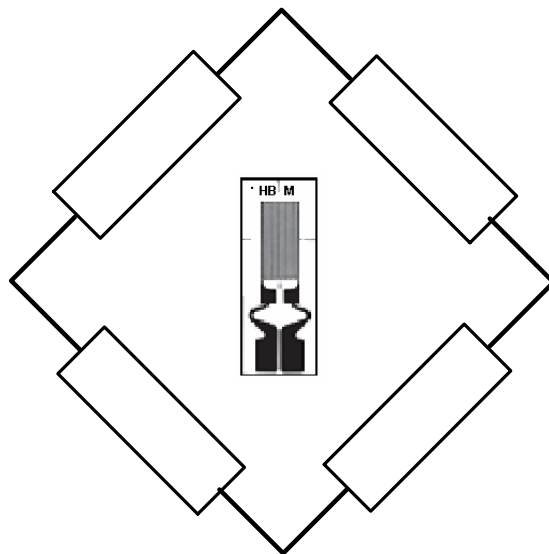


Karl Hoffmann

INTRODUZIONE ALLA TECNICA DI MISURA CON GLI ESTENSIMETRI



172 figure e tabelle

Edizione italiana a cura di Mauro Filippini

Publisher:

Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt

EDIZIONE ORIGINALE

Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen

© 1987 Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt

EDIZIONE ITALIANA

Traduzione di HBM Italia s.r.l.

Revisione tecnico-scientifica a cura di Mauro Filippini

© Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 2008

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte del libro può essere riprodotta o diffusa con un mezzo qualsiasi, fotocopie, microfilm o altro, senza il permesso scritto dell'editore.

All rights reserved. The reproduction and distribution of this publication either in full or in part, including both text and illustrations, in any form whatsoever is only permitted with expressed written permission from the publisher.

Darmstadt 2008

1 INTRODUZIONE

Solitamente la misurazione di parti di macchine, costruzioni, veicoli, velivoli ecc. (in generale di elementi strutturali) si basa sul calcolo della resistenza dai materiali.

Questo metodo risulta soddisfacente quando sono noti tipo ed entità della sollecitazione a cui gli elementi sono sottoposti, mentre insorgono problemi quando la sollecitazione è sconosciuta o può essere valutata solo in modo approssimativo. In passato si affrontava il pericolo di un sovraccarico con il sovradimensionamento. Ora invece le moderne strategie di progettazione richiedono notevoli risparmi di materiale per limitare sia i costi sia il peso; basti pensare alla tecnologia aerospaziale. Per soddisfare però le esigenze di sicurezza e di durata degli elementi strutturali, bisogna conoscere le sollecitazioni dei materiali ed è in quest'ambito che sono necessarie le misurazioni in condizioni di esercizio.

La grandezza da utilizzare per la valutazione della sollecitazione dei materiali è lo sforzo meccanico a cui essi sono sottoposti. Gli sforzi meccanici sono molto difficili da determinare in condizioni di esercizio. Il procedimento radiografico è adatto, ma soggiace a limitazioni di impiego. Un metodo utilizzabile per la determinazione sperimentale delle sollecitazioni dei materiali si basa su di una scoperta fatta già nel 1678 dallo scienziato inglese *Robert Hooke* (1635-1703) [1-1]. Egli trovò una relazione fra lo sforzo e l'allungamento da essa provocata. Questo allungamento chiamato "deformazione", si verifica anche sulla superficie degli oggetti ed è quindi possibile misurarla.

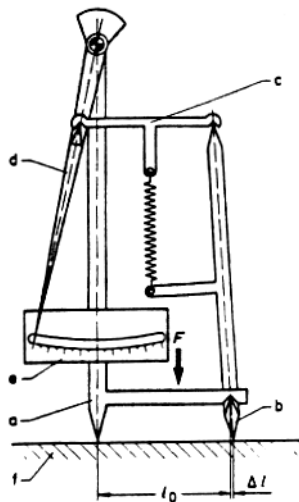
Sul principio della misurazione delle deformazioni si fonda un importante ramo dell'analisi sperimentale delle sollecitazioni.

Per la misurazione della deformazione si utilizzavano inizialmente strumenti meccanici molto complicati che moltiplicavano di mille volte e più il suo valore reale. Un esempio è mostrato nella fig.1.0 -1.

Per lungo tempo le misurazioni necessarie per l'analisi delle sollecitazioni dovettero essere effettuate con strumenti di questo tipo o altri simili. Nonostante la genialità e la precisione di alcune versioni di questi strumenti, essi presentavano degli svantaggi sistematici che limitavano fortemente il loro campo di applicazione e la loro importanza:

- Si possono osservare solo processi statici.
- Per evitare lo slittamento degli strumenti a causa di scosse sono necessarie notevoli forze di bloccaggio.
- Rispetto all'osservatore l'oggetto da misurare deve essere fisso.
- Le dimensioni degli strumenti limitano il loro impiego ad oggetti piccoli o lo rendono addirittura impossibile.
- Basi di misurazione relativamente lunghe consentono un risultato esatto solo in caso di deformazione uniforme. Concentrazioni di sforzi in zone molto ristrette non possono essere rilevate.

- Le condizioni locali possono essere non prevedibili per l'osservatore.
- Non è possibile la registrazione automatica dei valori misurati.



- a corpo dello strumento con coltello fisso
- b leva con coltello mobile
- c collegamento
- d indicatore a leva
- e scala
- f oggetto da misurare
- l_0 lunghezza della base
- Δl campo di misurazione

Figura 1.0-1: Estensimetro Huggenberger con rappresentazione schematica della doppia trasmissione di leve.

Fra tutte queste mancanze la maggiore era senz'altro il doversi limitare a misurazioni statiche. Solo procedimenti di misurazione elettrici potevano fornire un rimedio.

1.0.1. Estensimetri metallici

Nella seconda metà degli anni '30 ci si ricordò di un effetto già menzionato da Charles Wheatstone nel 1843 nella sua prima pubblicazione [1-2] sul circuito a ponte da lui inventato. Si trattava della variazione della resistenza in un conduttore elettrico per effetto della sollecitazione meccanica. *William Thomson* (1824-1905, dal 1892 *Lord Kelvin*) approfondì ulteriormente l'argomento in un lavoro pubblicato nel 1856 [1-3].

Il fatto che fossero trascorsi più di 80 anni prima che si giungesse ad un'utilizzazione pratica di questo fenomeno ha diverse ragioni.

La variazione della resistenza elettrica di un filo sottoposto ad una forza di trazione è minima. Per le sue misurazioni Thomson usò galvanometri altamente sensibili che non sono adatti per un impiego tecnico generico e tanto meno per quello industriale. Inoltre essi sono idonei solo per la misurazione di processi statici. Solo con la messa a punto degli amplificatori elettrici si vennero a creare le premesse necessarie.

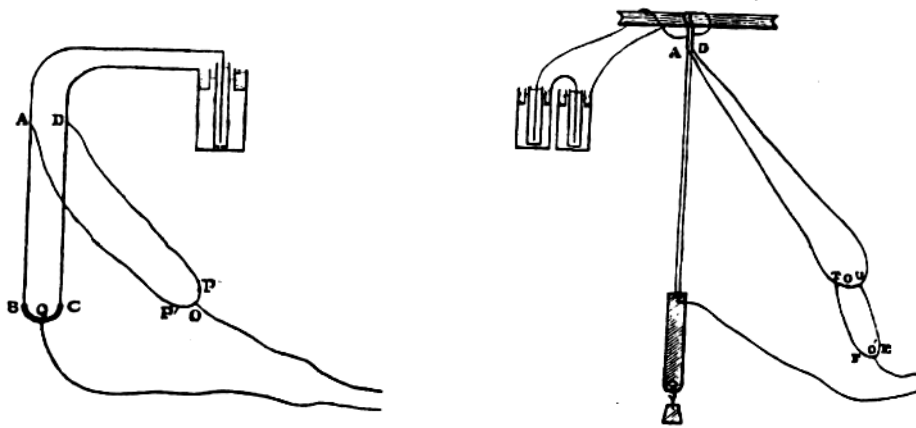


Figura 1.0-2: Struttura sperimentale di William Thomson per lo studio della variazione di resistenza di un conduttore elettrico sottoposto a sollecitazioni meccaniche. (Tratto da [1-3]).

In Germania i primi studi per chiarire il fenomeno vennero condotti dall'Istituto Sperimentale per l'Aviazione ma non vennero continuati. Le piastrine al carbonio per la misurazione degli allungamenti messe a punto dalla AEG si rivelarono poco utilizzabili.

Anche negli Stati Uniti intorno al 1938 due uomini si stavano interessando all'argomento. Essi tentavano infatti, nello stesso periodo ma separatamente, di utilizzare " l'effetto Thomson" per scopi di misurazione. Lo sviluppo che portò alla creazione dell'estensimetro ed alla sua diffusione è descritto chiaramente in [1-4].

In California, Edward E. Simmons utilizzò dei fili di seta come ordito ed un sottile filo per resistenze come trama, ottenendo così un tessuto che poi fece aderire isolato ad un cilindro d'acciaio. In questo modo egli creò uno strumento elettrico per la misurazione dell'urto causato da un pendolo sul provino. Figura 1.0-3.

Aug. 11, 1942. E. E. SIMMONS, JR 2,292,549
 MATERIAL TESTING APPARATUS
 Filed Feb. 23, 1940 2 Sheets-Sheet 2

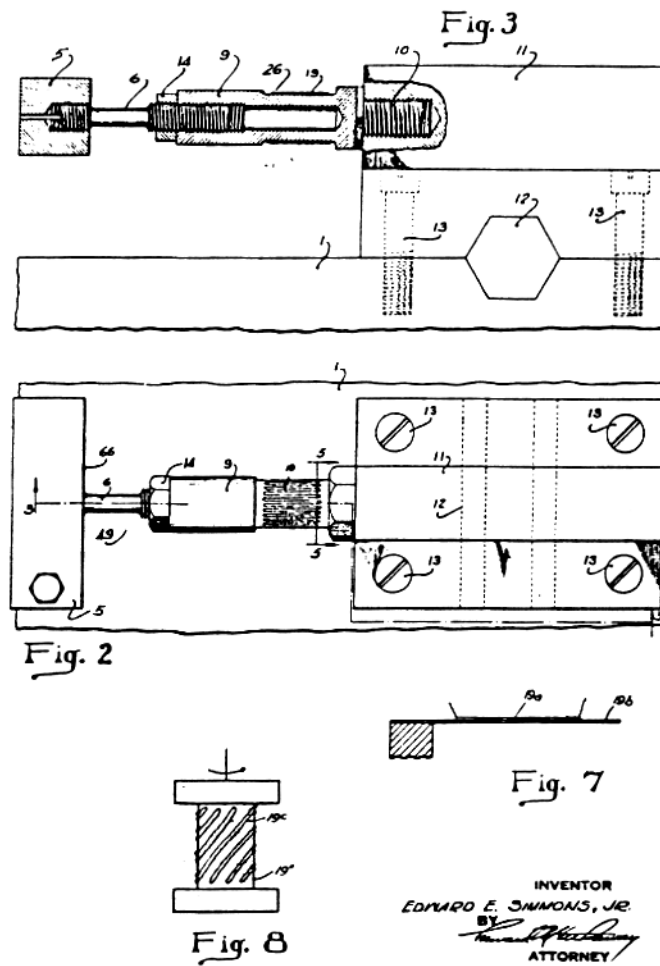


Figura 1.0- 3: Il dispositivo di misura delle forze di E.E. Simmons, tratto da [1-5].
 La forza impulsiva da misurare agisce nella direzione assiale.

Arthur Claude Ruge lavorava invece all'Istituto Sismologico del Massachusetts Institute of Technology e voleva misurare sul modello di un serbatoio d'acqua antisismico la sollecitazione causata da scosse sismiche simulate. Con questo modello dalle pareti molto sottili non era possibile impiegare gli strumenti di misurazione conosciuti poiché nessuno di essi era adatto. Come ultimo tentativo Ruge prese un sottile filo per resistenze, lo avvolse su se stesso facendolo aderire ad un pezzetto di sottile carta velina e dotò le estremità di connessioni più robuste. Per poter verificare le caratteristiche di questo strumento, lo fece aderire a una barra di flessione e confrontò i risultati così ottenuti con quelli ricavati da strumenti tradizionali. Egli riscontrò una buona concordanza, una relazione lineare fra l'allungamento - di tipo sia positivo che negativo (contrazione) - e l'indicazione nell'intero campo di misura ed una buona stabilità dello zero. Era stato così inventato l' "estensimetro a resistenza elettrica a griglia annegata". Questa forma iniziale è rimasta sostanzialmente invariata da allora.

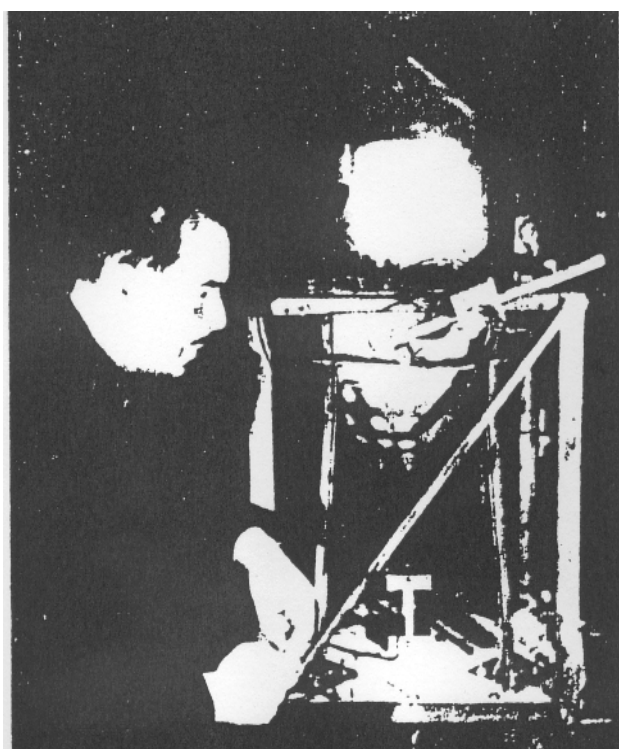
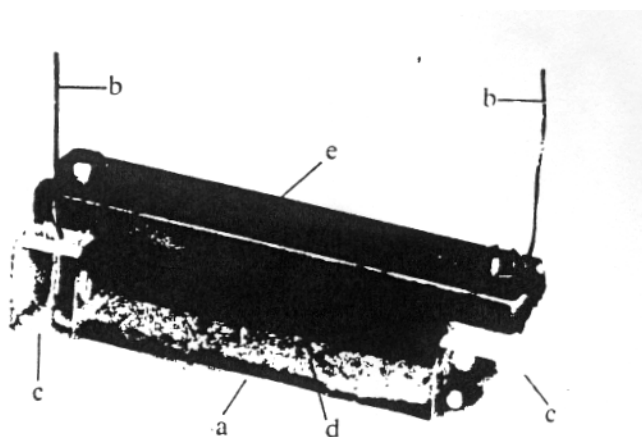


Figura 1.0-4: Arthur Claude Ruge, l'inventore dell'estensimetro, durante una delle sue misurazioni.

L'idea decisiva di Ruge, che lo aveva differenziato da Simmons, era l'aver fissato il filo di misura ad un materiale di supporto. In questo modo si era ottenuto uno strumento di misurazione indipendente e maneggevole che poteva essere applicato a qualsiasi superficie. Era molto leggero e sottile, non c'era bisogno di alcuna pressione e non aveva praticamente alcun effetto secondario, cosicché fu possibile misurare anche oggetti molto sottili. Con l'impiego di amplificatori elettrici si potevano effettuare misurazioni statiche e dinamiche. Già i primi esemplari sperimentali di estensimetro risultarono essere molto superiori agli strumenti tradizionali.

Un secondo merito di Ruge fu quello di perfezionare l'estensimetro, abbreviato con ER, rendendolo adatto alla produzione in serie e garantendo così in modo decisivo il suo trionfo. Per questo motivo non è esagerato definire Ruge il padre dell'estensimetro. Egli ebbe non solo l'idea iniziale ma anche la lungimiranza che gli permise di intravederne le immense possibilità di applicazione e la tenacia necessaria per fare dell'estensimetro un affidabile strumento per l'analisi delle sollecitazioni; campo a cui contribuì anche con i suoi lavori scientifici.

Inizialmente si pensava ancora che fosse necessario sostenere la gracile struttura con un telaio fisso e proteggere i sottili fili del diametro di solo 25 μm con una copertura di feltro. La figura 1.0-5 mostra un esemplare della prima serie di estensimetri prodotti in serie.



- a griglia di misura applicata alla carta con vernice cellulosica
- b fili di collegamento
- c blocchetto isolante
- d copertura di feltro a protezione della griglia di misura
- e staffa di supporto da rimuovere dopo l'applicazione

Figura 1.0-5: Primo estensimetro prodotto in serie, sistema Ruge

Le richieste, in particolare da parte dell'industria aeronautica americana, crebbero però in modo tale che fu necessario abbandonare questa costruzione. (Tatnall [1-4] parla per il 1941 di un giro d'affari di 50.000 pezzi in 2 mesi!). Infine l'esperienza mostrò anche che la complicata costruzione di sostegno non era necessaria e si giunse alla versione semplificata (fig. 1.0-6) che, a parte modifiche di minima entità, è stata mantenuta per diversi decenni. Gli sforzi continui di Ruge nel tentativo di migliorare le caratteristiche tecniche degli estensimetri sono comprovati da numerosi brevetti.

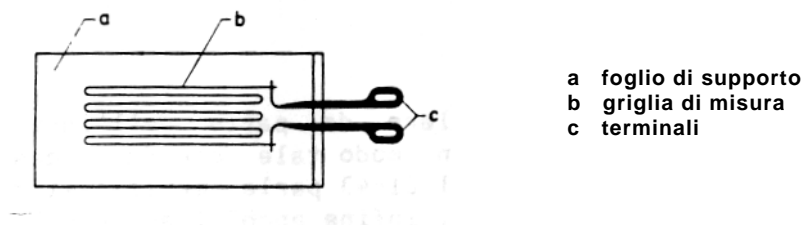


Figura 1.0-6: Forma caratteristica di un estensimetro con griglia di misura ottenuta con filo avvolto

In seguito si cercò di apportare le modifiche più disparate per la razionalizzazione della tecnica di produzione. In quest'ambito è da citare soprattutto la tecnica inventata da Paul Eisler del "circuit stampato" che, in forma essenzialmente più raffinata, portò dal 1952 circa alla messa a punto dei cosiddetti "estensimetri fotoincisi od a foglio" [1-6].

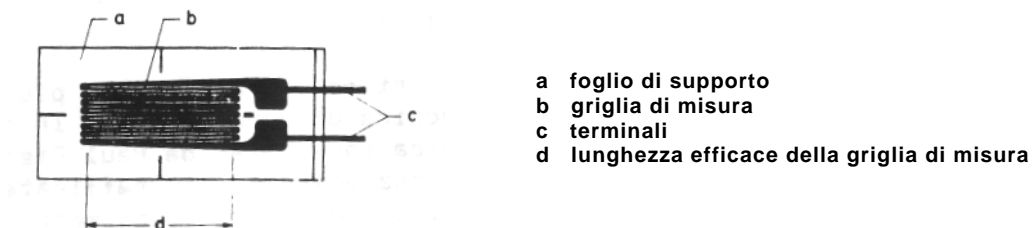


Figura 1.0-7: Forma costruttiva caratteristica di un estensimetro con griglia di misura ottenuta da un foglio di metallo fotoinciso.

Rispetto alla tecnica a filo avvolto questa permette un notevole ampliamento delle possibilità costruttive; sono realizzabili senza ulteriori aggiunte tutte le forme rappresentabili in un piano. Le forme a spirale sono altrettanto comode da produrre di interi reticoli. Ne vengono usati, ad esempio, nei sensori di grandezze fisiche come forze, pressioni, momenti torcenti e altre.

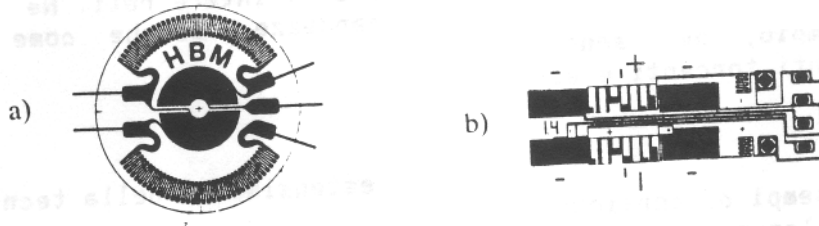


Figura 1.0-8: Esempi di configurazione di estensimetri nella tecnica di fotoincisione dei fogli

- a) Rosetta a membrana in 4 parti in collegamento a ponte per la costruzione di trasduttori di pressione.**
- b) Collegamento a ponte di estensimetri completo di tutti i collegamenti e degli elementi di bilanciamento.**

Gli estensimetri vengono prodotti in infinite versioni. Da ciò risulta un'eccezionale capacità di adattamento ai più disparati compiti di misurazione, anche in caso di condizioni secondarie difficili.

I principali campi di applicazione della tecnica di misurazione con estensimetri sono:

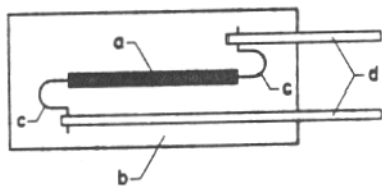
- l'analisi sperimentale delle sollecitazioni compresa la misurazione dei modelli e la biomeccanica
- la costruzione di trasduttori di grandezze fisiche

Mentre l'adattabilità degli estensimetri contribuì alla loro rapida espansione nel settore dell'analisi sperimentale delle sollecitazioni, la loro alta precisione di misura li rese interessanti per la costruzione di trasduttori di grandezze fisiche. Gli estensimetri filo avvolto e quelli a foglio vengono chiamati metallici a causa della loro griglia di misura in lega metallica.

1.0.2 Estensimetri a semiconduttore

Accanto a quelli metallici ci sono altri tipi di estensimetri a resistenza elettrica come per esempio gli estensimetri a semiconduttore (ER-SC). Essi ampliano il campo di applicazione di questa tecnica di misura e si basano sull'effetto di resistenza piezoresistiva dei semiconduttori scoperto da C.S. *Smith* nel 1954. Come materiale di base veniva utilizzato inizialmente il germanio che più tardi fu sostituito dal silicio.

La struttura degli estensimetri a semiconduttore è simile a quella degli estensimetri metallici. L'elemento di misura consiste in una piastrina larga pochi decimi di millimetro e spessa alcuni centesimi di millimetro che viene fissata su un supporto isolante e dotata di collegamenti. Gli effetti di raddrizzamento elettrico vengono evitati tramite un contatto senza strato di sbarramento del semiconduttore, ottenuta mediante la giunzione con filo d'oro molto sottile fra il semiconduttore ed il terminale di collegamento.



- a "griglia di misura"
- b foglio di supporto
- c conduttore intermedio d'oro
- d terminali a piattina

Figura 1.0-9: Struttura schematica di un estensimetro a semiconduttore

La sensibilità di deformazione (cioè il rapporto numerico fra la deformazione da misurare ed il segnale emesso dall'ER) per gli estensimetri a semiconduttore commerciali è pari a 50-60 volte quella degli estensimetri metallici. Essi vengono perciò impiegati prevalentemente per la costruzione di sensori atti alla misurazione di altre grandezze fisiche che, completandoli con semplici dispositivi elettronici, diventano così trasmettitori.

Nell'analisi sperimentale delle sollecitazioni gli estensimetri a semiconduttore non poterono imporsi per diverse ragioni.

- Le caratteristiche non lineari degli estensimetri a semiconduttore rendono necessarie correzioni dei valori indicati in caso di misurazioni con grandi requisiti di precisione.

- Gli estensimetri a semiconduttore sono notevolmente più costosi di quelli metallici.
- Le grandezze di disturbo dipendenti dalla temperatura hanno generalmente maggiore influenza sugli estensimetri a semiconduttore, anche in considerazione della loro maggiore sensibilità, e sono più difficili da compensare.
- A causa della fragilità del materiale semiconduttore la manipolazione è difficoltosa.

D'altra parte è grazie alla loro grande sensibilità che questo tipo di estensimetri viene impiegato nella misurazione di deformazioni molto piccole. Il forte segnale che generano è vantaggioso anche nel caso in cui agiscano forti campi di disturbo.

Accanto agli estensimetri convenzionali esistono anche altre versioni, che vengono citate per fornire un quadro completo, ma che non verranno trattate ulteriormente.

1.0.3 Estensimetri a vaporizzazione (a film sottile)

Un terzo tipo di estensimetri a resistenza elettrica sono quelli ottenuti con la tecnica di vaporizzazione. L'elemento di misura viene depositato direttamente sul punto di misura sotto vuoto tramite l'evaporazione dei componenti della lega. Il campo di applicazione è circoscritto alla produzione di sensori [1-7].

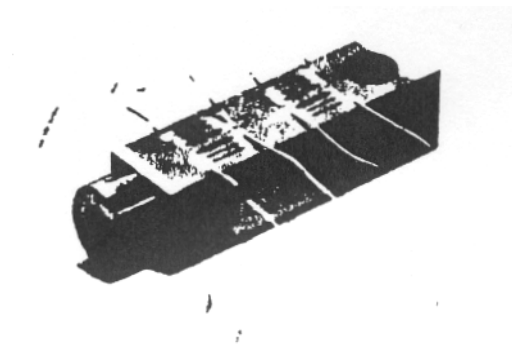


Figura 1.0-10: ER a film sottile sul corpo elastico di un trasduttore di forza

Si cercò di degli estensimetri liberamente applicabili ottenuti con il procedimento di evaporazione [1-8, 1-9], ma senza risultati soddisfacenti. Gli esperimenti vennero sospesi. Altri esperimenti per la produzione di estensimetri semiconduttori vaporizzati sono descritti in [1-10]. Durante i 20 anni nel frattempo trascorsi non si è constatata una loro diffusione sul mercato.

1.0.4 Estensimetri capacitivi

Gli estensimetri capacitivi sono un'evoluzione più recente da considerare come un'alternativa agli estensimetri convenzionali per le misurazioni nel campo delle alte temperature, settore in cui quelli metallici mostrano i loro limiti. Sono note finora 3 diverse versioni.

1. Una versione inglese dei Central Electricity Research Laboratories (C.E.R.L.) e della ditta Planer. Si tratta di un condensatore a piastre in cui la distanza di queste ultime varia in relazione alla deformazione da misurare.

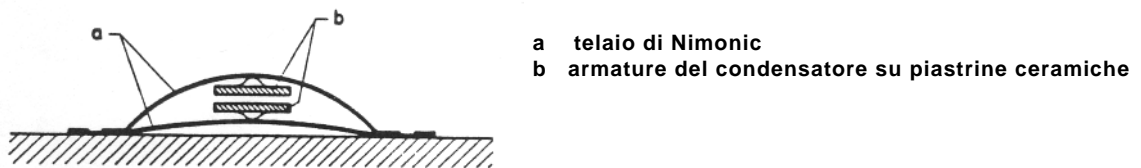


Figura 1.0-11: Schema di un estensimetro capacitivo della CERL-Planer

2. Una versione americana della Boeing Aircraft realizzata come condensatore differenziale.

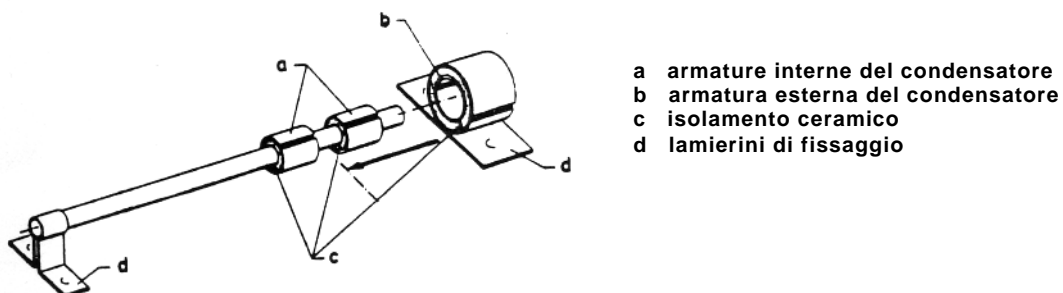


Figura 1.0-12: Schema di un estensimetro capacitivo della Boeing

3. Una versione tedesca della Interatom. Anch'essa è realizzata come condensatore a piastre.

I sensori capacitivi vengono fissati all'oggetto di misura col procedimento di saldatura a punti.

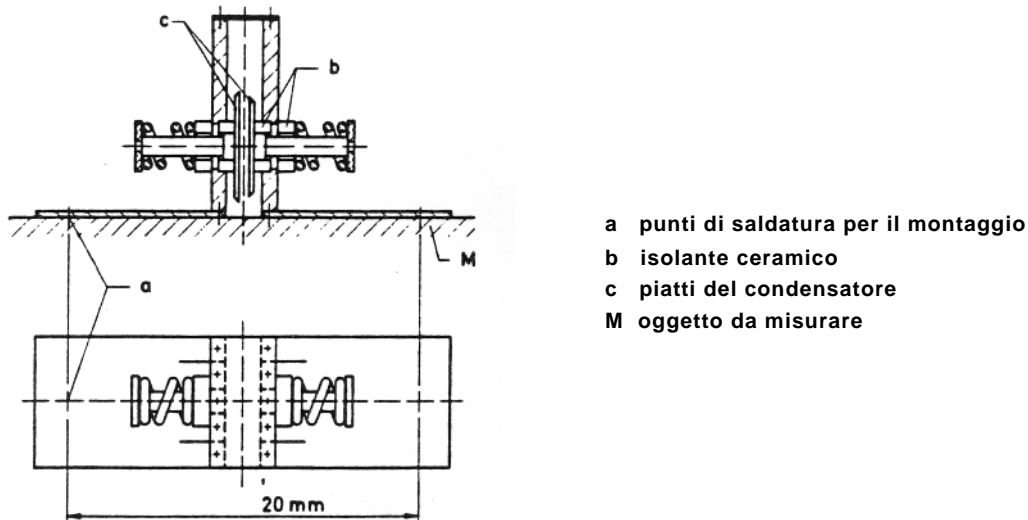


Figura 1.0-13: Schema di un estensimetro capacitivo della Interatom

Con gli estensimetri capacitivi si raggiunsero buoni risultati nel campo delle temperature fino a ca. 500°C. Nell'intervallo fino a 800°C i risultati erano ancora utilizzabili. A causa del procedimento di misurazione diverso rispetto agli estensimetri ohmici (resistivi), gli estensimetri capacitivi non verranno più trattati in questa sede. Chi fosse interessato può consultare la letteratura relativa [1-11 fino a 1-15].

1.0.5 Estensimetri piezoelettrici

Gli estensimetri piezoelettrici sono ER attivi. Come materiale sensibile alla deformazione viene impiegato titanato di bario. Similmente ai sensori piezoelettrici con quarzo come materiale sensore, l'estensimetro trasmette alla sua superficie una carica elettrica proporzionale alla deformazione, che può essere misurata con amplificatori di carica. Le misurazioni statiche sono possibili solo a determinate condizioni.

Gli estensimetri piezoelettrici hanno raggiunto un'importanza limitata e, secondo l'autore, sono caduti completamente in disuso.

1.0.6 Estensimetri fotoelastici

Una piastrina di materiale attivo fotoelasticamente mostra, dopo una sollecitazione "congelata" costantemente crescente, un campo isocromatico. In seguito alla deformazione agente, le isocromatiche si spostano. Lo spostamento, leggibile su di una scala, è la misura della deformazione. Estensimetri di questo tipo vennero costruiti negli Stati Uniti. Non hanno raggiunto alcun significato pratico e non sono più in commercio,

1.0.7 Estensimetri meccanici

Questi strumenti relativamente rari hanno una lunga tradizione. A causa delle loro dimensioni possono generalmente essere utilizzati solo per oggetti grandi. Come effetto di misurazione si forma un solco su di una piastrina di metallo o anche su di un cilindro di vetro che tuttavia può essere valutato al microscopio solo al termine della misurazione. In contrapposizione a questo svantaggio si pone l'ampio intervallo di temperature in cui lo strumento può essere impiegato. La registrazione è ancora leggibile anche se per esempio il rilevatore subisce un incendio a causa di un incidente [1-16].

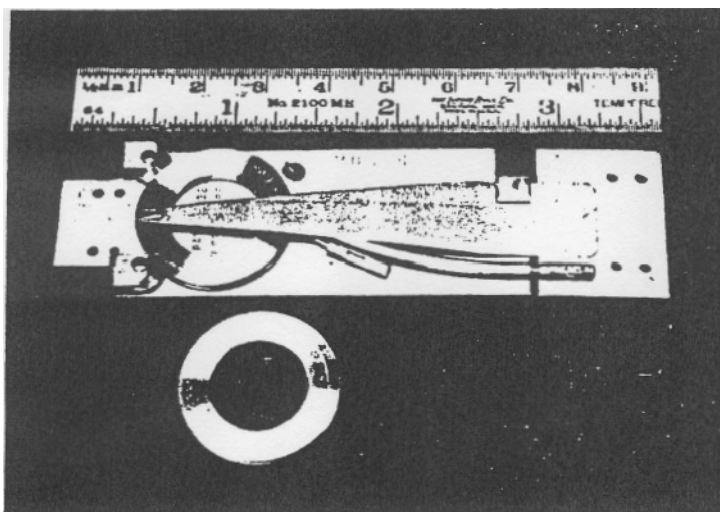


Figura 1.0-14:
Estensimetro meccanico [1-16]

1.0.8 Altri sistemi

Con la denominazione di "trasduttori di deformazione" vengono indicati numerosi altri strumenti. Fra questi vengono annoverati sistemi ohmici che lavorano con estensimetri, sistemi induttivi (a bobina differenziale ed a trasformatore differenziale), il metodo a corda vibrante e alcuni strumenti a funzionamento ottico o meccanico. A questi ultimi appartiene anche l'estensimetro Huggenberger mostrato nella fig. 1.0 -1.

Nella maggior parte dei casi il loro segnale non è proporzionale alla deformazione (variazione di lunghezza relativa) ma alla variazione di lunghezza assoluta. La deformazione deve essere calcolata dividendo il valore misurato per la lunghezza della base. Questi apparecchi non sono estensimetri per cui non vengono trattati in questo manuale.

1.1 Il principio fisico di funzionamento degli estensimetri

La premessa per misurare la deformazione con gli ER è che questa sia trasmessa senza perdite dall'oggetto da esaminare all'estensimetro. A questo scopo è necessario stabilire una stretta unione fra i due elementi. Nella stragrande maggioranza dei casi solo le superfici esposte possono essere misurate (esse si possono trovare all'esterno o anche negli spazi interni dell'oggetto da misurare). La stretta unione superficiale necessaria di misura fra oggetto ed estensimetro viene ottenuta con ottimi risultati tramite adesivi. Nell'interno di un oggetto, cioè dentro le sue parti piene, le misurazioni con estensimetri sono possibili solo eccezionalmente, per esempio nel caso di oggetti di plastica (tecnica modellistica) in cui l'estensimetro può essere annegato all'atto della produzione del pezzo, oppure nelle costruzioni in cemento dove esso può essere integrato durante il versamento del cemento stesso. Nel secondo caso sono necessari speciali trasduttori di deformazione incapsulati.

Altri leganti e metodi di connessione sono generalmente limitati a campi speciali, come ad esempio i leganti ceramici nel settore delle alte temperature e la saldatura a punti nella carpenteria metallica ecc.; in entrambi i casi sono necessari estensimetri speciali.

I diversi metodi di fissaggio sono descritti nel capitolo 4.

La deformazione trasmessa dall'oggetto da misurare causa negli estensimetri elettrici a resistenza elettrica - in seguito si parlerà esclusivamente di loro - una variazione misurabile di questa resistenza.

Nell'introduzione si è già accennato all'esistenza di due diversi tipi di estensimetri a resistenza elettrica:

Estensimetri metallici ed
estensimetri semiconduttori.

Il loro modo di funzionamento si basa su differenti processi fisici che verranno brevemente spiegati di seguito.

1.1.1 Estensimetri metallici

Il funzionamento degli estensimetri metallici si basa sulla relazione tra resistenza e deformazione dei conduttori elettrici scoperto da Wheatstone e Thomson (vedere paragrafo 1.0.1).

Ogni conduttore elettrico varia la sua resistenza in seguito a una sollecitazione meccanica, per esempio forze di trazione o compressione. La variazione della resistenza è dovuta in parte alla deformazione del conduttore e in parte a un mutamento della resistenza specifica del materiale del conduttore in seguito a variazioni della struttura. Questo processo è descritto dalla relazione.

$$\frac{dR}{R_0} = \underbrace{\varepsilon(1 + 2\nu)}_{\text{parte geometrica}} + \underbrace{\frac{d\rho}{\rho}}_{\text{parte strutturale}} \quad (1.1-1)$$

R = resistenza elettrica
 ε = allungamento
 ν = coefficiente di Poisson
 ρ = resistenza specifica

Nell' [1-17] sono pubblicati i risultati di uno studio su diversi materiali. Nel diagramma da esso ricavato fig. 1.1-1 i numeri scritti accanto alle curve definiscono l'incremento S; questo è il quoziente della variazione della resistenza relativa $\Delta R/R_0$, e dalla deformazione ε :

$$S = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l} = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon} \quad (1.1-2)$$

Le misurazioni sono state effettuate su fili liberi sottoposti a trazione.

Il diagramma mostra due particolarità:

1. L'incremento iniziale delle curve presenta notevoli differenze. Esso va da +6,5 per il platino-iridio 95/5 fino a -10 per il nickel. Queste differenze sono spiegabili con la forte variabilità della parte strutturale della variazione di resistenza del materiale.
2. Da certe deformazioni in poi variano le pendenze di quelle curve la cui pendenza iniziale si costa dal valore 2. La variazione avviene per deformazioni di diversa entità e sempre durante il passaggio dallo stato di deformazione elastica a quello di deformazione plastica. Se si parte dal presupposto che nel campo di deformazione plastica il coefficiente di Poisson assume il valore di $\nu = 0,5$ (costanza di volume), allora esso risulta dalla sola parte geometrica dell'equazione (1.1-1).

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \varepsilon(1 + 2\nu) = \varepsilon(1 + 2 \cdot 0,5) = 2\varepsilon.$$

La parte strutturale si annulla.

Particolarmente vantaggiosi sembrano quindi i materiali il cui incremento della curva caratteristica possiede dall'inizio il valore

$$S = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = 2 \frac{\Omega/\Omega}{m/m}$$

che viene mantenuto lungo tutto il campo di deformazione. Ne fanno parte alcune leghe che vengono quindi impiegate di preferenza per la produzione di estensimetri.

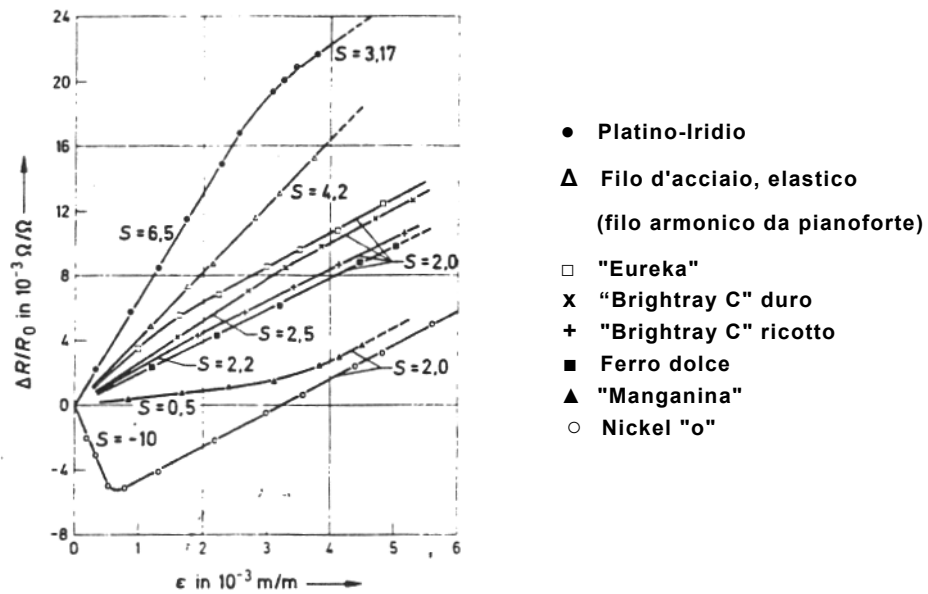


Figura 1.1-1: Caratteristica di deformazione- resistenza di fili a tensione libera (secondo [1/17]).

1.1.2 Estensimetri a semiconduttore (ER-SC)

Anche per gli estensimetri di questo tipo la misurazione si basa sulla variazione della resistenza elettrica. Diversamente dagli estensimetri metallici in questo caso l'effetto deformazione-resistenza si spiega principalmente con la variabile mobilità degli elettroni. D'altronde la parte geometrica della variazione è piccola ed ammonta a meno del 2%.

Dal silicio (e l'unico materiale cui si producono attualmente gli estensimetri semiconduttori) si ottengono monocristalli secondo il procedimento Czochralsky [1-18]. Per ottenere la purezza necessaria si rimuovono tutte le impurità con un processo di purificazione a zona fino a raggiungere una proporzione di 1 atomo estraneo su 10^{10} atomi di silicio. Tramite diffusione vengono poi inseriti determinati atomi estranei nella struttura cristallina del silicio. Questo processo viene chiamato "drogaggio". Se per il drogaggio del silicio quadrivalente si usano atomi trivalenti (accettori), p.e. boro o gallio, si viene a creare una carenza di elettroni e si ottiene una conducibilità p . Se si impiegano invece atomi pentavalenti (donatori), p.e. fosforo o arsenico, si ha un eccesso di elettroni e si ottiene una conducibilità n . Il grado di drogaggio determina la conducibilità elettrica.

È una caratteristica di questi monocristalli trattati in tal modo che la loro resistenza ohmica vari sotto l'influsso di una deformazione forzata, con differente entità nei tre assi del reticolo cristallino. L'effetto è anisotropo. In caso di deformazione positiva si viene a creare nell'asse $\langle 111 \rangle$ del silicio- p una variazione di resistenza positiva e nell'asse $\langle 100 \rangle$ del silicio- n una variazione negativa. In caso di deformazione negativa gli effetti sono opposti. Mentre in queste due direzioni assiali gli effetti sono chiaramente evidenti, nelle rimanenti direzioni essi sono molto più deboli.

Dalla figura 1.1-2 risulta che la sensibilità di deformazione (cioè la variazione di resistenza in relazione alla deformazione) dipende essenzialmente dalla conducibilità del silicio e di conseguenza dal grado di drogaggio.

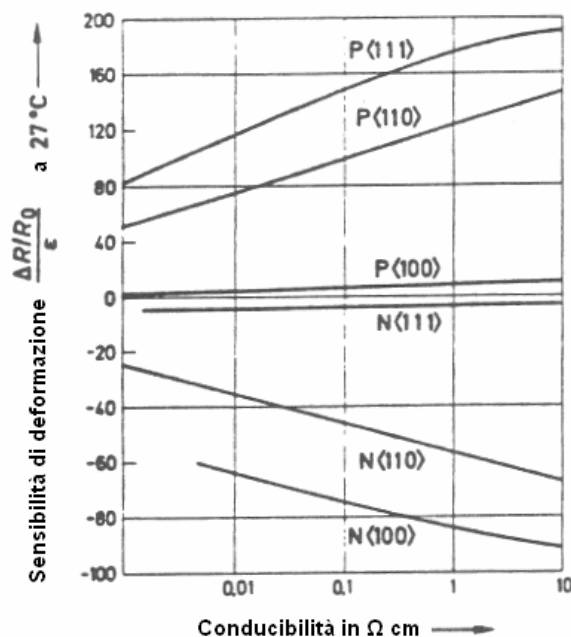


Figura 1.1-2: Sensibilità di deformazione del silicio monocristallino a conducibilità p ed n nei 3 assi del reticolo cristallino in relazione alla conducibilità (secondo [1-19]).

Per la produzione di estensimetri il monocristallo drogato viene scomposto in piastrine il cui asse longitudinale coincide con l'asse reticolare di maggiore sensibilità.

Gli estensimetri semiconduttori obbediscono alla relazione:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \epsilon \frac{T_0}{T} + C\epsilon^2 \left(\frac{T_0}{T}\right)^2 \dots \quad (1.1-3)$$

I parametri k , ϵ , T e C determinano la curva caratteristica.

1.2 La catena di misura

Le deformazione da misurare con gli ER sono di norma molto piccole. Di conseguenza anche le variazioni di resistenza sono minime e non si possono misurare direttamente con un ohmmetro. E' quindi necessario inserire l'estensimetro in una cosiddetta catena di misura per mezzo della quale diventa possibile determinare con precisione la variazione di resistenza dell'estensimetro.

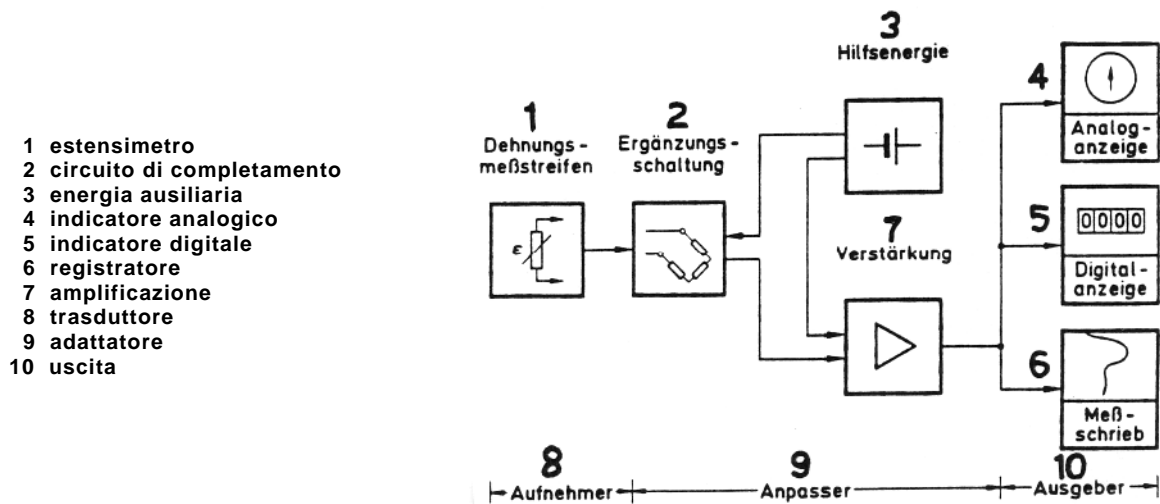


Figura 1.2-1: Schema di della catena di misura delle deformazioni con estensimetri

Il primo componente della catena è l'estensimetro che converte la "deformazione" meccanica in "variazione di resistenza" elettrica.

Il secondo anello è un circuito di misura (in questo caso il ponte di Wheatstone) di cui l'estensimetro forma un ramo. Sia l'estensimetro che il circuito sono (in senso fisico) componenti passivi. Deve essere loro fornita energia per poter ricevere un segnale valutabile. Questa energia ausiliaria viene ricavata da una fonte separata. Normalmente si usa una tensione elettrica costante (imposta), a volte una corrente elettrica costante (imposta).

Quando la resistenza dell'estensimetro varia in seguito ad una deformazione, il circuito a ponte perde la sua simmetria, viene sbilanciato e genera una tensione di uscita proporzionale allo sbilanciamento del ponte stesso, (vedere capitolo 5).

Il terzo componente è un amplificatore che incrementa la tensione di uscita del ponte in modo che possa essere rilevata dagli strumenti di misurazione. A volte gli amplificatori sono progettati anche in modo da fornire una corrente proporzionale alla tensione di uscita del ponte o, a scelta, entrambe le soluzioni. In un amplificatore lineare la tensione o la corrente di uscita sono proporzionali alla tensione di ingresso (cioè alla tensione di uscita del ponte) e quindi alla deformazione da misurare.

Il quarto componente è rappresentato dagli indicatori che trasformano il segnale d'uscita dell'amplificatore in una forma comprensibile per i sensi umani. Nel caso più semplice il valore misurato è indicato dalla deviazione dell'indice di un voltmetro o di un amperometro o dalla sequenza di cifre di un indicatore digitale. Qualora si debba rilevare una deformazione variabile nel tempo, in pratica un fenomeno dinamico, sono da preferire strumenti di registrazione. Alcuni amplificatori permettono il collegamento di entrambi i tipi di apparecchi in alternativa l'uno all'altro o, come nell'esempio della figura 1.2-1., in parallelo fra di loro.

Questa descrizione della catena ha fornito solo un'indicazione molto concisa dei componenti assolutamente indispensabili. Nella realtà vengono spesso aggiunti altri strumenti quali i commutatori del punto di misura, filtri, memoria dei picchi, comparatori di allarme, registratori di transitori ecc. Inoltre, al posto degli indicatori, possono essere installati gli usuali sistemi di elaborazione dati elettronici con le loro molteplici possibilità.

2 TERMINI ED UNITÀ DI MISURA IN USO NELLA TECNICA ESTENSIMETRICA

2.1 La deformazione: Definizione ed unità di misura

Nella lingua comune con il termine "deformazione" si definisce l'allungamento di un tratto. La deformazione può essere causata dall'azione di una forza. Per esempio un elastico si allunga quando viene tirato. La deformazione si può però verificare anche senza l'intervento di forze, è il caso di un oggetto che venga riscaldato.

Nel primo caso si parla di *deformazione meccanica*, nel secondo di *deformazione termica*.

Il processo inverso viene chiamato "contrazione". Anche la contrazione è la conseguenza dell'azione di una forza e più precisamente di una compressione. Anche quando un corpo si raffredda ha luogo una contrazione.

Il termine comunemente usato di "deformazione" causa a volte incomprensioni perchè con esso si tende ad indicare sia la "variazione di lunghezza assoluta", sia la "variazione di lunghezza relativa". Questa confusione di concetti ha radici storiche. Le spiegazioni fornite nelle prossime pagine dovrebbero chiarire i diversi significati.

2.1.1 Variazione di lunghezza assoluta

I procedimenti comunemente usati in passato e in parte ancora oggi in uso, misurano la variazione di lunghezza assoluta di un oggetto. Per essi si utilizzava il concetto di "misurazione di deformazione". Anche oggi gli strumenti vengono chiamati "estensometri".

La variazione di lunghezza assoluta Δl è la differenza fra la lunghezza l di un tratto al momento della misurazione e la lunghezza originaria del tratto stesso, chiamata lunghezza di base o lunghezza di riferimento l_0 :

$$\Delta l = l - l_0 \quad (2.1-1)$$

Le variazioni di lunghezza assoluta si misurano con strumenti di misura di lunghezze o con strumenti che misurano le variazioni di lunghezza.

La variazione di lunghezza Δl può avere segno positivo o negativo. Figura 2.1.1.

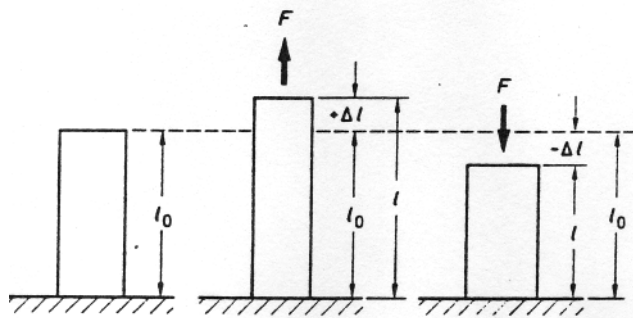
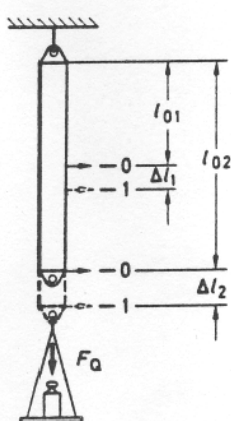


Figura 2.1.1: Variazione di lunghezza assoluta Δl e suo segno.

L'equazione (2.1-1) mostra che la variazione di lunghezza assoluta, e perciò il risultato della misurazione, dipende dalla lunghezza di riferimento prescelta. Nella figura 2.1-2 è rappresentato un esperimento che spiega questo concetto.



**Figura 2.1-2: Prova su modello "variazione di lunghezza assoluta"
Spiegazione nel testo.**

Sull'oggetto a forma di nastro appeso liberamente vengono marcate la lunghezza l_{01} e la lunghezza doppia l_{02} come di base. All'oggetto viene quindi applicato il peso F_Q . Una misurazione mostra che l'incremento di lunghezza Δl_2 è doppio rispetto a Δl_1 . La variazione di lunghezza è quindi una funzione della lunghezza di base:

$$\Delta l = f(l_0) \quad (2.1-2)$$

Tuttavia se si rapporta la variazione di lunghezza alla lunghezza di base, si ha in entrambi i casi lo stesso valore:

$$\frac{\Delta l_2}{l_{02}} = \frac{2 \Delta l_1}{2 l_{01}} = \frac{\Delta l_1}{l_1}$$

2.1.2 Variazione di lunghezza relativa o deformazione

Nel paragrafo "Variazione di lunghezza assoluta" si è constatato che i rapporti lineari $\Delta l_1:l_{01}$ e $\Delta l_2:l_{02}$ hanno la stessa grandezza (ciò vale naturalmente solo per un allungamento uniforme). Per questo motivo nella scienza della resistenza dei materiali e nella tecnica di misura delle deformazioni si usa come grandezza di misura la variazione di lunghezza relativa. Per definire questa variazione è stato introdotto il simbolo ϵ

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.1-3)$$

e la definizione "deformazione" come termine tecnico (Terminus technicus) come si può ritrovare nella norma tedesca DIN 1304. Il termine tecnico "deformazione" viene utilizzato come concetto generale per definire sia l'allungamento che l'accorciamento; nel primo caso si parla di "deformazione positiva", nel secondo di "deformazione negativa",

ϵ è positiva quando, Δl è positivo,
 ϵ è negativa quando, Δl è negativo.

2.1.3. L'unità di misura della deformazione [2-1]

Le lunghezze vengono misurate con l'unità di misura delle lunghezze: il metro [m]. La deformazione ϵ è definita come quoziente di una variazione di lunghezza Δl e di una lunghezza di riferimento l_0 , (vedere paragrafo 2.1.2). Di conseguenza la deformazione ha come unità di misura m/m :

$$(\epsilon) = \left[\frac{\Delta l}{l_0} \right] \quad \left[\frac{m}{m} \right]$$

Ciò viene definito rapporto di grandezze.

Poiché la variazione di lunghezza nei casi qui contemplati è di norma molto piccola, per la sua definizione si utilizzano i sottomultipli del metro:

$$\begin{aligned} 10^{-6} \text{ m} &= \mu\text{m} \\ 10^{-3} \text{ m} &= \text{mm} \\ 10^{-2} \text{ m} &= \text{cm} \end{aligned}$$

A seconda dell'entità della variazione di lunghezza verrà impiegato uno dei suddetti sottomultipli allo scopo di facilitare i calcoli. Si può scegliere liberamente se scrivere il valore numerico come potenza decimale o se utilizzare un simbolo standardizzato nella DIN 1301. Le due scritture sono equivalenti (vedere l'esempio sottostante).

Esempio: Modi di scrittura per l'unità di misura della deformazione

$$\varepsilon_1 = 180 \cdot 10^{-6} \frac{m}{m} = 180 \frac{\mu m}{m}$$

$$\varepsilon_2 = 2.5 \cdot 10^{-3} \frac{m}{m} = 2.5 \frac{mm}{m} = 2500 \mu m / m$$

$$\varepsilon_3 = 3 \cdot 10^{-2} \frac{m}{m} = 3 \frac{cm}{m} = 30000 \mu m / m$$

Spesso si incontrano anche le definizioni

% invece di 10^{-2} m/m = cm/m

‰ invece di 10^{-3} m/m = mm/m.

I dati in percento e permille dovrebbero essere riservati esclusivamente alle indicazioni di tolleranza. Per quanto riguarda i dati relativi alla deformazione essi dovrebbero essere evitati, in modo da non confonderli con quelli riguardanti la tolleranza e gli errori di misura e per non causare probabili errori di interpretazione, come mostra il seguente esempio.

Esempio: Significato dei dati percentuali in relazione ai valori di deformazione

a) $\varepsilon = 2,72 \text{ cm/m} \pm 0,5 \%$ significa $27200 \mu\text{m/m} \pm 136 \mu\text{m/m}$.

b) $\varepsilon = 2,72\% \pm 0,5\%$ significa però, se si usa il percento come misura della dilatazione:
 $27200 \mu\text{m/m} \pm 5000 \mu\text{m/m}$!

Pseudo unità come "microdeformazione", "μD" oppure "μϵ" non hanno alcun fondamento matematico e contraddicono il calcolo delle grandezze. In particolare la definizione americana μϵ porta a risultati assurdi come mostra l'espressione "ϵ = 250 μϵ". Esso contraddice la consuetudine matematica di utilizzare un simbolo (ϵ per deformazione) come unità di misura.

Osservazione:

I rapporti di grandezze sono caratterizzati dalla stessa unità al numeratore ed al denominatore della frazione, p.e. m/m. Si potrebbe abbreviare la frazione in modo

matematicamente corretto. In questo modo si verrebbe a creare una misura senza denominazione. L'informazione fisica sulla sua origine andrebbe perduta anche se si scrivesse sempre: $\epsilon = \dots 10^{-6}$ e si indicasse tramite il simbolo il significato della misura. Proprio nella tecnica di misurazione con estensimetri si trovano spesso rapporti di grandezze diversi, come p.e. la variazione relativa della resistenza degli estensimetri o la tensione di uscita relativa del ponte di Wheatstone (vedere esempio). Per evitare errori è consigliabile lasciare il simbolo di unità di misura accanto alla misura stessa.

Esempio: Diversi rapporti di grandezze

una deformazione di $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = 0.001 \frac{m}{m}$

causa in un estensimetro (fattore $k = 2$)

una variazione di resistenza relativa $\frac{\Delta R}{R_0} = 0.002 \frac{\Omega}{\Omega}$

in questo modo si viene a creare all'uscita del ponte di Wheatstone (quarto di ponte)

una tensione d'uscita relativa $\frac{U_A}{U_B} = 0.0005 \frac{V}{V}$

2.2 Gli sforzi; definizione ed unità di misura

Con il termine "sforzo di origine meccanica" viene indicata uno sforzo nei materiali che normalmente è da ricondurre a forze esterne, ma spesso è dovuto anche all'azione di forze interne al materiale o interne a sistemi più grandi. Gli sforzi si suddividono

- a) secondo il loro tipo: sforzi normali, sforzi di taglio
- b) secondo la loro origine: sforzi di trazione, compressione, flessione e torsione, sforzi residui e di origine termica.

Gli sforzi del punto b) appartengono, a seconda del tipo, a quelli definite in a). Per le considerazioni relative alla resistenza ciò che importa è il tipo di sforzo indipendentemente dalla sua causa.

A seconda della loro direzione d'influenza, gli sforzi si suddividono in monoassiali, biassiali o piani, triassiali o cubici.

Non è possibile misurare direttamente gli sforzi di origine meccanica. (Eccezion fatta per il procedimento radiografico tramite il quale si possono determinare gli sforzi nei materiali nel campo microscopico dalle deformazioni della struttura reticolare cristallina, cioè tramite la variazione relativa della distanza fra atomi. Questo procedimento è limitato a strati superficiali da ca. 5 a 15 μm di profondità [2-2]).

Gli sforzi vengono calcolati secondo i metodi della scienza delle costruzioni e della scienza della resistenza dei materiali o con misurazioni della deformazione. Il fondamento di queste ultime è dato dalla legge di Hooke (vedere capitolo 8).

2.2.1 Sforzi normali

Sotto questo concetto sono riassunti gli sforzi di trazione e di compressione. Si hanno sforzi normali quando forze di trazione o di compressione si contrappongono. Nella figura 2.2-1 è rappresentata la formazione di sforzi di trazione e/o di compressione. Il simbolo degli sforzi normali è σ .

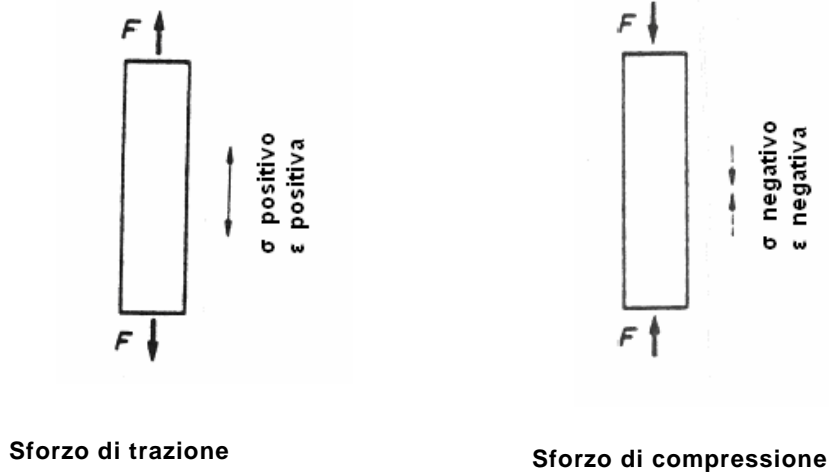


Figura 2.2.1: Sforzi normali e loro segno

Lo sforzo all'interno del materiale diventa, a sezione costante, tanto più grande quanto maggiori sono le forze.

In caso di forza costante lo sforzo varia in rapporto inverso rispetto alla sezione:

grande sezione \rightarrow piccola sollecitazione
piccola sezione \rightarrow grande sollecitazione

Affinché la barra della fig. 2.2-1 non venga spinta via, deve essere presente una forza contrapposta di uguale entità. La forza contraria spesso non è riconoscibile poiché è applicata da elementi di fissaggio o sostegni. Sforzi normali possono naturalmente verificarsi anche in oggetti in movimento, p.e. nella gomina fra rimorchiatore e nave. In questo caso la forza di trazione del rimorchiatore si contrappone alla forza della corrente dell'acqua.

Lo sforzo meccanico σ viene espresso come quoziente della forza F e della sezione dell'elemento strutturale sollecitato A :

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Gli sforzi di trazione hanno segno positivo.
Gli sforzi di compressione hanno segno negativo.

Come unità di misura degli sforzi meccanici venivano precedentemente usati nell'industria meccanica prevalentemente kp/mm^2 e nell'edilizia prevalentemente kp/cm^2 .

Dopo l'introduzione del "Sistema Internazionale delle Unità" (Système International d'Unités, abbreviato in System SI) [2-3 fino a 2-5], si usa l'unità "Newton"[N] per la forza e l'unità "Metro quadrato" [m^2] per la superficie. Da ciò risulta:
per gli sforzi meccanici l'unità [N/m^2],
che assume la denominazione "Pascal" [Pa].

$$1\text{N/m}^2 = 1\text{ Pa}$$

Questa unità porta a valori numerici straordinariamente grandi. Per questo motivo la forza viene spesso espressa in multipli decimali, come p.e. daN o kN e la superficie in sottomultipli decimali, come p.e. cm^2 o mm^2 . Ciò è permesso dalle norme legali.

$$1\text{ N/mm}^2 = 100\text{ N/cm}^2$$

$$1\text{ N/mm}^2 = 10^6\text{ Pa} (= 1\text{ MPa})$$

$$1\text{ N/cm}^2 = 10^4\text{ Pa}$$

A volte si trova anche la definizione daN/mm^2 che dà valori numerici simili a quelli ottenuti con l'unità precedente kp/mm^2 .

$$1\text{ daN/mm}^2 = 10\text{N/mm}^2 \approx 1\text{kp/mm}^2$$

La scelta di questa definizione non è ottimale ed è da intendersi come una concessione a vecchie abitudini. C'è da sperare che si realizzi un sistema di scrittura unitario. In questo manuale si userà sempre la denominazione N/mm^2 per indicare il valori numerici degli sforzi.

2.2.2 Sforzi di taglio

Negli sforzi normali le forze di trazione o compressione agiscono in direzioni contrapposte sempre sullo stesso asse. Esse cercano di tirare il materiale o di comprimerlo, a seconda che tendano ad allontanarsi o a sovrapporsi. Fondamentalmente di tutt'altro tipo sono gli sforzi di taglio. Volendo farsene un'idea si pensi a due forze F_1 e F_2 che agiscono in direzione contrapposta ma ad una distanza minima l'una dall'altra; un po' come quelle prodotte dalle lame di un paio di forbici.

La fig. 2.2.-2 mostra due esempi.

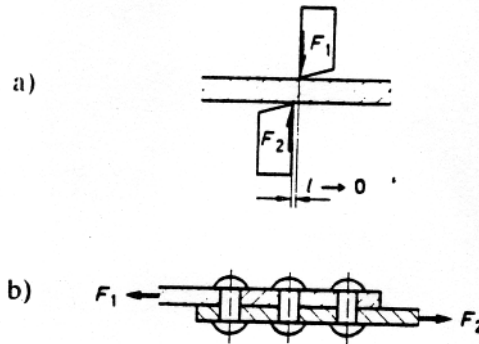


Figura 2.2-2: Formazione di sforzi di taglio
a) Esempio di cesoia per lamiera
b) Esempio di giunzione chiodata

Se le forze diventano così grandi da superare la resistenza del materiale, le parti vicine scorrono l'una davanti all' altra lungo tutta la sezione; la parte viene "tagliata".

Nella fig. 2.2-2 le forze sono rappresentate da semifrecce perchè la distanza l è molto piccola e si avvicina al valore „zero“. Anche quando la distanza l aumenta (vedere paragrafi da 8.4.4 a 8.4.6) si parla di sforzi di taglio, indicate con la lettera τ .

L'esempio della fig.2.2-2b mostra una situazione simile a quella che si verifica in una chiodatura.

Gli sforzi di taglio agiscono all'interno dell'oggetto e non sono riconoscibili esternamente, tuttavia è possibile rilevarli dalle deformazioni superficiali (mantello) che causano. Vedere l'esempio di pag.2.2-3.

Sulla superficie di un albero cilindrico non sottoposto a sforzi viene marcato un quadrato delimitato dalle linee del mantello parallele all'asse dell'albero. Dopo che l'albero è stato sottoposto gli sforzi dovuti a un momento torcente il quadrato si è deformato in un rombo. Le linee sul mantello sono ancora parallele fra di loro pur avendo assunto una forma a elica. Ci si può immaginare il fenomeno come segue:

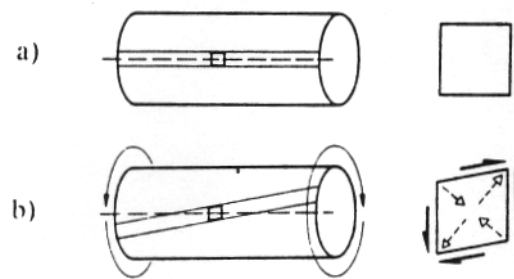


Figura 2.2-3: Deformazione superficiale in seguito a sforzo di taglio dovuto a torsione

- a) Sezione di albero non sottoposta a sforzi. Le linee sul mantello hanno un andamento parallelo rispetto all'asse; l'elemento sulla superficie è quadrato
- b) Sezione di albero sottoposta a torsione. Le linee sul mantello scorrono oblique rispetto all'asse; l'elemento superficiale è diventato un rombo.

L'albero si può pensare come composto da un grande numero di dischi circolari disposti parallelamente alla superficie della sezione e aventi lo spessore di una molecola. I momenti torcenti contrapposti tendono a far ruotare i dischi l'uno rispetto all'altro (come in un giunto a frizione). I dischi sono però tenuti insieme elasticamente dalle loro forze di coesione, per cui si forma solo un minuscolo angolo di scorrimento.

Le forze di taglio venutesi a creare fra i singoli dischi non si possono misurare. Lo sforzo di taglio τ si può calcolare dai due sforzi normali principali σ_1 e σ_2 :

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}. \quad (2.2-2)$$

Gli sforzi di taglio sono sempre accompagnati da sforzi normali (vedere par. 8.2-3).

Gli sforzi normali principali dello stato di sforzo piano (superficiale) sono i due valori estremi di sforzo (positivo e negativo, massimo e minimo) che si trovano rispettivamente su direzioni che formano un angolo di 90° , p.e. sulla superficie di un oggetto. Nell'esempio della fig. 2.2-3 si è verificata uno sforzo normale positivo massimo in direzione della diagonale maggiore del rombo e uno sforzo normale negativo in direzione della diagonale minore.

Per gli sforzi di taglio si usano le stesse unità di misura degli sforzi normali.

2.2.3 Sforzi residui e di origine termica

Dalla definizione è già evidente che in questo caso la causa della loro origine è nota. A seconda del tipo, anch'esse si possono suddividere in sforzi normali e sforzi di taglio. Ciò che li differenzia da altri sforzi contraddistinti dalla loro causa d'origine (p.e. sforzi di flessione e di torsione) è il fatto che essi insorgono senza l'azione di forze esterne.

I cosiddetti "sforzi residui" possono così essere provocati da forze interne al materiale dovute p.e. a variazioni di volume non uniformi in parti sottoposte a trattamento termico nella tempra dell'acciaio, al raffreddamento non uniforme di oggetti in metallo o in plastica colati o stampati ad iniezione, a parti saldate o fucinate, a processi di lavorazione meccanica o anche al peso proprio di grandi oggetti [2-6]. Una varietà degli sforzi residui sono gli "sforzi di origine termica". Esse si formano all'interno di sistemi in cui parti aventi dilatazione termica diversa sono così legate fra loro da impedire appunto una dilatazione libera, oppure si formano in seguito a un riscaldamento non uniforme. Gli sforzi residui e quelli termici caricano il materiale come gli sforzi di carico. Essi abbassano la resistenza del materiale all'azione di forze esterne. È possibile quindi rispondere in maniera esauriente a domande relative alla sicurezza funzionale di elementi strutturali solo quando siano note entità e direzione degli sforzi residui. La loro rilevazione con i metodi di misura usuali è possibile solo quando essi sono stati "rilasciati" e i conseguenti ritorni elastici del materiale possono essere misurati in condizione di riposo. Il rilascio degli sforzi residui può avvenire in diversi modi.

Durante le ricerche scientifiche si arriva al punto di suddividere l'oggetto in prova in piccoli pezzi e di misurare il ritorno elastico in ognuno di questi pezzi [2-7]. Si ottiene così un quadro completo della distribuzione degli sforzi, distruggendo tuttavia l'oggetto. Per quest'ultimo motivo questi metodi distruttivi non sono adatti per i normali compiti dell'analisi delle sollecitazioni. Sono molto più indicati invece procedimenti che richiedono interventi minimi sull'oggetto da misurare. Fra questi si possono annoverare il procedimento di foratura ([3-6 e 3-7] paragrafo 8.3) e quello di carotatura toroidale [3-5]. Le rosette per le misurazioni degli sforzi residui sono descritte nel paragrafo 3.2.2.3.

2.2.4 Stati di sforzo

Si distinguono in:

- a) stato di sforzo monoassiale,
- b) stato di sforzo biassiale o piano,
- c) stato di sforzo triassiale o cubico.

Lo stato di sforzo monoassiale è il caso più semplice che si verifica nelle barre di trazione o compressione (vedere fig. 2.2.-1).

Si parla di stato di sforzo biassiale o piano quando le forze che generano gli sforzi agiscono su due assi perpendicolari. La scomposizione delle direzioni di queste forze in due assi principali a 90° l'uno dall'altro risulta da considerazioni teoriche. Le direzioni di forze diverse, che agiscono sullo stesso piano ma con varie angolazioni, possono essere molto differenti, tuttavia si possono sempre scomporre nelle due direzioni principali.

Si parla di stato di sforzo triassiale o cubico quando le forze agiscono in qualsiasi direzione. Come nel caso precedente si definiscono tre assi principali perpendicolari fra loro.

La misurazione delle deformazioni si limita necessariamente alle superfici accessibili degli elementi strutturali e di conseguenza possono trasmettere informazioni solo sullo stato di sforzo superficiale. Mentre gli stati di sforzo monoassiale e piano si possono facilmente analizzare con l'ausilio degli estensimetri, quelli triassiali causano qualche problema poichè le necessarie misurazioni sul terzo asse, cioè all'interno dell'oggetto, non sono generalmente possibili. Tuttavia in un corpo tridimensionale sottoposto all'azione di forze esterne le massime sforzo si manifestano proprio sulla superficie! (Eccezione: problemi di contatto hertziano.) Per il progettista interessato in generale solo ai valori massimi di sforzo è quindi sufficiente stabilire gli sforzi superficiali; il loro andamento all'interno è di importanza relativa.

Gli stati di sforzo cubici si possono analizzare con misurazioni della deformazione solo se questa può essere rilevata anche nella terza direzione assiale, cioè all'interno dell'oggetto. Ciò è possibile per esempio nella tecnica di misurazione dei modelli quando gli estensimetri vengono inseriti nello stampo durante la colatura dei materiali plastici. Risultati equivalenti si possono avere anche nell'edilizia se gli strumenti sono posizionati durante la gettata del cemento.

2.3 Parametri materiali dei caratteristici

2.3.1. Il modulo elastico; definizione ed unità di misura

Un dato fondamentale per la determinazione della caricabilità meccanica dei materiali, è la resistenza alla trazione, che viene analizzata nei laboratori sperimentali su provini con dimensioni unificate [2-8]. La fig. 2.3-1 rappresenta schematicamente il procedimento da utilizzare.

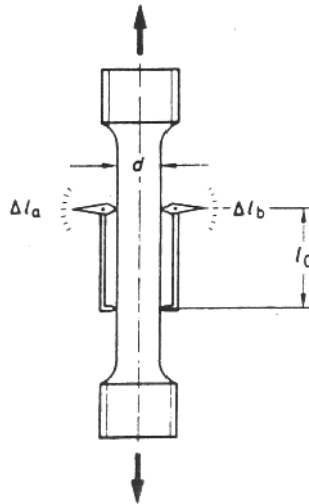


Figura 2.3-1: Schema per la valutazione della resistenza alla trazione e del modulo elastico statico dei materiali.

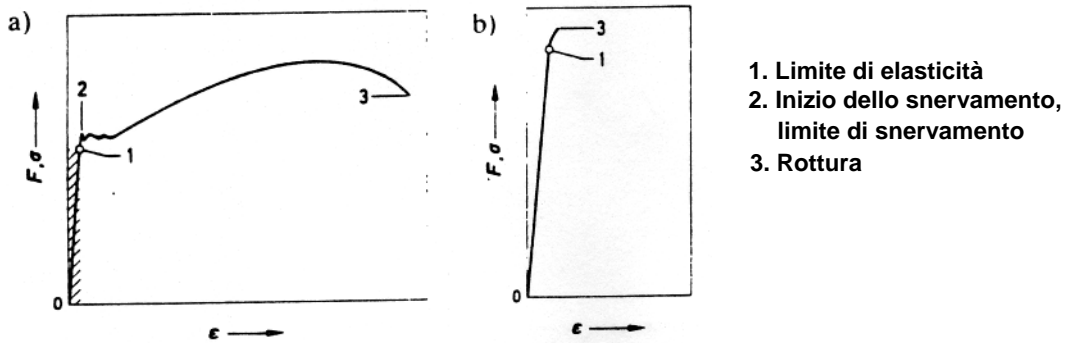


Figura 2.3-2: Esempi di diagrammi forza/deformazione e sollecitazione/deformazione
a) Curva caratteristica di un materiale con un grande campo di snervamento
b) Curva caratteristica di un materiale fragile

Il campione di materiale viene fissato su di una macchina prova materiali e caricato per un certo periodo, dopodiché si misura la sua deformazione ϵ in relazione alla forza applicata. Il risultato viene rappresentato sotto forma di diagramma. Al posto della forza F si può applicare anche la sollecitazione nominale σ ; essa viene calcolata secondo l'equazione (2.2-1) partendo dalla sezione del provino A_0 disponibile a inizio dell'esperimento. La fig. 2.3-2 mostra un esempio del diagramma F/ϵ cioè del diagramma σ/ϵ . L'andamento della curva σ/ϵ dipende dal materiale. I materiali duttili (deformabili plasticamente) hanno un grande campo di snervamento — fig. 2.3-2-a — mentre i materiali fragili e gli acciai ad alta resistenza hanno un'estensione dello snervamento molto bassa o nulla — fig. 2.3-2b — .

Nei cosiddetti materiali "lineari-elastici" si riscontra nel campo di deformazione elastica un incremento lineare della curva σ/ϵ . La pendenza di questa parte del diagramma indica la rigidità del materiale. Essa viene definita come il rapporto fra σ ed ϵ ed è chiamata modulo elastico, simbolo E .

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.3-1)$$

Il modulo elastico (brevemente: modulo E) viene indicato con il valore numerico del rapporto σ/ϵ e con le unità di misura [Pa] o [N/cm²] o [N/mm²].

$$\begin{aligned} 1 \text{ Pa} &= 1 \text{ N/m}^2 = 10^{-4} \text{ N/cm}^2 = 10^{-6} \text{ N/mm}^2 \\ 1 \text{ N/mm}^2 &= 10^2 \text{ N/cm}^2 = 10^6 \text{ N/m}^2 = 10^6 \text{ Pa.} \end{aligned}$$

Questa denominazione causa qualche problema ai "non addetti ai lavori" in particolare quando bisogna soddisfare l'esigenza di calcolo delle unità. Espressa in modo conciso la denominazione dovrebbe essere.

$$(E) = \left\{ \frac{\sigma}{\epsilon} \right\} \left[\frac{\text{N/mm}^2}{\text{m/m}} \right] \text{ o } \left[\frac{\text{N/cm}^2}{\text{mm}} \right] \text{ o } \left[\dots \right].$$

Come è normale in matematica la denominazione della misura e [m/m] viene abbreviata e perciò scompare. In questo modo per il modulo E rimane la stessa denominazione valida per gli sforzi nei materiali σ , sebbene si tratti di due cose completamente diverse.

Esempio:

$$E = \frac{70 \text{ N/mm}^2}{1000 \mu\text{m/m}} = \frac{70 \text{ N/mm}^2}{10^{-3} \text{ m/m}} = 70000 \frac{\text{N/mm}^2}{\text{m/m}} = 70000 \text{ N/mm}^2$$

Ogni materiale possiede il proprio modulo E . I diversi valori numerici risultano dalle diverse pendenze dei diagrammi σ/ϵ . Nella fig. 2.3-3, che mostra alcuni esempi, sono indicate solo le parti lineari delle curve.

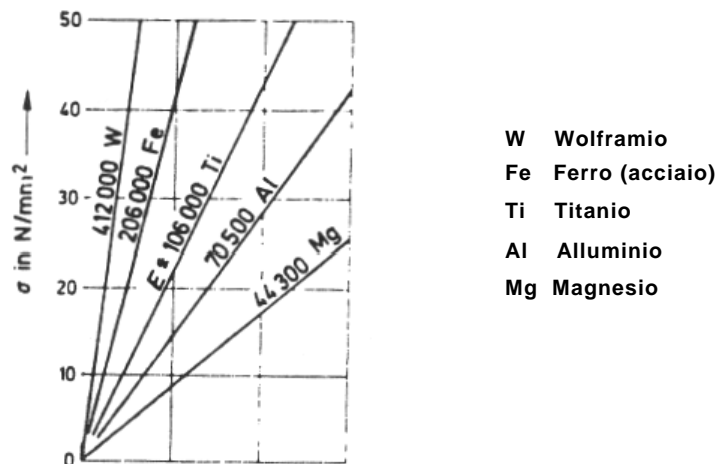


Figura 2.3-3: Esempio di alcuni moduli di elasticità E

Materiale	E[kN/mm ²] (0 ... 100°C)	Materiale	E[kN/mm ²] (0 ... 100°C)
Alluminio	66	Molibdeno	330
AlCuMg	70	Metallo Monel	156
AlMgSi	69	Nickel	193
AlMg5	68	Bronzo allo stagno Rg 5	93
AlCuNi	70	Acciaio C15	204
G-AlSi	75	C35	202
G-AlSiMg	75	C60	200
Bronzo SnBz6	109	41Cr4	203
G-SnBz 12	79	X10Cr13	216
AlBz 5	123	X12CrNi188	191
AlBz 8	122	36 % Ni-Acciaio	142
FeAlBz 10	123	Titanio	103
Rame	123	TiAl6V4	108
CuBe (Rame Beryllium)	131	Adesivi per estensimetri	E[kN/mm²] (0 ... 50°C)
CuNi55/45 (Constantan)	161		
Magnesio	44	X60 (Resina acrilica, riempita)	4,5 ... 6
MgAl7	43	Z70 (Cianacrilato)	3
Ottone Ms 58	88	H (Polyester)	3,5
Ms 60	88	EP250, EP310 (Resina epossidica)	2,8
Ms 72	88	Cr760 (Mastice ceramico)	20 ... 21

Tabella 2.3-1: Moduli E di alcuni materiali

Nelle tabelle si possono trovare gli elenchi dei moduli E dei più diversi materiali. È da notare che i valori delle tabelle possono essere sempre solo valori medi ricavati da un grande numero di misurazioni. In seguito a modifiche delle leghe ecc. bisogna considerare in realtà deviazioni dai valori delle tabelle di parecchi punti percentuali. Qualora sia necessaria una maggiore precisione si dovrà eseguire una misurazione secondo il metodo citato all'inizio.

Inoltre non si deve dimenticare che i moduli E dipendono dalla temperatura.

La tabella 2.3-1 fornisce come esempio i valori numerici di alcuni materiali comuni.

2.3.2 Il modulo elastico di taglio

Il modulo elastico di taglio G semplifica il calcolo dello sforzo di taglio. Non è un parametro indipendente come il modulo elastico E (paragrafo 2.3.1) ed il coefficiente di Poisson ν (paragrafo 2.3.3), ma viene dedotto da questi.

$$G = \frac{E}{2} \cdot \frac{1}{1+\nu} = \frac{E}{2(1+\nu)} \approx 0,385 E \text{ für } \nu = 0,3. \quad (2.3-2)$$

Come il modulo E , il modulo elastico di taglio viene espresso in N/mm^2 , (paragrafo 2.3.1.). Esso descrive il rapporto fra lo sforzo di taglio τ e l'angolo di scorrimento γ misurato in radianti [rad].

$$G = \frac{\tau}{\gamma}. \quad (2.3-3)$$

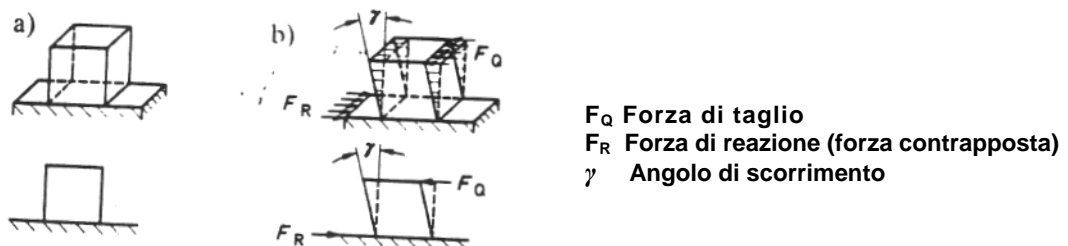


Figura 2.3-4: Posizione dell'angolo di scorrimento γ di un materiale sottoposto a sforzi di taglio
 a) non caricato
 b) caricato

2.3.3 Il coefficiente di Poisson

Quando si tira un elastico, questo si allunga ma diventa anche più sottile; se si comprime un oggetto di gomma, esso si accorcia ma contemporaneamente diventa più largo e più spesso.

Nel corso dei suoi studi, lo scienziato francese *Siméon Denis Poisson* (1781-1840) arrivò alle seguenti conclusioni:

Se una barra viene sottoposta a una forza di trazione F_z , essa si allunga di $\Delta l/l_0 = \epsilon_l$ (deformazione longitudinale); contemporaneamente la sua larghezza e il suo spessore si riducono di

$\Delta b/b_0 = \epsilon_q$ (contrazione trasversale). ϵ_l è positiva, ϵ_q è negativa; fig.2.3-5a.

Se una barra viene sottoposta a una forza di compressione F_d essa si accorcia di $\Delta l/l_0 = \epsilon_l$ ("deformazione longitudinale negativa"); contemporaneamente la sua larghezza e il suo spessore aumentano di $\Delta b/b_0 = \epsilon_q$ ("dilatazione trasversale"). ϵ_l è negativa, ϵ_q è positiva; fig. 2.3-5b.

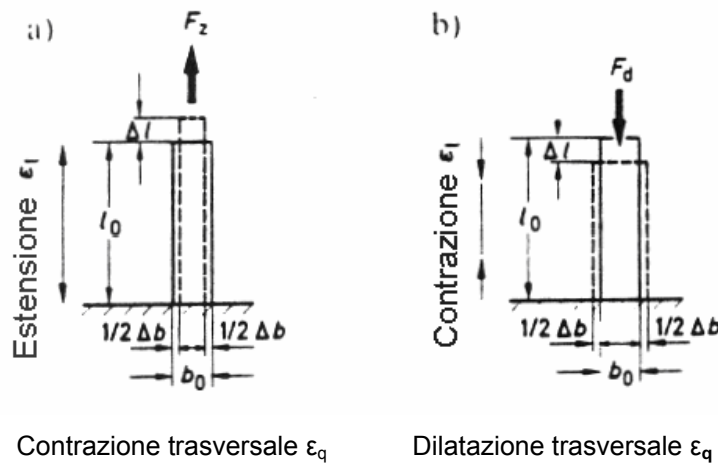


Figura 2.3-5: Formazione della contrazione trasversale/dilatazione trasversale. Spiegazione nel testo.

Vale quindi :

$$\left| \frac{\epsilon_l}{\epsilon_q} \right| = m \quad (\text{Modulo di Poisson}) \quad (2.3-4)$$

Nella scienza della resistenza dei materiali si utilizza generalmente il reciproco del coefficiente di Poisson, cioè il coefficiente di contrazione, per cui si usava inizialmente come simbolo la lettera greca μ . Siccome questa lettera μ nel campo tecnico è ricca anche di altri significati, si tende ora ad usare sempre più frequentemente la lettera ν . È quindi possibile trovare entrambi i simboli. In questo libro viene unicamente utilizzata la lettera ν .

$$\frac{1}{m} = \left| \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_1} \right| = \nu \quad (\text{coefficiente di Poisson}) \quad (2.3-5)$$

Il coefficiente di Poisson dipende dal materiale ed è valido per il campo di deformazione elastica del materiale stesso. Per i metalli ha un valore numerico di ca. 0,3. Può però discostarsi notevolmente da questo valore approssimato come mostra la tabella 2.3-2. Nei materiali plastici il valore ν è intorno a 0,4; nei media non comprimibili, p.e. gomma e acqua e nel campo di deformazione plastica dei metalli ν diventa = 0,5.

Materiale	ν	Materiale	ν
Leghe di alluminio	0,33	Argento, ricotto	0,37
Columbio	0,38	Argento, duro	0,39
Vetro	0,22	Acciaio	0,28
Gomma	0,5	Acciaio da costruzione, laminato a caldo	0,26
Ghisa grigia	0,25	17-7PH	0,28
Inconel	0,29	PH 15-7Mo	0,28
Rame	0,33	Invar, 36%Ni	0,29
Magnesio	0,35	XCrNi18.9 (SS304)	0,305
Ottone	0,33	XCrNiMo18.12 (SS316)	0,33
Molibdeno	0,32		
Monel	0,32	Titanio	0,34
Nickel	0,31	Vanadio	0,36
Platino	0,39	Wolframio	0,284
Renio	0,49	Zircaloy 2	0,39

Tabella 2.3-2: Coefficienti di Poisson ν in campo elastico di alcuni materiali

Materiale	Temp [°C]							
	-196	100	200	300	400	500	600	800
Metalli								
Aluminio (99.5%)	-22,6	23,8	24,5	25,5	26,5	27,4	28,3	
AlZnMgCu 1.5	-17,8	23,4	24,4	22,5				
Duralumin (95Al; 0.04Cu; resto: Mg, Mn, Si, Fe)		23,5	24,5	26,0	26,7	27,3		
Piombo	-26,8	29,0	29,6	31,1				
Bronzo (85Cu; 95 Mn; 6 Sn)	-14,9	17,5	17,9	18,3	18,8	19,2		
Ghisa	-8,4	10,4	11,1	11,6	12,3	12,9	13,5	14,7
Constantana (60 Cu; 40 Ni)	-11,9	15,2	15,6	16,0	16,4	16,7		
Rame	-13,9	16,5	16,9	17,2	17,7	18,1	18,5	
Magnesio	-21,1	26,0	27,1	27,9	28,8	29,8		
Ottone (62 Cu; 38 Zb)	-16,4	18,4	19,3	20,1	21,0			
Molibdeno	-4,2	5,2	5,4	5,5	5,6			
Nickel	-10,0	13,0	13,6	14,5	14,9	15,2	15,5	16,1
Acciaio								
Acciaio dolce	-8,8	12,0	12,6	13,1	13,6	14,1	14,7	
Acciaio invar (64Fe; 36 Ni)		1,5	3,8	5,3	7,8	9,4	10,8	13,1
1.4301 (X5CrNi 18.9)		16,1	17,1					
Titanio (TiAl6V4)		8,4	8,6	8,9	9,0	9,2		
Tungsteno	-3,8	4,5	4,5	4,7	4,7	4,5	4,5	4,5
Vetro								
Vetro di Jena 16III	-5,9	8,1	8,4	8,7	9,0	9,3		
Vetro di Jena 1565 III		3,5	3,6	3,7	3,9	4,1		
Vetro di quarzo	0,16	0,5	0,6	0,63	0,62	0,62	0,6	0,56
Zerodur® Vetroceramica	-0,18	0,02	0,02					
Materie plastiche								
	Temp= 50°C				Temp= 50°C			
Acetilcellulosa	80 - 90			Poliammide			90 - 100	
Resina acrilica	70 - 80			Poliestere			100 - 150	
Resina epossidica	60			Polistirolo			60 - 80	
Resina fenolica	50 - 80			Polistirolo resist.all'urto			80 - 100	
Poliacetale	90			Poliuretano			190	
Polietilene ad alta densità	160 - 180			Polivinilcloruro PVC			70	
Polietilene a bassa densità	230			Polivinil resist.all'urto			80 - 100	

Tabella 2.3-3: Coefficienti di dilatazione termica α per diversi materiali e per diverse

temperature fra 20 e ϑ [°C] in $10^{-6} \cdot \frac{m}{m} \cdot \frac{1}{K}$

Osservazioni:

La tabella 2.3-2 contiene i valori numerici relativi al coefficiente di Poisson ν di diversi materiali. Vista l'ampia gamma di valori numerici rilevati è consigliabile, nel caso sia necessaria un'alta precisione rilevare il coefficiente di Poisson sperimentalmente, cioè tramite la misurazione con ER della dilatazione e della contrazione trasversale in identiche condizioni. I valori di misurazione dovrebbero essere corretti con il metodo descritto nel paragrafo 7.5 per gli errori di sensibilità trasversale degli estensimetri.

Indicazione importante: il coefficiente ν viene sempre e solo indicato con il suo valore numerico, cioè senza il segno negativo. Ciò vale anche per la tavola 2.3-2. Questa caratteristica, le cui radici sono storiche, deve essere sempre considerata durante l'elaborazione di formule.

2.3.4. La deformazione termica

Ogni corpo varia le sue dimensioni al variare della sua temperatura.

Il riscaldamento produce dilatazione o espansione,
il raffreddamento causa contrazione.

Variazioni di lunghezza dovute alla temperatura non causano sforzi nei materiali se

- a) la libera espansione o contrazione degli oggetti non viene ostacolata,
p.e. tramite bloccaggio o serraggio,
- b) l'oggetto mantiene una temperatura costante in tutta la sua lunghezza.

Se l'espansione termica viene ostacolata, nel materiale si creano sollecitazioni termiche (vedere paragrafi 2.2.3 e 8.4.7).

Si distinguono dilatazioni lineari, dilatazioni superficiali e dilatazioni tridimensionali. Per la tecnica di misurazione delle deformazioni è di particolare interesse la deformazione termica.

Il coefficiente di dilatazione lineare α (chiamato anche coefficiente di dilatazione termica) fornisce un'indicazione della variazione di lunghezza relativa in 10^{-6} m/m ogni grado K:

$$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_1} \cdot \frac{1}{\Delta\vartheta} = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta\vartheta} \text{ in } \left[\frac{\text{m/m}}{\text{K}} \right] = \left[\frac{1}{\text{K}} \right] \quad (2.3-6)$$

$l_1 = l_0$ = Lunghezza iniziale prima della variazione di temperatura
(lunghezza di riferimento)

l_2 = Lunghezza finale dopo la variazione di temperatura

Δl = Variazione di lunghezza in seguito alla variazione di temperatura

$\Delta\vartheta$ = Variazione di temperatura (positiva in caso di riscaldamento, negativa
In caso di raffreddamento)

Anche qui il rapporto viene abbreviato in m/m , cosicché la misura viene denominata solo con $1/K$.

Attenzione: Il coefficiente di dilatazione lineare α dipende dal tipo di materiale e dalla temperatura. Perciò nelle tabelle si trovano diversi valori per diversi intervalli di temperatura. Le risultanti differenze nei valori numerici non devono venire interpretate come una variazione irregolare della dilatazione dei materiali.

2.4 Tipi di sollecitazione degli estensimetri

Il modo in cui un estensimetro viene sollecitato durante la misurazione ha delle conseguenze sulle sue caratteristiche. Per questo motivo, per alcune di esse, vengono indicati i valori limite di temperatura, deformabilità, ecc. A questo punto bisogna chiarire in che modo siano da interpretare i concetti di "misurazione statica", "misurazione quasistatica" e "misurazione dinamica" nella letteratura relativa agli estensimetri.

2.4.1 Misurazioni dinamiche (riferite allo zero)

"Nella tecnica estensimetrica la definizione di "misurazione statica" comprende tutte le misurazioni di deformazioni o parti di deformazioni costanti nel tempo. P.e. esso viene utilizzato anche per un processo costante nel tempo a cui se ne sovrappone uno variabile". (Citato da [2-1]). Riferito all'estensimetro, ciò significa che errori del segnale di misura in seguito a disturbi dovuti all'ER in un (generalmente non meglio precisato) periodo di tempo non superano una soglia di errore accettabile. Il segnale di misura può venire riferito al punto presente prima della misurazione. Per la definizione di queste caratteristiche qualitative dell'estensimetro sarebbe quindi più logico parlare di "misurazioni riferite allo zero".

2.4.2 Misurazioni quasistatiche

Con questo termine si definiscono processi a variazione lenta. La velocità di variazione è talmente lenta da rendere ancora possibile la lettura di uno strumento indicatore con sufficiente precisione senza particolari mezzi ausiliari.

2.4.3 Misurazioni dinamiche (non riferite allo zero)

"Tutte le misurazioni di processi di deformazioni variabili, delle quali possono essere valutate solo le componenti dinamiche, p.e. l'ampiezza di un'oscillazione, vengono considerate misurazioni dinamiche" (citazione da [2 -1]).

Questa definizione merita un'attenzione particolare. Se nei dati tecnici degli estensimetri, per le "misurazioni dinamiche" vengono fornite altre indicazioni rispetto alle misurazioni statiche, allora questi valori sono validi solo per processi a decorso veloce durante i quali non possono influire variazioni temporali dell'estensimetro. Se ad un'oscillazione viene attribuito un valore di base statico od un valore medio, sono validi i limiti per misurazioni statiche, cioè "riferite allo zero", quando anche questo valore di base o valore medio deve essere determinato. Sarebbe più logico allora parlare di "misurazioni non riferite allo zero" invece che di "misurazioni dinamiche".

3. CRITERI DI SCELTA DEGLI ESTENSIMETRI

I compiti svolti dagli estensimetri e gli effetti a cui sono sottoposti durante il loro impiego sono molteplici. Altrettanto vari e numerosi sono i punti da considerare dovendone scegliere uno fra quelli offerti dal mercato. Non esiste un estensimetro in grado di soddisfare al meglio tutte le esigenze, per questo motivo l'offerta è molto ampia e può essere completata, in caso di bisogno, con modelli speciali. A seconda della loro politica i produttori possono offrire una gamma di prodotti contenuta o estremamente vasta. Con un assortimento ben studiato e di dimensioni contenute è possibile risolvere la maggior parte dei problemi senza dover ricorrere a soluzioni speciali e contemporaneamente si facilita la scelta degli utilizzatori poco esperti. Si è potuto rilevare che con circa due dozzine di modelli è possibile eseguire la metà di tutti i tipi di misurazione.

Le seguenti spiegazioni permetteranno agli interessati di scegliere il tipo di estensimetro adatto in base a criteri logici. Che si possano tuttavia addurre argomenti contrastanti e che si debba di conseguenza giungere a un compromesso fa parte della natura della tecnica in generale.

L'autore ha spesso constatato che l'utilizzatore ha solo una vaga idea di ciò che gli serve. Un'attenta riflessione prima della misurazione contribuirà ad evitare costosi fallimenti e, a volte, anche a trovare soluzioni migliori. Il sistema di scelta qui indicato richiede da parte dell'utilizzatore un'analisi delle sue esigenze di misurazione. Per poterlo utilizzare devono essere rispettate due condizioni preliminari:

1. Devono essere chiari gli scopi di misurazione e devono essere note le sue singole fasi e le condizioni al contorno.
2. Devono essere note le caratteristiche dell'estensimetro.

Utile per soddisfare la prima condizione è la tabella 3.0 -1, in cui sono riportati i cinque gruppi di criteri essenziali per la scelta del tipo di strumento giusto. Questa tabella può servire come una specie di "lista di controllo" per evitare che qualche punto importante venga tralasciato. Quanto più accuratamente vengono esaminate le condizioni di utilizzo e le singole necessità, tanto più facilmente si potrà giungere alla decisione giusta evitando insuccessi. Ovviamente non si possono escludere le sorprese dovute a risultati imprevisti, ma si possono però ridurre al minimo.

<p>1. Compito di misurazione</p> <p>Primario: misurazione di deformazione</p> <p>Secondario: analisi sperimentale delle tensioni, costruzione di rilevatori di grandezze fisiche, controllo di processo, dispositivi di sicurezza</p>
<p>2. Condizioni meccaniche nel punto di misurazione</p> <p>2.1 Stato di sforzo Monoassiale - biassiale - direzione principale nota/sconosciuta</p> <p>2.2 Topografia del campo di tensione Omogeneo - eterogeneo - variabile repentinamente (sollecitazioni all'intaglio) Determinazione dei valori medi e dei picchi</p> <p>2.3 Tipo di sollecitazione Statica: entità - direzione (positiva/negativa) - numero dei carichi Dinamica: d'urto – stocastica (random) - ciclica - carico alternato - carico pulsante (positivo/negativo) - ampiezza - numero cicli - valori di misurazione riferiti allo zero/non riferiti allo zero</p> <p>2.4 Rapporto grandezza utile/grandezza perturbatrice P.e. forza normale come grandezza utile con momento flettente sovrapposto come grandezza perturbatrice</p>
<p>3. Condizioni secondarie</p> <p>3.1 Durata della misurazione unica - breve - breve ripetuta -lunga - periodo di funzionamento desiderato - durata dell'applicazione desiderata</p> <p>3.2 Temperatura Valore - campo (prima, durante e fra le misurazioni) - velocità di variazione - irraggiamento unilaterale - coefficiente di dilatazione termica del materiale</p> <p>3.3 Elementi di disturbo Intensità - durata dell'effetto</p> <p>3.3.1 Umidità dell'aria - acqua - acqua in pressione - vapore - ghiaccio</p> <p>3.3.2 Olio (olio per trasformatori, olio di paraffina, olio da macchina, olio idraulico)</p> <p>3.3.3 Sostanze chimiche (solide, liquide, gas, aggressive, inerti)</p> <p>3.3.4 Pressione - vuoto</p> <p>3.3.5 Campi elettrici - campi magnetici - flusso energetico (p.e. corrente di saldatura, fulmine)</p> <p>3.3.6 Radiazione energetica</p> <p>3.3.7 Forza esterna (urto, impatto, spinta delle terre)</p>
<p>4 Condizioni elettriche sul punto di misurazione</p> <p>4.1 Collegamento del punto di misurazione Quarto di ponte - collegamento a tre conduttori - mezzo ponte - due quarti di ponte - ponte intero</p> <p>4.2 Alimentazione dell'estensimetro Corrente continua - corrente alternata (frequenza portante) - potenziale contro massa (terra) - alimentazione continua/a impulsi (tempo - velocità di pulsazione)</p> <p>4.3 Cavi Lunghezza - resistenza - isolamento - capacità - resistenza ad azioni esterne (di tipo chimico, meccanico, termico) - tipo di terminale (spine, cavi passanti)</p>
<p>5. Condizioni di applicazione</p> <p>5.1 Materiale dell'elemento strutturale Lavorabilità - adesività o eventualmente saldabilità</p> <p>5.2 Possibilità di applicazione Accessibilità - impiego di sabbiatura o altri trattamenti superficiali - resistenza ai solventi e alla temperatura</p> <p>5.3 Direzione dei terminali</p> <p>5.4 Rapporti spaziali Estensimetro –cavo – copertura di rotezione – calotte di protezione</p>

Tabella 3.0-1: Schema per l'analisi delle condizioni da rispettare durante misurazione con estensimetri

Per poter scegliere lo strumento ottimale è necessario soddisfare la seconda condizione, cioè conoscere le caratteristiche degli estensimetri.

I metodi per la determinazione delle caratteristiche degli estensimetri non sono sempre gli stessi, cosicché i risultati sono forse da interpretare in maniera differenziata. Ovviare a questa situazione e giungere a un sistema di misurazione unitario è lo scopo della direttiva 2635, che è stata elaborata e pubblicata dall'Associazione VDI/VDE Tecnica di misurazione e regolazione [2-1]. Sono in corso dei tentativi per giungere a un allineamento internazionale. Un chiarimento sugli scopi e sul contenuto della direttiva è fornito in [3-1]. I dati individuali sono allegati in forma di fogli caratteristiche in ogni confezione di estensimetro; le specifiche di una serie sono contenute nella documentazione relativa. Nel par. 3.3 (dati tecnici) sono pubblicati ulteriori informazioni e valori empirici.

Così come gli effetti di disturbo non si verificano contemporaneamente, non è neanche necessario valutare contemporaneamente tutte le caratteristiche; sono sufficienti quelle che hanno attinenza con le condizioni di impiego rilevate in precedenza (eventualmente tramite la tabella 3.0 -1). Ciò appare logico anche per i procedimenti di applicazione e per i mezzi atti a proteggere il luogo di misurazione da disturbi esterni di tipo meccanico o chimico. In questo caso non bisogna solo verificare l'idoneità ma anche la possibilità di impiego.

3.1 CAMPI D'APPLICAZIONE

Fondamentalmente con gli estensimetri dei vari tipi si possono soddisfare sia le esigenze dell'analisi sperimentale delle sollecitazioni sia quelle della costruzione di trasduttori per la misura di grandezze fisiche. Tuttavia ci sono determinate differenze fra le varie serie di estensimetri che le rendono particolarmente indicate per l'uno o per l'altro campo di impiego.

3.1.1 Analisi delle sollecitazioni, tecnica di misurazione su modelli, biomeccanica

Per l'analisi sperimentale delle sollecitazioni, di cui fanno parte la tecnica di misurazione su modelli e la biomeccanica, sono da preferire estensimetri robusti e flessibili che possono essere tranquillamente utilizzati anche in condizioni particolarmente difficili. I più indicati sono gli estensimetri con "Polimide" come materiale portante per la griglia di misurazione aventi la "Y" come lettera di riferimento della serie. Questa serie include un grande numero di diversi tipi di estensimetri con i quali è possibile risolvere i molteplici problemi dell'analisi delle sollecitazioni. Ci sono inoltre numerose versioni speciali, p.e. rosette forate e rosette ad anello toroidale per la determinazione degli sforzi residui negli elementi strutturali, catene di estensimetri per lo studio della distribuzione degli sforzi in elementi dalla struttura complessa, estensimetri con supporti metallici che possono essere saldati a punti sull'oggetto da misurare e molti altri. Per avere informazioni si possono consultare i cataloghi recenti.

3.1.2 Costruzione di trasduttori per la misura di grandezze fisiche

Questa varietà di modelli di estensimetri non è necessaria nella produzione di trasduttori per la misura di grandezze fisiche; in questo settore è generalmente più importante la precisione di misurazione. Gli estensimetri che possono garantire la precisione estrema richiesta dalle celle di carico tarabili sono dello stesso tipo degli estensimetri della serie "G". Il supporto della griglia di misurazione è costituito da resina fenolica rinforzata in fibra di vetro.

In caso di bisogno possono essere realizzati estensimetri speciali per i quali è però necessario prendere accordi con il costruttore.

La serie "K" è stata realizzata appositamente per le esigenze della produzione di trasduttori. In una pubblicazione a parte sono elencate le sue caratteristiche e la sua possibilità di impiego.

In caso di bisogno la HBM fornisce anche versioni speciali progettate per adempiere in modo ottimale a determinati compiti. Sono disponibili le apparecchiature più moderne per la produzione dei negativi [3-51]. Essi consentono la piena utilizzazione delle varie possibilità di configurazione che la tecnica di incisione fotografica offre per la fabbricazione di estensimetri a lamina. Con questo l'utilizzatore non deve però sentirsi tentato dal farsi realizzare a tutti i costi un estensimetro speciale. Ciò contraddirebbe anche l'affermazione iniziale secondo cui nella maggior parte dei casi un piccolo assortimento di estensimetri è più che sufficiente. Gli estensimetri speciali sono adatti solo quando ci siano particolari vantaggi o condizioni. In questo caso si consiglia di fare una richiesta che fornisca una chiara spiegazione del caso. Eventualmente si può trovare una soluzione ricorrendo alla riserva dei negativi speciali disponibili.

3.2 Forme costruttive degli estensimetri

Gli estensimetri possono avere dimensioni e forme diverse. Oltre a griglie di misurazione di diversa lunghezza si possono trovare collegamenti di varie forme e lunghezze. Si distinguono inoltre i cosiddetti estensimetri lineari a disposizione semplice o doppia (parallela), rosette a X con gli assi della griglia di misurazione disposti fra loro a 90°, rosette a R con assi disposti ad una determinata angolazione, catene di estensimetri e numerose altre forme speciali.

La molteplicità delle dimensioni e delle forme è la conseguenza del necessario adattamento alle richieste di soluzioni disparate. Nei paragrafi seguenti verranno trattati i criteri per la scelta dell'estensimetro adatto.

3.2.1 Lunghezza della griglia di misura

La fig. 3.2.1 fornisce una rappresentazione schematica di estensimetri di diversa lunghezza con una disposizione in parte differenziata dei collegamenti.

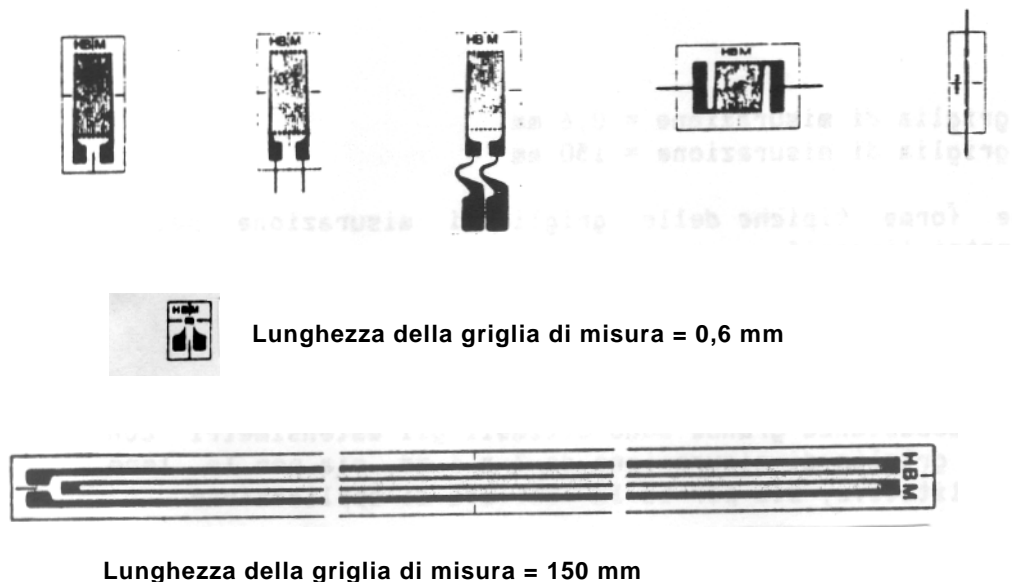


Figura 3.2-1: Alcune forme tipiche delle griglie di misura dei cosiddetti "estensimetri lineari"

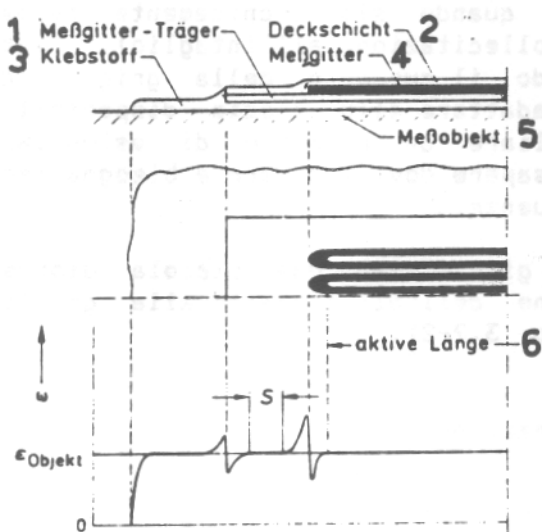
3.2.1.1 Campo di deformazione omogeneo

Un primo criterio è lo spazio disponibile sull'oggetto da misurare. Quando l'oggetto è abbastanza grande sono ottimali gli estensimetri con una lunghezza della griglia di misura da 3 a 6 mm, sia per le loro caratteristiche qualitative, sia per la facilità di applicazione.

Nei casi in cui lo spazio di applicazione sia limitato sono stati realizzati estensimetri con griglie di misura estremamente sottili e collegamenti ai lati delle griglie stesse.

La convinzione molto diffusa che la sensibilità di un estensimetro dipenda dalla sua lunghezza è sbagliata. Il segnale di misurazione di un estensimetro metallico è proporzionale alla variazione di lunghezza relativa (deformazione) e non alla variazione di lunghezza assoluta. La lunghezza assoluta dello strumento non ha quindi alcuna influenza sulla sua sensibilità. Tuttavia gli estensimetri estremamente piccoli dovrebbero essere impiegati solo quando sia tecnicamente necessario (p.e. nel caso di studi sugli sforzi in corrispondenza di intagli). Piuttosto bisognerebbe pensare se tagliando il supporto della griglia di un estensimetro grande lo si può adattare allo spazio disponibile. La domanda allora è: Si può tagliare un pezzetto di estensimetro? Risposta: Sì, si può, ma bisogna sapere dove tagliare e bisogna essere a conoscenza delle possibili conseguenze.

Per questo motivo ci è sembrato giusto fare una piccola digressione nella meccanica della trasmissione della deformazione alla griglia di misurazione dell'estensimetro (fig. 3.2-2).



- 1 sostegno della griglia di misura
- 2 strato di copertura
- 3 adesivo
- 4 griglia di misura
- 5 oggetto da misurare
- 6 lunghezza attiva

Figura 3.2-2: La trasmissione della deformazione nella griglia dell'estensimetro (schema), spiegazioni nel testo.

La premessa è che l'oggetto da misurare si deformi uniformemente di $\epsilon_{\text{oggetto}}$. Questa deformazione deve essere trasmessa attraverso lo strato di adesivo e la lamina di sostegno alla griglia di misura. A questo scopo sono necessarie forze che vengono sottratte all'oggetto stesso.

Se l'oggetto in questione non è troppo sottile, le forze prelevate sono trascurabilmente piccole rispetto alle forze attive in esso.

Per determinare l'entità della deformazione nei singoli strati di applicazione fino alla griglia dell'estensimetro sono necessari determinati tratti di trasmissione. Questi tratti si formano di volta in volta durante il passaggio da uno strato all'altro, e cioè:

- dall'elemento strutturale allo strato di adesivo,
- dallo strato di adesivo al supporto della griglia,
- dal supporto alla griglia di misurazione.

La lunghezza dei tratti di trasmissione dipende dallo spessore dei singoli strati e dalla rigidità (modulo E) del materiale di cui sono composti. Dal diagramma si può rilevare che alla fase di trasmissione segue uno strato in cui la deformazione dell'oggetto di misurazione e la deformazione parziale delle componenti dell'estensimetro sono uguali. Nei punti di passaggio da una componente dell'estensimetro all'altra si formano incrementi di deformazione che bilanciano lo scompensamento della componente successiva.

Il sostegno della griglia di misura - praticamente la parte essenziale - può eventualmente essere accorciato del tratto indicato con la lettera "S" nel diagramma senza che ciò abbia conseguenze sulle caratteristiche dell'estensimetro. Qualora esso venga ripetutamente tagliato, il tratto di trasmissione della dilatazione si estenderà fino al campo della lunghezza "attiva" della griglia di misura. Ciò ha come conseguenza una diminuzione apparente della sensibilità di deformazione che viene espressa con il fattore k (vedere par. 3.3.1). Negli estensimetri a griglia lunga questa influenza è limitata; negli estensimetri molto corti può portare a una diminuzione della sensibilità di pochi punti percentuali. Un accorciamento eccessivo dei tratti di trasmissione del sostegno della griglia può avere effetti negativi anche sullo scorrimento dell'estensimetro (par. 3.3.9).

Nei materiali sintetici (adesivi, materiali del supporto della griglia) il modulo E dipende dalla temperatura. Ciò significa che ad alte temperature i tratti di trasmissione si allungano e viceversa. Questa caratteristica può eventualmente essere importante. Come quota minima per la sporgenza della lamina di sostegno oltre la griglia di misurazione dovrebbero essere mantenuti 1-2 mm.

Il taglio laterale dell'estensimetro - parallelo alla direzione di misurazione - ha un'influenza minima sulla sensibilità trasversale dell'estensimetro (vedere par. 3.3.3). Siccome la sensibilità trasversale degli estensimetri moderni è già molto bassa, si può trascurare questa influenza e tagliare l'estensimetro senza timori fino ai bordi laterali della griglia.

3.2.1.2 Campo di deformazione eterogeneo

L'estensimetro forma la media aritmetica dello stato di deformazione al di sotto della sua griglia di misurazione. Bisogna partire da questa considerazione volendo rispondere al quesito relativo alla più opportuna lunghezza della griglia.

Per cercare la media bisogna utilizzare griglie lunghe.

Esempio caratteristico: misurazioni con cemento (eventualmente anche con legno, sintetici a fibre rinforzate ecc.). Con degli estensimetri corti si potrebbero stabilire gli allungamenti parziali che per la ghiaia sono inferiori al valore medio [3.2] mentre per i conglomerati cementizi sono superiori, fig. 3.2-3.

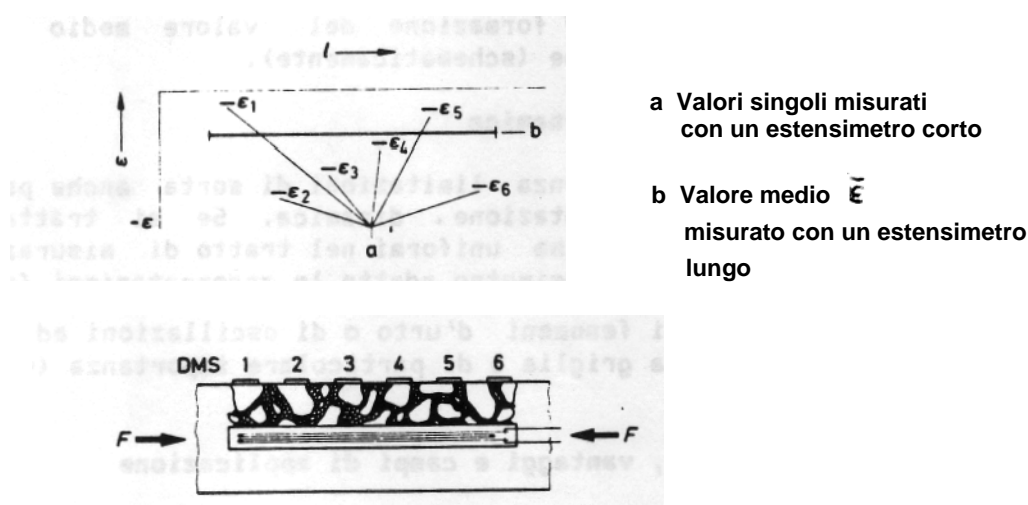


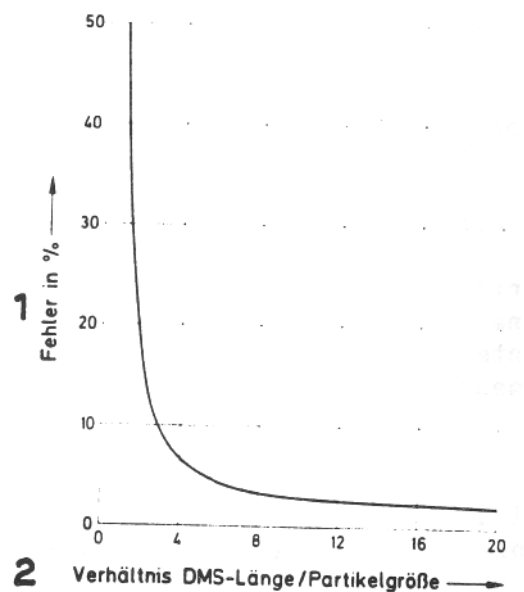
Figura 3.2-3: Esempio di applicazione di un estensimetro con griglia lunga: formazione del valore medio in una materiale eterogeneo, p.e. cemento

Il rapporto fra valori di deformazione massimi e minimi per il cemento può andare da 1:3 a 1:15 a seconda del tipo di inerti utilizzati. Si può ottenere un valore medio accettabile se la lunghezza della griglia di misurazione è quattro o, meglio, cinque volte superiore ai grani più grandi degli inerti. Il diagramma della fig. 3.2-4 mostra il probabile errore di misurazione in relazione al rapporto lunghezza dell'estensimetro/grandezza delle particelle.

È valido il contrario qualora si ricerchi il valore di picco o lo stato di deformazione locale in un campo di sforzo eterogeneo (p.e. sforzo in corrispondenza di un intaglio). In questo caso sono indicate griglie di misurazione corte poiché un estensimetro lungo fornirebbe un valore medio non ricercato.

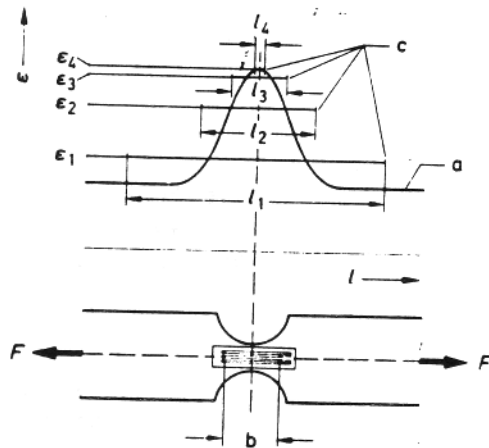
Nel diagramma della fig.3.2-5 viene mostrato in modo schematico come il valore di misurazione e la lunghezza della griglia siano interdipendenti. La curva rappresenta l'andamento effettivo della deformazione lungo il campione intagliato. I valori delle ordinate $\epsilon_1 \dots \epsilon_4$ indicano quali valori si otterrebbero se la griglia dell'estensimetro impiegato avesse la lunghezza correlata $l_1 \dots l_4$. Il valore massimo viene reso correttamente solo con l'estensimetro breve di lunghezza l_4 .

Sulla base di questo dato di fatto si potrebbe supporre che la lunghezza "zero" sia ideale ma naturalmente ci sono dei limiti. Tecnicamente è possibile realizzare degli estensimetri con una griglia lunga 0,2 mm. Quanto più corta diventa la griglia di misura, tanto più diventano evidenti i problemi di trasmissione della deformazione nella griglia. Essi sono dovuti soprattutto all'applicazione che è particolarmente difficile in corrispondenza di intagli e può portare a grossi errori di misurazione. Inoltre bisogna pensare che la sottrazione di calore dall'oggetto di misurazione è molto limitata quando la superficie della griglia è piccola. Ciò significa che la corrente che produce l'effetto Joule deve essere tenuta molto bassa e bisogna quindi scegliere e regolare di conseguenza la fonte utilizzata per l'alimentazione. Non si dovrebbe perciò scegliere un estensimetro più corto del necessario. Come indicazione di massima potrebbe valere: lunghezza della base di misura $\leq 1/2$ raggio dell'intaglio.



- 1 errore in %
- 2 rapporto lunghezza estensimetro/grandezza particelle

Figura 3.2- 4: Errore di misurazione in caso di materiali eterogenei (p.e. cemento) in relazione al rapporto lunghezza estensimetro/grandezza particelle (secondo [3-3]).



- a andamento reale della deformazione lungo l'asse mediano della barra di trazione intagliata
- b lunghezza attiva della griglia di misura $l_1 \dots l_i$
- c valori di deformazione misurati con un estensimetro di lunghezza l_i

Figura 3.2- 5: Influenza della lunghezza l della griglia sul valore di misurazione in seguito alla formazione del valore medio nella misurazione di picchi di sollecitazione (schematicamente).

3.2.1.3. Stati di deformazione dinamica

Gli estensimetri sono adatti senza limitazioni di sorta anche per la misurazione di stati di deformazione dinamica. Se si tratta di deformazioni variabili nel tempo ma uniformi nel tratto di misurazione, valgono per la scelta dell'estensimetro adatto le argomentazioni fornite nel par. 3.2.1.1. In caso di fenomeni d'urto o di oscillazioni ad alta frequenza la lunghezza della griglia è di particolare importanza (vedere par. 3.3.7).

3.2.2 Estensimetri multipli, vantaggi e campi di applicazione

Gli estensimetri multipli hanno più griglie di misurazione su di un sostegno comune. Versioni tipiche di questo tipo di strumenti sono gli estensimetri doppi, le catene e le rosette di estensimetri. Il loro vantaggio risiede nel fatto che la distanza e l'orientamento reciproci delle griglie sono rispettati con grande precisione. Un ulteriore vantaggio è determinato dal risparmio di tempo di applicazione, poiché più griglie di misurazione possono essere applicate contemporaneamente in una singola fase di lavoro. Infine alcune misurazioni che richiedono griglie strettamente affiancate le une alle altre possono essere eseguite solo con estensimetri multipli poiché l'applicazione di estensimetri singoli non sarebbe più tecnicamente possibile.

3.2.2.1 Catene di estensimetri per la determinazione dei gradienti di sforzo

Nel paragrafo "sforzi in corrispondenza di intagli" è stata spiegata l'influenza della lunghezza della griglia di misura sul risultato della misurazione stessa. In realtà i rapporti spesso non sono così chiari da permettere di predeterminare con sicurezza il luogo di massima sollecitazione. Oppure si potrebbe desiderare di conoscere non solo il picco, ma anche l'andamento dello sforzo in un certo tratto o lo spostamento del picco sotto l'influsso di un punto di applicazione del carico mobile. Per risolvere questo tipo di compiti sono state messe a punto le catene di estensimetri.

Le catene di estensimetri raccolgono su di un sostegno comune una serie di griglie di misurazione uguali o variabili a intervalli regolari.

La fig. 3.2-6 mostra alcune delle versioni più importanti.

Le catene contengono 10 griglie singole o 5 gruppi di 3 griglie. All'estremità di ogni catena si trova un'ulteriore griglia che può venire applicata separatamente e nel punto giusto come estensimetro di compensazione o di completamento.

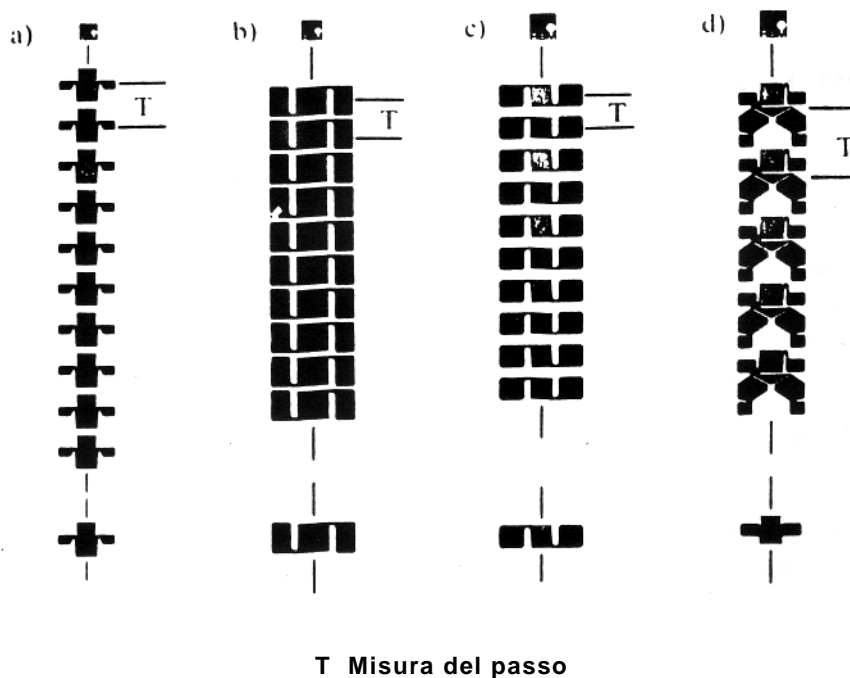


Figura 3.2-6: Varie versioni delle catene di estensimetri:

- a) direzione della griglia parallela all'asse longitudinale della catena
- b) direzione della griglia perpendicolare all'asse longitudinale della catena
- c) direzione della griglia alternativamente parallela e perpendicolare all'asse longitudinale della catena
- d) griglia in gruppi da 3 pezzi a $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ dall'asse longitudinale della catena (catena a rosette)

Le catene di estensimetri hanno misure diverse. La misura T (passo) indica la distanza degli assi mediani di due griglie vicine e, nel caso di catene a rosette, l'interasse fra due gruppi di griglie. Le catene del tipo a) e b) vengono prodotte con passo da 1 mm, 2 mm e 4 mm, quelle del tipo c) hanno passo da 2 mm e 4 mm, le catene a rosetta d) hanno una misura di passo di 4 mm.

La fig. 3.2.7 mostra come esempio l'impiego di catene di estensimetri per la determinazione della distribuzione degli sforzi nel raccordo di fondo dente di una ruota dentata [3-4]. Cinque catene misurano in questo caso in 50 punti del raccordo di fondo dente le deformazioni tangenziali e trasversali. L'immagine di sinistra mostra una catena di estensimetri applicata e, per un confronto di dimensioni, un fiammifero; l'immagine di destra mostra il punto di misurazione finito e cablato.

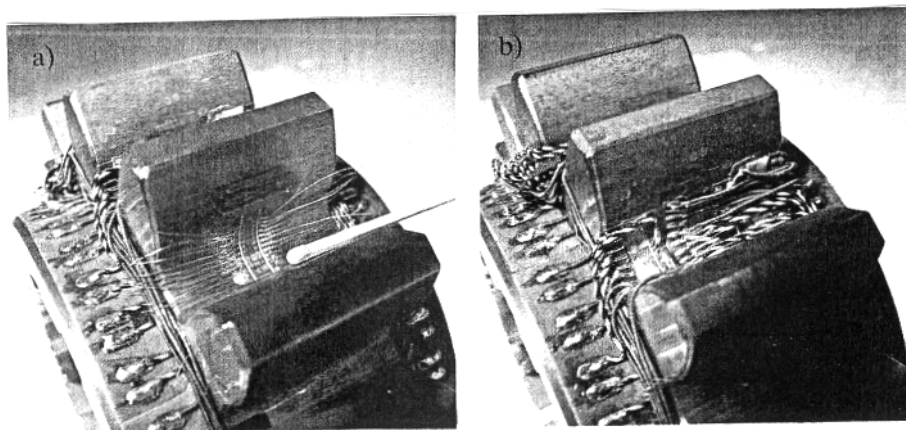


Figura 3.2.7: Misura di deformazioni con catene di estensimetri nel raccordo di fondo dente di una ruota dentata (secondo [3-4])
a) catena di estensimetri applicata con fiammifero per confronto dimensionale
b) punto di misurazione preparato e cablato

Il diagramma in fig. 3.2-8 (a sinistra sollecitazioni di compressione, a destra sforzo di trazione) mostra gli sforzi in direzione tangenziale rilevati su una ruota sperimentale con tre punti di applicazione della forza come parametro. (Gli esperimenti sono stati effettuati dal centro di ricerca per le ruote dentate e i meccanismi della TU di Monaco). In questo esempio non era possibile prevedere la posizione del valore massimo dello sforzo; inoltre è riconoscibile una certa dipendenza dal punto di applicazione della forza. Misurazioni di questo tipo possono essere effettuate in maniera soddisfacente solo con catene di estensimetri.

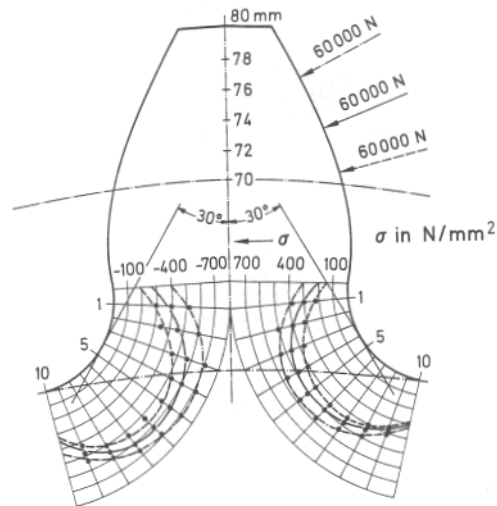
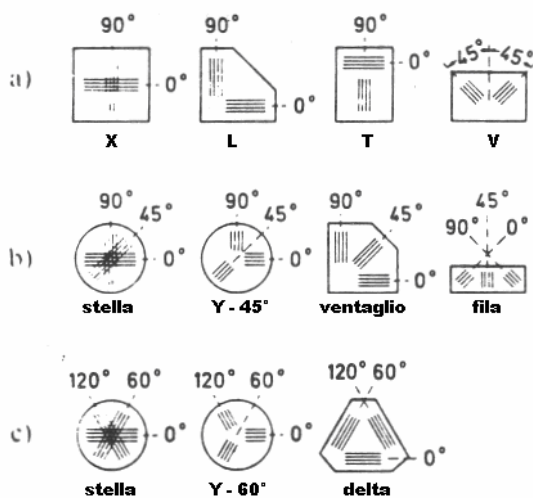


Figura 3.2- 8: Tensioni tangenziali nel raccordo di fondo dente di una ruota dentata

3.2.2.2 Rosette di estensimetri per la determinazione degli stati di sforzo biassiali

La denominazione di "rosetta" deriva dalla forma esterna originaria di questi estensimetri multipli che riunivano su di un supporto circolare comune diverse griglie incrociate a stella. Il termine venne poi trasmesso a tutti gli altri estensimetri multipli con gli assi della griglia incrociati. La disposizione incrociata era necessaria in origine a causa della grande lunghezza della griglia; tuttavia viene occasionalmente impiegata anche oggi. Le moderne tecniche di produzione, in particolare la tecnica di incisione delle lamine, hanno favorito le forme a rosetta con le griglie di misurazione disposte fianco a fianco, fig. 3.2-9. Entrambe le versioni hanno punti negativi e positivi.



a) Rosetta a X con assi incrociati a 90° impiego in caso di stati di sforzo biassiale con direzioni principali conosciute (vedere par. 8.2.1)

b) Rosette a R con assi incrociati a $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ (dette anche rosette ad angolo retto)

c) Rosette a R con assi incrociati a $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ (rosette delta), le rosette b) e c) vengono impiegate in casi di sforzo biassiale con direzioni principali sconosciute (vedere par. 8. 2. 2).

Figura 3.2- 9: Rosette di estensimetri

Nelle rosette a stella o a croce le griglie di misurazione sono sovrapposte. Ciò ha il vantaggio che le componenti di dilatazione possono essere determinate sullo stesso punto nello spazio più ristretto possibile. Si hanno però degli svantaggi dovuti alla distanza non uniforme della griglia dalla superfici dell'oggetto da misurare soprattutto quando oggetti dalle pareti sottili o superfici curve sono soggetti a sforzo di flessione. La superiore rigidità alla deformazione (indice di rigidità) dovuta alla struttura più robusta delle rosette "impilate" deve essere tenuta in considerazione nel caso di oggetti sottili, soprattutto di quelli costituiti da materiali con un basso modulo E (materie plastiche), a causa di un possibile impedimento della deformazione [3-52]. Il ristagno di calore dovuto alla sottrazione di calore sfavorevole nelle griglie medie e superiori può essere ovviato diminuendo la tensione di alimentazione. Da questo punto di vista sono più vantaggiose tutte le forme di rosette nelle quali le griglie sono affiancate sullo stesso piano. Il loro maggiore ingombro potrebbe causare problemi con oggetti molto piccoli o in caso di forti gradienti di sforzo nel campo della rosetta. Per questi motivi si producono rosette di diverse forme e dimensioni.

Per le rosette con 2 griglie di misurazione, i cui assi si tagliano a 90° (fig. 3.2-9a), viene utilizzata la lettera "X" come simbolo chiave. La lettera X viene impiegata come segno distintivo degli assi incrociati anche quando la disposizione spaziale della griglia assume una forma a T, a L o a V.

Nell'analisi delle tensioni si usano le rosette X per l'esame degli stati di tensione biassiali con direzioni principali note.

Per la costruzione di trasduttori per la misura di grandezze fisiche semplici e per scopi simili (p.e. nel controllo delle macchine) si stabiliscono con le rosette X le dilatazioni negative e positive per la formazione delle somme (vedere par. 8.4).

Il simbolo chiave per le rosette con 3 griglie di misurazione è la lettera "R". Ci sono due forme fondamentali che si differenziano per la diversa angolazione delle loro griglie: $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ e $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ (fig. 3.2-9 b e c). I dati relativi agli angoli si riferiscono sempre alle direzioni degli assi delle griglie, indifferentemente dal fatto che le griglie siano disposte a stella, a Y, a delta, a ventaglio ecc.. Le rosette a R sono impiegate per l'analisi degli stati di sforzo biassiali con direzioni principali di cui non si conoscono direzione e entità. Nel par. 8.2 sono contenuti esempi di applicazione e formule di interpretazione per le misurazioni con rosette.

3.2.2.3 Estensimetri a rosetta per la determinazione degli sforzi residui

Il metodo con cui si misurano gli sforzi residui di un elemento strutturale deve essere chiarito con un esempio. Ci si immagini una lastra di cui si debba accertare lo stato di sforzo residuo, fig.3.2-10. Si può trattare di tensioni normali mono- o biassiali con direzioni principali sconosciute, a cui possono sovrapporsi sforzo di flessione.

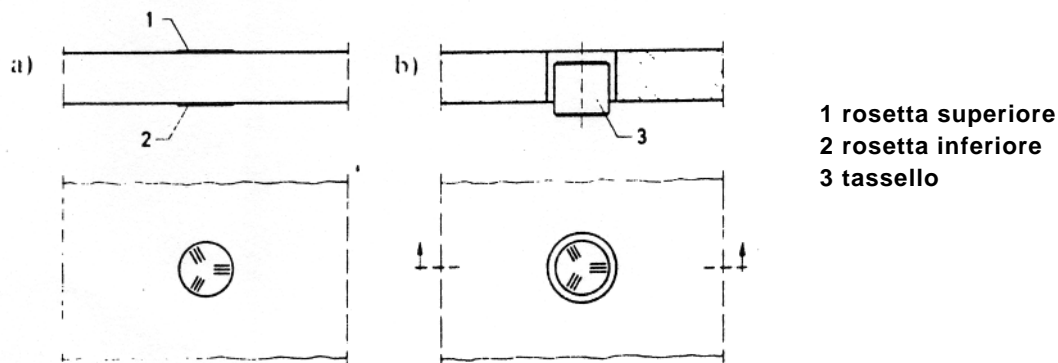


Figura 3.2-10: Esempio per la spiegazione del metodo di misurazione atto a determinare le tensioni proprie
a) stato iniziale
b) stato seguente alla separazione del tassello

Un estensimetro a rosetta viene applicato al punto da studiare e la direzione della sua griglia viene fissata in relazione all'oggetto da misurare. Poi vengono registrati i valori di misurazione di ogni singola griglia (stato di partenza). Qualora si prevedano sforzi di flessione sovrapposti, si deve applicare sulla superficie opposta, esattamente di fronte alla prima rosetta, un'altra rosetta e poi si procede allo stesso modo. Quindi, con una fresa ad anello o un altro strumento adatto, viene estratto il pezzo di materiale di sostegno alla rosetta. Il piccolo tassello estratto è ora libero dalle forze che prima gli venivano trasmesse dal materiale circostante. Di conseguenza ritorna elasticamente alla sua posizione naturale senza carico.

Una seconda misurazione delle singole griglie mette in evidenza le variazioni. La valutazione avviene sulla base della formula per le misurazioni con rosette del par. 8.2. Bisogna solo osservare che in questo caso viene misurato il rilassamento; gli sforzi residui hanno segno contrario.

Si è stabilito che non è assolutamente necessario fresare via completamente un tassello dall'oggetto da esaminare, soprattutto quando si tratta di elementi strutturali compatti e manca l'accesso da entrambi i lati consentito solo dalle piastre.

È già sufficiente far avanzare la scanalatura anulare fino ad una profondità relativamente limitata per poter distendere sufficientemente il nocciolo alla sua superficie, fig. 3.2-11.

Con il "procedimento a nucleo toroidale", come viene chiamato, cadono le limitazioni del metodo a tassello relative allo spessore dell'elemento. La profondità dell'intaglio anulare influenza il grado di distensione e ciò è da tenere presente nella valutazione dei risultati di misurazione. I fondamenti teorici e la valutazione dei risultati sono descritti in [3-5]. Una rosetta speciale a nucleo toroidale, che si adatta perfettamente alle esigenze di questo procedimento, è mostrata nella fig. 3.2-12.

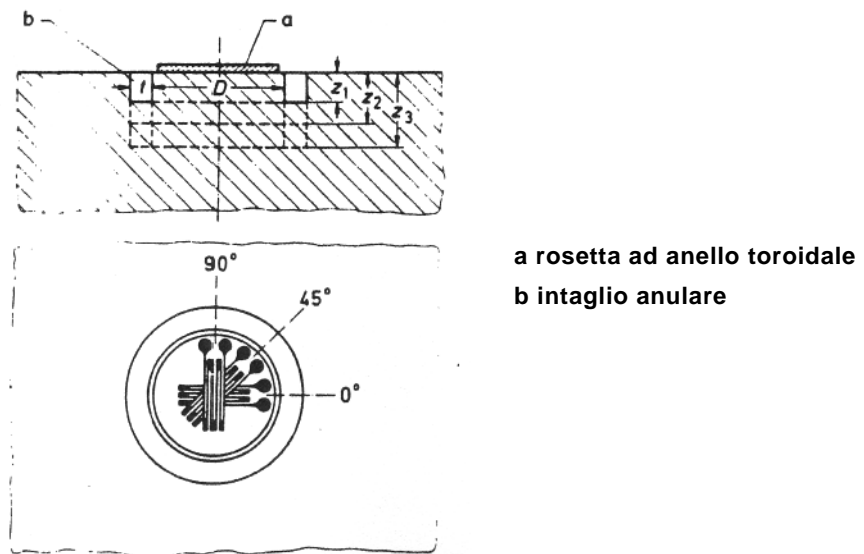


Figura 3.2-11: Il procedimento a nucleo toroidale secondo Boehm e Wolf (schematico)

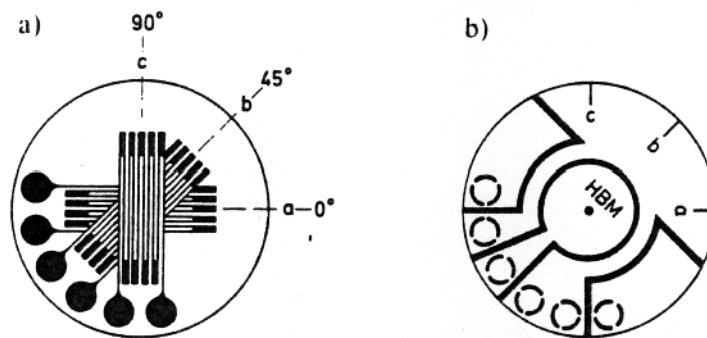


Figura 3.2-12: Estensimetro a rosetta speciale per il procedimento a nucleo toroidale secondo Boehm e Wolf
a) disposizione delle griglie
b) vista esterna con circuito stampato

Un vecchio metodo per la misurazione degli sforzi residui è il "procedimento della rosetta forata". Si trapano un piccolo foro e si causa così un disturbo nello stato di sforzo esistente. In questo modo varia il flusso di forze passante e il foro si deforma nei bordi, fig. 3.2-13.

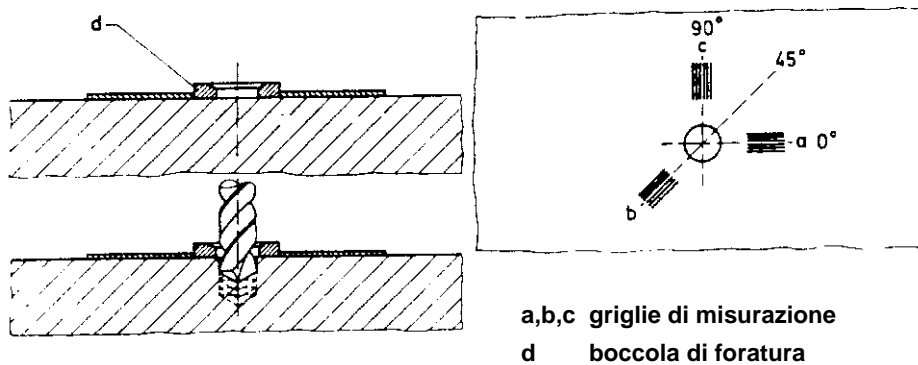


Figura 3.2-13: Il procedimento della rosetta forata (schema)

È sufficiente forare fino a raggiungere una profondità pari al diametro del foro. Una rosetta speciale possiede 3 griglie disposte a $0^\circ/45^\circ/90^\circ$, in modo da consentire un'analisi dell'entità e dalla direzione dello sforzo. Una piccola boccola di foratura serve a centrare il foro; premessa importante per ottenere risultati precisi. La figura 3.2-14 mostra una versione di rosetta per il metodo della rosetta forata.

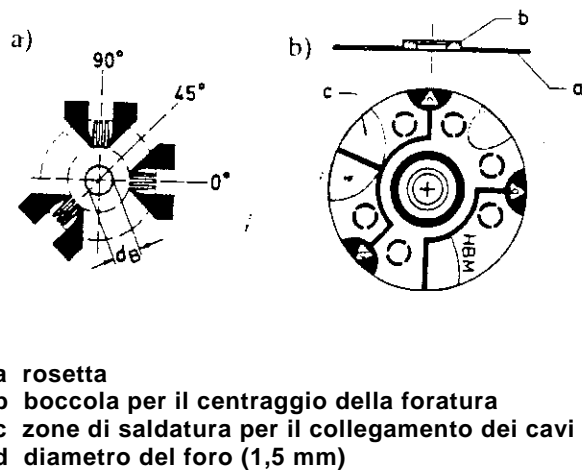


Figura 3.2-14: Estensimetro a rosetta speciale RY 61 per il procedimento della rosetta forata

- a) disposizione della griglia di misurazione
b) rosetta completa

I limiti del metodo sono dati dall'incremento dello sforzo ai bordi del foro in seguito all'effetto dell'intaglio. In questo modo il materiale può deformarsi oltre lo snervamento sebbene gli sforzi residui siano al di sotto di questo limite.

I principi su cui si basa questo procedimento e i metodi di valutazione sono trattati in [3-6, 3-7] nel par. 8.3.

3.2.3 Estensimetri speciali

Accanto alle griglie di misura più diverse, adattate ai diversi impieghi, ci sono anche estensimetri speciali che si differenziano per esempio dal modo in cui vengono fissati all'oggetto di misurazione (di questa versione forniremo 3 esempi). Ci sono inoltre altre forme speciali che non possiamo trattare in quest'ambito ma che sono ampiamente illustrate nei prospetti informativi.

3.2.3.1 Estensimetri saldabili

Questi estensimetri hanno una base metallica p.e. in acciaio inox. Il fissaggio viene effettuato con una saldatura a punti. La fig. 3.2-15 mostra alcuni esempi. A causa della loro base di acciaio questi estensimetri sono molto rigidi e possono perciò essere usati solo per oggetti robusti e dalle pareti spesse, p.e. strutture di acciaio.

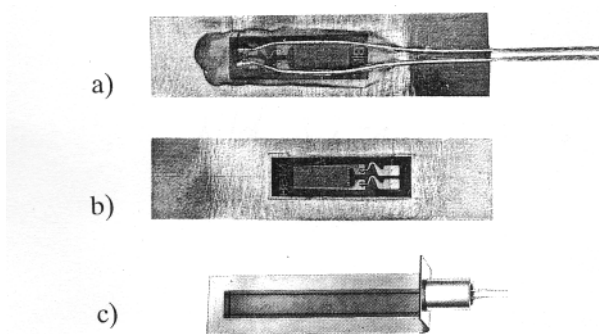
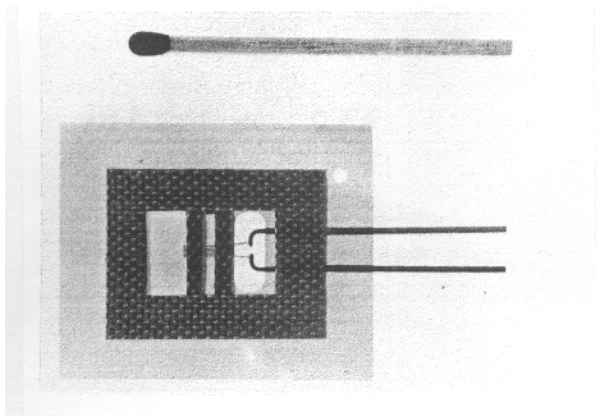


Figura 3.2-15: Esempi di estensimetri saldabili

- a) estensimetro con basetta in acciaio, terminali e protettivo
- b) estensimetro con basetta in acciaio
- c) estensimetro con capsula in metallo

3.2.3.2 Estensimetri a griglia libera e ad alta temperatura

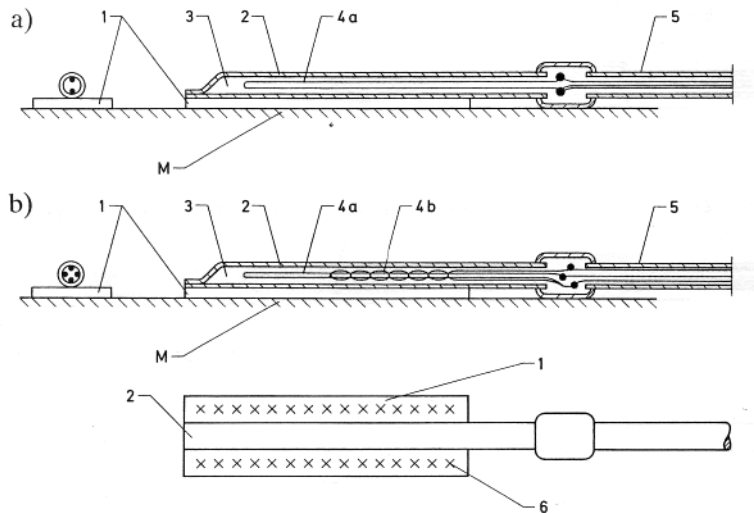
Gli estensimetri a griglia libera vengono impiegati preferibilmente per campi di temperature estremamente alti o estremamente bassi. La griglia è fissata ad un supporto che viene rimosso nel corso dell'applicazione, fig.3.2-16. Per il fissaggio vengono impiegati mezzi ceramici che, come la leghe in platino-wolframio della griglia, consentono misurazioni (non riferite allo zero) nel campo delle alte temperature fino a 800°C.



**Figura 3.2-16:
Estensimetro a griglia libera per alte temperature; adatto per l'applicazione con leganti ceramici**

3.2.3.3 Estensimetri saldabili ad alta temperatura

Rispetto ai suddetti estensimetri a griglia libera, la cui applicazione è veramente difficile, quelli applicabili con saldatura a punti - sistema Alitech - possiedono certi vantaggi. Essi vengono prodotti in versioni a quarto di ponte e a mezzo ponte.



- 1 flangia di saldatura
- 2 copertura metallica
- 3 polvere di ossido di magnesio
- 4a doppiino della griglia
- 4b elica di compensazione
- 5 cavo o cavo con rivestimento metallico
- 6 punti di saldatura

Figura 3.2-17: Estensimetro per alte temperature, incapsulato, saldabile sistema Alitech/Eaton (schema)
a) versione a quarto di ponte
b) versione a mezzo ponte (doppiino di misurazione ed elica di compensazione della temperatura)

Il filo di misurazione è immerso in polvere di MgO compatta e protetto da un tubo metallico (fig. 3.2-17). Sono disponibili anche versioni con cavo con rivestimento metallico. Il campo di temperature dell'estensimetro con griglia PtW va da ca. - 260°C a + 550°C e arriva a ca. 700°C per misurazioni non riferite allo zero. Ulteriori informazioni sono contenute in [3-8 fino a 3-10, 3-14, 3-18, 3-19, 3-23, 3-50].

3.2.4 La resistenza elettrica

Gli estensimetri vengono prodotti con resistenze diverse. I valori numerici hanno origini storiche e sono stati mantenuti. Il valore predominante è 120 Ω ed è in questo gruppo di resistenza che si può trovare la più ampia varietà di estensimetri. Essi vengono di preferenza impiegati per l'analisi dello stato di sforzo, per i compiti di controllo ecc.. Oltre a questi si possono trovare serie di estensimetri a 350 Ω , 700 Ω e 1000 Ω che, insieme a quelli con altri valori di misurazione, vengono impiegati in larga misura nella costruzione di trasduttori per la misura di grandezze fisiche.

Non si può dire con esattezza quale sia il valore ottimale. Ci sono però tre punti determinanti nella scelta della resistenza di un estensimetro:

- la compatibilità dell'apparecchio di misurazione da collegare,
- le influenze del tipo di cablaggio fra estensimetro e apparecchio di misurazione,
- il carico elettrico consentito dell'estensimetro.

A volte si verificano condizioni contrastanti che costringono ad un compromesso.

Gli amplificatori di misurazione HBM sono tanto adattabili da non causare problemi di resistenza elettrica.

Qualora venga loro collegato a valle un amplificatore a corrente continua, gli estensimetri ad alto valore ohmico, funzionanti con un'alta tensione di alimentazione, contribuiscono ad un relativo miglioramento della deriva dello zero dovuta all'amplificatore. D'altra parte i circuiti di misurazione chiusi ad alto valore ohmico sono antenne migliori per la captazione degli impulsi di disturbo rispetto a quelli a bassa resistenza. Ciò può portare facilmente a errori nel caso di misurazioni con amplificatori a tensione continua qualora non si sia provveduto a una corretta schermatura,

Nei cavi di misurazione lunghi l'attenuazione del segnale, che si verifica non solo nell'alimentazione di frequenze portanti ma - come spesso si dimentica - anche nei segnali di misurazione dinamici ad alta frequenza, è meno marcata nei collegamenti a bassa resistenza che in quelli ad alto valore ohmico (vedere par. 7.4).

Le resistenze ohmiche nei mezzi di trasmissione, p.e. cavi, punti di collegamento, anelli collettori ecc., hanno un'influenza inferiore nel caso di estensimetri ad alta resistenza. D'altra parte le oscillazioni della resistenza di isolamento hanno un'influenza inferiore negli estensimetri a bassa resistenza (par. 7.2).

Nella maggior parte dei casi l'estensimetro da 120 Ω sarà ottimale.

3.2.5 Il campo di temperature utilizzabile

È difficile riuscire a fornire dei valori limite della temperatura entro i quali gli estensimetri possano essere utilizzati. Il motivo è dovuto alla diversa influenza esercitata dall'alta temperatura sulle caratteristiche dello strumento, alla sua durata e infine all'errore di misurazione tollerabile. Nel [2-1] si dice perciò al punto "resistenza alla temperatura":

“Secondo le raccomandazioni di questa direttiva tutte le caratteristiche essenziali degli estensimetri devono essere indicate in relazione alla temperatura. In questo modo l'utente può valutare personalmente i limiti di temperatura superiori e inferiori consentiti per le sue misurazioni”.

Per quanto riguarda l'effetto della temperatura sulla validità di una misurazione bisogna distinguere due cose:

- il valore della temperatura,
- la sua variabilità durante la misurazione.

Per quanto riguarda il valore della temperatura bisogna sapere se e quanto può resistere un'applicazione oppure quali effetti ci si può aspettare. La temperatura non è una grandezza indipendente; essa è sempre correlata al tempo, il tempo di salita o la durata della sua permanenza. La temperatura è accompagnata da influssi esterni anche atmosferici che possono combinarsi con attacchi fisici (p.e. pressione) e chimici (p.e. ossidazione). Ne fanno parte anche i fenomeni di trasformazione delle leghe di cui è composta la griglia che possono avere luogo per un aumento di temperatura.

Perciò nel chiedersi fino a quale temperatura un estensimetro rimanga funzionante bisogna necessariamente considerare anche le condizioni al contorno, ed è a questo punto che cominciano le difficoltà nel dover dare una risposta. Essa può avere solo un carattere generale e può far riferimento a casi di applicazione frequenti. Del resto l'influenza della temperatura non causa variazioni nette da cui si possono dedurre limiti reali; il passaggio da buono a utilizzabile a non utilizzabile non è rigoroso; una classificazione dipende dal grado di precisione richiesto.

In generale si può dire che le basse temperature sono meglio controllabili delle alte. È anche importante sapere se sono richieste misurazioni “riferite allo zero” o “non riferite allo zero” (par. 2.4): nel primo caso i limiti di temperatura superiori sono molto più bassi che nel secondo (anche in relazione al tempo). Bisogna anche tener presente che in una misurazione non sono indicativi solo i dati dell'estensimetro ma anche quelli del mezzo di fissaggio, della protezione del punto di misurazione, del cablaggio ecc. Per un orientamento di massima relativo alle possibilità offerte dagli estensimetri metallici possono servire i seguenti dati numerici:

Il campo per misurazioni non riferite allo zero va da - 269 a più di 800°C. Per le misurazioni riferite allo zero di breve durata il limite superiore è di ca. 500°C se vengono utilizzate tutte le possibilità di compensazione e di correzione di errore. Per gli estensimetri con griglia in costantana il campo si limita a -200/ +200°C, per la "trasduttori di qualità" a -20/ +70°C, per alti gradi di precisione (celle di carico) addirittura da -10 a +40°C con una limitazione temporale a 20 minuti.

La vasta letteratura, soprattutto per il settore delle alte temperature, evidenzia i particolari problemi che si verificano; da essa si può inoltre rilevare che questo settore è ancora in via di sviluppo [3-8 fino a 3-23].

Le oscillazioni di temperatura influiscono prevalentemente sullo zero, cioè sul punto di riferimento del valore di misurazione. Scegliendo estensimetri autocompensanti (par. 3.3.4) e/o utilizzando i metodi di compensazione più adatti (par.7.1) si possono contenere gli errori entro limiti accettabili.

Si verificano problemi per le misurazioni nel campo di temperature al di sopra di 200 ... 300°C, sia per quanto riguarda la stabilità dello zero sia anche per la durata dell'uso [3-23]. In quest'ambito sembra che gli estensimetri capacitivi (par.1.0.4) possano essere impiegati in sostituzione [1-11 fino a 1-15].

3.3 Dati tecnici

I parametri e le caratteristiche degli estensimetri descritti in questo paragrafo da una parte sono importanti per le misurazioni con questi strumenti, dall'altra forniscono utili indicazioni per una scelta razionale in relazione a particolari esigenze. I valori numerici indicati sono stati determinati sulla base delle direttive contenute in [2-1]. È da osservare inoltre che la maggior parte dei parametri si riferiscono a estensimetri già applicati. Per questo motivo anche le caratteristiche del mezzo di fissaggio possono influire sul parametro, p.e. un adesivo può limitare il campo di applicazione termica di un estensimetro.

Deve essere chiarito che i valori limite possono essere definiti sempre nell'ambito di una tolleranza discrezionale. Praticamente non ci sono limiti netti; il tempo, la temperatura e gli altri parametri possono spostare i limiti accettabili. Per questo motivo in [2-1] per molti parametri non viene fornito un valore numerico ma una rappresentazione grafica che mostra la dipendenza del parametro da un'importante grandezza.

3.3.1 La sensibilità di deformazione (fattore k) degli estensimetri metallici

Nel par. 1.1.1 viene rappresentata la relazione fisica esistente fra la deformazione e la variazione di resistenza del conduttore elettrico metallico. È stato inoltre spiegato che in alcuni metalli esiste una relazione lineare fra la variazione di lunghezza relativa e la deformazione. Se questi metalli - si tratta di leghe di diverso tipo - oltre a questa caratteristica possiedono anche un coefficiente di temperatura della loro resistenza elettrica piccolo o trascurabile, essi vengono preferiti per la produzione di estensimetri. Vengono usate altre leghe qualora sia richiesto un particolare grado di resistenza alla fatica durante le sollecitazioni cicliche o di resistenza alla temperatura.

La sensibilità di un estensimetro viene espressa dal rapporto fra variazione di resistenza relativa e allungamento e viene caratterizzata dalla lettera k :

$$k = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l_0} = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon} \quad (3.3 - 1)$$

Con le relative denominazioni unitarie risulta:

$$(k) = \left\{ \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l_0} \right\} \text{ in } \left[\frac{\Omega/\Omega}{\text{m/m}} \right].$$

Le unità hanno importanza solo per un calcolo di grandezze: nella realtà esse sono abbreviate in modo che il "fattore k " appare come numero pivo di unità di misura.

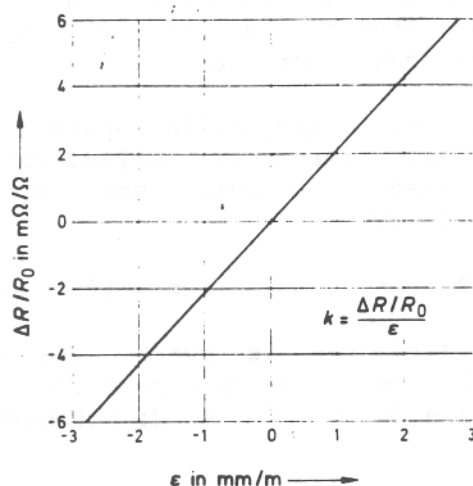


Figura 3.3-1: Curva caratteristica di un estensimetro metallico e definizione del fattore k .

Nel diagramma resistenza-deformazione il fattore k viene rappresentato tramite la pendenza della curva caratteristica dell'estensimetro, fig. 3.3-1.

In contrapposizione al parametro S del conduttore descritto nel paragrafo 1.1.1 il fattore k è un parametro per l'estensimetro completo di tutte le sue parti (fattore di proporzionalità). Le influenze dovute alla configurazione della griglia e alle condizioni di trasmissione della deformazione nella griglia provocano una differenza (generalmente limitata) fra S e k . Per questo motivo il fattore k viene determinato per ogni modello secondo le norme di [2-1] sulla base di metodi statistici di garanzia della qualità e il suo valore numerico viene annotato sul foglio caratteristiche di ogni confezione.

Non è possibile influenzare volontariamente il fattore k con misure tecniche per esempio per raggiungere un determinato valore numerico. Nella tavola 3.3-1 sono indicati i valori k medi per le leghe standard delle griglie di misurazione.

1 Meßgitterwerkstoff (Handelsnamen)	6 Richtanalyse [%]	7 mittlerer k -Faktor ca.
2 Konstantan	57 Cu, 43 Ni	2.05
3 Karma	73 Ni, 20 Cr, Rest Fe + Al	2.1
4 Nichrome V	80 Ni, 20 Cr	2.2
5 Platin-Wolfram	92 Pt, 8 W	4.0

- 1 materiale della griglia (nome commerciale)
- 2 Costantana
- 3 Carma
- 4 Nicromo V
- 5 Platino-Volframio
- 6 Analisi orientativa
- 7 fattore k medio

Tavola 3.3.-1: Fattori k medi di estensimetri con griglie in materiali diversi

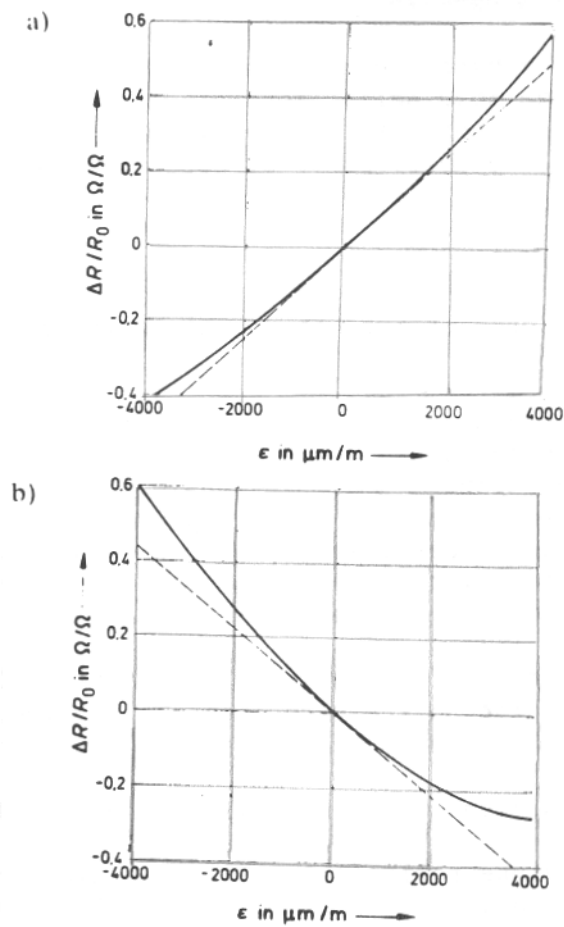
La constatazione che gli estensimetri metallici hanno una curva caratteristica lineare non è sempre esatta. Negli estensimetri con griglia in constantana si è riscontrata una curva caratteristica non lineare nel campo delle grandi deformazioni fino a $150.000 \mu\text{m}/\text{m} = 15 \text{ cm}/\text{m}$; in questo caso essa ha piuttosto un andamento parabolico e può essere descritta con buona approssimazione tramite il polinomio $\epsilon^* = \epsilon + \epsilon^2$, dove ϵ^* è il valore di deformazione indicato ed ϵ è quello reale. È probabile che anche altri tipi di leghe si comportino in modo simile. Per ulteriori informazioni vedere par. 3.3.6.

Se durante le misurazioni nel campo delle grandi deformazioni si utilizza, come di norma, l'estensimetro in collegamento a quarto di ponte, si ottiene automaticamente un'ampia compensazione della non linearità (vedere par. 5.2 e [3-29]).

3.3.2 La sensibilità degli estensimetri semiconduttori

Nel par. 1.1.2 è stato detto che la curva caratteristica degli estensimetri semiconduttori ha un andamento parabolico. La fig. 3.3-2 mostra le curve caratteristiche di questo tipo di strumenti in silicio del tipo *p* ed *n*, rispettivamente.

Le curve dipendono dalla temperatura come risulta dall'equazione (1.1-3). La dipendenza dalla temperatura può essere abbassata drogando maggiormente il silicio, in questo modo si abbassa però contemporaneamente anche la sensibilità. È quindi necessario giungere a un compromesso soddisfacente.



Linee continue: curve caratteristiche alla temperatura ϑ_0 .
 Linea tratteggiata: Tangente nel punto $\epsilon = 0 \rightarrow \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{\vartheta_0} = k\epsilon$

Figura 3.3-2: Curve caratteristiche degli estensimetri semiconduttori per:

a) Silicio *p* 0,020 Ωcm $\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{\vartheta_0} = k\epsilon + c\epsilon^2 = 119,5 \cdot \epsilon + 4000 \cdot \epsilon^2,$

b) Silicio *n* 0,031 Ωcm $\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{\vartheta_0} = k\epsilon + c\epsilon^2 = -110 \cdot \epsilon + 10000 \cdot \epsilon^2.$

Descrivere la curva tramite un valore numerico, come per il fattore k degli estensimetri metallici, è impossibile. Ciò è possibile solo per la pendenza della tangente della fig. 3.3-2 alla temperatura di riferimento ϑ_0 . Per gli estensimetri semiconduttori comuni a conducibilità p si hanno approssimativamente fattori k fra +110 e +130, per quelli a conducibilità n essi vanno invece da -80 a -100.

Se le deformazioni da misurare non superano i $\pm 1000 \mu\text{m/m}$ e se si accetta un'incertezza di misura fino a $\pm 5\%$, è possibile effettuare misurazioni semplificate ponendo come base un fattore k costante.

Per risultati più precisi sono necessarie delle correzioni. A questo scopo alcuni produttori dotano i loro strumenti di tabelle di correzione calcolate individualmente che facilitano molto la valutazione dei risultati ottenuti.

La descrizione di particolarità degli estensimetri semiconduttori che risultano dalle variazioni o dalle deviazioni della temperatura di misurazione ϑ in relazione alla temperatura di riferimento ϑ_0 va oltre i limiti di questa pubblicazione. Esse sono descritte con dovizia di particolari in [3-24].

3.3.3 La sensibilità trasversale

Gli estensimetri dovrebbero reagire ad una deformazione con una variazione di resistenza solo nella loro direzione "attiva" secondo la relazione definita dal fattore k . La direzione "attiva" è determinata dalla direzione dei fili o delle parti di conduttore simili a fili della griglia (fig. 3.3-3).



Figura 3.3-3: La direzione "attiva" di un estensimetro

Osservazione

La definizione "direzione attiva" o "estensimetro attivo" nel caso di estensimetri a resistenza deve sempre essere intesa nel senso di "direzione di misurazione" o "estensimetro di misura" (in contrapposizione all'estensimetro di compensazione). Essi vengono utilizzati generalmente in questo senso e non devono essere confusi con il concetto fisico di "rilevatori attivi". Un estensimetro attivo in senso fisico è l'estensimetro piezoelettrico descritto nel par. 1.0.5.

Talvolta si può osservare una variazione (generalmente limitata) anche quando le deformazioni agiscono trasversalmente alla direzione "attiva". Si dice allora che l'estensimetro sia "sensibile trasversalmente".

Alla base della definizione di sensibilità trasversale ci sono le seguenti premesse:

a) Se un estensimetro viene sollecitato nella sua direzione "attiva" da una deformazione monoassiale, fig. 3.3-4a, esso mostra una sensibilità k_1 , che è descritta dalla relazione :

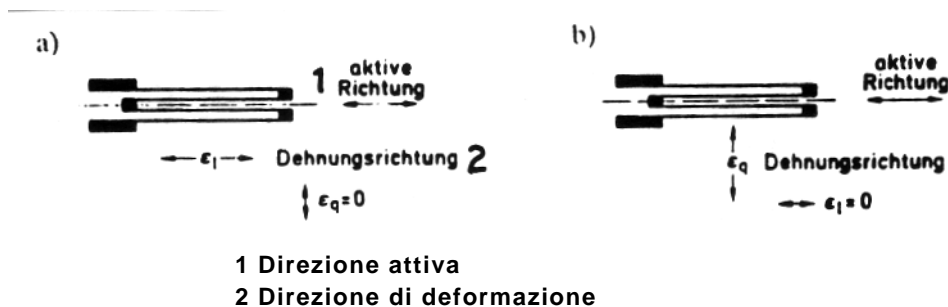
$$k_1 = \frac{\Delta R/R_0}{\epsilon_1} \quad (3.3-2)$$

b) Se si sollecita l'estensimetro con una deformazione monoassiale trasversale alla sua direzione di misurazione "attiva", fig. 3.3-4b, si riscontra ugualmente una sensibilità k_q , generalmente limitata, che si può descrivere con:

$$k_q = \frac{\Delta R/R_0}{\epsilon_q} \quad (3.3-3)$$

La sensibilità trasversale q viene definita come il rapporto fra la sensibilità trasversale rispetto alla direzione di misurazione k_q e la sensibilità nella direzione di misurazione k_1 :

$$q = \frac{k_q}{k_1} \quad (3.3-4)$$



ϵ_1 deformazione in senso longitudinale
 ϵ_q deformazione in senso trasversale

Figura 3.3-4: Per la definizione di sensibilità trasversale

- a) Direzione "attiva" dell'estensimetro e direzione di deformazione coincidono,
- b) Direzione "attiva" dell'estensimetro e direzione di deformazione sono perpendicolari.

In passato si riteneva che la sensibilità trasversale fosse causata dalle parti della griglia ad andamento trasversale rispetto alla direzione attiva. Ciò valeva essenzialmente anche per le prime versioni con i fili della griglia avvolti a grande distanza (fig. 3.3-5a). Si è perciò tentato, tramite misure costruttive, di migliorare questo punto. Si è riusciti con un certo successo in questo tentativo grazie ad un raffinato procedimento di avvolgimento con cui si sono ottenute distanze fra i fili inferiori a 0,1 mm (fig. 3.3-5b).



Figura 3.3-5: Diverse forme di griglia e misure per evitare la sensibilità trasversale

- a) Forma originaria
- b) Avvolgimento stretto
- c) Ponti trasversali spessi
- d) Collegamenti trasversali larghi

Si tentò anche di ovviare alla sensibilità trasversale realizzando il collegamento fra i singoli tratti della griglia per mezzo di ponti trasversali (fig. 3.3-5c). Questa misura di difficile realizzazione pratica ha permesso una notevole riduzione della sensibilità trasversale ma non la sua eliminazione.

Nei moderni estensimetri laminari (fig. 3.3-5d) si ricorre nuovamente in linea di principio all'idea della griglia a ponti trasversali poichè alle estremità dei singoli tratti della griglia si inseriscono larghi collegamenti trasversali. La loro realizzazione è comunque più semplice negli estensimetri a lamine che in quelli a filo.

Una ricerca sperimentale con gli estensimetri a lamine ha fornito i seguenti risultati:

Nel campo dei collegamenti trasversali allargati si verifica, in caso di deformazione positiva, una variazione di resistenza positiva minima, fig. 3.3-6b e c. Questo processo è limitato ad un'area ristretta all'estremità della griglia di misurazione. Esso si ripercuote perciò con più forza sulle griglie corte poichè la quota relativa delle parti di griglia deformate ha una grandezza diversa. Ciò è stato confermato anche da misurazioni i cui risultati sono mostrati nella fig. 3.3-7.

Un secondo effetto che si sovrappone è causato da forze che agiscono lateralmente lungo il tratto della griglia e tendono ad allargarlo (fig.3.3-6d).

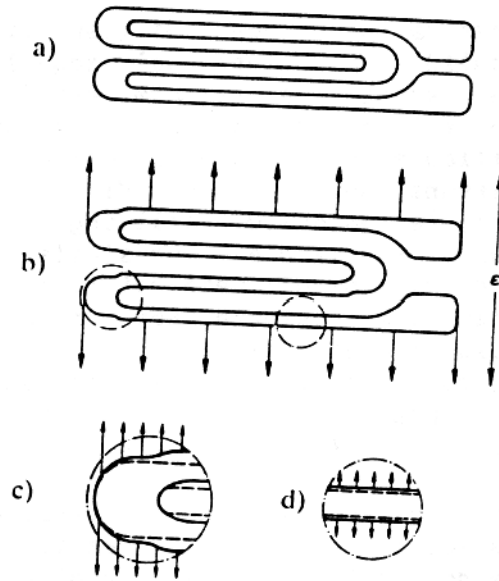


Figura 3.3-6: Le cause della sensibilità trasversale negli estensimetri

- a) Condizione iniziale
- b) Deformazione trasversale
- c) Deformazione nella zona delle connessioni trasversali
- d) Deformazione nelle altre zone della griglia di misura

Il effetto delle forze sul conduttore dipende dalle sue dimensioni e dalla loro modalità di trasferimento. Un conduttore completamente inserito nel supporto della griglia viene sollecitato di più rispetto ad uno semplicemente incollato. Questo effetto causa negli estensimetri a lamina con griglia in costantana o in karma e in caso di una dilatazione positiva, una variazione di resistenza negativa sempre minima (ciò spiega la sensibilità trasversale degli estensimetri che si osserva occasionalmente).

Nella progettazione di un estensimetro si sceglierà, potendo, una geometria della griglia tale da consentire alla sensibilità trasversale di raggiungere un valore limitato. Ciò non è però sempre possibile poichè altri punti devono essere tenuti in considerazione in questa fase.

Mentre la sensibilità di deformazione k_t viene misurata in un campo di deformazione monoassiale, la misurazione del fattore k ha luogo in un campo di sforzo monoassiale (vedere par. 3.3.1). Ne risulta perciò una differenza fra k_t e k che dipende dalla sensibilità trasversale dell'estensimetro.

Questa caratteristica non è svantaggiosa qualora si utilizzino gli estensimetri nella costruzione di rilevatori di grandezze fisiche, poichè essi vengono sempre calibrati una volta realizzati. La stesso vale anche per tutti gli altri impieghi nei quali la correlazione del segnale e della grandezza di misura viene trovata con la calibrazione.

Nell'analisi delle tensioni in un campo di sforzo biassiale sono necessarie delle correzioni (vedere par. 7.5) alle quali si può rinunciare nel caso di sensibilità trasversale limitata ($q \leq 0,01$) [7-3].

Il diagramma della fig. 3.3-7 mostra i risultati di una ricerca con diverse serie di estensimetri effettuata con il metodo fissato in [2-1].

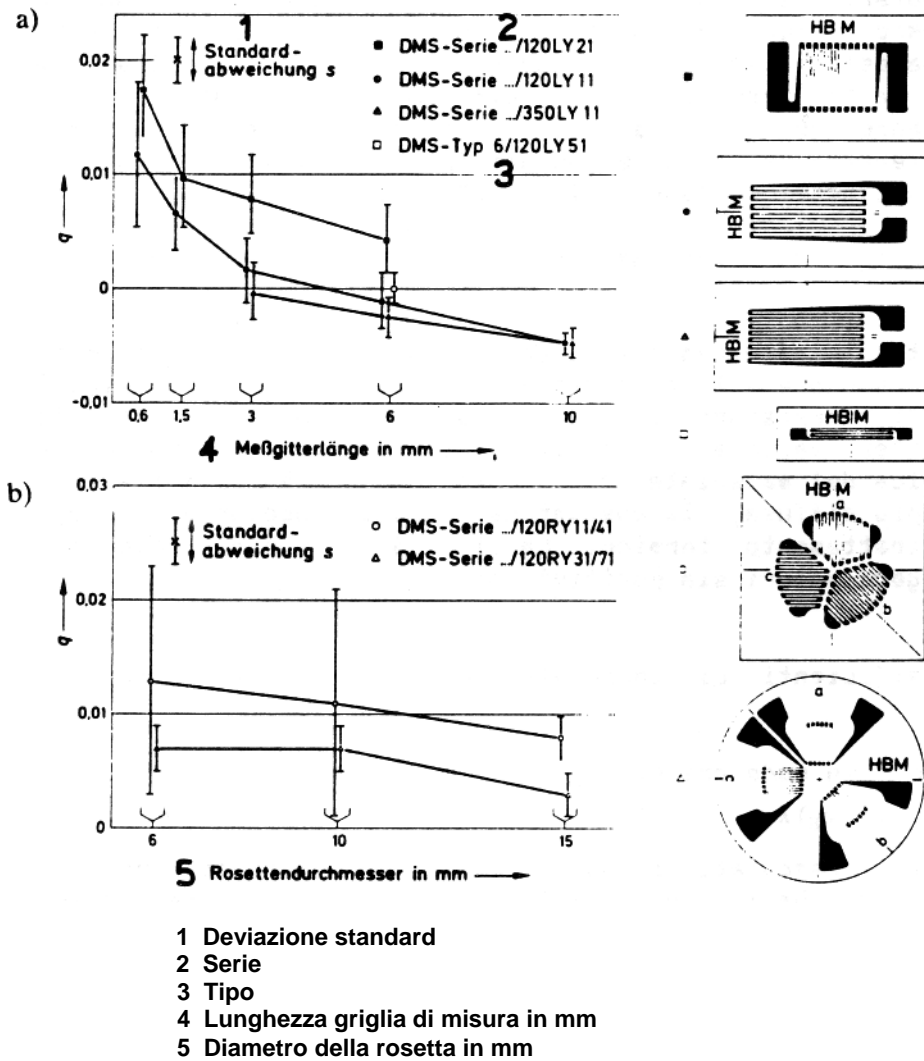


Figura 3.3-7: Sensibilità trasversale q in relazione alla lunghezza della griglia di misura per alcune serie di estensimetri e di rosette

- a) Estensimetri lineari
b) Estensimetri a rosetta

3.3.4 La risposta alla temperatura in un punto di misura

Con risposta alla temperatura in un punto di misura si intende la variazione dipendente dalla temperatura del segnale di misura nonostante la completa assenza o la completa costanza di una sollecitazione meccanica sull'oggetto da misurare. Una risposta alla temperatura si può verificare se durante il periodo di osservazione, cioè fra azzeramento o assunzione del valore di riferimento e lettura del valore di misura, la temperatura dell'oggetto da misurare o del suo ambiente varia. Questo fenomeno è reversibile e scompare quando vengono ripristinate le condizioni di temperatura originarie del punto di misurazione. A temperatura costante non si può di conseguenza verificare nessun processo di questo tipo.

Nella letteratura questa risposta viene spesso definita come "deformazione apparente", una definizione che non fornisce alcuna indicazione sulla causa.

Alla risposta alla temperatura ε_{θ} contribuiscono diverse cause:

- la dilatazione termica del materiale dell'elemento α_B ,
- la dilatazione termica del materiale della griglia dell'estensimetro α_M ,
- il coefficiente della temperatura della resistenza elettrica del materiale della griglia α_R ,
- la variazione della temperatura $\Delta \vartheta$ come grandezza scatenante.

Inoltre anche la risposta alla temperatura della resistenza elettrica del cavo di allacciamento collegato in serie all'estensimetro può contribuire al fenomeno. Per approfondimenti, si veda il par.7.1.

La risposta alla temperatura non deve essere confusa con la deriva termica, un processo irreversibile che a volte si sovrappone al fenomeno in questione (par. 3.3.4.2).

Un calcolo della risposta alla temperatura in un punto di misura è possibile approssimativamente con l'equazione.

$$\varepsilon_{\theta} = \left(\frac{\alpha_R}{k} + \alpha_B - \alpha_M \right) \Delta \vartheta \quad (3.3-5)$$

Questo valore numerico è orientativo per un campo di temperature limitato, poiché i parametri interessati α_R , α_B , α_M e k dipendono dalla temperatura. Per questo motivo la rappresentazione della risposta alla temperatura è più corretta in forma di diagramma.

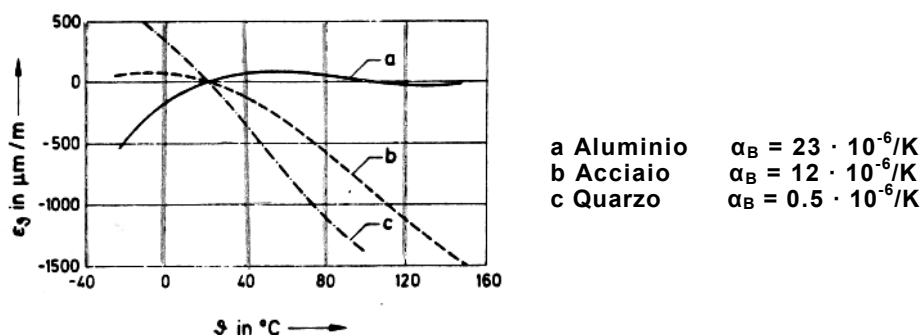


Figura 3.3-8: Esempi di risposta alla temperatura di estensimetri identici applicati su componenti in materiale differente.

Se si applicano estensimetri con caratteristiche identiche su elementi con α_B diversi, anche l'andamento della curva ϵ_g sarà diverso. Esempi alla fig. 3.3-8.

Per la validità del diagramma è anche necessario che sia garantita una sufficiente rigidità dell'oggetto da misurare, che non permetta l'azione delle forze originate dall'estensimetro e dall'adesivo. Questa premessa è sempre rispettata in caso di oggetti metallici, a parte quelli estremamente sottili.

Una misurazione durante la quale l'oggetto sollecitato meccanicamente subisce allo stesso tempo una variazione di temperatura avrà come risultato la somma della deformazione meccanica e di quella termica. In questo caso la parte termica dell'indicazione di deformazione è considerata un errore. Questa situazione non ottimale può essere ovviata per mezzo di estensimetri autocompensanti (par. 3.3.4.1) o con un procedimento di compensazione (par. 7.1) [3-25, 3-26].

3.3.4.1 Estensimetri ad autocompensazione della risposta alla temperatura

Ci sono possibilità di modificare l'estensimetro adottando speciali accorgimenti in modo tale da fare assumere alla risposta alla temperatura valori minimi in un intervallo di temperature limitato. A questo scopo si sfrutta la possibilità di poter variare il coefficiente di temperatura della resistenza elettrica del materiale della griglia. Ciò è possibile nel caso della lega più diffusa, la costantana, tramite aggiunte di elementi di lega correttivi e un trattamento termico. La fig. 3.3-9 mostra come sia possibile raggiungere valori sia positivi che negativi.

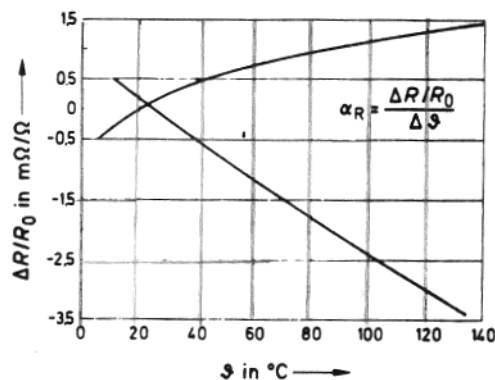
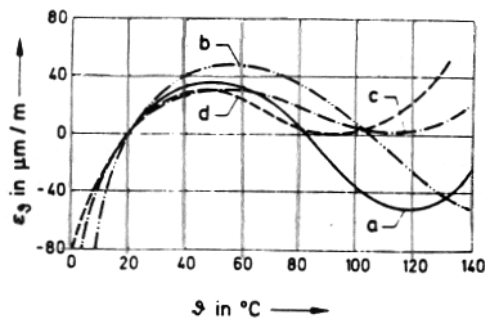


Figura 3.3-9: Coefficienti di temperatura α_R di diverse leghe di costantana.

Bisogna definire α_R in modo che sia

$$\alpha_R = (\alpha_M - \alpha_B) k \quad (3.3-6)$$

I membri non lineari trascurati in questa equazione non consentono una compensazione completa. Dalla fig. 3.3-10 si può osservare quanto efficace sia la compensazione, se la scala delle ordinate è confrontata con la scala estesa della fig. 3.38.



a	Titanio TiA16V4	$\alpha_B = 8,5 \cdot 10^{-6}/K$
b	Acciaio ferritico	$\alpha_B = 12 \cdot 10^{-6}/k$
c	Acciaio austenitico	$\alpha_B = 16 \cdot 10^{-6}/k$
d	Aluminio AlCuMg2	$\alpha_B = 23 \cdot 10^{-6}/k$

Figura 3.3-10: Residui della risposta alla temperatura degli estensimetri ad autocompensazione in caso di adattamento ottimale ai coefficienti di dilatazione termica dei diversi materiali degli elementi strutturali in un campo di temperature da 10 a 130°C.

Gli estensimetri di questo tipo vengono chiamati "a coefficienti di temperatura adattati" oppure "ad autocompensazione della risposta alla temperatura". I diagrammi sulla risposta alla temperatura, fig. 3.3-10, vengono allegati allo strumento in un foglio dati. Essi sono validi solo se il materiale dell'elemento strutturale ha stessa caratteristica di dilatazione termica del campione di materiale su cui è stata murata la curva.

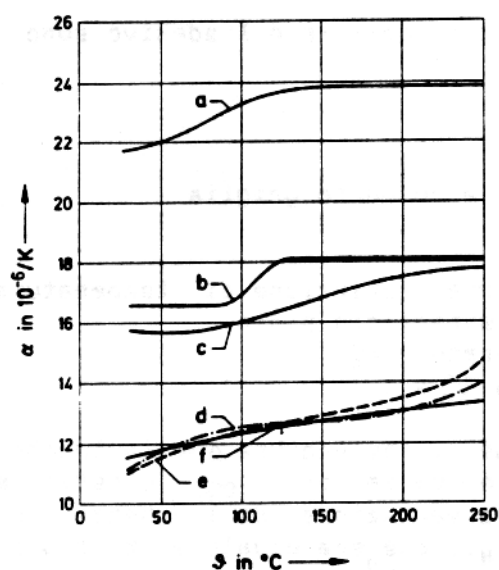
Questo non è sempre possibile come mostra la fig. 3.3-11. In essa sono mostrati i coefficienti di dilatazione termica differenziali di diversi materiali, cioè il valore numerico dell'incremento della curva di dilatazione in ogni punto. Si può riconoscere che anche lo stato di trattamento di un materiale (sia laminato che ricotto) causa una variazione. La curva per X5CrNi18 9 laminato mostra un'anomalia che può essere spiegata come un effetto degli sforzi residui nel campione. In alcuni rari casi sono stati anche osservati stati anisotropi.

Naturalmente un estensimetro autocompensante non può compensare queste anomalie. Le variazioni del comportamento della temperatura causate dal materiale dell'elemento strutturale in contrapposizione alle curve di risposta alla temperatura allegate all'estensimetro non sono da attribuire allo strumento. Una compensazione di questi errori residui è possibile con i metodi descritti nel par. 7.1. In quest'ambito viene citato un brano da [3-27]:

“Bisogna assolutamente sapere che il coefficiente di dilatazione termica di un materiale dipende da:

1. la sua composizione,
2. il suo trattamento termico,
3. gli antecedenti del suo trattamento a freddo,
4. il livello di temperature,
5. gli antecedenti del suo trattamento a caldo,
6. il tempo di permanenza in caso di temperatura elevata.

Per questo è assolutamente possibile che un materiale presenti 3 coefficienti di dilatazione termica completamente diversi conseguenti a diversi trattamenti termici, sebbene questi trattamenti consentano di ottenere caratteristiche di resistenza paragonabili fra loro. Inoltre tutti e 3 i coefficienti di dilatazione possono variare in modo diverso. È quasi sempre possibile adattare un estensimetro al coefficiente di dilatazione termica di un materiale entro un determinato intervallo di temperature, premesso che la caratteristica di questo materiale rimanga ripetibile dall'una all'altra fase del test e da un ciclo di temperatura all'altro. Da questo punto di vista la maggior parte degli estensimetri è molto più stabile dei materiali su cui vengono effettuate le misurazioni di dilatazione".



- a Lega di alluminio AlCuMg2
- b Acciaio austenitico X5CrNi18 9 laminato
- c Acciaio austenitico X5CrNi18 9 ricotto
- d Acciaio per utensili 50CrV4 laminato
- e Acciaio per utensili 50CrV4 ricotto
- f Acciaio da costruzione St37

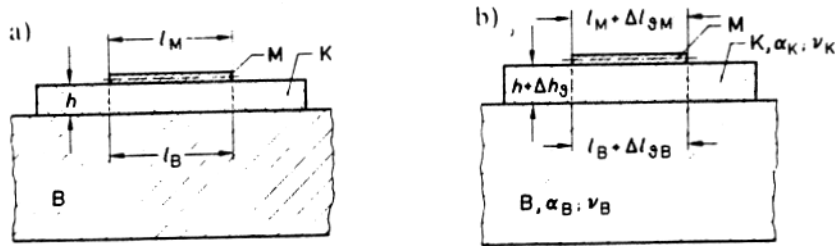
Figura 3.3-11: La dipendenza della temperatura del coefficiente di dilatazione termica lineare differenziale.

L'adattamento degli estensimetri autocompensanti alla dilatazione termica del materiale dell'elemento strutturale è ottimale per superfici di applicazione piane; si verificano delle deviazioni in caso di superfici curve con un piccolo raggio di curvatura.

Perché un estensimetro sia applicato correttamente devono essere soddisfatte le seguenti condizioni:

Sulle superfici di applicazione piane l'estensimetro segue la dilatazione termica dell'elemento strutturale "nel senso della lunghezza", cioè la dilatazione dell'elemento strutturale e quella dell'estensimetro sono identiche; l'equazione (3.3-5) descrive questo caso e la fig. 3.3-12 ne mostra le condizioni, molto esagerate per motivi di chiarezza.

Per semplificare i supporti delle griglie e l'adesivo sono considerati come un materiale unico.



- B** Elemento strutturale
- M** Griglia di misurazione
- K** Strato intermedio di adesivo e supporto griglia
- h** Spessore dello strato K

Figura 3.3-12: Influenza di una variazione di temperatura su di un estensimetro applicato ad una superficie piana.

- a) Condizione iniziale a temperatura θ_0
- b) Situazione alla temperature $\theta_0 + \Delta\theta$

In conseguenza della variazione di temperatura $\Delta\theta$ la lunghezza iniziale l_B dell'elemento strutturale varia di $\Delta l_{\theta B}$. L'estensimetro deve necessariamente seguire questa variazione di lunghezza. La lunghezza della griglia di misurazione l_M , che era uguale al tratto dell'elemento osservato l_B , è variata del tratto $\Delta l_{\theta B}$. Ne consegue che:

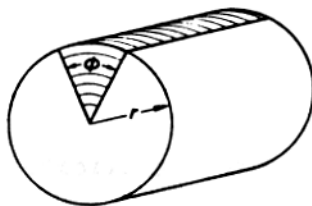
se $l_B = l_M$ allora $\Delta l_{\theta B} = \Delta l_{\theta M}$.

Conseguentemente anche le deformazioni sono simili fra loro:

$$\frac{\Delta l_{\theta B}}{l_B} = \epsilon_{\theta B}; \quad \frac{\Delta l_{\theta M}}{l_M} = \epsilon_{\theta M}; \quad \epsilon_{\theta B} = \epsilon_{\theta M}.$$

L'aumento dello spessore dello strato h di Δh_θ non ha alcuna influenza sulle condizioni di dilatazione poichè un estensimetro applicato correttamente segue "fedelmente nel senso della lunghezza" le dilatazioni di un oggetto dalla superficie piana.

Ora bisogna esaminare le relazioni che si verificano su di una superficie curva. Si pensi alla sezione di un cilindro, fig. 3.3-13.



ϕ Angolo dei settori = angolo di avvolgimento
r raggio del cilindro

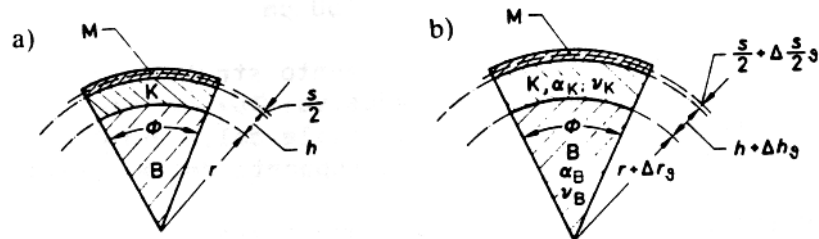
Figura 3.3-13: Sezione di cilindro

La dilatazione termica nella direzione assiale lungo una linea del mantello è uguale a quello di un pezzo piano, infatti $\epsilon_{\theta B} = \alpha_B \cdot \Delta\theta$. Nella direzione tangenziale la dilatazione termica ammonta a:

$$\epsilon_{\theta B} = \frac{r\phi\alpha_B\Delta\theta}{r\phi} = \alpha_B\Delta\theta. \quad (3.3-7)$$

Essa è quindi, come da aspettative, uguale alla dilatazione termica della superficie piana.

Nella fig. 3.3-14 il tronco di cilindro osservato, compresi gli strati di applicazione, è disegnato in sezione; gli spessori sono stati fortemente esagerati sempre per motivi di chiarezza.



s spessore della griglia di misurazione
 K, B, M, h vedere fig. 3.3-12
 ulteriori spiegazioni nel testo

Figura 3.3-14: Tronco di cilindro con estensimetro applicato sulla superficie del mantello (schematicamente)

- a) Condizione iniziale a temperatura ϑ_0
- b) Condizione a temperatura $\vartheta_0 + \Delta\vartheta$.

Gli strati K e M hanno lo stesso valore delle superfici piane stratificate (fig. 3.3-12). In caso di riscaldamento, in seguito ai coefficienti di dilatazione termica differenziati, i tratti r , h e s non aumentano con la stessa proporzione del materiale dell'elemento strutturale. Inoltre negli strati K e M si verifica un'ulteriore variazione di spessore sovrapposta corrispondente a ν -volte il loro impedimento alla dilatazione. In queste circostanze la dilatazione termica della griglia $\varepsilon_{\vartheta M}$ su di una superficie curva si diversifica da quella su di una superficie piana. La dilatazione termica della griglia nel campo delle sue fibre neutre, cioè sulla linea $s/2$, viene descritta dall'espressione:

$$\varepsilon_{\vartheta M} = \frac{\{r \alpha_B + h [\alpha_K + 2 \nu_K (\alpha_K - \alpha_B)]\} + s/2 [\alpha_M + 2 \nu_M (\alpha_M - \alpha_B)]}{r + h + s/2} \Delta \vartheta. \quad (3.3-8)$$

Mentre nella superficie piana le due dilatazioni $\varepsilon_{\vartheta B}$ e $\varepsilon_{\vartheta M}$ erano uguali, in questo caso c'è una differenza. In questo modo anche le risposte alla temperatura dei punti di misurazione si differenziano.

Per avere un'idea dell'ordine di grandezze della risposta alla temperatura, sono stati dati due esempi.

Esempio 1:

- r = raggio: 5 mm
- h = spessore dell'adesivo più supporto griglia: 100 μm
- s = spessore della griglia: 5 μm
- α_B = coefficiente di dilatazione termica dell' elemento strutturale: $12 \cdot 10^{-6}/\text{K}$
- α_K = coefficiente di dilatazione termica dell' adesivo: $70 \cdot 10^{-6}/\text{K}$
- α_M = coefficiente di dilatazione termica del materiale della griglia: $15 \cdot 10^{-6}/\text{K}$
- ν_K = coefficiente di Poisson dell'adesivo e del supporto della griglia: 0,4
- ν_M = coefficiente di Poisson del materiale della griglia: 0,3

Risultato: $\varepsilon_{\vartheta M} = 14,05 \cdot 10^{-6}/\text{K}$

In confronto a $\varepsilon_{\vartheta B} = 12,00 \cdot 10^{-6}/\text{K}$

Differenza $\varepsilon^*(\vartheta) = +2,05 \cdot 10^{-6}/\text{K}$

Esempio 2:

Con un raggio $r = 10$ mm (tutti gli altri dati unvariati) si ha

$$\varepsilon_{\vartheta M} = 13,04 \cdot 10^{-6}/\text{K}.$$

La Differenza $\varepsilon^*(\vartheta)$ ammonta ora solo a $+1,04 \cdot 10^{-6}/\text{K}$.

Conclusioni:

- Le risposte alla temperatura dei punti di misurazione con estensimetri dipendono dal profilo della superficie di applicazione. Le applicazioni nelle quali la griglia dell'estensimetro è curvata nella sua direzione attiva (segue tangenzialmente la curvatura) hanno una risposta alla temperatura diversa rispetto a quelle nelle quali la griglia nella sua direzione attiva rimane diritta.
- La differenza fra le due situazioni decresce al crescere del raggio di curvatura.
- L'influenza della curvatura diventa tanto più limitata quanto più si adattano reciprocamente i coefficienti di dilatazione termica del materiale dell'elemento strutturale e (preferibilmente) del supporto griglia e dell'adesivo.
- Nel caso di curvature concave o convesse i segni delle variazioni dell'andamento della temperatura sono contrapposti.
- Con materiali metallici la variazione della risposta alla temperatura cresce al crescere dello spessore dello strato di adesivo.
- Gli estensimetri autocompensanti sono studiati per le applicazioni in piano. Per le superfici curve il loro effetto di compensazione rimane incompleto.
- L'effetto a compensazione di temperatura del ponte di Wheatstone è ugualmente incompleto se l'estensimetro "attivo" e l'estensimetro di "compensazione" sono applicati a superfici con profili diversi.

Si possono verificare degli errori di misurazione solo se la temperatura dell'oggetto varia durante una misurazione.

Per l'analisi sperimentale delle tensioni l'errore della risposta alla temperatura può essere insignificante; non accade però lo stesso nel campo della costruzione di rilevatori per i quali è richiesta una maggiore precisione. Quando si conosce la causa di un errore si può anche correre ai ripari. In pratica bisognerebbe considerare in particolar modo due misure:

- Dotare la superficie del mantello del cilindro, almeno nel punto di applicazione dell'estensimetro, di piccole lamature per eliminare l'effetto di disturbo. Questa misura è di facile realizzazione nella costruzione di rilevatori.
- Rendere lo strato adesivo il più sottile possibile.

3.3.4.2 La deriva termica

La deriva termica ha luogo soprattutto a causa di variazioni strutturali e ossidazione o corrosione del materiale della griglia oppure anche a causa di fenomeni di distensione nell'estensimetro o nell'adesivo dovuti a una prolungata azione termica. Esso dipende dalla temperatura e dal tempo. La deriva termica causa variazioni irreversibili dello zero negli estensimetri applicati.

Alla deriva contribuiscono essenzialmente anche i componenti della lega e il grado di lavorazione del materiale della griglia. Tramite trazione o laminatura le griglie incrudite mostrano così derive più forti che si verificano anche a temperature relativamente basse (p.e. 100°C), mentre le leghe temperate dolcemente hanno una deriva minore. In questo modo un materiale a tempra dolce può essere dilatato fino al campo di deformazione o può essere incrudito tramite sollecitazione meccanica variando le sue caratteristiche. Una deformazione plastica può avere luogo anche in seguito ad una diversa dilatazione termica della griglia rispetto all'elemento strutturale. A ciò può contribuire anche una manipolazione inesperta dell'estensimetro durante l'applicazione.

Anche gli adesivi sono coinvolti nella deriva. Per questo motivo estensimetri della stessa specie possono avere derive diverse a seconda che siano applicati con adesivi a caldo o a freddo.

Nel campo delle alte temperature le influenze metallurgiche sono essenziali per la deriva degli estensimetri. Per ulteriori informazioni consultare [3-23].

La deriva termica si manifesta come errore solo nelle misurazioni riferite allo zero. L'errore si può eliminare tramite l'effetto compensativo del ponte di Wheatstone nel collegamento a semiponte e a ponte intero e utilizzando nel collegamento a quarto di ponte e a due quarti di ponte un estensimetro di compensazione. In questo caso devono essere soddisfatte le stesse premesse valide per la compensazione della risposta alla temperatura, par. 7.1. L'efficacia della compensazione diminuisce maggiormente rispetto alla risposta alla temperatura a causa di maggiori dispersioni da campione a campione.

3.3.5 La dipendenza dalla temperatura della sensibilità

La sensibilità di un estensimetro viene espressa tramite il fattore k (par. 3.3.1). Il valore numerico del fattore k indicato nelle confezioni degli strumenti vale per la temperatura ambiente. Esso varia al variare della temperatura e, a seconda del materiale che forma la griglia, varia in misura diversa. Nella fig. 3.3-15 sono rappresentate le variazioni relative del fattore k in relazione alla temperatura di 4 leghe impiegate comunemente per le griglie.

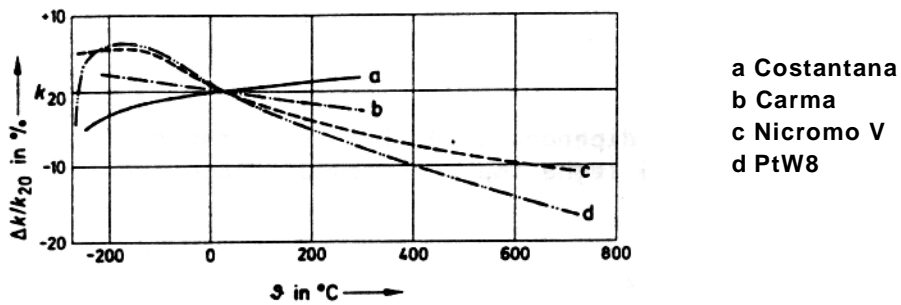


Figura 3.3-15: La dipendenza dalla temperatura del fattore k dell'estensimetro di 4 leghe impiegate comunemente per le griglie.

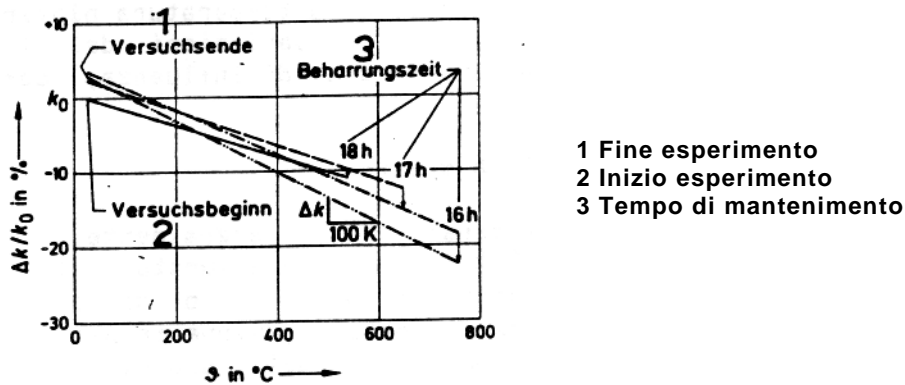


Figura 3.3-16: La dipendenza del fattore k dalla temperatura e dal tempo di mantenimento in temperatura in un estensimetro in platino-volframio (PtW8)

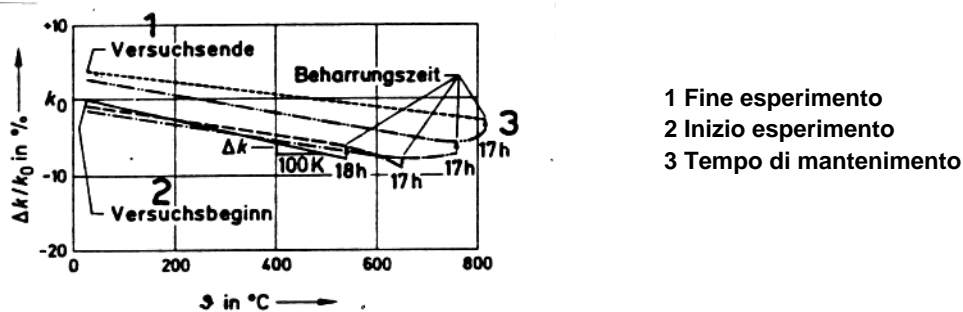


Figura 3.3-17: La dipendenza del fattore k dalla temperatura e dal tempo di mantenimento in temperatura in un estensimetro in nicromo V.

Le indicazioni sulla dipendenza dalla temperatura del fattore k si trovano sul foglio caratteristiche allegato a ogni confezione dello strumento. Per le leghe ad alta temperatura platino-volframio e nicromo V sono indicate inoltre le variazioni del fattore k dovute alla temperatura e alla sua durata di influenza, come risulta delle fig. 3.3-16 e 3.3-17.

3.3.6 La deformabilità statica

L'impiego degli estensimetri è generalmente limitato a un campo di deformazioni di $\leq \pm 3.000 \mu\text{m/m}$. Questo limite però, nel caso di misurazioni di materiali plastici o di esperimenti nel campo di deformazione plastica dei metalli, viene in parte ampiamente superato. Ci si chiede se e in che misura delle grandi deformazioni possono essere misurate con gli estensimetri.

In quest'ambito ci pare opportuno inserire osservazioni di carattere generale sul comportamento degli estensimetri in caso di grandi deformazioni (allo scopo anche [3-28, 3-29]).

La deformabilità massima di un estensimetro dipende dal tipo di costruzione e dai materiali impiegati. Ci sono serie di estensimetri che sono utilizzabili per una campo di deformazione massimo di $\pm 2 \text{ cm/m}$, mentre altre serie possono essere sollecitate fino a $\pm 20 \text{ cm/m}$ ($1 \text{ cm/m} = 10000 \mu\text{m/m}$). Si possono avere indicazioni al riguardo dai prospetti. Secondo le raccomandazioni contenute in [2-1] valgono indicazioni da prospetto per estensimetri con griglia lunga fino a 6 mm. Per esperienza possiamo dire che gli estensimetri lunghi sopportano meglio di quelli corti le deformazioni di grande entità.

A causa dell'enorme deformazione plastica il materiale della griglia si incrudisce e perde la sua duttilità iniziale. Perciò delle ripetizioni sono quasi impossibili, a meno che la deformabilità dell'estensimetro non sia stata sfruttata solo in parte e non fino al limite. Non sono noti esperimenti sulla ripetibilità delle grandi deformazioni in caso di sfruttamento parziale della deformabilità massima dell'estensimetro. Esse sarebbero anche di difficile esecuzione con l'attrezzatura descritta in [2-1], poichè non si possono fare dichiarazioni certe sulla riproducibilità della deformazione superficiale dei campioni di prova deformati plasticamente.

L'applicazione di estensimetri ad alta elongazione a gomma o materiali simili non è funzionale o addirittura impossibile non solo a causa della deformabilità unica ma anche a causa dell'impedimento alla deformazione dei materiali teneri. In questo caso sono più funzionali altri tipi di strumenti con una piccola forza antagonista. Oltre ai rilevatori di deformazione comuni adatti a questo scopo si può trovare in [3-30] la descrizione di uno strumento ausiliario per la misurazione con estensimetri delle deformazioni della gomma.

In caso di grandi deformazioni si hanno da parte dell'estensimetro e anche da parte del ponte di Wheatstone (par. 5.2) non linearità che superano il limite della trascurabilità. Mentre esiste una letteratura sufficientemente ampia riguardo di problemi di linearità del ponte di Wheatstone, non ci sono indicazioni sul comportamento lineare degli estensimetri nel campo delle grandi dilatazioni. A volte l'errore di linearità del cosiddetto "collegamento a quarto di ponte", cioè il tipo quasi unico di collegamento nel campo delle grandi dilatazioni, viene considerato come errore unico. Un esperimento condotto secondo le norme contenute in [2-1] nel campo di deformazione da $\pm 15 \text{ cm/m} = \pm 150000 \text{ }\mu\text{m/m}$ ha permesso di stabilire che la curva degli estensimetri metallici con griglia di costantana ha un andamento curvato, fig. 3.3-18. Sull'asse delle ascisse del diagramma è rappresentata la deformazione reale ϵ e sull'asse delle ordinate il valore di deformazione ϵ^* calcolato secondo l'equazione (3.3-4) sulla base della variazione di resistenza relativa.

$$\epsilon^* = \frac{\Delta R/R_0}{k} \quad (3.3-9)$$

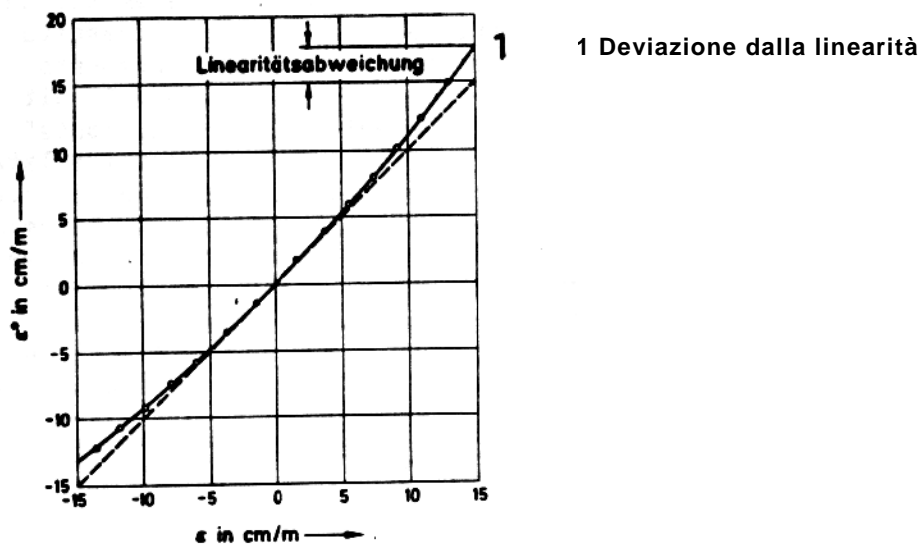


Figura 3.3-18: Valore di misurazione ϵ^* come funzione della deformazione oggettiva ϵ di un estensimetro nel campo delle grandi deformazioni (curva caratteristica dell'estensimetro)

La distanza sull'asse delle ordinate fra la curva e la tangente tratteggiata con l'incremento $\epsilon^* = \epsilon$, caratterizza la deviazione dalla linearità dell'estensimetro.

Questo risultato è da considerarsi valido, a causa dei possibili effetti contorno, solo per il tipo di estensimetro esaminato. Bisogna supporre che anche estensimetri con altre griglie di misurazione o quelli con la griglia in altra lega si comportino in modo uguale o simile se sono adatti per le misurazioni di grandi deformazioni.

Bisogna inoltre aggiungere che le deviazioni dalla linearità dell'estensimetro e del collegamento a quarto di ponte si compensano reciprocamente in larga misura (par. 5.2 e [3-29]).

La variazione strutturale del materiale della griglia dovuta alla deformazione plastica dell'estensimetro modifica il coefficiente di temperatura della resistenza elettrica dell'estensimetro stesso. Per questo motivo gli estensimetri per grandi deformazioni non possono anche essere ad autocompensazione della risposta alla temperatura. Altri estensimetri autocompensanti perdono questa caratteristica se subiscono una forte deformazione plastica. Nel caso della costantana come materiale per la griglia la variazione si verifica nel senso di un cambiamento di temperatura positive.

La massima deformabilità di un estensimetro può essere raggiunta solo se esso consente la sua adesione, con la premessa che siano sufficienti la deformabilità e l'aderenza dell'adesivo e che il lavoro di applicazione sia ineccepibile. Nel par. 4.1 sono elencate le particolari esigenze relative agli adesivi.

3.3.7 Misure dinamiche di deformazione

Gli estensimetri si adattano molto bene alla misurazione di fenomeni di deformazione dinamica. Come conseguenza della loro massa limitata non viene esercitata alcuna influenza percepibile sulla risposta alle vibrazioni dell'oggetto. Per ciò che riguarda l'estensimetro ci sono diversi punti da considerare:

- Le caratteristiche di durata ovvero il comportamento a fatica dell'estensimetro,
- la frequenza superiore ancora determinabile con sicurezza con l'estensimetro.

I leganti hanno in questo caso un'influenza relativa. Non bisogna però dimenticare che con la saldatura a punti viene a volte compromesso il limite di fatica dell'oggetto. Nel caso degli adesivi invece si riscontra nel campo delle alte frequenze un abbassamento del limite superiore al crescere della temperatura. La causa è da ricercarsi in un abbassamento del modulo E dell'adesivo (e anche del materiale del supporto) la cui diminuzione contribuisce ad un peggioramento della velocità di trasmissione. D'altra parte il limite delle frequenze misurabili con l'estensimetro è così alto da poter essere individuato e studiato solo con speciali apparecchiature sperimentali [3-31, 3-32]. In normali condizioni sperimentali - anche in caso di sollecitazione da urto - le frequenze delle oscillazioni da misurare sono molto al di sotto di questo limite.

3.3.7.1 Il comportamento a fatica

Se un estensimetro viene sollecitato dinamicamente per un certo periodo si possono verificare delle irregolarità nell'indicazione della deformazione in relazione all'ampiezza e al numero di cicli di rottura. Esse sono da ricondurre soprattutto a disturbi nella catena di misurazione o anche nei collegamenti. Il limite di fatica del materiale del supporto e degli adesivi è generalmente così grande che essi vengono esclusi dalle possibili fonti di disturbo.

Negli estensimetri con griglia metallica si verifica, a causa della sollecitazione di fatica, un affaticamento del materiale che si manifesta in due modi:

- In relazione all'ampiezza e al numero di cicli di rottura si ha un aumento della resistenza elettrica che si esterna come deriva dinamica dello zero.
- Al crescere del danneggiamento cumulativo si formano sugli intergrani del metallo della griglia delle microcricche che si allargano lentamente fino a giungere alla rottura per fatica.

Un metodo per determinare il comportamento a fatica degli estensimetri viene descritto in [3-33]; il procedimento è stato assunto in [2-1]. I diagrammi di durata a fatica, fig. 3.3-19a, fino a c - sono stati ottenuti con questo metodo. Le linee continue indicano la deriva dello zero in $\mu\text{m}/\text{m}$ con il suo valore numerico venutosi a creare dall'interazione di ampiezza di deformazione alternata ϵ_w e del numero di cicli di rottura n .

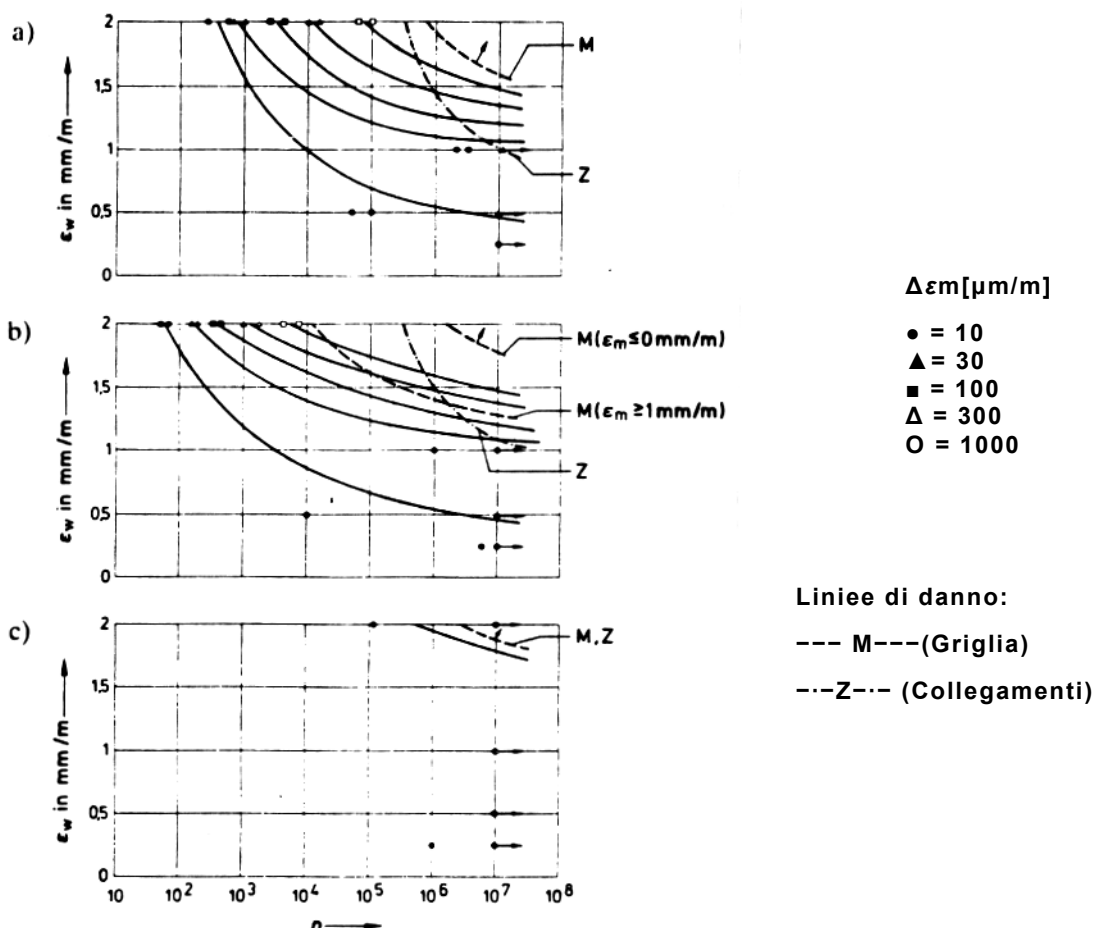
Le linee tratteggiate indicano la rottura per fatica verificatasi alla griglia (M) o ai collegamenti (Z). Nella fig. 3.3-19b è disegnata anche una curva di danno (M) per una deformazione media positiva statica sovrapposta alla deformazione alternata ϵ_m . L'esperimento è stato condotto fino a un numero di cicli di rottura massimo di $n = 10^7$.

Il diagramma 3.3-19c si differenzia in modo sostanziale dagli altri. Il testo della pubblicazione dice: "Solo in caso di sollecitazioni molto grandi si verifica una variazione dello zero di $10 \cdot 10^{-6}$, in deformazione. Una variazione dello zero di $30 \cdot 10^{-6}$, in deformazione e più non si è mai ottenuta con il campo di sollecitazioni esaminato." Nostre ricerche confermano un buon comportamento a fatica di questo tipo di estensimetro fino ad un'ampiezza di deformazione alternata di $\pm 3000 \mu\text{m}/\text{m}$. In questo caso è stato utilizzato un materiale per la griglia con un limite di elasticità maggiore del solito. Purtroppo il limite di elasticità dei materiali delle griglie non si può alzare a piacere. Per questo motivo esperimenti continuativi con ampiezze superiori sono possibili solo con apparecchiature ausiliarie che riducono la dilatazione, del tipo di quelle descritte in [3-30], e con rilevatori, rappresentati nella fig. 3.3-33.

Si denota inoltre una dipendenza reciproca fra limite di fatica e deformabilità statica massima. La deformabilità statica massima degli estensimetri con un'alta resistenza alla fatica termina a ca. 1 ... 2 cm/m (10000 ... 20000 $\mu\text{m}/\text{m}$), mentre i cosiddetti estensimetri a grande dilatazione possiedono una resistenza alla fatica molto limitata.

Un materiale americano per la griglia, "Isoleastic", si distingue per l'ottimo comportamento a fatica ma anche per un'alta risposta alla temperatura. Inoltre esso reagisce con forza alle dispersioni magnetiche. Questo materiale - per quanto ne sappia l'autore - non viene utilizzato da produttori europei.

Il diagramma 3.3-20 mostra buoni risultati per gli estensimetri a lamina, questa volta per un campo di deformazione alternata ampliato fino a $\pm 3000 \mu\text{m}/\text{m}$. Ciò può essere considerato tipico per gli estensimetri universali di alta qualità. In generale si può dire che la resistenza alla fatica di un estensimetro è massima in un campo di cicli pulsanti negativo, limitata in un campo alternato e minima in un campo di cicli pulsanti positivo. Gli estensimetri con una griglia lunga possiedono una resistenza alla fatica migliore rispetto agli estensimetri corti.



Una freccia su di un simbolo significa che in questo numero di cicli di rottura non si è ancora verificato l'effetto relativo. Ulteriori spiegazioni nel testo.

Figura 3.3-19: Diagrammi durata a fatica di diversi tipi di estensimetri con griglia a filo*
a) HBM-Typ 20/600FB1 b) HBM-Typ 20/600FB3 c) HBM-Typ 20/120FB4S

* Non più nel catalogo HBM.

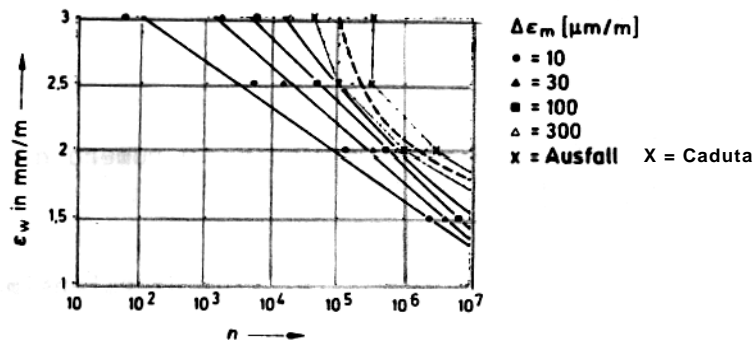


Figura 3.3-20: Diagramma di durata a fatica una serie di estensimetri a lamine Deriva del punto zero in relazione all'ampiezza di deformazione alternata ϵ_w e al numero di cicli di rottura n

Un consiglio pratico: Se si deve effettuare una misurazione in un campo di cicli pulsanti positivo si carichi l'oggetto (se le circostanze lo permettono) con il carico massimo dimezzato e si applichi lo strumento in queste condizioni. Durante l'esperimento l'estensimetro subisce una deformazione alternata con solo mezzo carico di picco. Sulla base dell'esperienza bisogna infine dire che i problemi si verificano piuttosto nei collegamenti e nelle connessioni dettriche dell'estensimetro che non nello strumento stesso. Per questo motivo è bene usare fili altamente flessibili ed evitare il più possibile che i cavi siano soggetti a sollecitazioni.

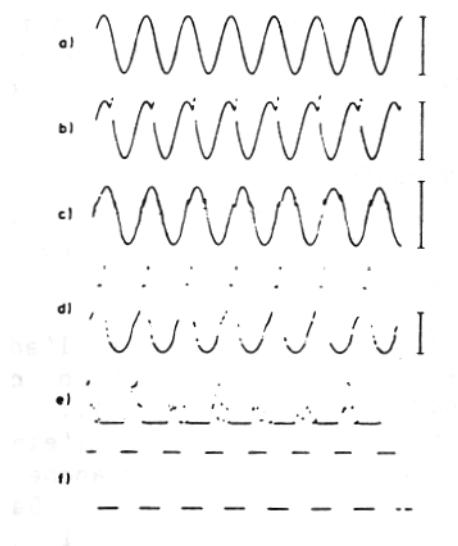


Figura 3.3-21: Alcune oscillazioni tipiche che hanno luogo durante una sollecitazione alternata (secondo [3-33]). I segni di taratura nella parte destra del diagramma forniscono l'ampiezza di oscillazione di $4000 \mu\text{m/m}$, che dovrebbe indicare un estensimetro integro.

L'inizio della rottura per fatica dell'estensimetro si può osservare bene con l'oscilloscopio. Si riconoscono le prime microcricche della griglia come "spikes" nel campo di oscillazione positivo che, con la propagazione delle stesse cricche, si possono trasformare in un regione di impulsi ("spikes"). Dopo una completa separazione il conduttore ha solo funzione di collegamento (fig. 3.3-21).

Nel caso degli estensimetri semiconduttori la "griglia" composta da silicio monocristallino possiede lungo l'intero campo di deformabilità di ca. $\pm 5000 \mu\text{m/m}$ una resistenza alla fatica ideale che però non si estende anche ai collegamenti (fig. 1.0-9).

Non c'è da aspettarsi che si verifichino fratture nell'adesivo o nel supporto della griglia in seguito a un carico dinamico continuato a causa dell'alta resistenza a fatica alternata di questi materiali.

Oltre al numero di cicli di rottura raggiunto con la prova di fatica e la conseguente deriva dello zero, interessa anche l'influenza sulla sensibilità dell'estensimetro, cioè sul fattore k . Dal diagramma in fig. 3.3-22 risulta che una crescita del fattore k dell'1% è il primo segno per un danno totale imminente. Le differenze di sensibilità determinate in precedenza rientrano nell'ambito dell'incertezza di misurazione della strumentazione di controllo.

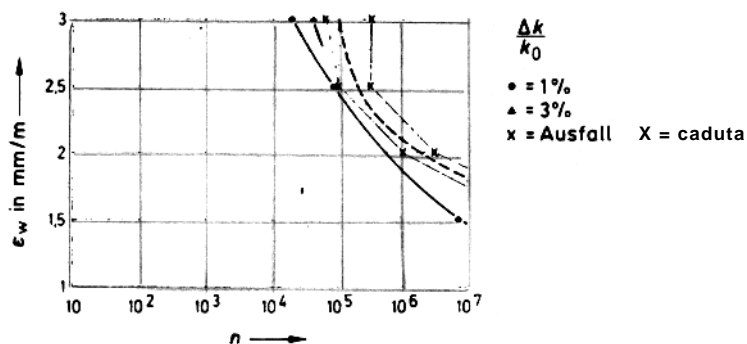


Figura 3.3-22: Variazione del fattore k in caso di sollecitazione a fatica alternata in relazione all'ampiezza della deformazione alternate ϵ_w e al numero di cicli di rottura n .

3.3.7.2 La frequenza limite

Per determinare la capacità dell'estensimetro di riprodurre dei processi di deformazione dinamica sono utili i lavori di Oi [3-31] e di Bagaria/Sharpe [3-32]. Oi ha esaminato la risposta a gradino di deformazione che si verifica spezzando una barra di acciaio temprato; Bagaria e Sharpe hanno studiato la riproduzione di un'onda d'urto scatenata da un pendolo al momento del contatto del martello con la superficie di una barra di acciaio. Le superfici di contatto rientravano in una tolleranza di 325 nm piani e avevano una rugosità compresa fra 76 e 127 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Questi numeri sono importanti perché evidenziano l'enorme sforzo necessario per avvicinarsi il più possibile a una risposta a gradino. Cito questo anche perché una simile situazione non si verificherà mai nei problemi di misurazione normali, come è spiegato anche dalla seguente descrizione di un esperimento.

Per la capacità di un estensimetro di riprodurre una variazione a gradino valgono le seguenti considerazioni:

Il gradino di deformazione percorre la lunghezza dell'estensimetro in un tempo t . Poiché l'estensimetro fornisce una risposta mediate, il segnale da lui trasmesso crescerà linearmente fino a un valore massimo in relazione alla lunghezza della griglia con la velocità di riproduzione del gradino di deformazione. La velocità di riproduzione corrisponde alla velocità del suono c . Il periodo di tempo teoricamente necessario t_{th} per raggiungere il valore di misurazione intero ammonta a

$$t_{th} = \frac{l_{DMS}}{c}. \quad (3.3-10)$$

A causa di diversi effetti, non tutti interamente chiariti, la riproduzione oggettiva del segnale assumerà la forma indicata in fig. 3.3-23c.

Nelle forme d'onda a gradino, come tempo di incremento t_a viene definito l'intervallo di tempo fra 10% e 90% del valore di misurazione.

Formula di Oi

$$t_a = t_b + 0,8 \frac{l_{DMS}}{c}, \quad (3.3-11)$$

in cui l'addendo t_b è un tempo dipendente dalla struttura sperimentale e di misurazione, indicata da Oi con $0,5 \mu\text{s}$ e ridotta da Bagaria/Sharpe a $0,2 \mu\text{s}$.

Nei fenomeni di vibrazioni sinusoidali il rapporto fra lunghezza dell'estensimetro l_{ER} e la lunghezza dell'onda λ gioca un ruolo determinante per la dispersione della raffigurazione del fenomeno. Se si suppone che la lunghezza dell'estensimetro sia uguale alla lunghezza d'onda di un'oscillazione sinusoidale stazionaria oppure mobile, allora l'estensimetro fornirà il valore zero come valore medio fra quote di oscillazione positive e negative, sebbene i valori di picco possono essere notevolmente grandi. È quindi necessario sforzarsi di rendere il rapporto $l_{ER} : \lambda$ il più piccolo possibile per ottenere un risultato sufficientemente preciso. Nel diagramma della fig. 3.3-24 si fa l'ipotesi di un fenomeno di oscillazione sinusoidale e viene fornito il rapporto del valore di picco reale della deformazione rispetto al valore di picco indicato come percentuale e più precisamente in relazione al rapporto $l_{ER} : \lambda$. Il diagramma è calcolato per la condizione di centro griglia sul punto massimo di deformazione.

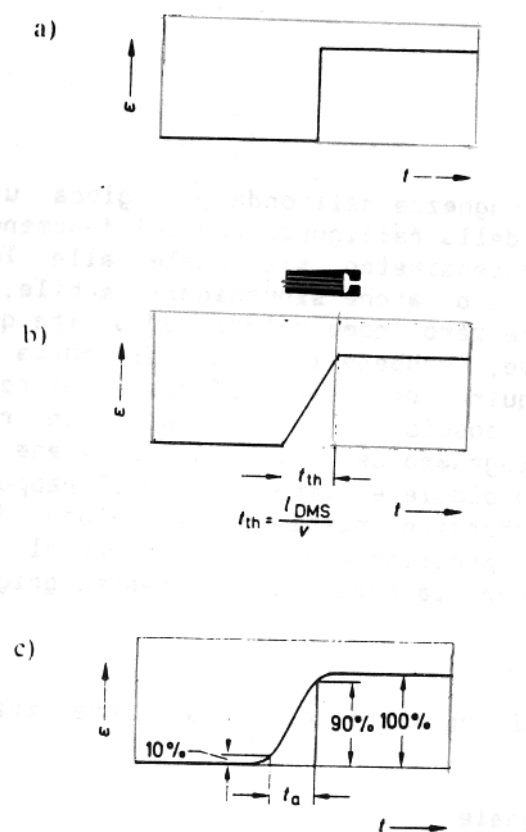


Figura 3.3-23: Riproduzione di un gradino di deformazione tramite un estensimetro

- a) Gradino rettangolare (ideale)
- b) Riproduzione teorica del segnale
- c) Forma reale del segnale

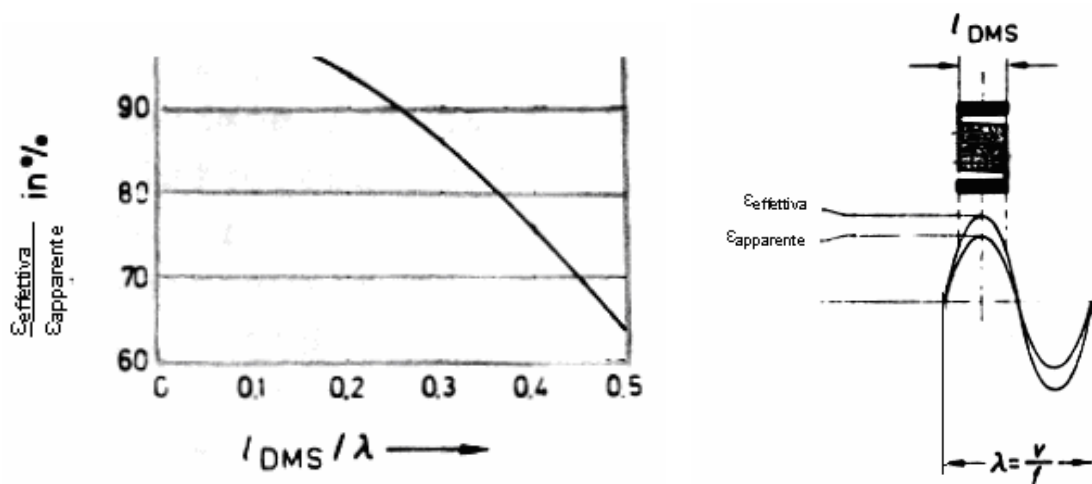


Figura 3.3-24: Caduta di sensibilità in relazione al rapporto $l_{ER}:\lambda$ in un processo sinusoidale con il centro della griglia sul punto di massima dilatazione.

In [3-49] Bickle mostra come per mezzo di una tecnica di compensazione analitica si possa diminuire notevolmente l'influenza del membro $0,8 l/c$ dell'equazione (3.3-11). La validità del metodo viene supportata da un esperimento in cui un detonatore produce in una barra di alluminio un'onda d'urto dal tempo di incremento di ca. $10\mu\text{m}$. La misurazione viene effettuata con estensimetri di diverse lunghezze. Il più breve di tutti era lungo $0,38\text{ mm}$; il suo segnale è stato accettato come valore di misurazione "vero". L'estensimetro più lungo era di 48 mm . L'esperimento mostra come il segnale deviante di quest'ultimo può essere paragonato con buona approssimazione al segnale di misurazione "vero" col calcolo di compensazione.

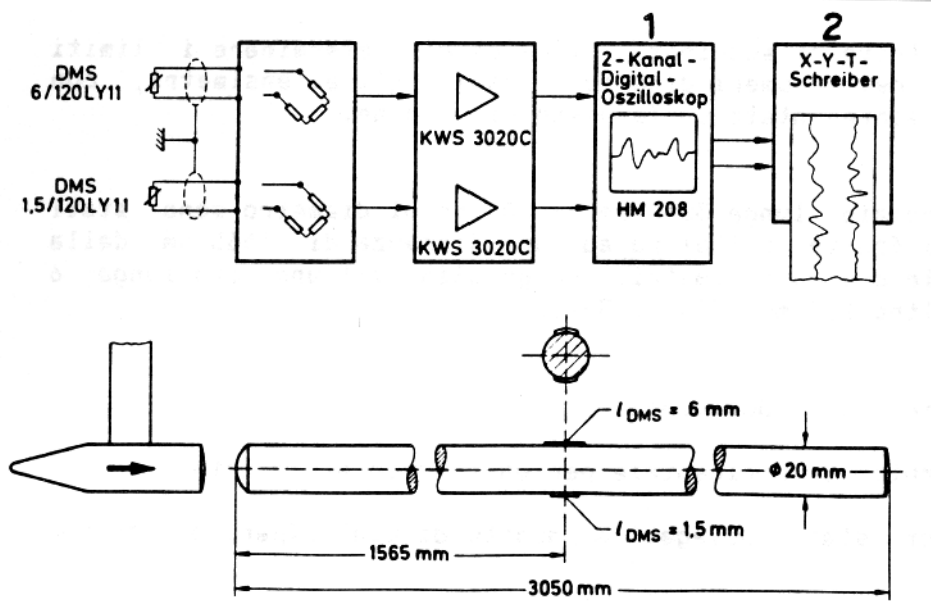
Mentre con gli esperimenti succitati si cerca di determinare i limiti della riproduzione dei fenomeni dinamici tramite gli estensimetri, con un esempio verrà rappresentato un fenomeno più comune.

Esempio:

Ad una barra di acciaio lunga 3050 mm di 20 mm di diametro sono stati applicati l'uno di fronte all'altro ad una distanza di 1565 mm dalla superficie frontale 2 estensimetri. La griglia del primo estensimetro era lunga 6 mm , quella dell'altro $1,5\text{ mm}$ (fig. 3.3-25).

Gli estensimetri sono stati collegati a quarto di ponte (par. 5) ognuno con un amplificatore a corrente continua KWS 3020 C*. Il campo di frequenze dei due amplificatori era regolato su 25 kHz (-1 dB). I loro segnali di uscita sono stati indirizzati ad un oscilloscopio-memoria-digitale a due canali (con presblocco) e si sono potuti osservare sullo schermo e trascrivere dalla memoria in modo sincrono tramite una stampante a due canali collegata a valle. La fig. 3.3-26 mostra il tracciato.

* Prodotto non più in catalogo.



- 1 Oscilloscopio digitale a due canali
- 2 Stampante X-Y-T

Figura 3.3-25: Struttura sperimentale per un esperimento d'urto

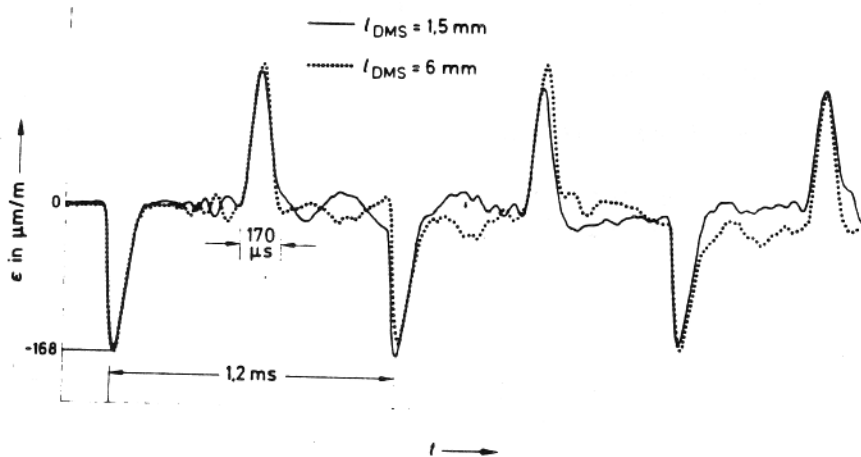


Figura 3.3-26: Tracciato di un esperimento d'urto su di una barra di acciaio lunga circa 3 m. Spiegazioni nel testo.

Risultato:

La distanza dei picchi negativi del segnale corrisponde a un tempo di 1,2 ms per andata e ritorno dell'onda d'urto, cioè di un percorso di $2 \times 3050 = 6100$ mm.

I picchi positivi del segnale indicano una curva riflessa.

Il segnale d'urto stesso dura $170 \mu\text{s}$.

Le ampiezze dei segnali ammontano a $168 \mu\text{m/m}$.

Ai picchi dei segnali è sovrapposta un'oscillazione di senso opposto che può essere interpretata come oscillazione di flessione (oscillazione laterale).

Valutazione:

Dal tempo di 1,2 ms per andata e ritorno dell'onda d'urto per un tratto di $2 \times 3050 = 6100$ mm si ricava la velocità di propagazione c di 5083 m/s; essa è uguale alla velocità del suono nell'acciaio.

La velocità del suono c nei corpi solidi si calcola dal modulo di elasticità E e dalla densità ρ secondo la relazione.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.3-12)$$
$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{206 \cdot 10^9 \frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^3}{\text{s}^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}}}{7,8 \cdot 10^3}} = \sqrt{\frac{206 \cdot 10^6 \text{m}^2}{7,8 \text{s}^2}} = 5140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La differenza fra velocità del suono misurata e calcolata è solo del 7% che, considerando il valori delle tabelle impiegate per E e ρ e la possibile imprecisione del tracciato, può essere considerata minima. Dalla durata del segnale d'urto di $170 \mu\text{s}$ e dalla velocità del suono c si ottiene la lunghezza dell'onda d'urto:

$$l = c \cdot t \quad (3.3-13)$$
$$= 5083 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 170 \cdot 10^{-6} \text{s} = 0,864 \text{m}.$$

L'ampiezza di deformazione ammonta a $\varepsilon = -168 \mu\text{m}/\text{m}$. Si ottiene la sollecitazione del materiale

$$\sigma = \varepsilon E = -168 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{m}} \cdot 206000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = -34,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

e della forza d'urto

$$F = \sigma A = -34,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 314 \text{mm}^2 = -10864 \text{N}.$$

Se si considera l'onda d'urto riprodotta nel tracciato di misurazione della fig. 3.3-26 approssimativamente come una semioscillazione sinusoidale di $\lambda/2=864$ mm di lunghezza e se si confronta l'errore ricavabile dal diagramma in fig. 3.3-24 per il rapporto $l_{ER}:\lambda$, allora è comprensibile che fra i segnali dei due estensimetri con griglie rispettivamente di 6 mm e 1,5 mm non si possa verificare alcuna differenza percepibile. Le differenze reciproche che tuttavia esistono si spiegano con l'oscillazione laterale sovrapposta della barra.

Conclusioni:

Fenomeni d'urto a carattere approssimativamente rettangolare possono essere prodotti solo con apparecchiature sperimentali ad alta precisione. Nella realtà gli urti sono essenzialmente meno violenti.

Con le lunghezze degli estensimetri prevalentemente impiegate a livello pratico, 3 e 6 mm, si possono tranquillamente affrontare problemi di misurazione dinamica. Anche le oscillazioni nel campo degli ultrasuoni si possono misurare con sufficiente precisione. In ogni caso deve essere considerata la risposta in frequenza degli strumenti di misurazione interessati.

3.3.8 Il carico elettrico

Se si inserisce un estensimetro con griglia di 6 mm e resistenza della griglia di 120 Ω , p.e. il tipo 6/120 LY11, in un collegamento a ponte simmetrico alimentato con una tensione di 5 V, allora esso è percorso da una corrente di 20,8 mA. Già a colpo d'occhio non è molto. Se si riferisce però la corrente alla sezione eccezionalmente piccola dei conduttori della griglia, si ottiene una densità di corrente di 45 A/mm² incredibilmente grande anche per le applicazioni di potenza. Solo per mezzo del favorevolissimo rapporto fra superficie della sezione e superficie del mantello dei conduttori con una piccola sezione è possibile cedere all'ambiente il calore di Joule causato dal flusso della corrente. Affinchè ciò possa avvenire in misura sufficiente, l'apporto e l'eliminazione della potenza devono essere armonizzati in modo tale che il conseguente aumento di temperatura nell'estensimetro rimanga entro limiti accettabili. A questo scopo devono essere soddisfatte alcune premesse. I parametri che influenzano sono:

- L'entità della tensione di alimentazione del ponte,
- la resistenza elettrica della griglia,
- le dimensioni e la geometria della griglia,
- la temperatura ambiente,
- la conducibilità termica del materiale della griglia,
- la capacità termica e la capacità di radiazione e di raffreddamento, dell'elemento strutturale.

Un carico elettrico eccessivo della griglia porta a effetti come un'eccessiva temperatura ambiente, surriscaldamento della griglia, del materiale di supporto e dello strato di adesivo da cui risultano isteresi, scorrimento, zero instabile, compromissione dell'autocompensazione della temperatura.

HBM fornisce con i dati tecnici per ogni tipo di estensimetro la tensione di alimentazione del ponte massima consentita. Questo valore serve per l'orientamento e vale nel campo di precisione medio per il funzionamento continuato a temperatura ambiente e l'applicazione a oggetti con una buona conducibilità termica. Una temperatura ambiente superiore, una cattiva conducibilità termica (anche strati di adesivo più spessi del dovuto) e una bassa capacità termica dell'elemento (piccoli oggetti) richiedono una riduzione della tensione di alimentazione del ponte.

Per misurazioni di elementi strutturali in materiale sintetico [3-34] la tensione di alimentazione dovrebbe essere ridotta fino a ca. il 10% dei valori della tabella. Eventualmente l'alimentazione a impulsi è un metodo adatto per evitare le difficoltà dovute all'eccessivo riscaldamento proprio degli estensimetri. I moderni apparecchi di commutazione per la tecnica di misurazione multipoint offrono entrambe le possibilità, anche se la riduzione della tensione di alimentazione è la misura più efficace:

Tensione di alimentazione U e potenza N sono in relazione quadratica fra loro.

$$N = \frac{U^2}{R} \quad (3.3-14)$$

In caso di scansione ciclica del punto di misurazione o di alimentazione a impulsi, l'alimentazione di potenza si accumula in relazione al rapporto del tempo di pulsazione e alla velocità di ripetizione.

Anche se si hanno grandi esigenze di precisione o in caso di costruzione di rilevatori è consigliabile una limitazione della tensione di alimentazione a circa la metà dei valori massimi indicate.

Se una riduzione della tensione non fosse possibile, p.e. per motivi tecnico-strumentali, allora può essere utile scegliere uno strumento con una maggiore resistenza. Potenza e resistenza hanno tuttavia una relazione lineare come risulta dall'equazione (3.3-14).

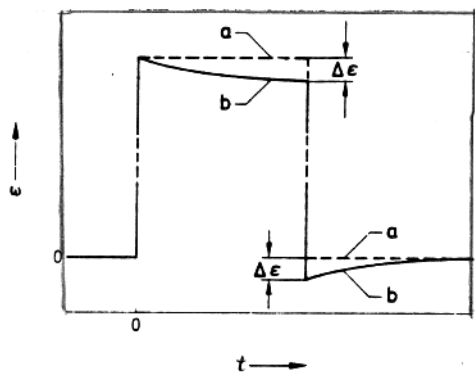
Una diminuzione della tensione tramite resistenze collegate a monte è in linea di principio possibile, ma è sempre correlata a una perdita del segnale di misurazione (par. 7.2). Inoltre si devono calcolare anche errori aggiuntivi dovuti alla dipendenza dalla temperatura o all'instabilità della resistenza precollegata.

3.3.9 Il creep

In quasi tutte le pubblicazioni sugli estensimetri il creep (scorrimento viscoso) viene rappresentato come una caratteristica negativa. Trent'anni fa questo era certamente corretto, ma oggi questa affermazione deve essere rivista. Per misurazioni precise un certo creep è indispensabile. I moderni metodi di produzione degli estensimetri laminari rendono possibile l'adattamento del creep dell'estensimetro allo scopo di applicazione. Per esempio senza questa tecnica sarebbe impossibile adempiere alle estreme richieste di precisione poste per i piatti delle bilance per il commercio.

Cosa si intende per creep (scorrimento viscoso)?

Se un estensimetro viene sottoposto a una deformazione statica, esso mostra, nonostante una deformazione costante dell'elemento, una variazione temporale della sua resistenza. Questa variazione del segnale di misurazione di un estensimetro dilatato (o compresso) avviene molto lentamente ("strisciamento") e in direzione della "distensione" della deformazione. La causa è da ricercare nel comportamento reologico degli strati a trasmissione di deformazione dell'adesivo e del materiale della griglia [3-35]. La griglia deformata agisce come un molla intensione. La forza elastica produce all'altezza dei punti di inversione della griglia degli sforzi tangenziali. Sulle superfici di contatto fra griglia e supporto oltre agli sforzi normali risultanti dalla deformazione. Sotto l'influenza di questi sforzi i materiali plastici dell'estensimetro e dell'adesivo si rilassano, cioè la forza di reazione si riduce e la griglia si ritira. Ha origine un errore negativo. Nella fig. 3.3-27 è rappresentato questo fenomeno.



a Deformazione dell'elemento strutturale
b Valore di misurazione dell'estensimetro

Figura 3.3-27: Andamento temporale del valore di misurazione di un estensimetro dopo carico spontaneo di un elemento strutturale e dopo la sua distensione spontanea (schema).

Poichè questo fenomeno si verifica in una zona relativamente limitata delle estremità della griglia, la sua influenza è maggiore nelle griglie corte, fig. 3.3-28.

Gli estensimetri laminari hanno un vantaggio rispetto agli estensimetri a filo usati in precedenza, poichè i punti di inversione diffusi distribuiscono le forze su di una superficie maggiore e diminuiscono così gli sforzi tangenziali (di scorrimento).

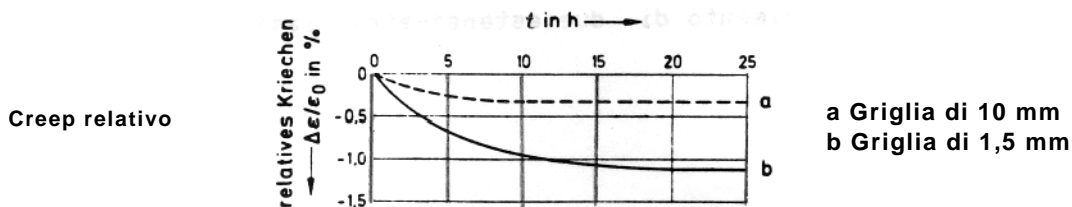


Figura 3.3-28: Curva di creep di due estensimetri laminari di diversa lunghezza (esempio).

Le cause che determinano questo fenomeno sono numerose e complicate. Il coefficiente di Poisson dei conduttori della griglia e il loro rapporto, il materiale del supporto, il tipo e lo spessore dell'adesivo, il tempo, l'umidità, la temperatura e altri. Il calore stimola il fenomeno, il freddo lo ostacola. Per questo motivo i dati forniti in questo capitolo possono indicare solo tendenze, i valori numerici non devono essere considerati assoluti ed essere considerati validi per altri strumenti.

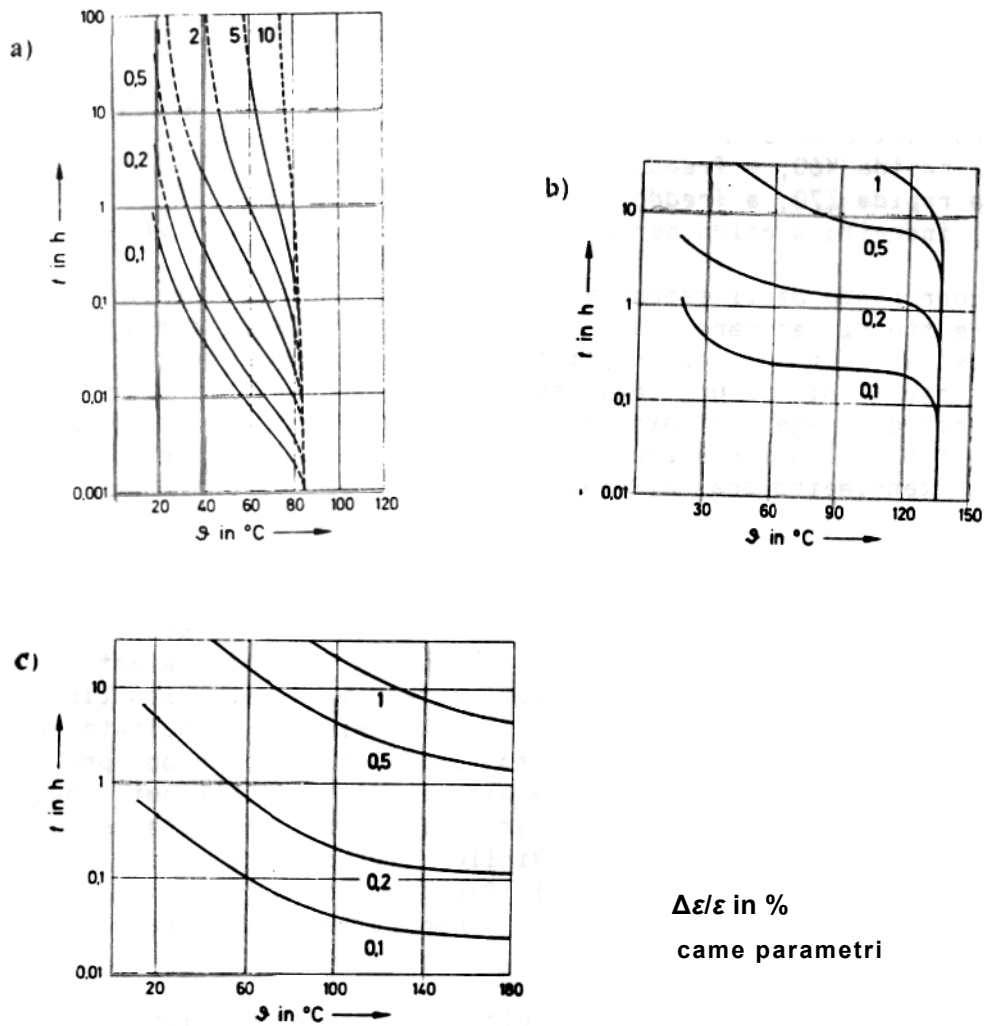


Figura 3.3-29: Diagrammi-tempo-temperatura-creep (ZTK) secondo [2-1], creep relativo $\Delta\varepsilon/\varepsilon_0$ in % di ε_0 , misurato a $\varepsilon_0 = 2000 \mu\text{m}/\text{m}$.

Tipo di estensimetro: 6/120 LY 11;

Adesivi: a) presa rapida X60, indurito a freddo

b) presa rapida Z70, indurito a freddo

c) presa EP 250, indurito a caldo per 2 h a 180°C + 2 h a 200°C

Secondo [2-1] il creep degli estensimetri è stato misurato con un dispositivo che permette di generare una deformazione costante nel tempo. La fig. 3.3-29 mostra, con un altro tipo di rappresentazione, i risultati di una serie di misurazioni per la determinazione del fenomeno. Come parametro viene indicato il creep relativo $\Delta\varepsilon/\varepsilon_0$ funzione del tempo t e della temperatura ϑ . La deformazione ε_0 a cui è stato sottoposto l'estensimetro era, all'inizio della misurazione, di + o -2000 $\mu\text{m/m}$.

Fondamentalmente questi diagrammi ZTK possono essere determinati solo per combinazioni estensimetro-adesivo e mai per i soli estensimetri. I diagrammi ZTK della fig. 3.3-29 sono stati ottenuti con un unico tipo di estensimetro combinato con tre adesivi diversi. È risultato che l'adesivo a presa rapida X60 è adatto in particolar modo per le misurazioni effettuate a temperatura ambiente. Si sono ottenuti buoni risultati anche a 50° e con cicli di carico fino a 1 ora. L'adesivo a presa rapida Z70 presenta invece una migliore stabilità e un più ampio intervallo di temperature utilizzabili. Ciò che non si riconosce dal diagramma sono le qualità dell'X60 nel campo delle basse temperature intorno al punto di congelamento.

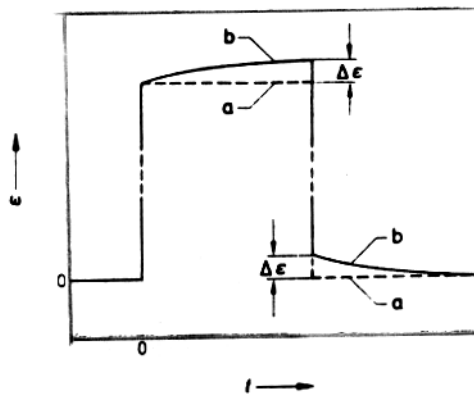
Quali effetti ha il creep sui risultati di una misurazione?

Si è già accennato in precedenza al fatto che la produzione di celle di carico ad alta precisione non sarebbe possibile senza la presenza di questo fenomeno; perchè?

Queste relazioni saranno spiegate tramite il semplice esempio di una barra di trazione; esse valgono anche per altri casi di carico ma solo per il campo di deformazione elastica. Per i rilevatori di grandezze fisiche è basilare che la sollecitazione del materiale dell'elemento elastico rimanga così bassa da escludere deformazioni plastiche non reversibili. Conseguentemente la scelta dei materiali deve essere effettuata tenendo presente lo scopo di impiego.

Se la barra viene sottoposta a una forza di trazione, allora essa si deforma spontaneamente di un valore determinato con la legge di Hooke. In seguito al rilassamento del materiale a questa dilatazione spontanea succede un'ulteriore deformazione ad andamento asintotico e in funzione del tempo. Se si scarica la barra, essa si ritira elasticamente di un tratto corrispondente alla deformazione spontanea sotto carico. Rimane una piccola deformazione residua delle dimensioni della deformazione aggiuntiva funzione del tempo che si smorza lentamente fino a che non viene ripristinata la condizione originaria. Questo fenomeno è definito "elasticità susseguente" (fig.3.3-30) per distinguerlo dallo scorrimento viscoso irreversibile dei materiali.

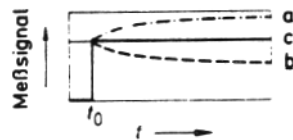
Sia nell'analisi delle tensioni che nella misurazione di altre grandezze fisiche che vanno di pari passo con gli effetti dinamici (forza, peso, momento flettente, pressione ecc.), la deformazione spontanea del materiale è una misura del carico. L'elasticità susseguente fornisce un errore (positivo) funzione del tempo. Creep ed elasticità susseguente hanno segno contrario e si riducono reciprocamente, fig. 3.3-31. Nel migliore dei casi si ha una compensazione più o meno buona.



- a Carico dell'elemento strutturale
- b Deformazione dell'elemento strutturale

Figura 3.3-30: Andamento temporale della deformazione di un elemento strutturale durante carico costante e dopo scarico completo (elasticità susseguente).

Segnale di misurato



- a Elasticità susseguenti dell'elemento elastico/materiale dell'elemento strutturale
- b Scorrimento dell'estensimetro
- c Segnale di misurazione

Figura 3.3-31: Schema della compensazione di scorrimento (creep)

Mentre il principio della compensazione del creep è molto semplice, più difficoltosa è la sua realizzazione pratica - a seconda della precisione richiesta. Comunque l'adattamento ottimale deve essere determinato durante l'esperimento in condizioni realistiche. Così oggi è possibile produrre rilevatori il cui errore di scorrimento è inferiore allo 0,005% del campo di misurazione, riferito a un arco di tempo di 30 minuti. Questo tempo è sufficiente per compiti di misurazione.

L'influenza della temperatura sullo scorrimento è rilevata dai risultati di un esperimento di laboratorio, fig. 3.3-32. Il campione è stato caricato a temperatura ambiente, a 60°C e a 100°C per 24 ore e successivamente scaricato per 24 ore. Durante questo periodo sono stati registrati i valori di misurazione.

A temperatura ambiente l'adattamento è migliore di + 0,05% rispetto al valore teorico.

A 60°C l'errore positivo, che segnala un'elasticità susseguente prevalente, raggiunge ca. + 0,15% in un periodo di 24 ore. Dopo lo scarico il punto zero torna all'origine dopo altre 24 ore.

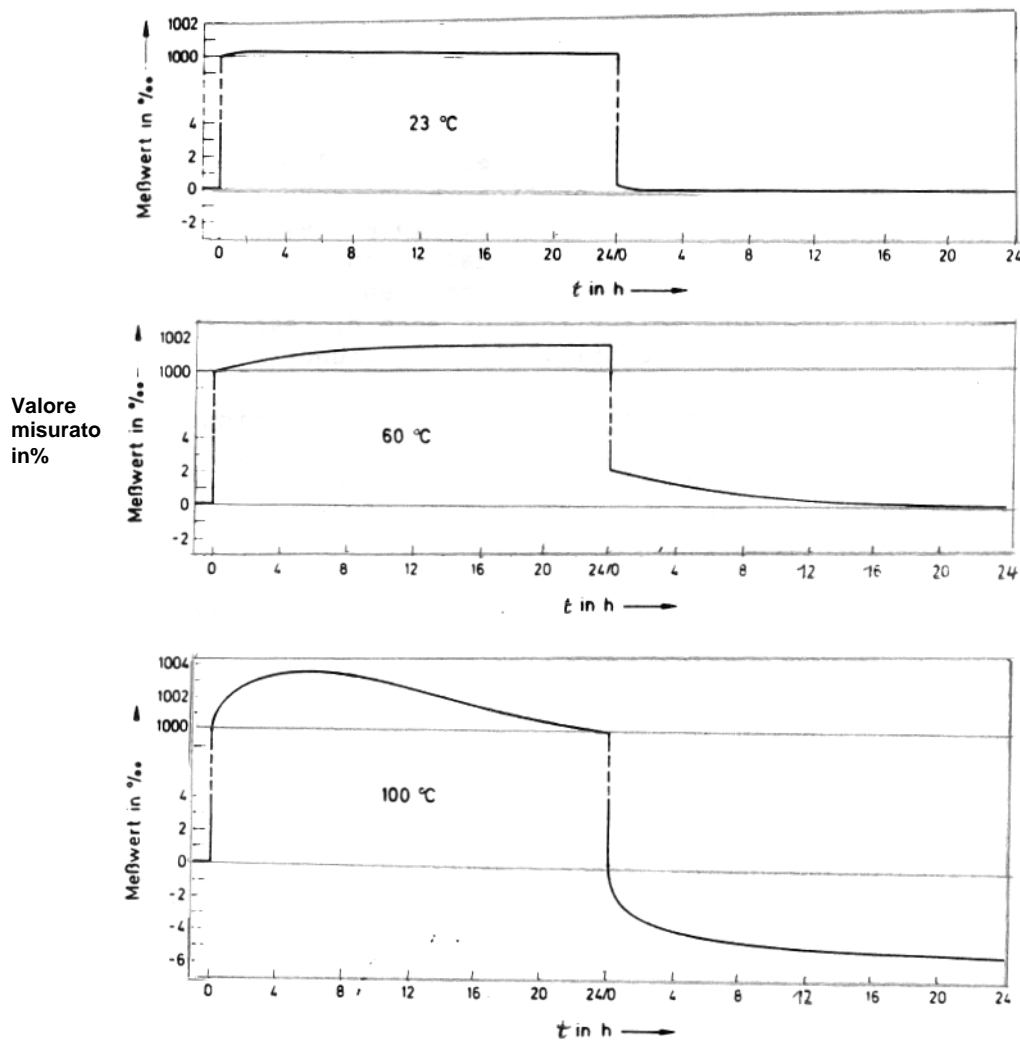


Figura 3.3-32: Creep in funzione del tempo e della temperatura di un oggetto dotato di estensimetro durante 24 ore a diverse temperature.

A 100°C si ha inizialmente un incremento positivo del segnale che dopo poche ore inverte la sua direzione. Questa inversione indica uno scorrimento viscoso irreversibile dell'estensimetro e dell'adesivo. Il valore numerico dello scorrimento può essere riconosciuto tramite lo spostamento residuo dello zero dopo che lo scorrimento reversibile si è smorzato in seguito alla scarico.

L'esempio mostra che effetti simili possono essere dovuti a influssi differenti e che una compensazione del creep può essere realizzata in un arco di tempo/temperatura/precisione limitato.

In quest'ambito bisogna dire che il creep dei moderni estensimetri a lamine è così limitato che a volte è necessario intervenire con degli accorgimenti per compensare in misura sufficiente l'elasticità susseguente del materiale dell'elemento elastico.

Un altro punto di vista è quello delle misurazioni dipendenti dal percorso (in contrapposizione a quelle finora descritte dipendenti dalla forza).

Esempio:

Una variazione di lunghezza deve essere misurata con una molla di flessione. La deformazione vicino al punto di afferraggio della molla è la misura della variazione di lunghezza (fig. 3.3-33). Il rilassamento del materiale della molla di flessione causa in questo caso solo una diminuzione della forza di reazione. Esso non ha alcuna influenza sulla deformazione che qui dipende solo dalla flessione della molla e non dalla forza di reazione. In questo caso il creep dell'estensimetro non avrebbe avuto un effetto di compensazione ma sarebbe stato solo una fonte di errore eliminabile con appositi strumenti, fig. 3.3-34. In questi estensimetri il creep si evita generando un equilibrio di forze in direzione dell'asse longitudinale sui ponti trasversali che delimitano la lunghezza attiva della griglia della distanza l . A questo scopo sono utili i prolungamenti verso l'esterno della griglia che non partecipano alla misurazione. Lo scorrimento che si verifica alle estremità esterne non ha alcuna influenza sull'attività del campo di misura della griglia.

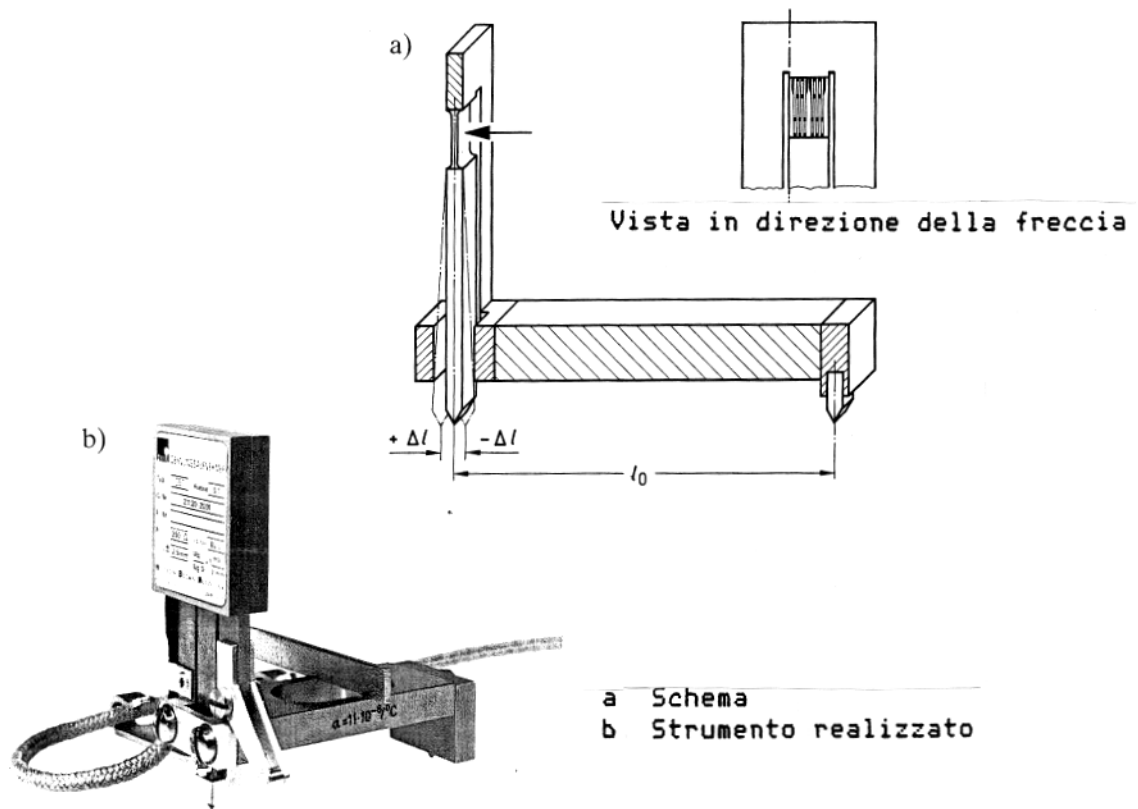
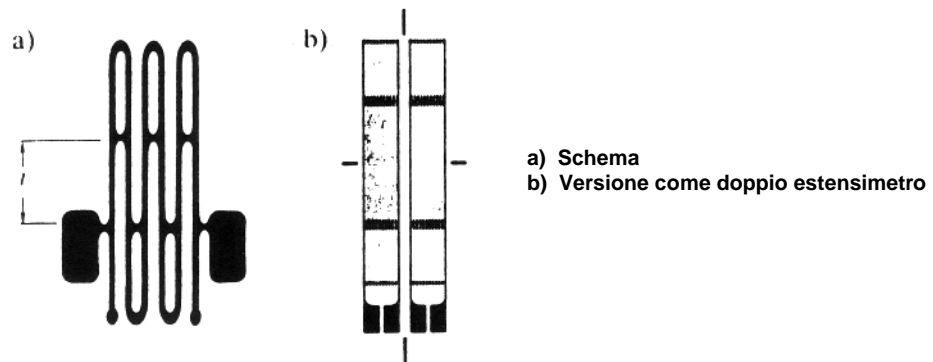


Figura 3.3-33: Dispositivo per la misurazione di una variazione di lunghezza per mezzo di molla di flessione dotata di estensimetro (rilevatore di dilatazione DD1 della HBM),



Lunghezza attiva (misurante) dell'estensimetro

Figura 3.3-34: Esempio di un estensimetro senza creep

3.3.10 L'isteresi meccanica

Con isteresi meccanica di un estensimetro si intende la differenza dell'indicazione fra deformazione crescente e decrescente a uguali valori di deformazione del campione di prova. In [2-1] viene fornita una definizione più particolare dell'uniformità

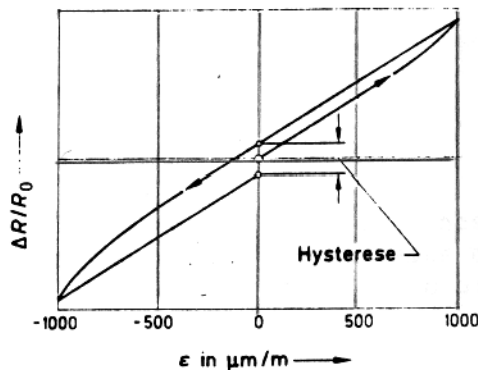
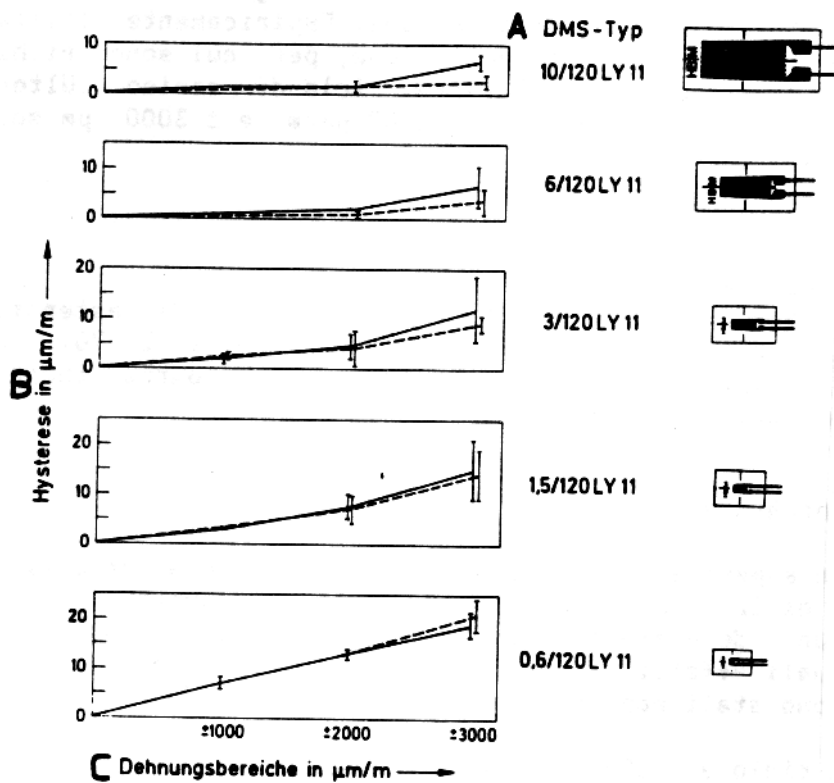


Figura 3.3-35: Definizione dell'isteresi meccanica secondo [2-1].

delle condizioni sperimentali: l'isteresi meccanica è la massima differenza nello zero delle ascisse fra il tratto ascendente e quello discendente della curva rappresentante un intero ciclo con valori estremi $\pm 1000 \mu\text{m/m}$ o $\pm 1000 \mu\text{m/m}$.

L'isteresi meccanica, come molti altri parametri - non dipende solo dall'estensimetro, ma anche dall'applicazione e dagli altri componenti che insieme formano il punto di misurazione. Empiricamente l'isteresi diminuisce dopo molti cicli di sollecitazione, per cui sono richieste indicazioni relative al primo e al terzo ciclo di carico. Ulteriori misurazioni con campi di deformazione $\pm 2000 \mu\text{m/m}$ e $\pm 3000 \mu\text{m/m}$ sono a scelta.



- A Tipi di estensimetri
 B Isteresi in $\mu\text{m}/\text{m}$
 C Campi di deformazione in $\mu\text{m}/\text{m}$

Figura 3.3-36: Isteresi meccanica di 6 diversi tipi di estensimetri serie LY11, applicati con adesivo a presa rapida Z 70. Nella denominazione dei tipi il numero a sinistra della sbarra indica la lunghezza della griglia come variabile.



I risultati di un esperimento rappresentati nel diagramma vanno al di là delle richieste di [2-1]. Essi mostrano fino a che punto esista una dipendenza da un determinato modello nella stessa famiglia di estensimetri e quali effetti hanno diversi tipi di adesivo. I risultati di misurazione sono stati rappresentati secondo lo schema

- a) Primo e terzo ciclo a $\pm 1000 \mu\text{m}/\text{m}$ o $\mp 1000 \mu\text{m}/\text{m}$
 b) Primo e terzo ciclo a $\pm 2000 \mu\text{m}/\text{m}$ o $\mp 2000 \mu\text{m}/\text{m}$
 c) Primo e terzo ciclo a $\pm 3000 \mu\text{m}/\text{m}$ o $\mp 3000 \mu\text{m}/\text{m}$

La fig. 3.3-36 permette di riconoscere una dipendenza dell'isteresi dalla lunghezza della griglia che è particolarmente accentuata nel caso di griglie corte.

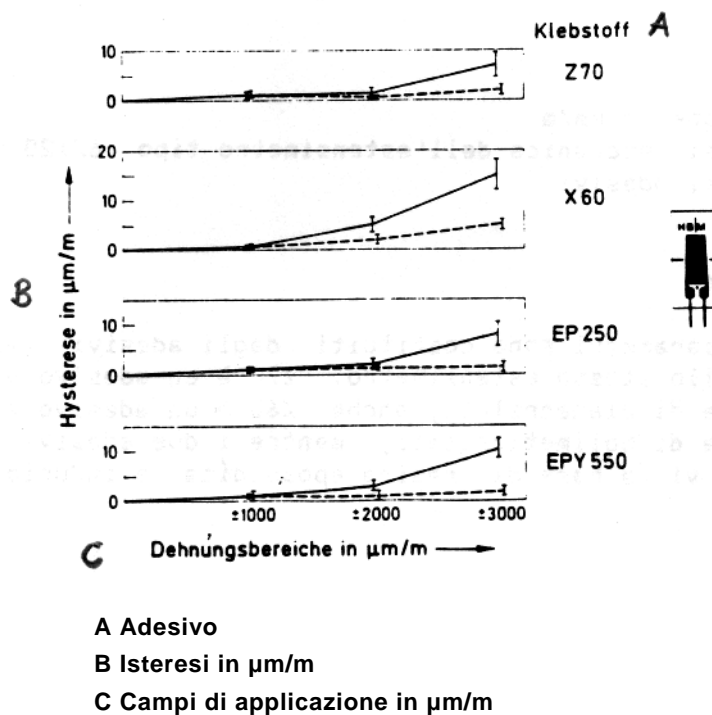


Figura 3.3-37: Isteresi meccanica dell'estensimetro tipo 6/120 LY 11, applicato con 4 diversi adesivi

Nella fig. 3.3-37 i parametri sono costituiti dagli adesivi impiegati per l'applicazione dello stesso estensimetro. Z70 è un adesivo a presa rapida a freddo a base di cianacrilato, anche X60 è un adesivo a presa rapida a freddo a base di polimetacrilato, mentre i due adesivi EP 250 ed EPY 550 sono adesivi a base di resina epossidica a indurimento a caldo.

L'esperimento, i cui risultati sono rappresentati in fig. 3.3-38, si differenzia solo per il tipo di estensimetro impiegato dall'esperimento precedente della fig.3.3-37. La notevole diminuzione dell'isteresi, in particolare nel campo di applicazione $\pm 3000 \mu\text{m}/\text{m}$, indica una forte influenza della costruzione dell'estensimetro.

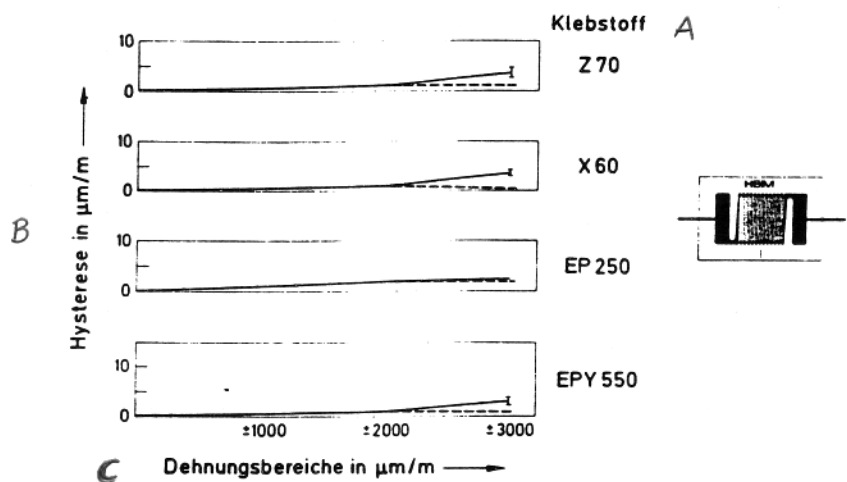


Figura 3.3-38: Isteresi meccanica dell'estensimetro tipo 6/120 LY 21, applicato con 4 diversi tipi di adesivo.

A Adesivo
 B Isteresi in $\mu\text{m}/\text{m}$
 C Campi di applicazione in $\mu\text{m}/\text{m}$

— Primo ciclo
 - - - Secondo ciclo
 ± : Deviazione standart s

3.4 Effetti ambientali

Gli effetti ambientali non agiscono solo sull'estensimetro ma sull'intero punto di misurazione. Uno studio isolato dell'estensimetro non è perciò sufficiente.

La stabilità (sicurezza dello zero) di un punto di misurazione con estensimetro dipende da numerosi fattori, fra i quali il fissaggio ineccepibile dello strumento, l'accurata preparazione e l'attenta protezione del punto di misurazione (par. 4 e [4.1]).

Anche gli antecedenti dell'estensimetro e della parte da esaminare possono influire. Una sollecitazione meccanica e termica della parte applicata prima della misurazione vera e propria permette di acquisire una preziosa stabilità. (È necessario specificare che le instabilità e gli errori non sono sempre causati dall'estensimetro o dal suo fissaggio; spesso ci sono altre cause responsabili o corresponsabili, p.e. errati collegamenti, protezione insufficiente, disturbi nell'alimentazione elettrica ecc.).

Le influenze più forti provengono naturalmente da fenomeni esterni. Più frequentemente si tratta di temperatura e umidità, ma anche altri fenomeni possono influenzare in modo negativo l'indicazione dell'estensimetro. Sono da considerare in questo caso pressione, vuoto, radiazione nucleare, campi magnetici ed elettrici.

In parte è possibile affrontare questi problemi scegliendo i materiali più opportuni, in parte essi si possono evitare o compensare per mezzo di misure adatte.

3.4.1 Temperatura

È difficile fornire una visione d'insieme degli effetti esercitati dalla temperatura sui punti di misurazione con estensimetri. Per questo motivo si preferisce rimandare ai singoli capitoli in cui si possono trovare informazioni più approfondite:

- 2.3.4: La deformazione termica longitudinale
- 3.2.3: Estensimetri speciali (anche estensimetri ad alta temperatura)
- 3.3.5: L'intervallo di temperature utilizzabile
- 3.3.4: La risposta alla temperatura di un punto di misurazione con estensimetro
- 3.3.5: La dipendenza dalla temperatura della sensibilità
- 3.3.8: Il carico elettrica
- 3.3.9: Il creep
- 7.1: Compensazione della risposta alla temperatura

3.4.2 Umidità

L'umidità è - accanto alla temperatura - una causa essenziale dei punti di misurazione instabili. Per esempio, soprattutto le variazioni di umidità durante una misurazione causano variazioni dello zero incontrollabili che, in particolare nelle misurazioni riferite allo zero, sono comprese nel risultato come errore e contribuiscono a volte anche a variazioni di sensibilità [3-36]. Il grado di influenza dipende dall'entità del salto di umidità e dal valore dell'umidità relativa.

Nel punto di misurazione l'umidità modifica la resistenza di isolamento fra estensimetro e oggetto e fra i percorsi del conduttore della griglia che agisce come derivazione variabile dell'estensimetro. Si hanno effetti particolarmente accentuati nel caso di leganti ceramici (p.e. applicazioni ad alta temperatura) a causa della loro alta igroscopicità. Inoltre le variazioni del contenuto di umidità fanno gonfiare o ritirare il supporto della griglia e l'adesivo. Infine anche il legante dell'adesivo può venire distrutto cosicché l'estensimetro può staccarsi del tutto o in parte dall'oggetto.

Una forte umidità può portare alla corrosione dell'estensimetro. Un campo di corrente continua fra griglia ed elemento strutturale può scatenare dei fenomeni di polarizzazione negli strati isolanti e rendere il punto di misurazione totalmente inutilizzabile. La presenza di altri elementi aggressivi, p.e. aria di mare, atmosfera industriale ecc., rafforzano l'effetto dell'umidità.

I disturbi dovuti all'umidità non sono limitati all'estensimetro. Anche i difetti di isolamento nei fili di misurazione e negli apparecchi collegati a valle causano degli errori e che devono perciò essere tenuti in considerazione. Però, anche se è utile conoscere la causa di un errore, è sempre meglio tentare di evitarlo. Per la produzione degli estensimetri vengono impiegati solo quei materiali che assorbono piccole quantità di umidità perchè purtroppo non ci sono materiali isolanti e adesivi che non ne assorbono assolutamente. È quindi necessario prendere le misure protettive più adeguate. Di quale tipo di misure si tratti, dipende dal mezzo che agisce (non solo umidità, ma anche acqua e altre sostanze), dalla precisione richiesta, dalla durata e dal punto di misurazione ecc. Per misurazioni di breve durata in un ambiente secco non è necessario ricorrere a misure eccezionali, mentre misurazioni di lunga durata all'aria aperta o sottacqua richiedono numerose protezioni. I dati sulla protezione del punto di misurazione si possono trovare nel par. 4.3 e in [4-1].

3.4.3 Pressione idrostatica

Dalla letteratura risulta che gli estensimetri sono stati sottoposti a pressioni idrostatiche oltre i 10 000 bar senza che le loro funzioni siano state compromesse. I risultati pubblicati indicano fondamentalmente una certa variazione della resistenza sensibile alla pressione che si sovrappone come errore al segnale della misurazione di deformazione. Tuttavia i dati non sono uniformi e ciò è dovuto in parte alla diversità delle condizioni sperimentali, ma soprattutto alle diverse strutture costruttive degli estensimetri. A ciò possono aver contribuito anche i diversi metodi di applicazione. Contrariamente alla maggior parte dei lavori che descrivono solo risultati empirici e sono difficilmente trasferibili ad altri casi di applicazione, in [3-37] vengono trattate a livello teorico le diverse grandezze influenti e vengono comprovati i loro effetti per mezzo di risultati sperimentali.

Ancor più che in altri casi di effetti ambientali, la correttezza dell'applicazione contribuisce al successo o all'insuccesso di una misurazione. Per questo motivo in seguito verranno fornite alcune importanti indicazioni.

Una premessa importante per avere risultati ineccepibili è un'accurata applicazione. In nessun altro caso la correttezza dell'applicazione ha una tale importanza sulla precisione dei risultati come nelle misurazioni sotto pressione idrostatica o sotto vuoto. I due diagrammi della fig. 3.4-1, ricavati da [3-38] lo dimostrano chiaramente. Il diagramma 3.4-1a mostra i risultati di un'applicazione non corretta, mentre per le misurazioni rappresentate nel diagramma 3.4-1b sono state rispettate tutte le misure necessarie in questo caso.

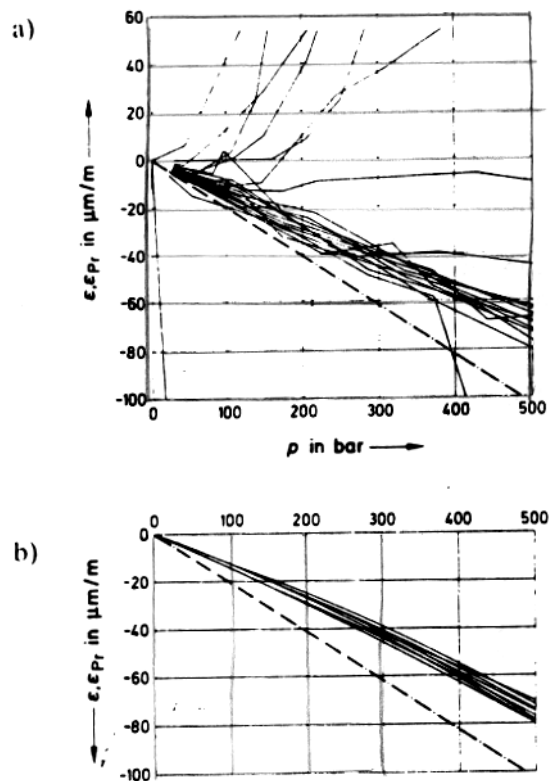


Figura 3.4-1: L'influenza della pressione idrostatica sull'indicazione degli estensimetri

- a) in caso di applicazione non corretta
- b) in caso di osservanza delle condizioni di applicazione necessarie per le misurazioni effettuate sotto pressione.

Come adesivi si possono utilizzare solo quelli che non contengono alcun solvente, che indurendosi non emettono sostanze gassose e si possono stendere in strati il più possibile sottili ma uniformi. Lo strato di adesivo deve essere assolutamente privo di bolle d'aria; anche quantità minime d'aria possono portare variazioni incontrollabili dello zero, a isteresi o addirittura alla rottura della griglia. Perciò negli adesivi a più componenti bisogna impedire, miscelando sotto vuoto o facendo il vuoto in seguito nella miscela, che si possa infiltrare la minima quantità d'aria.

Strati di adesivo a spessore irregolare si comprimono con forza diversa causando delle distorsioni nella griglia che si rispecchiano nell'indicazione. Un'alta pressione di contatto durante la fase di indurimento dell'adesivo permette di ottenere uno spessore dello strato uniforme. Nelle applicazioni i cui risultati sono rappresentati nel diagramma 3.4-1b sono state impiegate pressioni di contatto di 15 bar = 1,5 MPa, quelle delle applicazioni del diagramma 3.4-1a invece ammontano solo a 1 bar = 0,1 MPa. La differenza parla da sè.

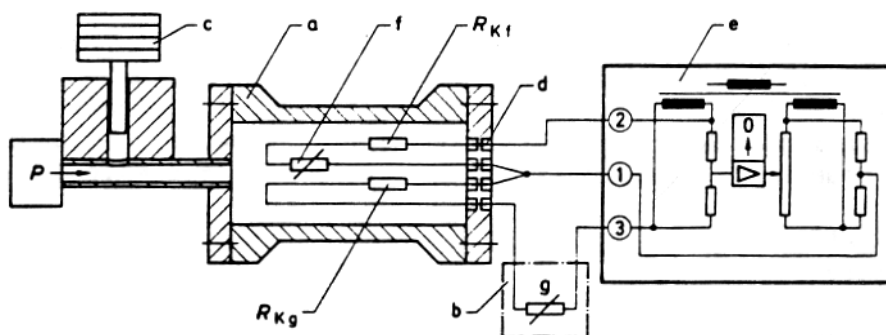
Mentre gli errori di applicazione possono essere evitati con un lavoro accurato, gli effetti di origine fisica permangono. Essi sono:

- l'effetto di resistenza piezoelettrica (coefficiente di pressione) del materiale della griglia di misurazione
- la compressibilità del materiale del supporto griglia e dell'adesivo e l'uniformità di spessore di quest'ultimo
- la struttura superficiale e il profilo dell'oggetto di misurazione (porosa o chiusa, piano o curvo)
- il modulo di elasticità e il coefficiente di Poisson del materiale dell'elemento. il valore

$$(2\nu - 1) \frac{1}{E}$$

Si possono verificare anche altri effetti parassiti:

- l'effetto di resistenza piezoelettrica del filo di collegamento nel recipiente in pressione
- effetti di risposta alla temperatura in seguito al riscaldamento adiabatico durante un incremento di pressione o al raffreddamento durante una caduta di pressione.



- a Serbatoio a pressione
- b Serbatoio dell'olio (aperto)
- c Manometro pistone con pompa P
- d Passaggi fili a tenuta stagna a pressione
- e Compensatore
- f Estensimetro di misura (attivo)
- g Estensimetro di compensazione
- R_{Kf} Resistenza filo in serie con estensimetro f
- R_{Kg} Resistenza filo in serie con estensimetro g

Figura 3.4-2: Modello sperimentale e collegamento per lo studio della sensibilità alla pressione degli estensimetri.

Il metodo corrente per lo studio della sensibilità alla pressione degli estensimetri è descritto in modo particolareggiato in [3-38]. Nella fig. 3.4-2 è raffigurato lo schema del dispositivo di misurazione utilizzato.

La fig. 3.4-3 mostra un provino con estensimetro applicato e il cilindro in pressione aperto della struttura sperimentale.

In seguito alla pressione idrostatica p esercitata su tutto il provino e alla compressibilità del suo materiale (isotropo) si origina sulla sua superficie una dilatazione negativa ϵ_{Pr} della grandezza

$$\epsilon_{Pr} = \frac{2\nu-1}{E} \cdot p. \quad (3.4-1)$$

Questa dilatazione impressa dal provino all'estensimetro è rappresentata come curva di riferimento a tratti e punti nei diagrammi della fig. 3.4-1. La differenza fra la curva di riferimento e i valori di misurazione è dovuta alla sensibilità alla pressione dell'applicazione dell'estensimetro. L'effetto è positivo. Effetti di disturbo sono stati compensati o corretti, a seconda del tipo.

Gli studi di [3-38] si sono estesi agli estensimetri citati nella tabella 3.4-1 e agli adesivi in diverse combinazioni.

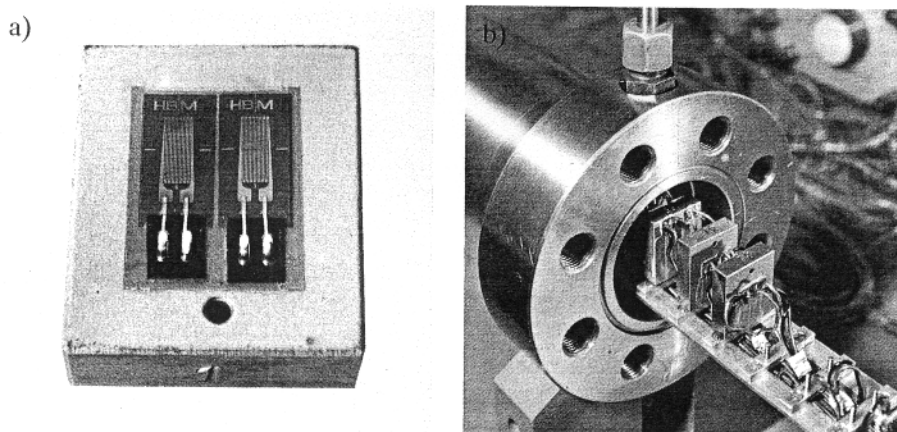


Figura 3.4-3: Provino per la misurazione della sensibilità alla pressione degli estensimetri

- a) Provino in acciaio dotato di estensimetro**
- b) Cilindro in pressione aperto con provino**

Dai tipi di estensimetro con "griglia a lamina" e con "griglia a filo" sono state scelte 2 famiglie caratteristiche e da queste di nuovo i tipi maggiormente richiesti. Essi sono stati combinati in modo funzionale con 3 diversi adesivi in modo da ottenere 17 accoppiamenti diversi. Di ogni coppia sono stati esaminati 8 campioni, per un totale di 136 campioni.

1 DMS-Art		2 Befestigungsmittel	3 Familie	4 Acrylharz-Schnellklebstoff X 60	5 Zyanacrylat-Schnellklebstoff Z 70	6 Epoxidharz-klebstoff (heißhärtend) EP 250
7	Folien-Meßgitter aus Konstantan	8	Polymidharz, Serie LY 11	3/120* 6/120	3/120 6/120	3/120 6/120
			9	Phenolharz m. Glasfaser, Serie LG 11	- -	3/120 6/120
10	Draht-Meßgitter aus Konstantan	11	Acrylharz m. Zellulosefaser, Serie LA 11	6/120 10/120	6/120 10/120	- -
			12	Phenolharz m. Zellulosefaser, Serie LP 11	6/120	6/120
13 sämtliche DMS-Typen sind selbst-temperaturkompensierend an Stahl. *3/120 bedeutet: 3 mm Meßgitterlänge/120 Ω Widerstand						

- 1 Tipo di estensimetro
 - 2 Mezzo di fissaggio
 - 3 Famiglia
 - 4 Adesivo a presa rapida X60 in resina acrilica
 - 5 Adesivo a presa rapida Z70 in cianacrilato
 - 6 Adesivo in resina epossidica EP250 (indurimento a caldo)
 - 7 Griglia a lamina in costantana
 - 8 Resina poliammidica
 - 9 Resina fenolica con fibra di vetro, serie LG 11
 - 10 Griglia a filo in costantana**
 - 11 Resina acrilica con fibra di cellulosa
 - 12 Resina fenolica con fibra di cellulosa serie LP 11
 - 13 Tutti i tipi di estensimetro sono ad autocompensazione della temperatura in acciaio
- *3/120 significa: 3 mm lunghezza della griglia/120 Ω resistenza

* Non più presente nel catalogo HBM.

Tabella 3.4-1: Le combinazioni estensimetro/adesivo di cui si è studiata la sensibilità alla pressione.

I provini levigati in acciaio sono stati resi ruvidi mediante sabbiatura, accuratamente puliti e sgrassati direttamente prima dell'applicazione dell'estensimetro. Per gli adesivi vale ciò che segue:

L'adesivo a presa rapida a due componenti X60 viene premuto con il pollice fino a raggiungere uno spessore di $65 \pm 15 \mu\text{m}$ e indurisce chimicamente entro 1 ora a temperatura ambiente.

L'adesivo a presa rapida a un componente Z70 viene applicato con uno spessore di $8 \pm 2 \mu\text{m}$ e indurisce chimicamente a pressione entro 1/2 minuto (misurabile dopo ca. 30 minuti).

L'adesivo a due componenti EP250 è stato indurito secondo il seguente programma: 1 h a 180°C sotto pressione di contatto meccanica di 15 bar più 1 h a 180°C senza pressione di contatto. Lo spessore così ottenuto è di $20 \pm 5 \mu\text{m}$.

Per il collegamento dell'estensimetro sono stati usati cavetti in rame con una sezione di 0,25 mm². Tutti i collegamenti sono stati saldati.

L'olio isolante impiegato come mezzo di pressione ha reso superfluo l'uso di una copertura di protezione aggiuntiva dell'estensimetro.

Per la misurazione della deformazione sono stati impiegati compensatori del tipo MK, che funzionano con il procedimento a frequenza portante. La tensione di alimentazione era di 1V/225 Hz, la risoluzione di 1µm/m.

I risultati sono riassunti nella tabella 3.4-2. I valori di misurazione sono + 7,4 µm/m ogni 100 bar per gli estensimetri a lamine e + 5,5 µm/m ogni 100 bar per quelli a filo. Le influenze della lunghezza della griglia e degli adesivi sono relativamente basse. Esse ammontano solo a ± 0,8 µm/m ogni 100 bar per gli estensimetri a lamina e a ca. ±1,3 µm/m ogni 100 bar per quelli a filo e corrispondono così ca. alla deviazione standard *s* delle single sequenze di misurazione.

Dehnungsmcßstreifen 1			ϵ_p in $\frac{\mu m}{m}$ / 100 bar $\pm s$ wenn geklebt mit 2		
Art 3	Familie 4	Typ 5	X 60	Z 70	EP 250
Folien-Meßgitter 6	LY 11	3/120	6,6 ± 1.2	7,9 ± 1,0	8,1 ± 1,0
		6/120	7,3 ± 1,0	8,1 ± 1,0	8,2 ± 0,4
	LG 11	3/120	–	7,0 ± 1,5	5,7 ± 1,0
		6/120	–	7,9 ± 1,0	6,8 ± 0,6
Draht-Meßgitter 7	LA 11	6/120	5,7 ± 0,8	6,5 ± 1,1	–
		10/120	4,0 ± 0,8	5,1 ± 1,6	–
	LP 11	6/120	5,6 ± 0,7	5,3 ± 1,0	5,9 ± 0,6

- 1 Estensimetro
- 2 $\epsilon_p \dots \pm s$ se applicato con
- 3 Genere
- 4 Famiglia
- 5 Tipo
- 6 Estensimetri a lamina
- 7 Estensimetri a filo (Non più presenti nel catalogo HBM.)

Tabella 3.4-2: L'influenza della pressione idrostatica sulle applicazioni di estensimetri esaminate in µm/m ogni 100 bar inclusa la deviazione standard *s*, valida per il campo di pressione esaminato da 0 a 500 bar.

Nella superfici di applicazione curve si forma, in seguito alla maggiore compressibilità degli strati adesivo/supporto griglia, una deformazione supplementare $\Delta\epsilon_p$ della griglia che non si verifica sulle superfici piane. (L'effetto è simile all'effetto di risposta alla temperatura sulle superfici curve descritto nel par. 3.3-4).

Nel diagramma della fig. 3.4-4 tratto da [3-37] è espressa per i due strati $d = 0,05$ e $0,1$ mm per adesivo più supporto griglia una variazione di deformazione sensibile alla pressione $\Delta\varepsilon_p$. Alla base del calcolo ci sono i seguenti dati:

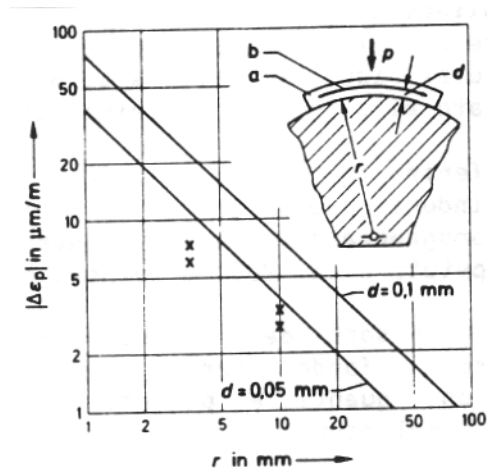
Modulo E per adesivo e supporto griglia ≈ 10000 N/mm²

Coefficiente di Poisson $\nu = 0,32$

Pressione $p = 100$ bar (10 MPa)

Variazione del raggio dell'elemento $\Delta r = 0$

Il segno diventa negativo per una curvatura convessa e positivo per una curvatura concava.



a Estensimetro b Griglia di misurazione
d Spessore strato adesivo più supporto griglia

===== Valore calcolato

xxx Valore misurato

Ulteriori spiegazioni nel testo.

Figura 3.4-4: Lo spostamento dello zero $\Delta\varepsilon_p$ causato dalla pressione idrostatica p con l'applicazione dell'estensimetro a una superficie curva (secondo [3-37]).

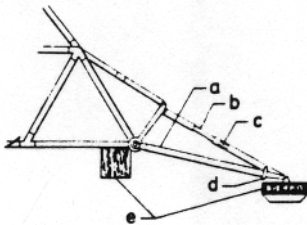
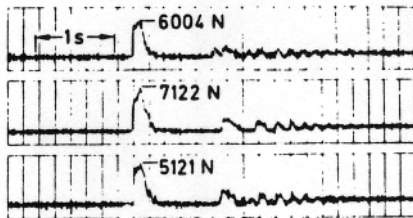
Un'influenza della pressione idrostatica sulla sensibilità dell'estensimetro (il fattore k) non si è potuto finora riscontrare. La dispersione dei valori di misurazione rientrava nell'incertezza di misurazione $\pm 0,5$ % dell'apparecchiatura di misurazione impiegata.

3.4.4 Il vuoto

Uno degli esempi più spettacolari della funzionalità degli estensimetri nel vuoto è stato il loro impiego sulla sonda lunare "Surveyor I" per la misurazione dell'urto al momento dell'allunaggio (fig. 3.4-5). Le misurazioni effettuate in questa circostanza dimostrano fondamentalmente l'applicabilità degli estensimetri in condizioni di ultravacuo [3-39].

Altri esempi di misurazioni sotto alto vuoto sono descritti in [3-40, 3-41].

Quando si ha a disposizione l'illimitata capacità di pompaggio dello spazio, la perdita di gas dei materiali (estensimetro, adesivi, mezzi di copertura, materiali isolanti ecc.) non causa alcun problema. Diverse sono le condizioni in un sistema chiuso, dove la condizione di vuoto peggiora a causa dell'emissione di gas dai materiali. Vuoti di 10^{-7} si possono ancora controllare bene, mentre è più difficile la situazione in caso di ultravuoti, in cui con la perdita di gas e il desorbimento non solo si distrugge il vuoto stesso, ma anche importanti parti della strumentazione sperimentale possono essere contaminate e compromesse nelle loro funzioni. Gli specialisti del vuoto conoscono questi problemi; essi sanno che anche una semplice impronta digitale può avere conseguenze catastrofiche per l'apparecchiatura.



- a Gamba di atterraggio
- b Ammortizzatore
- c Estensimetro
- d Ugello di livellamento
- e Respingente

Figura 3.4-5: Tracciato dell'urto di allunaggio della sonda lunare "Surveyor I" (1966).

Nell'applicare l'estensimetro si devono osservare i seguenti punti: gli estensimetri con supporti in poliammide pura o in pura resina epossidica sono da preferire, eventualmente del tipo a griglia aperta. I supporti di resina fenolica hanno dato buoni risultati nello spazio. Il supporto della griglia deve essere tagliato alla lunghezza minima consentita.

Anche come adesivi sono da preferire le resine pure. Se è possibile è meglio utilizzare adesivi che induriscono a caldo. Essi devono essere totalmente induriti; si usi il programma di indurimento massimo seguito da un prolungato indurimento ripetuto a ca. 200°C , se possibile.

Per il cablaggio dell'estensimetro sono da preferire fili robusti. L'isolamento deve essere pulito a fondo. Per evitare di lasciare impronte è meglio lavorare con guanti e pinzette. E' necessaria un'accurata pulitura dei punti di saldatura.

Materiale	Condizione	49 Tasso di fuoriuscita di gas in mbar 1/ (s · cm ²) dopo		
		1 hora	10 hore	100 hore
Alluminio		$1,7 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^{-9}$
"	450°C	$1,3 \cdot 10^{-6}$		
"	anodizzato		$1 \cdot 10^{-7}$	
Al-6061-T6			$2,5 \cdot 10^{-9}$	
"	200°C		$4,5 \cdot 10^{-9}$	
"	riscaldato completamente per 13,5 ore a 200 °C		$3,7 \cdot 10^{-10}$	
"	300°C		$1,4 \cdot 10^{-8}$	
"	riscaldato completamente per 13 ore a 300 °C		$1,6 \cdot 10^{-10}$	
Rame		$2,3 \cdot 10^{-6}$		
"	450°C	$1,6 \cdot 10^{-6}$		
"	Sgrassato a 450°C	$1,4 \cdot 10^{-6}$		
Molibdeno		$7 \cdot 10^{-7}$		
Nickel		$6 \cdot 10^{-7}$		
Argento		$6 \cdot 10^{-7}$		
Acciaio		$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$	
"	Pallinato		$6 \cdot 10^{-6}$	
"	200°C		$8,6 \cdot 10^{-9}$	
"	400°C		$8,4 \cdot 10^{-9}$	
"	riscaldato completamente per 15 ore a 200 °C			$4,3 \cdot 10^{-11}$
"	riscaldato completamente per 15 ore a 400 °C		$1,2 \cdot 10^{-11}$	
"	450°C	$4,2 \cdot 10^{-7}$		
"	Sgrassato a 450°C	$3,6 \cdot 10^{-7}$		
Acciaio inox		$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-8}$	
"	Sgrassato	$3 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$9 \cdot 10^{-11}$
"	Levigato, sgrassato a vapore		$1,4 \cdot 10^{-9}$	
"	400°C	$7,6 \cdot 10^{-10}$ dopo 3,5 h		$1,1 \cdot 10^{-10}$ dopo 167 h
"	400°C, riscaldato completamente per 24 ore a 200 °C		$1,5 \cdot 10^{-10}$ dopo 22 h	
"	400°C, riscaldato completamente per 12 ore a 400 °C		$9,3 \cdot 10^{-13}$	
Acciaio cromato	Levigato, sgrassato a vapore	$1 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-10}$	
Acciaio nichelato	Levigato, sgrassato a vapore	$5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-9}$	
Tantalo		$9 \cdot 10^{-7}$		
Volframio		$2 \cdot 10^{-7}$		
Zircone		$1,3 \cdot 10^{-6}$		
Araldite D			$1 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-7}$
KEL-F				
(PTFE-Fett)		$4 \cdot 10^{-8}$		
Teflon (PTFE)	Come fornito	$5 \cdot 10^{-6}$		
"		$4,6 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-8}$
Milar	Degassato	$2 \cdot 10^{-7}$		
"	Come fornito	$3 \cdot 10^{-6}$		
Ilyton		$1,2 \cdot 10^{-5}$		
Plexiglas	Degassato	$1 \cdot 10^{-6}$		
Polietilene		$2,6 \cdot 10^{-7}$		
Polivinilcloruro			$8 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$
"	Come fornito	$9 \cdot 10^{-7}$		
Gomma butilica		$1,5 \cdot 10^{-6}$		
Neoprene		$3 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	
"	Come fornito	$2 \cdot 10^{-4}$		
Gomma siliconica	Come fornito	$3 \cdot 10^{-5}$		
Porcellana	Smaltato	$6,5 \cdot 10^{-7}$		
Steatite		$9 \cdot 10^{-8}$		

Tabella 3.4-3: Tassi di perdita di gas di diversi sostanze in vuoto (da [3-41]).

L'assorbimento di umidità inevitabile durante questi lavori si può evitare tramite il riscaldamento o il deposito in un siccativo (p.e. Silica Gel) o in un essiccatoio con pentossido di fosforo. In questo modo si evita la fuoriuscita di gas nel vuoto e si stabilizza lo zero del punto di misurazione. La tabella 3.4-3 (estratta da [3-41]) contiene i tassi di perdita di gas di numerose sostanze, in parte dopo pretrattamento e per intervalli di tempo diversi.

3.4.5 Radiazione ad alto contenuto energetico (radiazione ionizzante)

Il concetto di "radiazione ad alto contenuto energetico" comprende le radiazioni corpuscolari ed elettromagnetiche. Grazie alla loro energia esse sono in grado di scindere gli elettroni dalla materia in cui vengono assorbite. Gli atomi originariamente a carica elettrica neutrale si caricano così positivamente e diventano ioni. Per questo motivo si parla anche di "radiazione ionizzante". Il numero delle coppie di ioni così formate aumenta con l'intensità della radiazione (tasso della dose).

Per l'assorbimento della radiazione energetica sono decisivi la composizione atomica e la densità del mezzo assorbente.

A questo gruppo di radiazioni appartengono le radiazioni α , β e γ , le radiazioni Roentgen (raggi X) e quelle protoniche e neutroniche.

L'energia radiante viene di norma indicata in milioni di voltelettroni (MeV). Con un elettronvolt (eV) si intende l'energia che un elettrone raggiunge percorrendo una differenza di potenziale di tensione di 1 Volt.

$$1\text{MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Nm} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Ws} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J.}$$

La radiazione α è una radiazione di corpuscoli costituita da atomi di elio veloci. Essa ha origine dalla disintegrazione (naturale) del nucleo. La sua profondità di penetrazione nei solidi raggiunge alcuni μm . A questo livello essa viene frenata ed emette una radiazione γ secondaria. La particella α cattura due elettroni dall'ambiente circostante e forma un atomo di elio stabile.

Anche la radiazione β è corpuscolare ed è formata da elettroni veloci. Essa penetra più in profondità nei solidi (fino ad alcuni mm) ed emette durante il decadimento una radiazione γ secondaria.

Radiazioni γ e Roentgen (radiazione X) hanno le caratteristiche delle onde elettromagnetiche. Esse si differenziano tramite le loro lunghezze d'onda (radiazioni γ ad onda corta, radiazioni Roentgen a onda lunga). La radiazione γ ha origine sia dalla fissione nucleare nel reattore, sia dalla disintegrazione nucleare delle sostanze radioattive. Essa può penetrare in profondità nella materia. A causa del percorso limitato delle particelle α e β , la radiazione γ sarà il tipo di radiazione principale che si verifica al di fuori di un reattore. Così come la radiazione α o β , quella γ non porta ad una radioattività artificiale delle sostanze irradiate.

La radiazione di neutroni è una radiazione corpuscolare senza carica elettrica (componenti neutri dei nuclei atomici). Essa ha origine dalla fissione nucleare nel reattore. Questo tipo di radiazione genera una radioattività artificiale nelle materie irradiate. I neutroni veloci e termici possono venire catturati da ogni nucleo atomico a causa della mancanza di carica elettrica. In questo modo cresce il loro numero di massa e si forma un isotopo dell'elemento inizialmente stabile che può essere instabile e si disintegra emettendo radiazioni α , β e γ radioattive.

I protoni sono nuclei di idrogeno con carica positiva. A causa della loro massa maggiore del fattore 10^3 , i protoni e le particelle α possiedono una densità di ionizzazione essenzialmente superiore rispetto agli elettroni e conseguentemente compiono un percorso più limitato a parità di energia cinetica.

Di tutti i tipi di radiazioni nucleari solo quella di neutroni e la radiazione gamma possono penetrare per più di alcuni centimetri nei solidi. Questi tipi di radiazione formano quindi il campo di radiazione intorno e nel reattore nucleare. È attraverso questi due tipi di radiazione però che anche tutte le altre si scatenano nei materiali colpiti ed è principalmente questa radiazione secondaria a breve percorso che provoca danni.

Il meccanismo del danneggiamento da radiazioni si può spiegare come segue: durante la penetrazione di un materiale una radiazione di particelle trasmette un'energia agli elettroni e ai nuclei dei singoli atomi che è grande abbastanza da rompere il legame degli atomi nella struttura molecolare. I frammenti così ottenuti reagiscono chimicamente fra loro e formano composti diversi da quelli originari. La concentrazione di questi composti inquinanti aumenta con l'energia e la dose di radiazioni e ha come conseguenza variazioni più o meno accentuate delle caratteristiche del materiale.

Le particelle che colpiscono i nuclei atomici causano danni permanenti. Se invece vengono colpiti degli elettroni si ha come conseguenza:

- a) nei metalli uno sviluppo di calore senza danni essenziali. Si può osservare un incrudimento a freddo del materiale che provoca una diminuzione della deformabilità.
- b) nei materiali artificiali una trasformazione chimica irreversibile e quindi danni permanenti.

Durante la radiazione di un punto di misurazione con estensimetro è stata inoltre osservata una corrosione causata da ossido di azoto, ozono e vapore acqueo. Anche altri gas che si formano dall'aria in seguito alla radiazione sono da considerare fra le cause. Se il contenitore dei campioni fosse stato lavato con elio secco, si sarebbe potuta evitare la corrosione dei composti elettrici causata dall'azoto.

Si sono rilevate differenze catastrofiche nella resistenza di isolamento dell'estensimetro applicato e nei fili di collegamento quando la pulizia con di elio è stato escluso in un test successivo. La resistenza iniziale di $2000 \text{ M}\Omega$ è diminuita nel corso di 30 giorni fino a raggiungere $3 \text{ k}\Omega$. Dopo che la pulizia ad elio è stata reinserita la resistenza di isolamento è risalita in 12 ore a $1000 \text{ M}\Omega$ [3-27].

3.4.5.1 L'effetto della radiazione ionizzante sui punti di misurazione con estensimetro

È difficile fornire dati concreti su questo tema. Le fonti accessibili all'autore riferiscono generalmente di singole osservazioni valide per casi specifici ma limitatamente generalizzabili. Le seguenti informazioni devono essere viste sotto questa luce.

L'influenza della radiazione ionizzante può essere suddivisa in 4 gruppi:

1. l'influenza sul materiale della griglia,
2. l'influenza sul supporto della griglia,
3. l'influenza sul mezzo di applicazione (adesivo),
4. l'influenza sui mezzi di collegamento (punti di saldatura, cavi ecc.).

A) All'influenza delle radiazioni contribuiscono:

a) da parte della radiazione: la dose, la densità di flusso, l'energia (cioè lo spettro energetico), il tipo di radiazione.

b) da parte del materiale: la disposizione molecolare, la geometria, la grandezza delle molecole, il peso molecolare, le dimensioni, il volume, lo spessore e la densità.

B) I materiali di cui sotto sono ordinati in ordine decrescente sulla base della loro resistenza alle radiazioni:

metalli, ceramica, semiconduttori, materie plastiche.

L'effetto di una radiazione nucleare sui componenti un punto di misura con estensimetri ne causa il danneggiamento. Con danno da radiazione si intende la variazione delle caratteristiche fisiche e composizione chimica del materiale.

a) In conseguenza di una radiazione i metalli presentano una variazione della loro resistenza elettrica. Fra i metalli impiegati per gli estensimetri si sono rivelate relativamente stabili le leghe Cu/Ni 45/55 ("costantana") e Pt/W 90/10, mentre la lega Cr/Ni 80/20 ("nicromo V") ha variato di parecchi punti percentuali la sua resistenza.

b) Fra i materiali semiconduttori il silicio normalmente utilizzato negli estensimetri ha mostrato una variazione di resistenza relativamente grande.

Esempio:

Variazione di resistenza dopo una dose di radiazioni di:

$$\begin{aligned} 3,5 \cdot 10^{15} \text{ n/cm}^2 \text{ (} E \geq 4,8 \cdot 10^{13} \text{ J = 3 MeV)}: &+ 25\%, \\ 4 \cdot 10^{16} \text{ n/cm}^2 \text{ (} E \geq 4,8 \cdot 10^{13} \text{ J = 3 MeV)}: &+ 86\%. \end{aligned}$$

c) I materiali del supporto griglia e gli adesivi sono composti di sostanze organiche. Esse degenerano in diversi modi se sottoposte a radiazioni.

Per quanto riguarda la resistenza alle radiazioni delle materie plastiche si ha la sequenza:

poliammide, resina fenolica, resina poliestere, resina siliconica a fibra di vetro rinforzata, resina epossidica, polietilene, cellulosa, silicone, teflon.

A volte al termine della radiazione si osserva un riassetamento parziale del materiale in funzione del tempo. I danni sono dovuti alla ionizzazione del materiale isolante che va di pari passo con la radiazione. In questo modo la capacità isolante di questi materiali va più o meno perduta con tutte le relative conseguenze per la misurazione. La ionizzazione torna a scomparire al termine della radiazione quando è conclusa la ricombinazione della struttura molecolare.

Possiedono una buona resistenza alle radiazioni i leganti puri applicati a fiamma (Al_2O_3 purissimo); anche i mastici ceramici sono utilizzabili. Per questo motivo gli estensimetri a griglia libera (cioè senza supporto) che vengono applicati con leganti ceramici sono più adatti di quelli normali in presenza di radiazioni.

Esempio:

Un estensimetro fissato con mastice ceramico con griglia in costantana presentava in una radiazione neutronica di $10^{13} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ una deriva media di $2 \mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ per un intervallo di tempo di 150 ore.

C) Conseguenze della radiazione sul punto di misurazione con estensimetro:

a) Il legame fra estensimetro ed elemento strutturale viene danneggiato o distrutto. Per quanto riguarda la resistenza alle radiazioni dei leganti si ha la seguente classifica: leganti ceramici, adesivi organici a indurimento a caldo, adesivi a freddo.

b) La resistenza di isolamento del supporto griglia, dell'adesivo e dell'involucro dei cavi si abbassa. Le variazioni di resistenza nell'estensimetro si possono in parte compensare tramite disposizioni a semiponte o a ponte. Hanno fornito buoni risultati gli estensimetri saldabili in versione a ponte completo con legame ceramico della griglia sul supporto saldabile.

c) Nelle vicinanze dei cordoni di saldatura si verifica una ionizzazione particolarmente intensa. Ulteriori effetti dannosi sono da attendere da parte dei residui di fondente. Bisognerebbe eseguire esclusivamente collegamenti saldati.

d) Nel circuito collegamento possono circolare correnti vaganti in seguito alla ionizzazione.

e) La resistenza e il fattore k dell'estensimetro variano.

Sommario

Per le misurazioni con estensimetri sotto un effetto radiante si raccomandano:

a) Estensimetri a griglia libera con griglie in costantana o in lega Pt-W 1200 (p.e. serie LF 30*);

b) il fissaggio con ceramica applicata a fiamma o con mastice ceramico (p.e. CR 760*),
oppure estensimetri saldabili;

c) collegamenti di linea saldati a punti;

d) isolamenti di linea ceramici;

e) a seconda delle possibilità disposizioni a ponte o a semiponte.

Letteratura [3-42]

* Non più nel catalogo dei prodotti HBM.

D) Alcune informazioni sull'influenza della radiazione ionizzante.

a) La resistenza alle radiazioni di alcune materie plastiche

La dose critica per le materie plastiche è di ca. $10^4 \dots 10^5$ J/kg. La loro resistenza si può aumentare con cariche (p.e. ossidi di metallo e minerali).

<u>Materia sintetica</u>	<u>Dose critica [J/kg]</u>
PVC	$10^5 \dots 10^6$
<u>Vinile</u>	$10^4 \dots 10^5$
<u>Resina fenolica-cemento</u> (adesivo BC 6035)	10^3
Teflon	10^2
<u>Adesivo di cellulosa (Duco)</u>	10
<u>Resina siliconica con asbesto</u>	$1 \dots 2 \cdot 10^6$
<u>Resina epossidica con</u> <u>ossido di metallo</u>	$10^5 \dots 10^6$

Tabella 3.4-4: Dose critica di radiazioni per alcuni materiali sintetici

Osservazioni:

Per le dosi energetiche delle radiazioni si possono trovare i dati più disparati. Per quanto riguarda il loro effetto possono essere ritenuti quasi equivalenti:

1 J/kg (Joule per chilogrammo) (unità SI)

$1 \cdot 10^2$ rad (Radation absorbed dose)

$1 \cdot 10^4$ erg/g (Erg per grammo)

$1,2 \cdot 10^2$ r (Roentgen)

$1 \cdot 10^{12}$ neutroni termici/cm²

$2,8 \cdot 10^{10}$ neutroni veloci/cm²

$1,4 \cdot 10^{11}$ fotoni gamma/cm²

$5,2 \cdot 10^9$ elettroni/cm²

b) Gli effetti di una radiazione gamma sui diversi componenti di un punto di misurazione con estensimetro sono riportati nella tabella 3.-5.

Denominazione	Dose di radiazioni Ψ [J/kg)
1. Estensimetri	
1.1 Estensimetri aperti con griglia in costantana	1 · 10 ⁶ viene considerata come limite di impiego sicuro 4 · 10 ⁶ possibile guasto nell'estensimetro
1.2 Estensimetri con griglia in costantana incapsulata	2 fino a 4·10 ⁶ campo di impiego sicuro 6 · 10 ⁶ possibile guasto nell'estensimetro
2. Materiale della supporto griglia	
2.1 Resina epossidica, griglia aperta	4 · 10 ⁶ limite massimo per sicurezza di lavoro
2.2 Poliammide	10 ⁹ senza perdita di isolamento o danno fisico
2.3 Resina epossidica a fibra di vetro rinforzata, griglia incapsulata	5 · 10 ⁴ campo di impiego sicuro
2.4 Resina fenolica a fibra di vetro rinforzata, griglia incapsulata	3 fino a 4·10 ⁵ dose massima 6 · 10 ⁶ dose massima
3. Leghe della griglia	
3.1 Costantana, griglia aperta	1 · 10 ⁶ campo di impiego sicuro 4 · 10 ⁶ possibile guasto nell'estensimetro
3.2 Costantana, incapsulata	2 fino a 4·10 ⁶ campo di impiego sicuro 6 · 10 ⁶ dose massima
3.3 Carma, incapsulata	5 · 10 ⁴ campo di impiego sicuro 4 · 10 ⁶ inizio indurimento
4. Adesivi	
4.1 Adesivo in resina epossidica	6 · 10 ⁶ dose massima
5. Mezzi di dcopertura dell'estensimetro	
5.1 Gomma siliconica	4 · 10 ⁶ rafforzarsi 6 · 10 ⁶ completamente dura, il legame con l'oggetto si può sciogliere
6. Isolamento	
6.1 Teflon (PTFE)	1 · 10 ⁴ campo sicuro 1 · 10 ⁵ limite superiore 2 · 10 ⁵ formazione di incrinature
6.2 Cloruro di polivinile (PVC)	8 · 10 ⁵ campo sicuro 1 · 10 ⁶ il PVC bianco diventa scuro 6 · 10 ⁶ dose massima
6.2 Rete di fibra di vetro	5 · 10 ⁴ campo sicuro 4 · 10 ⁵ limite superiore
7. Saldature	
7.1 Saldatura stagno-piombo	2 · 10 ⁵ limite superiore
7.2 Pasta saldante a base d'argento	5 · 10 ⁴ campo normale 3 fino a 4·10 ⁵ limite superiore
7.3 Saldatura a punti o a gas	6 · 10 ⁶ quasi limite superiore

Tabella 3.4-5: Resistenza dei componenti di un punto di misurazione con estensimetro contro radiazioni gamma.

3.4.6 Campi magnetici

Durante le misurazioni con estensimetri in campi magnetici si verificano 4 effetti:

- la magnetostrizione dell'oggetto a cui è applicato l'oggetto
- la magnetostrizione del materiale della griglia dell'estensimetro
- l'effetto di resistenza magnetica del materiale della griglia
- tensioni elettriche indotte nell'estensimetro (specialmente nel suo cablaggio) per mezzo di campi magnetici pulsanti o variabili.

La magnetostrizione causa, nei materiali ferromagnetici esposti a campi magnetici, delle variazioni di dimensione che vengono percepite e indicate dall'estensimetro applicato.

Se l'estensimetro stesso è soggetto alla magnetostrizione si avranno delle indicazioni sbagliate. Questo effetto si verifica solo in caso di materiali della griglia paramagnetici.

L'effetto di resistenza magnetica è la variazione di resistenza di un conduttore elettrico causata da un campo magnetico. Questo effetto viene osservato in quasi tutti i materiali conduttori ferromagnetici ed è stato oggetto di diversi studi con estensimetri. Soprattutto nella lega ferromagnetica ancora utilizzata in America "Isoelastic" questo effetto è particolarmente forte.

Alla lega rame-nichel ("costantana") usata in Germania in prevalenza per la produzione di estensimetri viene attribuita da parte di molti autori una insensibilità o almeno una bassa sensibilità. Le differenze nel giudizio possono essere giustificate sulla base delle differenze fra le leghe di costantana utilizzate dai diversi produttori e fra le forze dei campi magnetici nei quali questi estensimetri sono stati esaminati. In [3-43] vengono descritti gli esperimenti con campi magnetici dell'acceleratore di protoni "Bevatron" di Berkley con densità di flusso fino a 2 Tesla (= 20000 Gauss).

Negli estensimetri con griglie in costantana e il lega Pt/W 90/10 non si riscontrato è alcun effetto del campo magnetico.

È difficile trarre delle conclusioni definitive dalle informazioni disponibili poichè i risultati non sono univoci. Ciò può essere dovuto alle diverse condizioni sperimentali, alle apparecchiature di misurazione descritte in modo insufficiente o anche all'impossibilità di separare i fenomeni citati all'inizio nei loro effetti.

In [3-44] si parla di studi con estensimetri nel campo del sincrotrone Saturno. Il campo magnetico con una densità di flusso di 1,5 T (15000 Gauss) si genera in 0,8 secondi e scompare nello stesso periodo di tempo. Il ciclo si ripete ogni 3,2 secondi. Gli estensimetri esaminati provengono da due fonti non citate. Per escludere la magnetostrizione dell'elemento strutturale gli estensimetri sono stati fissati a materiali non magnetici (rame, plexiglas ecc.). La direzione della griglia dell'estensimetro era in parte parallela e in parte perpendicolare alla direzione di flusso magnetico. Gli estensimetri sono stati collegati in parte con una disposizione a quarto di ponte, in parte con una disposizione a mezzo ponte, quest'ultima per determinare il grado della compensazione. L'alimentazione era a corrente continua, la polarità è stata scambiata durante l'esperimento per separare il segnale magnetico dall'altra indicazione. Il livello di disturbo non ha superato i 7 $\mu\text{m/m}$. La tabella 3.4-6 contiene i valori di misurazione.

DMS Lieferant 1	DMS-Anordnung und Meßgitterrichtung zur Flußrichtung 2	magnetische Flußdichte in Tesla 3					
		0,26	0,6	1	1,4	1,6	2
		Nullpunktverschiebung in µm/m 4					
1	1DMS I	8	70	95	110	130	185
	1DMS II	4	12	18	22	28	35
	2DMS I	Kompenstation 5					5
	2DMS II	Kompenstation 5					5
2	1DMS I	2	8	10	12	16	20
	1DMS II	5	8	10	12	15	20
	2DMS I	Kompenstation					3
	2DMS II	Kompenstation					3

1 Fornitore dell'estensimetro

2 Disposizione dell'estensimetro e direzione della griglia rispetto alla direzione di flusso

3 Densità di flusso magnetico in Tesla

4 Spostamento dello zero in µm/m

5 Compensazione

Tabella 3.4-6: Spostamento dello zero dell'estensimetro in un campo magnetico statico (secondo [3-44]).

Ulteriori fonti [3-45 fino a 3-48].

Negli estensimetri semiconduttori l'entità dell'effetto di resistenza magnetica dipende dalla mobilità del portatore di carica. Essa viene descritta dall'equazione:

$$R = R_0 (1 + \beta^2 B^2) \quad (3.4-2)$$

R resistenza elettrica

R₀ resistenza senza influenza magnetica

β mobilità dei portatori di carica

B densità di flusso magnetico (Induzione)

Campi magnetici pulsanti o variabili inducono nei conduttori elettrici delle tensioni elettriche che si sovrappongono come errore al segnale di misurazione. Per evitarli vengono impiegati estensimetri in parte non induttivi (cioè con semigriglie avvolte in senso contrapposto) o quelli schermati magneticamente con lamine o cappe in mumetal. Per il cablaggio sono utilizzati cavi schermati magneticamente e/o intrecciati in modo non induttivo. Particolari vantaggio sono offerti in questi casi dagli amplificatori di misurazione a frequenza portante. Contrariamente agli amplificatori a corrente continua essi eliminano tutte le tensioni con frequenze oltre la banda di trasmissione (par. 5.3).

Nella routine giornaliera il tecnico di misurazione non avrà molte occasioni di confrontarsi con campi magnetici così potenti. La tabella 3.4-7 permette una valutazione approssimativa dell'intensità dei campi magnetici (secondo [3-48]).

L'intensità di campo magnetico *H* in prossimità del conduttore si calcola dall'equazione:

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (3.4-3)$$

I = corrente

r = raggio

Flußdichte B in Millitesla [mT] 1	Ursprungs-Beispiel 2
niedrig (≤ 2) 3	Leistungstransformatoren. Fluoreszenzlampen und Starkstromkabel in ca. 1 m Abstand; Lötpistolen in 2 ... 4 m Abstand; Elektromotoren. 4
mittel (2 ... 50) 5	Alle vorgenannten Gegenstände, näher als 1 m; Lötpistolen 15 cm ... 2 m; Sammelschienen, Kabel, Anschlüsse usw. die einen Strom von ≥ 5000 A führen in 3 ... 15 m Abstand, bei 1000 A bis 2 m Abstand 6
hoch (50 ... 3200) 7	Schütteltische innerhalb 3 m. Elektromotoren in unmittelbarer Nähe, Generatoren 8

- 1 Densità di flusso B in millitesla [mT]
- 2 Esempio originario
- 3 bassa (≤ 2)
- 4 Trasformatori di potenza, lampade fluorescenti e cavi di corrente forte a una distanza di ca. 1 m; pistole di saldatura a 2 ... 4 m di distanza; elettromotori
- 5 media (2...50)
- 6 Tutti gli oggetti succitati a meno di 1 m di distanza, pistole di saldatura a 15 cm ... 2 m; sbarre collettrici, cavi, collegamenti ecc. che conducono una corrente di ≥ 5000 A entro una distanza di 3 ... 15 m e di 1000 A entro una distanza di 2 m
- 7 alta (50 ... 3200)
- 8 Tavole vibranti entro 3 m. Elettromotori vicini, generatori

Tabella 3.4-7: Densità di flusso (intensità) di campi magnetici (secondo [3-48]).

La densità di flusso magnetica (induzione) B ammonta a:

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H. \quad (3.4--4)$$

μ = Permeabilità del materiale dell'oggetto di misurazione

μ_0 = Permeabilità del vuoto

H = Intensità di campo magnetico

Il flusso magnetico scorre in direzione perimetrale in un conduttore diritto.

3.4.7 Immagazzinamento

In condizioni normali gli estensimetri si possono conservare a tempo indeterminato. Per evitare danni meccanici dovrebbero rimanere fino al momento del loro impiego nelle loro confezioni originali. Le oscillazioni di temperatura dovute agli agenti atmosferici non possono comprometterli. Bisognerebbe proteggerli contro l'umidità; essi vengono prodotti in clima normale 23/50 secondo le norme DIN 50014. Le variazioni dell'umidità relativa dal valore 50% possono portare a oscillazioni insignificanti della resistenza elettrica. Più preoccupanti sono valori dell'umidità dell'aria molto alti che col tempo possono causare danni di corrosione. Anche l'azione diretta di acqua, acidi, basi, gas aggressivi, sostanze inquinanti e radiazione nucleare è dannosa.

Per alcuni tipi speciali di estensimetro valgono le seguenti limitazioni:

Gli estensimetri a griglia libera hanno un supporto autoadesivo il cui strato adesivo si secca nel corso del tempo e perde la sua proprietà. Per questo motivo il termine di giacenza viene fissato:

- a) a 6 mesi per le applicazioni a fiamma (rochide),
- b) minimo 1 anno per le applicazioni con mastice (CR 760).

L'estensimetro di per sè non è soggetto a invecchiamento.

Gli estensimetri con capsula metallica o in gomma non hanno limiti di deposito. Gli estensimetri saldabili possono essere conservati come quelli normali.

4 MEZZI DI APPLICAZIONE PER GLI ESTENSIMETRI

Per mezzi di applicazione si intendono i mezzi e gli ausili che servono al fissaggio dell'estensimetro all'oggetto da misurare, al suo collegamento elettrico e alla protezione del punto di applicazione. L'applicazione stessa è un lavoro che richiede una estrema attenzione, poichè solo un estensimetro applicato con attenzione e competenza può essere affidabile.

È perciò indispensabile seguire le istruzioni per l'applicazione dell'estensimetro e per l'uso dei mezzi di applicazione. Si pensi che dal risultato di una misurazione possono a volte dipendere la vita e la salute di molti esseri umani.

È raccomandabile frequentare i corsi speciali per applicatori che vengono organizzati dall'HBM e dagli Istituti per il Perfezionamento di Tecnici e Ingegneri. In questo testo non vengono pubblicati particolari sulla tecnica di applicazione; si rimanda alla pubblicazione [4-1] che ne fornisce una dettagliata introduzione e da cui sono tratti dei passaggi.

4.1 Mezzi di fissaggio degli estensimetri

I mezzi di fissaggio hanno il compito di mettere saldamente in contatto l'estensimetro con la superficie dell'oggetto da misurare e di trasmettere senza perdite la deformazione di quest'ultimo all'estensimetro. A causa delle varie condizioni secondarie, delle grandezze fisiche influenti e anche delle considerazioni sulle possibilità di impiego sono necessari diversi tipi di leganti e di procedimenti di applicazione. Prima per importanza è l'incollatura. Oltre ad essa vengono impiegati anche altri procedimenti come la saldatura a punti e il fissaggio con mezzi ceramici.

I vantaggi dovuti all'impiego di adesivi nell'applicazione degli estensimetri sono:

- La possibilità di collegare materiali di tipo diverso. A seconda del tipo di adesivo l'unione avviene a temperatura ambiente o a temperatura superiore.
- I materiali da unire non subiscono alcuna influenza (sono possibili limitazioni per le materie plastiche).
- Gli adesivi a indurimento chimico (solo questi hanno ancora importanza in questo tipo di misurazioni) si contraddistinguono per il basso assorbimento di umidità.
- Controllo della velocità di lavoro grazie alla scelta di tipi di adesivi diversi o delle condizioni di indurimento (a caldo o a freddo).
- L'alta resistenza elettrica specifica contribuisce all'alta resistenza di isolamento fra estensimetro ed elemento strutturale.

Ai vantaggi offerti dagli adesivi bisogna aggiungere la loro particolare idoneità all'applicazione degli estensimetri, cioè essi debbono essere in grado di trasmettere correttamente la deformazione dell'oggetto all'estensimetro. Nel par. 3.2.1.1. fig. 3.2-2, viene rappresentato schematicamente il fenomeno di trasmissione. La forza necessaria alla deformazione dell'estensimetro viene sottratta all'oggetto da misurare e trasmessa dallo strato di adesivo all'estensimetro. In questo modo si generano nello strato di adesivo degli sforzi di taglio la cui grandezza dipende dalla forza da trasmettere e dalla superficie di trasmissione. A causa dell'elasticità degli adesivi si genera una distorsione dello strato che decresce (vista nella direzione della deformazione) dai margini esterni verso il centro. Questa distorsione determina la lunghezza dei tratti di passaggio nella fig. 3.2-2. In seguito a questa situazione, negli adesivi teneri e negli strati spessi la deformazione del lato dello strato in contatto con l'estensimetro è inferiore a quella del lato posto in contatto con l'oggetto. Nella fig. 4.1-1a si è tentato di fornire una rappresentazione del fenomeno. Nella parte sinistra della figura le righe verticali nello strato di adesivo indicano la direzione delle superfici di sezione in condizione indeformato. La parte destra della figura mostra lo stesso oggetto dilatato. Le superfici in sezione sono inclinate in modo crescente verso i bordi. Ciò significa che l'adesivo trasmette la deformazione dell'oggetto all'estensimetro in modo incompleto.

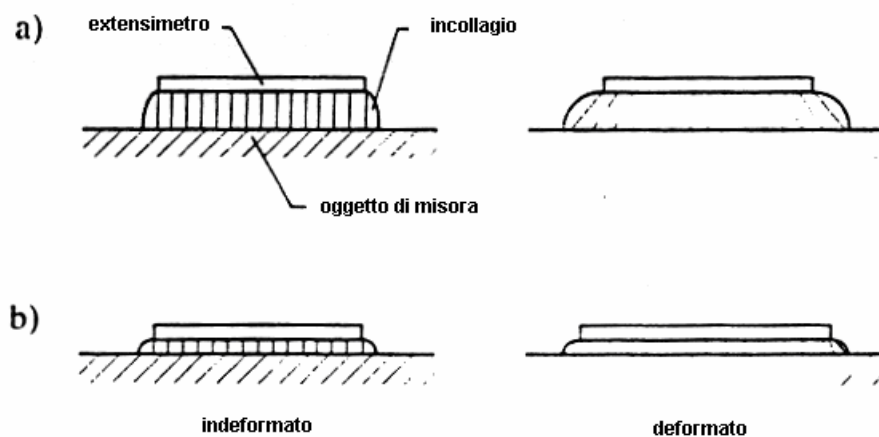


Fig. 4.1-1: Trasmissione della deformazione dall'elemento strutturale all'estensimetro attraverso l'adesivo

- a) Adesivo inadatto (o troppo tenero) e strato troppo spesso**
- b) Adesivo adatto e strato sottile**

Se si usano invece adesivi duri (adesivi con un alto modulo di elasticità) e se lo strato applicato è sottile, allora questa distorsione nello strato di adesivo rimane molto piccola e si limita essenzialmente alle parti esterne. Questa situazione è raffigurata nella fig. 4.1-1b. In questo caso i tratti di collegamento sono limitati e la trasmissione della deformazione corretta.

L'unione degli elementi strutturali incollati si basa sull'adesione fra adesivo e superfici da esso collegate. L'adesione ha origine prevalentemente grazie alle forze di attrazione fra molecole vicine. Il contributo di un fissaggio dell'adesivo nei pori delle superfici strutturali irruvidite o dell'azione capillare è limitato. L'incremento osservabile della capacità legante in caso di superfici strutturali moderatamente ruvide si basa sull'ingrandimento delle superfici di contatto attive ottenuto tramite l'irruvidimento e non sull' "adesione meccanica".

La causa dell'adesione è di natura veramente complicata ed è stata chiarita solo in parte [4-2, 4-3]. Un contributo essenziale alle forze di adesione è fornito dall'adsorbimento (si parla anche di "formazioni di valenze secondarie"), un contributo minore è invece quello da attribuire al legame chimico (legame elettrostatico) e ad altre fonti energetiche.

Sotto il concetto "forze di Van-der-Waal" sono riassunti meccanismi d'unione di vario genere del campo di adsorbimento. Essi vengono essenzialmente suddivisi in tre tipi di effetti di orientamento reciproci:

- Il momento del dipolo (forze di Keesom). Se in una molecola le cariche positive e negative sono distribuite in modo asimmetrico, allora le molecole sono complessivamente neutre ma possiedono un momento di dipolo elettrico, esse sono polari. Le molecole vicine cercano di allineare il loro momento del dipolo in modo tale che la parte positiva di una molecola è rivolta alla parte negativa della molecola vicina e viceversa. Il percorso medio delle forze Keesom va da 0,4 a 0,5 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).

- L'effetto induttivo (forze Debye). Se i baricentri di gravità di carica del campo elettrico di una molecola sono spostati dall'effetto induttivo di un campo esterno (p.e. di un'altra molecola), allora si hanno ugualmente delle interazioni. Diversamente dalle forze Keesom, nelle forze Debye una particella possiede un dipolo permanente e un'altra particella un momento del dipolo indotto. Il percorso medio delle forze Debye va da 0,35 a 0,45 nm.

- L'effetto di dispersione (forze London). Questo effetto viene interpretato tramite la teoria della meccanica ondulatoria secondo cui, sulla base della probabilità di posizione sempre variabile dei baricentri delle cariche elettriche si genera un sistema oscillante "in fase" di due particelle che si inducono reciprocamente e continuamente un dipolo. Il percorso medio delle forze London va da 0,35 a 0,45 nm.

- Una posizione speciale all'interno della forze Van-der-Waal è occupata dal cosiddetto "legame a ponte-idrogeno". Anch'esso si basa sull'interazione dei dipoli orientati, ma ha la particolarità che il polo positivo almeno di un dipolo viene rappresentato da un atomo di idrogeno. Il percorso del legame a ponte-idrogeno va da 0,26 a 0,3 nm. La componente delle forze di unione chimiche (unioni valenze principali) non è ancora molto chiara. Secondo quanto si conosce però sembra che esse forniscano il contributo più limitato alle forze di adesione.

Sia le condizioni di lavoro sul punto di applicazione che anche le diverse richieste rivolte al legante, soprattutto per quanto riguarda la temperatura d'esercizio, giustificano l'offerta di diversi mezzi di fissaggio. Lo stesso vale per gli estensimetri. In questo modo si hanno degli accoppiamenti fra determinate serie di estensimetri e certi tipi di adesivo che permettono di raggiungere caratteristiche ottimali in un campo di applicazione limitato. In altri accoppiamenti con rendimenti diversi la componente con il campo di applicazione più limitato determina i limiti d'impiego. Infine ci sono anche estensimetri e mezzi di fissaggio la cui combinazione è esclusa per motivi tecnologici. È sempre bene osservare le raccomandazioni dei prospetti informativi e dei fogli caratteristiche tecniche.

È assolutamente sconsigliato impiegare adesivi diversi da quelli consigliati. Gli adesivi per gli estensimetri devono avere caratteristiche diverse da quelli normali. Perciò essi derivano di regola da prodotti speciali o sono per lo meno il risultato di modifiche apportate agli adesivi commerciali. Il fatto che un estensimetro aderisca bene non è un criterio sufficiente per giudicare l'idoneità di un adesivo ai fini di misurazione.

Riguardo alla tecnica di applicazione si distinguono:

- adesivi che induriscono a freddo
- adesivi che induriscono a caldo
- mastici ceramici
- ceramica a spruzzo
- collegamenti con saldatura a punti.

- Gli adesivi che induriscono a freddo sono di facile ed economico impiego. Si distinguono adesivi con un solo componente che cominciano a reagire in condizioni anaerobe e a due componenti, che devono essere mescolati prima dell'impiego. In caso di tempi di reazione brevi si parla anche di "adesivi rapidi". Il loro campo di applicazione preferito è l'analisi sperimentale delle tensioni e simili.

- Gli adesivi che induriscono a caldo sono da utilizzare solo nei casi in cui l'oggetto da misurare può essere portato alla temperatura di indurimento richiesta. Ciò è generalmente possibile nella costruzione di rilevatori di grandezze fisiche ma anche nei casi in cui a possono venire applicati parti di macchina ecc. prima del montaggio queste possono essere rimosse in vista della loro applicazione. In confronto agli adesivi a freddo questi offrono un campo di applicazione più ampio nell'ambito delle alte temperature e si adattano, in collegamento con estensimetri di precisione, alle grandi richieste di precisione tipiche della costruzione di rilevatori. Anche gli adesivi a caldo sono utilizzati nelle versioni a una o due componenti.

- I mastici ceramici sono utilizzabili con estensimetri speciali (i cosiddetti estensimetri a griglia libera). Il loro impiego preferito è nel campo delle alte temperature e occasionalmente delle temperature criogene. I mastici ceramici richiedono temperature di cottura più o meno alte per cui il loro impiego è limitato. Una forte igroscopicità nel campo al di sopra del punto di congelamento fino al di sotto della temperatura di evaporazione dell'acqua porta a problemi con lo zero del punto di misurazione e richiede misure di protezione attive.

- La ceramica a spruzzo richiede gli stessi estensimetri speciali dei mastici ceramici e in aggiunta attrezzature speciali. Anche il campo di applicazione è simile a quello dei mastici ceramici. Il particolare vantaggio di questo procedimento risiede nel fatto che durante l'applicazione l'oggetto si riscalda in misura limitata. Il comportamento igroscopico delle applicazioni di questo tipo è simile a quello dei mastici ceramici. Le applicazioni a spruzzo possiedono buone qualità di reazione nei confronti delle radiazioni nucleari.

- La saldatura a punti è uno dei metodi di applicazione più semplici. Richiede un'apparecchiatura molto semplice (un piccolo strumento di saldatura), poche preparazioni e poco esercizio. Il fatto che, nonostante ciò, essa venga utilizzata raramente ha le seguenti ragioni:

Sono necessari estensimetri speciali la cui gamma di offerta è limitata.

Gli estensimetri saldabili non possono essere applicati a superfici curve.

Essi non possono neanche essere prodotti di dimensioni particolarmente limitate e questo è naturalmente un altro limite del campo di applicazione.

L'oggetto da misurare deve essere costituito di un materiale saldabile. Anche nel caso di oggetti saldabili si deve rinunciare a questo metodo qualora si tema il pericolo di una microcorrosione, p.e. nel caso di parti di caldaie a vapore altamente sollecitate, di acciai austenitici ecc. L'oggetto da misurare deve essere così forte (spesso) da evitare di variare la distribuzione locale degli sforzi in seguito alla forza di ritorno relativamente grande dell'estensimetro, cioè non deve aver luogo nessun impedimento evidente alla deformazione.

4.2 Materiali ausiliari per l'applicazione

4.2.1. Detergenti

Per la preparazione di un'applicazione sono necessarie diverse misure.

Per una pulitura grossolana delle parti molto sporche sono adatti i metodi meccanici e i detergenti comunemente usati in casa.

Per una pulitura di precisione vengono usati preferibilmente solventi organici. Nella tavola 4.2-1 sono elencati alcuni mezzi comuni insieme con i dati relativi alla massima concentrazione sul posto di lavoro (numeri MAK). Le annotazioni "facilmente infiammabile" e "dannoso per la salute" sono tratte dall'"ordinamento sulle sostanze pericolose nei luoghi di lavoro". Gazzetta ufficiale del governo federale I, a pagina 2493 dell'8.9.1975 e forniscono indicazioni sulle misure di sicurezza necessarie.

Designazione generale o nome commerciale	Altra designazione chimica	Formula chimica (totale)	Max conc. sul posto		Note
			ppm	mg/m ³	
Frigen 113 Cr®, Freon TF®	1,1,2-Tricloro-etano, 1,2,2-Trifluoro-etano	CCl ₂ F · CClF ₂ [C ₂ Cl ₃ F ₃]	1000	7800	Non infiammabile. Non attacca la plastica o solo in parte. I vapori non devono essere riscaldati sopra 300° C
Metil-etil-chetone	Butano-(2)	CH ₃ · CH ₂ · CO · CH ₃ [C ₄ H ₈ O]	200	590	Altamente infiammabile
Acetone	Acetone	CH ₃ · CO · CH ₃ [C ₃ H ₆ O]	1000	2400	Altamente infiammabile
Alcol isopropilico	Isopropanolo	CH ₃ · CH (OH) [C ₃ H ₈ O]	400	980	Altamente infiammabile
Alcol etilico	Etanolo	CH ₃ · CH ₂ · OH [C ₂ H ₆ O]	1000	1900	Altamente infiammabile
Etilacetato	Etil estere dell'acido acetico	CH ₃ · CO ₂ C ₂ H ₅ [C ₄ H ₈ O ₂]	400	1400	Altamente infiammabile
Percloroetilene	1,1,2,2-Tetracloroetilene	CCl ₂ · CCl ₂ [C ₂ Cl ₄]	100	670	rischioso per la salute, miscela gas-aria esplosiva
Cloruro di metilene	Didorometano	CH ₂ · Cl ₂ [CH ₂ Cl ₂]	200	720	rischioso per la salute, miscela gas-aria esplosiva
Toluene	Metilbenzene	C ₆ · H ₅ · CH ₃ [C ₇ H ₈]	200	750	Rischioso per la salute; altamente infiammabile
Benzina pura	-	-	*	*	Altamente infiammabile; *nessun dato ufficiale disponibile
Clorotene NU®	1,1,1-Tricloroetano	CCl ₃ · CH ₃ [C ₂ H ₃ Cl ₃]	200	1080	Rischioso per la salute

Tabella 4.2-1: Solventi impiegati per la pulizia e per sgrassare la superficie in corrispondenza dei punti di misura.

Alcuni di questi solventi sono offerti "tecnicamente puri" e "chimicamente puri". Tecnicamente puro significa: privo di impurità solide. Chimicamente puro, anche con l'aggiunta di "pro analisi" oppure "p.a." oppure "purissimo", significa: privo di impurità solubili nell'ambito delle possibilità tecniche. Nonostante i solventi chimicamente puri siano molto costosi, essi sono gli unici da utilizzare per la pulitura dei punti di adesione degli estensimetri. Durante l'applicazione è necessario fare la massima attenzione affinché essi non siano contaminati per distrazione e siano resi in questo modo inutilizzabili.

4.2.2. Mezzi per saldatura (brasatura)

4.2.2.1 Apparecchi per saldatura (brasatura)

Il tipo migliore e maggiormente utilizzato di collegamento elettrico fra estensimetro e filo di misurazione (cavo di misurazione) è la saldatura a stagno (detta anche brasatura dolce). Collegamenti altrettanto eccellenti si ottengono con la tecnica Crimp (connessione a schiacciamento). I collegamenti con serraggio a vite possono provocare degli spostamenti dello zero in seguito a resistenze di contatto variabili. I collegamenti a spina si sono rivelati ancora più critici e solo le qualità migliori con elementi di contatto dorati sono risultati sufficienti finché il loro perfetto funzionamento non è stato disturbato dallo sporco. Fondamentalmente bisogna dire che i normali collegamenti elettrici sono insufficienti proprio a causa della bassa tensione e le basse correnti di misurazione.

Le esigenze dell'industria elettronica hanno permesso la realizzazione di eccellenti saldatori di cui coloro che impiegano estensimetri dovrebbero approfittare. Sono da raccomandare i saldatori a bassa tensione a regolazione di temperatura che vengono alimentati dalla rete tramite un apparecchio di regolazione. La preferenza va ai modelli con regolazione elettronica sensibile e continua e ad alto potere calorifico (ca. 50 W) poichè la sottrazione di calore sulla punta di saldatura viene subito compensata. Il campo di regolazione della temperatura nelle stazioni di saldatura comuni va da 120°C a 400°C ed è sufficiente per tutte le leghe per saldatura dolce usate nella tecnica estensimetrica.

Decisiva per la produzione di punti di saldatura affidabili è la scelta della punta di saldatura giusta per i diversi campi di applicazione. La denominazione "punta di saldatura" non deve essere presa alla lettera. Un saldatore dalla forma a penna non è infatti adatto in quanto il flusso di calore dallo strumento al punto di saldatura non è sufficiente e la lega brasante si sposta dalla punta verso l'alto e viene quindi a mancare sul punto di saldatura. Una piccola superficie dalle dimensioni adatte per l'oggetto da brasare è giusta. Se siano migliori strumenti da saldatura diritti o curvi dipende esclusivamente dall'accessibilità del punto di saldatura.

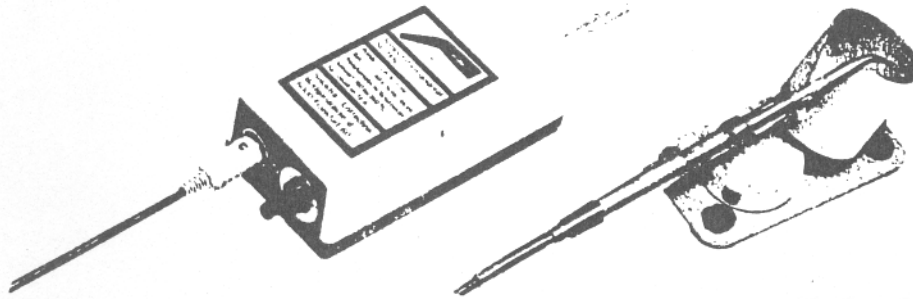


Fig. 4.2-1: Stazione di saldatura vegolabile

Le punte di saldatura temprate permettono l'accesso della lega brasante solo in determinati punti cosicchè essa rimane concentrata nelle zone utilizzate per la saldatura. La tempra impedisce inoltre l'ossidazione dello strumento.

4.2.2.2 Leghe brasanti e fondenti

Le leghe per brasatura dolce offerte sono innumerevoli. A seconda dei componenti della lega e della composizione esse soddisfano in modo ottimale determinate richieste. Nella tecnica estensimetrica sono apprezzate buone caratteristiche di bagnabilità e di fluidità e anche una temperatura di fusione adatta alle condizioni di impiego. La temperatura d'uso, in considerazione della resistenza meccanica del giunto brasato con leghe di brasatura eutettiche, non dovrebbe salire oltre i 30 K ca. al di sotto del punto di fusione della lega.

Piccole aggiunte di rame impediscono la corrosione dei punti di saldatura ("lega con protezione in rame"). In caso di sollecitazione dinamica permanente sono da preferire le leghe brasanti con un'alta resistenza alla fatica. Nella tabella 4.2.-2 sono elencate alcune leghe per brasatura dolci. Ulteriori informazioni sono contenute in DIN 1707 e negli elenchi dei produttori. Nel campo delle alte temperature si usino il più possibile giunti saldati. Le leghe per saldatura ad elevate resistenza devono essere impiegate con attenzione a causa dei fondenti aggressivi!

I fondenti hanno il compito di liberare i giunti brasati dagli ossidi e di impedire un'ulteriore ossidazione durante la saldatura. Essi creano così le premesse per un'unione corretta della lega brasante con le parti da saldare. La scelta del fondente deve avvenire sulla base del tipo di saldatura (p.e. saldatura dolce), dei materiali da saldare (p.e. metalli pesanti) e dell'oggetto di saldatura (p.e. collegamenti elettrici).

Lotbezeichnung 1	Legierungsbestandteile % 2					Schmelzbereich °C 3	empfohlene Lötspitzentemperatur °C 4	Bemerkungen 5
	Sn	Pb	Cu	Ag	In			
Röhrenlot DIN 8516 L-Sn 60 Pb Cu 2/F-SW 32 (C3) 3,5; Ø 1 mm 6	60	38	2			183 ... 190	230	Bestell-Nr.: 8-8403.0004 Harzkern aus reinem Kolophonium, korrosionsfrei 7
Doduco-Ceramin-Weichlot CN 306 Ø 0,8 mm, massiv 8	1	97,5		1,5		304 ... 310	360	Dr. E. Duerrwächter-Doduco-KG Postf. 480, 7530 Pforzheim warmfestes Lot 9
Blei-Indium-Lot 50/50 Ø 0,5 mm, massiv 10		50			50	190 ... 210	250	Gute Ermüdungsbeständigkeit, empfohlen bei dynam. Dauerbelastung vorwiegend für DMS der Serien LY41, LY43. Enthalten im Weichlot-Set WL 521 Bestell-Nr.: 214.04-2009 11

- 1 Definizione della lega brasante
- 2 Componenti della lega %
- 3 Campo di fusione °C
- 4 Temperatura raccomandata delle punte di saldatura °C
- 5 Osservazioni
- 6 Lega per brasatura a cannello
- 7 Nr d'ordine: 8-8403.0004 Nucleo di resina di colofonia pura anticorrosione
- 8 Lega per brasatura dolce CN 306 Ø pieno
- 9 Lega brasante refrattaria
- 10 Lega brasante piombo-indio piena
- 11 Buona resistenza alla fatica, raccomandata in caso di sollecitazioni dinamiche permanenti prevalentemente per estensimetri delle serie LY41, LY43. Contenuta nel set per leghe brasanti dolci WL 521. Numero d'ordine:

Tabella 4.2-2: Leghe per brasatura dolce (esempi)

I fondenti fortemente corrosivi sono certo comodi poichè è possibile saldare anche in condizioni di pulizia non perfetta; di negativo però c'è il fatto che i residui causano inevitabilmente dei fenomeni di corrosione e abbassano sensibilmente la capacità isolante del tratto di isolamento. Essi non sono perciò adatti per le saldature di collegamenti elettrici. Non usare in nessun caso pasta per brasatura!

I fondenti non corrosivi sono a base di resine naturali o naturali modificate. La più nota è la colofonia che viene impiegata nelle leghe brasanti per cannello come anima del fondente o come fluido disciolto in alcool. Questi fondenti "morbidi" richiedono un'accurata pulizia del giunto di brasatura subito prima della saldatura. Essi sono molto adatti per la tecnica estensimetrica.

Osservazioni: L'anima del fondente contenuta in molte leghe di brasatura a cannello può essere composta di fondente sia corrosivo che non corrosivo. Prima dell'impiego bisognerebbe accertarsi della natura del fondente. La norma "DIN 8511: fondenti per la saldatura di materiali metallici" fornisce informazioni sui diversi fondenti. La norma 2 tratta dei fondenti per la saldatura dolce dei metalli pesanti.

I fondenti con la sigla F-SW 31 e F-SW 32 non lasciano residui corrosivi. La denominazione "fondente privo di acidi" è scorretta e fuorviante. Per questo motivo essa, secondo DIN 8511, non può essere usata.

4.2.3. Mezzi di collegamento (elettrico)

4.2.3.1. Supporti per la saldatura dei terminali (brasatura)

Questi supporti hanno la funzione di creare un punto di ancoraggio fisso fra estensimetro e cavo. Essi vengono prodotti in diverse versioni e grandezze. La fig. 4.2-2 mostra alcune versioni caratteristiche.

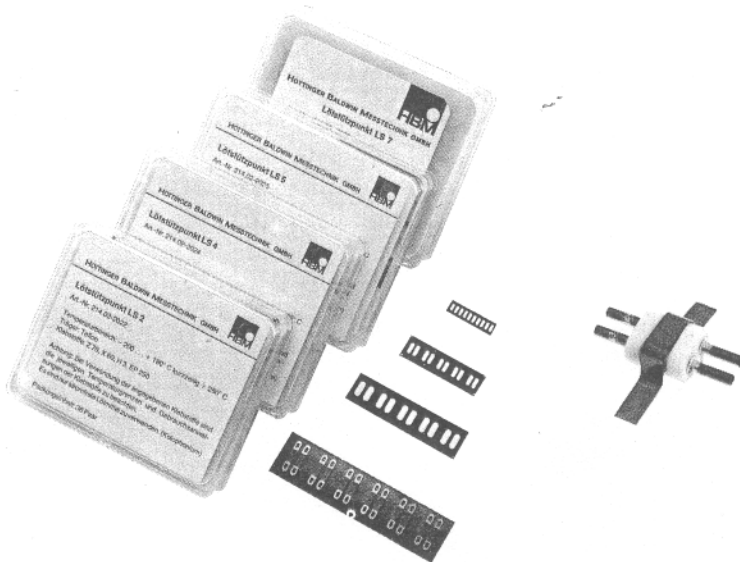


Figura 4.2-2: Alcune forme dei supporti per la saldatura dei terminali (immagine HBM)

Questi supporti sono posti direttamente sull'estensimetro, generalmente tramite adesione (generalmente contemporanea a quella dell'estensimetro), ma anche, per le versioni speciali previste per il campo delle alte temperature, con la saldatura a punti. I particolari sulle forme, i dati tecnici e l'impiego si possono ricavare dalla documentazione del produttore e da [4-1].

4.2.3.2 Materiale dei conduttori

Il successo della misurazione dipende anche dalla scelta dei conduttori e dei cavi di misurazione giusti, cioè adatti al caso speciale. Essi non dovrebbero trasmettere solo i segnali di misurazione fra membri della catena (ricevitore - adattatore - emettitore), ma devono anche limitare al minimo i segnali di disturbo e opporsi alle sollecitazioni causate dal funzionamento e dall'ambiente.

I collegamenti brevi, p.e. il cablaggio interno di un rilevatore, possono essere effettuati con fili o cavetti di sezione relativamente sottile. L'isolamento dei cavi deve essere buono e resistente alle temperature. Una buona saldabilità dei fili è quindi estremamente positiva. In caso di sollecitazioni dinamiche estreme dell'oggetto di misurazione può essere vantaggioso il cosiddetto "filo oscillante", si tratta di un cavo composto di fili molto sottili circondati da un isolamento flessibile.

Nel caso di collegamenti più lunghi o cavi si hanno maggiori necessità. Si tratta di contenere entro limiti accettabili la resistenza ohmica con la scelta della giusta sezione del conduttore. Con il funzionamento a frequenza portante si raccomanda un cavo con bassa capacità, lo stesso vale anche per il funzionamento a corrente continua se si devono trasmettere segnali di frequenza superiore. Una rete di rame a copertura dei fili simmetrizza la capacità dei cavi e protegge contro dispersioni di disturbo dovute a campi magnetici (schermatura elettrica). Per la schermatura dei campi magnetici si posino i cavi in un tubo corazzato di acciaio o simili (par. 7.2 e 7.4).

Si possono generare delle influenze elettrostatiche quando il campo magnetico di una fonte di tensione agisce in modo capacitivo sul circuito di misurazione. La migliore protezione in questo caso si ottiene circondando il cavo o la linea con uno schermo chiuso. Solitamente si ottiene una copertura sufficiente tramite una rete di fili di rame. I cavi di misurazione speciali contengono questo tipo di schermo. Il collegamento a massa dello schermo è importante poiché uno schermo a potenziale libero non ha alcun effetto.

Si possono avere influenze elettromagnetiche quando i cavi del circuito di misurazione sono posti in vicinanza di conduttori percorsi da corrente o di impianti elettrici (p.e. generatori, apparecchi di saldatura, trasformatori, motori ecc.). Secondo il principio del trasformatore nella linea di misurazione vengono indotte delle tensioni elettriche di disturbo. Una protezione attiva è fornita dall'intreccio dei fili (nei cavi finiti i fili sono intrecciati). Quando questo non è sufficiente si può aggiungere un'ulteriore schermatura per mezzo di un tubo corazzato in acciaio o un tubo del gas (acqua).

Il metodo a frequenza portante (par. 5.3) è molto meno sensibile contro i disturbi di corrente del metodo a corrente continua, poiché tutte le frequenze di disturbo vengono eliminate al di fuori della banda di trasmissione.

	PVC Cloruro di polivinile	PE Polietilene (densità inferiore)	PTFE Politetrafluoroetilene (Teflon)	PUR Poliuretano	SIR Gomma siliconica	PA Poliammide	PI Polimide	Rivestimento a spirale in fibra di vetro	Tubo in fibra di vetro	Parte di stakte
Resistenza alla temperatura costante breve	-50 ... 80 ... 90	-80 ... 80 ... 100	-100 ... 260 -269 ... 300	-60 ... 90 ... 100	-80 ... 180 ... 250	-55 ... 105 ... 125	-269 ... 275 ... 400	-269 ... 280 ... 480	-269 ... 400 ... 600	> 600
Speciale resistività di massa a 20°C Ocm	10 ¹⁴ ... 10 ¹⁵ media	10 ¹⁶ media	>10 ¹⁸ mediocre	10 ¹¹ ... 10 ¹⁴ molto buona	10 ¹⁴ ... 10 ¹⁵ mediocre	10 ¹² ... 10 ¹³ molto buona	10 ¹⁴ ... 10 ¹⁶ molto buona	- mediocre	- mediocre	molto buona
Combustibilità (1)										
Resistenza agli acidi e lisciviazione	buona	molto buona	2) molto buona buona	poco	3) buona	A. inconstante L.: buona	A. molto buona L.: mediocre	buona	buona	molto buona
olio	mediocre	buona	molto buona	buona	inconstante	buona	buona	molto buona	molto buona	molto buona
solventi	Generalmente instabile	Generalmente instabile	molto buona	inconstante	condizionale	buona	perlopiù	molto buona	molto buona	molto buona
assorbimento d'acqua %	1 ... 2	0	0	1,4	0,1 ... 0,4	2 ... 10	1 ... 3	-	-	-

1) sv = autospegnente

ef = infiammabile

sef = difficilmente infiammabile

nef = non infiammabile

2) Instabile contro alcali fuso e fluoro

3) Instabile nel vapore a 130°C

Tabella 4.2-3: I più importanti isolanti dei cavi (fili) e alcuni dei loro dati tecnici

Importante è che il valore di isolamento dei fili non varii a causa della temperatura, dell'umidità ecc. Con l'allacciamento di collegamenti a semiponte e a ponte ciò dipende dal fatto che la simmetria di rami di ponte vicini si conservi sia per quanto riguarda la resistenza sia anche per la capacità fra i fili (par. 7.2 fino a 7.4). L'involucro del cavo deve proteggere contro influssi esterni ed essere resistente contro l'umidità, l'acqua, l'olio, le sostanze chimiche, la temperatura (bassa e alta) e le sollecitazioni meccaniche. I cavi di misurazione commerciali soddisfano senz'altro molte richieste, purtroppo non ne esiste uno che si adatti a tutti gli impieghi.

Nella tabella 4.2-3 sono elencati i più importanti materiali isolanti e alcune indicazioni sulle loro caratteristiche.

4.2.4 Mezzi di controllo

Ogni applicazione estensimetrica e ogni punto di misurazione deve essere controllato prima di ogni misurazione per accertarsi del loro perfetto stato. Si tratti di controlli ottici (visivi) ed elettrici.

4.2.4.1. Ispezione visiva

È sufficiente una buona lente che ingrandisca di ca. 6 volte l'immagine. Con essa si possono riscontrare insufficienze nell'adesione dell'estensimetro come p.e.:

- bolle d'aria sotto l'estensimetro
- bordi incollati male
- punti di saldatura non affidabili
- residui di fondente e
- errori di orientamento.

Questo controllo può essere completato con il cosiddetto "test della gomma da cancellare" [4-1].

4.2.4.2. Resistività di massa

È sufficiente un buon ohmmetro per mezzo del quale la resistenza dell'estensimetro può essere misurata con un'incertezza dell' $< \frac{1}{4}\%$. Il controllo deve indicare se la resistenza dell'estensimetro è variata in seguito ad un'applicazione scorretta. Gli ohmmetri con una definizione di $0,1\Omega$ sono anche adatti a misurare se la resistenza dell'estensimetro è corretta prima della sua applicazione; questa misura viene raccomandata nella costruzione dei rilevatori di grandezze fisiche per ottenere una buona simmetria del collegamento a ponte.

La resistenza dei cavi di collegamento dell'estensimetro genera nei sistemi di misurazione comuni con alimentazione di tensione costante una diminuzione di sensibilità apparente dell'estensimetro. Perciò essa deve essere misurata per poter effettuare poi correzioni del valore di misurazione (par. 7.2). La resistenza del cavo viene automaticamente compensata dagli strumenti che lavorano secondo la "connessione incrociata" (per collegamenti a ponte e a semiponte) oppure secondo la connessione incrociata ampliata" (per collegamenti a quarto di ponte, a semiponte o a ponte), per cui una correzione non è necessaria (par. 7.3).

4.2.4.3. Resistenza di isolamento

Per la misurazione delle resistenze di isolamento fra estensimetro e oggetto, fra i singoli fili del cavo e fra di essi e la schermatura sono adatti strumenti con una tensione di prova non superiore ai 50 Volt e con un campo di misurazione fino a 20000 M Ω e più. I generatori magnetoelettrici non sono adatti.

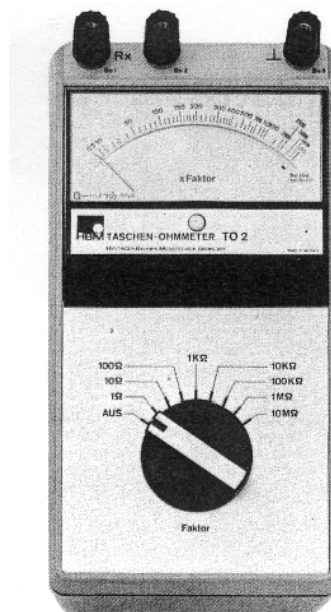


Figura 4.2-3: Ohmmetro tascabile TO 2 per la misurazione della resistività di massa e della resistenza di isolamento degli estensimetri applicati.

In alcune condizioni si osserva una dipendenza della resistenza dell'isolamento dal tipo di tensione applicata, cioè se si tratta di tensioni continue o alternate e dalla frequenza con la quale varia la tensione. Anche l'ampiezza della tensione applicata e la temperatura dell'isolamento di cui si vuol misurare la resistenza hanno un'influenza. Pertanto, in particolare alle alte temperature che si possono raggiungere negli adesivi ceramici, si verifica una migrazione di ioni, cosa che determina una misura non corretta della resistenza di isolamento [4-4]. In ogni caso, questo fenomeno si verifica anche per altri materiali. Esiste un metodo semplice per determinare la resistenza di isolamento di un estensimetro nelle condizioni di impiego per la misura delle deformazioni. Lo stesso amplificatore della centralina estensimetrica viene impiegato per questo scopo. Il metodo è sotto certi aspetti il duale o il contrario del metodo per la calibrazione shunt descritto nel par. 6.3. Un circuito a ponte intero o un mezzo ponte separato viene collegato in parallelo alla resistenza di isolamento che deve essere misurata e si registra l'indicazione della deformazione; questa risulta essere una misura della resistenza di isolamento.

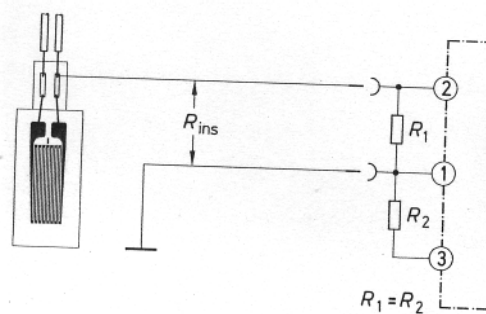


Fig. 4.2- 4: Circuito per la misura della resistenza di isolamento di estensimetri con una centralina estensimetrica. Il circuito ausiliario R_1 , R_2 si può anche disporre nella configurazione a ponte intero.

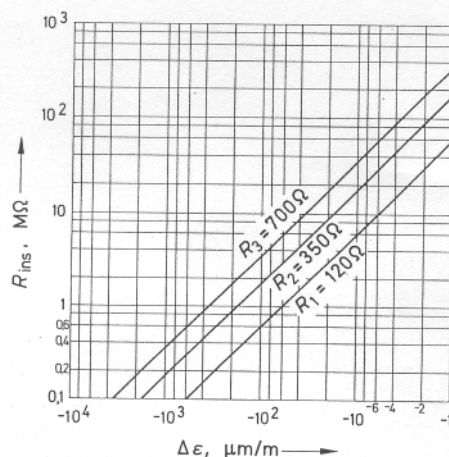


Figura 4.2- 5: Diagramma per la determinazione delle resistenza di isolamento di un'applicazione estensimetrica. Spiegazione nel testo.

La fig. 4.2-4 mostra il tipo di collegamento da utilizzare. Il collegamento ausiliario da sintonizzare con la resistenza di isolamento R_{ins} (nella fig. un collegamento a semiponte R_1, R_2) può essere costituito da estensimetri o da resistenze stabili.

Per poter determinare semplicemente la resistenza di isolamento si può far uso del diagramma in fig. 4.2-5 in cui i valori della resistenza degli estensimetri comuni sono riportati come parametri. Alla base del diagramma sono l'equazione (6.3-9a) e il fattore k con $k = 2$. Sulla scala $\Delta\varepsilon$ si ricerchi il valore di dilatazione misurato, si vada verticalmente fino al punto di intersezione con il parametro relativo e da qui a destra fino alla scala R_{ins} , dalla quale si può rilevare la resistenza di isolamento in $M\Omega$.

4.3 Mezzi per la protezione del punto di misura

I punti di misura con estensimetri devono essere protetti contro aggressioni meccaniche o chimiche. Anche in condizioni ideali, p.e. in laboratorio, le caratteristiche del punto di misura vengono influenzate nel corso del tempo se non sono state prese le adeguate contromisure. Così come possono essere numerosi i tipi di influssi che agiscono su un punto di misura, altrettanto varie sono le misure di protezione. In laboratorio, dove l'aria viene essiccata uniformemente, è sufficiente una leggera protezione contro il contatto (sudore delle mani), mentre in ambienti industriali sono necessarie protezioni contro vapore, acqua, olio, calore e sollecitazioni meccaniche. Nel primo caso basta un leggero rivestimento di vernice, nel secondo è necessario creare una barriera formata da diversi strati di sostanze protettive.

Bisogna però specificare immediatamente che una protezione totale a tempo indeterminato si ottiene solo con una capsula metallica ermetica. Questa soluzione viene adottata per i rilevatori comuni quando la loro funzione lo permette. Tutti gli altri tipi di copertura, anche i migliori, forniscono solo una protezione temporanea. La sua durata dipende dal tipo di protezione e dal suo spessore e anche dal tipo di mezzo attivo. I periodi di protezione attiva vanno da poche ore a parecchi anni a seconda delle circostanze. Quale sia il tipo di protezione necessaria non dipende solo dalla durata richiesta per il punto di misura, ma anche dalla durata delle singole misurazioni, dalla possibilità di effettuare controlli intermedi dello zero e della resistenza di isolamento e infine dal grado di precisione richiesta.

Limitati danneggiamenti del punto di misura, p.e. attraverso la penetrazione di umidità in seguito a diffusione, causano prima di tutto delle variazioni dello zero. Se esse sono controllabili, p.e. tramite la rimozione dei carichi dall'oggetto, e si muovono entro limiti accettabili (p.e. 100 ... 200 $\mu\text{m}/\text{m}$), allora si può continuare a misurare con una precisione sufficiente per gli studi di analisi delle sollecitazioni. Un ulteriore indizio della idoneità o meno di un punto di misura è la resistenza di isolamento. L'abbassamento di questa resistenza da 1000 $M\Omega$ a 1 $M\Omega$ causa in un estensimetro da 120, 350 e 700 Ω spostamenti dello zero rispettivamente di - 60 $\mu\text{m}/\text{m}$, - 175 $\mu\text{m}/\text{m}$ e - 350 $\mu\text{m}/\text{m}$!. Ciò significa che il limite inferiore della resistenza di isolamento dipende anche dalla resistenza della griglia dell'estensimetro impiegato.

La diffusione di materiali corrosivi e conduttori e la corrosione causano gravi compromissioni del punto di misurazione. La corrosione viene enormemente stimolata dall'utilizzo di corrente continua per l'alimentazione dell'estensimetro! In questo modo, come era già stato osservato, si formano elementi galvanici la cui tensione si sovrappone al segnale di misura causando così gravi errori. Infine non bisogna dimenticare che le esigenze di protezione del punto di misura si estendono anche in ugual misura ai cavi conduttori.

Le misure protettive devono essere efficaci senza però modificare le caratteristiche dell'oggetto. Gli oggetti sottili non devono essere irrigiditi al punto tale da impedire la deformazione; i materiali sintetici invece non devono essere attaccati da sostanze contenenti solventi.

Non è possibile dare indicazioni per ogni singolo caso. Le istruzioni seguenti dovrebbero tuttavia bastare per risolvere con la soluzione più appropriata i problemi più frequenti.

Nella scelta dei protettivi bisogna considerare:

- Le condizioni ambientali,
- la durata della misura e/o la durata richiesta del punto di misura,
- la precisione di misura richiesta,
- un irrigidimento eventualmente non consentito dell'oggetto,
- il materiale che entra in contatto con il punto di misura, compreso il cavo di collegamento, deve possedere un'altissima resistenza di isolamento e non deve scatenare reazioni chimiche o corrosioni.

Per quanto riguarda l'impiego:

- Il punto di misura deve essere in perfette condizioni prima di essere protetto. L'umidità rimasta, il sudore delle mani, i residui dei fondenti di saldatura ecc. sono bombe ad orologeria che presto o tardi causano errori di misurazione o addirittura il guasto dell'intero impianto. I mezzi di protezione non devono solo trattenere l'umidità esterna, ma anche quella interna!
- Il punto di misura deve essere protetto subito dopo l'applicazione.
- Se è inevitabile applicare l'estensimetro in un ambiente umido (termini pressanti, cattivo tempo o ambienti umidi), allora l'oggetto dovrebbe essere riscaldato in un forno (ad una temperatura di ca. 110 ... 120°C se possibile) oppure, qualora questa soluzione non sia adottabile, essere asciugato sotto un getto di aria calda (asciugacapelli ecc.).
- Il mezzo di protezione deve unirsi perfettamente ai margini esterni del punto di misura. Punti sbagliati e capillari (graffi, solchi) sono porte attraverso le quali possono penetrare mezzi aggressivi. L'unione del mezzo di protezione con il bordo non deve subire variazioni durante tutta la durata del punto di misurazione. Per questo motivo il margine deve essere accuratamente pulito, così come la zona di adesione, e deve estendersi 1 o 2 cm oltre i bordi dell'adesivo. Il sudore delle mani (impronte digitali) può creare le condizioni che permettono l'infiltrazione della ruggine rendendo

così inefficace l'intera installazione, nonostante l'unione del mezzo di protezione sia stata ineccepibile.

- I passaggi dei cavi devono essere sigillati con la massima attenzione. I mezzi di protezione devono avvolgere le estremità dei cavi da tutte le parti, perciò anche in quella inferiore, affinché non si formino canali o capillari attraverso i quali riesca a passare l'umidità. Nel caso di cavi a più fili ogni singolo filo deve essere incassato nella massa di protettivo insieme con un pezzo della guaina del cavo. Un esempio è mostrato in fig. 4.3-1.

- Per i mezzi di protezione in commercio bisogna assolutamente seguire le istruzioni di preparazione.

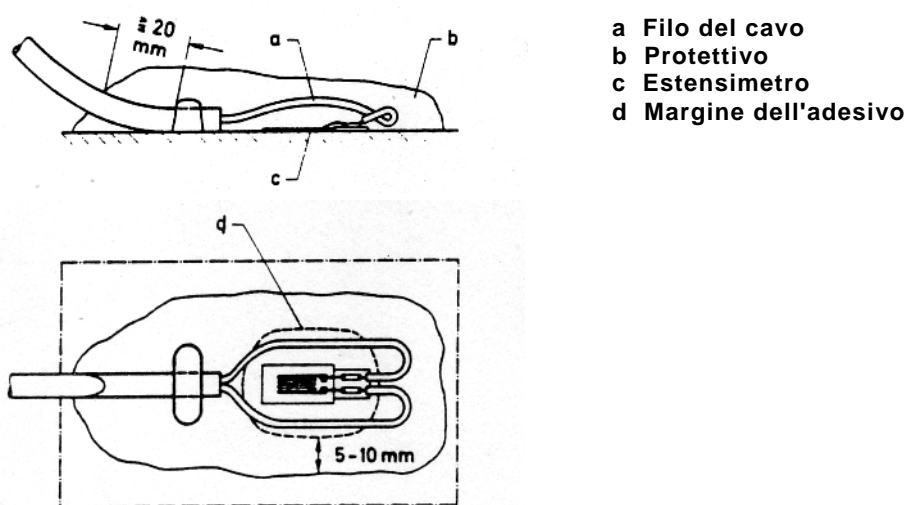


Figura 4.3-1: Esempio di copertura di protezione di un punto di misurazione con estensimetro.

Mezzi di protezione comunemente usati:

- Vernice poliuretanica PU 100

Essicca in aria. Adatta per la protezione dei punti di misura leggeri contro il contatto (sudore delle mani) e la polvere, l'umidità dell'aria normale e le sue oscillazioni nelle zone temperate (condizioni di laboratorio). Adatta anche come strato isolante sotto altri mezzi di protezione. Impermeabile all'olio. Buona resistenza all'abrasione. Resistente alla temperatura in un intervallo da -30 a +100°C, per breve tempo fino a 120°C. Non resistente contro gli idrocarburi.

- Vernice alla gomma di nitrile NG 150

Essicca in aria, contiene come solventi metiletilchetoni. Campo di applicazione e caratteristiche simili a quelli di PU 100. Resistente all'olio e alla benzina, impiego preferito a contatto con gas liquidi (non ossigeno!). Resistenza alla temperatura da -269 a +150°C.

- Vernice siliconica SL 450

Essicca in aria. Preferibilmente per la protezione di mastici ceramici (applicazioni ad alta temperatura) contro assorbimento di umidità e sporco. Resiste a temperature da -50 a +450°C.

- AK 22, mastice plastico

Vantaggi:

Semplice impiego tramite plastificazione. Eccellente adesione grazie a forte adesività propria. Ottima protezione contro umidità e acqua, utilizzabile anche sottacqua; azione protettiva in acqua a ca. 20°C fino a ca 1 anno, in acqua a 75°C fino ca. a 3 settimane, in acqua sotto pressione fino ad alcuni giorni. Valori limite non conosciuti. Ottima resistenza agli agenti atmosferici. La protezione durevole può essere notevolmente migliorata tramite l'inserimento di una lamina di alluminio come barriera di diffusione (fogli di alluminio domestici). Si ottiene una protezione meccanica contro urti e oggetti in caduta semplicemente applicando una lastra di latta sul mastice autoadesivo. Resistente alla temperatura in aria da -50 a +170°C. Durata di immagazzinamento illimitata.

Svantaggi:

Non resistente contro olio e solventi. Non utilizzabile in caso di alte forze centrifughe sul perimetro esterno degli oggetti.

- ABM 75 mastice plastico con lamina di alluminio

Campo di applicazione e caratteristiche simili all'AK 22 con le seguenti differenze: il materiale a forma di lastra già con uno spessore di 50 µm è accoppiato con una lamina di alluminio che funge da barriera antidiffusione. Il campo di temperature va da -200 a +75°C; il limite superiore viene fissato tramite l'inizio dello scorrimento.

- SG 250, gomma siliconica trasparente, senza solventi

Adatto per la protezione contro l'umidità e gli agenti atmosferici, contro l'acqua a temperatura ambiente, relativamente resistente all'olio. Il rivestimento tipo gomma offre un'ottima protezione meccanica. Resistenza alla temperatura: -70... +180°C, per breve tempo fino a 250°C; in questo intervallo il materiale rimane elastico.

- Vaselina, senza piombo

Vantaggi:

economica, di facile impiego; ottima protezione contro umidità e acqua, utilizzabile anche sottacqua.

Svantaggi:

non utilizzabile in acqua corrente e sotto la pioggia e gli spruzzi d'acqua; nei luoghi aperti può facilmente essere rimossa, fonde a ca. 50°C.

- Grasso di Policlotrifuoretilene (nome commerciale: Halocarbon[®])

Vantaggi: Utilizzabile a temperature fino a 200°C, vantaggi e svantaggi simili a quelli della vaselina.

- Grasso siliconico

Il grasso siliconico è da sconsigliare nonostante le sue buone caratteristiche poiché esso viene trasmesso dagli utensili e da questi agli altri oggetti. Grazie alla sua eccellente adesività è molto difficile rimuoverlo totalmente. Siccome è eccellente distaccante già tracce minime impediscono l'adesione corretta dell'estensimetro.

- Cera microcristallina , cera d'api

Buona protezione contro l'umidità e le influenze atmosferiche in generale. Deve essere applicata fusa sull'oggetto riscaldato per ottenere un legame perfetto. Protezione meccanica limitata. Campi di temperature da -70 a +100°C.

- Gomma polisolfurica

Materiale a due componenti, genera masse simili a gomma che sono eccezionalmente resistenti contro solventi e invecchiamento. Si distinguono anche per la buona resistenza agli agenti atmosferici. Campo di temperature da -50 ... a +120°C.

- Resina epossidica (nome commerciale: araldite[®], UHU-plus[®] e altri)

Per le coperture di estensimetri si adattano soprattutto versioni non troppo dure. Il materiale dal nome commerciale UHU-plus, una resina a due componenti, è adatto soprattutto per la protezione contro olio, carburanti dei motori, acidi diluiti, liscive diluite, molti solventi e fornisce inoltre una buona protezione meccanica. I limiti della temperatura dipendono dalle condizioni di indurimento (indurimento a caldo o a freddo).

- Striscie adesive di alluminio

Le striscie adesive dotate di lamina di alluminio creano una buona barriera contro il vapore acqueo (barriera di diffusione). Come copertura aggiuntiva del punto di misura esse sono adatte a migliorare le caratteristiche di altri mezzi di protezione, in particolare il loro comportamento di resistenza nel tempo. Anche le lamine di alluminio sono molto adatte come protettivo supplementare del cavo di misurazione che in molti casi rappresenta l'anello più debole dell'intera catena.

- Mezzi fluidi per la protezione dei punti di misura

Alcuni problemi relativi alla protezione dei punti di misurazione si possono risolvere utilizzando liquidi isolanti. Per esempio l'applicazione interna di un piccolo contenitore che deve essere sottoposto a una prova di pressione. Se invece del solito liquido di pressione, l'acqua, si può impiegare un altro mezzo, molti problemi si risolvono nella maniera più semplice. L'unica premessa è che il mezzo prescelto possieda migliori caratteristiche isolanti e sia libero da additivi che attacchino l'estensimetro. Si possono trovare:

- olio senza acqua e senza acidi,
- olio di paraffina,
- petrolio puro.

Questo tipo di protezione del punto di misurazione con mezzi fluidi era già stato impiegato con successo per la protezione dei punti di misurazione permanenti, la capsula dei quali veniva riempita con il liquido prescelto. In quest'ambito bisogna accennare anche ad un altro mezzo eccellente:

il poli-isobutilene, le cui strutture molecolari scorrono come olio o dense come il miele (nome commerciale: Oppanol[®] B3, B10 e B15).

- Mezzi combinati

Un mezzo di protezione solo non è sempre sufficiente per una protezione effettiva. Gli esempi dell'impiego combinato di più mezzi sono già indicati in AK 22 e in ABM 75 (massa plastica più lamina di alluminio). Se si vuole aggiungere un'ulteriore protezione alla lamina metallica, si può per esempio applicare gomma siliconica SG 250.

Spesso ci sono diversi mezzi che agiscono su di un punto di misura, p.e. olio e acqua. In un caso simile p.e. l'ABM 75 solubile in olio dovrebbe essere direttamente applicato sull'estensimetro, seguito dalla lamina di alluminio che funge da barriera di diffusione e infine dalla resina epossidica resistente all'olio.

In caso di mezzi indefinibili, come p.e. l'acqua di mare, è assolutamente necessaria una protezione pluristrato. Per gli strati superiori, che non entrano in contatto con l'estensimetro, possono anche essere utilizzati materiali diversi da quelli citati, p.e. l'asfalto. Essi non devono sciogliere né modificare chimicamente gli strati sottostanti; per quanto riguarda la loro resistenza di isolamento elettrico invece non vengono poste condizioni.

Il problema della protezione del punto di misurazione è così complesso che è possibile fornire solo una panoramica generale. Nei casi critici si raccomanda senz'altro uno studio preventivo delle condizioni di impiego.

5. IL PONTE DI WHEATSTONE

Sir Charles Wheatstone (1802-1875), un fisico inglese, descrisse nel 1843 in [1-2] un collegamento tramite il quale era possibile misurare con precisione le resistenze elettriche. Questo collegamento è poi divenuto famoso con il nome di "Ponte di Wheatstone" (qui abbreviato in WB).

Il ponte di Wheatstone può essere utilizzato in vari modi per la misurazione delle resistenze elettriche:

- per la determinazione del valore assoluto di una resistenza tramite il confronto con una resistenza di grandezza nota,
- per la determinazione delle variazioni relative di resistenza.

Nella tecnica estensimetrica viene utilizzata la seconda possibilità che permette di misurare con grande precisione le variazioni di resistenza relative degli estensimetri che vanno generalmente da 10^{-4} a 10^{-2} Ω/Ω . Il ponte di Wheatstone, che può essere impiegato innumerevoli modi, verrà in seguito trattato esclusivamente dal punto di vista della sua applicazione nella tecnica estensimetrica.

5.1 Lo schema elettrico del ponte di Wheatstone

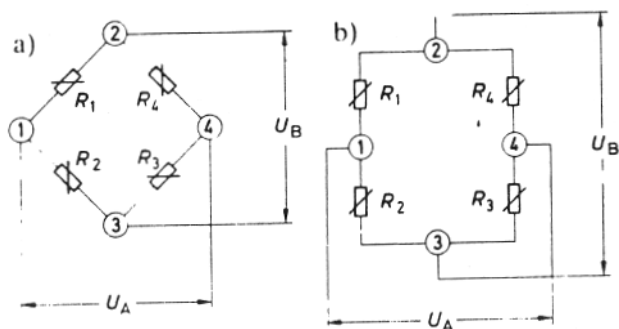
La fig. 5.1-1 mostra due rappresentazioni diverse ma elettricamente identiche del ponte: la 5.1-1a mostra la versione originale a forma di rombo.

La fig. 5.1-1b è una rappresentazione dello stesso collegamento di più facile comprensione anche per i profani.

I quattro bracci (o rami) del ponte vengono formati dalle resistenze da R_1 a R_4 . I punti d'angolo del ponte 2 e 3 indicano i collegamenti per la tensione di alimentazione del ponte U_B ; i punti d'angolo 1 e 4 indicano invece la tensione di uscita del ponte U_A , cioè il segnale di misurazione.

L'alimentazione avviene generalmente con una tensione continua o alternata applicata (stabilizzata) U_B . Occasionalmente viene utilizzata l'alimentazione a corrente, p.e. il metodo a doppia corrente.

I vantaggi del collegamento a ponte alimentato a tensione per quanto riguarda la sua correzione automatica delle deviazioni di linearità della caratteristica dell'estensimetro (par. 3.3-6) è segnalato in [5-1 fino a 5-4] ed è dimostrato sulla base di un esperimento in [3-29]. Un ulteriore vantaggio è l'insensibilità nei confronti delle tolleranze della resistenza estensimetrica. Nel seguito ci si limiterà perciò al ponte alimentato a tensione.



R_1, \dots, R_4 : Bracci del ponte 1... 4

U_B Tensione di alimentazione del ponte

U_A Tensione di uscita del ponte (segnale di misurazione)

Figura 5.1-1: Ponte di Wheatstone in due diverse rappresentazioni

Nota:

Per la denominazione delle parti del ponte e dei collegamenti non c'è purtroppo una regola generale. Le definizioni nella letteratura tecnica sono numerosissime e ciò si rispecchia naturalmente anche nelle equazioni relative. Per questo motivo è assolutamente necessario considerare le definizioni e gli elementi delle equazioni in relazione alla posizione delle parti del ponte all'interno del collegamento onde evitare interpretazioni sbagliate. In questo testo vengono utilizzate esclusivamente le definizioni della fig. 5.1-1.

5.2 Il funzionamento del ponte di Wheatstone

Se ai due punti di alimentazione del ponte 2 e 3 si applica una tensione U_B , questa si suddivide nei due semiponti R_1, R_2 e R_4, R_3 di volta in volta in rapporto alle resistenze del ponte, cioè ogni metà del ponte forma un divisore di tensione (fig. 5.2-1).

Le ulteriori osservazioni relative al ponte partono dal presupposto che la resistenza R_6 della sorgente della tensione di alimentazione sia trascurabilmente piccola e che la tensione interna dello strumento per la misurazione della corrente di uscita sia molto alta e non causi alcun disturbo al collegamento a ponte. Questo punto di vista è accettabile poichè gli strumenti usati nella realtà soddisfano ampiamente queste richieste.

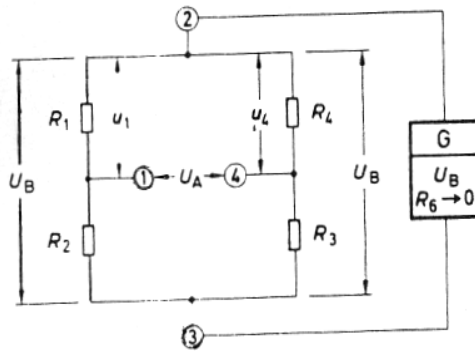


Figura 5.2-1: Funzionamento del ponte di Wheatstone alimentato in tensione. Spiegazioni nel testo.

La tensione parziale u_1 del punto 1 si calcola in:

$$u_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_B, \quad (5.2-1)$$

e la corrente parziale u_4 del punto 4 diventa:

$$u_4 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot U_B. \quad (5.2-2)$$

La differenza fra le due tensioni parziali è la corrente di uscita del ponte U_A :

$$U_A = U_B \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) = (u_1 - u_4). \quad (5.2-3)$$

Se si definisce come "sbilanciamento del ponte" la tensione di uscita relativa U_A / U_B , allora l'equazione (5.2-3) appare nella forma

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (5.2-3a)$$

oppure

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}. \quad (5.2-3b)$$

Ci sono due condizioni per le quali $U_A = 0$:

a) Quando tutte le resistenze del ponte sono grandi uguali.

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R,$$

b) Quando tutti i rapporti di resistenza delle due metà del ponte sono uguali.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}.$$

Per questi casi vale

$$\frac{U_A}{U_B} = 0,$$

il collegamento a ponte è "bilanciato".

Se le resistenze del ponte da R_1 a R_4 variano di ΔR , allora il ponte non è "bilanciato" e fra i punti 1 e 4, si crea una tensione di uscita U_A . L'equazione (5.2-3a) diventa:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4}. \quad (5.2-4)$$

Con l'equazione (5.2-4) si possono calcolare tutte le condizioni del ponte indifferentemente da quale resistenza di base R possiedano i singoli rami. Nella pratica però tutti i rami del ponte devono possedere la stessa resistenza, perlomeno le due metà ponte R_1, R_2 e R_3, R_4 devono avere resistenze uguali. Deviazioni nell'ambito delle tolleranze della resistenza negli estensimetri non hanno conseguenze sulla precisione di misurazione. Anche con differenze del 5% fra R_1 e R_2 l'errore rimane sotto lo 0,1%.

Nella tecnica estensimetrica i valori delle variazioni di resistenza degli estensimetri metallici sono generalmente molto piccoli, nell'ordine di grandezze di ca. il 10%. È perciò consueto usare al posto dell'equazione (5.2-4) l'equazione approssimata

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (5.2-5)$$

che, con questa premessa, fornisce risultati sufficientemente precisi per le esigenze pratiche. La formula approssimata mostra inoltre che è la variazione di resistenza relativa di ogni braccio del Ponte ad essere determinante per il bilanciamento del ponte stesso e non la variazione di resistenza assoluta. Invertendo l'equazione (3.3-1) si ottiene

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \epsilon, \quad (5.2-6)$$

per cui l'equazione (5.2-5) può essere espressa nella forma.

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \quad (5.2-7)$$

(Gli indici corrispondono alla numerazione dei lati del ponte.)

Le equazioni (5.2-4) e (5.2-5) partono dal presupposto che tutte le resistenze del ponte varino. Questo dato si può riscontrare nelle celle di carico o nei dispositivi di misura che vengono impiegati in funzioni simili. Nell'analisi sperimentale delle tensioni ciò non è corretto; in questo caso è generalmente solo una parte del lato del ponte ad essere occupata dall'estensimetro, il resto viene formato con resistenze di complemento. Per la differenziazione esistono definizioni come quarto di ponte, semiponte, due quarti di ponte o ponte diagonale e ponte intero. La fig. 5.2-2 mostra le diverse forme.

Le resistenze di complemento del ponte devono soddisfare severi criteri relativi alla loro stabilità nel tempo e alla loro indipendenza dalla temperatura. Le resistenze a film metallici altamente stabili hanno ottenuto buoni risultati. Questi complementi di ponte sono contenuti in alcuni amplificatori di misurazione. Al posto di queste resistenze assolutamente passive possono essere utilizzati anche estensimetri di compensazione in funzione di resistenze di complemento del ponte. Le condizioni che un estensimetro di compensazione deve soddisfare sono descritte nel par. 7.1.3.

Nel cap. 8 è invece spiegato come debbano essere usate le diverse forme del ponte.

Dalle equazioni (5.2-5 e 5.2-7) risulta evidente che le variazioni della resistenza, cioè le deformazioni che le causano, partecipano con segno diverso allo sbilanciamento del ponte e perciò al segnale di misura. Dal collegamento di uno strumento concepito per misurazioni di deformazioni con estensimetri risulta:

indicazione positiva quando $\epsilon_1 > \epsilon_2$ e/o $\epsilon_3 > \epsilon_4$

indicazione negativa quando $\epsilon_1 < \epsilon_2$ e/o $\epsilon_3 < \epsilon_4$

Osservazione:

I simboli "maggiore di" (>) o "minore di" (<) devano essere intesi in senso algebrico e non quantitativo!

Attenzione:

I valori di variazione degli estensimetri vicini nel collegamento si sottraggono quando hanno segno uguale (esempio di applicazione: compensazione della risposta alla temperatura, par. 7.1) e si sommano quando hanno segno diverso (esempio di applicazione: variazione di segnale, per esempio nelle celle di carico simili, par. 8.4).

Collegamento esterno

Collegamento di complemento

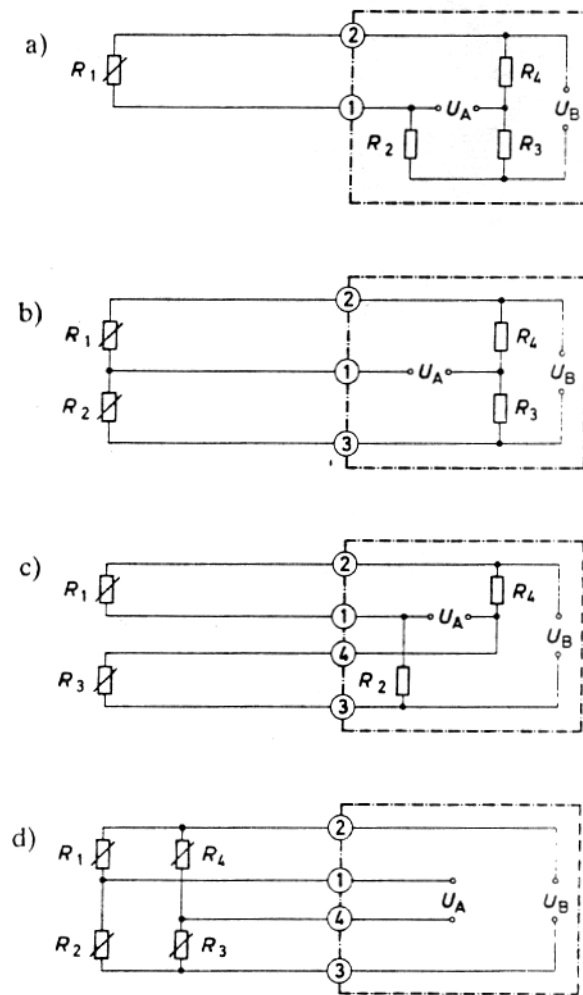
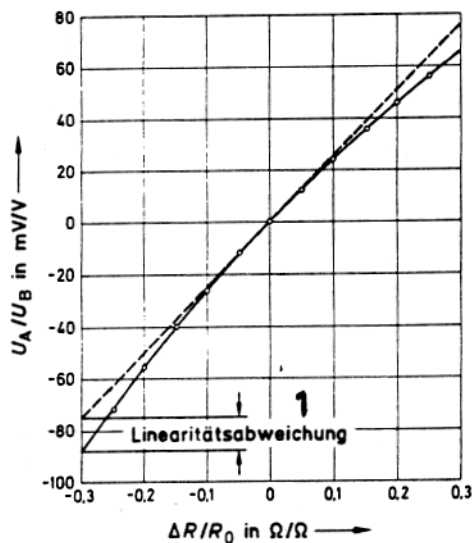


Figura 5.2-2: Forme del ponte di Wheatstone utilizzate nella tecnica estensimetrica

- a) quarto di ponte
- b) semiponte
- c) ponte a 2/4 o diagonale
- d) ponte intero

A seconda che le variazioni di resistenza si verifichino in uno o più lati del ponte e in relazione all'entità e al segno della variazione/i di resistenza può avere luogo una deviazione di linearità più o meno grande della variazione di frequenza del ponte.



1 Deviazione di linearità

Figura 5.2-3: Curva caratteristica del collegamento a ponte di Wheatstone nella forma a "quarto di ponte" secondo l'equazione (5.2-8) e curva di comparazione secondo la formula di approssimazione (5.2-9).

Una curva caratteristica strettamente lineare si forma quando la somma delle variazioni di resistenza nelle due metà ponte $\Delta R_1 + \Delta R_2$ e $\Delta R_4 + \Delta R_3$ diventa zero.

Si ha una deviazione di linearità massima nel collegamento a quarto di ponte (e in ugual misura nel collegamento a ponte a 2/4 o diagonale). La fig. 5.2-3 mostra l'andamento dello sbilanciamento del ponte U_A/U_B in relazione alla variazione di resistenza relativa $\Delta R/R$, nel ramo 1, calcolato secondo l'equazione.

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{\Delta R}{2(2R_0 + \Delta R)} \quad (5.2-8)$$

È premesso che $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R = R_0$. Per permettere il confronto la curva lineare calcolata secondo la formula di approssimazione

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{\Delta R}{4R_0} \quad (5.2-9)$$

è tratteggiata.

La deviazione di linearità del collegamento a quarto di ponte viene generalmente definita nella letteratura tecnica come il maggior difetto dei collegamenti a ponte alimentati in tensione in confronto ai ponti alimentati a corrente. Inoltre si trascura il fatto che l'estensimetro stesso mostra, nel caso di una grande deformazione, una deviazione di linearità di misura uguale ma di andamento opposto (par. 3.3.6). Un confronto con la fig. 3.3-18 mostra che le due deviazioni di linearità si compensano quasi completamente [3-29] (l'alimentazione a corrente costante non è capace di questa autocompensazione [5-1, 5-4]).

5.3 Alimentazione del ponte e amplificazione della tensione di uscita del ponte

Il ponte di Wheatstone può essere alimentato sia con tensione continua sia con tensione alternata. Il tipo di alimentazione deve essere scelto in relazione al sistema collegato a valle per l'amplificazione della tensione di uscita del ponte.

Gli amplificatori comuni contengono una fonte di tensione costante per l'alimentazione del collegamento a ponte. La tensione di alimentazione è generalmente commutabile a valori fissi fra 1 e 10 volt, per cui è possibile tenere in considerazione la caricabilità elettrica consentita dell'estensimetro (par. 3.3.8).

Gli amplificatori possiedono inoltre possibilità di messa a punto per la compensazione del punto di zero e la regolazione dell'amplificazione ai valori desiderati. Per gli amplificatori di misurazione a tensione alternata o a frequenza portante sono disponibili in caso di bisogno anche mezzi per la compensazione della fase.

Il compito primario dell'amplificatore è quello di innalzare il segnale di uscita del collegamento a ponte dai millivolt al livello dei volt. La tensione del segnale amplificata deve essere una raffigurazione il più possibile esatta della grandezza di misurazione. Le grandezze di disturbo come tensioni termiche e dispersioni di rete non devono avere alcuna influenza.

Le forme strutturali e le modifiche degli amplificatori di misura sono così numerose da non poter essere trattate in quest'ambito. Si possono però ottenere informazioni più dettagliate dalle pubblicazioni pertinenti. In seguito si farà solo un breve accenno alle principali differenze dei due sistemi.

L'amplificatore a corrente continua contiene un generatore che fornisce una tensione continua stabilizzata per l'alimentazione del collegamento a ponte. L'amplificatore a tensione continua, alimentato con la tensione di uscita del ponte, amplifica i segnali statici e dinamici fino ad alte frequenze. Nella pratica della misurazione di grandezze meccaniche è generalmente sufficiente un limite superiore di 10 kHz poiché oggetti meccanici con una certa massa lo potranno superare solo in casi estremi (per i quali l'amplificatore a tensione continua può essere facilmente modificato in caso di bisogno). Un esempio di un fenomeno meccanico ad alta frequenza è descritto nel par. 3.3.7.2.

Di norma le frequenze superiori vengono generate da impulsi di disturbo che devono essere tenuti il più lontano possibile dal segnale di misurazione. Lo svantaggio del dispositivo a tensione continua risiede nel fatto che le interferenze di disturbo vengono amplificate pienamente da campi elettrici o magnetici e dalle tensioni termiche e galvaniche originate nel circuito di misurazione e vengono inseriti come errore nel risultato di misura. Contro le interferenze di disturbo sono necessarie schermature elettriche o magnetiche. Gli errori dovuti alle tensioni termiche si possono riconoscere tramite l'inversione di polarità della tensione di alimentazione e devono venire corrette con calcoli.

Negli amplificatori a frequenza portante il generatore fornisce una tensione alternata a tensione e frequenza stabilizzate per l'alimentazione del ponte. Se il collegamento a ponte varia la frequenza tramite una grandezza fisica, p.e. una deformazione dell'estensimetro, allora esso fornisce, così come nel dispositivo a corrente continua, una tensione di uscita -in questo caso però una tensione alternata - le cui ampiezze sono proporzionali alla variazione di frequenza del ponte (modulazione di ampiezza). L'amplificatore è progettato in modo tale da amplificare solo la frequenza della tensione di alimentazione e le bande laterali relativamente piccole senza rilevare altre frequenze al di sopra o al di sotto. In questo modo vengono completamente esclusi tutti gli elementi a tensione continua di disturbo del segnale di misurazione (p.e. tensioni termiche che si possono formare nel circuito di misurazione). La frequenza portante viene scelta in modo tale che anche le tensioni alternate di disturbo, p.e. interferenze tramite la frequenza di rete e le sue armoniche e anche impulsi di disturbo ad alta frequenza, non influenzino il segnale di misurazione. Le frequenze portanti comuni sono 225 Hz e 5 kHz. Gli amplificatori TF a 225 Hz sono adatti per la misurazione di fenomeni statici e quasistatici (fino a 9 Hz), gli amplificatori TF a 5 kHz fanno fronte a fenomeni statici e dinamici fino a una frequenza di 1kHz (con attenuazione massima di 1 dB).

Un'osservazione tecnico-comparativa che va oltre la succitata differenziazione di massima fra i dispositivi alimentati in continua e quelli alimentati in alternata (a frequenza portante) è fornita in [5-5].

6 LA TARATURA DI UN DISPOSITIVO DI MISURA

Il compito di una misura è quello di rilevare il valore di una grandezza fisica e di rappresentarlo in forma numerica e codificata.

Per rilevare il valore di misurazione si utilizza un dispositivo di misura al cui inizio viene rilevata la grandezza fisica (rilevatore) e alla cui fine viene emesso il valore corrispondente (emettitore). I componenti del dispositivo si congiungono come gli anelli di una catena, da cui la definizione di catena di misura.

Ci si aspetta naturalmente che il valore numerico della grandezza fisica rilevata e il valore della misurazione uscente concordino. Questa concordanza si ottiene tramite la "calibrazione" del dispositivo di misurazione. Il termine di "taratura" usato in passato è riservato al corrispondente procedimento ufficiale effettuato dalle autorità responsabili. I concetti e le definizioni qui utilizzati seguono le osservazioni di [6-1] (vedere fig. 6.0-1).

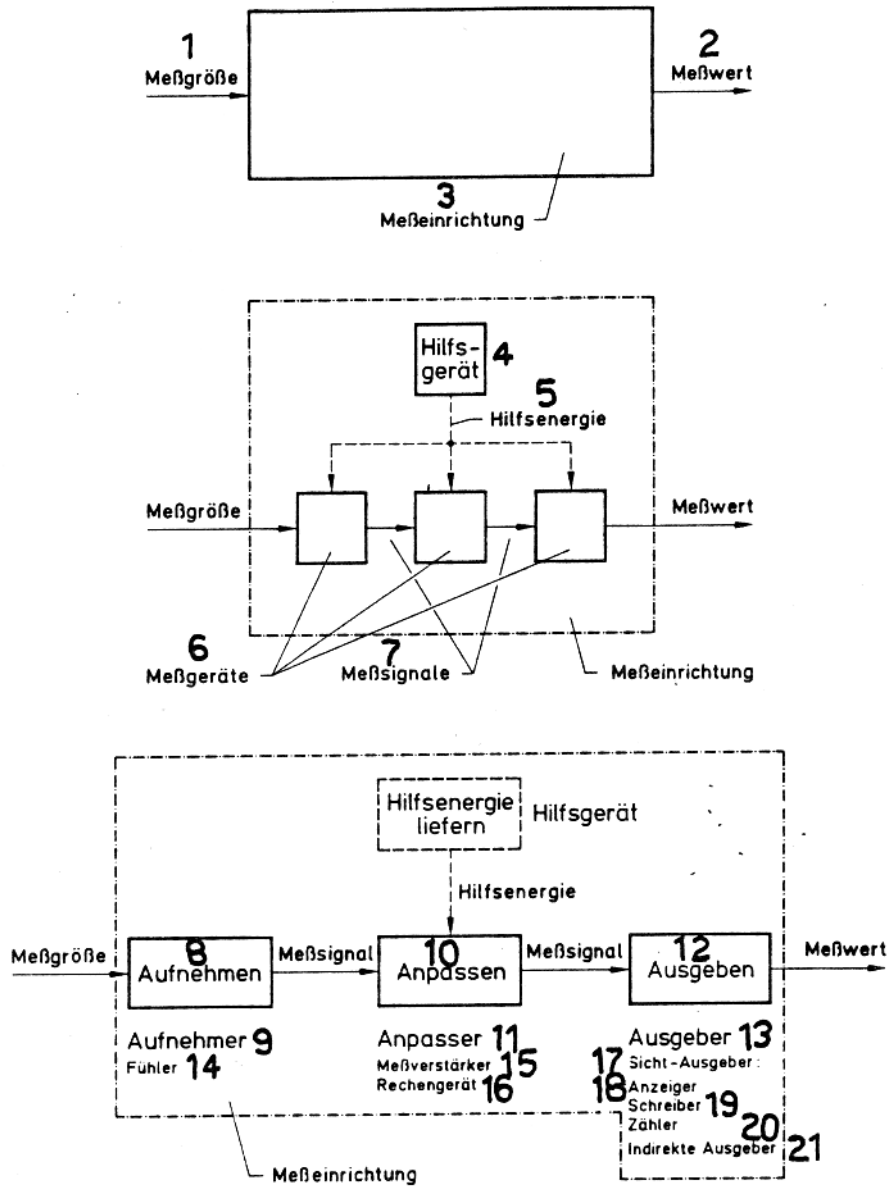
Il principio della calibrazione viene chiarito con un semplice esempio: la calibrazione di una bilancia a molla (fig. 6.0-2).

Si marca sulla scala la posizione dell'indicatore in condizione scarica e la si indica con "0". Quindi si appendono successivamente pesi diversi Q di valore noto sulla molla e si marca di volta in volta la posizione dell'indicatore sulla scala. In seguito si è in grado di determinare il peso sconosciuto di altri oggetti finché l'indicatore rimane all'interno della scala calibrata. I valori entro le marcature possono essere letti più o meno precisamente.

La precisione della calibrazione dipende dalla precisione dei pesi utilizzati.

La concordanza del valore indicato sulla scala con il valore della grandezza fisica di misura non deve consistere necessariamente in una uguaglianza numerica di per sé auspicabile, basta anche che la relazione sia realizzata tramite un fattore di proporzionalità noto. Questo fattore di proporzionalità viene ugualmente determinato tramite la calibrazione e deve essere considerato durante la lettura del valore di misurazione:

$$\text{valore di misurazione} = \text{valore sulla scala} \times \text{fattore}$$



- | | |
|----------------------------|---|
| 1 Grandezzas fisica misura | 11 Adattatore |
| 2 Valore di misura | 12 Emettere |
| 3 Dispositivo di misura | 13 Emittitore |
| 4 Apparecchio ausiliario | 14 Sensore |
| 5 Energia ausiliaria | 15 Amplificatore di segnale (di misura) |
| 6 Strumenti di misura | 16 Calcolatore |
| 7 Segnali di misura | 17 Emittitore a vista (display) |
| 8 Rilevare | 18 Indicatore |
| 9 Rilevatore | 19 Scrivente (plotter) |
| 10 Adattare | 20 Contatore |
| | 21 Emittitore indiretto |

Figura 6.0-1: Definizione del concetto "dispositivo di misura" e denominazione dei suoi elementi secondo [6-1].

Come è stato semplicemente mostrato con questo esempio, la calibrazione richiede che la grandezza da misurare sia applicata alla bilancia a molla con un valore numericamente il più preciso possibile. È necessario sia che la bilancia si trovi nella giusta posizione, sia che la grandezza agisca senza ostacoli (pesi). Questa condizione vale per ogni calibrazione.

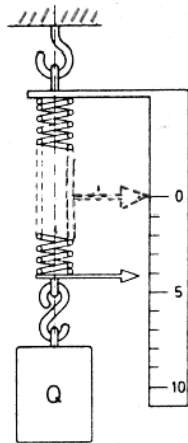


Figura 6.0-2: Schema per la calibrazione di una bilancia a molla.
Spiegazioni nel testo.

Nei dispositivi di misura meccanici l'introduzione della grandezza fisica per la calibrazione avviene di norma per via diretta (appendere un peso, misurare una distanza ecc.). Nel sistema di misura elettrica si procede nello stesso modo qualora sia possibile. Si verificano dei problemi laddove non sia disponibile una misura campione di calibrazione (peso di taratura, calibro a blocchetto) o esistano ostacoli tecnici di diverso tipo. Perciò questo tipo di calibrazione diretta non può essere impiegato nelle misurazioni di deformazioni con estensimetri. Il motivo è che una deformazione come valore di calibrazione non si può rappresentare con assorbimento sostituibile. In sostituzione vengono utilizzati altri metodi:

- la calibrazione con un segnale di calibrazione fornito da un amplificatore di misura (par. 6.2),
- la calibrazione in derivazione (par. 6.3),
- la calibrazione con uno strumento di calibratura (par. 6.4).

6.1 Il funzionamento dei dispositivi di compensazione e calibrazione di un amplificatore di misura

I dispositivi disponibili sotto la definizione "amplificatori di misura" (par. 5.3) sono costituiti - quando sono realizzati appositamente per la tecnica estensimetrica - oltre che dall'amplificatore vero e proprio, da altri numerosi strumenti ausiliari, come p.e. il collegamento supplementare a ponte, la fonte di alimentazione, le commutazioni del campo di misura, i dispositivi di calibrazione e diverse unità di compensazione (regolazione), che sono indispensabili per il lavoro pratico con gli estensimetri. Il concetto di "amplificatore di misura" definisce molto più di un semplice amplificatore.

In base alla loro concezione gli elementi costitutivi veri e propri dell'amplificatore hanno una curva caratteristica strettamente lineare, fig. 6.1-1a. Ciò vale in ugual misura per gli amplificatori a frequenza portante e per quelli a tensione continua. La tensione di uscita U_y è maggiore rispetto alla tensione di uscita U_x del fattore di amplificazione V . Se si collega all'amplificatore un collegamento a ponte formato da uno o più estensimetri, allora si risconterà che in seguito alle inevitabili differenze di resistenza minime dei bracci del ponte si è già verificata una variazione di frequenza del ponte. L'amplificatore riceve perciò di già una tensione di uscita del ponte sebbene la grandezza fisica di misurazione (deformazione, peso, momento torcente ecc.) non abbia ancora agito. Questo segnale è chiamato "segnale di tara" in base ai concetti della tecnica di pesatura (invece del "segnale di tara" si può trovare anche "segnale di zero" poiché la grandezza fisica ha valore zero). La curva caratteristica dell'amplificatore è spostata del valore del segnale di tara T (fig. 6.1-1b); lo spostamento può essere positivo o negativo.

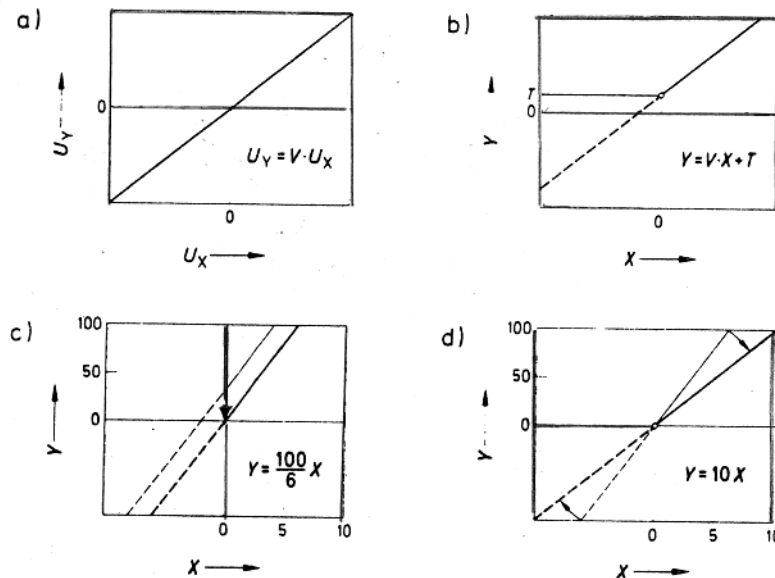
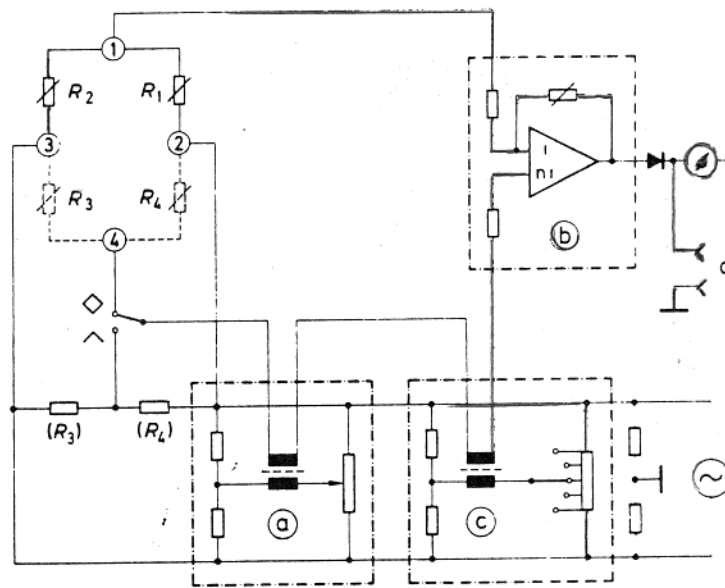


Figura 6.1-1: Il principio operativo degli elementi di taratura nell'amplificatore di misura.

- a) caratteristica dell'amplificatore
- b) effetto del segnale di taratura T sulla relazione tra la quantità misurata X e la lettura Y (spostamento del punto di zero)
- c) correzione della lettura di taratura mediante l'utilizzo del dispositivo di compensazione del punto di zero
- d) adeguamento di un rapporto intero tra la quantità misurata e la lettura ottenuta alterando l'impostazione del guadagno dell'amplificatore di segnale

Con l'ausilio di uno strumento di compensazione, chiamato compensatore del punto zero, del valore α o R , si può eliminare l'indicazione della tara, di modo che l'indicazione Y sia ora proporzionale al segnale X , fig. 6.1-1c. Il rapporto numerico fra grandezza fisica e indicazione, il fattore di amplificazione V , non è tuttavia arbitrario. Tramite una regolazione del grado di amplificazione si può effettuare, entro certi limiti, un adattamento che permetta di ottenere un rapporto totalmente numerico fra grandezza e indicazione. Nel diagramma della fig. 6.2-1d la variazione dell'amplificazione è indicata come rotazione della curva caratteristica attorno allo zero.



- a Segnale aggiuntivo per la compensazione del punto zero
- b Regolazione di amplificazione per la messa a punto della sensibilità
- c Generazione di un segnale di entità definita per una calibrazione indipendente dell'amplificatore
- d Uscita del segnale per elaborazione esterna

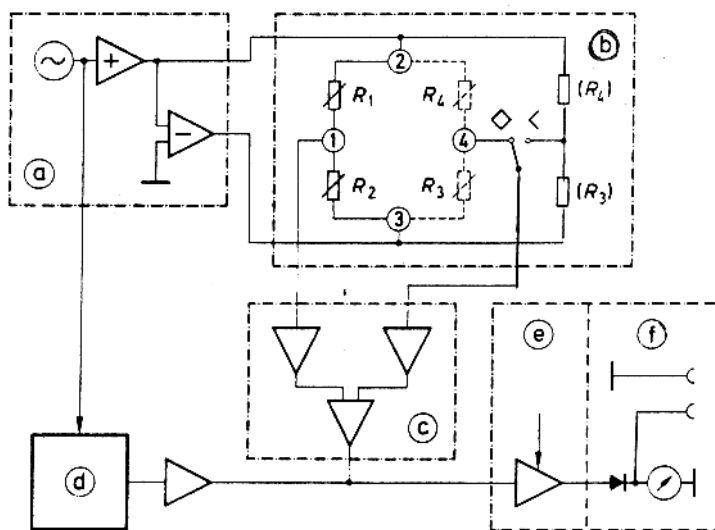
Figura 6.1-2: Collegamento del dispositivo di compensazione e regolazione di un amplificatore a frequenza portante (versione antiquata)

Un esempio del funzionamento del dispositivo di compensazione e regolazione è mostrato in fig. 6.1-2. Questo collegamento è stato nel frattempo sorpassato da altri più moderni tuttavia si adatta particolarmente bene per la spiegazione del principio.

Una tensione ausiliaria regolabile tramite potenziometro (a) viene aggiunta al circuito di misura e serve alla compensazione di tensioni di segnalazione dal collegamento di entrata, il ponte di Wheatstone, che possono generarsi in seguito ad un'asimmetria o a un carico di tara. Il segnale di compensazione - può essere positivo o negativo a seconda delle necessità - compensa la differenza fra il valore zero della grandezza fisica e il valore zero del segnale rendendo così superflue eventuali correzioni. Nella pratica la compensazione dello zero è generalmente suddivisa in un campo di compensazione di massima e medio discontinui e in un campo di compensazione fine continuo.

La regolazione dell'amplificazione (b) è continua per motivi di praticità. Inoltre con un interruttore speciale il campo di misurazione dello strumento si può commutare ripetutamente in gradi tarati e si può regolare su di un cosiddetto "selettore del fattore k " il valore numerico preciso del fattore k dell'estensimetro utilizzato. Anche la commutazione del campo di misurazione e il selettore del fattore k sono, sulla base della loro azione, dei regolatori di amplificazione.

Con il segnale di calibrazione (c) si possono ulteriormente inserire nel circuito di misura dei segnali di entità definita. In questo modo la catena di misura può essere calibrata dall'ingresso del segnale all'indicazione indipendentemente dal rilevatore collegato. Questo tipo di calibrazione è utile quando non sia possibile una calibrazione diretta della catena di misurazione.



- a Fonte di alimentazione, simmetrica verso terra
- b Collegamento del rilevatore e completamento del ponte per semiponti
- c Preamplificazione
- d Gruppo strutturale per la generazione di tensione di compensazione e calibrazione
- e Amplificatore finale con regolazione di amplificazione e adattamento del fattore k
- f Indicazione e segnale d'uscita per una rielaborazione esterna

Figura 6.1-3: Schema di collegamento di un amplificatore di misura di più recente fabbricazione.

La fig. 6.1-3 mostra lo schema elementare di un moderno amplificatore. Le funzioni sono le stesse di prima cosicché l'utente può lavorare con lo strumento come sempre; solo la struttura interna è stata modificata permettendo di ottenere determinati vantaggi. La resistenza interna estremamente bassa del generatore di alimentazione assicura delle condizioni di alimentazione totalmente analoghe anche in caso di grosse differenze della resistenza interna del ponte da collegare (del rilevatore). La preamplificazione simmetrica innalza il segnale di misurazione a un livello superiore. Un'alta soppressione isofase delle interferenze assicura una grande precisione di misura e un'alta precisione delle tensioni di compensazione e calibrazione generate in un gruppo costruttivo proprio. Il loro accoppiamento nel circuito di misura avviene con amplificatori operativi che consentono determinati miglioramenti rispetto all'accoppiamento trasformatorio precedente, in particolare nel collegamento dei rilevatori induttivi il cui funzionamento, nel caso di amplificatori a frequenza portante fino a 5 kHz, è possibile in alternativa ai rilevatori resistivi (ohmici) e agli estensimetri.

La regolazione dell'amplificazione, inclusa la commutazione del campo e l'adattamento del fattore k , avviene come finora negli amplificatori di uscita.

6.2 La calibrazione con il segnale fornito dall'amplificatore di misura

Gli amplificatori offerti per la tecnica estensimetrica contengono un interruttore o un pulsante attraverso cui un segnale definito può essere introdotto nel circuito di misura. Il valore del segnale di misurazione può essere indicato o nell'unità di deformazione in $\mu\text{m}/\text{m}$ o nella variazione di sbilanciamento del ponte in mV/V .

Nota importante!

Una calibrazione con il segnale trasmesso dall'amplificatore di misura non considera la resistenza che riduce la sensibilità dei lunghi cavi di collegamento fra estensimetro e amplificatore. Essa è sufficientemente precisa per i cavi corti (vedere anche par.7.2).

Se vengono utilizzati i $\mu\text{m}/\text{m}$, allora il valore numerico corrisponde con esattezza solo quando il fattore k dell'estensimetro possiede il valore 2,0. In caso di deviazioni del fattore k si procede secondo quanto indicato nel par. 6.5.

Se il segnale di calibrazione viene invece indicato in mV/V , allora si ha:

$$1 \text{ mV/V} \triangleq 2000 \mu\text{m/m} \quad , \quad k = 2,0.$$

La derivazione di questa corrispondenza è semplice. Nel par. 6.3 la variazione di frequenza del ponte U_A/U_B viene spiegata in conseguenza della deformazione dell'estensimetro.

Se nell'equazione (6.3-8) si pone $k = 2$ e $\varepsilon = 2000 \cdot 10^{-6}$ allora si ottiene

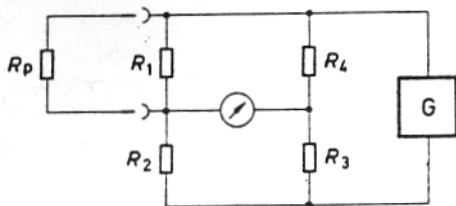
$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} k \cdot \varepsilon = \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot 2000 \cdot 10^{-6} = 1000 \cdot 10^{-6} \frac{\text{V}}{\text{V}} = 1 \frac{\text{mV}}{\text{V}}.$$

Anche qui, in caso di un fattore k differente, bisogna procedere secondo le possibilità descritte nel par. 6.5.

6.3 La calibrazione della derivazione (Shunt)

In tutti i casi in cui un dispositivo di misura non possa venire calibrato tramite l'effetto diretto della grandezza di misura con un valore sufficientemente preciso sul rilevatore (in questo caso l'estensimetro), si impiega metodo sostitutivo. In questo metodo si utilizza uno strumento ausiliario con cui si possa esercitare un effetto definito sul dispositivo di misura paragonabile a quella del rilevatore stesso.

In pratica è possibile variare lo sbilanciamento di un collegamento a ponte per mezzo di una resistenza di derivazione (Shunt). La fig. 6.3-1 mostra il principio della calibrazione Shunt. Il collegamento corrisponde ampiamente al reale collegamento estensimetrico.



$R_1...R_4$: resistenze dei rami del ponte (estensimetro)

R_p : resistenza parallela, Shunt

G: generatore della tensione di alimentazione

Figura 6.3-1: Principio della calibrazione Shunt .

Per il calcolo della variazione di frequenza del ponte è sufficiente utilizzare l'equazione di approssimata:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (6.3-1 \equiv 5.2-5)$$

Nel collegamento a quarto di ponte si ha: $\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = 0$

e rimane

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (6.3-2)$$

Si ha inoltre

$$R_p \parallel R \rightarrow R_r \quad (6.3-3)$$

$$R_r = \frac{R \cdot R_p}{R + R_p} \quad (6.3-4)$$

$$\Delta R = R_r - R \quad (6.3-5)$$

R_p = resistenza parallela (Shunt)

R = resistenza dell'estensimetro

R_r = resistenza risultante

ΔR = variazione di resistenza

Da ciò risulta

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{4} \cdot \frac{R_p - R}{R} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\frac{R \cdot R_p}{R + R_p} - R}{R}$$

$$= \frac{1}{4} \left(\frac{R_p}{R + R_p} - 1 \right). \quad (6.3-6)$$

Per l'estensimetro, dopo l'inversione dell'equazione (3.3-1), si ha:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (6.3-7)$$

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{4} \cdot k \cdot \varepsilon. \quad (6.3-8)$$

Se si indica il valore di calibrazione da calcolare con ε^* , allora si ha

$$\varepsilon^* = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{k} \left(\frac{R_p}{R + R_p} - 1 \right) \quad \text{in m/m} \quad (6.3-9)$$

oppure

$$\varepsilon^* = \frac{1}{k} \left(\frac{R_p}{R + R_p} - 1 \right) \cdot 10^6 \quad \text{in } \mu\text{m/m}. \quad (6.3-9a)$$

Se si collega in parallelo a un estensimetro un valore mille volte superiore alla sua resistenza e si parte inoltre da un fattore k approssimato = 2, allora risulta un valore di calibrazione $\varepsilon^* = 499,5 \mu\text{m/m} \approx 500 \mu\text{m/m}$.

Esempio:

$$\begin{aligned} R_{DMS} &= R = 120 \Omega \\ R_p &= 120 \text{ k}\Omega \\ k &= 2 \end{aligned} \quad \varepsilon = \frac{1}{2} \left(\frac{120,000}{120,120} - 1 \right) \cdot 10^6 = -499,5 \mu\text{m/m} \approx -500 \mu\text{m/m}$$

Il segno del valore di calibrazione diventa negativo quando si collega in derivazione uno dei rami del ponte R_1 o R_3 e positivo quando vengono invece collegati i bracci R_2 o R_4 .

Nei collegamenti a quarto di ponte si impiegherà l'estensimetro sempre nella posizione R del ponte a causa della concordanza di segno fra dilatazione e indicazione. Per questo motivo la calibrazione è possibile solo per il campo negativo e ciò presuppone l'impiego di uno strumento indicatore con campo negativo. La calibrazione vale allora anche per il campo positivo. Nei collegamenti a semiponte e a ponte la calibrazione è possibile naturalmente per entrambi i campi a seconda della posizione della resistenza derivata. L'esempio mostrato può servire per un esame approssimativo dei punti di misura estensimetrici; per la calibrazione i valori numerici di R_{DMS} , R_p e k noti devono essere il più precisi possibile, poiché da essi dipende la precisione della calibrazione.

Se si collega in derivazione direttamente su di un estensimetro, in contrapposizione al metodo descritto nel par. 6.2, allora vengono rilevati tutti gli effetti che agiscono sull'indicazione, come p.e. la resistenza del cavo di collegamento, il grado di amplificazione dell'amplificatore e la sensibilità dello strumento indicatore.

Se si rapporta il valore di calibrazione calcolato ε^* al valore di misura indicato ε_a , allora si ottiene un fattore di correzione F_c :

$$\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_a} = F_c. \quad (6.3-10)$$

Se si moltiplica ε_a con F_c si ottiene il valore di calibrazione ε^* numericamente uguale alla deformazione ε

$$\varepsilon_a \cdot F_c = \varepsilon^* = \varepsilon. \quad (6.3-11)$$

Un metodo più raffinato è quello di utilizzare amplificatori di misura con amplificazione regolabile (par. 6.1). Con essi è possibile fare coincidere numericamente l'indicazione con il valore di calibrazione ε^* , in modo da rendere superfluo un calcolo di correzione.

6.4 Calibrare con un uno strumento di calibrazione

Mentre il metodo descritto in 6.3 consente di mantenere un'ampia indipendenza dai valori della resistenza degli estensimetri impiegati e delle resistenze Shunt (esse devono solo essere note), gli strumenti di calibrazione devono essere fissati su determinati valori di resistenza standard, p.e 120 Ω e 350 Ω . Per poter determinare con precisione e poi eliminare le influenze dei cavi, le resistenze nominali dello strumento di calibrazione e dell'estensimetro devono coincidere. Lo strumento di calibrazione viene sempre installato nel collegamento al posto dell'estensimetro e del rilevatore, fig. 6.4-1, e viene poi di nuovo sostituito dopo la calibrazione dall'estensimetro o dal rilevatore.

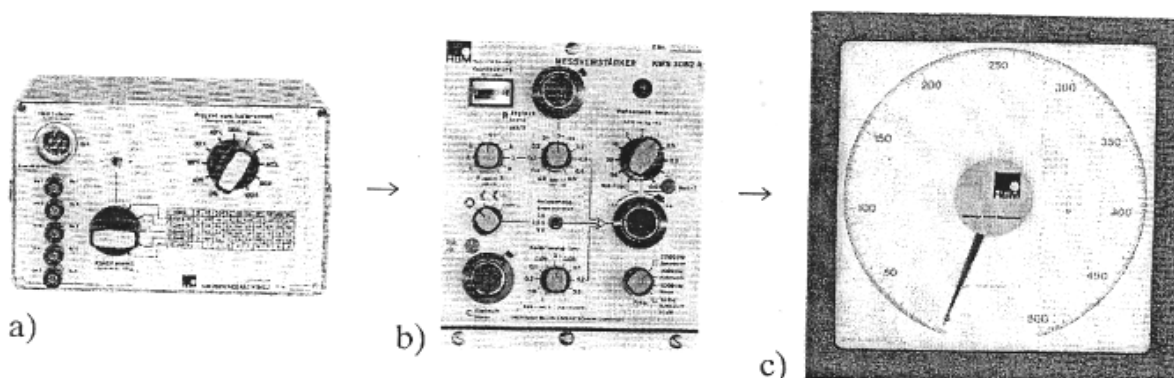


Figura 6.4-1: Disposizione dello strumento di calibrazione all'interno di un'unità di misurazione

- a) Strumento di calibrazione
- b) Amplificatore di misura
- c) Strumento indicatore

Gli strumenti di calibrazione possono lavorare in modi diversi. Lo strumento mostrato in fig. 6.4-2 lavora secondo il procedimento Shunt descritto nel par. 6.4-3, la fig. 6.4-3 mostra lo schema elementare.

Con le resistenze Shunt misurate con precisione e inserite nello strumento di calibrazione si possono generare variazioni di resistenza del ponte sia positive che negative di valore diverso. I diversi livelli della variazione di resistenza sono riportati nella scala di commutazione in mV/V. La relazione fra la variazione di frequenza del ponte indicata in mV/V U_A/U_B e la dilatazione ϵ viene definita dalla corrispondenza $1\text{mV/V} \triangleq 2000 \mu\text{m}$ con $k = 2,0$ (par. 6.2).

Il collegamento a ponte nello strumento di calibrazione si può commutare in caso di bisogno in semiponte o in ponte intero. Le resistenze Shunt sono collegate di volta in volta in parallelo solo a 1 ramo di ponte; parallelamente a R_1 , si ha un'indicazione negativa, parallelamente a R_2 si ha un'indicazione positiva. In questo modo si possono perciò calibrare senza problemi anche collegamenti a quarto di ponte; un tipo di collegamento che viene spesso utilizzato nell'analisi sperimentale delle tensioni. In questo caso si colleghi il cavo di collegamento dell'estensimetro ai morsetti 1 e 2 dello strumento di calibrazione. La calibrazione è allora possibile solo in direzione negativa.

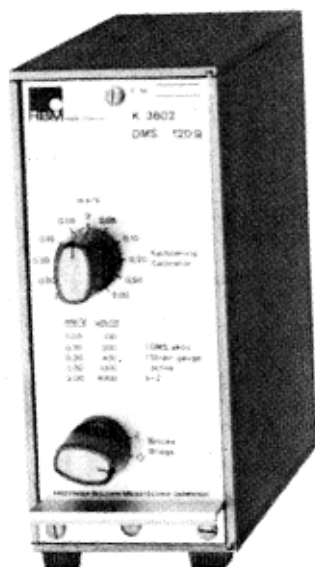


Figura 6.4-2: Strumento di calibrazione K3602 sistema "shunt calibration".

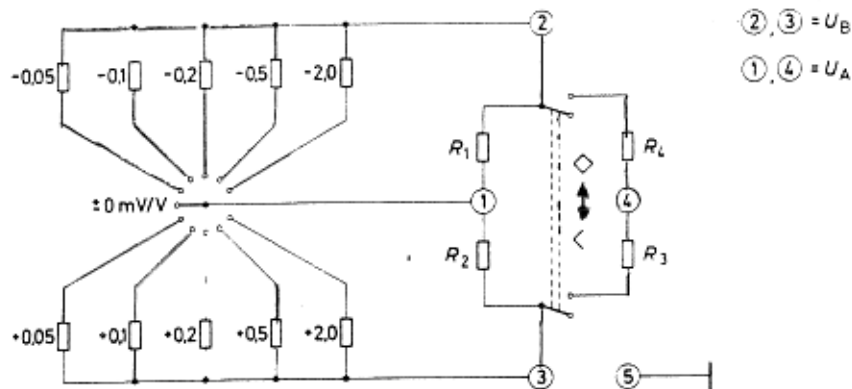


Figura 6.4-3: Schema elementare di uno strumento di calibrazione secondo il metodo Shunt

Quando i fattori k effettivi degli estensimetri impiegati differiscono dal valore di approssimazione 2 sono necessarie correzioni. Le diverse possibilità di correzione della calibrazione o del valore di misurazione sono descritte nel par. 6.5.

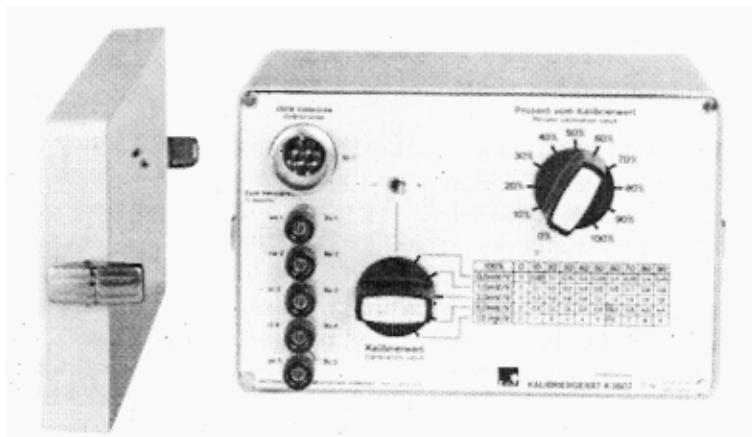


Fig. 6.4-4: Unità di calibrazione K 3607

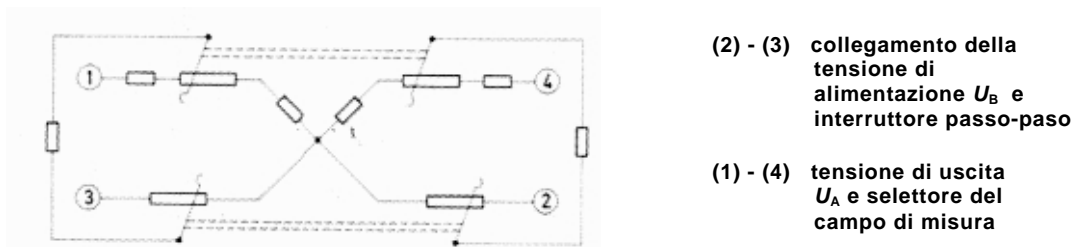


Fig. 6.4-5: Diagramma del circuito principale dell'unità di calibrazione K 3607.

Un altro principio è quello impiegato nello strumento K 3607 della fig 64-4. Esso contiene una rete di resistenza ad alta precisione in collegamento a stella che serve alla simulazione dello sbilanciamento del ponte dei rilevatori con collegamento a ponte intero dell'estensimetro. Con lo strumento di calibrazione vengono calibrati dispositivi di misurazione senza che il rilevatore appartenente venga alimentato con la grandezza di misura. Esso è realizzato per una resistenza del ponte di 350Ω in coincidenza con la resistenza standard del ponte dei rilevatori comuni. Attraverso 5 livelli diversi del segnale di calibrazione, che a loro volta sono suddivisi in sottogruppi del 10%, lo strumento può essere utilizzato anche per il controllo della linearità del dispositivo di misura. Le capacità e le indottanze proprie estremamente basse delle resistenze di precisione inserite permettono di raggiungere la classe di precisione 0,025 dello strumento di calibrazione.

Di solito si inseriscono cavi di collegamento lunghi fra estensimetro e amplificatore nella calibrazione per poter determinare anche influssi ohmici e capacitivi. Negli amplificatori di misura previsti allo scopo lo strumento di calibrazione può funzionare anche in un collegamento a 6 conduttori (par. 7.3.2).

6.5 Considerazione di un fattore k differente dal valore di approssimazione 2

Sui fogli caratteristiche delle confezioni di estensimetri il fattore k e la sua tolleranza previsti per il prodotto da impiegare sono indicati in percentuale. I fattori k effettivi possono differire di alcuni punti percentuali dal valore medio indicato nella tabella 3.3.1. Tuttavia le tolleranze per un determinato prodotto sono essenzialmente più restrittive e vanno generalmente da 0,5 a 1%. La tolleranza è riferita a estensimetri applicati correttamente e comprende oltre ai valori di dispersione essenzialmente inferiori anche le inevitabili influenze dell'applicazione.

Per l'utente è quindi importante calibrare il dispositivo di misurazione sul fattore k effettivo.

Negli amplificatori con selettore del fattore k quest'ultimo deve essere posto prima sul valore 2,0 poi viene determinato con la regolazione di sensibilità il valore di indicazione:

- o sulla base del valore numerico del segnale di calibrazione espresso in $\mu\text{m/m}$
- o sulla base del valore numerico 2000 per un segnale di calibrazione di 1 mV/V .

Si pone quindi il selettore del fattore k sul valore numerico dell'effettivo fattore k dell'estensimetro. Il selettore del fattore k modifica l'amplificazione nella proporzione $2:k$, cosicché la calibrazione del fattore k effettivo sia di nuovo corretta.

Negli amplificatori senza selettore del fattore k e negli strumenti di calibrazione il valore di calibrazione si calcola nel seguente modo:

a) Quando il segnale di calibrazione è espresso con il valore numerico Z in $\mu\text{m/m}$:

$$\epsilon^* = Z \cdot \frac{2}{k_{\text{DMS}}} \quad \text{in } \mu\text{m/m}, \quad (6.5-1)$$

b) Quando il segnale di calibratura è presente come sbilanciamento del ponte U_A/U_B in mV/V si ottiene

$$\epsilon^* = \frac{U_A}{U_B} \cdot 2000 \cdot \frac{2}{k_{\text{DMS}}}, \quad (6.5-2)$$

sempre in $\mu\text{m/m}$.

Esempio per a):

$$Z = 5000 \mu\text{m/m}$$

$$k_{\text{DMS}} = 2,07$$

$$\epsilon^* = 5000 \cdot \frac{2}{2,07} = 4830,9 \mu\text{m/m}.$$

Esempio per b):

$$\frac{U_A}{U_B} = 0,5 \text{ mV/V}$$

$$k_{\text{DMS}} = 2,06$$

$$\epsilon^* = 0,5 \cdot 2000 \cdot \frac{2}{2,06} = 970,9 \mu\text{m/m}.$$

Ora si regoli il regolatore di amplificazione dell'amplificatore di misura in modo tale che lo strumento indicatore mostri il valore numerico calcolato ϵ^* .

Negli indicatori digitali, nel caso dell'esempio a), si regolerà il valore su 4831, nel caso dell'esempio b) su 971.

Con un indicatore analogico con una scala a 100 lo strumento sarebbe regolato nel caso a) sul valore 48,3, nel caso b) sul valore 97,1 (sono da preferire scale in decimi). Le frazioni di $\mu\text{m/m}$ dovrebbero sempre essere arrotondate per eccesso.

7 METODI PER EVITARE O LIMITARE GLI ERRORI DI MISURA

Ogni misurazione, di qualunque tipo essa sia, è inevitabilmente accompagnata da un errore di misura. Per coloro che effettuano la misurazione si tratta di contenere gli errori entro limiti accettabili. Fino a che punto questi errori possano essere influenzati dipende:

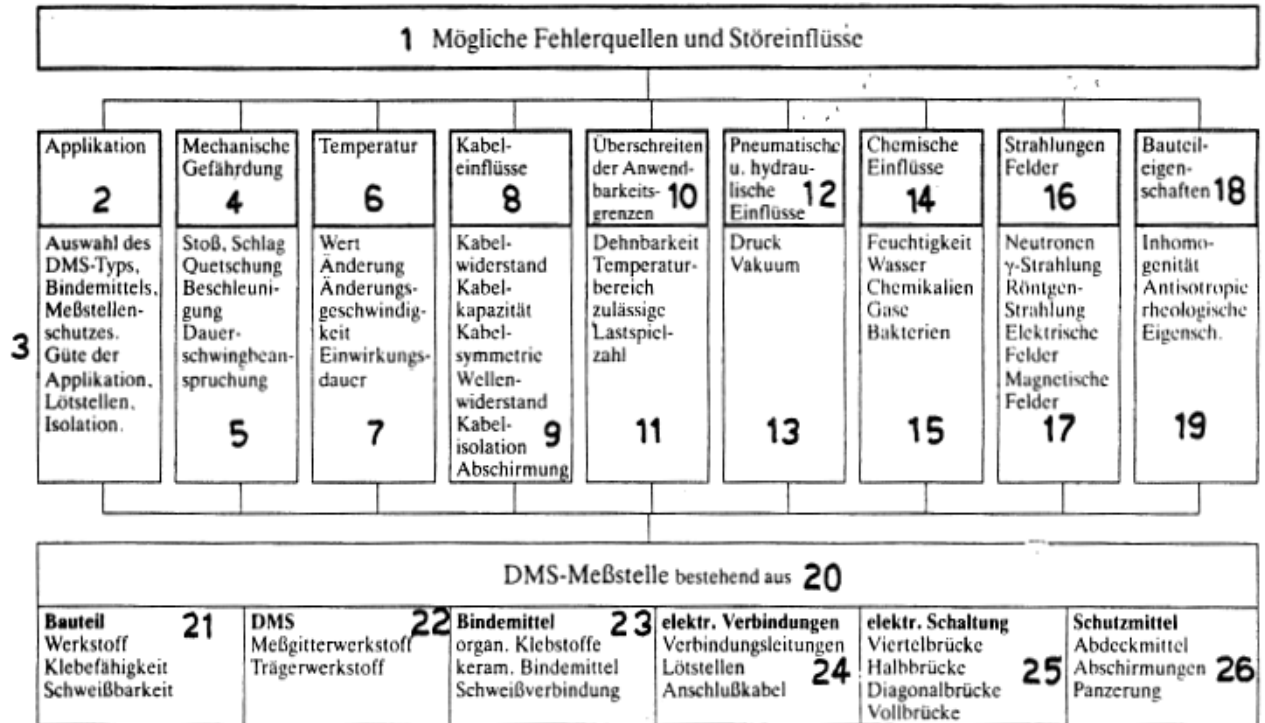
- dal procedimento di misura
- dalla cura e dalla precisione dell'utente
- dalla conoscenza delle possibili fonti di errore
- dalla conoscenza delle contromisure adeguate
- da quanto impiegato per l'eliminazione o la correzione dell'errore.

Inevitabile conseguenza della straordinaria varietà di applicazioni del procedimento estensimetrico è l'ampia gamma di influenze di disturbo. La tabella 7.0-1 fornisce un quadro d'insieme delle possibili fonti di errore e degli influssi di disturbo. In essa sono anche citati e chiariti gli elementi compresi nel concetto di "punto di misura con estensimetro".

In seguito non si parlerà delle fonti di errore negli amplificatori di misura, negli strumenti ausiliari ecc. Un metodo essenziale per evitare errori di misura, la calibrazione, è già stato trattato nel cap.6. Altre fonti di errore specifiche di un determinato strumento non possono essere esaminate in quest'ambito a causa della varietà di esecuzioni disponibili; si rimanda perciò alle relative istruzioni per il funzionamento nelle quali sono contenute le indicazioni necessarie. Inoltre gli errori causati dallo strumento hanno di norma un'importanza relativa, sempre ammesso che non ci siano errori di impiego.

Gli effetti di diversi elementi di disturbo nominati nella tabella 7.0-1 sono già stati trattati nel capitolo 3. Sono già state fornite anche raccomandazioni atte ad evitare, o perlomeno a limitare o a correggere, questi errori. I paragrafi seguenti descriveranno inizialmente altre misure di questo tipo.

Tabella 7.0-1: Possibili fonti di errore e azioni di disturbo relative a un punto di misura con estensimetro e spiegazione del concetto "punto di misura"



- 1 Possibili fonti di errore e azioni di disturbo
- 2 Applicazione
- 3 Scelta del tipo di estensimetro, leganti, protezione del punto di misura, correttezza dell'applicazione, punti di saldatura, isolamento
- 4 Pericoli meccanici
- 5 Urti, colpi, schiacciamento, accelerazione, sollecitazione di fatica
- 6 Temperatura
- 7 Valore, variazione, velocità di variazione, durata dell'effetto
- 8 Influenze del cavo
- 9 Resistenza del cavo, capacità del cavo, simmetria del cavo, impedenza caratteristica, isolamento del cavo, schermatura
- 10 Superamento dei limiti di applicabilità
- 11 Deformabilità, campo di temperature, numero di cicli di rottura consentito
- 12 Azioni pneumatiche e dinamiche
- 13 Pressione, vuoto
- 14 Influssi chimici
- 15 Umidità, acqua, sostanze chimiche, gas, batteri
- 16 Radiazioni, campi
- 17 Neutroni, raggi gamma, raggi γ , campi elettrici, campi magnetici
- 18 Caratteristiche dell'elemento strutturale
- 19 Eterogeneità, antisotropia, caratteristiche reologiche
- 20 Punto di misura estensimetrica costituito da:
- 21 Elemento strutturale, materiale, adesività, saldabilità
- 22 Estensimetro, materiale griglia, materiale supporto
- 23 Leganti, adesivi organici, leganti ceramici, giunti saldati
- 24 Connessioni elettriche, linee di collegamento, punti di saldatura, cavi di connessione
- 25 Collegamento elettrico, quarto di ponte, semiponte, ponte diagonale, ponte intero
- 26 Protettivi, mezzi di copertura, schermature, corazze

7.1 Compensazione della risposta alla temperatura

Una risposta alla temperatura si può verificare solo se la temperatura dell'oggetto da misurare, dei cavi di collegamento e/o delle apparecchiature rimanenti varia nel corso della misurazione. "Durante la misurazione" significa: fra l'assunzione del valore di riferimento (lettura dello zero) e l'assunzione del valore di misurazione di carico. La causa di una risposta alla temperatura dovuta all'estensimetro è già stata descritta nel par. 3.3.4. In questo paragrafo sono anche chiariti il funzionamento e i limiti di una compensazione automatica del fenomeno tramite un estensimetro autocompensante.

Un ulteriore, spesso non trascurabile contributo alla risposta alla temperatura di un punto di misurazione può essere fornito dai collegamenti elettrici nel collegamento a ponte. Esso ha luogo in particolar modo quando gli estensimetri sono collegati gli uni agli altri con cavi lunghi o con amplificatori. Nei sottoparagrafi successivi verranno descritte le possibilità di compensazione di tipo tecnico.

Si è solo accennato in quest'ambito all'eventualità di un effetto di risposta alla temperatura tramite amplificatori collegati a valle. Se e in che misura esso possa avere luogo lo si può ricavare dai dati tecnici degli strumenti.

Come è già stato constatato nell'introduzione non si può verificare una risposta alla temperatura qualora essa sia costante. Tuttavia, nel caso di un oggetto dilatato in un ambiente normale, una corrente d'aria dalla finestra aperta o una porta spalancata per breve tempo possono essere sufficienti per sconvolgere una misurazione anche se la differenza di temperatura è minima. In questo caso la causa non è tanto la risposta alla temperatura ma la deformazione dell'oggetto dovuta a un raffreddamento irregolare. Ciò causa delle dilatazioni relative che vengono rilevate e indicate dagli estensimetri. Sebbene in un caso simile i valori di misurazione dell'estensimetro siano corretti, la loro interpretazione in riferimento allo scopo di misurazione può diventare impossibile, (vedere anche par. 8.4.7: misurazione delle tensioni termiche). In questo caso è necessario eliminare la causa di errore.

In linea di massima si dovrebbero usare degli estensimetri che autocompensano i coefficienti di dilatazione termica del materiale dell'oggetto di misurazione. Nei casi in cui l'autocompensazione dell'estensimetro non sia sufficiente per i motivi descritti nel par. 3.3.4, oppure non sia disponibile un estensimetro adatto al coefficiente di dilatazione termica del materiale dell'oggetto, si possono utilizzare le possibilità di compensazione offerte dal ponte di Wheatstone.

Il principio di compensazione del collegamento a ponte si basa sul fatto che i segnali di disturbo con uguale direzione che agiscono su rami di ponte vicini partecipano alla variazione di frequenza del ponte con segni contrapposti e perciò si dimuiscono reciprocamente e, se sono della stessa entità, si compensano completamente. Il funzionamento diventa chiaro osservando l'equazione (7.1.-1) derivata dall'equazione (5.2-7).

$$\varepsilon_a = \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_B} = + \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4. \quad (7.1-1)$$

ε_a è il valore di dilatazione indicato, ε_1 fino a ε_4 sono i segnali di deformazione forniti dai bracci del ponte da 1 a 4.

Per quanto riguarda la risposta alla temperatura, sono problematiche le misurazioni di materiali eterogenei, p.e. materiali a matrice polimerica con rinforzo di fibre. Le fibre di carbonio e di vetro hanno dei coefficienti di dilatazione notevolmente inferiori rispetto ai materiali polimerici che le uniscono. Da ciò risultano, in particolare negli elementi con fibre orientate, differenti coefficienti di dilatazione in direzione longitudinale o trasversale con tutti i valori intermedi nelle direzioni fra i due estremi. I valori dei coefficienti dipendono dai materiali interessati tanto quanto dal grado di riempimento. Non sono realizzabili degli estensimetri autocompensanti per materiali come questi. Una compensazione della risposta alla temperatura per mezzo di estensimetri di compensazione può essere soddisfacente solo se essi vengono applicati a identiche condizioni ad un elemento di un unico materiale. Valori di dispersione delle caratteristiche dei materiali superiori a quelli normali per i metalli, e perciò, maggiori errori residui di risposta alla temperatura, in questo caso devono essere tollerati.

7.1.1 Compensazione della risposta alla temperatura nel collegamento a quarto di ponte semplice

Nell'analisi sperimentale delle sollecitazioni e nei campi di applicazione affini vengono impiegati quasi esclusivamente collegamenti a quarto di ponte (par. 5.2, fig. 5.2-2a). Per la compensazione della risposta alla temperatura sono utilizzabili solo le possibilità offerte dagli estensimetri autocompensanti (par. 3.3.4). La risposta alla temperatura cavi di collegamento (cioè dei cavi di connessione fra l'estensimetro e il resto del collegamento a ponte) rimane tuttavia attiva. Essa è causata dalla dipendenza alla temperatura della resistenza elettrica dei conduttori. Nel rame il coefficiente di temperatura della resistenza elettrica è di ca. 0,4%/K (incremento della resistenza all'aumentare della temperatura). Per i materiali impiegati nel campo delle alte temperature (leghe di cromo e nichel, leghe di platino) le variazioni di resistenza dipendenti dalla temperatura sono molto maggiori.

Tutte le variazioni di resistenza che si verificano in un collegamento a ponte causano uno sbilanciamento del ponte. Il collegamento a ponte non può distinguere fra le variazioni di resistenza dell'estensimetro e quelle dei cavi di connessione collegati in serie all'estensimetro stesso. Questa ulteriore risposta alla temperatura riduce anche l'efficacia degli estensimetri autocompensanti o la annulla completamente.

La fig. 7.1-1 mostra un semplice collegamento a quarto di ponte. Riscaldando i cavi di collegamento si ottiene un'indicazione anche se il punto di applicazione non è sollecitato meccanicamente o termicamente. L'indicazione è positiva nel ramo del ponte 1 e sarebbe negativa nel ramo del ponte 2.

Un esempio chiarirà la misura dell'influenza di una risposta alla temperatura dovuta al cavo.

Esempio:

Un filo di rame di 1m di lunghezza (0,5 m di andata e 0,5 m di ritorno) e $0,15 \text{ mm}^2$ di sezione collegato in serie ad un estensimetro a 120Ω causa, con una variazione di temperatura di 10 K, una risposta alla temperatura di $20 \mu\text{m/m}$. Alle stesse condizioni ma con un estensimetro a 350Ω la risposta alla temperatura è solo di $7 \mu\text{m/m}$.

Il semplice collegamento a quarto di ponte secondo la fig. 7.1-1 dovrebbe perciò essere utilizzato solo con cavi corti e in una certa misura a temperatura costante, p.e. in condizioni di laboratorio. I fili più lunghi che durante una misurazione sono esposti ai raggi solari e alla pioggia possono causare notevoli errori di misurazione.

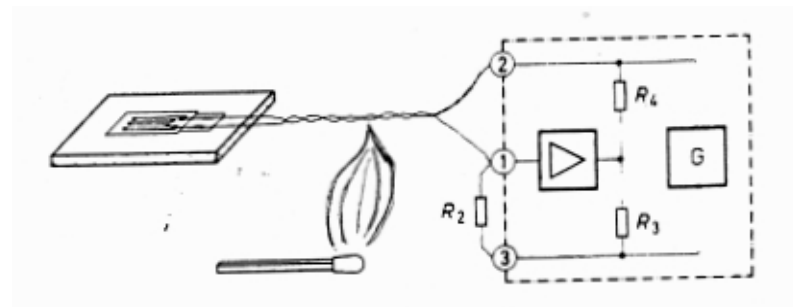


Figura 7.1-1: Risposta alla temperatura tramite riscaldamento del cavo in un collegamento a quarto di ponte semplice.

Calcolo della risposta alla temperatura tramite riscaldamento del cavo nei conduttori che sono collegati in serie all'estensimetro nello stesso ramo di ponte.

α_{MK} = Risposta alla temperatura del punto di misurazione in seguito a riscaldamento del cavo

α_K = Coefficiente di temperatura del materiale del filo

$$\alpha_{Cu} \approx 0,004 \frac{\Omega}{\Omega} \cdot \frac{1}{K}$$

ρ = Conducibilità del materiale del filo $\rho_{Cu} \approx 0,018 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$

$\Delta\vartheta$ = variazione della temperatura

R_K = resistenza del cavo

ΔR_K = variazione della resistenza del cavo

R_{DMS} = resistenza dell'estensimetro

k = fattore k dell'estensimetro

L = lunghezza del filo

A = sezione del conduttore

$$\alpha_{MK} = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta R_K}{R_{DMS} + R_K} \quad (7.1-2)$$

$$R_K = \rho \cdot \frac{l}{A}; \quad \begin{matrix} l \text{ in m} \\ A \text{ in mm}^2 \end{matrix} \quad (7.1-3)$$

$$\Delta R_K = R_K \cdot \alpha_K \cdot \Delta\vartheta = \rho \cdot \frac{l}{A} \cdot \alpha_K \cdot \Delta\vartheta \quad (7.1-4)$$

$$\alpha_{MK} = \frac{\rho \cdot l/A \cdot \alpha_K \cdot \Delta\vartheta}{k(R_{DMS} + \rho \cdot l/A)} \cdot 10^6 \quad \text{in } \mu m/m \quad (7.1-5)$$

7.1.2 Compensazione della temperatura in un quarto di ponte in collegamento a tre conduttori

Le rappresentazioni del funzionamento del ponte di Wheatstone (cap. 5) rendono evidente che le variazioni di resistenza con lo stesso segno che si verificano in rami vicini diminuiscono lo sbilanciamento del ponte e, se uguali, si eliminano reciprocamente. Questa particolarità del collegamento a ponte si utilizza in svariati modi per la compensazione degli effetti di disturbo inclusa la risposta alla temperatura.

Con il cosiddetto collegamento a 3 conduttori è possibile collegare i conduttori in rami vicini che causano la risposta alla temperatura. Ciò si realizza se si preleva il potenziale elettrico della tensione di uscita del ponte direttamente dall'estensimetro attraverso un terzo conduttore e lo si immette nello strumento di misurazione (da ciò il nome di „collegamento a 3 conduttori“).

Nella fig. 7.1-2 sono posti a confronto il collegamento a quarto di ponte semplice (a) e il collegamento a 3 conduttori (b).

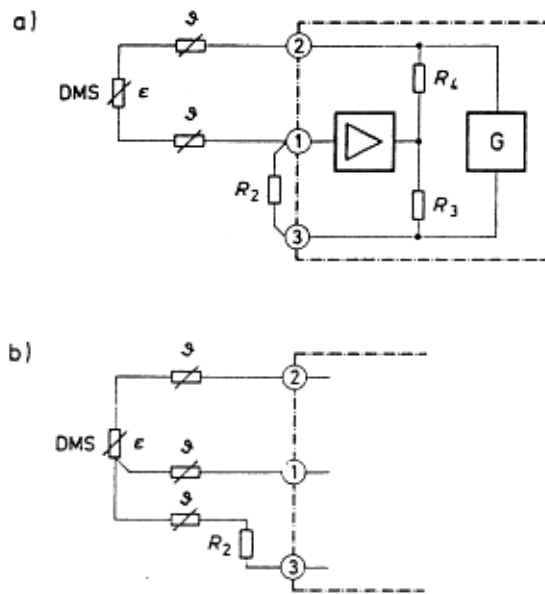




Figura 7.1-2: Confronto fra collegamento a 2 e a 3 conduttori nel collegamento a quarto di ponte

- a) Connessione a 2 conduttori, cavo di andata e di ritorno in serie con l'estensimetro
- b) Connessione a 3 conduttori in serie con l'estensimetro, cavo di ritorno in serie con

 la resistenza complementare R_2
 simbolo della resistenza del conduttore dipendente dalla temperatura

Per una compensazione totale è necessario che il cavo di andata e di ritorno possiedano dati fisici identici (lunghezza, sezione, coefficiente di temperatura) e siano esposti alle stesse condizioni di temperatura in tutta la loro lunghezza (cavi in involucro comune, p.e. cavi a 3 fili). Attenzione! Fili dall'aspetto esteriore identico possono avere coefficienti di temperatura diversi se non sono della stessa produzione. Il terzo filo (potenziale) conduce all'ingresso dell'amplificatore altamente ohmico; la sua resistenza propria e le piccole variazioni di quest'ultima non esercitano perciò alcuna azione di disturbo sulla misura.

Il collegamento a 3 conduttori è utilizzabile quando il ponte è alimentato a tensione continua o, se le linee sono lunghe solo pochi metri, anche a frequenza portante. Se i cavi sono molto lunghi e l'alimentazione avviene con tensione ad alta frequenza (p.e. 5 kHz di frequenza portante), l'asimmetria capacitiva può causare dei problemi (riconoscibili dal controllo di modulazione dell'amplificatore TF). Al riguardo vedere il par. 7.4.

7.1.3 Compensazione della risposta alla temperatura di un quarto di ponte con estensimetro di compensazione

Un'ottima compensazione della dilatazione termica si ottiene nei collegamenti a quarto di ponte con gli estensimetri di compensazione.

L'estensimetro di compensazione si differenzia da quelli di misura (attivi) solo per la sua funzione nel collegamento di misura. Per il resto esso deve possedere le stesse caratteristiche fisiche degli altri estensimetri e dovrebbe perciò provenire dalla stessa confezione e dallo stesso lotto di produzione.

Non è strettamente necessario, ma senz'altro molto utile, utilizzare per l'estensimetro di misura e per quello di compensazione degli estensimetri autocompensanti, in particolar modo quando le seguenti esigenze non possono essere totalmente soddisfatte:

L'estensimetro di compensazione deve essere applicato ad un punto dell'oggetto non sollecitato meccanicamente e deve subire le stesse variazioni di temperatura, a livello di tempo e di grado, dell'estensimetro misurante. Un punto simile è talvolta molto difficile o quasi impossibile da trovare su di un oggetto. Si può allora applicare l'estensimetro ad un pezzo del materiale di cui è composto l'oggetto (un pezzettino di lamiera p.e.) che entrerà in contatto termico con l'oggetto stesso. Il contatto termico può essere instaurato tramite la semplice sovrapposizione, l'adesione parziale o il fissaggio meccanico, l'avvitamento o la saldatura a punti di un angolo o di uno spigolo. All'elemento di compensazione non deve essere trasmessa alcuna sollecitazione meccanica dall'oggetto di misurazione ed esso non si deve neanche deformare per effetto della temperatura, a causa per esempio di sforzi residivi. Deve essere anche abbastanza rigido da non oscillare in caso di scosse, perché ciò causerebbe degli errori di misurazione.

La capacità termica (il volume) dell'elemento di compensazione dovrebbe essere bassa cosicché la sua temperatura segua velocemente le variazioni di quella dell'oggetto. Solo dopo l'equilibratura della temperatura la compensazione è di nuovo completa. In caso di piccoli raggi di curvatura del punto di misura si osservino le indicazioni del par. 3.3.4 e si cerchi di ottenere anche in quest'ambito una concordanza fra oggetto ed elemento di compensazione.

L'estensimetro di misura e quello di compensazione sono collegati elettricamente come semiponte di Wheatstone (par. 5.2 e fig. 5.2-2b), con R_1 come ramo di misura e R_2 come estensimetro di compensazione, fig. 7.1-3. Dal punto di vista della tecnica di misurazione questo è un collegamento a quarto di ponte, da quello della tecnica dei collegamenti si tratta invece di un collegamento a mezzo ponte. Si osservi la differenza funzionale! Il tipo di collegamento a) viene impiegato quando l'estensimetro di compensazione viene applicato nelle immediate vicinanze dell'estensimetro di misura. La forma b) si usa invece quando l'estensimetro di compensazione è lontano da quello di misura. Essa viene anche utilizzata quando diversi estensimetri di misura vengono fatti funzionare uno dopo l'altro, per esempio tramite un commutatore dei punti di misura, con un estensimetro di compensazione comune.

Gli effetti della risposta alla temperatura dei cavi di connessione si compensano, se anche in questo caso vengono rispettate le condizioni richieste nel par 7.1.2 per il collegamento a 3 conduttori.

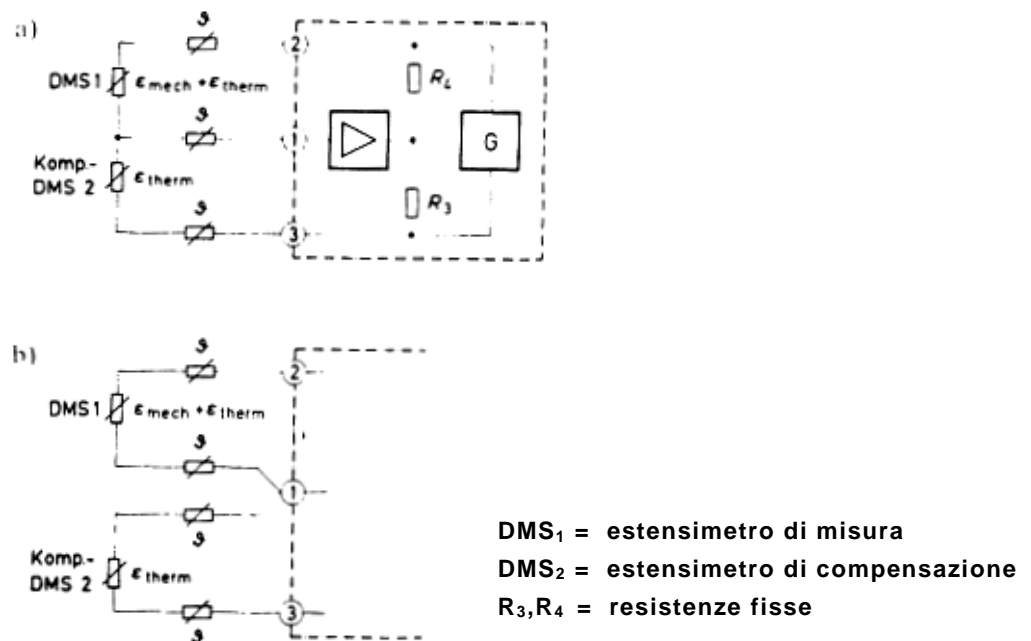


Figura 7.1-3: Collegamento con estensimetro di compensazione
a) e b) possibilità di collegamenti alternativi

Un esempio chiarirà la compensazione della deformazione termica.

L'estensimetro 1 fornisce come segnale di misura ϵ_1 la somma della deformazione meccanica ϵ_{mech} e della deformazione termica ϵ_{therm} . L'estensimetro di compensazione 2 fornisce come segnale di deformazione ϵ_2 solo la deformazione termica ϵ_{therm} dell'elemento di compensazione.

$$\epsilon_a = \underbrace{(\epsilon_{mech} + \epsilon_{therm})}_{\epsilon_1} - \underbrace{(\epsilon_{therm})}_{\epsilon_2}$$

I rami del ponte R_3 , R_4 sono sostituiti da resistenze fisse il cui contributo al segnale totale ϵ_a nell'equazione (7.1-1) è zero, cosicché l'espressione si abbrevia in:

$$\epsilon_a = \epsilon_1 - \epsilon_2. \tag{7.1-6}$$

Il valore di misura indicato ϵ_a corrisponde perciò da solo alla deformazione ϵ_{mech} causata dalla sollecitazione meccanica dell'oggetto.

Se l'estensimetro di compensazione è usato correttamente vengono eliminati totalmente anche i residui di risposta alla temperatura inevitabili degli estensimetri autocompensanti (figure 3.3-10 e 3.3-11).

7.1.4 Compensazione della risposta alla temperatura nel ponte a 2/4 o diagonale

La definizione di ponte a 2/4 definisce meglio di quelle ponte diagonale il funzionamento del collegamento descritto nella fig. 7.1-4. Ogni metà ponte 2-1-3 e 2-4-3 è costituita da un quarto di ponte con resistenza complementare secondo la fig. 7.1-4a o alternativamente da un quarto di ponte con estensimetro di compensazione secondo la fig. 7.1-4b. Dal punto di vista della tecnica dei collegamenti si tratta effettivamente di un collegamento a ponte intero, per quanta riguarda le sue funzioni esso non deve però essere confuso con quest'ultimo collegamento.

Per la compensazione delle risposte alla temperatura causate dai cavi di connessione viene usato nella fig. 7.1-4a il collegamento a 3 conduttori secondo il par. 7.1.2 e nella fig. 7.1-4b il collegamento di compensazione secondo il par. 7.1.3.

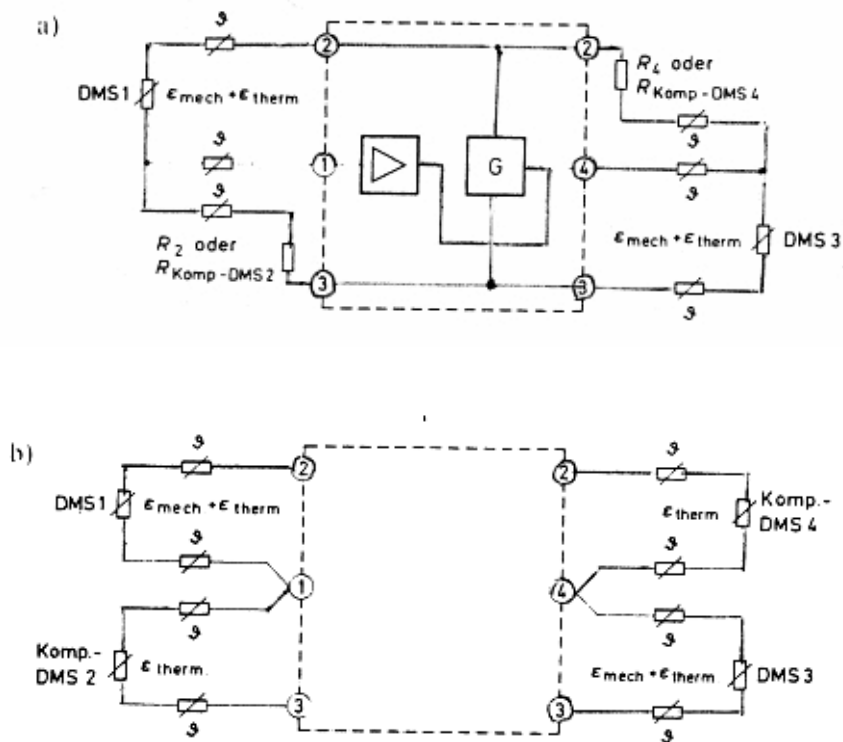
Il valore di misura ϵ_a è costituito, nel caso di impiego di resistenze fisse per R_2 e R_4 da:

$$\epsilon_a = \underbrace{(\epsilon_{\text{mech } 1} + \epsilon_{\text{therm } 1})}_{\epsilon_1} - \underbrace{\text{null}}_{\epsilon_2} + \underbrace{(\epsilon_{\text{mech } 3} + \epsilon_{\text{therm } 3})}_{\epsilon_3} - \underbrace{\text{null}}_{\epsilon_4}.$$

Il collegamento fornisce la somma delle deformazioni meccaniche ϵ_1 più ϵ_3 . Le deformazioni termiche devono essere eliminate tramite gli estensimetri autocompensanti e rispettando le condizioni valide per il loro funzionamento (par. 7.1.1 e 7.1.2). Se si utilizzano estensimetri di compensazione per R_2 , R_4 , diventa:

$$\epsilon_a = \underbrace{(\epsilon_{\text{mech } 1} + \epsilon_{\text{therm } 1})}_{\epsilon_1} - \underbrace{(\epsilon_{\text{therm } 2})}_{\epsilon_2} + \underbrace{(\epsilon_{\text{mech } 3} + \epsilon_{\text{therm } 3})}_{\epsilon_3} - \underbrace{(\epsilon_{\text{therm } 4})}_{\epsilon_4}.$$

Se vengono mantenute le condizioni preliminari descritte nel par. 7.1.3, allora si avrà un'ottima compensazione della risposta alla temperatura. Il ponte a 2/4 viene impiegato relativamente di rado.



DMS 1 e DMS 3 sono estensimetri di misura (attivi)

R_2 e R_4 sono resistenze complementari o estensimetri di compensazione

Figura 7.1-4 : Ponte a 2/4 o diagonale

a) in collegamento a 3 conduttori

b) con estensimetri di compensazione

7.1.5 Compensazione della risposta alla temperatura nel collegamento a mezzo ponte

La compensazione della risposta alla temperatura tramite il collegamento a mezzo ponte funziona nello stesso modo dell'estensimetro di compensazione, infatti devono essere soddisfatte le stesse premesse. Essa si differenzia dal secondo metodo per il solo fatto che l'estensimetro del ramo 2 non deve necessariamente essere applicato su di un punto non soggetto a sollecitazioni meccaniche, ma partecipa alla misurazione della deformazione meccanica. Tutte le condizioni rimanenti elencate per gli estensimetri di compensazione sono valide anche in questo caso. Negli schemi elettrici 7.1-3a e b si pensi di sostituire l'estensimetro di compensazione R_2 con un estensimetro di misura (attivo).

Il valore di misura, la deformazione ε_a indicata, si compone secondo l'espressione;

$$\varepsilon_a = \underbrace{(\varepsilon_{\text{mech } 1} + \varepsilon_{\text{therm } 1})}_{\varepsilon_1} - \underbrace{(\varepsilon_{\text{mech } 2} + \varepsilon_{\text{therm } 2})}_{\varepsilon_2}.$$

Le deformazioni $\varepsilon_{\text{therm } 1}$ e $\varepsilon_{\text{therm } 2}$ si compensano a vicenda se le premesse sono esaudite. Le deformazioni meccaniche si sommano in caso di segni contrari, si sottraggono in caso di segni uguali:

$$\varepsilon_a = (+ \varepsilon_{\text{mech } 1}) - (- \varepsilon_{\text{mech } 2}) = \varepsilon_{\text{mech } 1} + \varepsilon_{\text{mech } 2},$$

$$\varepsilon_a = (+ \varepsilon_{\text{mech } 1}) - (+ \varepsilon_{\text{mech } 2}) = \varepsilon_{\text{mech } 1} - \varepsilon_{\text{mech } 2}.$$

L'impiego di un collegamento a mezzo ponte è opportuno solo quando le componenti delle deformazioni ε_1 e ε_2 , che formano il segnale totale, ε_a sono note per entità e segno, p.e. nel caso di sollecitazione normale pura o di sollecitazione di flessione pura di un oggetto di misura con sezione simmetrica (al riguardo vedere cap.8).

Relativamente alla compensazione degli effetti della risposta alla temperatura dei cavi di connessione si presti attenzione alla simmetria delle linee 2 e 3 per quanto riguarda la loro lunghezza, la loro resistenza ohmica, i loro coefficienti di temperatura e la loro esposizione alla temperatura (vedere anche par. 7.1.1 e 7.1.2).

7.1.6 Compensazione della risposta alla temperatura nel collegamento a ponte intero

Il collegamento a ponte intero - fig. 7.1-5 - viene impiegata di preferenza nella costruzione di trasduttori e in misurazioni affini. In questo tipo di collegamento tutti e 4 i rami sono occupati da estensimetri di misura e disposti vicini gli uni agli altri. Perciò i cavi di collegamento interni al ponte, che forniscono un contributo indesiderato alla risposta alla temperatura, sono molto corti e di conseguenza è minima anche la loro influenza. Qualora sia richiesta un'altissima precisione questi collegamenti nei 4 rami del ponte devono coincidere il più possibile in sezione e in lunghezza.

La deformazione termica dell'oggetto agisce allo stesso modo su tutti e 4 gli estensimetri, per cui si ottiene un'ottima compensazione della risposta alla temperatura. Il segnale di misura ε_a è costituito dalla somma aritmetica delle deformazioni singole fra ε_1 e ε_4 rilevate dai quattro estensimetri:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4.$$

Se l'oggetto dovesse essere riscaldato in modo irregolare, p.e. attraverso una radiazione termica unilaterale, si deve allora tentare di ottenere una compensazione della temperatura tramite l'incapsulazione in masse termoisolanti, la schermatura della radiazione termica o altre misure adeguate.

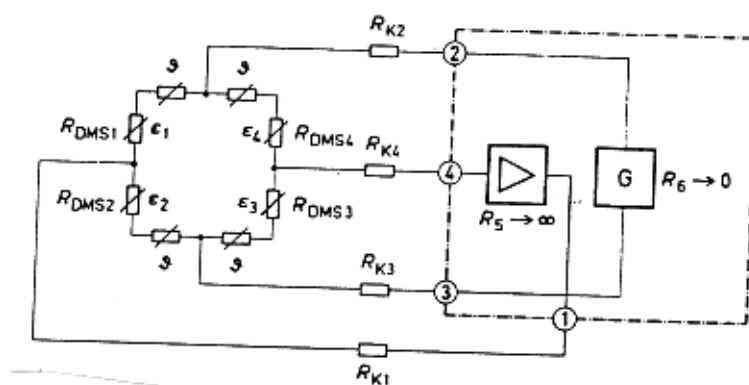


Figura 7.1-5: Collegamento a ponte intero
Spiegazioni nel testo

I cavi di uscita del ponte disegnate in fig.7.1-5 (linee di segnale) con le resistenze di linea R_{K1} e R_{K4} non influiscono sulla risposta alla temperatura nè sul segnale di misura. Anche i due cavi di alimentazione del ponte con le resistenze di linea R_{K1} e R_{K4} non hanno alcuna influenza sulla risposta alla temperatura; il loro influsso sul segnale di misura o sul valore di misura è trattato nel par. 7.2.

Per l'analisi delle sollecitazioni il collegamento a ponte intero è utilizzabile solo se la distribuzione della deformazione nei singoli estensimetri, in relazione al loro segno e al loro rapporto reciproco, è nota, p.e. nel caso di una barra di flessione con sezione di flessione simmetrica o di una barra di trazione o pressione (cap. 8). Per tutti i casi in cui la distribuzione della deformazione sia sconosciuta deve essere impiegato il collegamento a quarto di ponte.

7.2 L'influenza delle resistenze di linea

La resistenza dei cavi di connessione fra l'estensimetro e i vertici del collegamento a ponte (cioè i punti di collegamento del ponte indicati con 1 e 4 nei successivi schemi elettrici) possono generare nei collegamenti asimmetrici (quarti di ponte semplici, ponti a 2/4 o diagonali) una variazione di frequenza già così grande da non poter più essere corretta con il dispositivo di messa a punto (la compensazione R) dell'amplificatore collegato e da far modulare in buona parte o addirittura far sovrarmodulare l'amplificatore. In un caso simile la resistenza della vicina resistenza complementare (R_2 per il quarto di ponte, R_2 e R_4 per il ponte a 2/4) deve aumentare di conseguenza. Come resistenze complementari sono adatte solo quelle a film metallico altamente stabili.

Di una seconda influenza delle resistenze di linea si è già parlato nel par.6 (calibrazione): le resistenze dei cavi di collegamento diminuiscono il valore di misura rilevato dall'estensimetro. In questo capitolo è anche indicato come, per mezzo di speciali metodi di calibrazione, questi errori possano essere eliminati (par.6.3). Se c'è la possibilità e se sono disponibili resistenze Shunt precise, la calibrazione Shunt può essere considerata come il metodo più sicuro per la limitazione degli errori di misura. Se viene utilizzata la tecnica a punti multipli, allora la calibrazione Shunt permette contemporaneamente di controllare la disposizione dell'estensimetro rispetto alla posizione del commutatore del punto di misura. Se la calibrazione viene eliminata, allora le influenze del cavo devono essere corrette. Le seguenti realizzazioni richiedono l'impiego di un'alimentazione a tensione costante.

Negli schemi elettrici le connessioni fra i singoli elementi di collegamento sono viste come prive di resistenza. Nella realtà questa situazione è ammissibile solo se i cavi sono corti e la loro resistenza è inferiore di due o tre ordini di grandezza a quella dell'estensimetro o del ponte ed è di conseguenza trascurabile. Questa condizione non è già più soddisfatta nel caso di cavi di connessione lunghi. Qualora siano impiegati fili sottili o linee composte da materiali con un'alta resistenza specifica (p.e. nel campo delle alte temperature), già tratti di cavo abbastanza brevi possono portare a considerevoli errori di misurazione. Non è determinante la lunghezza del cavo, ma la sua resistenza.

I par. dal 7.2 al 7.2.6 contengono le equazioni per la correzione matematica dei valori di misurazione per collegamenti diversi, nel par. 7.2.7 sono invece espresse le equazioni per la correzione degli errori tramite selettore del fattore k applicato all'amplificatore di misurazione.

Riguardo all'influenza delle resistenze di contatto nei trasformatori ad anelli collettori vedere il par. 8.4.4.1.

7.2.1 Collegamento a quarto di ponte semplice

In quale modo la resistenza dei cavi di connessione diminuisca il segnale di un estensimetro viene spiegato tramite il collegamento a quarto di ponte semplice della fig. 7.2-1. L'estensimetro forma insieme con i cavi di connessione il ramo di ponte 1; le resistenze fisse R_2 , R_3 , R_4 completano il collegamento.

R_{DMS} estensimetro di misura

$R_{K1.1}$, $R_{K1.2}$ resistenze dei cavi di collegamento fra l'estensimetro e il resto del ponte

R_2 fino a R_4 resistenze complementari

R_5 resistenza di entrata dell'amplificatore di misura

R_6 resistenza interna del generatore di tensione costante G

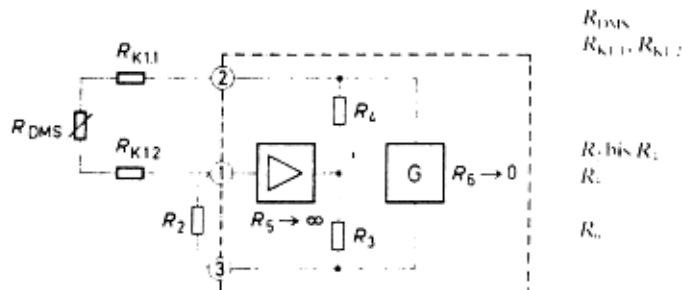


Figura 7.2-1: Influenza delle resistenze dei fili nel collegamento a quarto di ponte semplice

La resistenza del ramo di ponte 1 si compone delle resistenze singole dell'estensimetro (R_{DMS}), della linea di andata ($R_{K1.1}$) e della linea di ritorno ($R_{K1.2}$).

Nella misurazione delle dilatazioni con estensimetri si parte dal presupposto che lo sbilanciamento del ponte sia una misura per la deformazione secondo l'equazione (5.2-9):

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{DMS} \quad (7.2-1)$$

La variazione di resistenza relativa dell'estensimetro è proporzionale alla deformazione che la causa:

$$\frac{\Delta R_{DMS}}{R_{DMS}} = \varepsilon \cdot k. \quad (7.2-2)$$

A questo punto nel caso mostrato (fig. 7.2-1) il collegamento a ponte "vede" la variazione di resistenza ΔR , dell'estensimetro relativa alla resistenza totale del ramo di ponte 1 e perciò una variazione di resistenza relativa inferiore:

$$\frac{\Delta R_{DMS}}{R_{K1.1} + R_{DMS} + R_{K1.2}} < \varepsilon \cdot k. \quad (7.2-3)$$

Per questo motivo il segnale di misurazione diventa troppo piccolo.

Un esempio tenterà di fornire un'idea dell'influenza della resistenza del cavo sul risultato della misurazione.

Esempio:

Un cavo lungo 100 m (2 fili ognuno di 100 m) con una sezione dei fili di 0,5 mm² di rame causa nel collegamento a quarto di ponte (resistenze dei cavi in serie con la resistenza dell'estensimetro) un errore di misura del

- 5,8% per una resistenza dell'estensimetro di 120 Ω
- 1,8% per una resistenza dell'estensimetro di 350 Ω
- 1,2% per una resistenza dell'estensimetro di 600 Ω

Nel caso i fili abbiamo una sezione di 0,14 mm² gli errori di misurazione raggiungono addirittura

- 17,5 % per un estensimetro a 120 Ω
- 6,8 % per un estensimetro a 350 Ω
- 3,7 % per un estensimetro a 600 Ω

Il risultato sbagliato si può facilmente correggere con l'aiuto del diagramma di fig. 7.2-2 secondo la relazione

$$\varepsilon = \varepsilon_a \frac{100\%}{\text{indicazione residua } \%} \quad (7.2-4)$$

In essa ε è il corretto valore di misura e ε_a il valore indicato (sbagliato). La percentuale dell'indicazione residua, cioè della perdita di segnale (errore) si può ricavare dal diagramma.

Nella fig. 7.2-2 sono mostrati due esempi per la spiegazione della lettura del diagramma.

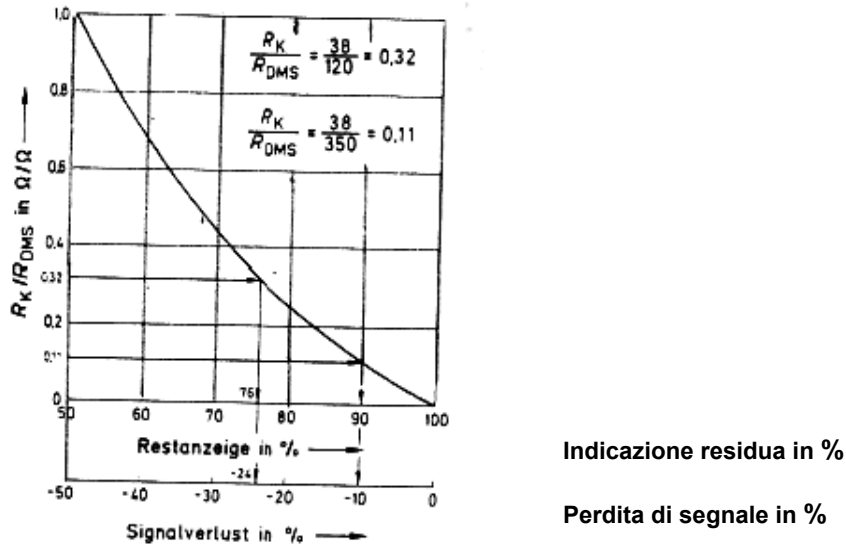


Figura 7.2-2: Diagramma per la determinazione dell'indicazione residua, cioè della perdita di segnale in seguito a resistenze dei cavi. Spiegazioni nel testo.

Per prima cosa si determina il rapporto R_K/R_{DMS} e si cerca il valore numerico nella scala delle ordinate. A questo punto si va orizzontalmente a sinistra fino alla curva e da essa verticalmente fino all'asse delle ascisse. Qui si può leggere la percentuale dell'indicazione residua e la si può inserire al denominatore dell'equazione (7.2-4).

Come ε_a vale sempre il valore di misura indicato, non corretto, come R_K invece la resistenza totale del cavo interna al ramo di ponte con estensimetro in serie. La precisione della correzione dipende essenzialmente dalla precisione con cui sono misurate le resistenze dei cavi.

Se il cavo di connessione è lungo, è possibile che la resistenza totale $R_{DMS} + R_{K1.1} + R_{K1.2}$ del ramo di ponte 1 diventi così grande da rendere insufficienti le possibilità di messa a punto dell'amplificatore per la compensazione dello zero. In questo caso deve essere adattata la resistenza complementare R_2 . L'incremento di R_2 rispetto alla resistenza totale R_1 non ha alcuna influenza negativa sul risultato di misura.

È anche possibile correggere il valore di misura ε_a tramite calcoli. Per il collegamento a quarto di ponte semplice vale l'equazione

$$\varepsilon = \varepsilon_a \frac{R_{K1.1} + R_{DMS} + R_{K1.2}}{R_{DMS}} \quad (7.2-5)$$

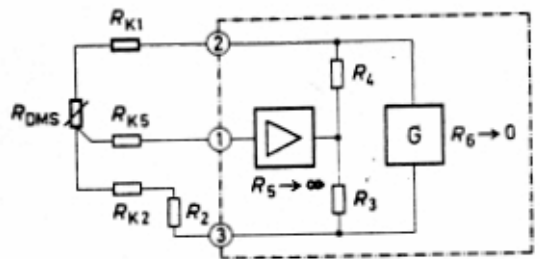
Nella fig. 7.2-1 sono disegnate in grassetto le resistenze da utilizzare per la correzione. Per entrambi i metodi di correzione devono essere noti i valori delle resistenze dei cavi e dell'estensimetro coinvolti, le prime tramite la misura, la seconda per mezzo del foglio caratteristiche contenuto nella confezione dell'estensimetro.

7.2.2 Quarto di ponte in collegamento a 3 conduttori

Nel caso del quarto di ponte con collegamento a 3 conduttori (fig. 7.2-3) solo il cavo di andata è in serie con l'estensimetro. Di conseguenza solo la resistenza R_{K1} influisce sul segnale di misura dell'estensimetro 1. L'equazione di correzione è.

$$\varepsilon = \varepsilon_a \frac{R_{DMS} + R_{K1}}{R_{DMS}} \quad (7.2-6)$$

Nell'equazione di correzione sono da impiegare i valori numerici delle resistenze disegnate in grassetto nella fig. 7.2.3.



Denominazioni come nella fig. 7.2-1.

Figura 7.2-3: Influenza delle resistenze dei cavi nel collegamento a quarto di ponte con connessione a 3 conduttori dell'estensimetro.

La linea di ritorno con R_{K2} si trova nel ramo passivo R_2 e non ha perciò alcuna influenza sul risultato della misura.

La resistenza R_{K5} del cavo di segnale può essere trascurata se la resistenza di entrata dell'amplificatore R_5 raggiunge un valore perlomeno mille volte superiore alla resistenza dell'estensimetro.

La correzione degli errori può essere effettuata anche con l'ausilio del diagramma della fig. 7.2-2.

7.2.3 Quarto di ponte con estensimetro di compensazione

La fig. 7.2-4 mostra due varianti di un collegamento a quarto di ponte con estensimetro di compensazione.

a) Estensimetro di misura e estensimetro di compensazione disposti vicini. In questo caso vale l'equazione di correzione (7.2-6).

b) Estensimetro di misura e estensimetro di compensazione separati. In questo caso vale l'equazione di correzione (7.2-5).

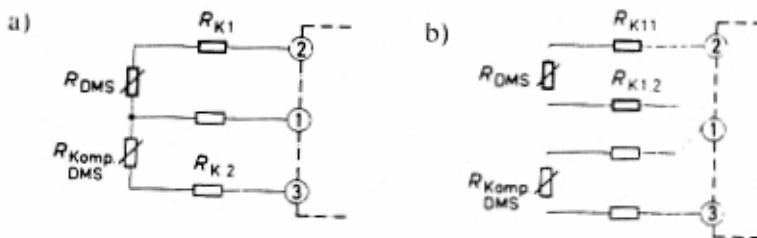


Figura 7.2-4: Collegamento a quarto di ponte con estensimetro di compensazione

a) Estensimetro di misura e estensimetro di compensazione disposti vicini

b) Estensimetro di misura e estensimetro di compensazione separati

Le resistenze da considerare per la correzione degli errori sono disegnate in grassetto.

Il collegamento a) si usa quando l'estensimetro di compensazione viene installato nelle immediate vicinanze dell'estensimetro di misura. Il collegamento b) si utilizza quando fra l'estensimetro di misura e quello di compensazione c'è una notevole distanza. Esso è anche comune dispositivi di misura a più punti dove lo stesso estensimetro di compensazione è collegato a più estensimetri di misura posti l'uno dopo l'altro.

Per entrambi i collegamenti la correzione dell'errore può essere effettuata anche con il diagramma della fig. 7.2-1.

7.2.4 Ponte a 2/4 o diagonale

Nella fig. 7.2-5 sono disegnate due varianti del collegamento a 2/4 di ponte:

a) Collegamento a 2/4 di ponte con gli estensimetri di misura DMS 1 e DMS 3 in collegamento a 3 conduttori insieme con le resistenze complementari R_2 e R_4 . L'equazione di correzione relativa è:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_3 = \varepsilon_a \frac{R_{K1} + R_{DMS1} + R_{DMS3} + R_{K3}}{R_{DMS1} + R_{DMS3}} \quad (7.2-7)$$

Se al posto delle resistenze fisse vengono utilizzati estensimetri di compensazione disposti vicini (analogamente alla fig. 7.2-4a) è valida la stessa formula di correzione.

b) Se gli estensimetri di compensazione vengono disposti separatamente (analogamente alla fig. 7.2-4b), allora l'equazione di correzione diventa:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_3 = \varepsilon_a \frac{R_{K1,1} + R_{DMS1} + R_{K1,2} + R_{K3,1} + R_{DMS3} + R_{K3,2}}{R_{DMS1} + R_{DMS3}} \quad (7.2-8)$$

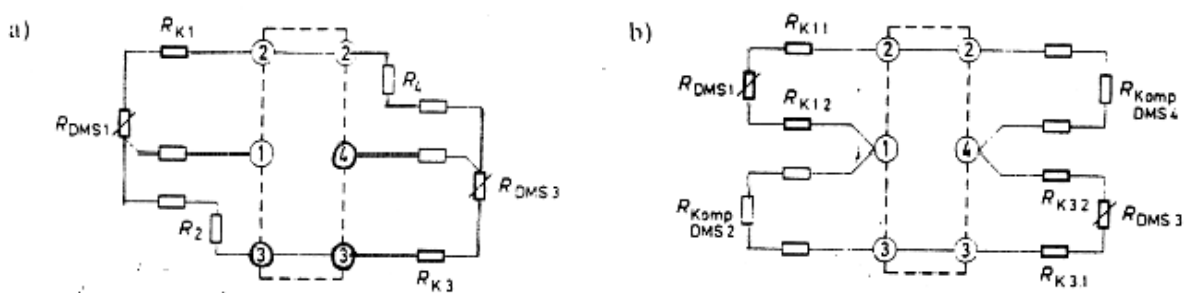


Figura 7.2-5: Collegamento a ponte a 2/4 o diagonale

- a) Ponte a 2/4 in collegamento a 3 conduttori
- b) Ponte a 2/4 con estensimetri di compensazione disposti separatamente

7.2.5 Collegamento a mezzo ponte

Il collegamento a mezzo ponte secondo al fig. 7.2-6 comprende 2 estensimetri di misura che lo differenziano perciò dal collegamento a quarto di ponte della fig. 7.2-4.

Nella fig. sono rappresentate due varianti. Il caso a) caratterizza la situazione nel caso i due estensimetri siano disposti vicini. La formula di correzione è:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \varepsilon_a \frac{R_{K1} + R_{DMS1} + R_{DMS2} + R_{K2}}{R_{DMS1} + R_{DMS2}} \quad (7.2-9)$$

Il caso b) si verifica quando i due estensimetri siano disposti ad una certa distanza fra loro come può avvenire negli oggetti molto grandi. La formula di correzione diventa:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \varepsilon_a \frac{R_{K1,1} + R_{DMS1} + R_{K1,2} + R_{K2,1} + R_{DMS2} + R_{K2,2}}{R_{DMS1} + R_{DMS2}} \quad (7.2-10)$$

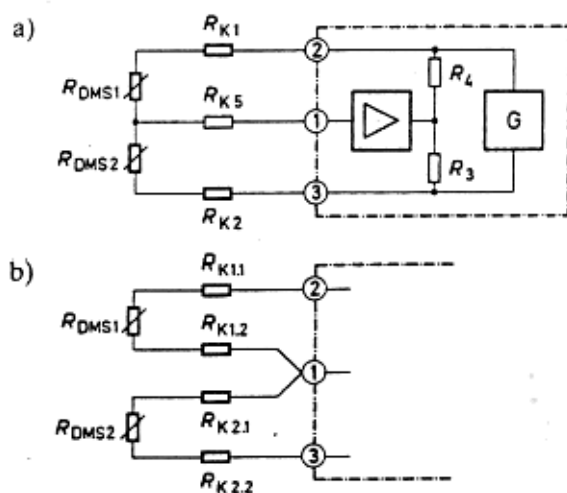


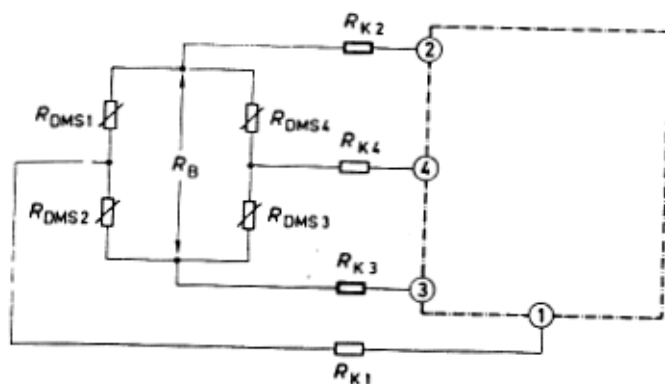
Figura 7.2-6: Collegamento a mezzo ponte

a) Estensimetri disposti vicini

b) Estensimetri disposti a una certa distanza l'uno dall'altro.

7.2.6 Collegamento a ponte intero

Il collegamento a ponte intero viene utilizzato per le sue caratteristiche positive - grande segnale di misura, compensazione automatica degli effetti di disturbo - prevalentemente per la costruzione di rilevatori di grandezze fisiche. I suoi vantaggi risultano particolarmente evidenti quando i cablaggi interni al ponte sono corti e simmetrici. Con questa premessa le resistenze dei cavi di collegamento interni al ponte rimangono trascurabilmente piccole e non richiedono precauzioni particolari. Invece bisogna prestare attenzione alle resistenze del cavo di collegamento fra amplificatore e ricevitore e più precisamente ai due fili di alimentazione del ponte con le loro resistenze R_{K2} e R_{K3} , fig. 7.2-7. Le resistenze delle linee di segnale 1 e 4 non hanno, come in tutti gli esempi precedenti, alcun effetto limitante sul segnale.



- $R_{DMS1...4}$ Resistenze degli estensimetri
- R_{K2}, R_{K3} Resistenze dei fili delle linee di alimentazione
- R_{K1}, R_{K4} Resistenze dei fili delle linee di segnale
- R_B Resistenza trasversale del ponte (resistenza di entrata)

Figura 7.2-7: Collegamento a ponte intero

L'equazione di correzione diventa:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = \varepsilon_a \frac{R_{K2} + R_B + R_{K3}}{R_B} \quad (7.2-11)$$

R_B denomina la resistenza trasversale del ponte (resistenza di entrata).

$$R_B = \frac{(R_{DMS1} + R_{DMS2}) \cdot (R_{DMS3} + R_{DMS4})}{R_{DMS1} + R_{DMS2} + R_{DMS3} + R_{DMS4}} \quad (7.2-12)$$

Se tutte le resistenze dell'estensimetro sono uguali fra loro, come è da presupporre, allora la resistenza trasversale del ponte (resistenza di entrata del ponte) diventa uguale alla resistenza dell'estensimetro.

Nelle misure con rilevatori di grandezze fisiche in collegamento a ponte intero dovrebbe essere preso in considerazione il metodo di calibrazione descritto nel par. 6.4 che è il più semplice e generalmente anche il migliore.

7.2.7 Correzione degli errori con il selettore del fattore k

Esiste un'ulteriore possibilità di eliminare l'influenza delle resistenze dei cavi se l'amplificatore utilizzato possiede un selettore del fattore k (par.6.1 e 6.5).

La perdita di segnale causata dalla resistenza del cavo può essere intesa come fattore k apparentemente ridotto dell'estensimetro. Se si ruota il selettore del fattore k sul valore numerico del fattore k diminuito k^* , aumenta il grado di amplificazione dell'amplificatore corrispondente, cosicché il valore di deformazione indicato è di nuovo corretto. Per il calcolo del fattore k apparente k^* dei diversi collegamenti valgono le formule sottostanti.

Collegamento a quarto di ponte semplice secondo la fig. 7.2-1:

$$k^* = k \cdot \frac{R_{DMS}}{R_{K1.1} + R_{DMS} + R_{K1.2}} \quad (7.2-13)$$

Quarto di ponte in collegamento a 3 conduttori secondo fig. 7.2-3:

$$k^* = k \cdot \frac{R_{DMS}}{R_{DMS} + R_{K1}} \quad (7.2-14)$$

Quarto di ponte con estensimetro di compensazione secondo fig. 7.2-4:

per il caso a) vale l'equazione 7.2-14,
per il caso b) vale l'equazione 7.2-13.

Ponte 2/4 o diagonale secondo fig. 7.2-5:

per il caso a) vale l'equazione 7.2-14,
per il caso b) vale l'equazione 7.2-13.

Si presuppone che i due rami di ponte 1 e 3 siano occupati in modo identico.

Collegamento a mezzo ponte secondo fig. 7.2-6:

per il caso a) vale l'equazione 7.2-14,
per il caso b) vale l'equazione 7.2-13.

Anche in questo caso si presuppone che i due rami di ponte 1 e 2 siano occupati in modo identico.

Collegamento a ponte intero secondo fig. 7.2-7:

$$k^* = k \cdot \frac{R_B}{R_{K2} + R_B + R_{K3}} \quad (7.2-15)$$

La resistenza trasversale del ponte R_B deve essere misurata o calcolata secondo l'equazione (7.2-12).

A causa dell'altissima impedenza d'entrata degli amplificatori e dei sequenziatori di tensione (SF2' e SF3'), i cavi dei sensori sono praticamente privi di corrente cosicché le loro resistenze di linea le resistenze degli interruttori S2' non possono causare cadute di tensione e, di conseguenza, errori di misurazione. Poiché il mezzo ponte interno (resistenze R_H), che costituisce un ponte intero con il mezzo ponte esterno di misurazione, è allacciato tramite i sequenziatori di tensione SF2' e SF3' alle tensioni provenienti dai punti di misurazione, i mezzo ponti esterni e interni sono soggetti alle identiche tensioni anche se la regolazione delle tensioni degli amplificatori V2 e V3 non lascia alcun errore residuo. I sequenziatori di tensione possono diventare così precisi grazie ai nuovi amplificatori operazionali che le loro tensioni di guasto sono trascurabilmente piccole.

Gli errori del punto zero e di sensibilità vengono perciò eliminati quasi al 100%. Il collegamento è adatto per il funzionamento a tensione continua e alternata a frequenza portante. Nel funzionamento in alternata a frequenza portante si ottiene addirittura una precisione superiore poiché in questo caso le tensioni offset e le derivate di temperatura seppur minime degli amplificatori e dei sequenziatori di tensione non hanno alcuna influenza. Un ulteriore pregio del collegamento della fig. 7.3-1 è il fatto che per ogni estensimetro aggiuntivo sono necessari solo altri due fili e due interruttori.

D'altra parte il collegamento richiede anche che la resistenza complementare R_E sia disposta vicino all'estensimetro, poiché la caduta di tensione che si verificano nelle linee di connessione fra l'estensimetro e la resistenza complementare R_E non vengono stabilizzate. Inoltre la connessione galvanica diretta dell'estensimetro fa sì che, nel caso di un collegamento a massa, i valori di misurazione dell'intero gruppo possano diventare errati.

In fig. 7.3-2 viene mostrato un collegamento ampliato rispetto a quello della fig. 7.3-1, che permette di collegare estensimetri singoli distanti fino a 1000m in cui la resistenza complementare può essere disposta addirittura nello strumento di misurazione [7-2]. Il collegamento della fig. 7.3-2 possiede, rispetto a quello della fig. 7.3-1, i due sequenziatori supplementari SF1 e SF4 e l'amplificatore differenziale DV. La caduta di tensione ΔU_1 generata dalla corrente di alimentazione nella linea 4 e nell'interruttore S4, cioè nel collegamento fra l'estensimetro e la resistenza complementare R_E , viene prelevata dai sequenziatori SF1 e SF4, dimezzata esattamente con l'ausilio delle resistenze R_T e distribuita in parti uguali ai due rami di ponte del mezzo ponte esterno. In questo modo viene esclusa l'influenza sul punto zero dovuta alla caduta di tensione ΔU_1 . Poiché la caduta di tensione ΔU_1 viene condotta tramite l'amplificatore differenziale DV al generatore di tensione del ponte e qui la tensione di alimentazione del ponte U_B viene aumentata di ΔU_1 , la somma delle tensioni presenti direttamente sull'estensimetro e nella resistenza complementare è sempre costantemente uguale a U_{ref} . Le cadute di tensione ΔU_1 e ΔU_2 , non hanno perciò nessuna influenza sulla sensibilità di misurazione. Siccome il collegamento della fig. 7.3-2 inserisce o disinserisce completamente l'estensimetro, nel caso uno di essi sia collegato a massa gli altri non vengono influenzati.

Cavo di alimentazione
Cavo sensore
Cavo di misura

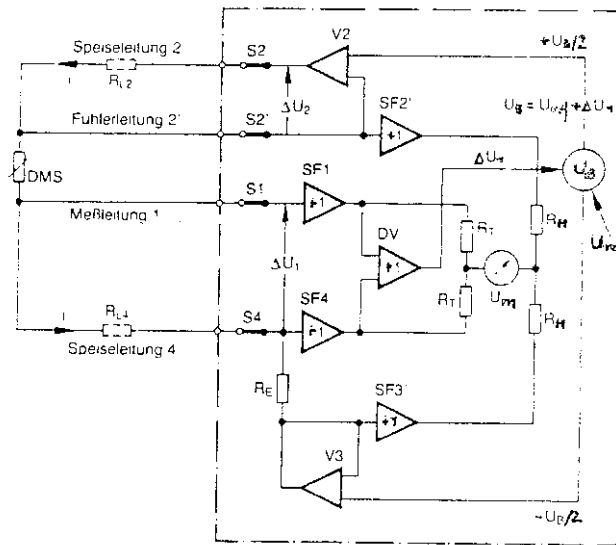


Figura 7.3-2: Quarto di ponte per il collegamento praticamente privo di errori di estensimetri singoli con resistenza complementare R_E disposta lontana dal luogo di misura.

Nella fig. 7.3-3 è rappresentata, in versione dettagliata rispetto al collegamento della fig. 7.3-2, la tecnica utilizzata da HBM per quarti di ponte, mezzo ponti e ponti interi. Con essa è possibile completare a uno a uno gli estensimetri con estensimetri di compensazione posti a distanza, come p.e. nel punto di misurazione M2 della fig. 7.3-3, oppure completare a semiponte estensimetri singoli per mezzo della resistenza complementare interna allo strumento $R_{Eint.}$ o di una resistenza complementare comune esterna $R_{Eext.}$. Se si lavora con frequenza portante, cioè se viene utilizzata una tensione alternata sinusoidale come tensione di alimentazione del ponte, il semiponte interno R_H e, in caso di bisogno, anche il partitore di resistenza R_T possono essere realizzati come partitori induttivi con una conseguente notevole diminuzione dell'errore di misura nel collegamento a mezzo ponte e a quarto di ponte. Ciò è dovuto al fatto che i partitori induttivi possono essere realizzati con stabilità termiche e in particolare di durata molto maggiori rispetto ai partitori di resistenza.

Fine della citazione.

1 Riferimento tensione di alimentazione

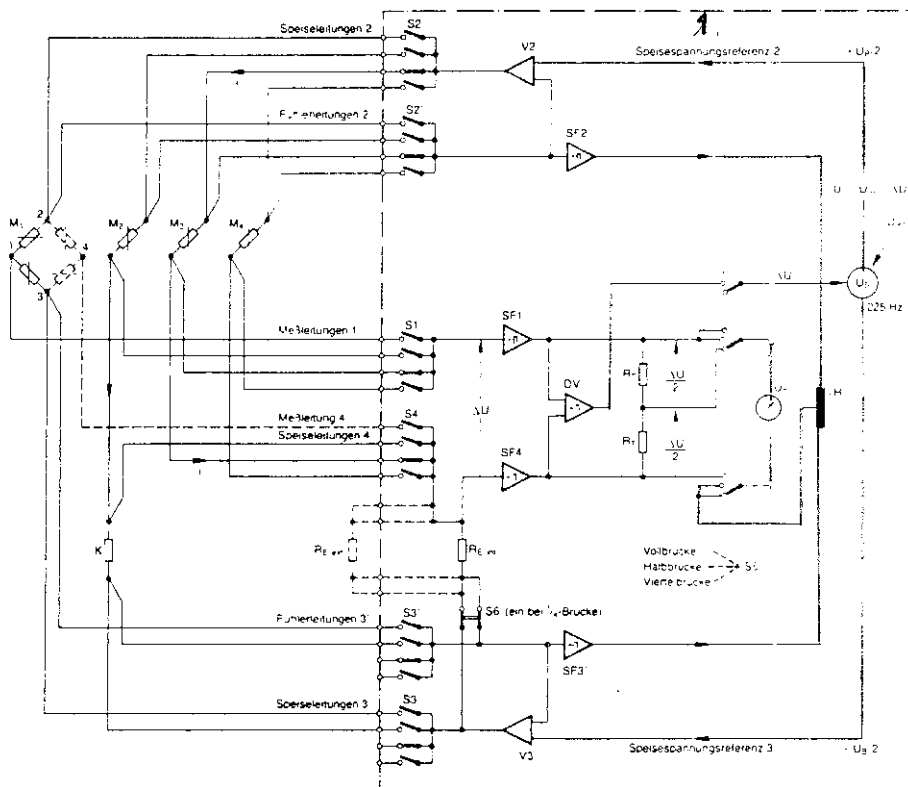


Figura 7.3-3: Ponte HBM per il collegamento senza errori di collegamenti a quarto di ponte, a mezzo ponte e a ponte intero.

7.3.2 Il collegamento a 6 conduttori

Lo stesso effetto della connessione incrociata si può ottenere con il collegamento a 6 conduttori, esso è però limitato al collegamento di ponti interi estensimetrici. La fig. 7.3-4 mostra il principio.

Un generatore di tensione regolabile G fornisce la tensione U_G per l'alimentazione del trasduttore dotato di un collegamento a ponte estensimetrico. In seguito alla caduta di tensione causata dalla corrente di alimentazione I_B nelle resistenze R_{K2} e R_{K3} della linea di alimentazione, il rilevatore riceve la bassa tensione U_B . I due cavi sensore 6 e 7 indicano la presenza della tensione U_B ad un comparatore che la confronta con la tensione di riferimento U_{Ref} . La tensione di riferimento è uguale alla tensione nominale di alimentazione del ponte. Le resistenze delle linee sensore R_{K6} e R_{K7} non disturbano perché non sono percorse da corrente. Se U_B differisce da U_{Ref} il generatore, comandato da comparatore, incrementa la sua tensione U_G finché i cavi sensore comunicano la concordanza di U_B con U_{Ref} . Così nel rilevatore si ottiene la tensione di alimentazione nominale.

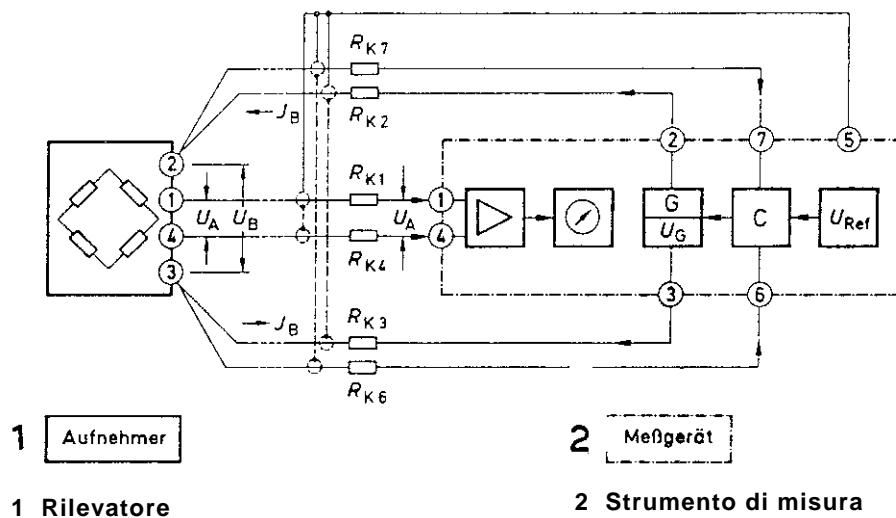


Figura 7.3-4: Principio del collegamento a 6 conduttori; spiegazioni nel testo

La regolazione della tensione del generatore può avvenire in linea di principio sia manualmente che automaticamente. La regolazione automatica ha il grande vantaggio che le variazioni delle resistenze della linea di alimentazione durante una misura – p.e. nel caso di variazioni della temperatura dovute ai coefficienti di temperatura del rame - sono sempre regolate immediatamente. Il segnale di misura U_A corrisponde perciò in ogni momento al valore di misura. Le resistenze delle linee segnale R_{K1} e R_{K4} anche in questo caso non influiscono, perchè anche l'amplificatore non riceve corrente.

7.4 L'influenza delle capacità dei cavi

I fili di un cavo sono fra di loro condensatori. La loro capacità dipende dalla lunghezza dei fili, dalla loro distanza reciproca, dalla sezione, dal dielettrico (isolamento) e dalla temperatura. Per le linee libere valgono le stesse condizioni.

La fig. 7.4-1 mostra il collegamento di un ponte intero estensimetrico a cui è collegato un cavo schermato. Il ponte di Wheatstone viene formato tramite le resistenze R_1 e R_4 . Fra i fili dall'1 al 4 del cavo di connessione si generano le capacità da C_1 a C_4 , C_9 e C_{10} . Nel cavo schermato si hanno inoltre le capacità da C_5 a C_8 .

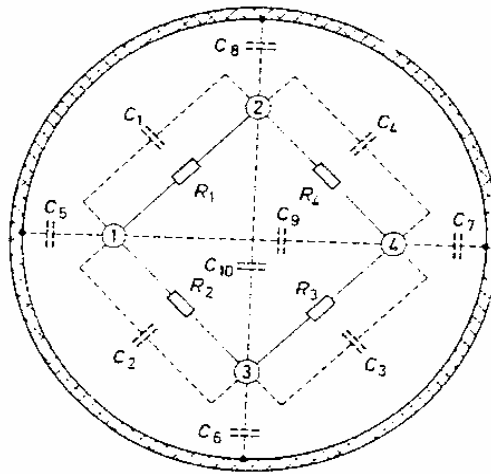


Figura 7.4-1: Capacità generate fra i fili del cavo e fra fili e schermo nel cavo di connessione schermato di un ponte di Wheatstone.

Le capacità dei cavi possono generarsi come fonte di errore in due modi:

a) L'asimmetria capacitiva del ponte può contribuire alla sovramodulazione dell'amplificatore e di conseguenza a una falsificazione del valore di misura. La sovramodulazione capacitiva è possibile solo nel sistema a frequenza portante. Come si possa ovviare all'inconveniente è descritto nel par. 7.4.1.

b) Le resistenze ohmiche formano insieme con le capacità dei cavi i cosiddetti elementi R-C che nei segnali dinamici generano una rotazione di fase. Nei sistemi a tensione continua e in quelli a bassa frequenza portante ciò non ha alcun effetto di disturbo degno di nota a parte una durata prolungata del segnale. Nei sistemi a frequenza portante si possono verificare errori di ampiezza se il comando di demodulazione non lavora in sincronia con la frequenza portante sfasata che giunge all'amplificatore. Nel par. 7.4.2 sono descritte delle contromisure.

Le due interferenze hanno luogo soprattutto nei tratti lunghi ma, nella peggiore delle eventualità e in caso di regolazione sbagliata degli strumenti, possano agire anche su cavi corti. In ogni caso è consigliabile utilizzare cavi a bassa capacità e di ottima fattura ed evitare i cavi eccessivamente lunghi.

7.4.1 Asimmetria capacitiva

La fig. 7.4-2 mostra solo una parte delle capacità contenute nella fig. 7.4-1. Sono le capacità da C_1 a C_4 . Sono parallele alle resistenze del ponte R_1 a R_4 e formano così un ponte capacitivo collegato in parallelo al ponte ohmico.

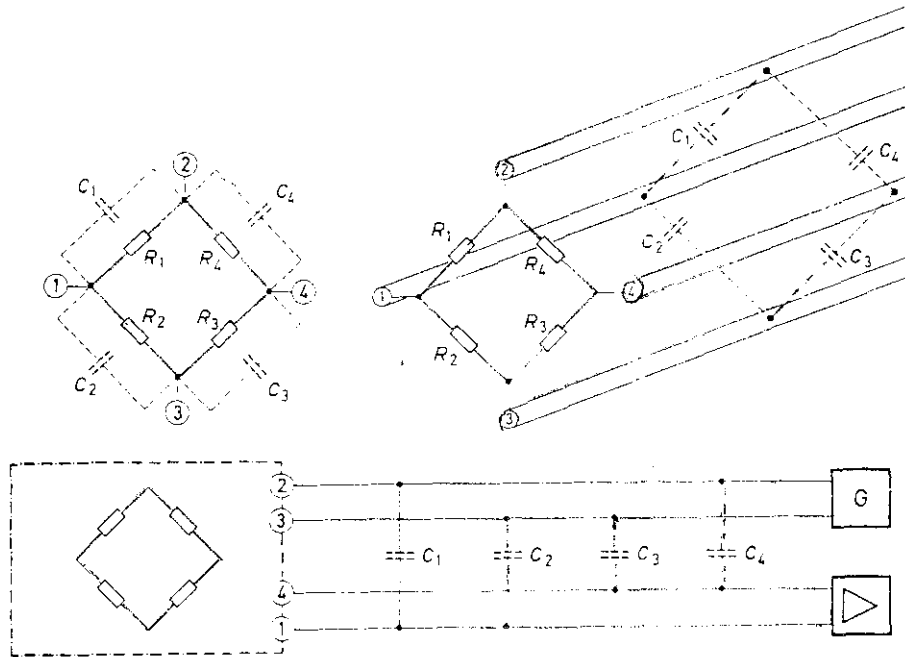


Figura 7.4-1: Il ponte ohmico e il ponte capacitivo che si viene a creare in seguito alle capacità parallele ad esso in tre diverse rappresentazioni.

In caso di alimentazione a tensione alternata (funzionamento a frequenza portante) ogni capacità agisce sulla resistenza sensibile alla temperatura. La resistenza capacitiva X_c (resistenza cieca) di un condensatore dipende dalla sua capacità C e dalla frequenza f della tensione alternata:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad (7.4-1)$$

Finchè le 4 capacità sono uguali, il ponte capacitivo è compensato. Se tuttavia si generano delle differenze capacitive (asimmetria capacitiva), si crea uno sbilanciamento capacitivo del ponte e di conseguenza una tensione di uscita del ponte che non viene determinata dalla grandezza di misura. La tensione capacitiva di uscita è sfasata di 90° rispetto alla tensione di uscita ohmica.

L'amplificatore collegato a valle lo amplifica entrambe. La demodulazione a fase critica dell'amplificatore della frequenza portante fa sì che solo la tensione di segnale amplificata originata dalla variazione di frequenza ohmica venga indicata. A questo proposito sembra tutto a posto. Però, nel caso di una forte variazione di frequenza capacitiva del ponte, l'amplificatore può già essere modulato in parte o anche completamente. Se si aggiunge poi una variazione di frequenza ohmica l'amplificatore si sovraccarica, cioè la tensione di uscita dell'amplificatore non è più proporzionale alla variazione di frequenza ohmica e l'indicazione risulta sbagliata. Per poter riconoscere la situazione di modulazione dell'amplificatore, questi strumenti vengono dotati di un indicatore di modulazione aggiuntivo che fornisce solo informazioni sul grado di modulazione generale dell'amplificatore senza accenni alla causa. Con l'ausilio della compensazione di capacità disponibile negli amplificatori a frequenza portante (compensazione C) si porti la deviazione dell'indicatore sul minimo. In questo modo il ponte è compensato dal punto di vista capacitivo. Se dovesse rimanere un'indicazione residua, essa avrà probabilmente origine da una variazione di frequenza ohmica. Ulteriori particolari si possono ricavare dalle istruzioni per l'uso degli amplificatori di misurazione.

Rimane ancora da osservare che ci sono anche amplificatori a frequenza portante i quali non possiedono una compensazione C e, grazie al loro criterio costruttivo, non ne hanno neanche bisogno. Li si impiega in sistemi con una bassa definizione di segnale.

Da cosa hanno origine le asimmetrie capacitive?

Nella fig. 7.4-3 sono raffigurati i collegamenti comunemente usati nella tecnica estensimetrica insieme con le loro capacità attive.

Nel collegamento a ponte intero, fig. 7.4-3a, la disposizione geometrica dei fili del cavo deve coincidere con i punti di vertice del ponte. Se due fili vicini vengono scambiati si genera un'asimmetria capacitiva con le conseguenze descritte sopra.

La capacità filo contro filo nei cavi di misura va, a seconda della loro struttura, da 70 a 150 pF/m. I cavi HBM si contraddistinguono per la loro alta simmetria capacitiva; anche nel caso di cavi molto lunghi non si generano solitamente tendenze sistematiche. (L'asimmetria di resistenza, cioè la differenza di resistenza dei singoli fili del cavo fra loro, è praticamente insignificante). Un controllo della simmetria capacitiva in caso di difficoltà di compensazione errori può indicare errori di collegamento nelle spine e negli allacciamenti. Il controllo avviene con uno strumento di misurazione della capacità la cui frequenza dovrebbe andare possibilmente da 1000 a 10 000 Hz.

- 1 Schermatura
- 2 Disposizione dei fili nel cavo

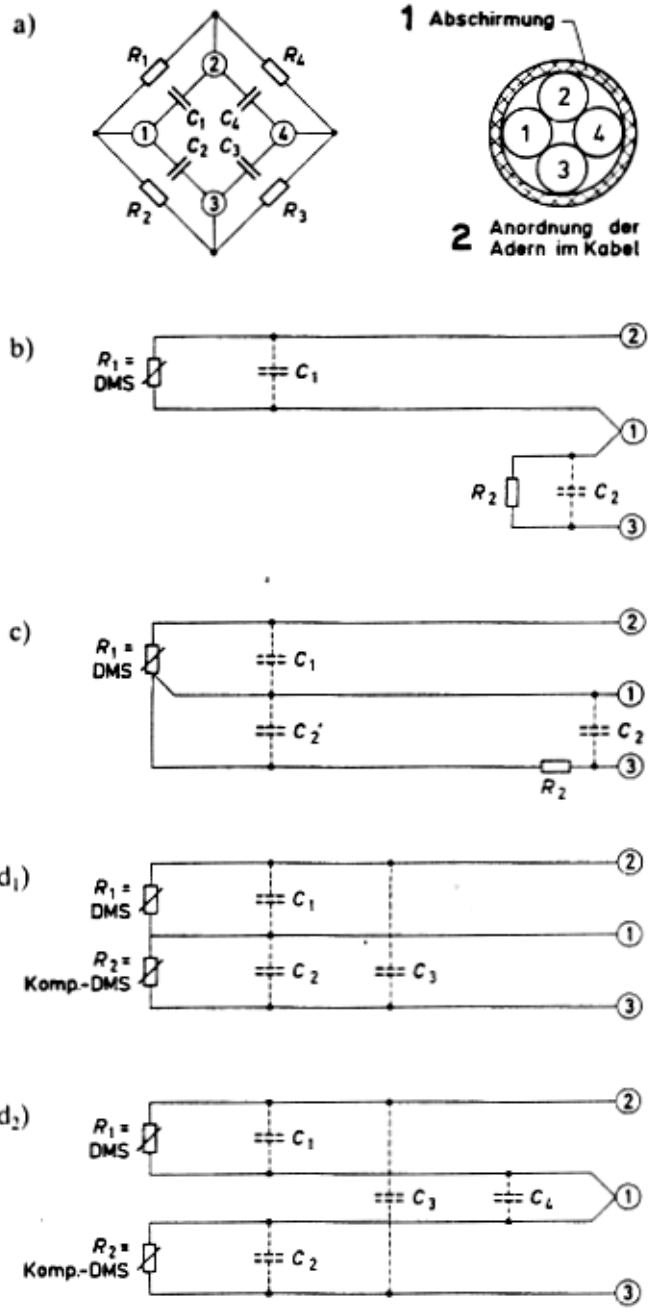


Figura 7.4-3. Rappresentazione delle capacità dei cavi nei diversi tipi di collegamento per estensimetri. Ulteriori spiegazioni nel testo.

a) Le capacità dei fili 1 contro 2 (C_1) e 1 contro 3 (C_2) devono avere la stessa grandezza. Si può tollerare una differenza da 100 a 200 pF indipendente dalla lunghezza del cavo.

b) Anche le capacità dei fili 4 contro 2 (C_4) e 4 contro 3 (C_3) devono coincidere da 100 a 200 pF.

Valori capacitivi differenti per a) e b) non hanno importanza. È importante la simmetria entro ognuno dei due semiponti 2-1-3 e 2-4-3. Se si fosse in presenza di un'asimmetria che superi la tolleranza indicata come valore orientativo, la si potrebbe compensare con condensatori aggiuntivi. Prima bisogna verificare che non si tratti di un errore di collegamento. I condensatori possono essere collegati sia all'inizio che alla fine del cavo.

Si genera un'asimmetria capacitiva drastica nel collegamento a quarto di ponte semplice, fig. 7.4-3b, quando l'estensimetro (R_1) viene collegato con cavi lunghi e la resistenza complementare (R_2) con cavi corti vicino all'amplificatore. C_1 è essenzialmente maggiore di C_2 . Se la compensazione capacitiva dell'amplificatore non è sufficiente per equilibrare l'asimmetria, si può collegare un condensatore di grandezza adatta ai collegamenti 1 e 3.

In linea di principio i tipi di collegamento asimmetrici (quarti di ponte e ponte a 2/4) sono i peggiori da ogni punto di vista per quanto riguarda la suscettibilità agli errori. Il quarto di ponte in collegamento a 3 conduttori, fig. 7.4-1c, compensa la risposta alla temperatura dovuta alla linea del punto di misura ma non le asimmetrie capacitivie. Le linee 1 e 3 sono collegate insieme nell'estensimetro e hanno perciò lo stesso potenziale. A causa di questo corto circuito la capacità C_2 si disattiva. Qualora dovesse essere necessaria una simmetrizzazione per mezzo di un condensatore, quest'ultimo dovrebbe essere collegato all'amplificatore dal collegamento 1 al collegamento 3.

Il quarto di ponte con estensimetro di compensazione, fig. 7.4-3d₁, risulta in questo caso essenzialmente superiore anche quando al posto dell'estensimetro di compensazione dovesse essere impiegata una resistenza di completamento. Le linee 1, 2, e 3 di uguale lunghezza si occupano della simmetria delle due capacità C_1 e C_2 , C_3 non influisce; le due linee 2 e 3 sono praticamente cortocircuitate tramite la resistenza interna estremamente bassa del generatore di alimentatore.

La variante 7.4-3d₂ si differenzia nel comportamento capacitivo dalla variante d₁. Lo stesso vale se al posto dell'estensimetro di compensazione vengono utilizzati estensimetri di misura. Si ottengono allora collegamenti a mezzo ponte.

Nel ponte a 2/4 la simmetria capacitiva raddoppia rispetto a quella del quarto di ponte semplice e del quarto di ponte in collegamento a 3 conduttori.

7.4.2 La rotazione di fase

Nel par. 4.2.3.2 si è già accennato all'opportunità di utilizzare cavi schermati per il collegamento di estensimetri o rilevatori con l'amplificatore. La schermatura in rete di rame accuratamente messa a terra protegga dalle dispersioni dei campi elettrici, fra cui la spiacevole "ondulazione", la dispersione a 50 Hz dalla rete di alimentazione.

In questo modo, oltre a quelle descritte nel par. 7.4.1, si generano le capacità da C_5 a C_8 fra i fili del cavo e lo schermo e le capacità ad azione diagonale C_9 e C_{10} nei cavi a 4 fili, fig. 7.4-4.

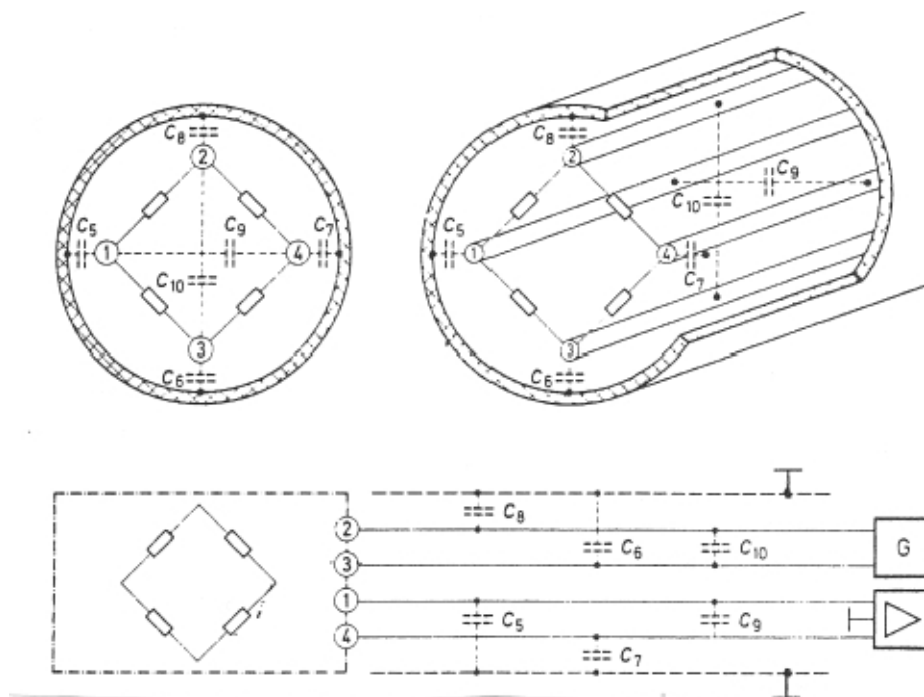


Figura 7,4-4: Capacità dei cavi che contribuiscono alla rotazione di fase del segnale di misura.

Le capacità C_6, C_8 e C_{10} attive fra i fili di alimentazione del ponte 2, 3 e lo schermo e fra loro agiscono in caso di alimentazione a tensione alternata solo come carico aggiuntivo del generatore ma non hanno alcuna influenza negativa sulla misura.

Le capacità C_5 , C_7 e C_9 formano invece attraverso i cavi di misura 1 e 4 e insieme con la resistenza interna al ponte del rilevatore un elemento R - C . Dalla sua costante di tempo τ e dalla frequenza f della tensione di alimentazione o , nel caso di alimentazione a tensione continua, dalla frequenza del segnale di misurazione, risulta una sfasatura fra il segnale all'uscita del rilevatore e l'entrata dell'amplificatore.

$$\tau = R \cdot C \quad (7.4-2)$$

$$\varphi = \frac{R \cdot C}{f} \cdot 2\pi \quad (7.4-3)$$

Nel caso di alimentazione a tensione continua ciò può suscitare interesse solo se devono essere rilevati numerosi segnali paralleli e sincroni.

Negli amplificatori a frequenza portante il demodulatore deve trasformare il segnale del rilevatore a modulazione di ampiezza in un segnale di uscita demodulato. A tal fine la tensione ricavata dal generatore (oscillatore) per il demodulatore deve avere la stessa posizione di fase del segnale del rilevatore all'ingresso del demodulatore. L'adattamento è puramente empirico tramite in secondo elemento R - C nell'amplificatore con costante di tempo regolabile; in questo modo la posizione di fase della tensione può essere fatta coincidere con quella del segnale del rilevatore. La compensazione di facile esecuzione è descritta nelle istruzioni per l'uso sotto la voce "Compensazione delle fasi di riferimento".

La compensazione delle fasi di riferimento per evitare gli errori di misurazione viene utilizzata nello stesso modo, e con lo stesso successo, in tutti gli altri tipi di collegamento descritti nel cap. 7.

7.5 Correzione della sensibilità trasversale dell'estensimetro

Il concetto di "sensibilità trasversale" esprime il fatto che un estensimetro reagisce con una variazione di resistenza non solo alle deformazioni che agiscono longitudinalmente sulla griglia ma anche a quelle trasversali. La definizione di sensibilità trasversale e le sue cause sono descritte nel par. 3.3.3. Fortunatamente essa è molto bassa nei moderni estensimetri a lamina. Nei diagrammi di fig. 3.3.-7a) e b) è indicata la sensibilità trasversale di numerosi estensimetri lineari e rosette di uso comune. Nei tipi più diffusi essa giunge a $\pm 0,005$ ($\pm 0,5\%$), in un tipo speciale essa raggiunge il valore ideale di 0, nei tipi rimanenti si sposta di 0,01 (1%). Nella maggior parte dei casi si potrà perciò rinunciare a una correzione dei valori di misura [7-3] senza che ciò comporti l'insorgere di grossi errori, a meno che non si tratti di deformazioni trasversali molto estese o sia richiesta un'estrema precisione di misura. Solo in questi casi vale la pena di effettuare una correzione. Nella costruzione di rilevatori la sensibilità trasversale è di importanza relativa poiché i rilevatori vengono calibrati nello stadio finale. Solo nei rilevatori a più componenti la sensibilità dell'estensimetro può contribuire a una "diafonia" (di cui l'estensimetro è solo parzialmente responsabile).

Osservazione:

Con il termine di rilevatori a più componenti si intendono quelli che, p.e. possono misurare indipendentemente fra loro delle forze con diverse direzioni assiali. Se p.e. una forza che agisce sull'asse X del sistema di misurazione influenza in modo indesiderato l'asse Y si parla, con un termine mutuato dall'elettroacustica, di "diafonia".

Nei seguenti paragrafi, verranno fornite le formule per la correzione dei valori di misura. Discussioni teoriche sulla derivazione delle formule sono fornite in [7-4, 7-5].

Prima di parlare delle correzioni vere e proprie bisogna accennare nuovamente al metodo per la determinazione del fattore k (par. 3.3.1). Secondo un metodo diffuso a livello mondiale gli estensimetri vengono calibrati nel campo di tensione monoassiale di una barra di acciaio (vedere [2-1]). Uno stato di sforzo monoassiale genera un campo di deformazione biassiale. Le due direzioni di deformazione principali hanno andamento longitudinale $\epsilon_1 = \epsilon_l$ e trasversale, $\epsilon_2 = \epsilon_q$. Il rapporto fra le due deformazioni viene espresso tramite il coefficiente di Poisson (par. 2.2.4 e 2.3.3). Il coefficiente di Poisson della barra di acciaio viene definito con ν_0 e per le barre di calibrazione in acciaio è di:

$$\nu_0 = \frac{\epsilon_q}{\epsilon_l} = 0,285.$$

Per la calibrazione l'estensimetro viene applicato alla barra con il suo asse longitudinale in direzione della deformazione longitudinale. Come risultato della calibrazione si ottiene per definizione il fattore k dell'estensimetro:

$$k = \frac{\Delta R/R_0}{\epsilon_l} \quad (7.5-1)$$

La dilatazione trasversale attiva sull'estensimetro ϵ_q rimane inosservata per motivi storici. Appare evidente che in un estensimetro con una certa sensibilità di deformazione anche nella direzione trasversale, la deformazione trasversale ϵ_q della barra di calibrazione deve fornire un contributo alla variazione di resistenza. Con $\epsilon_q = -\nu_0 \cdot \epsilon_l$ (7.5-2)

la variazione di resistenza relativa dell'estensimetro diventa;

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k_l (\epsilon_l - q \cdot \nu_0 \cdot \epsilon_l) = k_l \cdot \epsilon_l (1 - q \cdot \nu_0). \quad (7.5-3)$$

q definisce la sensibilità trasversale dell'estensimetro (par. 3.3.3).

7.5.1. Correzioni per estensimetri lineari

Le misure che vengono effettuate sulla base delle premesse precedenti e con l'impiego del fattore k indicato dal produttore, sono perciò precise a due condizioni:

1. Se l'estensimetro utilizzato non possiede alcuna sensibilità trasversale ($q = 0$).
2. Se in un campo di deformazione biassiale esiste il rapporto $\varepsilon_q/\varepsilon_l = \nu_0$ e l'estensimetro misura nella direzione ε_l , cioè alle condizioni di calibratura dell'estensimetro.

In casi di condizioni differenti si genera un errore f la cui grandezza dipende sia dalla sensibilità trasversale dell'estensimetro, sia dal rapporto delle deformazioni che agiscono sull'estensimetro in direzione longitudinale e trasversale:

$$f = \frac{q}{1 - \nu_0 \cdot q} \left(\nu_0 + \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l} \right). \quad (7.5-4)$$

In seguito alla bassa sensibilità trasversale dell'estensimetri gli errori rimangono generalmente entro limiti accettabili. Solo in un rapporto estremo fra le deformazioni nella direzione principale l'errore percentuale della deformazione minore può diventare considerevole. Una rapida panoramica è fornita nel diagramma di fig. 7.5-1. Esso contiene come parametri 11 diversi rapporti $\varepsilon_q/\varepsilon_l$ ed è realizzato per valori di sensibilità trasversale $q = +0,03$ fino a $-0,03$. I valori intermedi si possono trovare per interpolazione.

Per poter utilizzare il diagramma è necessario conoscere il rapporto di deformazione $\varepsilon_q/\varepsilon_l$. In un campo di sforzo monoassiale $\varepsilon_q/\varepsilon_l$ nelle direzioni principali è:

$$\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l} = -1 \cdot \nu. \quad (7.5-5)$$

I coefficienti di Poisson di numerosi materiali si possono trovare nella tabella 2.3-2.

La comprensione del diagramma è facilitata da 3 esempi.

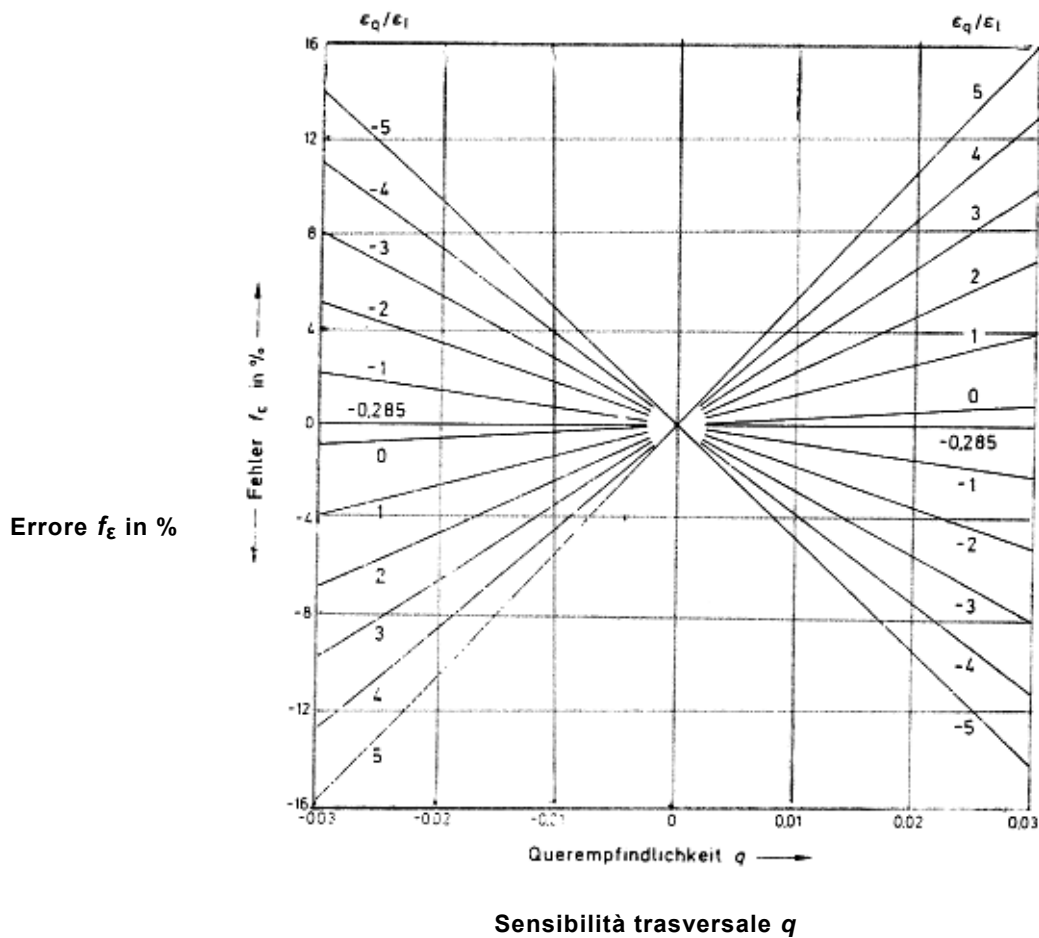


Figura 7.5-1: Diagramma per la determinazione dell'errore di misura in seguito alla sensibilità trasversale di un estensimetro.

Esempio 1:

$q = -0,01$;

Campo di sforzo monoassiale = campo di deformazione biassiale,
materiale dell'elemento: alluminio, $\nu = 0,33$;

è stata misurata la prima deformazione principale $\varepsilon_1 = \varepsilon_1$.

L'errore di misura viene ricercato sulla base della deformazione trasversale dell'estensimetro.

Osservazione:

Le deformazioni sono indicate in modi diversi. Gli indici 1 e 2 ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) definiscono le direzioni principali, cioè le direzioni perpendicolari fra loro nelle quali si verificano i valori estremi dell'oggetto di misura.

Anche gli indici l e q ($\varepsilon_l, \varepsilon_q$) definiscono le deformazioni perpendicolari fra loro secondo la loro direzione di influenza sull'estensimetro.

In un altro punto compaiono anche gli indici x e y ($\varepsilon_x, \varepsilon_y$) che definiscono le direzioni x e y di un sistema di coordinate perpendicolari allineate appositamente. Le direzioni x e y possono essere diverse dalle direzioni principali 1 e 2 e dalle direzioni l e q dell'estensimetro.

Soluzione:

Prima di tutto si compone il rapporto $\varepsilon_q/\varepsilon_l$

$$\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l} = -1 \cdot \nu = -0,33.$$

Per il valore -0,33 non è contenuta nel diagramma nessuna curva parametrica; questo valore si può trovare per interpolazione. Il punto si trova così vicino all'asse delle coordinate degli errori (cioè la linea media orizzontale del diagramma) da rendere molto difficile una valutazione grafica. L'errore è ca. + 0,07% ed è perciò trascurabile.

Esempio 2:

Dati come nell'esempio 1, ora si cerca invece l'errore generato durante la misurazione estensimetrica della deformazione trasversale ε_2 dell'oggetto. In questo caso è $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$.

Soluzione:

$$\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = -\frac{1}{\nu} = -\frac{1}{0,33} = -3.$$

Nel diagramma si segua la curva parametrica -3 fino al punto di intersezione con la coordinata delle ascisse verticale $q = -0,01$. Da qui si proceda orizzontalmente verso sinistra e si legga il risultato sulla scala degli errori. I valori intermedi si ottengono anche in questo caso con un'interpolazione.

Risultato: $f_{\varepsilon_1} = f_{\varepsilon_2} = +2,8\%$

Esempio 3:

$q = +0,015$;
 Campo di deformazione biassiale $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = \varepsilon_l/\varepsilon_q = 5:1$;
 Misurazione in direzione $\varepsilon_1 = \varepsilon_l$;
 $\varepsilon_q/\varepsilon_l = 1:5 = +0,2$.
 Errore: $f_{\varepsilon_1} = f_{\varepsilon_2} = +1,2\%$.

Anche il diagramma di fig. 7.5-2 offre un metodo altrettanto semplice di correzione. Il suo impiego è conforme a quello del diagramma degli errori. Il giusto valore di dilatazione ε si ottiene dalla moltiplicazione del valore di deformazione indicato ε_a con il fattore di correzione C determinato tramite il diagramma:

$$\varepsilon = \varepsilon_a \cdot C. \quad (7.5-6)$$

Per l'esempio 1 non è necessaria alcuna correzione.

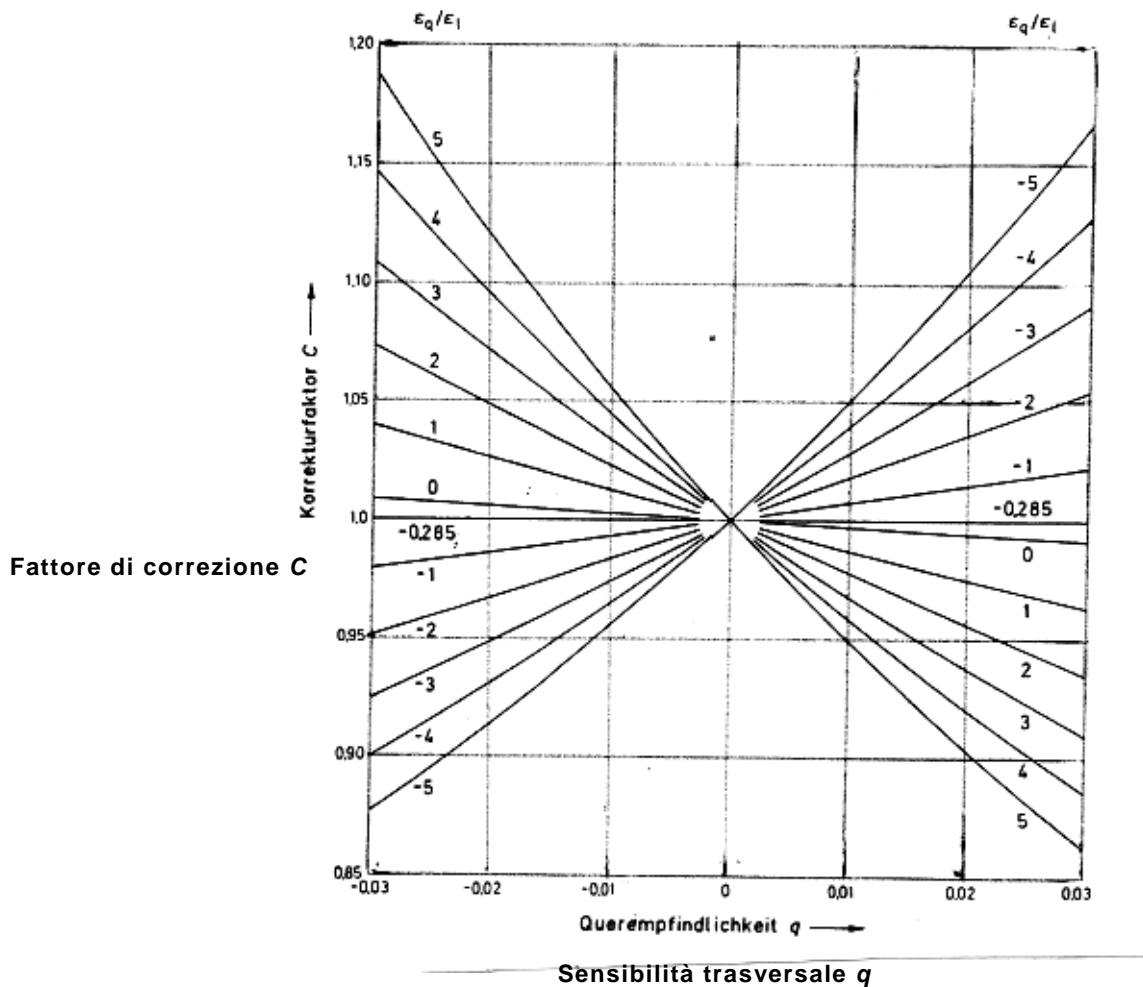


Figura 7.5-2: Diagramma per la determinazione del fattore di correzione C per la correzione dei valori di misura ottenuti con estensimetri sensibili alla dilatazione trasversale.

L'esempio 2 dà $C = 0,974$.

$$\varepsilon_a = \varepsilon + f = 100\% + 2,8\% = 102,8\%,$$

$$\varepsilon = \varepsilon_a \cdot C = 102,8\% \cdot 0,974 = 100,1\%.$$

Incertezza: + 0,1%.

L'esempio 3 dà $C = 0,991$.

$$\varepsilon_a = 100\% + 1,2\% = 101,2\%,$$

$$\varepsilon = \varepsilon_a \cdot C = 101,2\% \cdot 0,991 = 100,2\%.$$

Intertezza: +0,2%

Per il calcolo e la correzione degli errori precedentemente descritti deve essere noto il rapporto $\varepsilon_q/\varepsilon_l$. Ciò è possibile per esempio in uno stato di sforzo monoassiale con coefficiente di Poisson noto e nel caso di una pura sollecitazione di torsione ($\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$). In tutti gli altri casi le deformazioni devono essere misurate nella direzione della griglia e trasversalmente ad essa, p.e. con le cosiddette rosette X (par. 3.2.2).

7.5.2 Correzioni per le rosette di estensimetri

La sensibilità trasversale di griglie geometricamente identiche negli estensimetri a lamina dipende in scarsa misura dalla direzione che assume l'asse della griglia rispetto alla direzione di laminazione della lamina. Nelle rosette a X con disposizione della griglia a 0°/90° gli assi della griglia sono disposti all'atto della produzione a ± 45° rispetto alla direzione laminare e hanno perciò sensibilità trasversale uguale. Nelle rosette a tre elementi del tipo 0°/45°/90° e 0°/60°/120° questa concordanza può essere ottenuta solo in modo approssimativo. Tuttavia le differenze sono così minime che, per esigenze pratiche, si può lavorare con valori uguali. Nel diagramma di fig. 3.3.7b) a volte è perciò indicato solo il valore 1.

7.5.2.1 Rosette a X 0°/90°

Le rosette a X con due assi della griglia disposti fra loro a 90° (par. 3.2.2.2) vengono normalmente utilizzate per le misure di deformazioni nei campi di deformazione biassiali con direzioni principali note. Gli assi della griglia 1 e 2 vengono fatti coincidere con gli assi principali ε_1 e ε_2 . Dai valori di misura ε_1 e ε_2 si possono calcolare gli sforzi principali σ_1 e σ_2 (par. 8.2.1).

Il calcolo di correzione riportato in seguito non vale però solo per le disposizioni estensimetriche nelle direzioni principali ma anche per qualsiasi direzione del sistema di coordinate all'interno di un campo di deformazione. La indicizzazione della deformazione avviene quindi con x e y invece di 1 e 2 ($\varepsilon_x, \varepsilon_y$ invece di $\varepsilon_1, \varepsilon_2$).

Per ogni posizione del sistema a 90° degli assi della griglia si possono calcolare le deformazioni indicate (misurate) ε_{xa} e ε_{ya} le giuste dilatazioni ε_x e ε_y .

$$\varepsilon_x = \frac{1 - \nu_0 \cdot q}{1 - q^2} (\varepsilon_{xa} - q \cdot \varepsilon_{ya}) \approx (1 - \nu_0 \cdot q) (\varepsilon_{xa} - q \cdot \varepsilon_{ya}) \quad (7.5-7)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1 - \nu_0 \cdot q}{1 - q^2} (\varepsilon_{ya} - q \cdot \varepsilon_{xa}) \approx (1 - \nu_0 \cdot q) (\varepsilon_{ya} - q \cdot \varepsilon_{xa}) \quad (7.5-8)$$

Le forme approssimative delle equazioni (7.5-7) e (7.5-8) sono sufficientemente precise per scopi pratici poiché $1 - q^2$ è con $q = 0,03$, già maggiore di 0,999.

Anche in questo caso si può utilizzare in alternativa al calcolo di correzione il diagramma di fig. 7.5-2. Per prima cosa si deve determinare per ognuno dei due estensimetri il rapporto fra deformazione trasversale e longitudinale; cioè

$$\frac{\varepsilon_{ya}}{\varepsilon_{xa}} \text{ per l'estensimetro in direzione } x$$

$$\frac{\varepsilon_{xa}}{\varepsilon_{ya}} \text{ per l'estensimetro in direzione } y$$

Si cerchi poi nel diagramma il valore esatto di q , si salga verticalmente fino al parametro del rapporto di deformazione $\varepsilon_q/\varepsilon_l$ (o fino al valore intermedio) relativo alla griglia della rosetta in questione e da qui a sinistra fino alla scala delle ordinate da cui si possono leggere i fattori di correzione da C_x a C_y .

$$\varepsilon_x = C_x \cdot \varepsilon_{xa}, \quad (7.5-9)$$

$$\varepsilon_y = C_y \cdot \varepsilon_{ya}. \quad (7.5-10)$$

Un esempio chiarirà i due metodi i cui risultati saranno poi messi a confronto.

Esempio:

Rosetta a X a $0^\circ/90^\circ$,

$$q = 0,03$$

$$\nu_0 = 0,285$$

Valori di misura:

$$\varepsilon_{xa} = + 1280 \mu\text{m/m}$$

$$\varepsilon_{ya} = + 750 \mu\text{m/m}$$

Inserendoli nelle equazioni (7.4-7) e (7.4-8) si avrà:

$$\varepsilon_x = (1 - 0,285 \cdot 0,03) \cdot (1280 - 0,03 \cdot 750) = 1247 \mu\text{m/m},$$

$$\varepsilon_y = (1 - 0,285 \cdot 0,03) \cdot (750 - 0,03 \cdot 1280) = 706 \mu\text{m/m}.$$

Utilizzando il diagramma di correzione di fig. 7.5 -2 si avrà

$$\frac{\varepsilon_{ya}}{\varepsilon_{xa}} = \frac{750}{1280} = 0,59 \approx 0,6 \quad \text{per la griglia X}$$

$$\frac{\varepsilon_{ya}}{\varepsilon_{xa}} = \frac{1280}{750} = 1,71 \approx 1,7 \quad \text{per la griglia Y}$$

$$C_x = 0,977; C_y = 0,945.$$

Così diventa

$$\varepsilon_x = C_x \cdot \varepsilon_{xa} = 0,977 \cdot 1280 = 1250 \mu\text{m/m},$$

$$\varepsilon_y = C_y \cdot \varepsilon_{ya} = 0,945 \cdot 750 = 708 \mu\text{m/m}.$$

7.5.2.2 Rosette a R

Quando non sono note le direzioni degli assi principali sono necessarie tre misurazioni indipendenti fra loro per una determinazione completa dello stato di deformazione e di sforzo. Le forme delle rosette utilizzate allo scopo sono descritte nel par.3.2.2.2. Si tratta delle rosette con griglie a 0°/45°/90° e a 0°/60°/120°; esse sono equivalenti ma necessitano di formule diverse per la correzione della sensibilità trasversale. (I metodi per il calcolo delle deformazioni e gli sforzi principali e delle loro direzioni sono descritti nel par. 8.2.2).

Rosette a R 0°/45°/90°

I valori di misurazione della griglia a 0°- 90° devono essere corretti nello stesso modo delle rosette a X 0°/90°. Sono valide le equazioni (7.5-7) e (7.5-8) nella forma (7.5-11) e (7.5-13).

Anche il diagramma di fig. 7.5-2 può essere utilizzato per la determinazione dei fattori di correzione.

La griglia intermedia a 45° necessita di un'equazione di correzione diversa. Per maggiore semplicità verranno elencate successivamente tutte e 3 le equazioni senza però il divisore $1-q^2$.

$$\varepsilon_{0^\circ} = 1 - \nu_0 \cdot q (\varepsilon_{0^\circ a} - q \cdot \varepsilon_{90^\circ a}) \quad (7.5-11)$$

$$\varepsilon_{45^\circ} = 1 - \nu_0 \cdot q [\varepsilon_{45^\circ a} - q (\varepsilon_{0^\circ a} + \varepsilon_{90^\circ a} - \varepsilon_{45^\circ a})] \quad (7.5-12)$$

$$\varepsilon_{90^\circ} = 1 - \nu_0 \cdot q (\varepsilon_{90^\circ a} - q \cdot \varepsilon_{0^\circ a}) \quad (7.5-13)$$

Con a si indica sempre il valore di deformazione "indicato"; $\varepsilon_{0^\circ a}$ è il valore di deformazione indicato (misurato) della griglia di misurazione nella direzione a 0° ecc.

ε_{0° , ε_{45° , ε_{90° sono i valori di deformazione corretti nelle direzioni a 0°, 45° e 90°.

Rosette a R 0°/60°/120°

La correzione dei valori di misurazione delle griglia a 0°, 60° e 120° avviene nel modo suddetto ma con le equazioni sottostanti. Anche in questo caso è stato tralasciato il divisore $1-q^2$.

$$\varepsilon_{0^\circ} = 1 - \nu_0 \cdot q \left[\left(1 + \frac{q}{3}\right) \cdot \varepsilon_{0^\circ a} - \frac{2}{3} q (\varepsilon_{60^\circ a} + \varepsilon_{120^\circ a}) \right] \quad (7.5-14)$$

$$\varepsilon_{60^\circ} = 1 - \nu_0 \cdot q \left[\left(1 + \frac{q}{3}\right) \cdot \varepsilon_{60^\circ a} - \frac{2}{3} q (\varepsilon_{120^\circ a} + \varepsilon_{0^\circ a}) \right] \quad (7.5-15)$$

$$\varepsilon_{120^\circ} = 1 - \nu_0 \cdot q \left[\left(1 + \frac{q}{3}\right) \cdot \varepsilon_{120^\circ a} - \frac{2}{3} q (\varepsilon_{0^\circ a} + \varepsilon_{60^\circ a}) \right] \quad (7.5-16)$$

8 LA LEGGE DI HOOKE PER LA DETERMINAZIONE DELLE TENSIONI DEI MATERIALI TRAMITE LE MISURE DI DEFORMAZIONE

I metodi per il calcolo degli sforzi dei materiali dalle deformazioni misurate si basano sulla legge di Hooke. La sua validità si estende al campo di deformazione elastica dei materiali elastici. Espressa nella sua forma più semplice la legge di Hooke diventa:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (8.0-1)$$

σ = sforzo del materiale (par. 2.2.1)

ε = deformazione (par. 2.1)

E = modulo di elasticità del materiale (par. 2.3.1)

Questa versione della legge di Hooke è valida solo per lo stato di sforzo monoassiale; gli altri stati di sforzo richiedono versioni ampliate (par. 2.2.4 e par. successivi).

In quest'ambito si sottolinea un dato di fatto importante:

Con le misurazioni di deformazione si può determinare sempre solo la differenza fra uno stato iniziale esistente e una variazione di stato verificatasi successivamente. Lo stato iniziale può essere libero da sollecitazioni ma può essere anche soggetto a un notevole precarico; p.e. tramite il peso proprio dell'oggetto (esempio: ponte).

I precarichi o anche gli stati di sforzo residuo (par. 2.2.3) si possono misurare solo se è possibile effettuare una piccola perforazione dell'oggetto (par. 8.3).

8.1 Lo stato di sforzo monoassiale

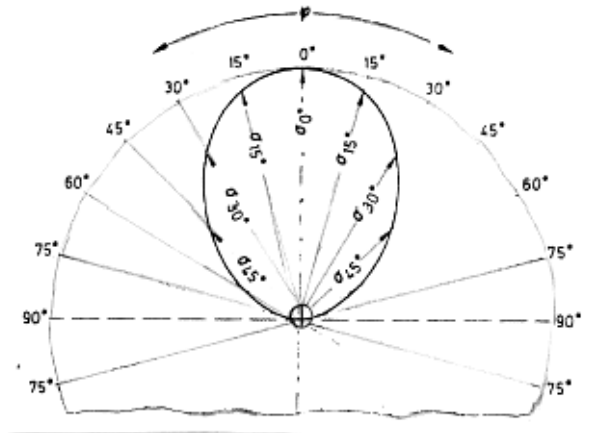
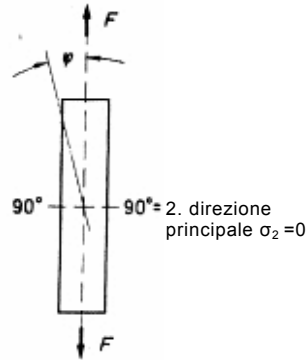
Il caso più semplice di stato di sforzo monoassiale si verifica nelle barre in trazione e in compressione. Il massimo degli sforzi di trazione (o compressione) ha luogo nella direzioni delle forze applicate. In tutte le altre direzioni gli sforzi sono minori e seguono la relazione:

$$\sigma = f(\varphi) = \frac{1}{2} \sigma_{\max} (1 + \cos 2\varphi). \quad (8.1-1)$$

φ = angolo fra la direzione di applicazione della forza (direzione principale) e la direzione osservata.

Nella fig. 8.1-1 viene rappresentata questa funzione per la barra di trazione di un diagramma polare.

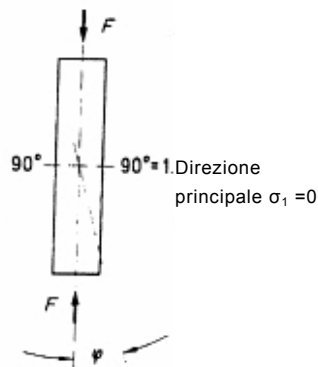
$0^\circ = 1.$ direzione principale σ_1



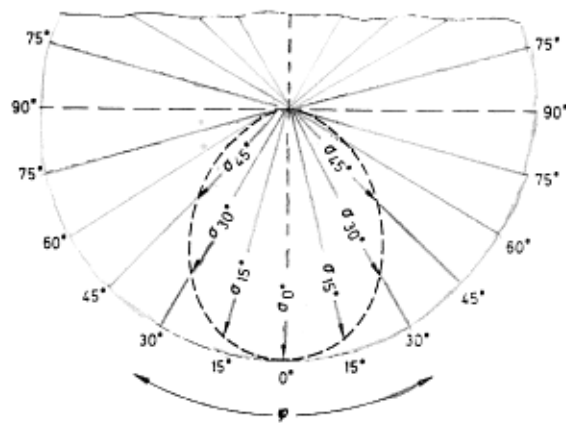
$$\sigma = f(\varphi); \sigma_{0^\circ} = \sigma_{\max} \text{ (positiva)}; \sigma_{90^\circ} = 0$$

Figura 8.1-1: Distribuzione dello sforzo a una barra di trazione

La figura 8.1-2 mostra la relazione (8.1-1) per la barra in compressione.



$0^\circ = 2.$ direzione principale σ_2



$$\sigma = f(\varphi); \sigma_{0^\circ} = \sigma_{\max} \text{ (negativa)}; \sigma_{90^\circ} = 0$$

Figura 8.1-2: Distribuzione degli sforzi nella barra in compressione

Osservazione:

La 1. a e la 2. a direzione principale sono sempre perpendicolari fra loro. La 1. a direzione principale è sempre quella con il valore numerico algebricamente superiore; perciò il cambio dell'indicazione della barra di trazione e in compressione .

Se si considera la distribuzione di deformazione nello stesso modo in cui si è precedentemente analizzata la distribuzione di sforzo, si riscontrerà uno stato di deformazione biassiale nonostante lo stato di sforzo monoassiale.

Ci sono due direzioni distinte, una nella direzione della forza applicata (0°) e l'altra trasversale ad essa (90°).

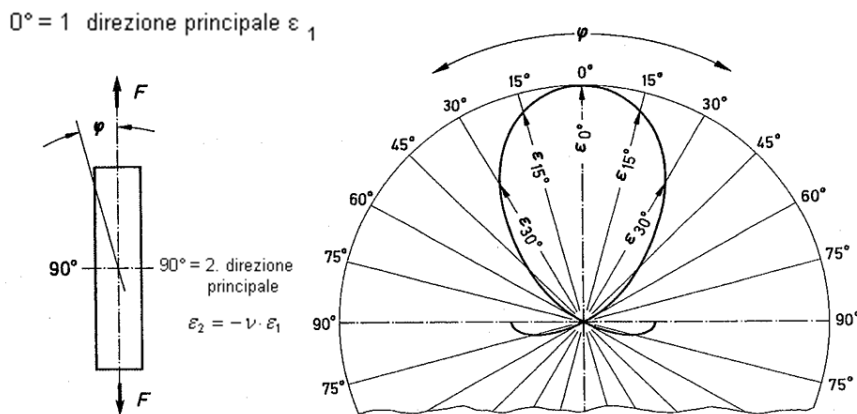
A partire dalla deformazione principale $\epsilon_{0^\circ} = \epsilon_1$ si possono calcolare le deformazioni ϵ_φ che insorgono nell'angolo $\varphi > 0^\circ \dots 90^\circ$ rispetto alla direzione x secondo la relazione:

$$\epsilon = f(\varphi) = \frac{1}{2} \epsilon_1 [1 - \nu + \cos 2\varphi (1 + \nu)]. \tag{8.1-2}$$

Il rapporto fra le due direzioni principali viene espresso tramite il numero di Poisson m o il suo reciproco, il coefficiente di Poisson ν (par. 2.2.3):

$$\epsilon_2 = -\nu \cdot \epsilon_1 \tag{8.1-3}$$

Nelle fig. 8.1-3 e 8.1-4 viene rappresentata la relazione (8.1-2) per una barra di trazione o compressione.



$$\epsilon = f(\varphi); \epsilon_{0^\circ} = \epsilon_1 \text{ (positiva); } \epsilon_{90^\circ} = \epsilon_2 \text{ (negativa)}$$

Figura 8.1-3: Distribuzione di deformazione in una barra di trazione

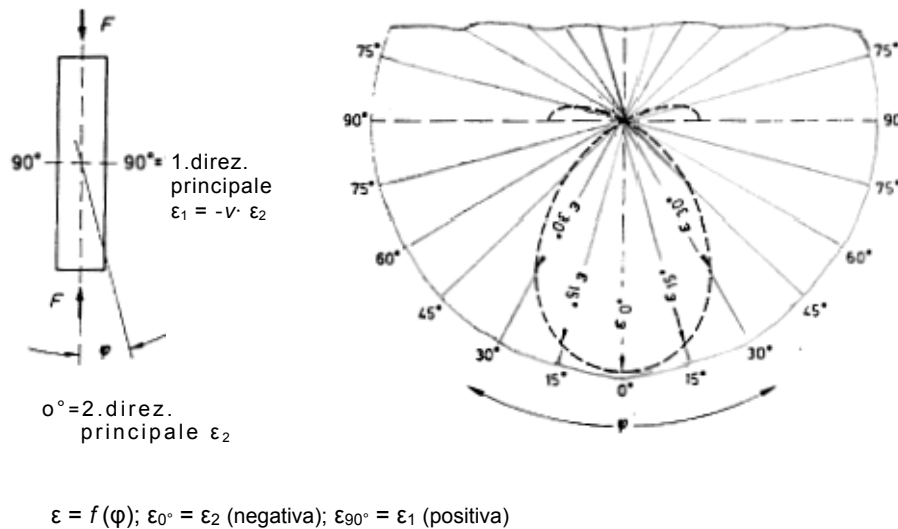


Figura 8.1-4: Distribuzione di deformazione in una barra in compressione

Osservazione:

Il diagrammi delle fig. 8.1-3 e 8.1-4 sono realizzati per un materiale con coefficiente di Poisson $\nu = 0,3$. In questo caso , con un angolo $\varphi = 61^\circ 20'$, la deformazione diventa $\varepsilon_\varphi = 0$; cioè in questa direzione il passaggio per lo zero è fra un campo di deformazione positivo e negativo.

La differenza rappresentata nei diagrammi fra distribuzione di sforzo e distribuzione di deformazione in relazione alla direzione della forza applicata porta alla conclusione estremamente importante:

Lo sforzo del materiale σ può essere ricavato secondo la legge di Hooke per lo stato di sforzo monoassiale sulla base dell'equazione (8.0-1) dalla deformazione ε solo se la deformazione è stata preventivamente calcolata nella direzione di applicazione della forza (nelle fig. 8.1-3 e 8.1-4 la direzione 0°)!

Nella direzione trasversale (direzione a 90°), nonostante la deformazione misurabile (contrazione trasversale, deformazione trasversale), non esiste alcuno sforzo nel materiale!

Se si vogliono ottenere risultati attendibili bisogna quindi conoscere la direzione di applicazione della forza e misurare la deformazione in questa direzione. Se essa non è nota o è conosciuta solo in modo approssimativo, allora le misurazioni e la loro valutazione devono essere effettuate come nello stato di sforzo biassiale con direzioni principali sconosciute secondo il par. 8.2.2.

8.2 La stato di sforzo biassiale

Nell'ambito dell'analisi sperimentale delle sollecitazioni la stato di sforzo monoassiale dovrebbe essere un'eccezione. Molto più spesso si riscontrerà uno stato di sforzo biassiale la cui determinazione non può più essere effettuata nel semplice modo adatto per lo sforzo monoassiale poiché esso causerebbe dei considerevoli errori (par. 8.1).

Negli stati di sforzo piano gli sforzi normali estremi σ_1 e σ_2 si verificano nelle direzioni perpendicolari fra loro. Gli sforzi σ_1 e σ_2 sono denominati sforzi principali e, analogamente, le direzioni 1 e 2 diventano le direzioni principali dello stato di sforzo piano. Se sono note gli sforzi normali principali e le direzioni di applicazione delle forze lo stato di sforzo biassiale è definito chiaramente.

Direzioni di sforzi principali noti si hanno p.e. sulla superficie di un contenitore cilindrico sotto pressione interna, su di un albero sollecitato con torsione pura, nell'area lontano dai bordi di una lastra piegata.

Negli altri oggetti e in caso dell'azione contemporanea di diverse grandezze influenti, come p.e. forza normale e flessione o torsione e flessione ecc., si deve presupporre che le direzioni principali non siano conosciute.

8.2.1 Lo stato di sforzo biassiale con direzioni principali note

La relazione fra sforzi e deformazioni nel campo di sforzo biassiale e l'interazione di deformazione longitudinale e trasversale saranno chiariti fase per fase sulla base di un esempio. Nello stato iniziale l'oggetto portato ad esempio è un elemento piano di forma quadrata, fig. 8.2-1a.

Questo elemento piano viene sollecitato con una forza di trazione F_1 che agisce nella direzione 1-1 sull'intera superficie dell'elemento stesso, fig. 8.2-1b. Nella direzione di applicazione della forza si generano uno sforzo del materiale σ_1 e una deformazione longitudinale ε_1 , nella direzione trasversale lo sforzo del materiale $\sigma_2 = 0$ (stato di tensione monvassiale), la deformazione trasversale ε_2 è negativa (contrazione trasversale).

Se su questo elemento piano con un carico monoassiale agisce ora nella direzione 2-2 anche una forza di trazione aggiuntiva F_2 , perpendicolare alla direzione 1-1, si ottiene una sovrapposizione dei due sforzi σ_1 e σ_2 con conseguenze anche sullo stato di deformazione esistente, fig. 8.2-1c. Nella direzione 2-2 si genera una deformazione ε_2 che si sovrappone alla contrazione trasversale dallo stato di carico b (e, in questo esempio, addirittura la supera). Nella direzione 1-1 si crea in seguito al carico nella direzione 2-2 una contrazione trasversale che va anch'essa a sovrapporsi alla deformazione esistente dallo stato di carico b e così la diminuisce. Sulla base di questa sovrapposizione della deformazione e della contrazione trasversale dai due carichi nelle direzioni principali 1 e 2 si perde la semplice relazione lineare fra sforzo e deformazione che la legge di Hooke formula per lo stato di sforzo monoassiale. L'equazione (8.0-1) non è più utilizzabile perché non considera l'influenza della deformazione (vedere l'osservazione a pag. 221). Perciò non è possibile neanche la determinazione dello stato di sforzo biassiale da una singola misurazione di deformazione. Le due dilatazioni ε_1 e ε_2 che hanno luogo nelle direzioni principali 1 e 2 devono essere misurate separatamente.

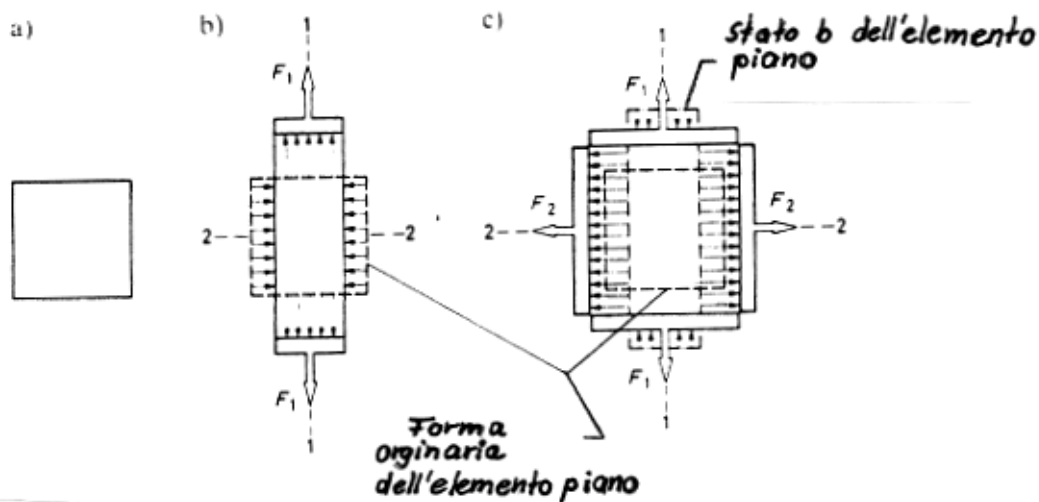


Figura 8.2-1: Struttura di uno stato di sforzo biassiale con rappresentazione dello stato di deformazione risultante
 a) elemento piano privo di carico
 b) elemento piano carico in direzione 1
 c) elemento piano carico nelle direzioni 1 e 2

Gli sforzi normali principali σ_1 e σ_2 dello stato di sforzo biassiale piano si calcolano secondo la legge di Hooke generalizzata sulla base delle deformazioni principali ϵ_1 e ϵ_2 , del modulo di elasticità E e del coefficiente di Poisson ν del materiale:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_1 + \nu \cdot \epsilon_2) \quad (8.2-1)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_2 + \nu \cdot \epsilon_1) \quad (8.2-2)$$

Si presuppone che lo sforzo σ_3 nella direzione principale 3 (perpendicolare alla superficie) sia uguale a zero.

Per la valutazione delle misurazioni bisogna sempre partire dalle equazioni (8.2-1 e (8.2-2), anche se $\epsilon_2 = 0$!

Osservazione:

Nell'esempio indicato i due sforzi normali principali σ_1 e σ_2 sono positivi e di uguale grandezza. È senz'altro possibile che i due sforzi si differenzino molto per grandezza o addirittura che abbiano segno diverso, per cui i rapporti di deformazione possono formarsi in modo essenzialmente più complicato. Perciò può capitare che in una direzione si verifichi uno sforzo negativo nonostante la deformazione sia positiva e viceversa.

Un esempio per un oggetto la cui superficie è sottoposta ad uno stato di sforzo biassiale con direzioni principali note è mostrato in fig. 8.2-2.

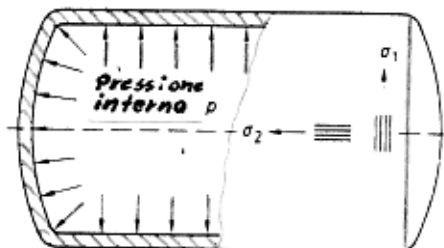


Figura 8.2-2: Una caldaia a sezione circolare sollecitata con pressione interna.

Sulla superficie esterna del mantello cilindrico della caldaia si crea uno stato di sforzo biassiale in cui la 1. a direzione principale σ_1 ha andamento tangenziale (nella direzione perimetrale) e la 2. a direzione principale σ_2 ha andamento assiale. I due sforzi principali σ_1 , σ_2 si calcolano dalle deformazioni ϵ_1 , ϵ_2 misurate secondo le formule (8.2-1) e (8.2-2).

Un ulteriore esempio, un albero sollecitato da torsione, è descritto nel par. 8.4.4.

Anche in condizioni di carico così chiare bisognerebbe sempre procedere con una certa cautela nella misura poiché delle sollecitazioni di flessione e/o normali aggiuntive non riconoscibili all'esterno possono facilmente tramutare lo stato ipotizzato con direzioni principali note in uno con direzioni principali ignote. In questo caso si devono utilizzare le formule indicate nel par. 8.2.2.

Per semplificare le operazioni di applicazione si adottano, per le misurazioni in un campo di sforzo biassiale con direzioni principali note, le rosette a X descritte nel par. 3.2.2.2 e raffigurate nella fig. 3.2-9a. Gli assi delle due griglie devono essere applicati in modo che coincidano con gli assi degli sforzi normali principali (= direzioni di deformazione principali)!

8.2.2 Lo stato di sforzo biassiale con direzione principale sconosciuta

In oggetti dalle forme complesse, in caso di sovrapposizione di diversi tipi di sollecitazioni (normale, di flessione e/o di torsione) o nei punti con sforzi non uniformi (p.e. variazioni della sezione) una predizione in piena regola delle direzioni delle tensioni principali non è possibile. È da escludere perciò un'analisi secondo il metodo descritto nel par. 8.2.1.

In ogni caso, siccome le direzioni delle tensioni principali non sono fissate in modo chiaro, l'analisi delle sollecitazioni deve essere effettuata secondo il metodo descritto qui di seguito [8-1].

Le figure 8.2-3 e 8.2-4 mostrano come esempio di un oggetto complicato una struttura a rivestimento portante. Lo studio dello stato di sforzo è stato effettuato nel modello mostrato in fig. 8.2-3 [8-2]. La fig. 8.2-4 mostra la realizzazione principale.

Anche in questo caso lo scopo è la determinazione delle sforzi normali principali σ_1 e σ_2 e delle direzioni degli sforzi principali.

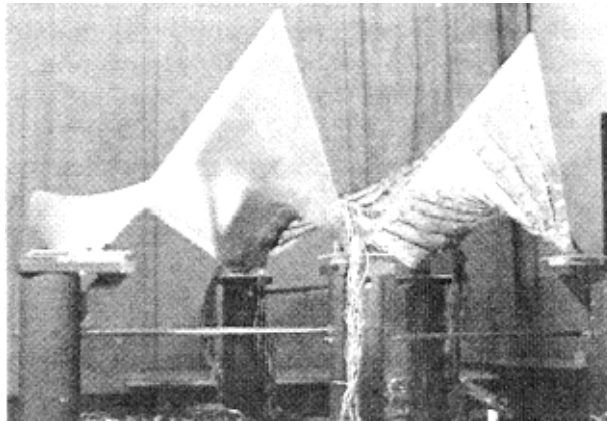


Figura 8.2-3: Esempio di un oggetto con direzioni degli sforzi principali sconosciuti (secondo [8-2]). Modello in materiale sintetico di un tetto a rivestimento portante in cemento per l'analisi delle sollecitazioni.



Figura 8.2-4: Versione principale del modello di fig. 8.2-3 (secondo [8-2]).

In questo caso bisogna misurare la deformazione nei punti interessati in tre diverse direzioni. Queste direzioni, che non coincidono con le direzioni principali, vengono di

solito definite con le lettere a, b, c e le deformazioni misurate in queste direzioni con ϵ_a , ϵ_b e ϵ_c . Importante è la sequenza degli assi della griglia a, b, c in un senso di rotazione matematicamente positivo (a sinistra guardando l'oggetto dall'alto), importante perché questo senso di rotazione è alla base delle formule (8.2-3) fino a (8.2-7) per il calcolo degli sforzi normali principali e delle loro direzioni. Per evitare confusioni i collegamenti delle griglie delle rosette HBM devono essere contrassegnati con le lettere a, b e c.

In linea di principio queste tre deformazioni potrebbero essere misurate in una direzione qualsiasi. In pratica però si sono sviluppati due sistemi con i quali la valutazione avviene secondo le formule relative. Gli estensimetri speciali offerti per questo scopo, le cosiddette rosette a R, hanno 3 griglie su di un supporto comune. Essi sono descritti nel par. 3.2.2.2.

8.2.2.1 Misurazione con la rosetta 0°/45°/90°

La fig. 3.2-9b mostra alcuni esempi di possibili disposizioni delle griglia nel gruppo di rosette a 0°/45°/90°.

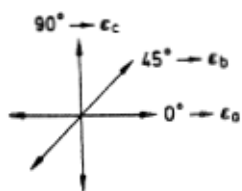


Figura 8.2-5: Disposizione delle deformazioni ϵ_a , ϵ_b , ϵ_c rispetto alle direzioni angolari 0°, 45°, 90°.

Il calcolo degli sforzi normali principali σ_1 , σ_2 avviene secondo la relazione

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\epsilon_a + \epsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \cdot \sqrt{(\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_c - \epsilon_b)^2} \quad (8.2-3)$$

8.2.2.2 Misurazione con la rosetta 0°/60°/120°

La fig. 3.2-9c mostra alcuni esempi di possibili disposizioni della griglia nel gruppo delle rosette a 0°/60°/120°.

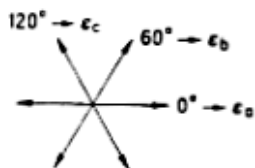


Figura 8.2-6: Disposizione delle deformazioni ϵ_a , ϵ_b , ϵ_c rispetto alle direzioni angolari 0°, 60°, 120°.

In relazione alla diversa disposizione della griglia della rosetta avviene il calcolo delle sforzi normali principali σ_1 , σ_2 secondo l'equazione

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} \pm \frac{E}{1+\nu} \cdot \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \frac{1}{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2} \quad (8.2-4)$$

8.2.2.3 La determinazione delle direzioni principali

Le direzioni principali sono le direzioni lungo le quali si verificano gli sforzi normali principali σ_1 e σ_2 calcolati secondo le equazioni (8.2-3) e (8.2-4). (Sono identiche alle direzioni normali principali ε_1 e ε_2). Esse si possono determinare secondo relazioni geometriche dalle deformazioni ε_a , ε_b e ε_c misurate con la rosetta R.

Le seguenti versioni hanno lo scopo di fornire agli addetti ai lavori uno schema pratico e maneggevole. Gli aspetti teorici del cerchio di Mohr, che rappresenta il fondamento, sono descritte nella letteratura tecnica e in [8-1] e non vengono trattate in questa sede.

Per prima cosa si calcola la tangente di un angolo ausiliario ψ (psi):

per la rosetta $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ secondo la formula

$$\tan \psi = \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \quad \left| \quad \frac{Z}{N} \right. \quad (8.2-5)$$

per la rosetta $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ secondo la formula

$$\tan \psi = \frac{\sqrt{3}(\varepsilon_t - \varepsilon_c)}{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c} \quad \left| \quad \frac{Z}{N} \right. \quad (8.2-6)$$

Osservazione:

La tangente di un angolo in un triangolo rettangolo è il rapporto fra il cateto opposto (= numeratore Z) e il cateto adiacente (= denominatore N):

$$\tan \psi = \frac{\text{cateto opposto}}{\text{cateto adiacente}} = \frac{Z}{N} \quad (8.2-7)$$

La fig. 8.2-7 mostra che l'angolo ψ può trovarsi in 4 punti diversi del cerchio a seconda del segno del cateto opposto e di quello adiacente.

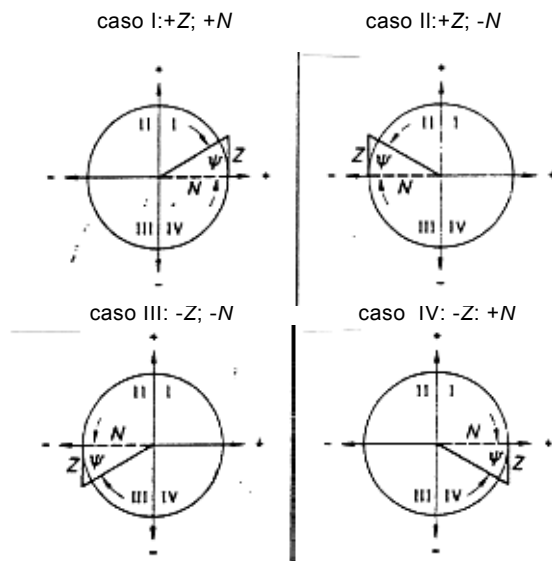


Figura 8.2-7: Schema per l'individuazione del quadrante di appartenenza dell'angolo ψ

Questa ambiguità della tangente rende necessario determinare i segni di numeratore (Z) e denominatore (N) prima del calcolo definitivo dei due quozienti (8.2-5) e (8.2-6). Essi sono importanti perché solo grazie a loro è possibile sapere in quale quadrante del cerchio si può trovare l'angolo ψ . Questa chiara disposizione è indispensabile per la determinazione delle direzioni principali 1 e 2.

Dal valore numerico della tangente si determina per prima cosa il valore dell'angolo, o da una tabella o dal registro di un calcolatore:

$$|\psi| = \arctan [^\circ] \quad (8.2-8)$$

Poi si deve determinare il valore numerico dell'angolo ϕ (fi) tramite lo schema mostrato in fig. 8.2-8.

Z	$\geq 0 (+)$	$> 0 (+)$	$\leq 0 (-)$	$< 0 (-)$
N	$> 0 (+)$	$\leq 0 (-)$	$< 0 (-)$	$\geq 0 (+)$
Quadrante di appartenenza	I	II	III	IV
$\psi =$	$\frac{1}{2} \cdot (0^\circ + \psi)$	$\frac{1}{2} \cdot (180^\circ - \psi)$	$\frac{1}{2} \cdot (180^\circ + \psi)$	$\frac{1}{2} \cdot (360^\circ - \psi)$

Figura 8.2-8: Schema per la determinazione dell'angolo

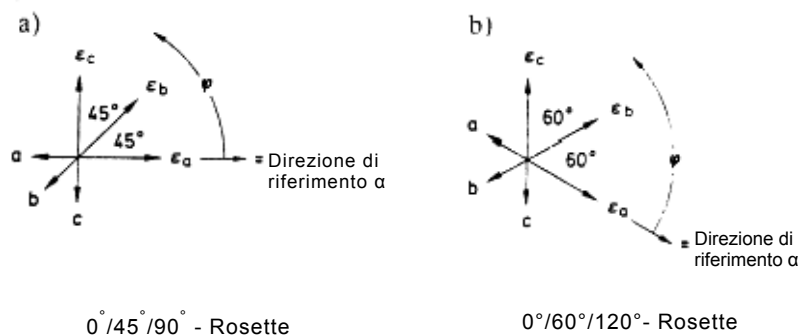


Figura 8.2- 9: Determinazione delle direzioni di sforzo principali

- a) nella rosetta $0^\circ/45^\circ/90^\circ$**
b) nella rosetta $0^\circ/60^\circ/120^\circ$

L'angolo così trovato φ uscente dall'asse della griglia di riferimento a deve essere indicato con segno matematicamente positivo (autorario) (fig. 8.2-9). L'asse a forma un lato dell'angolo φ , l'altro angolo è dato dalla 1.a direzione principale (direzione della 1.a tensione normale principale σ_1 , identica a quella della 1.a direzione di deformazione principale ϵ_1). Il vertice si trova nel punto di intersezione degli assi della griglia.

La 2.a direzione principale (σ_2, ϵ_2) ha l'angolo $\varphi + 90^\circ$.

8.2.2.4 Altre possibilità per la determinazione degli sforzi normali principali e delle loro direzioni

A) Un metodo molto semplice è la soluzione grafica per mezzo di nomogrammi speciali che vengono offerti dalla HBM per i due tipi di rosetta a $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ e a $0^\circ/60^\circ/120^\circ$. Nel nomogramma sono inseriti i parametri elastici modulo di elasticità (E) e coefficiente di Poisson (ν) per l'acciaio e l'alluminio. Ogni progettista può effettuare la valutazione poiché non sono necessarie conoscenze sulla scienza della resistenza dei materiali.

B) Ci sono anche calcolatori tascabili programmabili che, immettendo i dati catman[®] risolvono le equazioni relative alle rosette.

C) Coi programmi sperimentali di ampia portata si possono richiedere, manualmente o in automatico, i segnali delle singole griglie dai dispositivi di commutazione dei punti di misurazione, li si può amplificare in modo sequenziale o parallelo ed immeterli poi, tramite interfaccia, nei computer disponibili che si occupano della valutazione ed eventualmente della rielaborazione.

8.2.3 Il cerchio di Mohr

Le direzioni principali 1 e 2 di uno stato di sforzo piano si distinguono per il fatto che in esse gli sforzi normali principali σ_1 , σ_2 assumono i loro valori massimi e minimi, mentre gli sforzi tangenziale τ si azzerano. In ogni altra direzione gli sforzi normali si trovano fra questi valori estremi e gli sforzi tangenziali assumono valori finiti.

Nella fig. 8.2-10a è riportato un particolare di una superficie sollecitata biassialmente con le direzioni degli sforzi principali σ_1 , σ_2 . Entro questa superficie è inserito un elemento le cui coordinate x , y sono ruotate dell'angolo φ rispetto agli assi principali. Gli sforzi che si generano sull'elemento si possono calcolare secondo le relazioni

$$\sigma_x = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \cos 2\varphi, \quad (8.2-9)$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \cos 2\varphi, \quad (8.2-10)$$

$$\tau_{xy}, \tau_{yx} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \sin 2\varphi. \quad (8.2-11)$$

τ_{xy} e τ_{yx} hanno sempre lo stesso valore; la fig. 2.8-10b mostra la regola relativa al loro segno.

Gli sforzi normali principali σ_1 , σ_2 e le loro direzioni si possono calcolare secondo i metodi descritti nei par. 8.2.1 e 8.2.2.

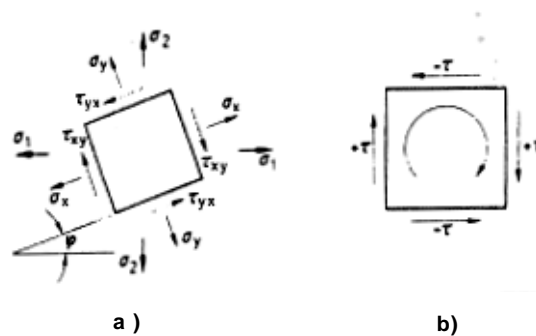


Figura 8.2-10: Stato di sforzo biassiale piano

- a) Sforzi su di un elemento piano le cui coordinate x e y sono ruotate dell'angolo φ rispetto alle direzioni principali 1e 2.
- b) Regola del segno per gli sforzi tangenziali τ (fissate per convenzione).

Lo stato di sforzo biassiale piano può essere chiaramente descritto in due modi:

1. tramite l'indicazione degli sforzi normali principali σ_1 , σ_2 e le loro direzioni principali,
2. con l'indicazione degli sforzi normali σ_x , σ_y e degli sforzi tangenziali τ_{xy} e τ_{yx} .

La prima soluzione risulta dai metodi descritti nei par. 8.2.1 e 8.2.2, la seconda dal cerchio di Mohr. La scelta cade sulla seconda quando gli sforzi sono da riferire a un sistema di coordinate relativo all'elemento strutturale.

Il cerchio di Mohr viene rappresentato in un sistema di coordinate $\sigma - \tau$ ortogonale, fig. 8.2-11a.

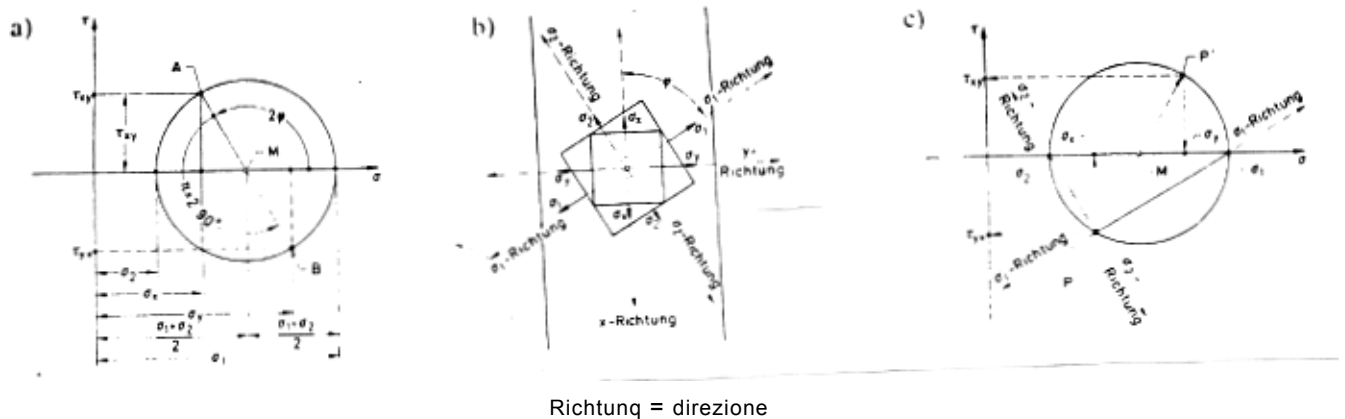


Figura 8.2-11: Il cerchio di Mohr, 1.o esempio

a) Costruzione

b) Situazione degli sforzi nell'elemento strutturale

c) Costruzione dei poli

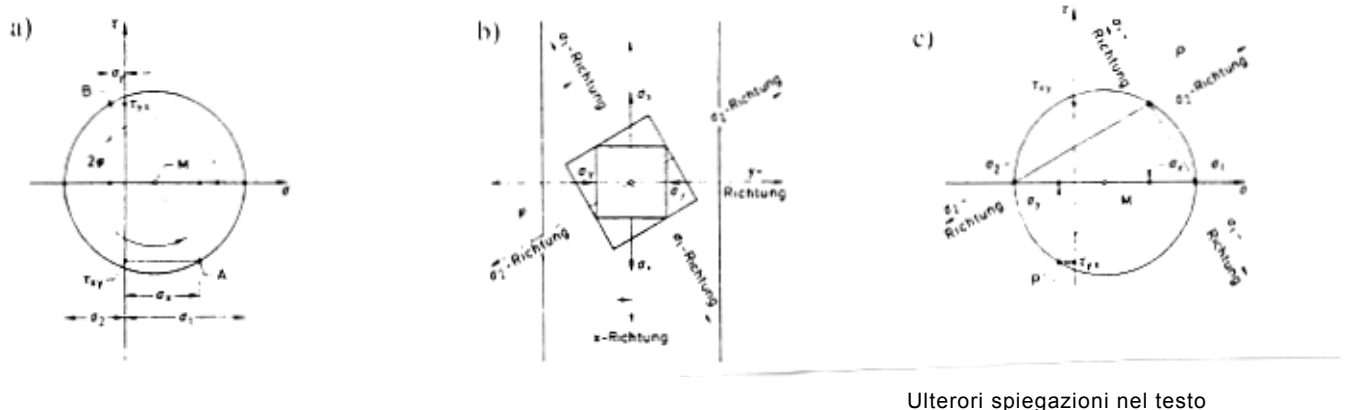


Figura 8.2-12: Il cerchio di Mohr, 2. o esempio
Spiegazioni come per la fig. 8.2-11.

I due assi devono essere dotati di scala con la stessa misura N/mm^2 o N/cm^2 . Quindi gli sforzi principali σ_1 e σ_2 , calcolati dalle misure di deformazione secondo le equazioni dei pa. 8.2.1 e 8.2.2, vengono disegnate sull'asse σ . Intorno al punto mediano M si tracci un cerchio; M si trova sull'asse σ nel punto $1/2 (\sigma_1 + \sigma_2)$, il suo raggio è $1/2 (\sigma_1 - \sigma_2)$, il cerchio taglia i punti σ_1 e σ_2 .

Nel cerchio di Mohr tutti gli angoli appaiono raddoppiati. L'angolo compreso fra la direzione principale 1 e l'asse x (fig. 8.2-11b) deve quindi essere disegnato con il valore 2φ partendo dall'asse σ in senso matematicamente positivo (antiorario); il suo primo lato forma l'asse σ e il secondo taglia il cerchio nel punto A. Il secondo lato dell'angolo $2\varphi + 2 \cdot 90^\circ$ (tratteggiato) corrisponde alla direzione σ_y e taglia il cerchio nel punto B. Si proiettino i punti A e B sull'asse σ e si leggano i valori per σ_x e σ_y . I punti A e B proiettati sull'asse τ forniscono i valori degli sforzi tangenziali τ_{xy} e τ_{yx} .

Nella fig.8.2-11b sono rappresentati gli elementi piani disegnati l'uno nell'altro secondo le direzioni principali 1 e 2 e secondo le coordinate x e y dell'oggetto.

Un metodo alternativo è la costruzione dei poli del cerchio di Mohr raffigurato in fig. 8.2-11c.

La costruzione dei poli è un'alternativa per la determinazione degli sforzi σ_x , σ_y , τ_{xy} , τ_{yx} . Anche alla base delle costruzioni di fig. 8.2-11c c'è la situazione dell'oggetto delle fig. 8.2-11b.

Il cerchio di Mohr deve essere realizzato, come sopra, nel sistema di coordinate ortogonali $\sigma - \tau$ dagli sforzi principali calcolati σ_1 , σ_2 fig. 8.2-11c. I passi successivi si differenziano da quelli del metodo descritto prima.

Si osservino le direzioni delle coordinate $\sigma - \tau$ come coincidenti con il sistema di coordinate di riferimento dell'elemento strutturale, nell'esempio l'asse τ del diagramma è parallelo all'asse x dell'elemento e l'asse σ è parallelo all'asse y. Si trasferisca quindi la direzione σ_1 , in linea retta sul cerchio in modo che essa tagli il punto σ_1 , e il cerchio. Si proceda nello stesso modo per la direzione σ_2 , cosicché essa tagli il punto σ_2 e il cerchio. Il punto di intersezione delle due rette sul cerchio si deve trovare sul punto comune P, il polo del cerchio di Mohr. Proiettando il polo sull'asse σ e τ si ottengono σ_x e τ_{xy} . Si tracci quindi una retta dal polo P attraverso il punto medio M che tagli il cerchio nella parte opposta: in questo modo si ottiene il punto P'. Proiettando P' sugli assi σ e τ si ricavano σ_y e τ_{yx} .

Nella fig. 8.2-11 σ_1 e σ_2 sono entrambi positivi. Nell'esempio di fig. 8.2-12 σ_1 è positivo e σ_2 negativo.

8.3 Determinazione degli sforzi residui secondo il metodo della rosetta forata

Gli sforzi residui sulla superficie degli elementi si possono determinare con un estensimetro solo se lo stato di sforzo esistente viene disturbato da un intervento meccanico. Con il metodo della rosetta forata si riesce a limitare al minimo la portata di questo intervento. La rosetta indicata nel par. 3.2.2.3 fig. 3.2-14, richiede solo una piccola foratura con un diametro e una profondità di foratura di 1,5 mm, per cui l'intervento può essere considerato come quasi privo di conseguenze.

Durante la foratura bisogna osservare i seguenti punti: la bulinatura non è consentita perché causerebbe un'alterazione dello stato di tensione proprio nel campo della rosetta. Per questo motivo la rosetta RY 61 raffigurata in fig. 8.3-1 è dotata di una boccia di foratura che, insieme con un dispositivo ausiliario, assicura la concentricità del trapano. Il trapano deve essere perfettamente affilato per non creare ulteriori sforzi residui che falserebbero il risultato.

La foratura causa un'interruzione del flusso di forze nella superficie dell'elemento con un conseguente ritorno elastico del materiale circostante. Da questo ritorno elastico misurabile con estensimetro si può calcolare lo stato di sforzo precedente. Si parte da uno stato di sforzo biassiale piano con direzioni principali sconosciute poiché il ritorno elastico deve essere misurato in tre direzioni diverse.

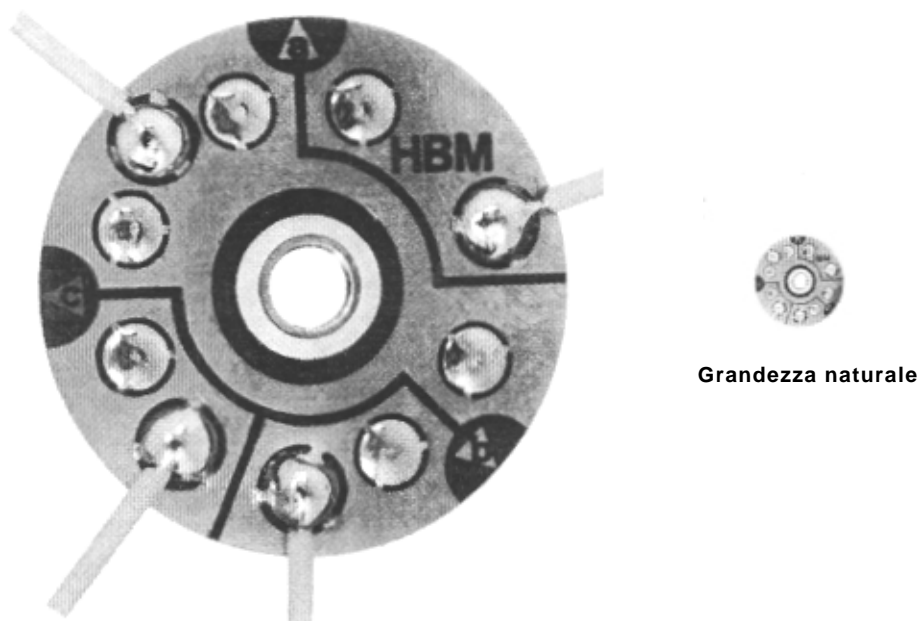


Figura 8.3-1: Rosetta a forare RY 61

Una descrizione dettagliata del procedimento è fornita negli articoli [3-6] e [3-7] che contengono anche le formule per la valutazione dei risultati. Le equazioni sottostanti presuppongono che le misure di deformazione siano effettuate nelle direzioni $0^\circ/45^\circ/90^\circ$; esse sono tratte da [3-7] e [3-8].

Prima di forare si misurino sulle griglie a, b e c i valori di riferimento ϵ_v . Dopo la foratura si misurino i valori variati ϵ_N . La differenza è la deformazione di ritorno elastico ricercata $\Delta\epsilon$:

$$\Delta\epsilon = \epsilon_N - \epsilon_v \quad (8.3-1)$$

Per differenziare si indichino i valori di misura con le varie denominazioni delle griglie: $\Delta\epsilon_a$, $\Delta\epsilon_b$ e $\Delta\epsilon_c$. Nelle rosette HBM le denominazioni delle griglie si possono trovare sugli cavi di collegamento, fig. 8.3-1 e 8.3-2.

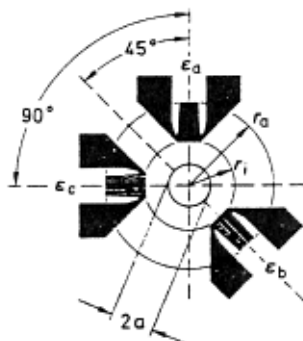


Figura 8.3-2: Quotatura della rosetta RY 61

Dai tre valori $\Delta\epsilon_a$, $\Delta\epsilon_b$, $\Delta\epsilon_c$ può determinare lo stato di sforzo biassiale della superficie dell'oggetto prima della foratura. Lo stato di sforzo è determinato con certezza quando sono note gli sforzi normali principali σ_1 e σ_2 e le loro direzioni.

$$\sigma_{1,2} = -\frac{E}{4A} (\Delta\epsilon_a + \Delta\epsilon_c) \pm \frac{E}{4B} \sqrt{(\Delta\epsilon_c - \Delta\epsilon_a)^2 + (\Delta\epsilon_a + \Delta\epsilon_c - \Delta\epsilon_b)^2} \quad (5.3-2)$$

E = Modulo di elasticità del materiale dell'oggetto.

A e B sono costanti che si possono determinare come segue:

$$A = \frac{\alpha^2 (1 + \nu)}{2 r_a \cdot r_i}; \quad (5.3-3)$$

$$B = \frac{2 \alpha^2}{r_a \cdot r_i} \cdot \left[1 - \frac{\alpha^2 (1 + \nu) (r_a^2 + r_a \cdot r_i + r_i^2)}{4 r_a^2 \cdot r_i^2} \right] \quad (5.3-4)$$

ν = coefficiente di Poisson del materiale dell'oggetto

r_a = raggio esterno della griglia

r_i = raggio interno della griglia

vedere par. 8.3-2

α = raggio di perforazione

Le direzioni degli sforzi principali si possono ricavare dallo schema del par. 8.2.2.3 per le rosette 0°/45°/90°.

I valori numerici dei seguenti dati sono validi per la rosetta RY 61:

$$\begin{aligned} r_a &= 3,3 \text{ mm}, \\ r_i &= 1,8 \text{ mm}, \\ a &= 0,75 \text{ mm}. \end{aligned}$$

Da questi valori risulta:

$$\begin{aligned} A &= 0,04735 (1 + \nu), \\ B &= 0,1894 - 0,01515 (1 + \nu). \end{aligned}$$

La valutazione è semplificata se l'equazione (8.3-2) viene scritta nella forma

$$\sigma_{1,2} = -A^* (\Delta \varepsilon_a + \Delta \varepsilon_c) \pm B^* \sqrt{(\Delta \varepsilon_a + \Delta \varepsilon_c - 2 \Delta \varepsilon_b)^2 + (\Delta \varepsilon_c - \Delta \varepsilon_a)^2} \quad (8.3-5)$$

In cui

$$A^* = \frac{E}{4A} = \frac{E}{0,1894 (1 + \nu)} \quad (8.3-6)$$

$$B^* = \frac{E}{4B} = \frac{E}{0,7576 - 0,0606 (1 + \nu)} \quad (8.3-7)$$

Osservazione:

Per l'acciaio con $E = 206000 \text{ N/mm}^2$ e $\nu = 0,28$ risulta

$$\begin{aligned} A^* &= 849720 \text{ N/mm}^2 \\ B^* &= 302930 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Per le leghe di alluminio con $E = 706000 \text{ N/mm}^2$ e $\nu = 0,33$ si ha

$$\begin{aligned} A^* &= 280270 \text{ N/mm}^2 \\ B^* &= 104280 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

8.4 Misure di deformazione e analisi delle sollecitazioni per diverse condizioni di carico

Le condizioni di carico elementari "normale" (sollecitazione di trazione e compressione), "flessione" e "torsione" si verificano raramente (se non mai) in forma pura. Nei seguenti sottoparagrafi si parlerà delle possibilità di determinare le sollecitazioni pure o combinate. La disposizione degli estensimetri sull'oggetto e all'interno del ponte di Wheatstone ha in questo caso un ruolo essenziale.

Si ricorda per l'ennesima volta di prestare attenzione al segno della deformazione misurata.

Spiegazione dei simboli usati nel par. 8.4 eventualmente non chiariti nel testo e indicazione dei paragrafi contenenti ulteriori informazioni.

DMS 1...DMS 4 = Estensimetri autocompensanti (3. 4.1) per la compensazione della dilatazione termica (7.1)

E = modulo di elasticità (2.3.1)

F = forza

G = modulo di scorrimento (2.3.2)

$R_1 \dots R_4$ = posizione delle resistenze all'interno del collegamento a ponte (5)

R_E = Resistenze complementari per il completamento del collegamento a ponte (5.2)

WB = Ponte di Wheatstone e sue modificazioni

ϵ_a = valore di deformazione indicato

ϵ_b = deformazione di flessione

ϵ_n = deformazione normale (trazione o compressione)

ν = coefficiente di Poisson (2.3.3)

σ = sforzo nel materiale (2.2.1)

σ_b = sforzo di flessione

σ_l = sforzo in direzione longitudinale dell'oggetto

σ_n = sforzo normale (2.2.1)

σ_o = sforzo della parte superiore dell'oggetto

σ_u = sforzo della parte inferiore dell'oggetto

ω = frequenza angolare

8.4.1 Misurazione con una barra di trazione/compressione

In una barra di trazione si genera nella direzione di applicazione della forza (longitudinale) la deformazione longitudinale positiva ϵ_l e nella direzione trasversale la deformazione trasversale negativa (contrazione trasversale) ϵ_q . In una barra di compressione la deformazione longitudinale è negativa e quella trasversale è positiva.

Per la deformazione longitudinale ϵ_l è valida la relazione

$$\epsilon_l = \frac{F}{A \cdot E} \quad (8.4-1)$$

in caso di forza normale $\epsilon_l = \epsilon_n$.

Per la deformazione trasversale ε_q si ha

$$\varepsilon_q = -\nu \cdot \varepsilon_l = -\nu \frac{F}{A \cdot E} \quad (8.4-2)$$

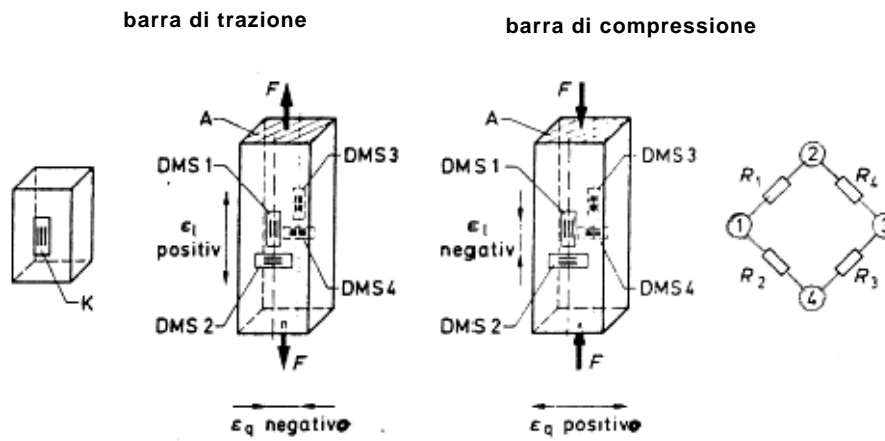
lo sforzo normale σ_n risulta dalle relazioni

$$\sigma_n = \frac{F}{A} \quad (8.4-3)$$

oppure

$$\sigma_n = \varepsilon_n \cdot E. \quad (8.4-4)$$

Nella fig. 8.4-1 è raffigurata la disposizione opportuna degli estensimetri sulla barra di trazione/compressione e nel collegamento a ponte. A seconda delle circostanze non tutti e 4 i bracci di ponte devono essere occupati con estensimetri. Le caratteristiche, i pregi e i difetti dei diversi tipi di collegamento sono elencati nella tabella 8.4-1.



K = estensimetro di compensazione su di un elemento non sollecitato meccanicamente (par. 7.1-3)

Figura 8.4-1: Disposizione dell'estensimetro su di una barra di trazione/compressione e nel collegamento a ponte.

	1				2		3
	Brückendarme	R_1	R_2	R_3	R_4	Ergebnis	Bemerk.
4	Brückengleichung	$\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4 = \epsilon_a$					1
5	einfache Viertelbrücke	DMS1	R_E	R_E	R_E	$\epsilon_a = \epsilon_1$	2
6	Viertelbrücke mit Kompensat.-DMS	DMS1	K	R_E	R_E	$\epsilon_a = \epsilon_1$	3
7	Halbbrücke	DMS1	DMS2	R_E	R_E	$\epsilon_a = \epsilon_1 + \epsilon_4 = (1 + \nu) \cdot \epsilon_1$	4
8	Zweiviertelbrücke	DMS1	R_E	DMS3	R_E	$\epsilon_a = 2 \cdot \epsilon_1$	5
9	Zweiviertelbrücke mit 2 Komp.-DMS	DMS1	K	DMS3	K	$\epsilon_a = 2 \cdot \epsilon_1$	6
10	Vollbrücke	DMS1	DMS2	DMS3	DMS4	$\epsilon_a = 2(\epsilon_1 + \epsilon_4) = 2(1 + \nu)\epsilon_1$	7

- 1 rami del ponte
- 2 risultato
- 3 osservazione
- 4 equazione del ponte
- 5 quarto di ponte semplice
- 6 quarto di Ponte con estensimetro di compensazione
- 7 mezzo ponte
- 8 ponte 2/4
- 9 ponte 2/4 con 2 estensimetri di compensazione
- 10 ponte intero

Tabella 8.4-1: Collegamenti utilizzabili nelle barre di trazione/compressione e loro risultati. Per le spiegazioni dei simboli vedere la fig. 8.4-1.

Osservazioni sulla tabella 8.4-1:

1. Si osservi il cambio di segno nell'equazione e il segno della deformazione! Nei rami R_2 e R_4 le deformazioni entrano nel risultato ϵ_a con segno opposto.

2. Le deformazioni di flessione sovrapposte entrano nel risultato. Le deformazioni termiche devono essere eliminate con estensimetri autocompensanti, altrimenti sono incluse come errore nel risultato

$$\sigma_1 = \sigma_n + \sigma_b = \epsilon_a \cdot E. \quad (8.4-5)$$

3. La compensazione della deformazione termica tramite gli estensimetri di compensazione si ottiene anche quando il coefficiente di dilatazione termica del materiale dell'elemento devia dal valore standard dell'estensimetro autocompensante o se il campo di compensazione dell'estensimetro viene superato. Altrimenti vale quanto detto al punto 2.

4. Le deformazioni di flessione sovrapposte fanno parte del risultato, le deformazioni termiche sono ben compensate.

$$\sigma_1 = \sigma_n + \sigma_b = \frac{\epsilon_a \cdot E}{1 + \nu}. \quad (8.4-6)$$

5. Nelle sezioni speculari della barra le deformazioni di flessione sovrapposte si compensano.

Le deformazioni termiche devono essere eliminate con estensimetri autocompensanti altrimenti sono incluse nel risultato come errore.

$$\sigma_n = \frac{1}{2} \varepsilon_a \cdot E. \quad (8.4-7)$$

6. In riferimento alla compensazione della deformazione termica vedere osservazione 3. Per il resto come al punto 5.

7. Nelle sezioni speculari della barra le deformazioni di flessione sovrapposte sono compensate. Le deformazioni termiche sono sempre ben compensate. Gli influssi di disturbo dovuti ai collegamenti interni al ponte sono totalmente eliminati. Idoneità per la misurazione della forza normale.

$$\sigma_n = \frac{\varepsilon_a \cdot E}{2(1 + \nu)}, \quad (8.4-8)$$

$$F = \frac{\varepsilon_a \cdot E}{2(1 + \nu)} \cdot A. \quad (8.4-9)$$

Osservazione:

Gli estensimetri devono essere orientati nelle direzioni degli assi principali per evitare errori (vedere anche par. 8.1). Un errore di orientamento di 5° (che è già estremamente grande) dà in un campo di sforzo monoassiale nella 1. a direzione principale un errore del -1%, nella 2. a direzione principale (trasversale) un errore del -3,3%, entrambi calcolati per $\nu = 0,3$. Una rosetta a X con un errore di rotazione del 5° causerebbe in un collegamento a semiponte o a ponte intero un errore totale del -1,54%.

Sulla barra di trazione oltre alla sollecitazione normale possono agire diverse grandezze di disturbo come flessione, torsione e calore. A seconda dello scopo della misurazione può essere opportuno eliminare le deformazioni di flessione sovrapposte (p.e. con misurazioni delle forze) o includere (p.e. per la determinazione degli sforzi massimi). I diversi tipi di collegamento del ponte di Wheatstone ne offrono le possibilità ma solo per sezioni simmetriche della barra. Per le misurazioni con sezioni asimmetriche vedere par. 8.4.3.

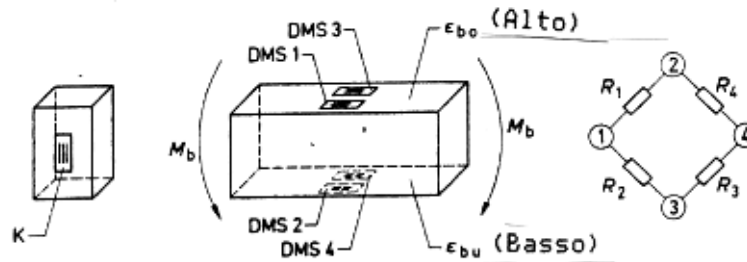
L'influenza della torsione come grandezza perturbatrice può essere eliminata disponendo gli estensimetri vicini e simmetrici all'asse mediano. La determinazione della sollecitazione massima dovuta alla sovrapposizione può avvenire solo con il metodo per la determinazione dello stato di sforzo biassiale con direzioni principali sconosciute (par. 8.2.2 e 8.4.5).

8.4.2 Misurazione su di una barra di flessione

La flessione genera su di un lato della barra inflessa una deformazione positiva e sull'altro una deformazione negativa. Nelle sezioni simmetriche la deformazione positiva e quella negativa hanno lo stesso valore. È perciò possibile utilizzare le opportunità offerte dal ponte di Wheatstone per l'addizione o la compensazione delle grandezze perturbatrici.

Le possibili grandezze di disturbo sono la sollecitazione normale, la torsione e la deformazione termica.

La fig. 8.4-2 mostra l'opportuna disposizione dell'estensimetro sulla barra di flessione. Come anche nella barra di trazione (par. 8.4.1) non tutti i 4 rami del ponte devono essere occupati da estensimetri. Le caratteristiche dei diversi tipi di collegamento sono elencate nella tabella 8.4-2.



K = Estensimetri di compensazione su di un elemento non sollecitato meccanicamente (par. 7.1-3)

Figura 8.4-2: Disposizione degli estensimetri sulla barra di flessione e nel collegamento a ponte.

Gli assi degli estensimetri devono indicare le direzioni di sforzo principali. Se le direzioni principali non sono note (p.e. in caso di torsione sovrapposta) e devono essere determinate gli sforzi principali, si proceda secondo quanto scritto nei par. 8.2.2 o 8.4.5.

	1	2	3					
	Brückenarme	R_1	R_2	R_3	R_4	Ergebnis	Bemerk.	
4	Brückengleichung	$\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4 = \epsilon_s$				1	1 rami del ponte	
5	einfache Viertelbrücke	DMS1	R_E	R_F	R_E	$\epsilon_s = \epsilon_{fu}$	2	2 risultato
		DMS2	R_E	R_E	R_E	$\epsilon_s = \epsilon_{fu}$		3 osservazione
6	Viertelbrücke mit Kompensat.-DMS	DMS1	K	R_E	R_E	$\epsilon_s = \epsilon_{fu}$	3	4 equazione del ponte
		DMS2	K	R_E	R_E	$\epsilon_s = \epsilon_{fu}$		5 quarto di ponte semplice
7	Halbbrücke	DMS1	DMS2	R_E	R_E	$\epsilon_s = 2 \epsilon_{fu}$	4	6 quarto di ponte con estensimetro di compensazione
8	Zweiviertelbrücke	DMS1	R_E	DMS3	R_E	$\epsilon_s = 2 \epsilon_{fu}$	5	7 mezzo ponte
		DMS2	R_E	DMS4	R_E	$\epsilon_s = 2 \epsilon_{fu}$		8 ponte 2/4
9	Zweiviertelbrücke mit 2 Komp.-DMS	DMS1	K	DMS3	K	$\epsilon_s = 2 \epsilon_{fu}$	6	9 ponte 2/4 con 2 estensimetri di compensazione
		DMS2	K	DMS3	K	$\epsilon_s = 2 \epsilon_{fu}$		10 ponte intero
10	Vollbrücke	DMS1	DMS2	DMS3	DMS4	$\epsilon_s = 4 \epsilon_{fu}$	7	

Tabella 8.4-2: Collegamenti utilizzabili in una barra di flessione con sezione simmetrica e loro risultati.

Per le spiegazioni dei simboli vedere par. 8.4-2.

Osservazioni sulla tabella 8.4-2:

1. Si osservi il cambio di segno nell'equazione e il segno delle deformazioni!

Nei rami di ponte R_2 e R_4 le deformazioni entrano nel risultato con segno opposto (ε_a).

2. Le deformazioni normali sovrapposte sono incluse nel risultato.

Le deformazioni termiche devono essere eliminate con estensimetri autocompensanti, altrimenti sono incluse nel risultato,

$$\sigma = \sigma_b + \sigma_n = \varepsilon_a \cdot E. \quad (8.4-10)$$

3. La compensazione della deformazione termica tramite l'estensimetro di compensazione si ottiene anche quando il coefficiente di dilatazione termica del materiale dell'elemento strutturale differisce dal valore standard dell'estensimetro autocompensante o se il campo di compensazione dell'estensimetro viene superato. Altrimenti come per il punto 2.

4. Le deformazioni normali sovrapposte sono compensate. Le deformazioni termiche sono compensate molto bene.

$$\sigma_b = \frac{1}{2} \varepsilon_a \cdot E. \quad (8.4-11)$$

Il momento flettente attivo M_b si calcola secondo l'equazione

$$M_b = \sigma_b \cdot W_b. \quad (8.4-12)$$

Il valore numerico del momento resistenza flettente W_b si può ricavare dai manuali. Per alcune forme di sezione molto frequenti nella tabella 8.4-3 sono elencate le formule per il calcolo di W_b .

5. Le deformazioni normali sovrapposte sono incluse nel risultato. Le deformazioni termiche devono essere eliminate con estensimetri autocompensanti, altrimenti entrano nel risultato come errore.

$$\sigma = \sigma_b + \sigma_n = \frac{1}{2} \varepsilon_a \cdot E. \quad (8.4-13)$$

6. La compensazione della deformazione termica tramite estensimetro di compensazione si ottiene anche quando non è disponibile un estensimetro autocompensante adatto o il suo campo di compensazione non è sufficiente. Altrimenti come per il punto 5.

7. In una sezione simmetrica le deformazioni normali sono compensate. Le deformazioni termiche sono compensate molto bene. Le grandezze perturbatrici dovute a collegamenti interni al ponte sono completamente soppresse. Buona idoneità per la misurazione dei momenti flettenti e delle forze flettenti (lunghezza della leva nota).

$$\sigma_b = \frac{1}{4} \varepsilon_a \cdot E. \quad (5.4-14)$$

Il momento flettente attivo M_b si può calcolare secondo l'equazione. Per il calcolo di W_b vedere osservazione 4 e tabella 8.4-3.

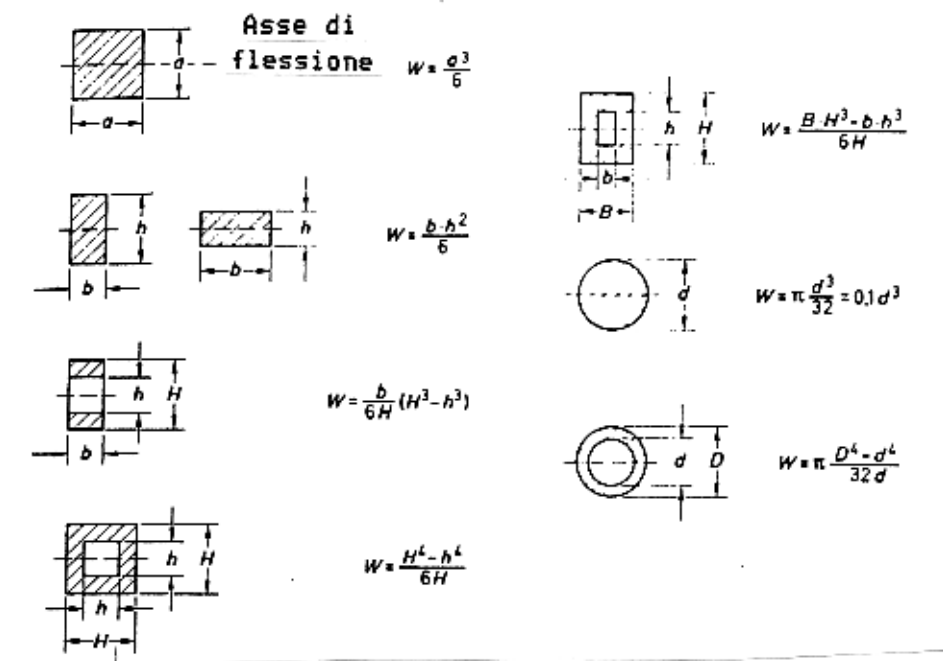


Tabella 8.4-3: Momento resistente (flettente) per forme di sezioni molto frequenti.

8.4.3 Misurazioni su di una barra sollecitata con forza normale e momento flettente con sezione simmetrica e asimmetrica

Nei par. 8.4.1 e 8.4.2 sono già state descritte le possibilità di poter determinare separatamente le deformazioni normali e quelle di flessione ed è stato inoltre indicato con quale collegamento si possano trovare le somme delle deformazioni normali e flettenti nelle sezioni simmetriche. Nelle sezioni asimmetriche le deformazioni di flessione hanno valori diversi nei diversi lati della barra che possono perciò, essere determinate solo con misurazioni separate. In caso di sovrapposizione contemporanea di deformazioni normali e deformazioni di flessione non è più possibile separare le due componenti nel risultato complessivo per mezzo di artifici tecnici. In questo caso sono possibili solo soluzioni grafiche o di calcolo che verranno chiarite per mezzo di due esempi.

Le deformazioni di flessione hanno sempre segno contrario nei due lati opposti. Tuttavia può capitare che le deformazioni misurate abbiano segno uguale; ciò si verifica quando la deformazione normale sovrapposta è maggiore della deformazione di flessione (fig. 8.4-3).

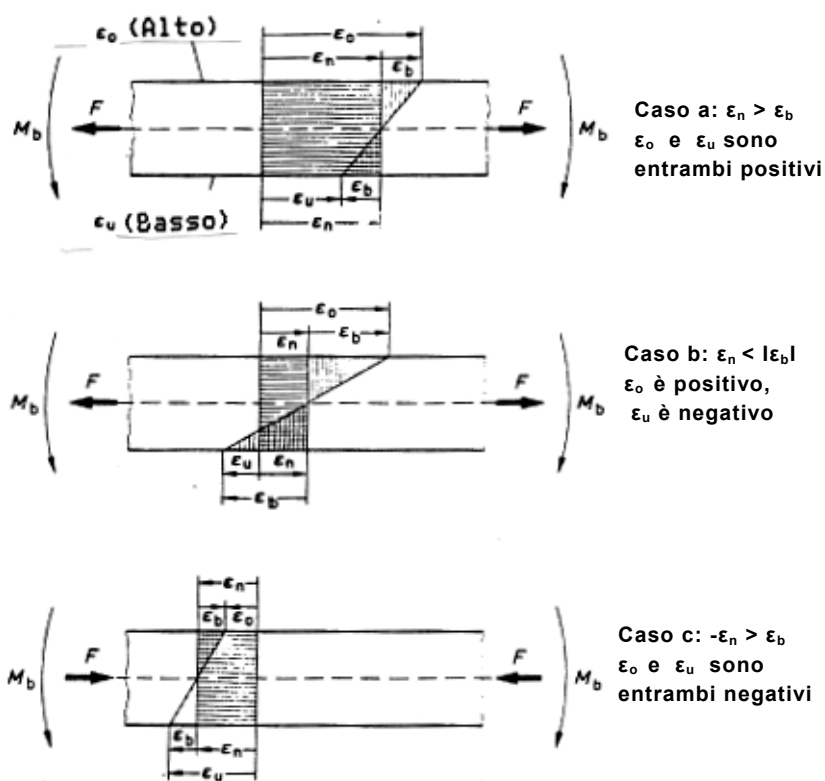


Figura 8.4-3: Esempio di una distribuzione di deformazione in un oggetto sottoposto a sforzo normale e di flessione.

Alla base dei due esempi sottostanti ci sono misurazioni effettuate su un modello. Le superficie di sezione A delle due barre sono uguali, le loro forme in sezione sono quadrate nell'esempio 1 e a T nell'esempio 2. Anche i carichi normali e i momenti flettenti sono grandi uguali.

Esempio 1:

Barra con sezione quadrata. L'esempio vale per tutte le sezioni simmetriche.

Misurazioni:

Le dilatazioni ε_o e ε_u devono essere misurate separatamente.

Risultati di misurazione:

$$\begin{aligned} \varepsilon_o &= 900 \mu\text{m/m}, \\ \varepsilon_u &= -1140 \mu\text{m/m}. \end{aligned}$$

A: Soluzione matematica

Provino in Al-Cu-Mg 1, $E = 72100 \text{ N/mm}^2$.

Dalle due deformazioni misurate ϵ_o e ϵ_u si ottengono gli sforzi :

$$\begin{aligned}\sigma_o &= \epsilon_o \cdot E = 900 \cdot 10^{-6} \cdot 72100 = 64,9 \text{ N/mm}^2, \\ \sigma_u &= \epsilon_u \cdot E = -1140 \cdot 10^{-6} \cdot 72100 = -82,2 \text{ N/mm}^2.\end{aligned}$$

Le componenti di deformazione sono:

$$\begin{aligned}\epsilon_n &= \frac{1}{2} (\epsilon_o + \epsilon_u) = \\ &= \frac{1}{2} (900 - 1140) = -120 \text{ } \mu\text{m/m}, \\ \epsilon_b &= \pm \frac{1}{2} (\epsilon_o - \epsilon_u) = \\ &= \pm \frac{1}{2} (900 + 1140) = \pm 1020 \text{ } \mu\text{m/m}.\end{aligned}$$

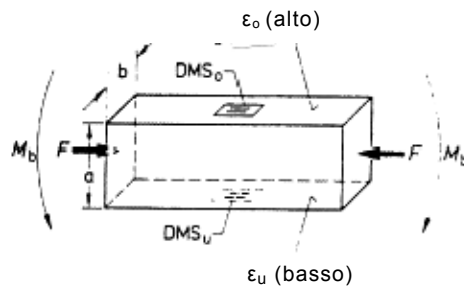


Figura 8.4-4: Schizzo dell'esempio 1

B: Soluzione grafica

Il profilo del provino nel campo della misurazione deve essere disegnato in scala (ingrandito o rimpicciolito) su un foglio di carta millimetrata con a fianco una scala ϵ , fig. 8.4-5a.

L'asse baricentrico passa attraverso i punti baricentrici delle superfici in sezione; nelle sezioni simmetriche esso è uguale all'asse. Sulla scala si riportino i valori di deformazione misurati ϵ_o e ϵ_u li si proiettino sugli spigoli corrispondenti dello schizzo dell'oggetto collegando i due punti con una retta. Il punto di intersezione N di questa retta con la linea ϵ_o , indica la distanza d fra lo strato di fibra neutro e lo spigolo inferiore del campione che può essere misurata dallo schizzo, fig. 8.4-5a.

I campi tratteggiati a destra e a sinistra della linea ϵ_o mostrano la distribuzione delle deformazioni attraverso la sezione del campione, a destra le dilatazioni positive e a sinistra quelle negative, fig. 8.4-5b.

Sull'asse baricentrico si marchi il punto di intersezione con le rette di collegamento $\epsilon_o - \epsilon_u$ e si proietti questo punto sulla scala ϵ . Su di essa si può leggere il valore della deformazione normale, nell'esempio $-120 \mu\text{m/m}$, fig. 8.4-5c.

Le deformazioni di uguale valore corrispondono ai tratti

$$\overline{\epsilon_o \epsilon_n} = \epsilon_{bo} = 900 - (-120) = 1020 \mu\text{m/m}$$

$$\overline{\epsilon_u \epsilon_n} = \epsilon_{bu} = -1140 - (-120) = -1020 \mu\text{m/m}.$$

La precisione della soluzione grafica dipende dalla precisione del disegno.

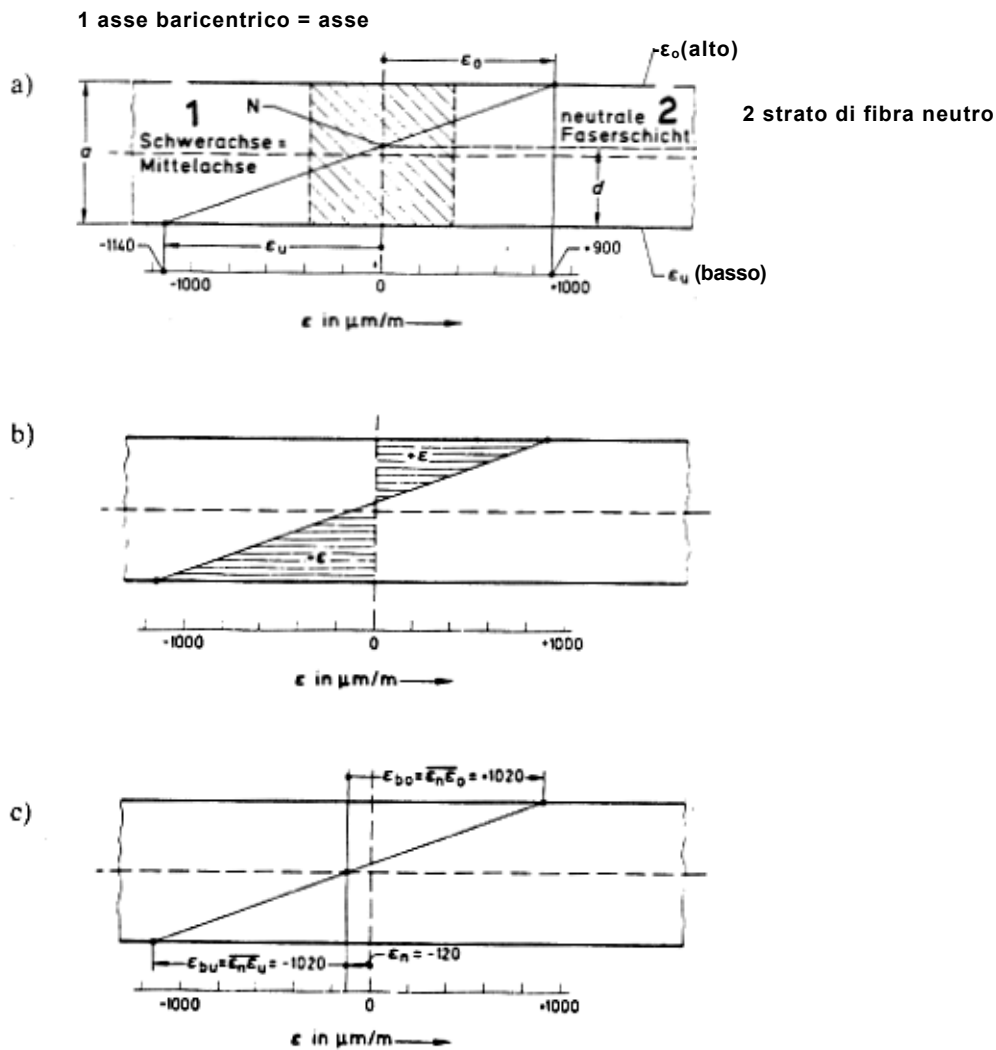


Figura 8.4-5: Soluzione grafica dell'esempio 1. Spiegazioni nel testo.

Esempio 2:

Barra con sezione a forma di T. (Il principio impiegato per la soluzione, di questo caso può essere utilizzato anche per sezioni di altre forme).

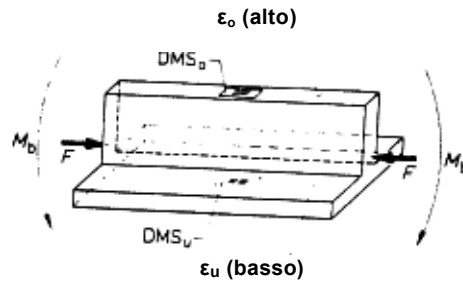


Figura 8.4-6: Schizzo dell'esempio 2

Materiale dell'oggetto di misurazione: Al-Cu-Mg 1; $E = 72100 \text{ N/mm}^2$

Misurazioni:

Le deformazioni ϵ_o e ϵ_u devono essere misurate separatamente.

Risultato di misurazione:

$$\begin{aligned}\epsilon_o &= + 490 \text{ } \mu\text{m/m,} \\ \epsilon_u &= - 400 \text{ } \mu\text{m/m.}\end{aligned}$$

A: Soluzione matematica

Dalle due deformazioni misurate ϵ_o e ϵ_u si ricavano gli sforzi

$$\begin{aligned}\sigma_o &= \epsilon_o \cdot E = 490 \cdot 10^{-6} \cdot 72100 = 35,3 \text{ N/mm}^2, \\ \sigma_u &= \epsilon_u \cdot E = - 400 \cdot 10^{-6} \cdot 72100 = - 28,8 \text{ N/mm}^2.\end{aligned}$$

Per la determinazione matematica delle componenti della deformazione si deve conoscere la distanza dei punti baricentrici (fig. 8.4-7). Per i profili normali questa distanza è elencata nelle tabelle, per gli altri profili si possono trovare le formule per calcolarla nei manuali. Per il profilo dell'esempio 2 si ha:

$$e = \frac{1}{2} \cdot \frac{a \cdot H^2 + b \cdot c^2}{a \cdot H + b \cdot c} \quad (8.4-15)$$

Con le misure del modello secondo la fig. 8.4-7 si ricava la misura e:

$$e = \frac{1}{2} \cdot \frac{2,5 \cdot 15^2 + 12,5 \cdot 2^2}{2,5 \cdot 15 + 12,5 \cdot 2} = 4,9 \text{ mm.}$$

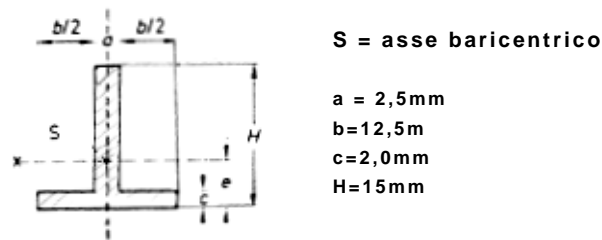


Figura 8.4-7: Schizzo quotato della sezione a T

La deformazione normale ϵ_n si calcola secondo la relazione

$$\epsilon_n = \epsilon_u + e \cdot \frac{\epsilon_o - \epsilon_u}{H} \quad (3.4-16)$$

Pe l'esempio 2 si ha:

$$\epsilon_n = -400 + 4,9 \cdot \frac{490 - (-400)}{15} = 4,9 \cdot \frac{890}{15} - 400 = -109 \mu\text{m/m}.$$

La forza normale F_n , è

$$\begin{aligned}
 F_n &= \epsilon_n \cdot E \cdot A = \\
 &= -109 \cdot 10^{-6} \cdot 72100 \text{ N/mm}^2 \cdot 64 \text{ mm}^2 = 503 \text{ N} \quad (8.4-17)
 \end{aligned}$$

Le deformazioni di flessione delle sezioni asimmetriche hanno valori diversi. Essi sono:

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{bu} &= \epsilon_u - \epsilon_n = -400 - (-109) = -291 \mu\text{m/m}, \\
 \epsilon_{bo} &= \epsilon_o - \epsilon_n = 490 - (-109) = +599 \mu\text{m/m}.
 \end{aligned}$$

B) Soluzione grafica:

La soluzione grafica è analoga a quella impiegata per le sezioni simmetriche. Si tracci il profilo del campione su di un foglio di carta millimetrata con accanto una scala ϵ , fig. 8.4-8a.

Nello schizzo si disegni alla distanza e dalla base l'asse baricentrico; esso è la linea che collega i punti baricentrici delle superfici della sezione.

Si riportino sulla scala ϵ , i valori di deformazione misurati ϵ_o e ϵ_u li si proietti sulle corrispondenti linee di contorno dello schizzo dell'oggetto e si colleghino i due punti con una retta. Il punto di intersezione N di questa retta con la l'inea ϵ_o fornisce la distanza d dello strato di fibra neutro dallo spigolo inferiore del campione che può essere misurata dallo schizzo, fig. 8.4-8a.

I campi tratteggiati a destra e a sinistra della linea ϵ_o indicano la distribuzione delle deformazioni attraverso la sezione del campione, a destra le deformazioni positive e a sinistra quelle negative, fig. 8.4-8b.

Sull'asse baricentrico si marchi il punto di intersezione con la retta di collegamento $\epsilon_0 \rightarrow \epsilon_u$ e si proietti questo punto sulla scala ϵ , fig. 8.4-8c. Su di essa si può leggere il valore della deformazione normale ϵ_n , nell'esempio $-110 \mu\text{m/m}$.

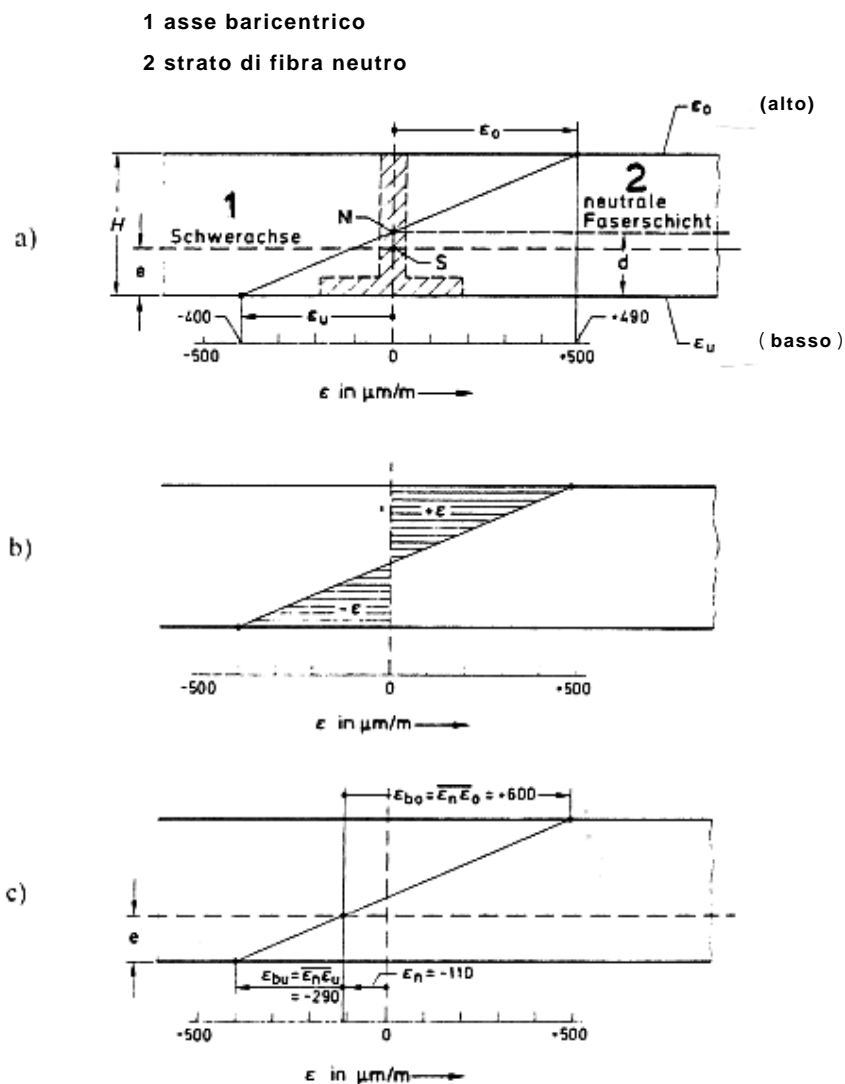


Figura 8.4-8: Soluzione grafica dell'esempio 2.
Spiegazioni nel testo.

Le deformazioni di flessione corrispondono ai tratti

$$\overline{\epsilon_0 \epsilon_n} = \epsilon_{b0} = 600 \mu\text{m/m},$$

$$\overline{\epsilon_n \epsilon_u} = \epsilon_{bu} = -290 \mu\text{m/m}.$$

Anche in questo caso la precisione del disegno è fondamentale per la precisione del risultato e dipende dalla scelta della scala giusta.

8.4.4. Misurazione su di una barra di torsione

Una misurazione su di una barra di torsione può avere parecchi fini:

1. La determinazione degli sforzi normali e tangenziali per gli studi di resistenza.
2. La determinazione del momento di torsione attivo M_t , da cui si può calcolare la potenza trasmessa P nel caso di alberi rotanti.
3. La determinazione dell'angolo di scorrimento γ o dell'angolo di torsione φ .

In 1.

Un barra soggetta a torsione è sottoposta ad uno stato di sforzo biassiale. Gli sforzi normali principali si verificano secondo angoli di $\pm 45^\circ$ rispetto alle generatrici del cilindro (linee parallele all'asse longitudinale). Le deformazioni generate dagli sforzi normali si possono misurare con estensimetri. A questo scopo sono adatte le rosette a X descritte nella fig. 3.2-9a, in particolar modo la forma a V con gli assi della griglia a $\pm 45^\circ$ rispetto l'asse di simmetria. Gli assi della griglia devono coincidere con le direzioni di sforzo principali, fig. 8.4-9.

Osservazione:

Un risultato corretto presuppone una misurazione corretta. Gli assi della griglia devono coincidere con le direzioni di sforzo principali. Deviazioni rispetto all'angolo α causano un errore di misurazione f di

$$f = (\cos 2\alpha - 1) \cdot 100\%. \quad (8.4-18)$$

Se un estensimetro viene applicato con un errore di orientamento $\alpha = 5^\circ$, il valore di misurazione sarà troppo piccolo dell'1,6%. Se nelle disposizioni a mezzo ponte e a ponte intero gli altri estensimetri sono orientati nel modo giusto, allora l'errore diminuisce del - 0,8% nel collegamento a mezzo ponte e del - 0,4% in quello a ponte intero. Non si dimentichi però che, se gli estensimetri sono disposti asimmetricamente, si possono verificare a volte errori maggiori dovuti all'insufficiente compensazione di eventuali dilatazioni normali e di flessione.

I collegamenti adatti sono il mezzo ponte e il ponte intero. Per la trasmissione dei valori di misurazione dall'albero rotante attraverso l'anello collettore si deve impiegare il collegamento a ponte intero, poiché altrimenti possono insorgere considerevoli errori di misurazione a causa delle resistenze di contatto variabili del ponte. Nel collegamento a ponte intero le resistenze di contatto si trovano nei cavi di alimentazione 2 e 3 in serie con la resistenza del ponte e nei cavi di misurazione 1 e 4 in serie con la resistenza d'entrata dell'amplificatore. In entrambi i casi la loro influenza cala a livelli insignificanti ammesso che anelli e spazzole siano di buona qualità.

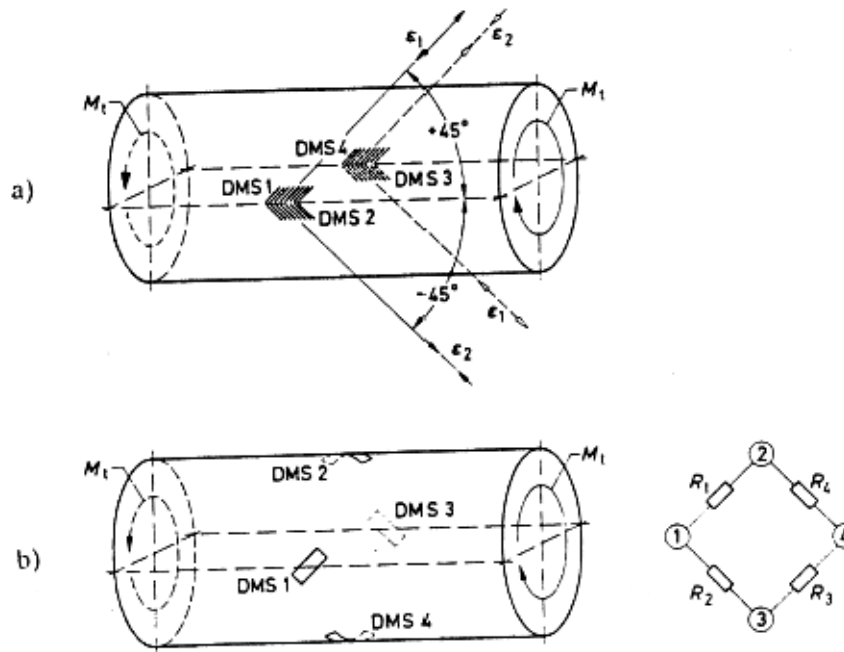


Figura 8.4-9: Albero di torsione con estensimetri applicati nelle direzioni di deformazione principali ϵ_1 e ϵ_2 e loro disposizione nel collegamento a ponte.
a) Utilizzando rosette a X speciali
b) Utilizzando estensimetri singoli

Il collegamento a ponte intero compensa nel migliore dei modi anche i segnali perturbatori dalle sollecitazioni normali e flettenti sovrapposte se gli estensimetri vengono applicati nel modo indicato nelle fig. 8.4-9a e b.

Dalle deformazioni principali misurate ϵ_1 , ϵ_2 si possono calcolare gli sforzi normali principali σ_1 , σ_2 secondo le formule (8.2-1) e (8.2-2) per lo stato di sforzo biassiale con direzioni principali note; esse vengono qui ripetute:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_1 + \nu \cdot \epsilon_2), \tag{8.2-1}$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_2 + \nu \cdot \epsilon_1). \tag{8.2-2}$$

Per l'albero di torsione si ha:

$$|\epsilon_1| = |\epsilon_2|, \tag{8.4-19}$$

$$\epsilon_2 = -\epsilon_1. \tag{8.4-20}$$

Se si collegano gli estensimetri come mezzi ponti nei bracci 1 e 2, allora si avrà un'inversione di segno per ϵ_2 , vedere par. 5 ed equazioni (5.2-5) e (5.2-7). Il valore di dilatazione indicato ϵ_a diventa di conseguenza

$$\epsilon_a = \epsilon_1 - (-\epsilon_2) = |\epsilon_1| + |\epsilon_2| = 2\epsilon. \tag{8.4-21}$$

Lo stesso vale per il collegamento a ponte intero.

Da ciò risulta il cambiamento di segno fra parentesi della seguente equazione rispetto alle equazioni (8.2-1) e (8.2-2).

Per il collegamento a mezzo ponte si ha:

$$\sigma_{1,2} = \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (1-\nu) \cdot \varepsilon_a \quad (8.4-22)$$

Per il collegamento a ponte intero risulta:

$$\sigma_{1,2} = \pm \frac{1}{4} \cdot \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (1-\nu) \cdot \varepsilon_a \quad (8.4-23)$$

Lo sforzo tangenziale T cresce da $T = 0$ dal centro verso l'esterno fino al valore massimo T_{\max} .

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= 2 \varepsilon_{45^\circ} \cdot G & (8.4-24) \\ &= \varepsilon_a \cdot G \quad \text{per il mezzo ponte.} \\ &= \frac{1}{2} \varepsilon_a \cdot G \quad \text{per il ponte intero.} \end{aligned}$$

ε_a = valore di deformazione indicato nei collegamenti a ponte e a mezzo ponte

G = modulo di elasticità tangenziale (par. 2.3.2. equazione 2.3-2).

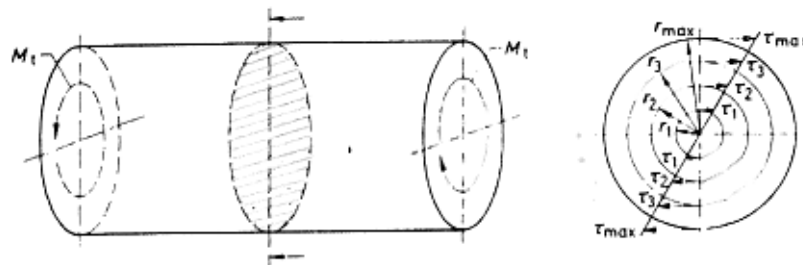


Figura 8.4-10: Distribuzione dello sforzo di torsione nella sezione di un albero soggetto a momento torcente.

In 2.

Il momento torcente M_t si calcola dallo sforzo tangenziale T_{\max} ricavato dall'equazione (8.4-24) e dal momento resistente polare W_p dell'albero

$$M_t = T_{\max} \cdot W_p = 2 \varepsilon_{45^\circ} \cdot G \cdot W_p \quad (8.4-25)$$

Per il mezzo ponte si ha:

$$M_t = \varepsilon_a \cdot G \cdot W_p \quad (8.4-26)$$

Per il ponte intero vale:

$$M_t = \frac{1}{2} \varepsilon_a \cdot G \cdot W_p \quad (8.4-27)$$

Con T_e G in N/cm² e W_p in cm³ si ottiene M_t in Ncm.

Il momento resistente polare W_p dipende dalla forma della sezione della barra torcente. Le formule per determinarlo sono contenute nei manuali. Per l'albero cilindrico si ha:

$$W_p = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \approx 0,2 d^3. \quad (8.4-28)$$

La potenza trasmessa dall'albero rotante P si calcola;

$$P = \omega \cdot M_t = \frac{2\pi \cdot n}{60} \cdot M_t = 0,105 \cdot n \cdot M_t = \frac{n \cdot M_t}{9,55}. \quad (8.4-29)$$

Con M_t in Nm e il numero di giri n in 1/min si ottiene P in Nm/s = W.

Per la trasmissione del segnale da alberi rotanti vedere il par. 8.4.4.1.

In 3.

La figura 8.4-11 chiarisce l'angolo di scorrimento γ e l'angolo di torsione φ , dell'albero di torsione.

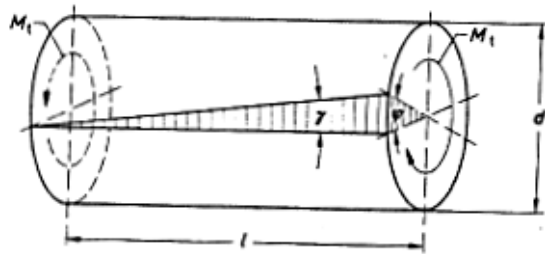


Figura 8.4-11: Spiegazione dell'angolo di scorrimento γ e dell'angolo di torsione φ .

L'angolo di scorrimento γ si calcola

$$\gamma = \frac{\tau_{\max}}{G} \quad (8.4-30)$$

e l'angolo di torsione φ

$$\varphi = 2 \cdot \frac{l}{d} \cdot \gamma = 4 \varepsilon_{45^\circ} \cdot \frac{l}{d}; \quad (8.4-31)$$

per il mezzo ponte si ha

$$\varphi = 2 \varepsilon_a \cdot \frac{l}{d}, \quad (8.4-32)$$

per il ponte intero

$$\varphi = \varepsilon_a \cdot \frac{l}{d}. \quad (8.4-33)$$

8.4.4.1 Trasmissione del segnale di misura da alberi rotanti

Per la trasmissione del segnale di misura da alberi rotanti ci sono diverse possibilità.

In caso di movimento rotatorio lento e di poche rotazioni dell'oggetto un cavo, che viene avvolto e arrotolato, può rappresentare la soluzione più facile che può essere impiegata per tutti i tipi di collegamento (anche per il quarto di ponte tuttavia con le limitazioni descritte nei par. 7.1.1 e 7.2.1.).

Una seconda possibilità è la trasmissione della tensione di alimentazione del ponte e del segnale di misura attraverso gruppi di anelli collettori. Sono adatti solo i tipi di migliore qualità, a causa delle resistenze di contatto estremamente basse fra anello collettore e spazzola, con un'usura minima per una velocità la più alta possibile e con basse tensioni termiche.

La HBM fornisce questi anelli collettori da montare sugli alberi rotanti in diverse grandezze con 4 spazzole. Gli accessori comprendono 5 piste: 4 per l'allacciamento all'estensimetro, la 5. a per un perfetto collegamento a massa dell'albero rotante per evitare impulsi perturbatori. Le cosiddette teste ad anelli collettori da flangiare con l'estremità libera dell'albero sono disponibili a 6 o a 12 piste (fig. 8.4-12). I fogli caratteristiche forniscono i dati sul numero di giri consentiti ecc.

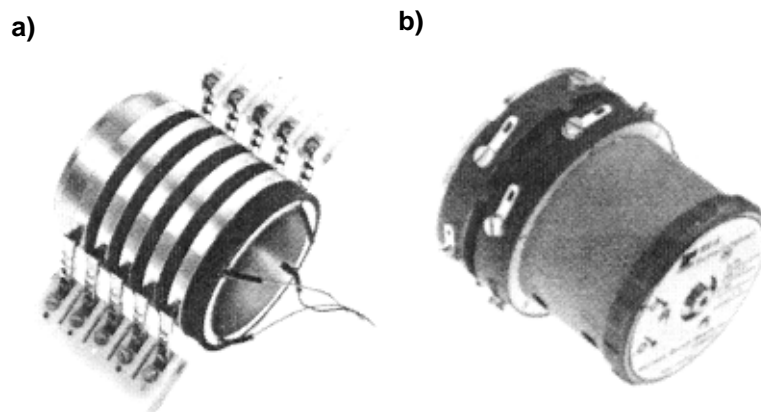


Figura 8.4-12: Anelli collettori (contatti striscianti)

- a) Corpo dell'anello collettore SK5 con 2 spazzole SK5/ZB**
- b) Testa di anello collettori SK6**

Nonostante l'impiego dei migliori materiali per gli anelli collettori a contatti striscianti certe oscillazioni della resistenza di contatto (fruscio da contatto) sono inevitabili. La HBM indica una resistenza di contatto fra anello e spazzola di 40 m Ω con oscillazioni <2 m Ω . Mentre la resistenza di contatto è piuttosto insignificante, le sue oscillazioni disturbano il segnale di misura. Se si considera che la resistenza di un estensimetro da 120 Ω con deformazione di 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ varia di ca. 240 m Ω , allora in un collegamento a quarto di ponte a 2 piste si avrà un disturbo del segnale di misura di ca. 1,7% = 17 $\mu\text{m}/\text{m}$. La quota costante della resistenza di contatto di 2 x 40 m Ω causa una diminuzione di sensibilità apparente dell'estensimetro di solo lo 0,06%.

Essenzialmente più favorevoli sono i rapporti nel collegamento di un mezzo ponte. In questo caso le resistenze di contatto sono in serie con la resistenza del mezzo ponte. Si genera così nell'estensimetro a 120 Ω , tramite la caduta della tensione di alimentazione nei punti di contatto, una perdita di sensibilità apparente solo dello 0,03%, che è ancora più bassa qualora le resistenze degli estensimetri siano maggiori. La resistenza di contatto del 3. o anello non influisce sulla misurazione.

Grazie alla sua capacità di compensazione dei disturbi il collegamento a ponte intero è da preferire ovunque sia possibile. Esempi per l'impiego della trasmissione mediante contatti striscianti nelle misurazioni estensimetriche sono descritti in [8-7 e 8-8].

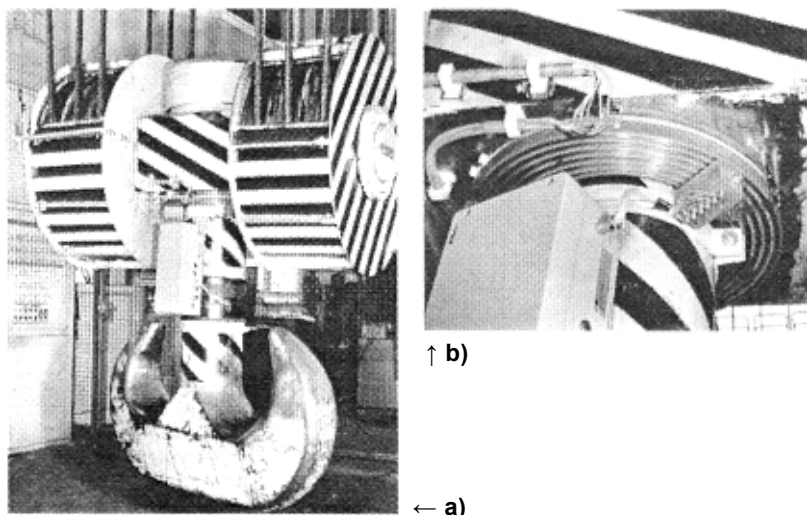


Figura 8.4-13: Esempio di montaggio di un amplificatore alla parte mobile e di trasmissione del segnale amplificato tramite contatti striscianti (figure tratte da [8-9]).
a) Vista d'insieme di un gancio da gru da 120 t con applicazioni di estensimetri e inserimento di amplificatore industriale.
b) Dettaglio dell'anello collettore e delle spazzole per la trasmissione della tensione di alimentazione, del segnale amplificato e di un segnale di controllo.

Negli elementi strutturali di grandi dimensioni si hanno solo piccole deformazione. In questo modo insorge il pericolo che i segnali di misurazione siano coperti in misura più o meno ampia da tensioni di disturbo e altri segnali. In questo caso bisogna considerare l'eventualità di montare l'amplificatore o un preamplificatore sulla parte rotante e di trasmettere il segnale amplificato tramite gli anelli collettori, fig. 8.3-13.

La trasmissione del segnale senza contatto offre numerosi vantaggi grazie al funzionamento libero da usura e all'immunità nei confronti delle influenze perturbatrici. A seconda della struttura del sistema l'alimentazione del collegamento estensimetrico può avvenire per mezzo di batterie rotanti e della trasmissione induttiva senza contatto dell'energia.

Il disaccoppiamento del segnale a modulazione di frequenza può essere capacitivo o induttivo a scelta. La conversione della frequenza di pulsazione in una tensione continua proporzionale al valore di misura avviene nelle unità accessorie. La fig. 8.4-14 mostra come esempio due tipi di trasformatore di segnale.

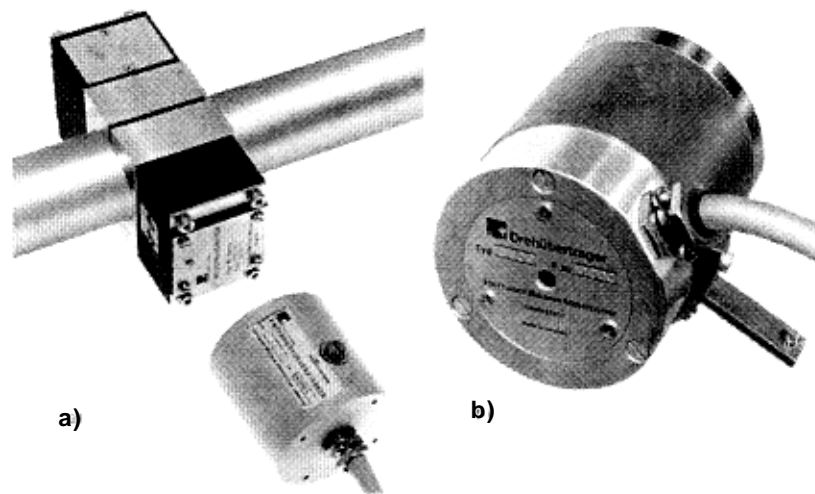


Figura 8.4-14: Trasformatori di segnali senza contatto
 a) sistema montabile sull'albero con contenitore della batteria, trasmettitore e preamplificatore di ricezione periferico
 b) trasformatore rotante da applicare ad un'estremità dell'albero

Il passaggio dalla misura del momento torcente alla misura della potenza richiede solo un minimo sforzo ulteriore per la determinazione del numero di giri. In questo caso si possono utilizzare, oltre alla dinamo tachimetrica che fornisce una tensione proporzionale al numero di giri, i sistemi ottici o magnetici di prossimità per la misurazione del numero di giri. Esempi per questi ultimi sono forniti in fig. 8.4-15.

Con la moltiplicazione della tensione proporzionale al momento torcente con quella proporzionale al numero di giri in un amplificatore di moltiplicazione si ottiene un segnale proporzionale alla potenza. Ulteriori particolari si possono ricavare dai fogli caratteristiche.

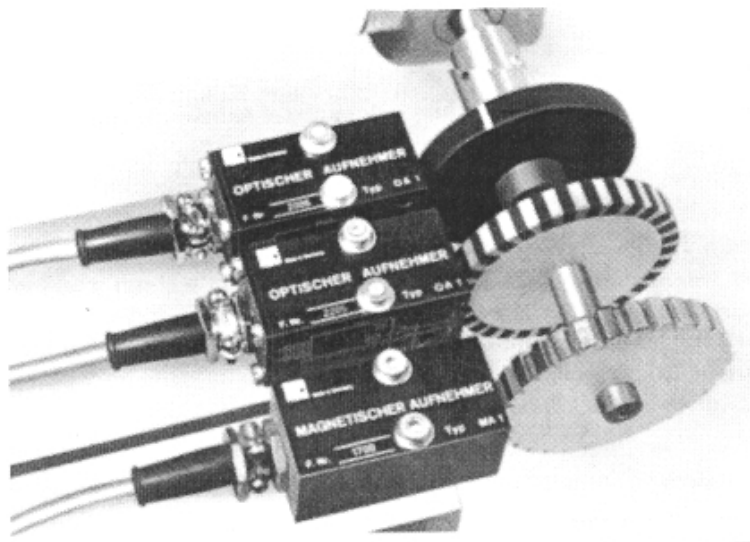


Figura 8.4-15: Sistemi di rilevatori per la determinazione del numero di giri di parti rotanti.

8.4.5 Misurazione su di una barra di torsione con forza normale e momento torcente sovrapposti

Bisogna differenziare due eventualità:

1. La determinazione delle singole componenti di sollecitazione,
2. la determinazione della sollecitazione massima.

Entrambe sono possibili ma richiedono naturalmente applicazioni estensimetriche diverse.

In 1.

Ogni componente di sollecitazione deve essere misurata separatamente. Se esse devono essere rilevate insieme a causa del loro ordine temporale sarà necessario un canale per ognuna di esse. I segnali di misurazione possono essere registrati contemporaneamente, p.e. con una stampante a più canali.

Torsione con sollecitazione normale sovrapposta

La misurazione separata di ogni componente della sollecitazione richiede:

per la misurazione della torsione una applicazione secondo il par. 8.4.4, fig. 8.4-9, per la misurazione della sollecitazione normale una applicazione secondo il par. 8.4.1, fig. 8.4-1.

Un problema simile viene a crearsi per esempio negli alberi delle eliche delle navi. A causa delle dilatazioni generalmente sempre molto piccole bisognerebbe sempre impiegare il collegamento a ponte intero che garantisce la migliore soppressione dei disturbi.

Torsione con flessione sovrapposta

Anche in questo caso le due componenti si possono misurare separatamente.

La misurazione della torsione richiede sempre l'applicazione secondo il par. 8.4.4, fig. 8.4-9.

La componente di flessione è misurabile con un'applicazione secondo il par. 8.4.2, fig. 8.4-2; tuttavia bisogna conoscere la direzione del momento flettente, il piano di inflessione. Se questa direzione è sconosciuta la si può ricercare tramite le misurazioni con estensimetri singoli disposti assialmente a 90° rispetto alla circonferenza o anche per mezzo di un procedimento visivo (metodo a tensovernice [8-4], metodo degli strati superficiali fotoelastici, speciali rivestimenti ceramici che richiedono una temperatura di cottura di 550°C).

In 2.

La sollecitazione risultante di un oggetto sollecitato con diverse componenti si può determinare solo secondo il metodo dell'analisi di uno stato di sforzo biassiale con direzioni principali sconosciute secondo il par. 8.2.2.

Nel caso di torsione con sollecitazione normale sovrapposta il punto di misura non ha importanza poiché entrambe le sollecitazioni agiscono uniformemente sulla sezione. Lo stesso non si può affermare per una torsione a cui è sovrapposta una flessione. La sollecitazione di flessione attraversa la sezione dal massimo positivo a quello negativo. Si possono trovare i punti di massima sollecitazione se è nota la direzione del piano di inflessione. Misurazioni su più punti a 90° rispetto al diametro o impiego di uno dei metodi visivi succitati possono essere d'aiuto.

8.4.6 Misurazione su una barra di taglio

Così come in una barra di torsione gli sforzi di taglio si verificano in concomitanza con un momento torcente, in una barra di taglio esse si manifestano in concomitanza con un momento flettente. Dalla fig. 8.4-16 si può ricavare una delucidazione.

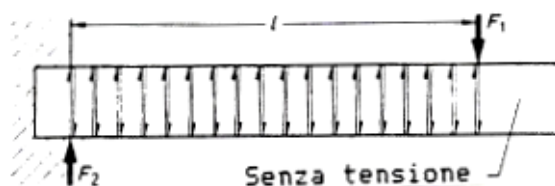


Figura 8.4-16: Formazione di sforzi di taglio in una trave a sbalzo

La trave vincolata ad una sola estremità (trave a sbalzo) viene caricata alla distanza l con la forza F_1 . La forza di reazione uguale F_2 ha direzione opposta. Si viene a creare una coppia di forze già mostrata nella fig. 2.2-2. Il fatto che i punti di applicazione della forza siano a grande distanza non influisce sui nascenti sforzi di taglio. In ogni superficie in sezione fra i due punti di applicazione della forza si generano degli sforzi di taglio. Gli sforzi normali σ_1, σ_2 concomitanti agli sforzi di taglio T formano - come nelle barre di torsione - un angolo di 45° con la superficie di taglio, fig. 8.4-17a. Contemporaneamente la forza F per il tratto l causa un momento flettente; gli sforzi di flessione così generati si sovrappongono agli sforzi normali. Per questo motivo l'indicazione di un angolo a $\pm 45^\circ$ è valida esattamente solo all'altezza dell'asse neutro dove gli sforzi di flessione si annullano. Il sistema di coordinate ruota verso i bordi cosicché gli sforzi sul contorno (sono tensioni di flessione pure) hanno un andamento parallelo ai bordi, fig. 8.4-17b. Per questo è importante applicare gli estensimetri il più vicino possibile alle fibre neutre.

Gli sforzi di taglio T e l'angolo di scorrimento γ non sono misurabili con estensimetri, tuttavia si possono calcolare dalle deformazioni misurate a 45° . Vale la relazione

$$\varepsilon_{45^\circ} = \frac{\tau}{2G} = \frac{1}{2} \gamma. \quad (8.4-34)$$

Da ciò risultano

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \gamma \cdot G = 2 \varepsilon_{45^\circ} \cdot G & (8.4-35) \\ &= \varepsilon_a \cdot G \quad \text{per il collegamento a mezzo ponte} \\ &= \frac{1}{2} \varepsilon_a \cdot G \quad \text{per il collegamento a ponte intero} \end{aligned}$$

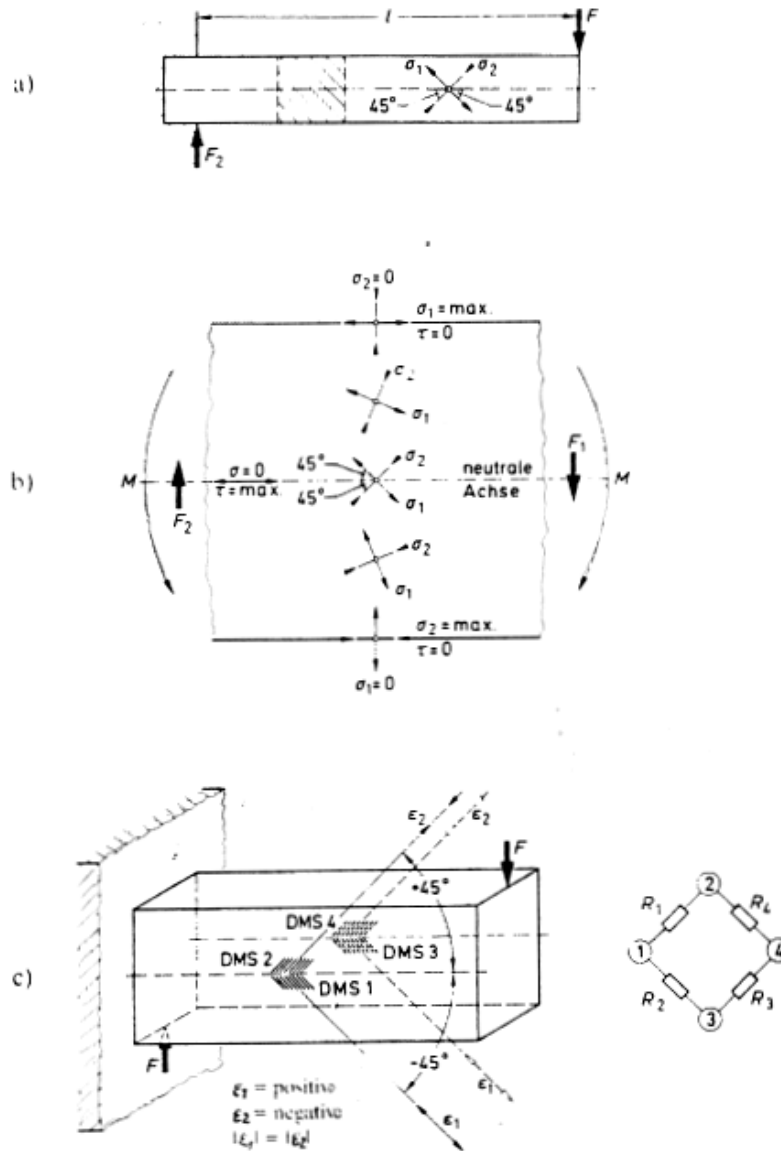


Figura 8.4-17: Stati di sforzo e deformazione su una barra di taglio
 a) direzioni degli sforzi normali principali σ_1, σ_2 all'altezza dell'asse neutro
 b) direzioni degli sforzi normali principali σ_1, σ_2 e degli sforzi di taglio T all'altezza della sezione in caso di sollecitazioni di taglio e di flessione sovrapposte
 c) disposizione degli estensimetri per la misurazione dei massimi di deformazione ε_{45° e nel collegamento a ponte.

$$\gamma = 2 \varepsilon_{45^\circ}. \quad (8.4-36)$$

La distribuzione degli sforzi di taglio attraverso la sezione non é lineare. In una sezione rettangolare la distribuzione é ca. come quella mostrata nella fig. 8.4-18.

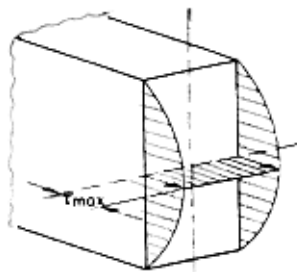


Figura 8.4-18: Distribuzione dello sforzo di taglio in una sezione rettangolare

Le deformazioni e gli sforzi di flessione sovrapposte possono essere determinati secondo il metodo descritto nel par.8.4.2. A questo scopo diventa necessaria la disposizione estensimetrica ivi descritta.

Dalla deformazione misurata ε_{45° si può determinare anche la forza F .

Vale

$$F = \frac{2 \varepsilon_{45^\circ} \cdot G \cdot A}{c_A}, \quad (8.4-37)$$

derivante da

$$\tau_{\max} = \frac{F}{A} \cdot c_A = \gamma \cdot G = 2 \varepsilon_{45^\circ} \cdot G. \quad (8.4-38)$$

Il fattore di forma c_A dipende dalla forma della sezione della trave. Per sezioni rettangolari con $b/h \leq 1/2$ si ha $c_A = 3/2$. Per altre forme c_A si può calcolare secondo le formule indicate nella letteratura specifica.

Se si vuole utilizzare la barra di taglio esclusivamente per la misurazione di forze, risulta opportuno utilizzare un profilo che possieda un momento resistente a flessione massimo per una sezione superficiale minima, p.e. in profilo I. I suoi vantaggi rispetto a un profilo rettangolare sono:

- Le deformazioni ε_{45° diventano più grandi.
- Gli sforzi di flessione diminuiscono.
- La distribuzione degli sforzi di taglio nel campo dell'estensimetro diventa più uniforme.
- Il segnale di misurazione (in contrapposizione alla barra di flessione) diventa indipendente dal punto di applicazione.

La fig. 8.4-19 mostra un esempio. La variante b) con un braccio di leva accoppiato permette di spostare il punto di applicazione della forza oltre il punto di misurazione.

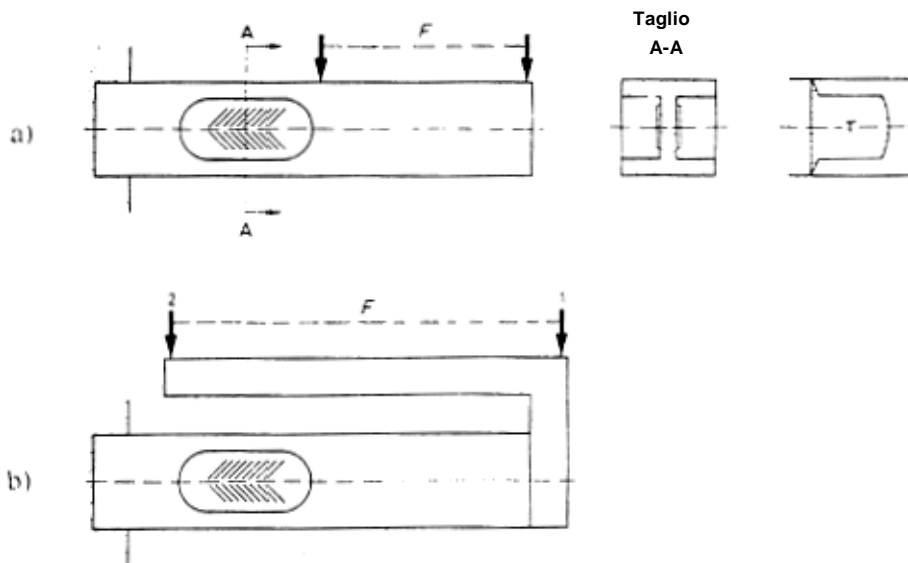


Figura 8.4-19: Variante I di una barra di taglio per la misurazione della forza e la distribuzione dello sforzo di taglio. Spiegazioni nel testo.

La disposizione degli estensimetri avviene opportunamente secondo la fig. 8.4-17c nel collegamento a ponte intero. La correlazione del segnale di misurazione ϵ_a alla forza F avviene per calibratura con una forza di grandezza nota.

8.4.7 Misurazione di sforzi di origine termica

Gli sforzi termici si generano negli elementi quando la deformazione causata dalle variazioni di temperatura o la contrazione vengono ostacolate e/o impedito con la forza. Gli sforzi termici sono normali sforzi dei materiali. Come esempio tipico per un oggetto in cui si generano sforzi termici di grossa entità si possono citare le rotaie ferroviarie saldate senza interruzione. L'origine degli sforzi termici sarà chiarita in un esempio.

Un tubo di acciaio di $l = 2$ m di lunghezza viene riscaldato da 15°C a 35°C , ne risulta $\Delta\theta = 20\text{K}$. Il coefficiente di dilatazione longitudinale dell'acciaio è $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{m}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Si calcola la variazione di lunghezza Δl .

$$\Delta l = l \cdot \alpha \cdot \Delta\theta = 2\text{m} \cdot 12 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{m} \cdot \text{K}} \cdot 20\text{K} = 480 \cdot 10^{-6} \text{m} = 480 \mu\text{m}.$$

In riferimento a una lunghezza di 1 m risulta una deformazione di

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{480 \mu\text{m}}{2 \text{m}} = 240 \mu\text{m}/\text{m}.$$

Per poter di nuovo eliminare questa deformazione è necessaria una forza che comprima il tubo alla sua lunghezza originaria. In questo modo si genera nel tubo uno sforzo longitudinale (in questo caso negativa). Lo stesso sforzo si viene a creare se il tubo viene mantenuto alla sua lunghezza originaria da ricoli esterni. Lo sforzo longitudinale σ si ottiene da

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = -240 \mu\text{m/m} \cdot 206 \text{ kN/mm}^2 \approx -50 \text{ N/mm}^2.$$

La forza F (pressione) che si viene a creare dipende dalla sezione A del tubo. In un tubo con un diametro esterno di 50 mm e pareti spesse 3 mm la sezione si ricava moltiplicando il diametro medio D per lo spessore della parete s

$$A = (D - s) \cdot \pi \cdot s = (50 - 3) \cdot \pi \cdot 3 = 443 \text{ mm}^2.$$

$$F = \sigma \cdot A = -50 \text{ N/mm}^2 \cdot 443 \text{ mm}^2 = -22150 \text{ N}.$$

L'esempio mostra che già variazioni di temperatura relativamente piccole possono causare sforzi e forze considerevoli.

Lo disposizione degli estensimetri sull'oggetto dipende da cosa si vuole misurare. Per gli oggetti a forma di barra si possono ottenere informazioni dai par. 8.4.1 fino a 8.4.3, per gli oggetti piani si consulti invece il par. 2.2.2. Sono da preferire estensimetri ad autocompensazione della risposta alla temperatura. Una misurazione contemporanea della temperatura [8-5, 8-6] fornisce a volte utili informazioni supplementari.

Il problema è ora: come si possono misurare con gli estensimetri delle dilatazioni impedita?

I paragrafi seguenti descrivono diversi metodi la cui opportunità viene di volta in volta stabilita dalle condizioni vigenti sull'oggetto da misurare.

I problemi speciali nella determinazione degli sforzi termici su modelli di resina epossidica sono descritti in [8-10].

8.4.7.1 Confronto di due misurazioni su un oggetto libero e bloccato

Una misurazione comparativa è possibile solo se l'elemento da misurare viene liberato prima o dopo la misurazione sotto carico e viene sottoposto a una misurazione di riferimento a uguale temperatura. In questo modo si possono rilevare ed eliminare gli errori di risposta alla temperatura. Il metodo verrà chiarito tramite un esperimento su modello.

Un tubo di alluminio che può subire una dilatazione termica liberamente porta su lati opposti 2 estensimetri e una resistenza termica Pt 100 per la misurazione della temperatura. Gli estensimetri sono collegate come ponte a $2/4$ o diagonale per il raddoppiamento del valore di misurazione ε_1 e la compensazione di un'eventuale flessione. Nel ponte a $2/4$ si ha $\varepsilon_1 = 1/2 \varepsilon_a$.

Il tubo viene riscaldato dalla temperatura ambiente a 45°C. Il valore venutosi a creare $\varepsilon = 1/2 \varepsilon_a = -100 \mu\text{m/m}$ ha origine dal mancato adattamento dell'estensimetro ai coefficienti di dilatazione termica del tubo di alluminio (risposta alla temperatura), fig. 8.4-20a.

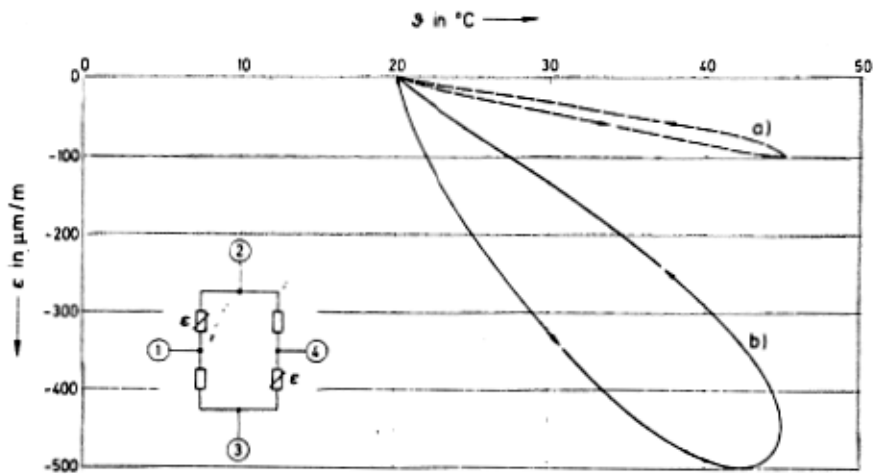


Figura 8.4-20a: Risultato di una prova su modello per la determinazione delle tensioni termiche
a) Segnale del tubo libero di espandersi (misurazione di riferimento)
b) Segnale del tubo bloccato (misurazione di carico)
 Per il collegamento a ponte a $2/4$ si ha $\epsilon = 1/2 \epsilon_a$.

Dopo il raffreddamento il tubo viene fissato alla estremità in una morsa, che impedisce la dilatazione termica del tubo. Riscaldandolo nuovamente si ottiene un valore di misurazione $\epsilon = 1/2 \epsilon_a = -500 \mu\text{m/m}$ (misurazione di carico), sebbene la lunghezza del tubo sia forzatamente fissata, fig. 8.4-20b.

La differenza di $-400 \mu\text{m/mm}$ corrisponde alla deformazione termica impedita. (Il maggiore ciclo di isteresi si ottiene con il raffreddamento irregolare del tubo bloccato. A causa dei robusti elementi di bloccaggio le estremità del tubo si raffreddano più velocemente del centro di esso dove viene misurata la temperatura. Mentre l'indicazione della temperatura si riferisce a quel punto, l'indicazione di dilatazione viene determinata dall'integrale di dilatazione attraverso la lunghezza del tubo).

Senza la lunghezza di riferimento si sarebbe creato un errore del 20%.

8.4.7.2 Misurazione con un elemento di compensazione

Il metodo più semplice per compensare un errore di risposta alla temperatura consiste nell'utilizzare un pezzo separato del materiale dell'elemento strutturale come elemento di compensazione. Nelle misurazioni su rotaie si può trattare di un altro pezzo di rotaia non bloccato. Questo tipo di compensazione di risposta alla temperatura viene descritto nel par. 7.1. Il vantaggio risiede nel fatto che si può ottenere il giusto risultato con una sola misurazione senza dover ricorrere alla misurazione di riferimento.

8.4.7.3 Determinazione separata o successiva della risposta alla temperatura

Quando è possibile effettuare la misurazione di riferimento sull'oggetto reale, è possibile effettuarla anche su di un pezzo separato dello stesso materiale. Si ha però bisogno di correlare il valore di deformazione alla temperatura, cioè si deve misurare la temperatura vicino all'estensimetro sull'elemento di comparazione e sull'oggetto.

Quando l'oggetto lo permette, anche dopo la misurazione della forza si può separare l'estensimetro con tutto il materiale sottostante nel modo mostrato in fig. 3.2-10. In questo caso l'estensimetro non deve subire danni. La misurazione di riferimento (misurazione della risposta alla temperatura) può poi essere determinata successivamente nel modo descritto all'inizio.

A seconda che ci si aspettino stati di sforzo monoassiali o biassiali, si devono usare estensimetri lineari o rosette a R. La valutazione dei valori di misurazione avviene sulla base dei par. 8.1 e 8.22.

9 OSSERVAZIONI SULLA PRECISIONE DI MISURA

Gli estensimetri vengono immessi sul mercato finiti ma non sono ancora uno strumento di misura. Questa constatazione solo apparentemente contraddittoria risulta dal fatto che l'estensimetro è in grado di effettuare misurazioni solo dopo essere stato applicato dall'utente. Le indicazioni di precisione da parte del produttore sono legate alle condizioni incontrate nei singoli casi. È per questo motivo, affinché anche l'utente possa ottenere dei buoni risultati, che nei vari paragrafi di questo libro si sono trattate dettagliatamente le possibili fonti di errore e sono state descritte misure per la compensazione o la correzione di detti errori.

I trasduttori di forza dimostrano che gli estensimetri sono in grado di fornire risultati insolitamente precisi. Al vertice si trovano le celle di cavico con obbligo di taratura con un errore consentito inferiore allo 0,02%. La costanza temporale del parametro (sensibilità) è migliore di $1 \cdot 10^{-4}$ /anno. Questa estrema precisione si può ottenere e mantenere solo con i rilevatori in cui i punti di misurazione sono incapsulati ermeticamente. I modelli più recenti di rilevatori di precisione che sono destinati a misurazioni comparative internazionali nei dispositivi di misurazione normali hanno consentito un incremento della precisione di misurazione [9-1].

Alle condizioni che si riscontrano nell'analisi sperimentale delle tensioni e nei campi di applicazione analoghi la precisione raggiungibile si riduce molto velocemente a valori convenzionali nel campo percentuale. Non bisogna al proposito dimenticare che tutti gli elementi della catena di misurazione, oggetto incluso, forniscono il loro contributo all'errore di misura.

Si pensi alle asimmetrie elettriche nel collegamento a ponte, alle asimmetrie meccaniche nell'oggetto (p.e. dovute a tolleranze di produzione, distorsioni delle sezioni in seguito a carico, anisotropia delle caratteristiche elastiche), agli errori di orientamento dell'estensimetro ecc..

Ogni misurazione dovrebbe perciò essere accompagnata da un accurato studio degli errori: prima della misurazione per riconoscere e possibilmente eliminare le grosse fonti di errore; dopo la misurazione per ottenere un quadro concreto dei probabili errori di misura rimasti.

La nuova filosofia sostituisce il concetto di "errore di misura", tranne in caso di poche eccezioni, con il concetto di "incertezza di misura". Un ampio quadro del tema trattato in questo capitolo si può, trovare in [9-2].

9.1 Cause degli errori di misura

Ogni risultato di misurazione viene falsificato a causa dell'imperfezione

- dell'oggetto misurato
- dello strumento di misura
- del procedimento di misura
- dalle influenze ambientali
- dall'influsso dell'osservatore
- dalle variazioni temporali di tutte le fonti di errore suddette.

A causa di questi influssi ogni valore di misura differisce in un certo grado dal valore reale della grandezza esaminata. Un risultato è imperfetto quando non fornisce un'indicazione sulle deviazioni in esso contenute. Devono essere fissati dei limiti all'interno dei quali si trova il vero valore ricercato.

Si distinguono:

- a) errori grossolani,
- b) dispersioni casuali,
- c) deviazioni sistematiche.

In a)

Gli errori grossolani hanno origine da:

- scelta di un metodo di misura o valutazione sbagliato,
- impiego scorretto dei rilevatori del valore di misura (p.e. errore di applicazione),
- errore di collegamento,
- uso sbagliato degli strumenti,
- errori nella lettura del valore di misura,
- mancato controllo di una fonte di errore.

Per questo tipo di errori c'è una possibilità di correzione. O vengono riconosciuti in tempo ed eliminati oppure vengono totalmente inclusi nel risultato. A volte ci si può accorgere della presenza di uno di questi errori da un risultato improbabile. Talora però anche i risultati "improbabili" sono giusti e le aspettative sbagliate.

In b)

Si hanno dispersioni casuali a causa di influenze la cui presenza dipende dal caso. A questo gruppo appartengono tutte le variazioni non determinabili e non influenzabili durante la misurazione

- dell'oggetto di misura (invecchiamento),
- dell'ambiente (temperatura, umidità, pressione dell'aria, campi elettrici e magnetici, radiazioni),
- dei dispositivi di carico (frizione, usura, gioco nelle trasmissioni delle leve),
- degli strumenti di misurazione (invecchiamento, variazione della tensione d'esercizio, influssi ambientali),
- dell'osservatore (stanchezza, compromissione dovuta ad altre influenze).

I diversi influssi non possono essere separati e non seguono una legge riconoscibile.

Dispersioni casuali non hanno valori e segni costanti (\pm). Essi possono essere determinati solo ripetendo più volte la misurazione.

In c)

Le deviazioni sistematiche sono causate principalmente da

- imperfezione dell'oggetto,

- imperfezione del metodo,
 - imperfezione degli strumenti,
- in secondo luogo da:
- influssi ambientali,
 - caratteristiche dell'osservatore.

Le deviazioni sistematiche hanno un valore determinato e un segno determinato (o - o +); in linea di massima esse possono essere stabilite tramite misure comparative con strumenti e procedimenti ad alta precisione. Una deviazione sistematica nota può essere condizionata dal principio di misurazione impiegato (p.e. collegamento di un rilevatore con caratteristica non lineare ad un amplificatore con curva lineare). Questo tipo di deviazioni si possono correggere. La correzione K ha il segno contrario alla deviazione.

9.2 Determinazione matematica della dispersione casuale dei valori di una serie di misure

Con i mezzi della statistica matematica le dispersioni casuali possono essere valutate numericamente e in modo tanto più affidabile quanto maggiore è il numero delle misure effettuate, cioè possono essere indicati dei limiti entro i quali il risultato è incerto.

9.2.1 Requisiti sperimentali

Le condizioni sperimentali hanno un'influenza sulla dispersione dei valori. Si distinguono due casi limite dei requisiti sperimentali pratici:

Condizioni di ripetizione

Un osservatore determina il valore con un unico apparecchio alle stesse condizioni di lavoro. In condizioni di ripetizione non sono riconoscibili gli errori sistematici.

Condizioni di confronto

Diversi osservatori effettuano le misurazioni in laboratori diversi utilizzando strumenti diversi dello stesso tipo. In questo caso la deviazione standard è in generale maggiore rispetto al caso precedente.

9.2.1.1 La distribuzione di Gauss

Per la valutazione statistica di una misura si ipotizza una distribuzione normale gaussiana della grandezza esaminata. La distribuzione gaussiana può avere luogo ovunque le dispersioni della grandezza di misurazione siano puramente casuali; non si può effettuare alcuna scelta preventiva o prendere qualche altra misura attraverso cui si ottenga uno spostamento unilaterale o una preferenza di un settore parziale del campo di dispersione. Questo significa che tutte le misurazioni vengono effettuate in condizioni di ripetizione o perlomeno in condizioni di confronto.

Da un grosso numero di misure singole ottenute in questo modo (p.e. 1000) si può calcolare la media aritmetica secondo l'equazione (9.2-1).

par.9.2.2. Si confronti il valore di ogni singola misurazione con la media. Si troverà che un gran numero di misurazioni singole corrisponde esattamente alla media, un altro numero considerevole avrà ottenuto risultati molto simili e un numero sempre decrescente avrà conseguito risultati via sempre più differenti in positivo e in negativo. Se si riportano su di un istogramma i valori p ottenuti con questo confronto, si formerà la figura di distribuzione caratteristica, fig. 9.2-1.

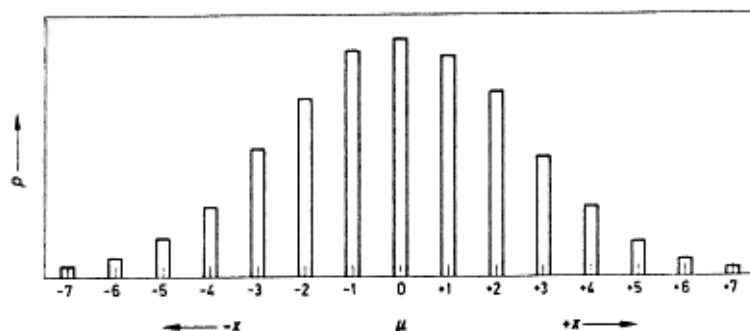


Figura 4.2-1: Istogramma della distribuzione dei valori di dispersione di una serie di misure

x = Deviazione della media μ (valore previsto)

p = numero dei valori di misurazione all'interno di ogni gruppo

In condizioni ideali e in una rappresentazione con intervalli infiniti si ottiene una distribuzione normale che, in onore al suo inventore, viene chiamata distribuzione di Gauss, fig. 4.2-2.

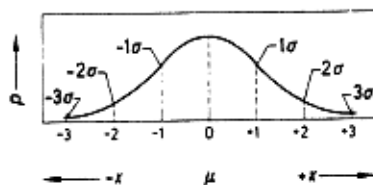


Figura 4.2-2: Densità di frequenza p della distribuzione gaussiana (curva a campana di Gauss).

Nel diagramma di Gauss le aree sottese dalla curva corrispondono alla quota dei valori singoli rispetto al numero totale dei valori di misurazione, la cosiddetta popolazione base.

I punti di flesso della curva che delimita la superficie sono indicati nella fig. 9.2-2 con -1σ e $+1\sigma$. Il tratto σ sull'asse delle ascisse (nella fig. 9.2-2 $1\sigma = 1x$) viene definito deviazione standard della popolazione base.

Nella distribuzione normale (distribuzioni gaussiane) delle grandezze su 1000 valori indipendenti ne cadono nella media

683 nel campo $x \pm 1\sigma$ (68,3%)

954 nel campo $x \pm 2\sigma$ (95,4%)

997 nel campo $x \pm 3\sigma$ (99,7%)

Le percentuali corrispondono al livello di confidenza $(1-\alpha)$.

Nell'industria si preferisce in misura crescente, nel controllo della produzione un livello di confidenza $(1-\alpha)$ del 95%, che può arrivare in alcuni campi anche al 99%.

Su 1000 valori singoli indipendenti ne rientrano

950 nel campo $x \pm 1,96 \sigma$, $1 - \alpha = 95\%$,

990 nel campo $x \pm 2,58 \sigma$, $1 - \alpha = 99\%$.

Quando una grandezza fisica si disperde poco si ha una curva stretta, fig. 9.2-3a, mentre nel caso di grandi dispersioni la curva è ampia, fig. 9.2-3b.

Si può riconoscere dal valore di σ se una curva presenta elevata o limitata dispersione.

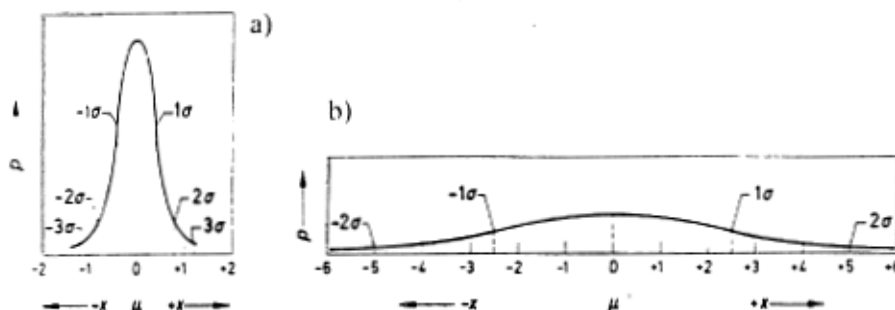


Figura 9.2-3: Densità di frequenza p della distribuzione gaussiana

a) in caso di dispersione limitata della grandezza fisica ($\sigma = 0,4x$)

b) in caso di dispersione elevata della grandezza fisica ($\sigma = 2,5x$)

In pratica non è possibile ripetere una misurazione 1000 volte. Perciò da un numero più limitato di misurazioni si calcola con l'equazione (9.2-2), par. 9.2.3, (al posto della deviazione standard σ della popolazione base) un valore stimato di σ , la deviazione standard s . Tanto maggiore è il numero delle singole misurazioni, quanto di più s si avvicina al valore σ .

9.2.2 Media aritmetica

Se in una serie di misurazioni n sono stati misurati i valori singoli indipendenti $x_1 \dots x_i \dots x_n$ in condizioni di ripetizione e confronto, allora come risultato vale normalmente la media aritmetica di questi valori singoli n , abbreviata in media \bar{x} .

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (9.2-1)$$

\bar{x} un valore stimato per il valore previsto μ ,

9.2.3 Deviazioni standard (empiriche) s e coefficiente di variazione v

La grandezza di calcolo più importante per la determinazione numerica della dispersione casuale di n valori singoli di una serie di misurazioni rispetto al loro valore medio \bar{x} è la deviazione media quadrata delle singole osservazioni, essa viene denominata deviazione standard (empirica) s :

$$\begin{aligned} s &= + \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \\ &= + \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}} \end{aligned} \quad (9.2-2)$$

La deviazione standard (empirica) s è un valore stimato per la deviazione standard σ (par. 9.3).

Il quadrato della deviazione standard si chiama varianza s^2 o σ^2 .

Invece della deviazione standard (empirica) s viene utilizzato anche il coefficiente di variazione (empirica) v ; v viene anche espresso in %. Per $x \neq 0$ si ha:

$$v = \frac{s}{|\bar{x}|} = \frac{100 s}{|\bar{x}|} \% \quad (9.2-3)$$

Il coefficiente di variazione era chiamato in precedenza "deviazione standard relativa s_r ".

9.2.4 Limite di confidenza e bauta di confidenza per il valore previsto μ

Non si deve supporre che il valore medio \bar{x} sia uguale al valore previsto μ o al valore vero x_w . È però possibile indicare un intervallo intorno al valore medio \bar{x} (corretto da deviazioni sistematiche note) che si sovrappone al valore previsto con una data probabilità $(1 - \alpha)$.

I limiti di questo intervallo si chiamano limite di confidenza per il valore previsto e l'intervallo stesso banda di confidenza per il valore previsto; essi sono correlati al livello di confidenza (1- α). Deve essere indicato il livello di confidenza prescelto. I limiti di confidenza simmetrici rispetto alla media per il valore previsto μ si ottengono con

$$\bar{x} + \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot s \quad (\text{limite superiore}) \quad (9.2-4)$$

$$\bar{x} - \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot s \quad (\text{limite inferiore}) \quad (9.2-5)$$

Il fattore t (distribuzione t secondo Student) dipende dal livello di confidenza prescelto (1- α). Nella tabella 9.2-1 sono riassunti i valori per diversi livelli di confidenza.

1 Anzahl n der Einzel- werte	2 Werte für t und t/\sqrt{n} (gerundet)					
	3 Vertrauensniveau (1- α)					
	68,3 %		95 %		99 %	
	t	t/\sqrt{n}	t	t/\sqrt{n}	t	t/\sqrt{n}
2	1,84	1,30	12,7	8,98	63,7	45,0
3	1,32	0,76	4,3	2,48	9,9	5,7
4	1,20	0,60	3,2	1,59	5,8	2,9
5	1,15	0,51	2,8	1,24	4,6	2,1
6	1,11	0,45	2,6	1,05	4,0	1,7
8	1,08	0,38	2,4	0,84	3,5	1,2
10	1,06	0,34	2,3	0,71	3,3	1,0
20	1,03	0,23	2,1	0,48	2,9	0,6
200	1,0	0,07	1,97	0,14	0,6	0,2

- 1 Numero n dei singoli valori
- 2 Valori per t e t/\sqrt{n} (arrotondati)
- 3 livello di confidenza (1- α)

Tabella 9.2-1: Valori per t e t/\sqrt{n} a diversi valori del livello di confidenza (1- α) (estratto)

Il crescere oltre qualsiasi limite fisicamente sensato di t per un numero di limitato n , in particolare per alti livelli di confidenza, mostra che con solo due misurazioni non è generalmente possibile ottenere dati statistici reali se s o σ non sono noti grazie a misurazioni precedenti.

D'altra parte non vale la pena di scegliere un numero troppo alto di misurazioni. In generale n non dovrebbe essere maggiore di 10 poiché altrimenti ci sarebbe una sproporzione fra la diminuzione del limite di confidenza e lo sforzo effettuato. È meglio limitare la deviazione standard s con misurazioni accurate e con la scelta di un metodo di misura attendibile. Se possibile però, si dovrebbe ripetere ogni misura 4 o 5 volte poiché in questo modo si ottiene l'incertezza di misura con sufficiente attendibilità e uno sforzo accettabile.

9.2.5 Incertezza della misurazione u

Il risultato di una serie di misure e il valore medio \bar{x} , corretto delle deviazioni sistematiche note situato in un intervallo all'interno del quale si trova anche il valore vero. Con incertezza della misura si definisce di volta in volta l'intervallo fra la media corretta e il limite superiore o inferiore dell'intervallo. Si osservi: Non si può definire come incertezza di misurazione l'intero intervallo fra limite superiore e inferiore [9-2]!

L'incertezza di misurazione u ha due componenti:

- La componente casuale u_z riguarda le deviazioni casuali.
- La componente sistematica u_s riguarda le deviazioni sistematiche sconosciute.

L'equazione

$$u_z = \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot s \quad (9.2-6)$$

è valida per una serie di misure in condizioni di ripetizione con deviazione standard di ripetizione σ_r sconosciuta.

La componente sistematica u_s può essere generalmente valutata solo sulla base di una sufficiente esperienza sperimentale (di indicazioni affidabili da parte del produttore).

Per quanto riguarda le indicazioni del produttore si può osservare che:

Tutti gli strumenti di misura hanno deviazioni sistematiche di varia grandezza a causa delle irregolarità di produzione diverse da esemplare a esemplare. Sarebbe veramente troppo dispendioso determinare la deviazione oggettiva di ogni singolo strumento confrontandolo con un campione normale. È sufficiente indicare i limiti entro i quali devono essere contenute le variazioni. Negli strumenti di qualità i dati tecnici sono elencati con i loro valori limite nei fogli caratteristiche tecniche. Il produttore controlla solo che le deviazioni rimangano entro i limiti garantiti. Da questo punto di vista i numeri non sono un valore assoluto.

Le deviazioni possono riguardare grandezze addizionali o moltiplicative. Bisogna fare attenzione poiché esse possono avere anche segno diverso e compensarsi reciprocamente in modo più o meno accentuato. Si raccomanda perciò di stabilire dalle deviazioni sistematiche non determinabili singolarmente un valore stimato per la componente sistematica u_s dell'incertezza di misurazione. La somma geometrica di tutti i valori singoli a_i può essere uno dei metodi utilizzati.

$$u_s = \pm \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2} \quad (9.2-7)$$

L'incertezza di misurazione u si può ottenere con un'addizione lineare delle due componenti u_z e u_s :

$$u = u_z + u_s. \quad (9.2-8)$$

Se le due componenti sono quasi grandi uguali, allora si può anche determinare u come somma geometrica:

$$u = \sqrt{u_z^2 + u_s^2}. \quad (9.2-9)$$

9.2.6 Risultato di misura

Il risultato y di una misurazione si compone di:

- la media aritmetica \bar{x} di una serie di misurazioni,
- la correzione K per le deviazioni sistematiche determinabili,
- l'incertezza di misurazione u ,
- l'indicazione del livello di confidenza prescelto $(1-\alpha)$.

$$y = \bar{x} + K \pm u \text{ per } (1-\alpha) = \dots\% \quad (9.2-10)$$

Osservazione:

Alla base delle versioni del capitolo 9 c'è [9-2]. Sono stati esaminati solo i passaggi che sembravano opportuni per le misure di deformazioni con estensimetri. Si possono ottenere ulteriori informazioni dalle normative.