di elementi strutturali sottoposti ai carichi statici/dinamici previsti dalle condizioni di progetto e di prova. In quest'articolo si vogliono evidenziare le problematiche incontrate in questo tipo di misurazioni e le possibili soluzioni.

La storia.

Il principio di funzionamento degli estensimetri elettrici a resistenza ER si basa sul fatto che un materiale metallico, se sottoposto a sollecitazione, varia la propria resistenza elettrica. Sebbene questo fenomeno, *la piezoresistività*, fosse già stato descritto dal fisico inglese William Thomson a metà dell'800, solo a partire dagli anni 30 apparvero i primi estensimetri di serie, funzionanti sullo stesso principio. Furono due ricercatori americani, il prof. A. C. Ruge del M.I.T. e E. Simmons del California Institute of Technology, indipendentemente e negli stessi anni, a perfezionare la scoperta di Thomson.

Ad entrambi i ricercatori si era posto il problema di misurare deformazioni rapidamente variabili nel tempo cosa impossibile con gli estensimetri meccanici e ottici. Spinti da queste necessità, fabbricarono il primo estensimetro elettrico a resistenza incollando a zig-zag un filo di costantana su una cartina di sigarette ed applicandolo direttamente sul componente metallico. Gli estensimetri che si utilizzano oggi si basano sulla stessa configurazione; naturalmente i materiali che li compongono sono stati affinati, per avere misure sempre più precise e il loro impiego in condizioni estreme.

Altre tecniche per la misura della deformazione.

Oltre alla piezoresistività, possono essere utilizzati altri fenomeni fisici per misurare le deformazioni.

Gli *estensimetri meccanici* furono storicamente i primi ad essere utilizzati e si basano sostanzialmente sull'amplificazione, tramite leveraggi dell'allungamento assoluto ΔL , subito dal componente e non di quello unitario $\epsilon = \Delta L/L_0$, detta deformazione.

Il grosso ingombro e la risoluzione molto bassa ha portato ad abbandonare questo tipo di strumenti.

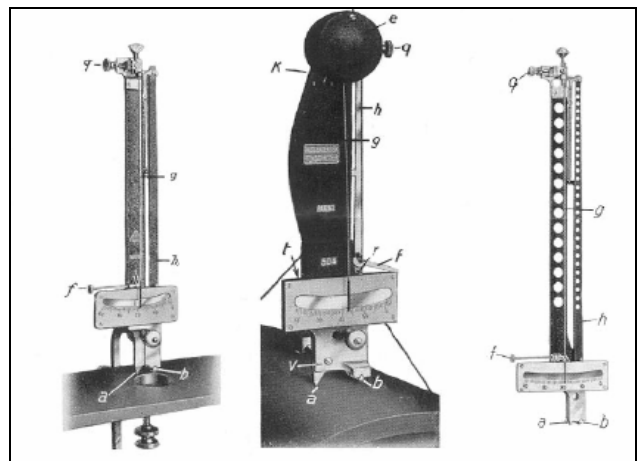


Figura 1 Misuratori di deformazione meccanici

Anche *l'effetto piezoelettrico* viene utilizzato per misurare deformazioni e quindi forze. Esso si basa sul fenomeno per cui si generano delle cariche elettriche

sulla superficie d'alcuni materiali (titanato di bario, quarzo) quando essi vengono deformati. La tecnologia piezoelettrica non è influenzata da campi magnetici e da radiazioni e presenta un'eccellente linearità anche in condizioni severe. Tuttavia i sensori piezoelettrici possono essere impiegati solo in misure quasi-statiche e dinamiche perché in queste condizioni non si ha dispersione di carica sull'elemento sensibile e quindi perdita di segnale. I *sensori a fibra ottica* di Bragg si basano sulla variazione della lunghezza d'onda della luce ultravioletta riflessa in seguito a deformazione dell'elemento sensibile. Questa tecnica è abbastanza recente e oltre vantaggi quali poter misurare alte deformazioni in zone a rischio esplosivo o in ambienti con forti interferenze elettromagnetiche, presenta dei punti deboli: primo fra tutti l'elevata dipendenza dalla temperatura d'esercizio.

Accanto agli estensimetri a griglia metallica esistono anche quelli *a semiconduttore*, che trovano impiego per misure con basse deformazioni. Tuttavia non sono largamente utilizzati nell'analisi sperimentale delle sollecitazioni, a causa del comportamento non lineare, dalla dipendenza della temperatura e dalla loro fragilità.

Relazioni fondamentale degli estensimetri.

La variazione specifica di resistenza R , della griglia estensimetrica varia linearmente con la deformazione unitaria. Pertanto se si grafica $\Delta R/R$ su ε otteniamo una retta passante per lo zero con coefficiente angolare K della retta costante, che rappresenta la sensibilità dell'estensimetro e prende il nome di gage factor.

La relazione che lega la deformazione alla variazione di resistenza è:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Il coefficiente K è misurato sperimentalmente dal produttore di estensimetri ed ha valori variabili tra 2 e 6 a seconda di che lega è costituita la griglia.

Per misurare la variazione di resistenza di un estensimetro sottoposto a sollecitazione si ricorre al ponte

di Wheatstone. La relazione che correla lo sbilanciamento del ponte e la variazione di resistenza è la seguente:

$$\frac{mV}{V} = \frac{K \cdot B}{4} \cdot \varepsilon \quad (2)$$

dove con B si intende fattore di ponte che assume valori unitari a seconda della disposizione degli estensimetri sul componente. Le equazioni sopra non riportano eventuali coefficienti correttivi necessari a prevenire fenomeni di non linearità o di sensibilità trasversali. In misurazioni con sollecitazioni monoassiali e deformazione 0,4÷0,5% queste correzioni sono trascurabili.

Tipi di estensimetro, collanti, protettivi.

Un estensimetro elettrico a resistenza è sostanzialmente costituito da due componenti: il supporto e la griglia.

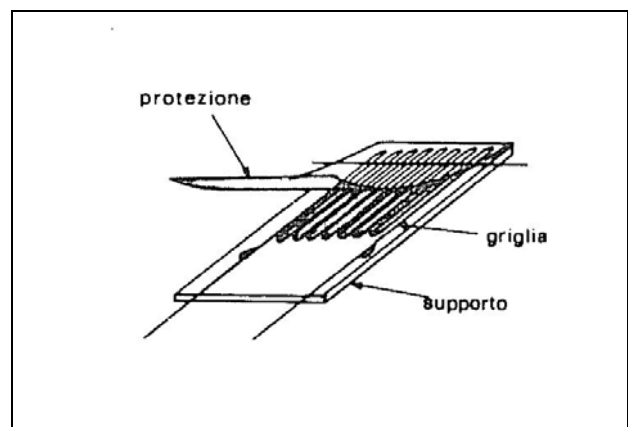


Figura 2 Estensimetro

Il supporto è il materiale sul quale viene incollato il filo estensimetrico oppure fotoincisa la griglia. Esso ha il compito di trasmettere alla griglia le deformazioni del pezzo sul quale viene applicato. In commercio esistono estensimetri con supporti di poliammide, fibra di vetro rinforzata con resina fenolica, resina acrilica, cellulosa; la scelta del supporto viene fatta in base all'applicazione.

La griglia è la parte sensibile alle variazioni di resistenza elettrica prodotte dalle deformazioni e trasmesse dal pezzo tramite il supporto. Il materiale della griglia varia a seconda delle applicazioni, il più utilizzato è la costantana una lega rame-nickel come l'advance; se si lavora a temperature elevate il materiale consigliato è il nichromo

mentre per misurazioni dove si richiede una elevata resistenza a fatica e stabilità bisogna impiegare leghe quali isoelastico o karna.

Le dimensioni longitudinali degli estensimetri metallici possono variare dal millimetro a qualche centimetro e la loro resistenza tra circa 120 Ω a circa 1000 Ω .

La scelta della resistenza risulta importante quando si lavora su materiali che dissipano poco calore (es. plastiche, legno) in quanto l'estensimetro, essendo alimentato con voltaggi 0,5-10 Volt, deve poter dissipare il calore generato dal passaggio di corrente tramite il materiale su cui è incollato per evitare errori dovuti a derive termiche. Esistono tabelle che riportano per lo specifico estensimetro gli idonei valori di densità di potenza [W/mm^2], applicabili a seconda del materiale di prova:

$$V = 2 \cdot \sqrt{R \cdot P \cdot A} \quad (3)$$

In questa relazione compare la tensione di alimentazione V in funzione della resistenza dell'estensimetro R , dell'area della griglia A e della densità di potenza generata P .

Abbiamo visto che i materiali che costituiscono il supporto della griglia sono molteplici ed essi devono avere particolari affinità chimica nei confronti dei collanti impiegati per installare l'estensimetro. Gli adesivi sono quindi costituiti da resine che hanno la stessa matrice chimica del supporto. I collanti hanno la proprietà di polimerizzare facilmente costituendo legami molecolari con i materiali della base. I più utilizzati per la loro facilità di applicazione in quanto polimerizzano a freddo esercitando una moderata pressione, sono quelli a base di cianoacrilato; per la costruzione di sensori si utilizzano le colle epossidiche o fenoliche che richiedono una polimerizzazione con cicli termici e pressioni note sull'estensimetro durante l'incollaggio.

Per una buona riuscita dell'incollaggio è determinante la preparazione della superficie che può essere fatta sia per via chimica che meccanica.

Alla fine dell'installazione e del cablaggio, per poter proteggere l'estensimetro da urti, abrasioni meccaniche e da infiltrazione di umidità tra il supporto e il materiale base è sempre consigliabile coprire il punto di misura con resine poliuretatiche, siliconiche, lacche di gomma o fogli di alluminio con massa plastica.

Suggerimenti per una corretta installazione.

Come accennato prima, l'assenza di umidità tra supporto dell'estensimetro e materiale in prova, è un elemento fondamentale per il buon funzionamento. È consigliabile avere valori di isolamento tra estensimetro e componente prossimi a 20.000 $M\Omega$ a temperatura ambiente. L'umidità non favorisce valori di isolamento elevati e cambiando nel tempo, crea segnali fittizi di deformazione. Questo fenomeno risulta maggiormente evidente con estensimetri con resistenze nominali elevate, installati in ambienti all'aperto.

Quando si utilizzano colle a base di cianoacrilati, con temperature prossime allo zero, è consigliabile utilizzare degli acceleranti che vengono applicati tramite pennello nella zona preparata all'incollaggio. In questo tipo di adesivi il processo di polimerizzazione è avviato da tracce di umidità presenti sulla superficie aderente.

Nella scelta dell'estensimetro la lunghezza della griglia deve essere commisurata al gradiente di deformazione. In applicazioni volte a misurare sollecitazioni di picco (ad esempio in corrispondenza di intagli, fori, variazioni geometriche, cordoni di saldatura) si impiegano estensimetri con lunghezza di griglia inferiore ai 1,5 mm. Su componenti meccanici costituiti da materiali omogenei con distribuzione regolare della deformazione, si utilizzano prevalentemente estensimetri con griglie da 3-6 mm autocompensati in temperatura per il materiale su cui vanno applicati.

Se non si esegue l'operazione di tracciatura per definire la direzione dell'ER rispetto alle direzioni principali, si incorre in errori di posizionamento angolare. L'errore di misura risulta:

$$e = \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_q}{2} [\cos 2(\alpha + \beta) - \cos 2\alpha] \quad (4)$$

dove ε_p è la deformazione principale massima, ε_q la deformazione principale minima, α la direzione di misura rispetto a quella principale e β l'errore di posizionamento. Nel caso di sollecitazione monoassiale questo errore è piccolo, dell'ordine 1% quando la direzione di misura coincide con una direzione principale ($\alpha=0^\circ$ o 90°), massimo, circa 12%, quando la direzione di misura è a 45° con le direzioni principali.

Molto importanti sono i controlli da attuare sull'estensimetro cablato. Per verificare le condizioni di incollaggio ed escludere presenza di bolle tra colla e supporto, si misura il segnale di uscita prima e dopo aver compresso la superficie dell'estensimetro con un dito o meglio ancora, con una gomma morbida. Se, tolta la pressione esercitata dalla gomma, il segnale non ritorna al valore iniziale, l'adesione è da ritenersi scadente e l'applicazione deve essere rieseguita.

La verifica della misura di deriva dallo zero deve essere protratta per un tempo pari alla durata della prova. La deriva del segnale indica o cattivo incollaggio o saldature eseguite male, o, se la misura è protratta per mesi, l'inizio di fenomeni corrosivi.

Il fenomeno dell'isteresi meccanica nell'applicazione estensimetrica dipende non solo dalla tipologia dell'estensimetro utilizzato ma anche dal tipo di collante e da tutti quei componenti che formano il punto di misura. L'esperienza mostra che l'isteresi diminuisce dopo 3-4 cicli di carico e scarico condotti al 125% del carico previsto.

Qualificazione del personale.

Il controllo tramite estensimetri elettrici a resistenza deve essere effettuato da personale altamente qualificato che dimostri di avere padronanza della tecnica e del settore in cui viene impiegata. Oggigiorno le misure estensimetriche, assieme ad altre tipologie di prove (magneto induttivi, ultrasuoni, correnti indotte,

radioscopiche, liquidi penetranti), sono entrate a pieno titolo tra i controlli non distruttivi e seguono particolari normative europee (ISO 9712:2005), atte a certificare il personale che esegue questo tipo di controlli.

Condizionamento del segnale.

Nella trasmissione tra ER e acquirente, il segnale elettrico è insidiato da disturbi elettrici che possono falsare la misura. I disturbi sono generati da campi elettromagnetici presenti nell'intorno della catena di misura, oppure da piccolissime differenze di tensione fra i vari blocchi della catena. Il segnale, prima di essere utilizzato, deve essere privato dei disturbi presenti, quindi è indispensabile un'operazione di pretrattamento del segnale tramite un componente chiamato filtro.

I filtri sono classificati in:

- filtri passa-basso che permettono il passaggio delle armoniche, la cui frequenza è inferiore ad una frequenza detta di taglio ω_c .
- filtri passa-alto che permettono il passaggio delle armoniche la cui frequenza è superiore a ω_c .

Queste due tipologie di filtri possono avere andamenti con caratteristica Butterworth o Bessel: la scelta del filtro è discriminata dal gradiente di banda e dai tempi di intervento del filtro.

Nelle moderne apparecchiature il segnale analogico continuo, proveniente dai sensori, viene convertito in digitale. Durante questa operazione, se non viene scelta correttamente la frequenza di campionamento f_c e di filtro ω_c , si incorre nel fenomeno dell'aliasing, che porta a distorcere in maniera sensibile e irreversibile il segnale di partenza.

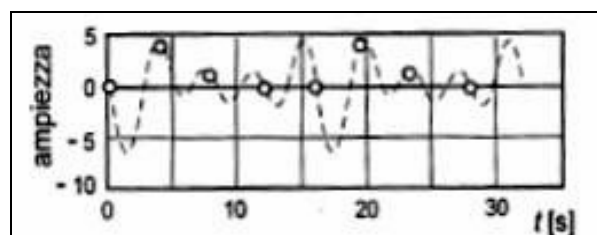


Figura 3 Campionamento errato

Una corretta procedura di campionamento è la seguente:

- stabilire la frequenza massima, f_N dell'armonica che si vuole mantenere, facendo un'analisi nel dominio della frequenza
- utilizzare un filtro passa-basso con frequenza di taglio superiore di un 20% a quella del segnale
- scegliere una frequenza di campionamento, f_c , tale che $f_c > 2 f_N$, secondo il criterio di Nyquist/Shannon

Calcolo dello sforzo partendo dalla deformazione.

Supponendo di aver misurato le deformazioni in campo elastico lungo le direzioni principali e conoscendo il coefficiente di proporzionalità tra sforzo e deformazione, E , modulo di Young specifico dal materiale, tramite la legge di Hooke per stato uniassiale otteniamo la tensione:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (5)$$

In caso di stato biassiale, considerando il coefficiente di contrazione trasversale di Poisson ν e le deformazioni ε_1 , ε_2 lungo le due direzioni principali, abbiamo le tensioni σ_1 , σ_2 :

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_1 + \nu \cdot \varepsilon_2) \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_2 + \nu \cdot \varepsilon_1) \end{aligned} \quad (6)$$

Ulteriori approfondimenti si possono trovare nell'articolo in bibliografia [6] dove vengono trattate le formule per trovare le deformazioni e le direzioni principali utilizzando rosette estensimetriche.

Applicazione estensimetrica su vettura per telecabina.

La tecnica estensimetrica è utilizzata nel settore funiviario per quantificare le componenti statiche e dinamiche di sollecitazione che si generano sugli elementi strutturali delle cabine. I punti su cui installare gli ER vengono scelti dal progettista, in base a modelli agli elementi finiti, FEM, o dove si ritiene che la sollecitazione superi il coefficiente di sicurezza stabilito da progetto.

Gli ER sono adatti ad essere installati in zone vicine a fori, intagli (freccia alta fig. 5), o su superfici con profili complessi come quello del montante raffigurato in fig. 5 freccia bassa.

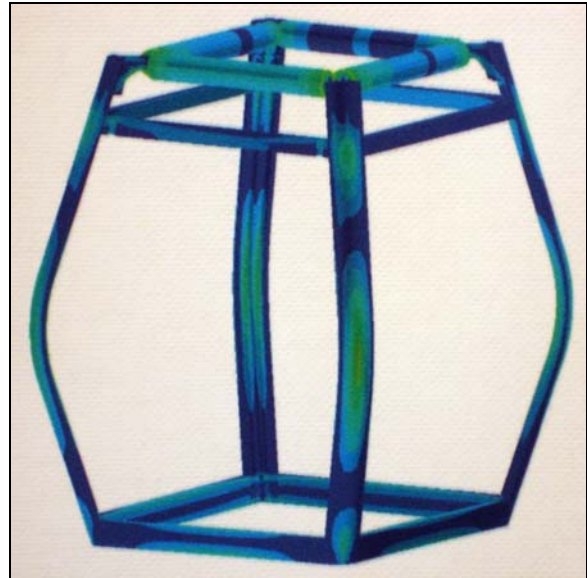


Figura 4 Simulazione FEM struttura cabina

In questo genere di applicazione le temperature di lavoro non sono critiche (0-30°C), le deformazioni massime sia in trazione che compressione sono lontane dall'elongazione massima tollerate dall'ER. L'estensimetro scelto è con monogriglia da 3-6 mm in costantana su supporto in poliammide con resistenza 120 Ω . L'installazione, fatta sull'impianto, utilizza un collante a polimerizzazione a freddo. La misura viene fatta in giornata quindi il cianoacrilato rappresenta l'adesivo ideale per installazioni rapide, mentre è inadatto ad impiego in monitoraggi per decadimento delle sue prestazioni nel tempo.

Il materiale di costruzione delle cabine è Fe S335 zincato e Al 6082 verniciato: prima dell'operazione di pulizia ed incollaggio è necessario rimuovere completamente questi ricoprimenti con carta vetrata, dalla zona sui cui si vuole installare l'ER.



Figura 5 ER su elementi della cabina

Per assestare gli estensimetri si sovraccarica la cabina con pesi corrispondenti ad un numero di persone maggiore del consentito (80 kg per persona), e si controlla il ritorno a zero e la stabilità del segnale dei vari punti di misura.

Naturalmente, se tutta la catena di misura funziona correttamente, si comincia a caricare la cabina con carichi noti e si verifica la proporzionalità carico-deformazione. Se qualche elemento dovesse plasticizzare, scaricando la vettura, gli estensimetri non ritornerebbero a zero. È comunque rarissimo che nelle cabine utilizzate per il trasporto persone progettate con coefficienti di sicurezza pari a 3, si deformi permanentemente qualche elemento per sovraccarico.

Accanto alla misura statica i progettisti sono interessati a fare una verifica a fatica della cabina. Acquisendo le deformazioni con varie configurazioni di carico in regime dinamico, si riesce a costruire la storia di carico della vettura durante un giro completo da valle a monte e ritorno.

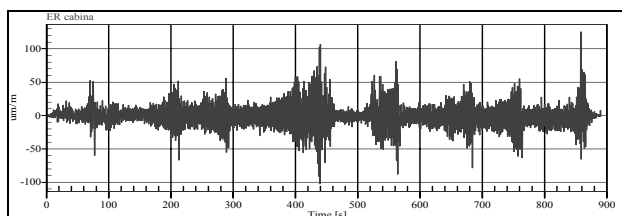


Figura 6 Spettro di carico di cabina

Seguendo alcuni metodi (Miner, Δ equivalente) il progettista riesce a fare la stima della vita del componente.

In questo tipo di misure è importantissimo scegliere la frequenza di campionamento adatta al fenomeno fisico che si vuol misurare; la velocità massima che raggiunge la vettura in linea è di 6 m/s, gli urti che si rilevano coinvolgono strutture di una certa massa, quindi campionando a 300 Hz si riesce a non perdere nessuna informazione e ad avere dei file di dimensioni ridotte. La scelta di questo intervallo di campionamento deriva anche da comparazioni di misure fatte a varie frequenze di acquisizione.

Per facilitare la trattazione dei dati, le moderne apparecchiature generano accanto al file di misura, un file con dimensioni 10000 volte più piccolo, che contiene tutti i valori massimi e minimi dello spettro di deformazione; la “visualizzazione” di questo file è immediata e garantisce la bontà della misura.

Eseguendo misure statiche e dinamiche il costruttore compie una verifica strutturale del componente nelle sue reali condizioni di utilizzo, cosa che non può esser fatta da una pura simulazione al computer.

Riferimenti bibliografici e norme.

- [1] Karl Hoffmann “An introduction to measurements using strain gages” Hottinger Baldwin Messtechnik, Darmstadt
- [2] “Estensimetri elettrici a resistenza – Manuale per l’impiego e l’analisi dei risultati” C.N.R. – Bollettino ufficiale A. XXIII – n°131
- [3] A. L. Window, G. S. Holister “Strain gauge technology” Applied Science Publishers
- [4] R. L. Hannah, S. E. Reed “Strain gauge users’ handbook” Elsevier Applied Science
- [5] R. Schicker, G. Wegener “Measuring torque correctly” HBM
- [6] S. Keil, “Stress calculation from measured strains in the elastic deformation range” Fundamentals of strain-gage application
- [7] Th. Bortolamedi, F. Degasperis, A. Dallago “Metodologia per prove estensimetriche su veicoli funiviari” Quota Neve n°142 novembre-dicembre



[8] UNI 10478 Prove non distruttive – Controllo mediante estensimetri elettrici a resistenza

[9] UNI 10659 Prove non distruttive – Controllo mediante estensimetri elettrici a resistenza degli apparecchi a pressione e di sollevamento - generalità