



*centroappunti.it*

**CORSO LUIGI EINAUDI, 55/B - TORINO**

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

**NUMERO: 2593A**

**ANNO: 2025**

# **A P P U N T I**

**STUDENTE: Andrea Forno**

**MATERIA: Sperimentazione su Strutture Aerospaziali - Prof.  
Frulla**

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTI E NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.

## Sommario

<b>1 Regulation .....</b>	<b>4</b>
1.1 FAR Part 23 Subpart C-Structure .....	5
1.2 FAR Part 23 Subpart D-Design and Construction .....	6
<b>2. Strumenti di misura e trasduttori .....</b>	<b>8</b>
2.1 Principi fisici .....	8
2.2 Sistemi di rivelazione .....	10
2.3 Caratteristiche metrologiche di strumenti di misura.....	10
2.3.1 Errori di misura.....	11
2.4 Misura della deformazione .....	14
2.5 Estensimetri meccanici .....	15
2.6 Estensimetri Ottici .....	15
2.7 Estensimetri Pneumatici o Acustici .....	16
2.8 Estensimetri elettrici .....	17
2.2.1 Sistemi combinati .....	20
2.9 Dinamometri o celle di carico .....	20
2.10 Macchina di prova sperimentale.....	21
<b>3. Prove caratteristiche di impiego aeronautico.....</b>	<b>23</b>
3.1 Macchina di prova .....	25
3.2 Prova a compressione .....	28
3.3 Prova di resilienza .....	29
3.4 Prova a scorrimento viscoso.....	29
3.5 Prova per la determinazione delle condizioni critiche.....	30
3.5.1 Metodo di Southwell .....	33
3.5.2 Strain reversal Method.....	34
<b>4. Sensori e attuatori.....</b>	<b>36</b>
4.2 Caratteristiche generali dei sensori.....	36
4.2.1 LVDT.....	39
4.2.2 Estensometri .....	39
4.2.3 Sensori di forza.....	39
4.2.4 Fibra ottica.....	39
4.2.5 Laservibrometro (LDV: Laser Doppler vibrometer) .....	40
<b>5. Incertezza e analisi dei dati.....</b>	<b>42</b>
5.1 Variabili aleatorie.....	43
5.2 Distribuzioni di probabilità.....	44
5.2.1 Principali distribuzioni di probabilità.....	45
5.3 Teoremi limite.....	47
5.4 Probabilità nel calcolo strutturale .....	47

<b>6. Elementi di statistica .....</b>	<b>49</b>
6.1 Teoria della stima.....	50
6.1.1 Piccoli campioni .....	51
6.1.2 Esempio di calcolo.....	52
6.1.3 Dimensione minima del campione .....	53
6.1.4 Metodo dei minimi quadrati .....	53
<b>7. Prove in similitudine.....</b>	<b>54</b>
7.1 Teorema di Buckingham.....	54
<b>8. Correlazione dati numerici e sperimentali.....</b>	<b>58</b>
8.1 Esempio prova statica.....	60
8.2 Modellazione FEM di un estensimetro.....	61
8.3 Simulazione prova di trazione .....	63
8.4 Simulazione di una prova dinamica.....	64
<b>9. Prove full scale .....</b>	<b>65</b>
<b>10. Prove a fatica.....</b>	<b>68</b>
<b>11. Determinazione sperimentale della tenacità a frattura .....</b>	<b>73</b>
<b>12. Analisi di sensitività .....</b>	<b>79</b>

# 1 Regulation

In generale la valutazione della resistenza statica è un fattore importante per la certificazione delle strutture metalliche o in composito del velivolo.

Molti fattori contribuiscono alla resistenza delle strutture dei velivoli. Tradizionalmente si usano test strutturali su larga scala a livello di componente per valutare i percorsi di carico e i meccanismi di failure delle strutture.

Nel caso dell'utilizzo di nuovi metalli questi test sono effettuati anche per garantire la sufficiente resistenza ultima.

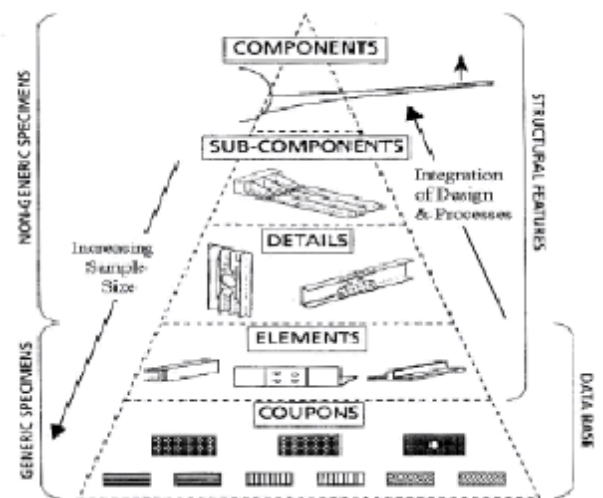
La combinazione di test su piccola scala e analisi è provata essere sufficiente per quantificare molti problemi di resistenza statica, minimizzare le incertezze e mitigare i rischi prima di effettuare test su larga scala.

Possiamo considerare la seguente suddivisione all'interno del velivolo.

In generale quindi per qualsiasi progetto si parte dall'analisi dei **provini** (Coupons) che viene fatta in modo statistico attraverso diverse tipologie di prove come quelle a fatica, queste prove sono guidate dall'ufficio tecnico e concordate con l'ente certificatore.

Dai provini si passa ai **singoli elementi** e poi ai **dettagli** dei componenti su cui possono essere fatti dei test a rottura. Si passa poi ai **sub-componenti** e ai **componenti** veri e propri su cui faremo delle prove macroscopiche.

In generale è molto conveniente partire da un database di provini esistente a meno che si stia progettando qualcosa di molto innovativo.



Alcuni fattori da considerare quando sto determinando la resistenza di un elemento in composito sono:

- Fattori di carico critici e modi di rottura associati
- Effetto dell'ambiente, dei carichi ripetuti, delle tolleranze di creazione e della variabilità di materiali e processi.
- Difetti di fabbricazione e danni in servizio che non sono visibili con il metodo delle ispezioni anticipate
- Scenario di riparazione del pezzo

La dimostrazione di resistenza a carico statico deve includere un test a carico ultimo per ogni componente strutturale importante, a meno che è dimostrato che le analisi fatte su sub-componenti o componenti sono sufficienti.

Questi test su importanti componenti strutturali includono le strutture di: l'ala, l'impennaggio e fusoliera.

L'esperienza per validare le analisi effettuate deriva da test fatti precedentemente su componenti con design, load cases e materiali simili.

Dobbiamo anche considerare che i fattori che influenzano la resistenza statica possono avere un impatto anche sulle caratteristiche di vibrazione (smorzamento, rigidità e inerzia) della struttura in composito. Per questo motivo bisogna essere in grado di determinare l'integrità della struttura composita in condizioni di flutter o di altri meccanismi aeroelastici.

Dobbiamo poi dire che la prova sperimentale di solito determina se una data condizione di carico vada bene o no ma a volte c'è bisogno di test da fare su scala reale.

(3) The structure **must be shown by residual strength tests, or analysis supported by residual strength tests**, to be able to withstand critical limit flight loads, considered as ultimate loads, with the extent of detectable damage consistent with the results of the damage tolerance evaluations. (...omissis...). (5) For any bonded joint, the failure of which would result in catastrophic loss of the aeroplane, the limit load capacity must be substantiated by one of the following methods:-(i) The maximum disbonds of each bonded joint consistent with the capability to withstand the loads in subparagraph (a)(3) **must be determined by analysis, test, or both**. (-omissis...) (6) Structural components for which the damage tolerance method is shown to be impractical **must be shown by component fatigue tests, or analysis supported by tests**, to be able to withstand the repeated loads of variable magnitude expected in service. **Sufficient component, subcomponent, element, or coupon tests must be done to establish the fatigue scatter factor and the environmental effects.** (omissis)

**must** = obbligo normativo

Section 23.573(a)(1) :Damage tolerance and fatigue evaluation of structure

(b) Metallic airframe structure. If the applicant elects to use Sec. 23.571[(a)(3)] or Sec. 23.572(a)(3), then the damage tolerance evaluation must include a determination of the probable locations and modes of damage due to fatigue, corrosion, or accidental damage. **The determination must be by analysis supported by test evidence and, if available, service experience.** Damage at multiple sites due to fatigue must be included where the design is such that this type of damage can be expected to occur. The evaluation must incorporate repeated load and static analyses **supported by test evidence**. The extent of damage for residual strength evaluation at any time within the operational life of the airplane must be consistent with the initial detectability and subsequent growth under repeated loads. (omissis)

## 1.2 FAR Part 23 Subpart D-Design and Construction

•Section 23.601 : General ; Section 23.603 : Materials and workmanship ; Section 23.605 : Fabrication methods; Section 23.609 : Protection of Structure ; Section 23.613 : Material strength properties and design values ; Section 23.619 : Special factors

Section 23.613 : Material strength properties and design values.

(a) Material strength properties **must be based on enough tests** of material meeting specifications to establish design values on a statistical basis.

(b) Design values must be chosen to minimize the probability of structural failure due to material variability. Except as provided in paragraph (e) of this section, compliance with this paragraph must be shown by selecting design values that ensure material strength with the following probability:

(1) Where applied loads are eventually distributed through a single member within an assembly, the failure of which would result in loss of structural integrity of the component; 99 percent probability with 95 percent confidence.

(basis A) (2) For redundant structure, in which the failure of individual elements would result in applied loads being safely distributed to other load carrying members; 90 percent probability with 95 percent confidence.

(basis B)

Section 23.613 : Material strength properties and design values

(c) The effects of temperature on allowable stresses used for design in an essential component or structure must be considered where thermal effects are significant under normal operating conditions.

(d) The design of the structure must minimize the probability of catastrophic fatigue failure, particularly at points of stress concentration.

(e) Design values greater than the guaranteed minimums required by this section may be used where only guaranteed minimum values are normally allowed if a "premium selection" of the material is made in which a specimen of each individual item is tested before use to determine that the actual strength properties of that particular item will equal or exceed those used in design.

In generale possiamo poi dire che speciali normative codificano il modo in cui le caratteristiche meccaniche dei materiali vengono ottenute e definite, per esempio il MIL-HDBK-5H specifica cosa fare per il materiali metallici. Lo scopo di questi documenti è quello di essere sorgente di alcuni ammissibili di progetto come la resistenza del materiale, la tenacità a frattura, la resistenza a fatica e all' accrescimento delle cricche e così via.

## 2. Strumenti di misura e trasduttori

Il concetto tradizionale della misurazione è quello di operare un confronto (**misurazione per confronto**) tra la grandezza fisica in esame e quella scelta come campione.

Ci sono però altre procedure che forniscono il valore di una grandezza leggendo la posizione di un indice su una scala. In questo caso si definiscono **misurazioni per deviazione**.

In entrambi i casi si procede sulla base del campione di riferimento che permette nel primo caso effettuare un confronto diretto, mentre nel secondo caso il confronto avviene dopo taratura della scala.

I metodi per confronto si suddividono poi in:

- metodi per opposizione Es. la bilancia a due piatti
- metodi per sostituzione Es. la bilancia ad un solo piatto

Il Ponte di Wheatstone è un metodo per opposizione.

Sono quindi da considerare diversi elementi per effettuare e gestire l'operazione di misura.

Tali elementi sono:

- **Trasduttori** ( elemento sensibile, elemento modificatore, elemento rivelatore) con il loro principio fisico per la trasformazione.
- **Strumenti di rivelazione** ( metodi, strumenti indicatori, strumenti registratori e stampanti) permettono di avere il valore quantitativo della variabile.

Posso poi in generale in un sistema di misura distinguere:

- Elemento sensibile: il componente che sente la grandezza in entrata ( ad esempio la molla nel caso del dinamometro) .
- Elemento modificatore: elemento che trasforma la grandezza da misurare in una diversa ( per il dinamometro la molla che trasforma la forza in uno spostamento)
- Elemento rivelatore: l'indice e la scala graduata del dinamometro che trasforma la grandezza modificata in una indicazione percepibile con l'occhio o con strumenti rivelatori ( registratori, ecc..)

### 2.1 Principi fisici

Per le grandezze meccaniche i principi fisici più frequenti sono:

- **Principi che legano le leggi dello spostamento e della deformazione:** a questo gruppo appartengono i trasduttori nei quali la misura è legata a spostamenti o variazione di forma dei corpi ad esempio: trasduttori di spostamento, di velocità di accelerazione, di pressione, di coppia torcente, di forza.
- **Effetto fotoelastico:** a seconda della deformazione il materiale avrà diverse caratteristiche ottiche che fanno sì che se il materiale viene illuminato nascono delle ombreggiature sul materiale in funzione della deformazione. E' possibile valutare l'entità della deformazione con la scala di colori. Questo metodo adesso non è più tanto utilizzato perché si usano sensori elettrici o meccanici più precisi.
- **Effetto meccanico-capacitivo** in cui si lega la capacità del condensatore allo spostamento che subisce le armature. Non sono così comodi per misurare lo spostamento.

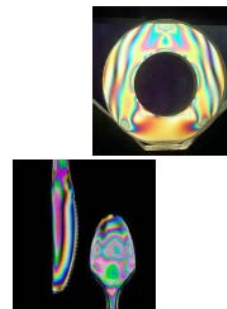
Possiamo dire che:

$$\text{Capacitance (C)} = \frac{\epsilon A}{d}$$

$\epsilon$  = permittivity of dielectric

A = overlapping area of plates

d = distance between plates





## 2.2 Sistemi di rivelazione

Quando faccio la rivelazione devo essere sicuro di interpretare correttamente la misurazione, devo essere in grado di capire come la misura in mm corrisponde alla grandezza in volt.

Devo fare quindi la taratura, per farlo si utilizza un sensore più preciso già tarato oppure utilizzando blocchetti di spessore predefinito, si misura la grandezza in uscita e, conoscendo la grandezza in ingresso, posso definire dei punti da cui ricavo la relazione tra spostamento e tensione.

Es. con 10 spessori conosciuti misuro 10 valori di tensione da cui ricavo la curva caratteristica  
 $V=f(\text{Spostamento})$

In genere i sensori hanno una risposta lineare per cui devono essere utilizzati in quella zona, ci saranno dei valori massimi e minimi di spostamento al di fuori del quale la legge che lega spostamento e tensione non è più lineare, è importante quindi in laboratorio mettere il trasduttore nel punto giusto per fare sì che tutte le misurazioni che verranno fatte con esso siano nel campo lineare e non escano andando nel campo non lineare o saturato.

Siccome poi il sensore può invecchiare o usurarsi allora periodicamente per ogni sensore deve essere rivalutata la curva di taratura e se questa esce del N% dalla curva iniziale non può più essere utilizzato, devo fare una taratura periodica dei sensori.

Di solito in laboratorio si usa un sensore di confronto che è più preciso e si usa per confrontare la misurazione degli altri sensori e capire se essi funzionano ancora bene. Un sensore che ha perso la sua caratteristica di linearità o la cui pendenza non è più la stessa deve essere sostituito.

## 2.3 Caratteristiche metrologiche di strumenti di misura

Alcune definizioni:

**Campo di misura:** limiti entro cui lo strumento può essere normalmente usato. Tale limite rappresenta l'intera scala o una sua parte. Insieme dei valori che lo strumento può misurare.

**Portata massima:** limite superiore del campo di misura.

**Portata minima:** limite inferiore del campo di misura. Se non è indicata si sottintende lo zero.

In alcune prove capita che non conosco quale sarà il valore massimo di spostamento che otterrò quindi può succedere di superare il valore di portata massima, cambio sensore.

**Caratteristica di funzionamento:** Rappresenta la relazione che lega i valori della grandezza in entrata E con quelli della grandezza in uscita U.

Può essere determinata a priori se si conosce il principio fisico su cui si basa lo strumento di funzionamento del trasduttore: caratteristica Ideale.

Può essere determinata per taratura riportando su un grafico le coppie di valori (E,U): caratteristica reale.

Per strumenti prodotti commercialmente si parla di caratteristica nominale come quella dichiarata dal costruttore per tutti gli strumenti dello stesso tipo.

Nota la caratteristica di funzionamento si può determinare:

- La sensibilità assoluta
- Il fattore di taratura
- La sensibilità relativa

Dove la **sensibilità assoluta** rappresenta la capacità del trasduttore di rispondere alla variazione della grandezza in quanto rappresenta la variazione massima della grandezza in ingresso per cui la grandezza in uscita rimane costante. Essa è valutata nel range di funzionamento lineare del trasduttore, se vado in range non lineari questo valore varia e dobbiamo controllare se rimane nel range previsto dalla normativa.



Dovuti a	Errore	Di tipo
All'operatore	1-Errore di lettura	Accidentale
Allo strumento	2-Errore di mobilità (errore di inversione)	
	3-errore di isteresi	Accidentale o sistematico (a seconda che vengano corretti oppure no)
	4- errore sullo zero	
	5- errore di linearità della caratteristica	
Alle condizioni di misura	6 – errore sulla grandezza di riferimento	Sistematico
	7 – errore di disturbo	
	8 – errore dovuto alle grandezze di influenza	Accidentale o sistematico (a seconda che vengano corretti oppure no)
	9 – errori dovuti alla variazione nel tempo del misurando ( in particolare per misure di tipo dinamico	

Dove per:

- **Errore sullo zero** si intende l'errore dovuto ad un incorretto azzeramento del sensore.
- **Errore di isteresi:** si intende l'errore dovuto al fatto che il materiale non ha un comportamento uguale quando viene caricato in direzioni opposte
- **Errore di mobilità:** si intende il fatto che quando vado da 0 al valore Max e poi dal valore Max voglio tornare a 0 non riesco ad arrivarci ma mi fermo ad un valore un po' più grande o un po' più piccolo questo perché gli spostamenti calcolati in una direzione non corrispondono agli spostamenti calcolati nella direzione opposta.
- **Errori di lettura:** che sono dovuti ad un errata lettura della misura da parte dell'operatore che può avvenire per diversi motivi:
  - Potere separatore dell'occhio e del sistema ottico che si utilizza nello strumento: il potere separatore medio convenzionale dell'occhio è di  $0.001d$  ( con  $d$  = distanza a cui si fa la lettura), esso diminuisce fino a  $0.0003d$  in condizioni di buona illuminazione ma sale a  $0.003d$  in condizioni non buone. In generale per letture su diagramma ci si limita al  $1/10$  di millimetro.
  - Errore di parallasse si determina valutando la distanza dell'indice dal quadrante e gli scarti angolari che l'osservatore può fare per rapporto alla normale al quadrante.
  - Errore di interpolazione è dell'ordine del 10% della larghezza della divisione per scale lineari
  - Errore dovuto al rumore di fondo ( tremolio dell'indice). Si valuta aggiungendo al valore medio dell'indice il 10% della doppia ampiezza dell'oscillazione.

Questi sono tutti errori associati allo strumento e, in quanto tali, possono essere minimizzati facendo una calibrazione iniziale dello strumento prima della prova o conservandoli molto bene dopo la calibrazione. Diventa quindi essenziale calibrarli periodicamente e tararli prima di qualsiasi prova.

Abbiamo poi altre fonti di errore:

- **Errore di disturbo:** si intende l'errore dovuto all'ambiente di prova e dalle condizioni esterne. ES. Estensimetri Elettrici in cui devo compensare la temperatura dell'ambiente esterno per cui vogliamo che la prova sia fatta a  $T = \text{cost}$  per misurare solo il  $\Delta l$  dovuto ad una forza meccanica.

Per quanto riguarda la propagazione degli errori prendiamo due risultati di misura espressi in valore medio + errore assoluto.

$$a = \bar{a} + \Delta a$$

$$b = \bar{b} + \Delta b$$

Possiamo notare che se all'interno delle formulazioni sono presenti:

- Somma o sottrazione: l'errore sul risultato si ottiene sommando gli errori assoluti

$$\Delta x = (\Delta a + \Delta b)$$

- Moltiplicazione o divisione: l'errore sul risultato si ottiene sommando gli errori relativi

$$\frac{\Delta x}{|\bar{x}|} = \left( \frac{\Delta a}{|\bar{a}|} + \frac{\Delta b}{|\bar{b}|} \right)$$

## 2.4 Misura della deformazione

Dobbiamo distinguere tra grandezze nominali e grandezze reali. Per grandezze nominali si intendono le grandezze riferite ad una sezione  $A_0$  iniziale, per grandezze reali si intendono grandezze riferite ad una sezione  $A$  reale.

Per esempio, possiamo creare la curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  nominale da una prova a trazione ma nella curva che si ottiene la  $\sigma$  indicata non sempre è quella che realmente agisce sul provino a causa della strizione per cui in alcuni casi si preferisce usare la curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  reale.

Avrò che le tensioni e le deformazioni nominali sono:

$$s = \frac{P}{A_0} \quad \text{TENSIONE NOMINALE} \quad e = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{DEFORMAZIONE NOMINALE}$$

Le tensioni e le deformazioni reali sono invece definite:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

Dove la  $A$  e la  $l$  sono calcolate nell'istante di misura.

Per quanto riguarda la deformazione reale, introducendo l'espressione di quella nominale si ottiene:

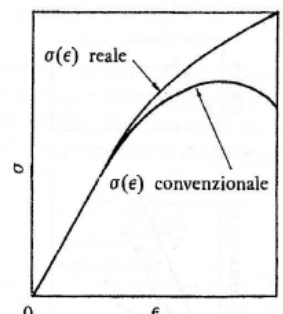
$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad \varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0}\right) = \ln(1 + e)$$

Posso anche legare la tensione reale a partire da quella nominale con:

$$\begin{aligned} A_0 l_0 &= A l \\ A_0 &= \frac{A l}{l_0} = A(1 + e) \end{aligned} \quad \sigma = \frac{P}{A} = \frac{P}{A_0} (1 + e)$$

Posso fare poi lo sviluppo in serie se la deformazione è molto piccola e dire che:

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1 + e) = e + e^2/2 + \dots$$



Gli **estensimetri ottici a reticolo a fibra di Bragg (fibre ottiche)** funzionano grazie alla variazione delle caratteristiche ottiche e riflettenti della fibra a seconda del suo allungamento. Più precisamente quando il reticolo a fibra di Bragg viene sottoposto a deformazioni, la luce riflessa impiega un tempo maggiore o minore per compiere l'intero percorso di andata e ritorno; inoltre, anche la lunghezza d'onda riflessa cambia. In termini scientifici, il reticolo a fibra di Bragg presenta un certo indice di rifrazione che varia al variare della deformazione.

Solitamente si installano quindi le fibre ottiche all'interno della struttura e sono utilizzate per fare il monitoraggio delle stesse durante la loro vita operativa. Non sono molto usate per l'attività sperimentale.



Gli **estensimetri ottici mediante applicazione di Laser** funzionano grazie ad un laser che illuminano la superficie del provino, durante la prova la riflettività della superficie varia per cui posso valutare il  $\Delta l$  del provino facendo delle fotografie successive dello stesso.



## 2.7 Estensimetri Pneumatici o Acustici

Gli **estensimetri pneumatici** trasformano il segnale da misurare in una variazione di portata d'aria che affluisce attraverso un orifizio di misura.

L'aria arriva all'orifizio ed esce ad una pressione che varia in base alla distanza dell'orifizio dal puntale.

Non viene solitamente usato perché è molto poco preciso e poco versatile.

Gli **estensimetri acustici (Schaeffer)** funzionano grazie ad un trasduttore costituito da una corda vibrante tesa ai due estremi che definiscono la base di misura. La trazione della corda viene modificata dalla deformazione della struttura su cui gli estremi sono collegati. La frequenza di vibrazione viene poi comparata (accordata) con una corda vibrante di confronto che permette la valutazione della variazione in frequenza e quindi della deformazione secondo la seguente formulazione:

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \varepsilon}}$$

Dove:

- L = lunghezza della base di misura
- $\rho$  = densità del materiale della corda

Il supporto dell'estensimetro poi deve essere perfettamente solidale per questo motivo prima di mettere l'estensimetro solitamente si tratta la superficie levigandola e pulendola per togliere eventuali residui organici. Questo permette di garantire l'adesione il più possibile uniforme dell'estensimetro al pezzo.

I sensori vanno poi messi nella direzione in cui si vuole misurare la deformazione.

In base alle dimensioni della struttura da misurare si utilizzano estensimetri più o meno grandi ma in campo aeronautico siccome i materiali sono omogenei si tende ad utilizzare griglie piccole quindi di 10mm al massimo.

Al sensore sono poi legati due cavi che lo collegano al sistema di misurazione, esso può essere fatto in molti modi ma il metodo classico e più semplice è quello di utilizzare il **Ponte di WheatStone** che è un dispositivo elettronico che permette di calcolare i valori di resistenza a partire da due misure di tensione.

Per farlo utilizza la seguente formulazione:

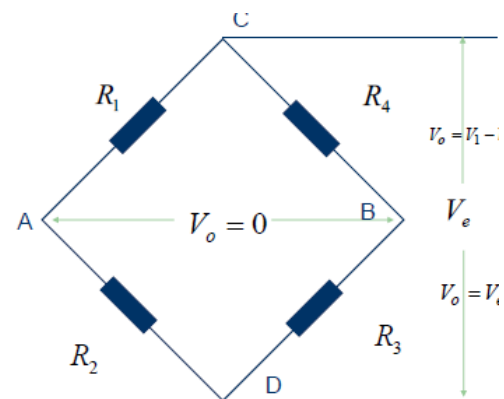
$$\text{Ramo CAD : } i_a = \frac{V_e}{R_a} = \frac{V_e}{R_1 + R_2}$$

$$\text{Ramo CBD : } i_b = \frac{V_e}{R_b} = \frac{V_e}{R_3 + R_4}$$

$$V_1 = R_1 \frac{V_e}{R_a} = R_1 \frac{V_e}{R_1 + R_2}$$

$$V_4 = R_4 \frac{V_e}{R_b} = R_4 \frac{V_e}{R_3 + R_4}$$

$$V_o = V_1 - V_4 = V_e \left[ \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right]$$



$$V_o = V_e \left[ \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \right]$$

In questo modo calcolando le tensioni  $V_o$  e  $V_e$  posso determinare i valori di resistenza. Noto che se le resistenze sono tutte uguali allora  $V_o = 0$  ma se una di queste è un estensimetro conoscendo le altre 4 posso calcolare istante per istante il suo valore di resistenza e con i Gage Factor ottenere la deformazione che cercavo.

Parleremo poi di:

- **Collegamento a Ponte Intero** se tutte le 4 resistenze sono estensimetri
- **Collegamento a Mezzo Ponte** se solo 2 resistenze sono estensimetri e le altre 2 le conosco
- **Collegamento ad Un Quarto di Ponte** se solo 1 resistenza è un estensimetro.

Per capire come è collegata la variazione di tensione con la deformazione vado a calcolare il differenziale di  $V_o/V_e$  alla variazione delle resistenze e ottengo:

$$\frac{V_o}{V_e} = f(R_i) = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

Facendo lo sviluppo in serie posso dire che:

$$\frac{V_o}{V_e} = \frac{\partial f}{\partial R_1} \Delta R_1 + \frac{\partial f}{\partial R_2} \Delta R_2 + \frac{\partial f}{\partial R_3} \Delta R_3 + \frac{\partial f}{\partial R_4} \Delta R_4$$

Nel caso della **configurazione a mezzo ponte** ho che sono presenti due sensori e che, se messi correttamente, posso annullare l'effetto della parte termica. Per metterli correttamente di solito si mette  $R_1$  sul provino e  $R_2$  su un componente dello stesso materiale del provino, e quindi si deformerà ugualmente al provino dal punto di vista termico, che metto vicino alla macchina di misura.

Otengo che quindi:

$$\frac{V_0}{V_e} = \frac{k}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$$

Dove però la  $\varepsilon_2$  è data solo dalla parte termica quindi ottengo che:

$$\frac{V_0}{V_e} = \frac{k}{4}(\varepsilon_m + \varepsilon_T) = \frac{k}{4}(\varepsilon_{m1} + \varepsilon_{T1} - \varepsilon_{T2}) = \frac{k}{4}(\varepsilon_m)$$

Si parla quindi di **configurazione a mezzo ponte con compensazione termica**.

Oss.

- Fare compensazione termica è facile se il materiale è isotropo, se non è così è più complicato perché le deformazioni sono in tutte le direzioni.
- Secondo normativa la variazione di T che ci può essere nella stanza di prova può essere solo nell'ordine dei decimi di grado.

### 2.2.1 Sistemi combinati

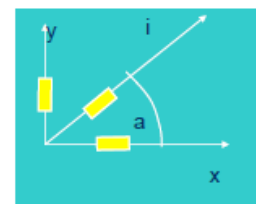
Se ho un pannello con un carico combinato devo mettere degli estensimetri in tutte le direzioni di carico perché l'estensimetro misura bene solo in direzione della griglia. Quindi ogni qualvolta io voglio determinare sia  $\varepsilon_x$  che  $\varepsilon_y$  e  $\varepsilon_{xy}$  devo mettere più estensimetri.

Quello che solitamente viene usato al posto di più estensimetri diversi sono i sistemi di estensimetri sopra i quali sono messi sensori a  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $45^\circ$ , ogni sensore sarà poi legato al suo ponte di Wheatstone e posso calcolare, conoscendo gli angoli tra il sistema di riferimento dell'estensimetro (1,2,3) e il sistema di riferimento della piastra (x,y,z) i valori delle deformazioni della piastra con la seguente formulazione:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos(2\alpha_1) + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin(2\alpha_1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos(2\alpha_2) + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin(2\alpha_2)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos(2\alpha_3) + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin(2\alpha_3)$$



## 2.9 Dinamometri o celle di carico

Sono strumenti utilizzati per misurare la forza, per farlo relazionano la loro deformazione con la misura della forza.

Il dinamometro più utilizzato è quello ad anello che si dividono in:

- **Dinamometri ad anello schiacciato:** dinamometro di tipo meccanico in quanto misurano lo schiacciamento dovuto al peso applicato con un trasduttore di spostamento
- **Dinamometri ad anello circolare:** possono essere di tipo meccanico con la misura della variazione del diametro mediante un trasduttore di spostamento oppure con applicazione di estensimetri che misurano la deformazione elastica delle pareti dell'anello a seguito dell'applicazione del carico.

Dobbiamo conoscere portata, range di misura e precisione della prova fatta con quella data macchina. Per avere valori buoni di queste grandezze la macchina deve essere sufficientemente rigida da non deformarsi durante la prova e quindi non introdurre incertezza nella prova, si deve quindi valutare la rigidità complessiva a carico massimo usando elementi molto rigidi.

Si valuta l'effetto della deformabilità sulla macchina di prova ogni volta che vario le celle di carico.

Questo è particolarmente importante da fare quando si fanno test su componenti di grandi dimensioni per cui si usano macchine di prova autocostruite.

- Nel tratto plastico ci sarà un valore di  $\sigma_{MAX}$  che in verità non corrisponde con la rottura del pezzo perché considerando i valori nominali si trascura l'effetto della strizione che fa diminuire la A. Si considera come carico di rottura il valore massimo della curva  $s=f(e)$  anche se non è quello esatto perché di solito il materiale si rompe poco dopo a questo valore quindi si è conservativi.

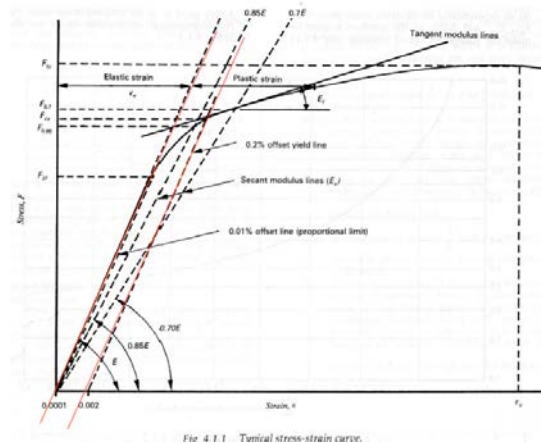
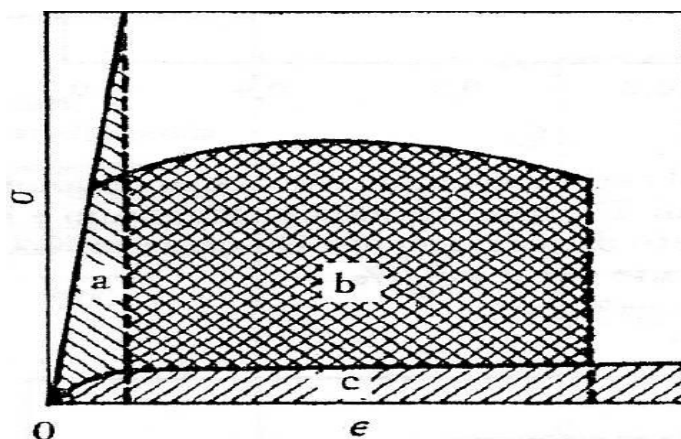


Fig. 4.1.1 : Typical stress-strain curve.

Per quanto riguarda i **materiali fibrosi** il comportamento si discosta da quello metallico perché il diagramma è lineare fino a rottura trattandosi di un materiale fragile, in verità poi per i compositi solitamente la pendenza della curva aumenta un po' con l'aumentare del carico. Il materiale non avrà deformazioni plastiche e questo è un problema perché non ho nessuna indicazione del fatto che ci si sta avvicinando alla rottura del pezzo, cosa che è invece presente nei metalli perché quando arrivo al campo plastico sono vicino alla rottura del pezzo.

Inoltre essendo materiali con una caratteristica lineare che però arrivano a carichi di rottura elevati quando questa avviene tutta l'energia viene rilasciata in modo esplosivo, a differenza del materiale metallico in cui parte dell'energia rimane immagazzinata nella deformazione permanente. Questo fa sì che si possano generare delle schegge che possono danneggiare i sistemi vicini.

Questi 2 diversi comportamenti sono riassunti nella seguente figura dove con c si identificano i materiali polimerici.



Le curve possono essere poi approssimate da formule analitiche.

La componente di deformazione plastica può essere calcolata con la formulazione a destra funzione di k e n che sono due coefficienti calcolabili sperimentalmente in modo da avere la formula analitica per il calcolo della curva del materiale.

$$\varepsilon_P = K \left( \frac{\sigma}{E} \right)^n$$



controllo di spostamento. Solitamente però, siccome non ci interessa, si faranno prove in controllo di carico e ci si accontenta del  $\sigma_{\max}$  che si ottiene.

Le leghe deformate a freddo hanno poi un po' di incrudimento per cui se scarico dopo essere entrato nel tratto plastico il provino sarà diventato più rigido quindi rilascerà meno energia e questo farà sì che quando caricherò di nuovo allo stesso valore di carico non mi troverò più nel punto D ma andrò in F.

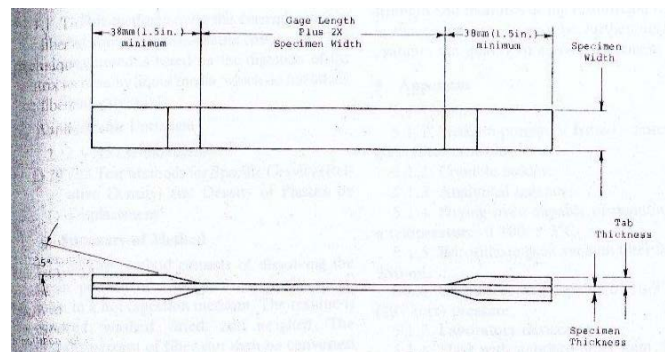
Le proprietà che di solito ci interessa misurare nella prova sono: E,  $\nu$ , G, allungamento a rottura e strizione percentuale.

Il valore di  $\nu$  viene determinato utilizzando sia sensori in direzione del carico assiale e sia sensori in direzione trasversale al carico per avere il valore di deformazione delle 2 direzioni. Per i metallici di solito mi aspetto una contrazione laterale per cui avrei  $\nu < 0$  ma per convenzione lo considero positivo, questo fa sì che se alcuni materiali, come i compositi, si allarghino se sottoposti a carichi di trazione (materiali AEUXETICI) allora ho  $\nu < 0$ .

Alcune leghe hanno poi un valore di temperatura alla quale passano da un comportamento duttile ad uno fragile, questo è importante conoscerlo se le leghe si sa debbano lavorare a bassa T.

Per quanto riguarda invece la prova di trazione su **materiale composito unidirezionale** esse vengono eseguite seguendo lo standard ASTM-D3039 che definisce: dimensioni del provino, velocità del carico, T dell'ambiente, controllo dell'atmosfera.

La geometria standard è differente da quella dei metalli perché ho variazioni di spessore solo in direzione dello spessore mentre sul suo piano il provino rimane di forma rettangolare come da figura.



In questo modo si ha che nella creazione del provino non debba rompere delle fibre nella parte che ci interessa ovvero la zona centrale, l'ispessimento lungo lo spessore complica però le cose perché lì devo incollare delle fibre che saranno più corte, di solito si usano per quella regione dei compositi in fibra di vetro perché riesce a compensare meglio le compressioni dovute agli afferraggi.

Si nota che l'angolo che deve avere il rinforzo è definito, questo perché in questo modo si uniforma l'andamento tensionale.

Da normativa nei compositi viene indicato lo spessore caratteristico e la lunghezza del provino in funzione della direzione delle fibre rispetto al carico come si nota dalla tabella:

Fiber Orientation	Recommended Specimen Width		Recommended Minimum Gage Length	
	mm	in.	mm	in.
0° (angle)	12.7	0.5	127	5
90° (angle)	25.4	1.0	38.1	1.5
0/90° (angle) balanced crossplay	25.4	1.0	127	5

Type of Reinforcement	Continuous Fibers		Discontinuous Fibers	
	mm	in.	mm	in.
Boron	0.508 to 2.54	0.020 to 0.100	1.016 to 5.08	0.040 to 0.200
Graphite	0.508 to 2.54	0.020 to 0.100	1.016 to 5.08	0.040 to 0.200
Glass	0.762 to 3.275	0.030 to 0.125	1.524 to 6.35	0.060 to 0.250

Si nota che avendo ogni strato di composito uno spessore di circa 0,2 mm allora il provino sarà composto da qualche decina di strati diversi.

Per creare il provino è importante come viene fatto il taglio perché è necessario che si ottenga un lato superiore e inferiore perfettamente perpendicolare alla direzione delle fibre e i lati laterali paralleli ad esse.

Se consideriamo **compositi unidirezionali** si nota, dalla tabella sottostante, che la dimensione del provino da usare nel caso di fibre a 90° è doppia rispetto alla dimensione del provino da usare se le fibre sono a 0° perché nel caso a 90° lavora solo la matrice che resiste a tensioni più piccole per cui deve avere spessori più grandi.

Fiber Orientation	Recommended Specimen Width		Recommended Minimum Gage Length	
	mm	in.	mm	in.
0° (angle)	12.7	0.5	127	5
90° (angle)	25.4	1.0	38.1	1.5
0/90° (angle) balanced crossplay	25.4	1.0	127	5

### 3.2 Prova a compressione

Per la prova a compressione nel caso di **compositi unidirezionali** si usa la normativa ASTM-D3410 che definisce una configurazione diversa rispetto alla prova a trazione.

Si ha un fissaggio a forma di tronco di cono agli estremi che fa sì che la forza di compressione non sia trasferita al provino tramite le facce perpendicolari al carico ma tramite un carico di taglio. Questo viene fatto perché se io applicassi la forza sulle superfici di base del provino allora avrei degli incurvamenti e misurerei le caratteristiche della trave incurvata, se invece la applico attraverso delle ganasce coniche non ci sarà il buckling locale perché la sezione di misura è più piccola e il provino verrà caricato lateralmente sulle facce laterali e non sulla testa.

Attualmente poi il provino è ulteriormente fissato al tronco di cono tramite un bullone perché se il carico avvenisse come fatto con le macchine precedenti (in figura) in cui non era presente nessun fissaggio tra provino e macchina di misura allora finché il provino non fosse sottoposto al carico di compressione adeguato lui non starebbe fermo all'interno delle ganasce coniche e questo invaliderebbe i risultati, per tenerlo fermo anche nella fase di precarico si è quindi messo questo bullone di fissaggio.

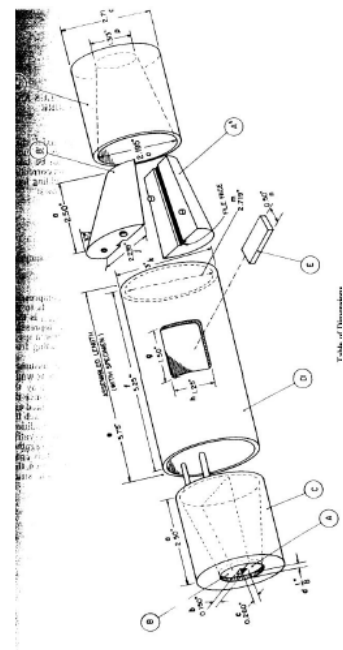
In generale è comunque complicato trovare le caratteristiche del materiale a compressione perché è complicato fare la prova bene in quanto il provino deve essere nella posizione giusta e mantenuto in equilibrio durante la fase di precarico ed inoltre anche la zona di misura risulta molto ridotta e potrebbero nascere dei fenomeni di Buckling locale che vorrei evitare.

Solitamente quello che viene determinato è che:

$$\sigma_R^C \approx 1/2\sigma_R^T$$

Si nota che c'è una discrepanza evidente ed è un problema perché se un componente, come una trave a sezione a C è sottoposto in parte a trazione e in parte a compressione la parte dimensionante diventa quella sottoposta a compressione e quindi, per esempio, con i compositi non riuscirei ad ottenere il risparmio di peso voluto. Bisogna considerare anche il fatto che poi per molti materiali compositi la  $\sigma_R^C$  non viene neanche fornita perché difficile da calcolare.

Notiamo che in seguito al carico di compressione il provino può rompersi in vari modi, solo 4 di essi sono in verità accettabili perché avvengono nella zona centrale del provino e sono caratteristici del carico a compressione ovvero avvengono con un angolo di circa 45°. Si nota che solitamente in materiali fibrosi tendono a fare esplodere le fibre perché vanno in buckling.

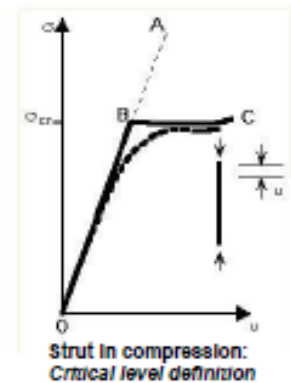
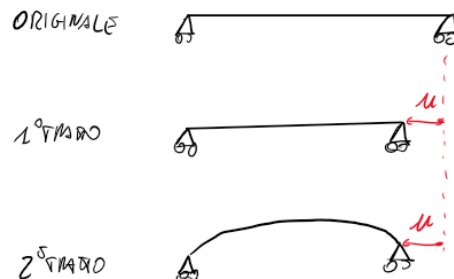


Per fare questa prova la T deve essere di circa 600/900°C per le leghe metalliche mentre nei polimerici va bene anche più bassa.

### 3.5 Prova per la determinazione delle condizioni critiche

Le condizioni critiche vengono determinate per travi sottili, piastre o cilindri sottili con carichi di compressione o taglio.

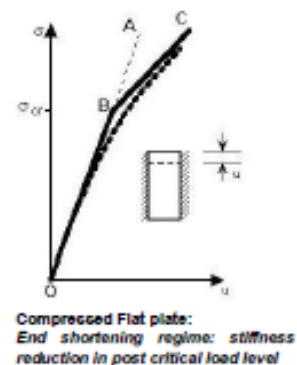
Il comportamento delle **travi** su cui è applicato un carico di compressione è descritto dal grafico a destra in cui  $u$  rappresenta l'accorciamento della trave secondo lo schema seguente.



Si nota che superato il valore di  $\sigma_{CR}$  la struttura non può essere ulteriormente caricata perché non può sopportare carichi maggiori, la trave compressa ha quindi come caso di riferimento l'applicazione del  $\sigma_{CR}$ .

Per quanto riguarda il **pannello compresso** invece il comportamento sarà diverso perché ci sarà un  $\sigma_{CR}$  ma, superato questo valore di carico, la piastra continuerà a sopportare il carico e si defletterà lateralmente in modo diverso a seconda della geometria e del materiale utilizzato.

Questo comportamento è spiegato nel grafico a destra.



Si nota che superato il  $\sigma_{CR}$  la pendenza della curva varia, questo succede perché  $\epsilon_x$  ha termini non lineari dovuti alla flessione fuori dal piano della trave che fanno sì che lo spostamento  $u$  della trave, superato il carico critico possa essere scritto come:

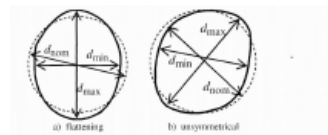
Questo  $\Delta u$  dovuto alla flessione fa sì che la trave si comporti come se la rigidità diminuisca infatti nella configurazione postcritica deformata si considera che la trave non risponde completamente alla sollecitazione ma solo una parte, detta striscia collaborante, sopporta il carico.

La curva che si genera è infatti bilineare con pendenze diverse che indicano rigidità diverse.

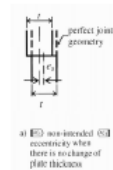
Siccome la valutazione del  $\sigma_{CR}$  dipende dalla geometria del cilindro vengono introdotte delle tolleranze sulle imperfezioni che ci possono essere nella fabbricazione dei cilindri in modo da poter determinare il  $\sigma_{CR}$  con certezza.

Queste riguardano:

- Eccentricità
- Allineamento dei pannelli
- Non planarità del guscio dovuto a rivetti, viti...



$$U_r = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_{nom}} < U_{r,max}$$



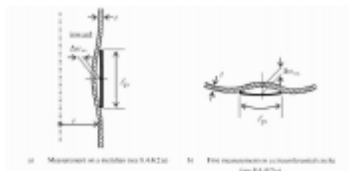
$$U_e = \frac{e}{t} < U_{e,max}$$

Table 8.3: Recommended values for (a) non-intended (b) eccentricity tolerances

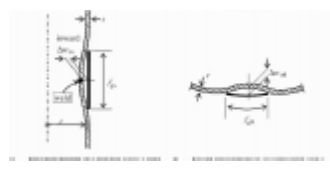
Fabrication tolerance quality class	Deviation	Recommended value of $U_{e,max}$
Class A	Excluded	0.10
Class B	Excluded	0.20
Class C	Excluded	0.30

Eccentricità

Allineamento pannelli

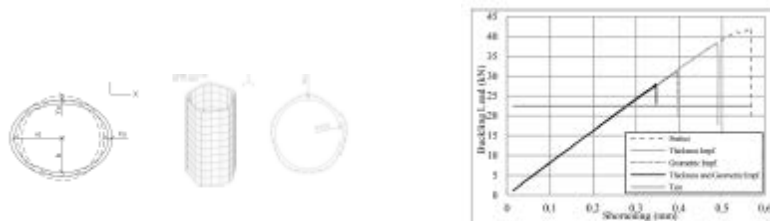


Non planarità del guscio

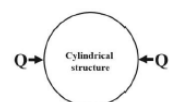
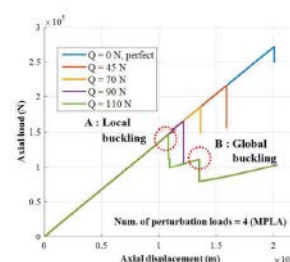
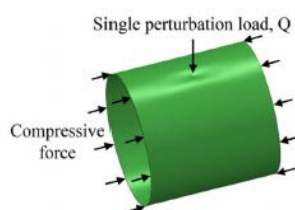


$$U_0 = \frac{\Delta w_0}{l_0} < U_{0,max}$$

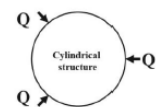
Per studiare il comportamento reale del sistema ovvero le imperfezioni della configurazione cilindrica con un metodo numerico dobbiamo introdurre queste imperfezioni nella mesh della struttura che è di per se una cosa molto complicata perché bisogna riprodurre le imperfezioni della struttura, introducendo le imperfezioni si nota che però  $\sigma_{CR}$  diminuisce per cui il metodo funziona.



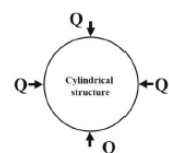
Un altro metodo consiste nell'inserire un carico perturbante rispetto alla geometria perfettamente cilindrica con i carichi perfettamente planari, questo carico perturbante però deve essere abbastanza piccolo da non influenzare il comportamento dello struttura a compressione ma ha il compito solo di introdurre un difetto. In base a dove metto il carico e di quale intensità lo metto si determina una curva  $\sigma_{CR}=f(\text{carico perturbante})$  e si ottiene il  $\sigma_{CR}$  reale.



(a) Number of perturbation loads: 2 (interval: 180 deg.)



(b) Number of perturbation loads: 3 (interval: 120 deg.)



(c) Number of perturbation loads: 4 (interval: 90 deg.)

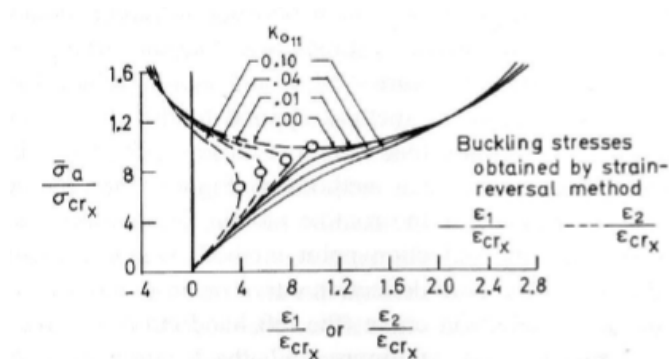
A livello teorico non potrei applicare l'approccio di Southwell su questa equazione perché non posso creare una retta la quale pendenza è il carico critico ma si nota che se  $w$  è piccolo, siccome i termini non lineari dipendono da  $w^2$ , allora la parte non lineare diventa trascurabile.

Per questo motivo posso considerare un intervallo di  $w/P$  piccolo e all'interno di essi considerare un tratto lineare e estrapolare il carico critico per quel tratto come fatto in figura.

Esistono poi altre metodologie per il calcolo del  $P_{CR}$  che oltre alle informazioni su  $P$  e  $W$  utilizzano le informazioni su  $\varepsilon$ , questo permette di avere un valore migliore.

### 3.5.2 Strain reversal Method

Considero un pannello compresso e 2 estensimetri posizionati sulla cresta della semionda di ingobbamento sulla faccia superiore e inferiore. Essi devono essere esattamente nella stessa posizione in modo che quando il pannello si ingobba si ottiene il seguente andamento:



Dal grafico si nota che all'inizio quindi prima che il pannello si ingobbi i due estensimetri danno valori uguali di deformazione, quando invece supero il carico critico il comportamento dell'estensimetro che si trova nella parte compressa è diverso dal comportamento dell'estensimetro che si trova nella parte tesa a causa della deflessione locale fuori dal piano.

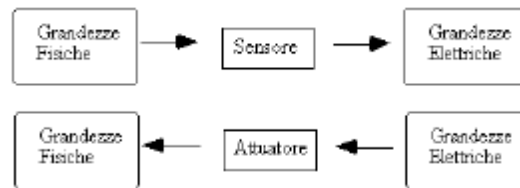
Il carico critico sarà associato al livello di carico di reverse ma se il sistema è imperfetto (tratteggiata e continua sottile) le due  $\varepsilon$  partono già staccate, come possiamo vedere dal grafico, per cui è più complicato determinare il carico critico che in genere sarà un po' minore del punto in cui  $\varepsilon_2$  si inverte.

Dal punto di vista numerico per ottenere i due valori di  $\varepsilon$  devo considerare la Z1 e Z2 della piastra.

Siccome poi bisogna anche in questo caso calcolare sia lo spostamento assiale  $u$  che quello fuori dal piano  $w$  dobbiamo usare degli estensimetri ma anche sensori di spostamento per avere un'idea di come saranno e dove saranno le creste, questo fa sì che alla fine della prova ottengo i seguenti 3 grafici:



## 4. Sensori e attuatori



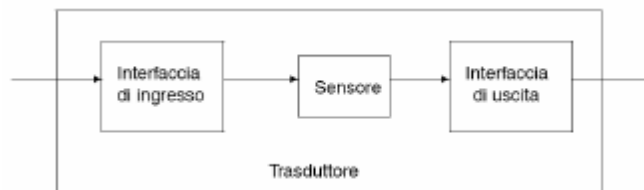
I sensori sono dispositivi che convertono una grandezza fisica in una grandezza elettrica (tensione o corrente) o meccanica (anche se ormai poco utilizzata).

Ad esempio le sonde NTC (Negative Temperature Coefficient) convertono una variazione di temperatura in una variazione di tensione elettrica.

Gli attuatori convertono un segnale elettrico in una grandezza fisica (ad esempio un attuttore idraulico comandato da un'elettrovalvola).

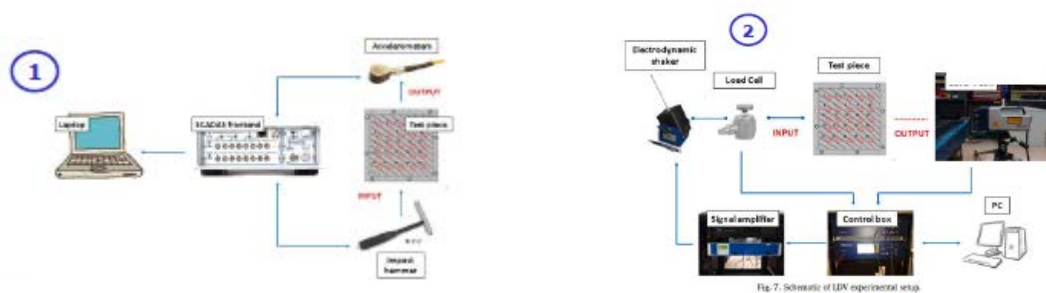
In ambito strettamente metrologico, il termine sensore è riferito solamente al componente che fisicamente effettua la trasformazione della grandezza d'ingresso in un segnale elettrico

I dispositivi in commercio spesso integrano al loro interno anche altri elementi, in quest'ultimo caso si preferisce parlare di trasduttori anche se in generale vengono sempre chiamati sensori.



Solitamente poi sensori e attuatori si trovano all'interno di una catena di misura che permette di avere un'interfaccia più semplice e vedere i dati più facilmente.

Alcuni esempi sono:



Dove:

- 1) Ho tanti accelerometri sul profilo da misurare, il segnale di ognuno viene inviato alla SCADAS che riceve anche il segnale dato in input dal martello e manda tutto al PC
- 2) Ho un laservibrometro al posto degli accelerometri che è collegato alla CONTROL BOX così come anche la cella di carico, in questo modo si può controllare sia la forzante che le accelerazioni in più punti e capire la frequenza di vibrazione.

### 4.2 Caratteristiche generali dei sensori

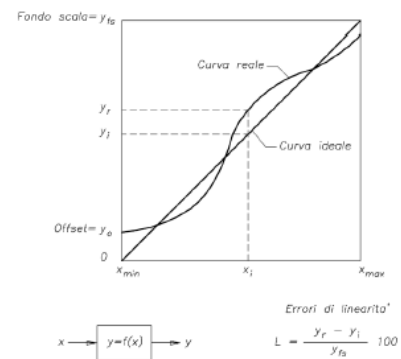
Le caratteristiche dei sensori si dividono in caratteristiche statiche, in cui la grandezza fisica varia lentamente nel tempo, e dinamiche, in cui la variazione è più veloce.

**Non linearità** che viene definita perché molti sensori vengono progettati in modo da avere una funzione di trasferimento teorica lineare.

Il funzionamento reale può però presentare scostamenti dalla linearità dovuti a vari fattori esterni (rumore di misura, variazioni di temperatura, etc.).

Per questo motivo i costruttori forniscono un'indicazione di quale sia il massimo scostamento dalla linearità entro certe condizioni operative.

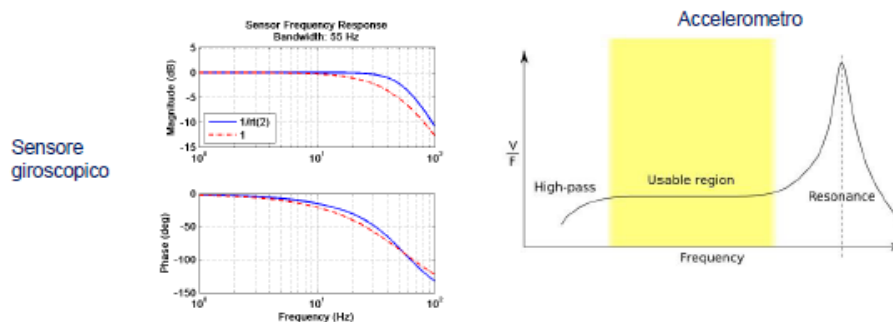
Funzione di trasferimento di un trasduttore



**Banda passante** è una caratteristica dinamica che descrive il comportamento del trasduttore al variare della frequenza della grandezza di ingresso

È molto importante conoscere la risposta in frequenza del trasduttore nel caso di misure dinamiche (misure in cui la grandezza da misurare cambia velocemente nel tempo).

Per misurarla bisogna tenere conto dell'attenuazione del segnale, che deve essere minore di 3Db, e della frequenza di risonanza del sensore che deve essere lontana dalla frequenza di misura che voglio fare.



Altre caratteristiche dinamiche importanti vengono determinate valutando la risposta del sensore ad un input a gradino dal quale si determinano le seguenti caratteristiche:

- Il dead time è la lunghezza dell'intervallo di tempo che intercorre fra l'applicazione del gradino in ingresso e la manifestazione del primo effetto sull'uscita
- La costante di tempo  $\tau$  è il tempo necessario affinché l'uscita si porti al 63% del valore finale. La costante di tempo influenza la capacità del trasduttore a rispondere a sollecitazioni variabili nel tempo
- Il rise time o tempo di salita è la durata dell'intervallo temporale nel corso del quale il segnale di uscita passa dal 10% al 90% del valore massimo

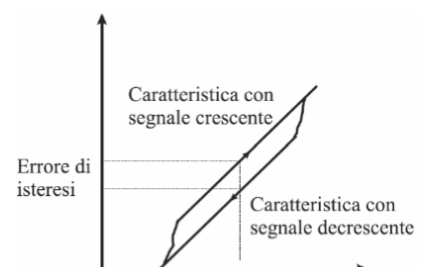
Gli errori che si possono fare per quanto riguarda le caratteristiche dinamiche sono:

### Offset error - Errore di fuori zero

È il valore che assume l'uscita del trasduttore quando la grandezza da misurare è nulla

### Hysteresis - Errore di isteresi

Si parla di isteresi quando la caratteristica del trasduttore è differente nei casi in cui il segnale è in crescita dai casi in cui il segnale è in diminuzione. L'errore di isteresi è la massima differenza tra le uscite nei due casi.

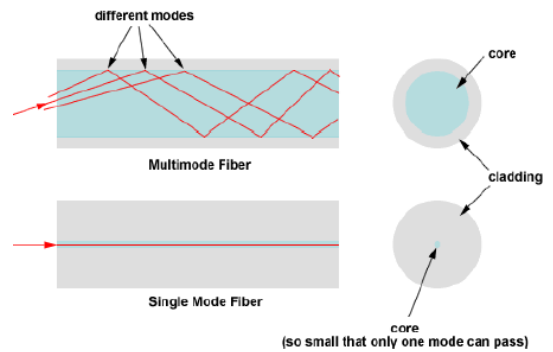




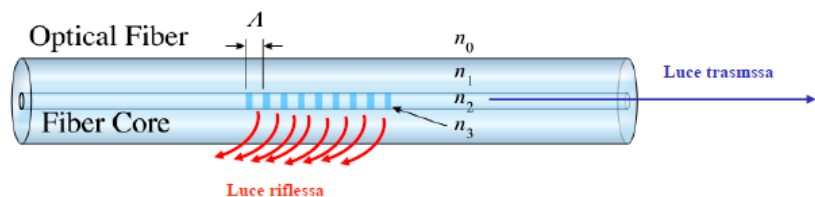
Il suo funzionamento si basa sugli indici di rifrazione che devono essere diversi tra loro tra cladding e core perché in questo modo si riesce ad avere un angolo limite di riflessione tale per cui la luce rimane all'interno della fibra ottica.

Sulla base di questo comportamento le fibre ottiche sono in grado di intrappolare più o meno lunghezze d'onda della luce e si dividono quindi in:

- multi-modali: fibre capaci di trasmettere più raggi
- unimodali: fibre capaci di trasmettere solo una lunghezza d'onda che ci ottengono riducendo molto il diametro della fibra



Per utilizzare le fibre come sensore di deformazioni devo variare localmente l'indice di rifrazione, questo avviene immettendo un **reticolo di Bragg**.



Se lo metto capita che il canale fa passare tutte le lunghezze d'onda tranne una che vien riflessa indietro a causa della variazione degli indici di rifrazione, questa dipende dal indice di rifrazione della zona del reticolo ( $n_{eff}$ ) e dalla distanza tra le bande del reticolo ( $\Lambda$ ) secondo la seguente formulazione:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$$

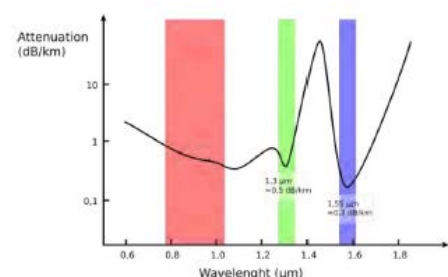
Quindi quando ho uno strain della fibra si modifica  $\Lambda$  e la lunghezza d'onda riflessa indietro, detta lunghezza d'onda di Bragg, cambia. Misurando la lunghezza d'onda dell'onda riflessa siamo in grado di determinare la distanza tra le zone del reticolo e quindi lo strain subito dalla fibra.

Si crea quindi una legge del tipo:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = k * \epsilon$$

Quello che si cerca si riflettere è circa la lunghezza d'onda dell'ultravioletto perché per misurarla ho bisogno di catturarla con un sensore che però non deve ricevere un segnale attenuato dall'atmosfera e si nota dal grafico a fianco che per le lunghezze d'onda di circa 1500nm ho un minimo di attenuazione.

Le fibre ottiche con sensori a reticolo di Bragg sono molto utilizzate perché posso mettere molti sensori per ogni fibra e quindi ottenere molte misurazioni, inoltre posso inserirle all'interno di strutture in utilizzo per fare health monitoring.



#### 4.2.5 Laservibrometro (LDV: Laser Doppler vibrometer)

Questo sensore si basa sull'effetto doppler ed è usato per corpi che vibrano, il principio di funzionamento è che il sensore spara il laser sul corpo che sta vibrando, esso lo riflette e il sensore, tramite un detector, lo riceve. Misurando la differenza di frequenza tra il laser inviato e quello riflesso si può determinare la velocità di oscillazione del corpo.



## 5. Incertezza e analisi dei dati

L'incertezza è la conoscenza imprecisa o incompleta di una grandezza, di un modello o di un sistema. Ovvero, le informazioni a disposizione non sono sufficienti a determinare in maniera univoca lo stato del sistema.

Esistono 2 tipi di incertezza:

- **Incetezza aleatoria o irriducibile:** essa è legata alla impossibilità fisica di conoscere con certezza alcune grandezze (Principio di indeterminazione di Heisenberg) o alla variabilità intrinseca di altre (modulo elastico di una serie di provini realizzati con lo stesso materiale)
- **Incetezza epistemica o riducibile:** deriva da una incompleta conoscenza del fenomeno e delle grandezze in gioco (approssimazione nel modello utilizzato, imprecisione del sistema di misura). Una maggiore conoscenza permette una riduzione di questa incertezza
- **Incetezza totale:** è la combinazione (somma) di incetezza aleatoria e incetezza epistemica

Noi ci occuperemo dell'incetezza aleatoria.

Si definisce invece la probabilità che un evento futuro si verifichi la fiducia che riponiamo nel suo verificarsi.

Della probabilità sono state date 3 definizioni:

- **Assiomatica** in cui la probabilità si basa su assunzioni iniziali  
ES. Probabilità di uscire testa nel lancio di una moneta è del 50% se assumo che essa sia una moneta ideale quindi non truccata
- **Frequentista** in cui la probabilità si basa su prove sperimentali  
ES. Misuro la probabilità che esca testa nel lancio di una moneta lanciandola molte volte e misurando ogni volta che cosa è uscito
- **Soggettiva** che si basa sull'esperienza accumulata

Possiamo dare altre definizioni:

- **Evento Semplice:** risultato di un esperimento mutuamente esclusivo rispetto a tutti gli altri risultati.
- **Campo di Probabilità:** insieme di tutti gli eventi semplici
- **Evento Composto:** composizione di eventi semplici

Da esse ricaviamo 3 assiomi fondamentali nel calcolo di probabilità che sono:

### I Assioma

Dato un campo di probabilità costituito dai punti  $E_1, E_2, \dots$ , assumiamo che a ciascun punto  $E_i$  sia associata una grandezza misurabile non negativa  $p_i = P[E_i]$ , detta probabilità dell'evento  $E_i$ .

### II Assioma

La probabilità  $P[A]$  associata ad un evento composto  $A$ , costituito dai punti  $E_1, E_2, \dots$ , è data dalla somma delle probabilità dei singoli punti che lo costituiscono per cui:

$$P[A] = P[E_1] + P[E_2] + \dots$$

### III Assioma

La probabilità dell'evento certo è 1.