

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI SALERNO
Facoltà di Ingegneria

APPUNTI DALLE LEZIONI DI
MISURE INDUSTRIALI

PARTE PRIMA

Settembre 2013

Prof. Ferdinando Luminoso

PREFAZIONE

L'attività professionale dell'Ingegnere ed in particolare dell'Ingegnere Industriale è caratterizzata da una molteplicità di prestazioni che vanno dalla progettazione alla direzione lavori, dal controllo della produzione al collaudo.

Ognuna di queste fasi è sempre contraddistinta da misure di grandezze, la cui conoscenza è indispensabile sia per l'investigazione scientifica, sia per la sperimentazione e sia infine per le attività di controllo e di collaudo.

In un mondo disseminato di impianti complessi e di macchine sempre più sofisticate, l'uso degli strumenti di misura è diventato sempre più intensivo: ne è un esempio illuminante la strumentazione di bordo dei velivoli e delle automobili.

Spesso inoltre la misura delle grandezze fornisce importanti informazioni per la sicurezza delle persone, delle strutture e delle apparecchiature, nonché per il monitoraggio continuo di processi e di operazioni.

Infine un importante campo di applicazione delle misure è il Collaudo. Quest'ultimo rappresenta la fase finale di ogni processo costruttivo, in quanto esso si concretizza in varie operazioni tese a verificare che l'oggetto del collaudo soddisfi le specifiche di progetto e quelle di legge, oltre quelle contrattuali.

Ogni operazione di collaudo termina quindi con un giudizio emesso dal collaudatore e, nel caso di esito positivo, occorre che le costruzioni o gli oggetti abbiano superato "cum laude" l'esame o la verifica.

E' la stessa etimologia della parola collaudo, che indica quindi a quale livello di bontà occorra spingere il giudizio sul rispetto delle specifiche. E' fondamentale quindi che ogni Ingegnere conosca in maniera approfondita, sia la teoria della misura sia gli strumenti, in modo da poter avere un'esatta cognizione dei fenomeni posti alla sua osservazione.

Il Corso di Misure Industriali si pone quindi l'obiettivo di fornire ai futuri Ingegneri i criteri e i metodi per effettuare operazioni di misura, soprattutto nell'ambito di sistemi meccanici e di impianti industriali.

Per gli approfondimenti dei vari argomenti si rinvia alla letteratura tecnica specializzata ed in particolare a ANGRILLI "Corso di Misure meccaniche, termiche e collaudi" Edizioni CEDAM e DOEBELIN – Strumenti e Metodi di misura II Edizione – Edizioni M.cGraw-Hill.

INDICE

CAPITOLO 1	5
METODI DI MISURA	5
1.1 Concetti introduttivi	5
1.2 Sistemi di misura	7
1.3 Incertezza della misura e richiami di statistica	12
1.4 Catena di misura	23
1.5 Misure statiche e misure dinamiche	24
1.6 Misure e collaudi dimensionali	26
1.7 Esercizi	37
1.7.1 Esercizio n. 1	37
1.7.2 Esercizio n. 2	38
1.7.3 Esercizio n. 3	39
1.7.4 Esercizio n. 4	39
1.7.5 Esercizio n. 5	41
1.7.6 Esercizio n. 6	41
1.7.7 Esercizio n. 7	43
1.7.8 Esercizio n. 8	45
1.7.9 Esercizio n. 9	46
CAPITOLO 2	48
CENNI DI TEORIA DEI SEGNALE	48
2.1 Generalità	48
2.2 Trasduttori	49
2.3 I segnali	51
2.4 Conversione dei segnali nel campo analogico-digitale	53
2.5 I sistemi diagnostici	56
2.6 Analisi delle vibrazioni	58
CAPITOLO 3	61
TARATURA STATICA DEGLI STRUMENTI	61
3.1 Generalità	61
3.2 Curva di taratura	61
3.3 Errori ed incertezze	64
3.4 Esercizi	67
3.4.1 Esercizio n. 1	67

CAPITOLO 4	69
MISURE DI DEFORMAZIONE ED ESTENSIMETRI	69
4.1 Generalità	69
4.2 Estensimetri	70
4.3 Ponte di Wheatstone	72
4.4 Esercizi	79
4.4.1 Esercizio n. 1	79
4.4.2 Esercizio n. 2	81
CAPITOLO 5	83
L'ATTIVITA' DI COLLAUDO	83
5.1 Generalità	83
5.2 Classificazione dei collaudi	84
5.3 Strumentazioni e tecniche di collaudo	85
CAPITOLO 6	88
COLLAUDO DI IMPIANTI INDUSTRIALI	88
6.1 Generalità	88
6.2 Fasi del collaudo	89
6.3 Collaudo provvisorio e definitivo	91
CAPITOLO 7	94
MISURE DEI PARAMETRI INERENTI I GENERATORI DI VAPORE	94
7.1 Generalità	94
7.2 Classificazione dei generatori di vapore.	95
7.3 Principali norme sulla costruzione dei generatori di vapore	97
7.4 Prove di collaudo inerenti la determinazione del rendimento.	98
CAPITOLO 8	102
IL COLLAUDO DI UNA MACCHINA PROTOTIPALE	102
8.1 Introduzione	102
8.2 Descrizione della macchina	103
8.3 Sistema di monitoraggio e controllo	104
8.4 Le operazioni di collaudo del LISA	105

CAPITOLO 1

METODI DI MISURA

1.1 *Concetti introduttivi*

Misurare rappresenta un'attività fondamentale in ogni campo delle scienze applicate.

Nel settore ingegneristico occorre confrontarsi con misure sia quando si esaminano problemi tecnici, sia quando si verificano prestazioni, sia ancora quando occorre tarare strumenti o investigare limiti dei modelli semplificativi adoperati.

E' infatti noto che tutta l'attività ingegneristica si fonda su ipotesi semplificative che danno origini a modelli semplici da applicare ai fenomeni fisici.

Per penetrare la complessa fenomenologia della natura si fa ricorso ad una serie di "modelli teorici", i quali, pur non essendo perfettamente aderenti alla realtà, riescono, in talune condizioni ed ipotesi, a descrivere abbastanza bene tale "realtà".

Si pensi ad esempio al modello del gas perfetto, che, pur non trovando riscontro nei gas reali, può essere utilizzato per lo studio di questi ultimi in opportuni campi di pressione e temperatura, con approssimazioni del tutto trascurabili.

Compito principale dell'Ingegnere è però quello di stabilire, ogni qualvolta si adotta un'ipotesi semplificativa, i limiti operativi entro i quali essa possa essere considerata valida.

Per tali motivi occorre molte volte procedere a misure per verificare la validità dei modelli adottati.

Le misure servono anche a controllare processi: si pensi ad esempio al controllo della temperatura in un forno industriale, oppure a tarare strumenti o a verificare prestazioni.

La misurazione è quindi il procedimento attraverso cui si assegnano valori numerici alla rappresentazione di grandezze fisiche.

Essa ha come risultato un valore che rappresenta la misura.

La metrologia è invece quella disciplina che concerne la qualità delle misure, mentre si intende per misurando il parametro sottoposto a misurazione.

Le misure si distinguono in misure **statiche** e **dinamiche**. Le prime concernono misure stabili nel tempo di osservazione, le seconde, invece, sono soggette all'effetto del tempo sulla grandezza da misurare. I metodi di misurazione definiscono le modalità con cui la misura viene eseguita. Essi sono il **metodo diretto**, che si applica allorquando si è in grado di leggere direttamente la misura senza invocare l'ausilio di altre grandezze (ad esempio la lettura di una dimensione effettuata con un calibro) e il **metodo indiretto**, cioè quello relativo alla misura di una grandezza mediante il rilievo di un'altra grandezza correlata alla prima (ad esempio la misura di una forza attraverso la valutazione di un allungamento provocato da essa su una molla).

Esistono diverse norme UNI che sono alla base della metrologia. Si ricordano le norme:

- UNI 4546 (1984 – Misure e misurazioni: termini e definizioni generali);
- UNI-CEI-ENV 13005 (2000 – Guida all'espressione dell'incertezza della misura).

Una grandezza misurata è rappresentabile dalla formula:

$$G = (n \pm i) [U_g]$$

dove:

G = grandezza da misurare

n = numero reale

i = incertezza

U_g = unità di misura

Si ricorda che l'incertezza è un numero associato al risultato di una misurazione, che esprime la dispersione dei valori che possono ragionevolmente essere attribuiti al misurando.

1.2 Sistemi di misura

Un sistema di misura è costituito da un insieme di unità di misura, convenzionalmente definite, utilizzabili per la misura di grandezze fisiche. Esso è caratterizzato da Grandezze Fondamentali e Grandezze Derivate.

Le prime devono essere direttamente misurabili e pur potendo essere scelte arbitrariamente, devono essere in grado di descrivere l'intero universo scientifico.

Le grandezze derivate sono ottenute, a partire dalle fondamentali, per mezzo di relazioni che le legano a queste ultime.

Terzo elemento fondamentale di ogni sistema di misura è l'istituzione di campioni di riferimento per ogni grandezza. Esso costituisce la base per la definizione dell'unità di misura.

Tale campione, pur potendo essere scelto arbitrariamente, deve possedere le seguenti caratteristiche:

- accuratezza e cioè possibilità di essere definito con la minima incertezza;
- accessibilità, nel senso che deve consentire il confronto con altri campioni secondari;
- riproducibilità, cioè capacità di poter essere riprodotto;
- invariabilità, cioè immutabilità nel tempo.

Si ricorda che è sempre possibile esprimere una qualsiasi grandezza in funzione delle grandezze di base del sistema. Ciò avviene mediante l'utilizzo di equazioni dimensionali del tipo:

$$[G] = [L]^a [T]^b [M]^c$$

ove

$[G]$ è la dimensione della grandezza derivata

$[L]$ è la dimensione di una grandezza fondamentale

$[T]$ è la dimensione di una grandezza fondamentale

$[M]$ è la dimensione di una grandezza fondamentale

a, b, c sono gli esponenti da dare alle grandezze fondamentali che permettono di ottenere le dimensioni della grandezza derivata.

Un sistema di misura dovrebbe essere:

- **completo** Allorquando qualsiasi grandezza fisica è definibile tramite le grandezze fondamentali;
- **assoluto** Se le unità di misura sono invarianti nel tempo e riproducibili in ogni luogo;
- **omogeneo** Se tutte le grandezze derivate sono ricavabili da quelle fondamentali mediante espressioni monomie, con fattori di conversione adimensionali;
- **coerente** Allorquando le grandezze derivate sono ricavate da quelle fondamentali mediante espressioni monomie con fattori di conversione unitaria;
- **decimale** Se i multipli e i sottomultipli delle sue unità sono scelti secondo le potenze di dieci;
- **razionalizzato** Se i coefficienti numerici presenti nelle leggi fisiche sono tali che i fattori irrazionali 2π o 4π appaiono soltanto in formule relative a configurazioni circolari o sferiche e non in formule relative a configurazioni piane.

I sistemi di misura utilizzati sono innumerevoli e sono comparsi per la prima volta nel 1790. Al fine di rendere interscambiabili i dati e i risultati scientifici, si è avvertita la necessità di utilizzare sistemi comunemente accettati.

Nel 1978 è stato introdotto in Italia, in ottemperanza alle Direttive Comunitarie, il Sistema Internazionale (S.I.), che è un sistema coerente ed omogeneo ma non è un sistema completo, in quanto non contempla ancora le unità di misura necessarie per la fisica nucleare.

Le grandezze fondamentali del S.I. sono sette:

- 1) Lunghezza [L];
- 2) Tempo [T];
- 3) Massa [M];
- 4) Intensità di corrente elettrica [I];
- 5) Intervallo di temperatura [q];

- 6) Intensità luminosa [I];
- 7) Unità di quantità di sostanza [mol].

Esistono poi altre due grandezze che si definiscono supplementari e cioè l'angolo piano e l'angolo solido.

Le unità di misura per le sopracitate grandezze sono:

Grandezza	Unità di misura	Definizione della U.M.
Lunghezza	metro (m)	Distanza percorsa nel vuoto dalla luce nell'intervallo di tempo (1/299 792 458) s.
Tempo	secondo (s)	Pari a 9 192 631 770 periodi della radiazione emessa nella transizione tra due particolari livelli energetici dell'atomo di cesio-133
Massa	chilogrammo (kg)	Massa del campione in platino-iridio conservato a Sévres e che nelle intenzioni originarie doveva equivalere alla massa di 1 dm ³ .
Intensità di corrente	ampere (A)	Corrente costante che percorrendo a regime stazionario due conduttori paralleli rettilinei di lunghezza infinita, di sezione circolare con diametro trascurabile, posti a distanza di 1 m, nel vuoto produce tra i due conduttori una forza di $2 \cdot 10^{-7}$ N/m.
Temperatura	Kelvin (K)	Determinato fissando a 273,16 K la temperatura del punto triplo dell'acqua sulla scala termodinamica delle temperature assolute. Tale scala è realizzata con la Scala Internazionale Pratica delle Temperature (SIPT)
Quantità di sostanza	la mole (mol)	Quantità di sostanza di un sistema che contiene tante unità elementari quanti sono gli atomi in 0,012 kg di carbonio 12 (¹² C)
Angolo Piano	Radiani (rad)	La misura degli angoli si riduce a quella di lunghezze o di aree e si evita il ricorso ad altre unità non coerenti quali ad esempio i gradi sessagesimali
Angolo solido	Steradiani (sr)	

Poiché la rappresentazione di una grandezza viene effettuata mediante un numero finito di cifre occorre formulare il concetto di *cifra significativa*. Ad esempio scrivendo il numero 413,61 si intende effettuare la somma seguente:

$$4 \cdot 10^2 + 1 \cdot 10^1 + 3 \cdot 10^0 + 6 \cdot 10^{-1} + 1 \cdot 10^{-2}$$

In altri termini ciò equivale a determinare il valore della funzione

$$f(x) = 4 \cdot x^2 + 1 \cdot x + 3 \cdot x^0 + 6 \cdot x^{-1} + 1 \cdot x^{-2} \text{ quando } x=10$$

Il numero 10 costituisce la base del sistema di numerazione, mentre i coefficienti che compaiono nella relazione prendono il nome di cifre, costituite cioè da numeri interi compresi tra 0 e 9.

Ogni numero si può esprimere nella forma a virgola mobile per cui:

$$\alpha = d \cdot 10^p$$

in cui

$$d = a_{-1} \cdot 10^{-1} + a_{-2} \cdot 10^{-2} + \dots + a_{-t} \cdot 10^{-t} = 0, a_{-1} a_{-2} a_{-3} \dots a_{-t}$$

Le t cifre $a_{-1}, a_{-2}, \dots, a_{-t}$ costituiscono la mantissa del numero α mentre p costituisce la caratteristica. Si chiarisce il concetto con un esempio:

Il numero 0,00218 si può scrivere come $d = 0,218 \cdot 10^{-2}$ e quindi avremo:

caratteristica $p = -2$

mantissa data da $a_{-1} = 2$

Per determinare le cifre significative occorre seguire due semplici regole:

- se lo zero è l'ultima cifra essa è una cifra significativa;
- gli zeri che si trovano a sinistra di un numero e quindi servono solo a localizzare il separatore decimale non sono cifre significative ad esempio nel numero 8,121 tutte le cifre sono significative, così come nel numero 2000, mentre il numero 000,6 ha una sola cifra significativa.

L'arrotondamento si effettua eliminando tutte le cifre che seguono l'ultima cifra significativa in base alle seguenti regole:

- se la prima delle cifre eliminate è >5 si aumenta l'ultima cifra significativa di una unità;
- se la prima delle cifre eliminate è <5 l'ultima cifra significativa resta invariata;

- se la prima delle cifre eliminate è ≥ 5 , si considera l'ultima cifra significativa. Se essa è dispari la si aumenta di una unità, se essa è pari la si lascia invariata. Ad esempio per arrotondare a quattro cifre significative il numero 12,376 si adotta il numero 12,38. Se invece si vuole arrotondare a quattro cifre significative il 12,373, si adotta il numero 12,37. Se invece si vuole arrotondare a quattro cifre significative 12,375 occorre adottare il numero 12,38, così come volendo arrotondare 12,365 si adotta il numero 12,36

1.3 Incertezza della misura e richiami di statistica

Se si effettuano ripetute misure di una medesima grandezza si ottengono, in generale, risultati tra loro diversi. In altri termini si può affermare che il valore “vero” di una grandezza non è conoscibile, se non altro perché l’azione stessa del misurare influenza il fenomeno da investigare e ne impedisce la sua naturale evoluzione.

In generale si assume come valore vero della grandezza il valore più probabile del misurando, intendendo come tale quello che si ricaverebbe da un gran numero di misure mediante apparecchi più perfezionati disponibili.

E’ quindi pacifico affermare che il valore vero di una grandezza è un concetto ideale e che ogni valore rilevato differisce dal valore vero di una quantità E_a , detta **errore assoluto**.

In altri termini, se x_m è il valore rilevato e x_v il valore vero si ha

$$E_a = x_m - x_v$$

Si definisce invece errore relativo il rapporto:

$$E_r = \frac{E_a}{x_v} = \frac{x_m - x_v}{x_v}$$

Gli errori di misura possono essere distinti in:

- **errori sistematici**, cioè legati alla causa che li ha prodotti da una legge fisica determinabile. Il loro effetto quindi può essere previsto e corretto;
- **errori accidentali**, cioè provocati da cause occasionali. Essi hanno una distribuzione gaussiana.

E’ noto che quando si ripete più volte, nelle stesse condizioni, la misurazione di una grandezza si ottengono, in generale, risultati diversi.

Ciò certamente non significa che la grandezza è cambiata, ma vuol dire che le indicazioni fornite dallo strumento utilizzato sono variate per cause accidentali o che la loro lettura è stata effettuata in modo imperfetto.

In altri termini una stessa operazione di misura, ripetuta più volte, fornisce risultati prossimi tra loro ma diversi. Per determinare il valore più attendibile del risultato e per cogliere il significato da dare agli scarti riscontrati, è necessario rifarsi a metodi statistici.

La miglior stima del valore del misurando, che varia casualmente e per cui n osservazioni indipendenti x_k sono state ottenute nelle stesse condizioni di misura, è costituita dalla media aritmetica X_m delle n osservazioni pari a

$$X_m = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k$$

Ovviamente il valore di X_m tanto è più attendibile quanto maggiore è il numero delle misure effettuate.

Ogni misura presenta uno scarto dalla media pari $x_k - X_m$ per effetto di fattori di influenza casuali.

Quanto più dispersi tra loro sono i dati, tanto maggiori saranno gli scarti.

La qualità della misura sarà, quindi, tanto migliore, quanto più piccoli sono tali scarti rispetto alla media.

Come detto l'incertezza di misura è un parametro associato con il risultato di una misurazione, che caratterizza la dispersione dei valori che potrebbero essere ragionevolmente attribuiti al misurando.

In generale può dirsi che il valore della grandezza da misurare X è dato dalla sua stima X_m gravata da un'incertezza I per cui

$$X = X_m \pm I$$

Talvolta l'incertezza I può essere espressa anche in forma relativa

$$I_r = \frac{I}{X_m}$$

Nell'incertezza del risultato di una misura possono essere individuati diversi componenti, che vengono raggruppati in due grandi categorie, in relazione al modo in cui l'incertezza viene stimata:

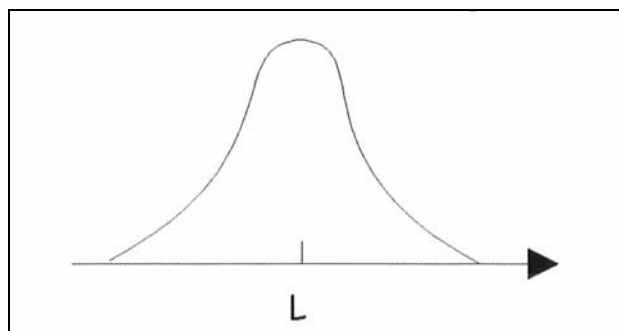
- quelli che vengono valutati applicando metodi statistici, partendo da una serie di misure ripetute (incertezza di tipo A);
- quelli che vengono valutati con altri mezzi (incertezza di tipo B).

Si precisa che tra la classificazione dei componenti nelle categorie A o B non esiste alcuna corrispondenza, se non quella di indicare due diversi criteri di valutazione dell'incertezza.

Prima di trattare l'incertezza di tipo A e di tipo B, conviene svolgere alcune considerazioni sull'elaborazione statistica dei dati.

Allorquando una misura viene ripetuta più volte, come detto, si ottiene una serie di valori diversi. Il valore di una misura può quindi essere assimilato ad un evento analogo al lancio di un dado cioè, può essere assimilato ad una variabile aleatoria e quindi i dati provenienti dalle misure possono essere trattati con i metodi specifici delle variabili casuali.

Ripetendo una misura più volte e considerando il suo valore medio X_m si ottiene una distribuzione del tipo



Dall'esame di essa si nota che la frequenza più alta dei valori è vicina a quella del valore centrale e via via decresce man mano che ci si allontana da esso. In statistica vengono introdotti alcuni concetti, quali quello di media, varianza e scarto tipo, sia in riferimento all'intero insieme dei dati N , detto universo, sia agli n dati riferiti ad un campione estratto dalla totalità dei valori possibili.

Per quanto concerne l'universo si ha:

$$MEDIA \rightarrow \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

$$VARIANZA \rightarrow \sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2$$

$$SCARTO TIPO \rightarrow \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$$

Per quanto concerne il campione si ha:

$$MEDIA \rightarrow X_m = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k$$

$$VARIANZA \rightarrow s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - X_m)^2$$

$$SCARTO TIPO \rightarrow s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - X_m)^2}$$

Di norma per studiare la curva di distribuzione, si raggruppano i dati in classi di intervallo di appartenenza. Il numero dei dati che appartengono ad una determinata classe j si chiama frequenza della classe e si indica con f_j

Se chiamo x_{max} e x_{min} , il valore massimo e minimo assunto dalla grandezza in ogni singola classe e k il numero di classi, possono ritenere che il campo di variazione della classe generica j è $x_{jmax} - x_{jmin}$ e il suo valore medio risulta pari a

$$\frac{x_{jmax} + x_{jmin}}{2}$$

La frequenza f_j di ogni singola classe viene determinata valutando il numero di osservazioni che cadono all'interno di ciascuna classe.

Si definisce come frequenza relativa percentuale della classe il parametro

$$f_{pj} = 100 \frac{f_j}{n}$$

La probabilità di ottenere la misura all'interno dell'intervallo che definisce la classe j vale

$$p = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f_j}{n}$$

La rappresentazione della distribuzione di probabilità può essere fatta con istogramma della frequenza o con il poligono della frequenza.

Un istogramma è caratterizzato da un insieme di rettangoli aventi:

- come base sull'asse orizzontale, con centro sul valore centrale, e lunghezza uguale all'ampiezza della classe;
- aree proporzionali alle frequenze delle classi.

Un poligono di frequenza è invece costituito da un grafico lineare delle frequenze delle classi passante per i valori centrali delle classi stesse. In altri termini esso può essere ottenuto unendo i punti di mezzo dei lati superiori dei rettangoli di un istogramma.

Talvolta si fa riferimento alle cosiddette frequenze cumulate. Esse rappresentano la frequenza totale di tutti i valori inferiori al confine superiore di una data classe che includa anche la classe considerata. Se ad esempio consideriamo la massa in chilogrammi di 100 persone, così distribuita:

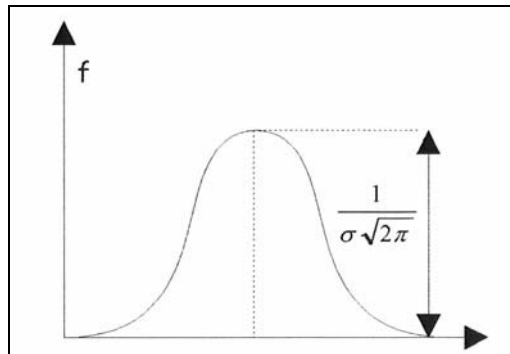
<i>Massa Kg</i>	<i>Persone Numero</i>
60-65	5
65-70	20
70-75	40
75-80	27
80-85	8

la frequenza cumulata corrispondente alla massa di 75 kg è:

$$5 + 20 + 40 = 65$$

Ciò significa che 65 persone hanno una massa inferiore a 75 kg.

Vogliamo ora prendere in esame alcune distribuzioni che trovano notevole applicazione negli studi statistici. Tratteremo dapprima la distribuzione normale o Gaussiana. Essa ha questo andamento:



μ = media della distribuzione

σ = scarto tipo della distribuzione

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2 / 2\sigma^2}$$

L'area delimitata dalla curva vale 1 essendo la probabilità cumulata su tutti i valori possibili. L'area sotto la curva compresa tra due valori $x = a$ e $x = b$ con $a < b$ rappresenta la probabilità che x sia compreso tra a e b .

Possiamo allora calcolare la probabilità che una misura cada entro un intervallo pari alla deviazione standard σ del valore vero μ .

$$P(\text{entro } \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{\mu-\sigma}^{\mu+\sigma} e^{-(x-\mu)^2 / 2\sigma^2} dx$$

Esprimendo la variabile x in termini di unità standard faccio la sostituzione

$$z = \frac{(x - \mu)}{\sigma}$$

Con questa sostituzione $dx = \sigma dz$ e i limiti dell'integrale diventano $z = \pm 1$. Allora

$$P(\text{entro } \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-1}^{+1} e^{-z^2/2} dz$$

Più in generale potremmo calcolare la probabilità entro $n\sigma$, che significa la probabilità per un risultato entro n deviazioni standard di μ , dove n è qualunque numero positivo

$$P(\text{entro } n\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-n}^{+n} e^{-z^2/2} dz$$

da questo integrale si ricava hce la probabilità che una misura cada entro una deviazione standard del risultato vero è il 68.27%, che cada entro 2σ è il 95.45% e che cada entro 3σ è il 99.73%. Per esprimere questi risultati in un altro modo, si può dire che la probabilità che una misura (avente distribuzione gaussiana) cada al di fuori dell'intervallo $\mu \pm \sigma$ è piuttosto apprezzabile (32%), che cada al di fuori di 2σ è molto più piccola (4.6%), e che si trovi al di fuori di 3σ è estremamente piccola (0.3%).

Se si estraggono n valori da una popolazione di infiniti valori, può, attraverso l'analisi dei dati estratti, essere stimata la media e lo scarto tipo di tale popolazione.

Se x_1, \dots, x_n rappresentano il nostro campione di n misure della stessa grandezza x , possiamo affermare, come già visto che la nostra migliore stima per la grandezza x è la loro media x_m .

I valori medi dei campioni hanno anch'essi distribuzione gaussiana con media coincidente con la media dell'universo. La deviazione standard delle medie vale

$$\sigma_{xm} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}$$

Talvolta accade che una misura, nell'ambito di una serie di misure, sembra essere completamente diversa ed in stridente disaccordo con tutte le altre, per cui si rende necessario decidere se la misura anomala sia generata da qualche errore e deve pertanto essere rigettata, oppure se essa può essere utilizzata come le altre.

Poiché non si può affidare tale decisione ad una valutazione soggettiva, dobbiamo ricorrere ad un criterio in grado di determinare, in maniera oggettiva, se la

misura anomala possa o meno essere accettata. Tale criterio viene denominato criterio di Chauvenet.

In una serie di n dati sperimentali, se alcuni valori presentano uno scostamento dal valore medio che ha probabilità di verificarsi inferiore di $\frac{1}{2n}$, allora quei valori devono essere scartati.

In particolare se facciamo n misure della stessa grandezza x ci calcoliamo X_m e s . Supponiamo che la misura i -ma x_i sia una misura sospetta e ci calcoliamo

$$s_i = \frac{x_i - X_m}{s}$$

Data una probabilità $p = 1 - \frac{1}{2n}$ dal grafico o dalla tabella si determina il valore z in modo che $F(z) = \frac{p+1}{2} = 1 - \frac{1}{4n}$. Se $|s_i| > z$ allora il dato viene scartato.

Ovviamente l'ipotesi posta alla base del criterio di Chauvenet è che le misure siano distribuite secondo una gaussiana e cioè secondo una distribuzione normale.

Incetezza di tipo A

Nell'incetezza di misura di tipo A, per quantificare le differenze tra le n misure x_k e, quindi l'incetezza di misura da associare alla singola misura x_k si ricorre alla media X_m e allo scarto quadratico medio

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - X_m)^2$$

Oppure allo scarto tipo:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - X_m)^2}$$

La misura sarà data quindi dalla media X_m e la sua incetezza sarà lo scarto tipo della media ovvero la misura sarà

$$X_m \pm \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Entrambe i parametri citati possono essere utilizzati per indicare l'incertezza di misura, ma si preferisce quasi sempre usare lo scarto tipo, che può essere espresso in valore assoluto, in valore relativo, o in valore relativo percentuale.

Ai fini del confronto tra risultati di serie di misure ripetute, delle quali è nota la stima più attendibile del misurando X_m , risulta utile esprimere l'incertezza di misura tramite lo scarto quadratico medio delle medie

$$s_{\mu}^2 = \frac{s^2}{n}$$

oppure lo scarto tipo delle medie

$$s_{\mu} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

L'incertezza di misura, definita tramite il parametro s o il parametro s_{μ} prende il nome di incertezza tipo e si indica con i minuscolo. Nel caso di incertezza di tipo A, l'incertezza tipo i , da associare alla singola misurazione x_k risulta essere lo scarto tipo s , mentre l'incertezza tipo i da associare alla media aritmetica delle misure X_m risulta essere lo scarto tipo delle medie s_{μ} . In altri termini

$$i(x_k) = s$$

$$i(X_m) = s_{\mu}$$

Incetezza di tipo B

La stima dell'incertezza di tipo B deve essere determinata valutando tutte le informazioni che si possono ottenere in relazione alla variabilità dei risultati e, quindi, alla loro distribuzione probabilistica.

Tali informazioni possono includere precedenti dati di misura, dati di taratura degli strumenti, specifiche dei costruttori, dati di incertezza sui materiali utilizzati. In altri termini l'incertezza di tipo B non riguarda dati sperimentalmente acquisiti, bensì prevede la conoscenza a priori della distribuzione probabilistica associata ai risultati della misurazione.

Per quantificare l'incertezza di misura di tipo B si ricorre alla varianza della distribuzione

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx$$

o alla deviazione standard

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx}$$

Ove μ è la media per una certa distribuzione probabilistica, che viene ottenuta pesando ogni valore x con la corrispondenza e densità di probabilità $f(x)$.

Anche per l'incertezza di tipo B può procedersi con i ragionamenti già fatti con quella di tipo A e quindi l'incertezza di tipo i da associare alla singola misurazione x risulta essere la deviazione standard della distribuzione σ , mentre l'incertezza tipo i da associare alla media aritmetica delle misure X_m , nel caso di misure ripetute, risulta essere la deviazione standard della distribuzione delle medie

$$\sigma_{\mu} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

In altri termini

$$i(x) = \sigma$$

$$i(X_m) = \sigma_{\mu}$$

Incetezza composta

Occorre inoltre introdurre il concetto di incertezza composta, in quanto, in molti casi, le incertezze di misura, ottenute sui singoli componenti di un sistema complesso vanno combinate tra loro per determinare l'incertezza complessiva che grava sulla misurazione. Se il risultato della misurazione y è ottenuto dall'elaborazione di più risultati di misure indipendenti tra loro (x_k), cioè

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k \dots x_n)$$

l'incertezza che grava sulla stima del misurando finale e cioè l'incertezza composta è legata alle incertezze che gravano sulle singole misure x_i mediante la relazione:

$$i(y) = \sqrt{\sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_k} \right)^2 i(x_k)^2}$$

Dove $i(x_k)$ sono le incertezze di tipo A o B che gravano sulle diverse quantità x_k .

Nella tabella di seguito riportate sono illustrate le espressioni dell'incertezza tipo composta per alcuni casi particolari.

Funzione	Incertezza Composta Assoluta
$y = A + B$	$i(y) = \sqrt{i(A)^2 + i(B)^2}$
$y = A - B$	$i(y) = \sqrt{i(A)^2 + i(B)^2}$
$y = k \cdot A$	$i(y) = k \cdot i(A)$
$y = A \cdot B$	$i(y) = \sqrt{B^2 i(A)^2 + A^2 i(B)^2}$
$y = \frac{A}{B}$	$i(y) = \sqrt{\frac{1}{B^2} i(A)^2 + \frac{A^2}{B^4} i(B)^2}$
$y = A^n$	$i(y) = n \cdot A^{n-1} \cdot i(A)$
$y = A + B + C$	$i(y) = \sqrt{i(A)^2 + i(B)^2 + i(C)^2}$

Incetenza estesa

L'incetenza estesa $I(y)$ riportato in un certificato o in un rapporto viene ottenuta moltiplicando l'incetenza tipo composta $i(y)$ per un opportuno fattore di copertura k , per cui

$$I(y) = k \cdot i(y)$$

In tal modo l'incetenza definisce un intervallo dentro il quale si possa ritenere compreso con probabilità elevata il “valore vero” del misurando. Tale probabilità viene definita come livello di confidenza.

Di norma si prendono quali riferimento tre livelli di confidenza (68,3% - 95% - 99,7%) che rappresentano la probabilità che la nostra misura sia compatibile con qualsiasi altra misura dello stesso parametro associata ad un certo rischio di errore.

A livello di confidenza 68% viene associato un fattore di copertura uguale ad uno, mentre ai livelli di confidenza del 95% e del 99% vengono associati rispettivamente i fattori di copertura $k = 2$ e $k = 3$.

In campo internazionale è stato deciso di adottare, se non diversamente indicato il fattore di copertura $k = 2$.

Se, come accade di solito, la distribuzione si può considerare Gaussiana, ciò associa i limiti dell'incertezza estesa ad un livello di confidenza approssimativamente uguale al 95%.

1.4 Catena di misura

Si definisce catena di misura l'insieme di strumenti collegati, tra loro mediante i quali un parametro viene acquisito ed elaborato dall'ingresso all'uscita, sino ad ottenere il valore di lettura.

Pertanto una generica catena di misura è individuata dai seguenti elementi:

- **un sensore**, cioè un elemento in grado di prelevare l'informazione dal sistema da misurare;
- **un sistema di trasmissione**, che ha la funzione di trasdurre l'informazione;
- **un sistema di conversione**, in grado di convertire la grandezza misurata in un'altra, di norma di tipo elettrico;
- **un sistema di elaborazione**, in grado di elaborare il segnale rendendolo facilmente interpretabile;
- **un sistema di memorizzazione**, ove tutti i dati raccolti ed elaborati vengono archiviati e memorizzati;
- **un sistema di presentazione**, in grado di offrire uscite facilmente percepibili dall'operatore.

1.5 Misure statiche e misure dinamiche

Allorquando il misurando resta costante nel tempo, lasciando quindi al sistema tutto il tempo necessario per assumere una posizione di equilibrio, la misura si chiama **statica**.

Se invece il misurando varia abbastanza rapidamente nel tempo occorre valutare, istante per istante, la risposta dinamica dello strumento ossia il rapporto

$$\frac{U(t)}{\overline{E(t)}},$$

cioè il rapporto tra i valori della misura $U(t)$ e quelli del misurando $E(t)$.

Il modello più comunemente impiegato per la risposta dinamica degli strumenti di misura è quello delle equazioni differenziali, ordinarie, lineari a coefficienti costanti.

In generale detto $U(t)$ il segnale di uscita e $E(t)$ il segnale di ingresso, la relazione tra tali valori è spesso rappresentabile, in maniera sufficientemente rigorosa, mediante un'equazione lineare di ordine n , a coefficienti costanti del tipo

$$(1) \quad a_n \frac{d^2 U}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} U}{dt^{n-1}} + a_{n-2} \frac{d^{n-2} U}{dt^{n-2}} + \dots + a_0 U =$$

$$= b_m \frac{d^m E}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} E}{dt^{m-1}} + \dots + b_{0E}$$

ove: $\frac{E_0}{U_0} = \frac{a_0}{b_0}$, per cui la (1) può ascriversi assumendo $u = \frac{U}{U_0}$ ed $e = \frac{E}{E_0}$ le

risposte di entrata e uscita “normalizzate” la (1) diventa:

$$a'_n \frac{d^2 u}{dt^n} + a'_{n-1} \frac{d^{n-1} u}{dt^{n-1}} + \dots + u = b'_m \frac{d^m e}{dt^m} + b'_{m-1} \frac{d^{m-1} e}{dt^{m-1}} + \dots + e$$

Un sistema che è caratterizzato dalle equazioni (1) e (2) si dice “sistema lineare”, in quanto U e le sue derivate vi compaiono combinate linearmente.

In tale tipo di sistema è possibile calcolare la risposta alla somma delle sollecitazioni in entrata, come somma delle risposte in uscita e cioè in virtù dell'applicabilità del principio di sovrapposizione degli effetti.

1.6 Misure e collaudi dimensionali

Spesso nell'ambito dei collaudi, soprattutto dimensionali, delle produzioni in serie, occorre procedere all'estrazione dall'insieme degli oggetti prodotti, nominato **universo statistico**, un numero rappresentativo di oggetti, chiamato **campione statistico**, da analizzare con metodi statistici.

E' per questo motivo che occorre aver assimilato alcuni concetti dell'analisi statistica, prima di procedere alla valutazione parametri misurati.

In altri termini occorre associare al campione statistico un valore medio e una varianza, o uno scarto quadratico medio per valutare la dispersione dei dati misurati, per poi utilizzare tali informazioni al fine di avere indicazioni sull'universo statistico degli oggetti prodotti.

Per analizzare il campione, si possono usare le seguenti formule statistiche, in parte già richiamate nel precedente capitolo 1.3.

- **Valore medio** m o media aritmetica è definito dalla seguente relazione:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x}$$

Ove: x_i è il valore della misura i -ma

n è il numero dei valori

- **Scarto o deviazione** d_i che è la differenza tra ogni misura x_i e la media \bar{x} della serie di misure

$$d_i = (x_i - \bar{x})$$

- **Varianza** ν è la stima della dispersione dei valori osservati x_i intorno alla loro media ed è data dalla relazione

$$\nu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

- **scarto quadratico medio** o deviazione standard, che è la radice quadrata della varianza e rappresenta un criterio di valutazione della dispersione dei valori intorno al valore medio

$$\sigma = \sqrt{v} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

E' interessante notare:

- che la media degli scarti $\frac{1}{n} \sum d_i$ è sempre nulla;
- che la deviazione standard σ è sempre positiva ed ha le stesse dimensioni di x_i

Tutto ciò premesso, è importante sottolineare che, a causa di vari motivi (errori di lettura, errori procedurali, ecc.) possono comparire, all'interno del campione statistico dati poco attendibili, che dovrebbero essere scartati prima di calcolare media e varianza.

Poiché lo scarto di tali dati atipici non può essere affrontato con criteri soggettivi, occorre utilizzare un criterio che fornisca un giudizio oggettivo sull'accettabilità dei campioni.

Per tale esigenza, come già visto, ci viene in soccorso il criterio di Chauvenet, che dà la possibilità di formulare un giudizio di accettabilità dei dati acquisiti.

Tale criterio si fonda sull'ipotesi che la distribuzione sia gaussiana e quindi, affinché sia applicabile, occorre verificare che la distribuzione delle frequenze dei valori del campione sia di tipo gaussiano.

Per tale verifica occorre applicare il test del χ^2 o di Pearson, che pone a confronto le frequenze assolute osservate f_{oj} e quelle attese f_{aj} nell'ambito delle classi di appartenenza in cui è suddivisa la distribuzione dei dati.

In termini esemplificativi, ottenuti i dati x_i del campione essi vengono suddivisi in m classi.

Detto:

a il minimo degli x_i

b il massimo degli x_i

Δx_j l'intervallo della classe j -ma

Si avrà che

$$\Delta x_j = \frac{b_j - a_j}{k}$$

E se le classi sono di ampiezza costante, sarà

$$\Delta x = \Delta x_j$$

Inoltre ogni classe sarà caratterizzata dal valore centrale V_j pari alla media fra il valore massimo e minimo

$$V_j = \frac{1}{2}(a_j + b_j)$$

Va precisato che il numero di classi può essere definito in modo arbitrario e se esso è molto elevato Δx tende a diventare sempre più piccolo.

Ogni classe quindi sarà caratterizzata da:

- una base Δx_j
- un'altezza $y_j = \frac{v_j}{n} \cdot \frac{1}{\Delta x_j}$

ove:

v_j = è il numero di volte in cui si sono misurati valori compresi nell'intervallo j -mo;

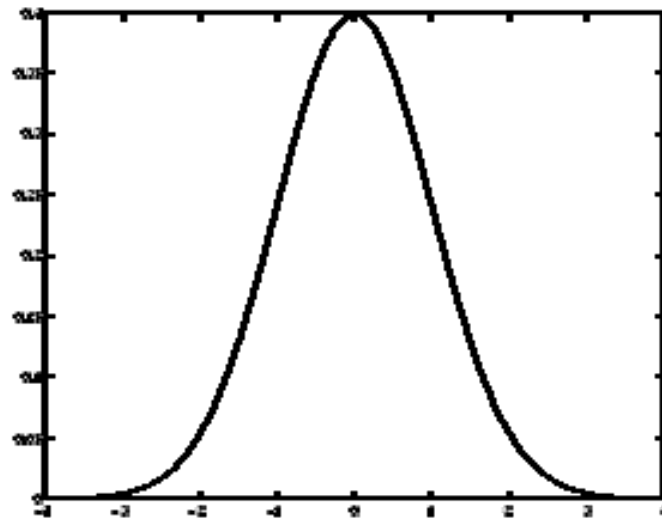
n = è il numero totale di misure eseguite

il prodotto $y_j \cdot \Delta x_j$ è proprio la frequenza con cui si sono registrati i valori nella classe j -ma.

Se si effettua la distribuzione dei risultati in m classi si può vedere come l'istogramma, per $m \rightarrow \infty$ e quindi per $\Delta x \rightarrow 0$, tende alla curva gaussiana con espressione

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right]$$

di seguito rappresentata



Tale curva rappresenta una curva di distribuzione dei dati di misurazione di una medesima grandezza allorquando la dispersione dei dati attorno alla media è dovuta a molte cause.

Dalle precedenti definizioni si ricava che la frequenza f è

$$f = y_j \cdot \Delta_j = \frac{\nu_j}{n}$$

cioè è il rapporto tra il numero di volte ν_j in cui l'evento si è verificato e il numero totale di prove eseguite.

Essa è ovviamente una stima sperimentale effettuata a posteriori e non va confusa con la probabilità di accadimento di un evento, che è una valutazione aprioristica data dal rapporto tra numero di eventi favorevoli e numero di eventi possibili.

Poiché la distribuzione dei valori misurati può essere approssimata, in caso di errori casuali, a una curva rappresentativa della funzione di Gauss, che, come si sa, è

univocamente determinata se si conoscono la media \bar{x} e il valore $\bar{\sigma}$ dello scarto quadratico medio.

Pertanto quando la distribuzione dei risultati di una serie di misure è normale, la conoscenza della media dello scarto quadratico medio è sufficiente a descrivere l'intera distribuzione.

Per meglio chiarire quanto esposto ci proponiamo di effettuare **un collaudo dimensionale** di un lotto di 110 oggetti prodotti da una linea di produzione.

Il problema è quindi quello di risalire dal numero limitato delle misure (110) alle caratteristiche dell'intero universo statistico.

Abbiamo visto che se la distribuzione dei risultati è influenzata solo da errori casuali, la distribuzione dell'insieme di misure è normale con valore medio \bar{x} e scarto quadratico medio σ .

In tabella sono riportati i valori numerici dei dati misurati del campione.

N° campione	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	10,208	10,221	10,204	10,201	10,202	10,199	10,209	10,192	10,217	10,202	10,208
2	10,195	10,200	10,188	10,170	10,224	10,180	10,194	10,190	10,194	10,217	10,188
3	10,214	10,227	10,220	10,199	10,212	10,204	10,186	10,205	10,236	10,227	10,210
4	10,202	10,240	10,208	10,190	10,174	10,237	10,218	10,193	10,207	10,200	10,214
5	10,235	10,204	10,241	10,196	10,220	10,214	10,229	10,230	10,246	10,187	10,187
6	10,177	10,176	10,226	10,186	10,197	10,194	10,207	10,185	10,195	10,186	10,167
7	10,205	10,212	10,245	10,216	10,208	10,222	10,214	10,216	10,231	10,207	10,196
8	10,188	10,230	10,192	10,226	10,184	10,210	10,181	10,196	10,227	10,173	10,214
9	10,218	10,210	10,197	10,210	10,195	10,220	10,216	10,202	10,198	10,167	10,199
10	10,198	10,192	10,212	10,207	10,205	10,218	10,208	10,220	10,203	10,210	10,236
Σx	102,040	102,112	102,133	102,001	102,021	102,098	102,062	102,029	102,154	101,976	102,019
$\Sigma x/10$	10,204	10,211	10,213	10,200	10,202	10,210	10,206	10,203	10,215	10,198	10,202
Σx^2	10412,162	10426,861	10431,150	10404,204	10408,284	10424,002	10416,652	10409,917	10435,440	10399,105	10407,876

In essa compaiono i valori dei due parametri (\bar{x} e σ) per ogni gruppo di 10 misure, nonché i valori relativi a tutti e 110 dati.

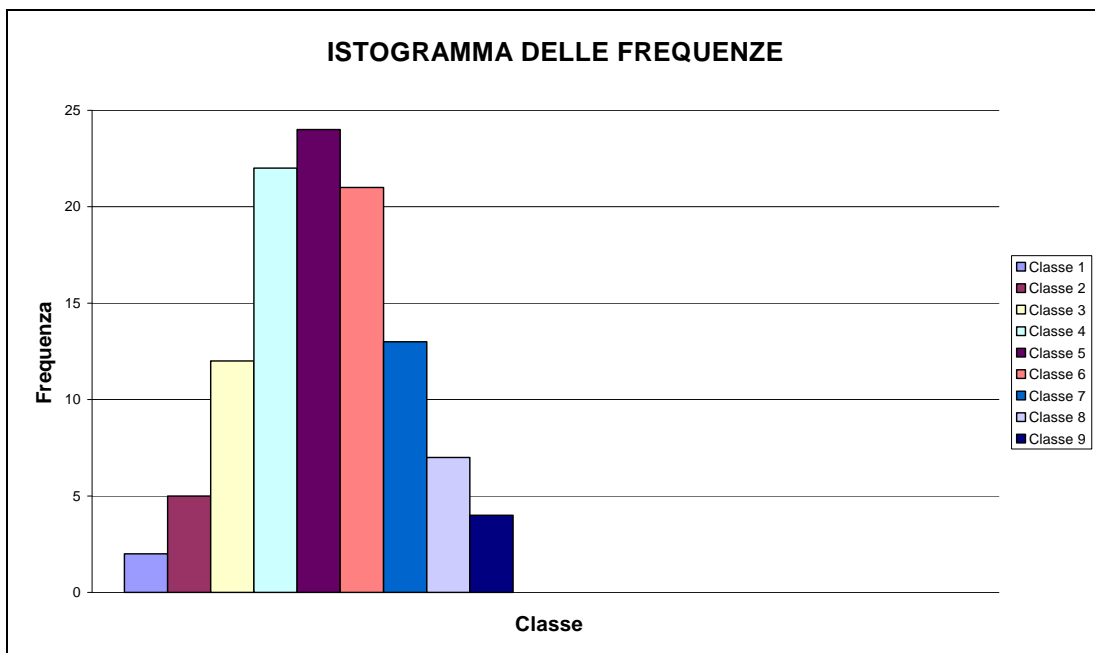
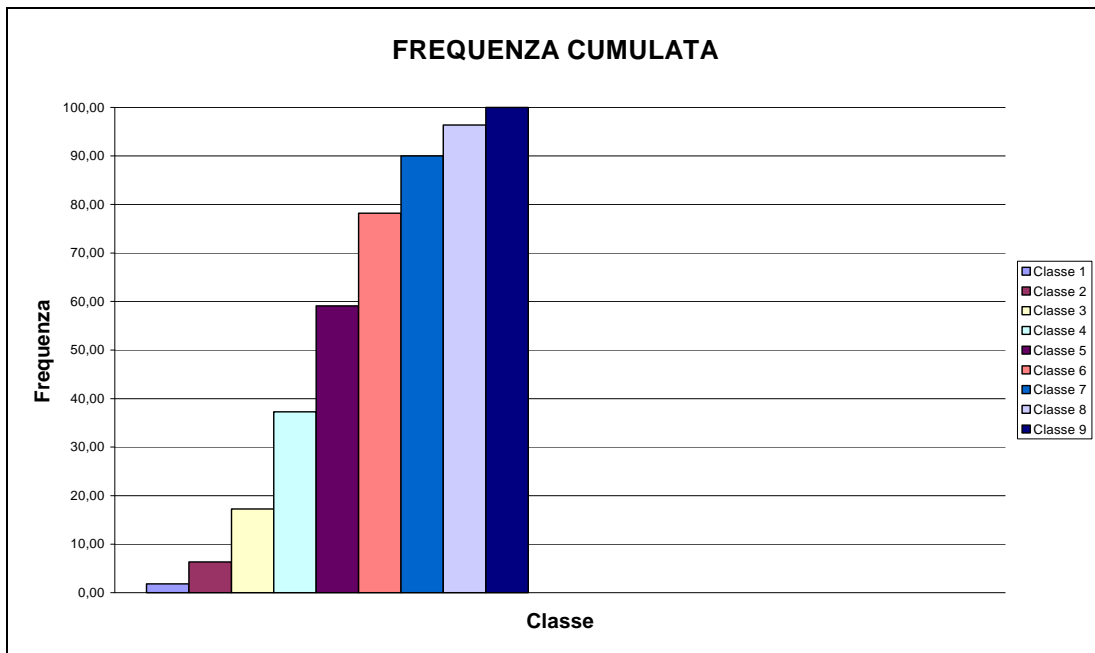
Per controllare se la distribuzione dei dati può essere considerata gaussiana, la suddividiamo in 7 classi di appartenenza avente ognuna la stessa ampiezza Δx_j .

Ad ogni classe assoceremo:

- il valore centrale ν_j
- la frequenza assoluta osservata f_{oa} (numero di elementi che vi appartengono)
- la frequenza osservata percentuale $f_{op}(\%) = 100 \cdot \frac{f_{oj}}{n}$
- la densità di frequenza osservata $d_j = \frac{f_{op}}{b_j - a_j}$

e otterremo la seguente tabella.

Classi	Limiti delle classi		Valore centrale della classe	Frequenza assoluta	Frequenza percentuale	Densità di frequenza	Frequenza cumulata percentuale
progressivo	> di [mm]	< di [mm]	x_i [mm]	f_j	$f_p = \frac{f_j}{n} \cdot 100$	$\frac{f_p}{\Delta x}$	$\sum_{k=1}^i \frac{f_k}{n} 100$ (%)
1	10,160	10,170	10,165	2	1,82	0,18	1,82
2	10,170	10,180	10,175	5	4,55	0,45	6,36
3	10,180	10,190	10,185	12	10,91	1,09	17,27
4	10,190	10,200	10,195	22	20,00	2,00	37,27
5	10,200	10,210	10,205	24	21,82	2,18	59,09
6	10,210	10,220	10,215	21	19,09	1,91	78,18
7	10,220	10,230	10,225	13	11,82	1,18	90,00
8	10,230	10,240	10,235	7	6,36	0,64	96,36
9	10,240	10,250	10,245	4	3,64	0,36	100,00



Occorre poi calcolare, per ogni gruppo di valori le frequenze attese per ogni singola classe nell'ipotesi di una particolare distribuzione, generalmente gaussiana, con il seguente procedimento:

- a) per ogni classe j si calcolano gli scarti ridotti dei limiti inferiori e superiori z_{min} e z_{max} mediante le formule:

$$z_{j \min} = \frac{(x_{j \min} - x_{medio})}{s} \quad z_{j \max} = \frac{(x_{j \max} - x_{medio})}{s}$$

ove s è la deviazione standard

- b) dalla distribuzione gaussiana si calcola la frequenza percentuale attesa fa_j per classe j utilizzando le seguenti tabelle:

$$of(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}$$

z	0,0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,39894	0,39802	0,39886	0,39876	0,39862	0,39844	0,39822	0,39797	0,39767	0,39783
0,1	0,39695	0,39654	0,39608	0,39559	0,39808	0,39448	0,39387	0,39322	0,39253	0,39181
0,2	0,39104	0,39024	0,38940	0,38853	0,38762	0,38667	0,38568	0,38466	0,38361	0,38251
0,3	0,38189	0,38028	0,37903	0,37780	0,37654	0,37824	0,37591	0,37155	0,37115	0,36973
0,4	0,34827	0,36678	0,36526	0,36371	0,36243	0,36063	0,35889	0,35723	0,25553	0,35881
0,5	0,35207	0,35029	0,34849	0,34667	0,34482	0,34294	0,34105	0,33912	0,33710	0,33521
0,6	0,33322	0,33121	0,32918	0,32713	0,32506	0,32297	0,32086	0,31874	0,31659	0,31443
0,7	0,31225	0,31006	0,30785	0,30563	0,30339	0,30114	0,29887	0,29659	0,29431	0,28200
0,8	0,28969	0,28737	0,28504	0,28269	0,28034	0,27799	0,27562	0,27624	0,27086	0,26848
0,9	0,26609	0,26369	0,26129	0,25888	0,25647	0,25406	0,25164	0,24923	0,24681	0,24439
1,0	0,24197	0,23955	0,23713	0,23471	0,23230	0,22988	0,22747	0,22506	0,22265	0,22025
1,1	0,21785	0,21546	0,21307	0,21069	0,20831	0,20594	0,20357	0,20121	0,19886	0,19652
1,2	0,19419	0,19186	0,18954	0,18724	0,18494	0,18265	0,18037	0,17810	0,17585	0,17360
1,3	0,17137	0,16915	0,16694	0,16474	0,16256	0,16033	0,15823	0,15603	0,15395	0,15183
1,4	0,14973	0,14764	0,14556	0,14350	0,14146	0,13943	0,13742	0,13542	0,13344	0,13147
1,5	0,12952	0,12753	0,12566	0,12376	0,12188	0,12001	0,11816	0,11632	0,11451	0,11270
1,6	0,11092	0,10916	0,10741	0,10548	0,10396	0,10227	0,10059	0,09893	0,09728	0,09566
1,7	0,09405	0,09246	0,09089	0,08933	0,08780	0,08628	0,08478	0,08329	0,0818	0,08038
1,8	0,07895	0,07754	0,07614	0,07477	0,07341	0,07507	0,07074	0,06943	0,06814	0,06687
1,9	0,06562	0,06438	0,06316	0,06195	0,06077	0,05959	0,05844	0,05730	0,05618	0,05508
2,0	0,05399	0,05292	0,05186	0,05082	0,04980	0,04879	0,04780	0,04682	0,04586	0,04491
2,1	0,04398	0,04307	0,04217	0,04128	0,04041	0,03955	0,03871	0,03788	0,03706	0,03626
2,2	0,03547	0,03470	0,03394	0,03319	0,03246	0,03174	0,03103	0,03034	0,02965	0,02898
2,3	0,02833	0,01768	0,02705	0,02643	0,02585	0,02522	0,02463	0,02406	0,02349	0,02294
2,4	0,02239	0,02186	0,02134	0,02083	0,02033	0,01984	0,01936	0,01888	0,01842	0,01797
2,5	0,01753	0,01709	0,01667	0,01625	0,01585	0,01545	0,01506	0,01468	0,01430	0,01394
2,6	0,01358	0,01323	0,01289	0,01256	0,01223	0,01191	0,01160	0,01129	0,01100	0,01071
2,7	0,01042	0,01014	0,00987	0,00961	0,00935	0,00909	0,00885	0,00860	0,00837	0,00814
2,8	0,00791	0,00770	0,00748	0,00727	0,00707	0,00687	0,00668	0,00649	0,00631	0,00613
2,9	0,00595	0,00578	0,00562	0,00545	0,00530	0,00514	0,00499	0,00485	0,00470	0,00457
3,0	0,00443	0,00430	0,00417	0,00405	0,00393	0,00381	0,00369	0,00358	0,00314	0,00337
3,1	0,00327	0,00317	0,00307	0,00298	0,00288	0,00279	0,00271	0,00262	0,00254	0,00256
3,2	0,00238	0,00231	0,00224	0,00216	0,00210	0,00203	0,00196	0,00190	0,00186	0,00178
3,3	0,00172	0,00167	0,00161	0,00156	0,00151	0,00146	0,00141	0,00136	0,00132	0,00127
3,4	0,00123	0,00119	0,00115	0,00111	0,00107	0,00104	0,00100	0,00097	0,00094	0,00090
3,5	0,00087	0,00084	0,00081	0,00079	0,00076	0,00073	0,00071	0,00068	0,00066	0,00063
3,6	0,00061	0,00059	0,00057	0,00055	0,00053	0,00051	0,00049	0,00047	0,00046	0,00044
3,7	0,00042	0,00041	0,00039	0,00038	0,00037	0,00035	0,00034	0,00033	0,00031	0,00030
3,8	0,00029	0,00028	0,00027	0,00026	0,00025	0,00024	0,00023	0,00022	0,00021	0,00021
3,9	0,00020	0,00019	0,00018	0,00018	0,00017	0,00016	0,00016	0,00015	0,00014	0,00014
4,0	0,0001338									
4,5	0,0000160									
5,0	0,000001487									

$$F(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \int_{-\infty}^z \sigma f(z) dz$$

<i>z</i>	0,0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,50000	0,50399	0,50798	0,51197	0,50595	0,51994	0,52392	0,52790	0,53188	0,53584
0,1	0,53983	0,54380	0,54776	0,55171	0,55567	0,55962	0,56356	0,56750	0,57142	0,57535
0,2	0,57926	0,58317	0,58707	0,59005	0,59484	0,59871	0,60257	0,60642	0,61026	0,61409
0,3	0,61791	0,62172	0,62552	0,62950	0,63307	0,63683	0,64058	0,64431	0,64803	0,65173
0,4	0,65542	0,65910	0,66276	0,66640	0,67003	0,67365	0,67724	0,68082	0,68439	0,68794
0,5	0,69147	0,69498	0,69847	0,70195	0,70540	0,70884	0,71226	0,71566	0,71905	0,72241
0,6	0,72575	0,72907	0,73237	0,73566	0,73892	0,74216	0,74538	0,74858	0,75175	0,75491
0,7	0,75804	0,76115	0,76421	0,76731	0,77035	0,77338	0,77638	0,77935	0,78231	0,78524
0,8	0,78815	0,79403	0,79390	0,79674	0,79955	0,80234	0,80511	0,80786	0,81058	0,81307
0,9	0,81595	0,81889	0,82122	0,82382	0,82540	0,82805	0,83148	0,83398	0,83646	0,83892
1,0	0,84135	0,84376	0,84614	0,84850	0,85084	0,85315	0,85543	0,85770	0,85994	0,86216
1,1	0,86434	0,86651	0,86865	0,87077	0,87286	0,87494	0,87698	0,87901	0,88101	0,88298
1,2	0,88494	0,88687	0,88877	0,89066	0,89252	0,89436	0,89617	0,89797	0,89974	0,90148
1,3	0,90321	0,90491	0,90659	0,90815	0,90989	0,91150	0,91309	0,91466	0,91622	0,91774
1,4	0,91925	0,92074	0,92220	0,92365	0,92507	0,92648	0,92786	0,92923	0,93057	0,93190
1,5	0,93320	0,93449	0,93575	0,93700	0,93823	0,93944	0,94063	0,94180	0,94296	0,94409
1,6	0,94521	0,94631	0,94739	0,94846	0,94951	0,95054	0,95155	0,95255	0,95353	0,95450
1,7	0,95545	0,95638	0,95729	0,95820	0,95908	0,95995	0,96081	0,96165	0,96247	0,96328
1,8	0,96408	0,96486	0,96563	0,96639	0,96713	0,96786	0,96857	0,96927	0,96996	0,97063
1,9	0,97130	0,97195	0,97258	0,97321	0,97382	0,97440	0,97501	0,97559	0,97616	0,97672
2,0	0,97726	0,97780	0,97832	0,97883	0,97934	0,97983	0,98031	0,98079	0,98125	0,98170
2,1	0,98215	0,98258	0,98301	0,98343	0,98384	0,98424	0,98463	0,98501	0,98539	0,98576
2,2	0,98611	0,98646	0,98681	0,98714	0,98747	0,98779	0,98810	0,98841	0,98871	0,98900
2,3	0,98929	0,98957	0,98984	0,99011	0,99037	0,99063	0,99088	0,99112	0,99136	0,99159
2,4	0,99182	0,99204	0,99226	0,99247	0,99267	0,99287	0,99307	0,99326	0,99345	0,99363
2,5	0,99381	0,99398	0,99415	0,99431	0,99447	0,99463	0,99478	0,99493	0,99508	0,99522
2,6	0,99536	0,99549	0,99562	0,99575	0,99587	0,99599	0,99611	0,99623	0,99634	0,99645
2,7	0,99655	0,99665	0,99675	0,99685	0,99695	0,99704	0,99713	0,99722	0,99730	0,99738
2,8	0,99726	0,99754	0,99762	0,99769	0,99776	0,99783	0,99790	0,99797	0,99803	0,99809
2,9	0,99815	0,99821	0,99827	0,99832	0,99838	0,99843	0,99848	0,99853	0,99858	0,99863
3,0	0,99867	0,99871	0,99876	0,99880	0,99884	0,99888	0,99891	0,99895	0,99899	0,99902
3,1	0,99905	0,99909	0,99912	0,99915	0,99918	0,99920	0,99923	0,99926	0,99928	0,99931
3,2	0,99933	0,99936	0,99938	0,99940	0,99942	0,99944	0,99946	0,99948	0,99950	0,99952
3,3	0,99954	0,99955	0,99957	0,99959	0,99960	0,99962	0,99963	0,99965	0,99966	0,99967
3,4	0,99968	0,99970	0,99971	0,99972	0,99973	0,99974	0,99975	0,99976	0,99977	0,99978
3,5	0,99979	0,99980	0,99981	0,99981	0,99982	0,99983	0,99984	0,99984	0,99985	0,99986
4,0	0,9999683									
4,5	0,9999966									
5,0	0,9999997									

VALORI CARATTERISTICI

<i>F(z)</i>	0,75	0,90	0,95	0,975	0,99	0,995	0,999	0,9995	0,99995	0,999995
<i>a = 2(1 - F(z))</i>	0,50	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,002	0,001	0,0001	0,00001
<i>z</i>	0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,090	3,291	3,891	4,417

La prima tabella permette di calcolare il prodotto $\sigma \cdot f(z)$, invece che la funzione di densità f_z , in modo da rendere quest'ultima dimensionale.

La seconda tabella consente invece di valutare e calcolare la frequenza cumulata $F(z)$. Tale funzione rappresenta la probabilità di verificarsi di un valore z' compreso tra $-\infty$ e z .

Date le caratteristiche di simmetria della curva $\sigma \cdot f(z)$ risulta che

$$F(-z) = 1 - F(z)$$

Una volta calcolati gli scarti ridotti dei limiti inferiori e superiori della classe e cioè $z_{j \min}$ e $z_{j \max}$ dalla tabella relativa alla distribuzione gaussiana si determinano i valori $F(z_{j \max})$ ed $F(z_{j \min})$ se ne calcola la differenza che corrisponde alla frequenza percentuale attesa per la classe j , cioè $f_{apj} = f_{apj \max} - f_{apj \min}$.

La frequenza assoluta attesa per la j -ma classe sarà $faaj = f_{apj} \cdot n$

- c) per ogni classe si calcola poi il rapporto R_j

$$R_j = \frac{(faaj - faoj)^2}{faaj}$$

ove $faoj$ è la frequenza assoluta osservata nella classe j ;

- d) si calcola infine il valore del χ^2 con la formula

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k R_j$$

- e) si stabilisce un rischio di errore α generalmente inferiore al 10% e si calcolano le due probabilità

$$p_1 = 1 - \frac{\alpha}{2} \quad p_2 = \frac{\alpha}{2}$$

nonché il numero dei gradi di libertà

$$v = k - 3$$

- f) da alcune tabelle ricavabili dal sito

www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda3674.htm

è possibile ricavare in funzione dei tre parametri p_1 , p_2 e v si trova un intervallo dei valori compresi fra:

$$\chi^2(p_1, v), \chi^2(p_2, v)$$

A titolo esemplificativo si riporta la tabella ricavata dal sito prima citato:

v / p	0.999	0.99	0.975	0.95	0.90	0.10	0.05	0.025	0.01	0.001
1	10.828	6.635	5.024	3.841	2.706	0.016	0.004	0.001	0.000	0.000
2	13.816	9.210	7.378	5.991	4.605	0.211	0.103	0.051	0.020	0.002
3	16.266	11.345	9.348	7.815	6.251	0.584	0.352	0.216	0.115	0.024
4	18.467	13.277	11.143	9.488	7.779	1.064	0.711	0.484	0.297	0.091
5	20.515	15.086	12.833	11.070	9.236	1.610	1.145	.831	0.554	0.210
6	22.458	16.812	14.449	12.592	10.645	2.204	1.635	1.237	0.872	0.381
7	24.322	18.475	16.013	14.067	12.017	2.833	2.167	1.690	1.239	0.598
8	26.125	20.090	17.535	15.507	13.362	3.490	2.733	2.180	1.646	0.857
9	27.877	21.666	19.023	16.919	14.684	4.168	3.325	2.700	2.088	1.152
10	29.588	23.209	20.483	18.307	15.987	4.865	3.940	3.247	2.558	1.479
11	31.264	24.725	21.920	19.675	17.275	5.578	4.575	3.816	3.053	1.834
12	32.910	26.217	23.337	21.026	18.549	6.304	5.226	4.404	3.571	2.214
13	34.528	27.688	24.736	22.362	19.812	7.042	5.892	5.009	4.107	2.617
14	36.123	29.141	26.119	23.685	21.064	7.790	6.571	5.629	4.660	3.041
15	37.697	30.578	27.488	24.996	22.307	8.547	7.261	6.262	5.229	3.483
16	39.252	32.000	28.845	26.296	23.542	9.312	7.962	6.908	5.812	3.942
17	40.790	33.409	30.191	27.587	24.769	10.085	8.672	7.564	6.408	4.416
18	42.312	34.805	31.526	28.869	25.989	10.865	9.390	8.231	7.015	4.905
19	43.820	36.191	32.852	30.144	27.204	11.651	10.117	8.907	7.633	5.407
20	45.315	37.566	34.170	31.410	28.412	12.443	10.851	9.591	8.260	5.921
21	46.797	38.932	35.479	32.671	29.615	13.240	11.591	10.283	8.897	6.447
22	48.268	40.289	36.781	33.924	30.813	14.041	12.338	10.982	9.542	6.983
23	49.728	41.638	38.076	35.172	32.007	14.848	13.091	11.689	10.196	7.529
24	51.179	42.980	39.364	36.415	33.196	15.659	13.848	12.401	10.856	8.085
25	52.620	44.314	40.646	37.652	34.382	16.473	14.611	13.120	11.524	8.649
26	54.052	45.642	41.923	38.885	35.563	17.292	15.379	13.844	12.198	9.222
27	55.476	46.963	43.195	40.113	36.741	18.114	16.151	14.573	12.879	9.803
28	56.892	48.278	44.461	41.337	37.916	18.939	16.928	15.308	13.565	10.391
29	58.301	49.588	45.722	42.557	39.087	19.768	17.708	16.047	14.256	10.986
30	59.703	50.892	46.979	43.773	40.256	20.599	18.493	16.791	14.953	11.588
35	66.619	57.342	53.203	49.802	46.059	24.797	22.465	20.569	18.509	14.688
40	73.402	63.691	59.342	55.758	51.805	29.051	26.509	24.433	22.164	17.916
45	80.077	69.957	65.410	61.656	57.505	33.350	30.612	28.366	25.901	21.251
50	86.661	76.154	71.420	67.505	63.167	37.689	34.764	32.357	29.707	24.674
55	93.168	82.292	77.380	73.311	68.796	42.060	38.958	36.398	33.570	28.173
60	99.607	88.379	83.298	79.082	74.397	46.459	43.188	40.482	37.485	31.738
70	112.317	100.425	95.023	90.531	85.527	55.329	51.739	48.758	45.442	39.036
80	124.839	112.329	106.629	101.879	96.578	64.278	60.391	57.153	53.540	46.520
90	137.208	124.116	118.136	113.145	107.565	73.291	69.126	65.647	61.754	54.155
100	149.449	135.807	129.561	124.342	118.498	82.358	77.929	74.222	70.065	61.918

Eseguite le suddette operazioni è possibile effettuare il test chi-quadro o di Pearson, che serve per valutare quantitativamente appartengono ad un tipo di distribuzione.

Nel caso in esame, avendo adottato la distribuzione gaussiana si calcola il valore del χ^2 per la nostra serie di dati e si confronta tale valore con quello dei valori estremi dell'intervallo citato.

Se $\chi^2(p_1, \nu) \leq \chi^2 \leq \chi^2(p_2, \nu)$ è cioè se il valore calcolato rientra in questo intervallo, si può accertare che non ci sono ragioni statistiche per rifiutare il modello gaussiano adottato.

L'Allievo in riferimento ai dati sopra forniti, compirà un utile esercizio verificando, con il test chi-quadro se la distribuzione dei dati è gaussiana, avendo assunto un rischio di erro α pari al 10%.

1.7 Esercizi

1.7.1 Esercizio n. 1

La trazione T di un elica propulsiva di tipo aeronautico è espressa dalla formula $T = \tau \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4$ ove:

τ = coefficiente di trazione (numero puro)

ρ = densità dell'area

n = numero di giri al minuto

D = diametro dell'elica

Dimostrare mediante le equazioni dimensionali che il secondo membro dell'espressione ha le dimensioni di una forza.

Svolgimento

$$[\rho] = [M \cdot L^{-3} \cdot T^0]$$

$$[n^2] = [M^0 \cdot L^0 \cdot T^{-2}]$$

$$[D^4] = [M^0 \cdot L^4 \cdot T^{-2}]$$

$$[M \cdot L^{-3} \cdot T^0] [M^0 \cdot L^0 \cdot T^{-2}] [M^0 \cdot L^4 \cdot T^{-2}] = MLT^{-2} \quad \text{cvd}$$

1.7.2 Esercizio n. 2

La costante di tempo di un termometro vale $t = \frac{m \cdot c}{A \cdot \alpha}$ calcolare il valore numerico di tale costante espresso in secondi sapendo che:

A (area del bulbo sferico) diametro $d = 0,2$ in

$\alpha = 150$ W/in²K

$m = 2,00$ g

$c = 950$ J/kgK

Svolgimento

Occorre preliminarmente convertire le unità di misura in unità del sistema internazionale e si assume che i valori siano espressi con almeno tre cifre significative.

$$d = 0,2 \cdot 2,54 \cdot 10^{-2} = 5,08 \cdot 10^{-3} \text{ m D}$$

$$A = \pi d^2 = 8,107 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$m = 2,00 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$\alpha = \frac{150}{0,0254^2} = 2,33 \cdot 10^5 \text{ J/sm}^2\text{K}$$

$$t = \frac{2,00 \cdot 10^{-3} \text{ Kg} \cdot 950 \text{ j/kgK}}{2,33 \cdot 10^{-5} \text{ J/sm}^2\text{K} \cdot 8,107 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2} = 0,0101 \text{ s}$$

1.7.3 Esercizio n. 3

Si determini l'incertezza del risultato Y di una somma di dati indipendenti.

$$Y = X_1 + X_2 + X_3$$

Ove

$$X_1 = 9,10 \pm 0,05$$

$$X_2 = 5,30 \pm 0,04$$

$$X_3 = 11,20 \pm 0,10$$

Svolgimento

$$i_y = \sqrt{0,05^2 + 0,04^2 + 0,10^2} = 0,12$$

Risulta quindi

$$Y = 25,60 \pm 0,12$$

1.7.4 Esercizio n. 4

Dovendo effettuare la misura di una massa incognita mediante una bilancia elettronica, un osservatore effettua un certo numero di misure ripetute in modo tale da rendere evidenti le cause di incertezza che si vogliono stimare (es. collocando la massa in posizioni diverse, ripetendo le misure durante un periodo sufficientemente lungo da comprendere le variazioni di temperatura, ecc.)

I dati rilevati risultano essere quelli rappresentati in tabella

Tabella delle misure (g)

$$x(1) = 100.0568$$

$$x(14) = 99.96014$$

$$x(2) = 99.99646$$

$$x(15) = 99.92793$$

$$x(3) = 99.93649$$

$$x(16) = 99.93853$$

$x(4) = 99.99458$	$x(17) = 100.0021$
$x(5) = 100.0761$	$x(18) = 99.97930$
$x(6) = 99.99119$	$x(19) = 100.0216$
$x(7) = 99.98705$	$x(20) = 99.97158$
$x(8) = 99.99824$	$x(21) = 100.0437$
$x(9) = 100.0437$	$x(22) = 99.96122$
$x(10) = 99.98410$	$x(23) = 99.99166$
$x(11) = 100.0140$	$x(24) = 99.95460$
$x(12) = 100.0120$	$x(25) = 100.0684$
$x(13) = 99.96027$	

Svolgimento

La migliore stima della massa incognita viene fornita dalla media delle 25 misurazioni:

$$\bar{X} = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} x(i) = 99.995 \text{ g}$$

La stima dell'incertezza di tipo A può essere semplicemente ricavata sulla base della stima dello scarto tipo del campione (confidenza al 95%)

$$s = \sqrt{\frac{1}{24} \sum_{i=1}^{25} (x(i) - \bar{X})^2} = 0.040 \text{ g} \quad \longrightarrow \quad U = 2 \frac{s}{\sqrt{25}} = 0.016 \text{ g}$$

1.7.5 Esercizio n. 5

Si stimi l'incertezza di tipo B correlata ad una misura effettuata con un'unica pesata della massa incognita mediante una bilancia elettronica con una portata pari a 120 g e con i seguenti dati:

- Fonte di incertezza: Incertezza tipo
- Grandezza di riferimento 0.05 mg
- Stabilità (3 mesi) 0.1 mg
- Eccentricità 0.3 mg
- Influenza della temperatura (a 20 ± 5 °C) 0.4 mg
- Linearità 0.2 mg
- Ripetibilità 0.1 mg
- Risoluzione 0.1 mg

Svolgimento

$$u_c = \sum_{i=1}^n u_B(i)^2 = 0.568 \text{ g} \quad \longrightarrow \quad U = 2 \cdot u_c = 1,136 \text{ g}$$

1.7.6 Esercizio n. 6

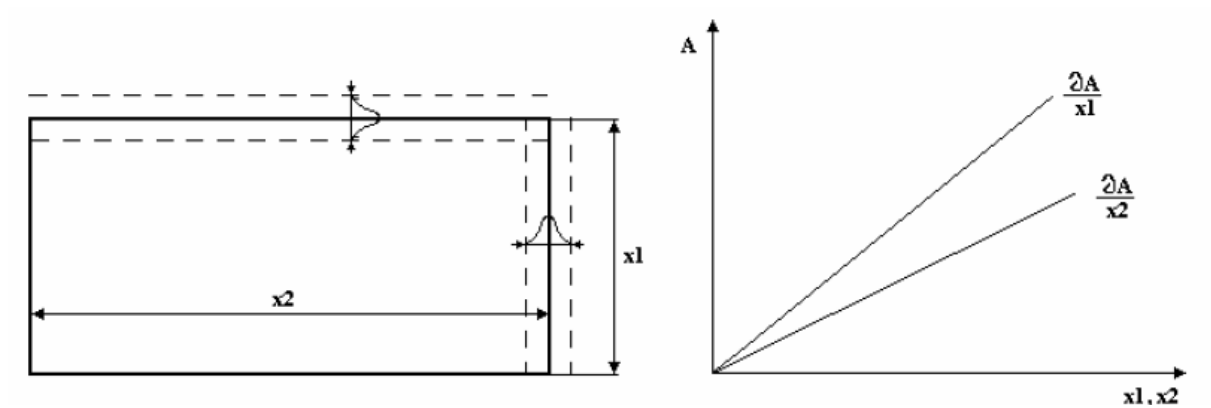
Si determini l'incertezza associata alla misura dell'area A di una piastra avente superficie rettangolare di dimensioni x_1 e x_2 tali che

$$x_1 = 1,5 \pm 0,02 \text{ m.}$$

$$x_2 = 1,0 \pm 0,04 \text{ m.}$$

Svolgimento

In riferimento al quesito, può considerarsi la seguente figura:



la superficie è il prodotto delle misure delle due dimensioni x_1 ed x_2 :

$$A = x \cdot x_2$$

l'incertezza associata alla determinazione dell'area A , sarà, dunque, funzione delle incertezze associate alle misure di x_1 ed x_2 , secondo la relazione:

$$u_C^2(A) = \left(\frac{\partial A}{\partial X_1} \right)^2 u_C^2(X_1) + \left(\frac{\partial A}{\partial X_2} \right)^2 u_C^2(X_2)$$

1) coefficienti di sensibilità sono pari a:

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} = x_2 \quad \frac{\partial f}{\partial x_2} = x_1$$

2) incertezze (tipo A) delle due dimensioni

$$x_1 = 1,5 \pm 0,02 \text{ m.}$$

$$x_2 = 1,0 \pm 0,04 \text{ m.}$$

3) propagando le due incertezze

$$u_c^2(A) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 u_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 u_2^2$$

4) l'incertezza tipo composta sarà:

$$u_c(A) = \sqrt{(1.0)^2 0.02^2 + (1.5)^2 (0.04)^2} = \pm 0.06 \text{ m}$$

5) la superficie incognita risulterà:

$$A = (1,5 \pm 0,06) \text{ m}^2$$

1.7.7 Esercizio n. 7

Dovendo misurare la durata di un evento previsto in $900 \pm 40 \text{ s}$, si hanno a disposizione due cronografi così caratterizzati:

- Cronografo A con risoluzione di $1/100 \text{ s}$ e con un ritardo costante di $0,12 \pm 0,02$ (95%) ore/giorno;
- Cronografo B con risoluzione di $2/10 \text{ s}$ e con un anticipo costante di $0,725 \pm 0,001$ (95%) ore/giorno.

Si proceda a scegliere il cronografo più idoneo alla misura, supponendo trascurabile l'incertezza di modello.

Svolgimento

Si passa a valutare, con idonee unità di misura le risoluzioni, l'anticipo ed il ritardo dei cronografi le cui caratteristiche sono quindi:

Cronografo A

risoluzione $\pm 0,005s$ (essendo la distribuzione di tipo rettangolare)

$$\text{ritardo} = \frac{0,12 \cdot 3600}{86400} \pm \frac{0,02 \cdot 3600}{86400} = 0,005 \pm 0,0008s/s$$

Cronografo B

Analogamente per il cronografo B

risoluzione $\pm 0,1s$ (essendo la distribuzione di tipo rettangolare)

$$\text{anticipo} = 0,03021 \pm 0,00004s/s$$

Considerando il caso peggiore e cioè la durata più lunga dell'evento pari a 940s, avremo per i due cronografi:

$$\text{A) risoluzione} = \pm 0,005s; \text{ritardo} = 4,7 \pm 0,8s$$

$$\text{B) risoluzione} = \pm 0,1s; \text{anticipo} = 28,40 \pm 0,04s$$

L'incertezza sarà quindi

$$i_p = \sqrt{i_o^2 + i_c^2}$$

dove i_o è l'incertezza di risoluzione ed i_c è l'incertezza strumentale. In relazione ai due cronografi avremo:

Cronografo A

$$i_p = \pm \sqrt{0,005^2 + 0,8^2} = \pm 0,8s(95\%)$$

Cronografo B

$$i_p = \pm \sqrt{0,1^2 + 0,04^2} = \pm 0,1s(95\%)$$

Confrontando tali valori, si deduce che il cronografo B è lo strumento più idoneo. L'Allievo eseguirà un utile esercizio anche nel caso in cui l'evento abbia

durata minore e cioè pari a 860s. Constaterà che nel campo di durata prevista per l'evento il cronografo B è sempre più idoneo.

Diverso è il discorso se considererà una durata dell'evento di soli 5 secondi. In tal caso constaterà che è il cronografo A ad essere più idoneo.

1.7.8 Esercizio n. 8

La frequenza fondamentale di oscillazione ν_{01} di una membrana circolare uniformemente tesa è data dalla relazione

$$\nu_{01} = \frac{2.40}{\pi D} \sqrt{\frac{T}{M}}$$

Siano

$$D = 23.64 \text{ in} \qquad T = 19.2 \text{ lbf/ft} \qquad M = 2,138 \cdot 10^{-4} \text{ lb/in}^2$$

Determinare il valore di ν_{01} nel SI.

Soluzione

Nel Sistema Internazionale la frequenza ha per unità $s^{-1} = \text{Hz}$. Per determinare il valore di ν_{01} i dati vanno evidentemente espressi in unità SI e per far ciò conviene per prima cosa scrivere i fattori di conversione tra le varie unità. Essi sono:

$$1 \text{ lb} = 0.453 \text{ kg}$$

$$1 \text{ lbf} = 4.448 \text{ N}$$

$$1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$$

$$1 \text{ in} = 0.0254 \text{ m}$$

Da questi seguono i valori dei dati nel SI (tenendo nei calcoli intermedi una cifra significativa in più)

$$D = 23.64 \text{ in} \times 0.0254 \text{ m/in} = 0.6004 \text{ m}$$

$$T = 19.2 \frac{\text{lbf}}{\text{ft}} \times \frac{4.448 \text{ N/lbf}}{0.3048 \text{ ft/m}} = 280.2 \text{ N/m}$$

$$M = 2.138 \cdot 10^{-4} \frac{lb}{in^2} \times \frac{0.453lb/kg}{0.254^2 m^2/in^2} = 0.1501kg/m^2$$

Non resta che sostituire i valori calcolati nella formula. Si ottiene

$$\nu_{01} = \frac{2.40}{\pi 0.6004} \sqrt{\frac{280.2}{0.1501}} = 55.0Hz$$

1.7.9 Esercizio n. 9

Nella tabella sottostante sono riportati i valori numerici di 100 dati dimensionali misurati del campione

	1-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	81-90	91-100
1	7.477	7.311	7.314	7.496	7.137	7.023	7.281	7.329	7.235	7.551
2	7.335	7.189	7.325	7.314	7.552	7.238	7.490	7.322	7.206	7.062
3	7.042	7.129	7.254	7.314	7.315	7.098	7.353	7.417	7.467	7.117
4	7.224	7.215	7.228	7.056	7.200	7.394	7.086	7.434	7.256	7.322
5	7.439	7.050	7.263	7.315	7.307	7.396	7.434	7.272	7.256	7.077
6	7.305	7.290	7.296	7.339	7.208	7.298	7.137	7.310	7.379	7.216
7	7.162	7.317	7.050	7.235	7.301	7.351	7.280	7.479	7.197	7.404
8	7.335	7.478	7.384	7.255	7.328	7.450	7.338	7.282	7.263	7.250
9	7.335	7.384	7.200	7.167	7.551	7.197	7.402	7.253	7.286	7.099
10	6.911	7.159	7.139	7.367	7.437	7.368	7.392	7.433	7.150	7.133
Media	7.2565	7.2522	7.2453	7.2858	7.3336	7.3193	7.2813	7.3531	7.2695	7.2231
Scarto q.	0.17579	0.12805	0.09722	0.11856	0.14145	0.12762	0.13995	0.08022	0.09216	0.16086
Valore medio: $m = 7.2820$; scarto quadratico: $s = 0.12964$										

Si desidera mediante il test chi-quadro accertare se la distribuzione è gaussiana. Attraverso un foglio excel si porta una tabella in cui i predetti valori sono stati raggruppati in sette classi. In tale tabella nella prima colonna sono riportati i limiti dimensionali delle classi, nella seconda colonna il valore centrale della classe, nella terza colonna la frequenza osservata assoluta, nella quarta la frequenza osservata percentuale, nella quinta la densità di frequenza osservata e nella sesta colonna la frequenza cumulata osservata percentuale. Per tali grandezze in fondo alla tabella sono riportate le formule di calcolo.

Limiti delle classi (k=7)		Valore Centrale	Frequenza Osservata Assoluta	Frequenza Osservata Percentuale	Densità di frequenza osservata	Frequenza Cumulata Osservata Percentuale
x_{\min} [mm]	x_{\max} [mm]	x [mm]	foa	fop [%]	D [%mm]	fcop [%]
6,9	6,9999	6,95	1	1	10	1
7,0	7,0999	7,05	10	10	100	11
7,1	7,1999	7,15	13	13	130	24
7,2	7,2999	7,25	27	27	270	51
7,3	7,3999	7,35	31	31	310	82
7,4	7,4999	7,45	15	15	150	97
7,5	7,5999	7,55	3	3	30	100

- 1) Valore Centrale x [mm] = $(X_{\max} + X_{\min}) / 2$
- 2) Frequenza Osservata Percentuale [%] = $foa * 100 / n$ con n pari al numero dei valori del campione
- 3) Densità di frequenza D [%mm] = $foa / (X_{\max} - X_{\min})$
- 4) Frequenza Cumulata Osservata Percentuale $fcop$ [%] = $\sum foa * 100 / n$

Sempre con foglio excel si riportano i valori calcolati degli scarti ridotti delle frequenze cumulate, delle frequenze percentuali attese, delle frequenze percentuali osservate, della frequenza assoluta attesa e della frequenza assoluta osservata, nonché la frequenza accumulata osservata percentuale.

Nell'ultima colonna, per ogni classe, è riportato il chi-quadro parziale ed in fondo alla colonna stessa il chi-quadro totale, somma dei chi-quadro parziali.

Alla base della tabella sono riportate le formule utilizzate e le tabelle di riferimento.

Classe	Valori Limite inf. di classe	Valori Limite sup. di classe	Scarto ridotto limite inf.	Scarto ridotto limite sup.	Frequenza Cumulata limite inf.	Frequenza Cumulata limite sup.	Frequenza Percentuale Attesa	Frequenza Percentuale Osservata	Frequenza Assoluta Attesa	Frequenza Assoluta Osservata	Frequenza Cumulata Osservata Percentuale	Chi - quadro parziale
	x_{\min} [mm]	x_{\max} [mm]	z_{\min} [mm]	z_{\max} [mm]	$F(z_{\min})$ [%]	$F(z_{\max})$ [%]	fap [%]	fop [%]	faa	foa	fcop [%]	
1	- infinito	6,9999	- infinito	-2,1759	0	1,478	1,478	1	1,478	1	1	0,2285
2	7,0	7,0999	-2,1759	-1,4043	1,478	8,011	6,533	10	6,533	10	11	1,2020
3	7,1	7,1999	-1,4043	-0,6327	8,011	26,346	18,335	13	18,335	13	24	2,1894
4	7,2	7,2999	-0,6327	0,1389	26,346	55,523	29,177	27	29,177	27	51	0,1755
5	7,3	7,3999	0,1389	0,9105	55,523	81,872	26,349	31	26,349	31	82	0,6978
6	7,4	7,4999	0,9105	1,6821	81,872	95,373	13,501	15	13,501	15	97	0,1498
7	7,5	+ infinito	1,6821	+ infinito	95,373	100	4,627	3	4,627	3	100	0,8824
Chi - Quadro totale												5,5254

- 1) z_{\min} [mm] = $(X_{\min} - X_{\text{medio}}) / \text{scarto quad. medio}$
- 2) z_{\max} [mm] = $(X_{\max} - X_{\text{medio}}) / \text{scarto quad. medio}$
- 3) $F(z_{\min})$ [%] da tabella delle Funzioni Gaussiane
- 4) $F(z_{\max})$ [%] da tabella delle Funzioni Gaussiane
- 5) fap [%] = $F(z_{\max}) - F(z_{\min})$
- 6) fop [%] da tabella precedente
- 7) faa = $fap * n / 100$ con n pari al numero dei valori del campione
- 8) foa da tabella precedente
- 9) fcop [%] da tabella precedente
- 10) x_{medio} **7,282**
- 11) scarto q. med. **0,1296**
- 12) Chi - quadro = $((faa - foa)^2) / foa$
- 13) Rischio d'errore $\alpha = 10\%$
- 14) Gradi di libertà $G = N \text{ classi} - 3 = 4$
- 15) Probabilità $P1 = 1 - \alpha / 2 = 95\%$
- 16) Probabilità $P2 = \alpha / 2 = 5\%$
- 17) Chi - Quadro ($P1, G$) = 0,711
- 18) Chi - Quadro ($P2, G$) = 9,49
- 19) Chi - Quadro totale calcolato è compreso tra i valori precedenti.
Pertanto può essere accettato il modello di distribuzione Gaussiana per il campione statistico dei dati dimensionali in oggetto.

CAPITOLO 2

CENNI DI TEORIA DEI SEGNALE

2.1 Generalità

Durante le operazioni di collaudo, soprattutto di sistemi meccanici, vengono spesso utilizzati dei sistemi di acquisizione ed elaborazione dati, in modo da acquisire, sotto forma di segnali elettrici, misure di grandezze fisiche.

Tali argomenti, pur facendo parte di altre discipline, alle quali si rinvia per uno studio più approfondito, devono essere conosciuti dai collaudatori al fine di sviluppare competenze e capacità nell'analisi dei segnali e nell'esame dei dati.

I notevoli progressi compiuti nel settore elettronico mettono oggi a disposizione dei tecnici un numeroso bagaglio di informazioni e di strumenti che garantiscono l'acquisizione e l'elaborazione dei dati per ogni occorrenza relativa alla misura, al rilevamento, al controllo e all'elaborazione di grandezze fisiche.

Lo schema generale di un sistema elettronico prevede essenzialmente i seguenti blocchi:

- **acquisizione**, che ha il compito di introdurre nel sistema le grandezze da elaborare, le quali possono essere di tipo fisico (temperatura, pressione, velocità, ecc.) o di tipo elettrico (segnali);
- **elaborazione**, che elabora il segnale, analizzandolo e controllandolo eventualmente con opportuni parametri di riferimento;
- **emissione**, che ha il compito di fornire all'uscita del sistema le grandezze risultanti dall'elaborazione, sia sotto forma di segnali elettrici sia sotto forma di grandezze fisiche, quali spostamenti o rotazioni;
- **controllo**, che ha il compito di garantire, durante l'elaborazione il rispetto di parametri prestabiliti di riferimento.

E' ovvio che tale schema elementare può essere ulteriormente arricchito di altri blocchi, allorquando si pone la necessità di meglio specificare ulteriori funzioni.

2.2 Trasduttori

Gli apparati per l'acquisizione dei dati hanno la necessità di acquisire tali dati sotto forma di segnali elettrici e quindi occorre, preliminarmente trasformare una grandezza fisica in segnale elettrico.

Quest'ultimo deve essere poi manipolato e analizzato in circuiti in modo da conferire ad esso caratteristiche adeguate al successivo utilizzo.

In questo paragrafo vengono esaminate le caratteristiche dei dispositivi che consentono di inserire un sistema elettronico dati in forma di segnali elettrici. Essi sono i trasduttori, i quali consentono di trasformare la grandezza fisica in un segnale elettrico.

Si possono distinguere in trasduttori veri e propri e in sensori. I primi stabiliscono un legame continuo tra le variazioni della grandezza fisica di ingresso e quelle delle grandezze elettriche di uscita. I sensori, invece, forniscono all'uscita un segnale variabile tra due valori, in relazione al superamento o meno di specifiche soglie da parte della grandezza di ingresso.

Esistono molteplici modi per classificare i trasduttori. Un primo modo è quello di suddividere i trasduttori in diretti e indiretti. I primi garantiscono che la grandezza fisica venga direttamente trasformata in un segnale elettrico ad essa proporzionale (ad esempio la termocoppia). I trasduttori indiretti sono quelli nei quali la grandezza fisica da convertire produce un'ulteriore grandezza fisica che è poi trasformata in grandezza elettrica (ad esempio un sistema di rilevamento di livello con galleggiante).

Vengono poi classificati anche in relazione alla grandezza fisica da convertire. Pertanto avremo trasduttori di:

- pressione;
- temperatura;
- velocità;
- accelerazione;
- livello;
- portata;

- posizione;
- flusso;
- campo magnetico;
- gas;
- suono;
- radiazioni.

Ulteriore classificazione può essere effettuata in base al principio fisico di funzionamento e cioè in base alla modifica, per effetto di una grandezza fisica, di uno dei seguenti parametri:

- resistenza;
- tensione;
- corrente;
- capacità;
- induzione.

Tra i trasduttori resistivi si ricorda il Ponte di Wheatstone, tra quelli a tensione si menziona il potenziometro. Altri trasduttori sono: le *fotoresistenze* cioè dispositivi atti a modificare la resistenza elettrica in funzione dell'intensità della radiazione luminosa che li colpisce, le *termoresistenze* che modificano la loro resistenza al variare delle temperature alla quale sono sottoposte, gli *estensimetri* che trasformano una deformazione meccanica in variazione di resistenza, le *magnetoresistenze* che trasformano in variazioni di resistenza le variazioni di intensità del campo magnetico nel quale sono collocate, le *termocoppie* che generano una forza elettromotrice di entità proporzionale alla differenza di temperatura esistente tra le due estremità di una coppia di metalli diversi, i *generatori di HALL* nei quali viene generata una tensione proporzionale alla densità di flusso del campo magnetico che li attraversa.

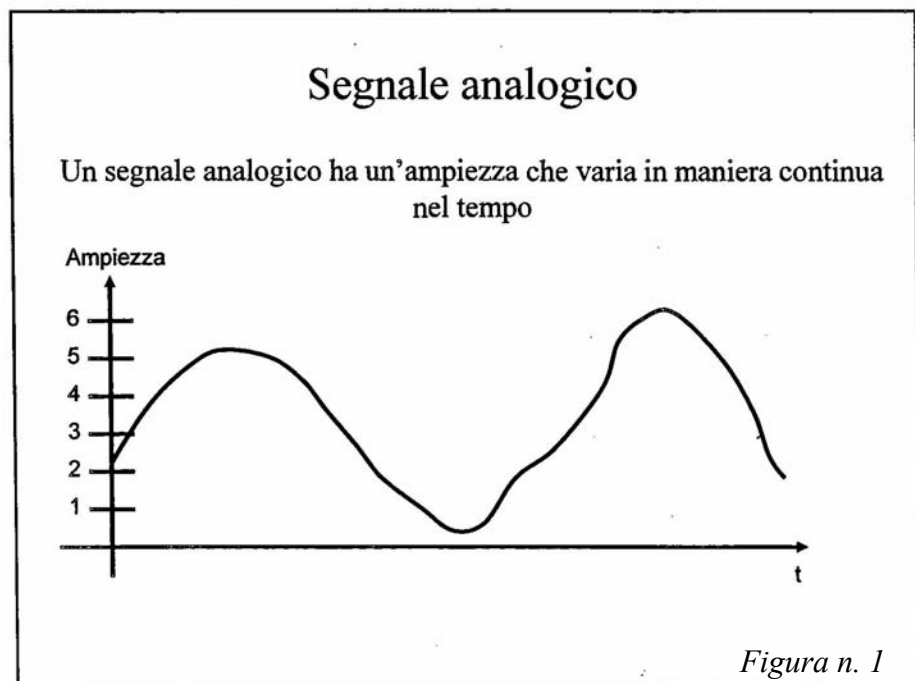
I trasduttori ad effetto capacitivo si basano sulla modifica di capacità conseguente alla variazione di uno dei parametri fisici caratterizzanti un condensatore, provocata dalla grandezza da rilevare.

Nei trasduttori ad effetto induttivo, la grandezza elettrica da rilevare, modifica uno dei parametri che determina l'autoinduzione o la mutua induzione di un circuito elettromagnetico.

2.3 I segnali

I segnali assumono fondamentale importanza in tutti i settori della scienza della tecnica. Essi descrivono il modo di variare di una grandezza misurabile e pertanto possono essere rappresentati matematicamente da una funzione di una o più variabili indipendenti.

I segnali provenienti dai trasduttori sono di norma continui nel tempo e possono quindi assumere tutti i valori compresi tra un limite inferiore ed un limite superiore. Pertanto, considerato un intervallo di tempo compreso tra 0 e T , si ha la possibilità di acquisire infiniti valori del segnale ([vedasi fig. 1](#)).



In questo caso si parla di segnale analogico, che è quindi caratterizzato da un dato noto o disponibile all'utente con continuità nel tempo. In altri termini un segnale analogico può assumere un infinito numero di valori in un intervallo di tempo Δt , piccolo a piacere.

Un segnale si dice invece digitale allorquando è caratterizzato da un dato noto o disponibile all'utente in forma discreta nell'intervallo di tempo considerato (vedasi fig. 2).

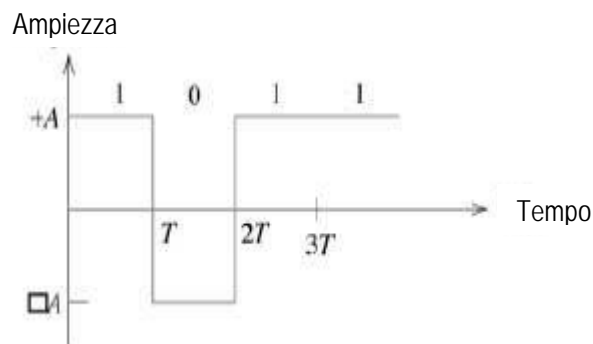


Figura n.2

In tale figura è rappresentato il grafico di un segnale binario, cioè un segnale digitale che può assumere solo due valori.

Si ricorda che in molte analisi di segnali torna comodo fruire della serie *Fourier*, che consente di esprimere il segnale variabile nel tempo, quale somma di segnali sinusoidali con ampiezze, frequenze e fasi diverse.

Un segnale si dice determinato allorquando è conosciuto il suo andamento nel tempo o sotto forma di equazione o sotto forma di grafico e pertanto i suoi valori sono prevedibili in ogni istante.

Il segnale aleatorio è un tipo di segnale di cui non si conosce a priori l'andamento, ma tutt'al più solo qualche caratteristica statistica.

I segnali inoltre vengono suddivisi in:

- periodici, allorquando il loro andamento nel tempo si ripete sempre in maniera uguale dopo ogni intervallo che prende il nome di periodo;

- aperiodici, quei segnali il cui andamento nel tempo non si ripete mai in modo uguale.

2.4 Conversione dei segnali nel campo analogico-digitale

I segnali provenienti dai trasduttori sono continui nel tempo e possono assumere tutti i valori compresi tra un limite inferiore ed un limite superiore. Trattasi pertanto di segnali analogici che assumono infiniti valori nell'intervallo di tempo compreso tra 0 e T.

Il segnale digitale invece è disponibile all'utente, come detto, in forma discreta nel dominio del tempo e può essere rappresentato con una sequenza di numeri.

I principali vantaggi dei sistemi che acquisiscono ed elaborano segnali digitali sono:

- velocità di elaborazione;
- versatilità;
- facilità di manipolazione, trasmissione, di registrazione e di riproduzione;
- compatibilità intrinseca con i sistemi di calcolo;
- ripetibilità e riproducibilità;
- bassa incertezza con costi relativamente contenuti.

Pertanto assume fondamentale importanza convertire i segnali analogici (cioè variabili con continuità nel tempo) con tutto ciò che elabora segnali digitali (cioè variabili tra due livelli).

I sistemi elettronici idonei ad assicurare tale conversione prendono il nome di convertitori A/D (Analogico / Digitale) e D/A (Digitale / Analogico).

Le principali fasi della conversione A/D sono:

- *quantizzazione*, allorché il dato analogico viene suddiviso in un insieme di stati discreti;
- *codifica*, allorché si assegna una parola digitale ad ogni stato discreto secondo un opportuno codice.

Compito essenziale quindi di un convertitore Analogico-Digitale è la trasformazione di una tensione in un codice binario e la sua funzione consiste essenzialmente nel dividere l'intervallo nelle tensioni di ingresso in tanti parti uguali quante sono le parole binarie codificabili, realizzando un legame biunivoco tra ciascun livello e il corrispondente codice.

L'operazione di conversione ha una durata finita, che è chiamata tempo di conversione. Mentre viene convertito un elemento del segnale analogico in ingresso, questo, essendo continuo nel tempo, può modificare il proprio valore. E' chiaro quindi che il convertitore necessariamente deve prelevare un campione del segnale da convertire ed operare su quel campione, indipendentemente dalle modifiche che il segnale stesso subisce durante la conversione. L'operazione di prelievo e di mantenimento del campione viene effettuato da un circuito detto sample-hold (campionamento-mantenimento).

E' evidente però che il prelevamento dei campioni e la loro codifica devono essere effettuati in modo da non perdere l'informazione contenuta delle variazioni di livello del segnale analogico e ciò pone ovviamente il problema di collegare la frequenza dei campionamenti con la variazione e la frequenza del segnale di ingresso.

Nelle figure nn. 3 e 4 è visibile il campionamento di un segnale analogico $V(t)$ in una sequenza di dati digitali (t_i, V_i) ad istanti prefissati.

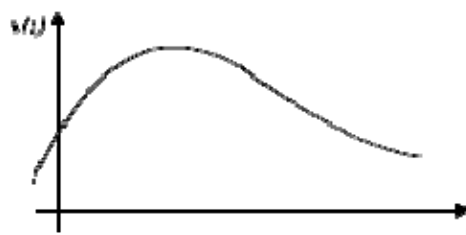


Figura n. 3

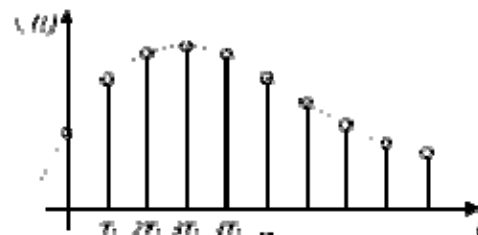


Figura n. 4

Nella figura n. 4 è valutabile l'intervallo di campionamento Δt_c e la frequenza di campionamento $f_c = 1 / \Delta t_c$

La domanda a cui occorre fornire risposta è: “A che frequenza occorre campionare un segnale per rappresentarlo correttamente?” La risposta è fornita dal Teorema di Shannon. Esso definisce la frequenza di prelevamento dei campioni, necessari e sufficienti, affinché non si abbia perdita di informazione, per un segnale periodico di frequenza nota, oppure, per un segnale aperiodico a banda di frequenza limitata.

Il Teorema di Shannon afferma che:

se un segnale è periodico con frequenza f_1 o aperiodico, ma con banda di frequenza limitata entro il valore f_1 non si hanno perdite di informazione se vengono prelevati campioni ad intervalli di tempo T_c

$$T_c \leq \frac{1}{2f_1}$$

Ciò equivale a dire che la frequenza di campionamento f_c deve essere:

$$f_c \geq 2f_1$$

In altri termini il Teorema di Shannon definisce una condizione limite, che consente di interpolare correttamente un segnale analogico, per mezzo della conoscenza di una successione di campioni del segnale medesimo.

In pratica si preferisce mantenere una frequenza di campionamento $f_c \geq 5f_1$ in quanto:

- la condizione di Shannon preserva la frequenza del segnale campionato, ma restituisce una forma ricca di armoniche di ordine superiore e quindi assai distorta;
- una frequenza di campionamento molto vicina alla frequenza del segnale, può dar luogo ad un fenomeno indesiderato, definito aliasing che non rende più riconoscibile il segnale campionato, che sembra avere una frequenza più bassa del segnale originario.

Nelle [Figura n. 5](#) è rappresentata una condizione di aliasing. Da essa si evince chiaramente che se la frequenza di campionamento diminuisce, il segnale campionato sembra avere una frequenza più bassa del segnale originario.

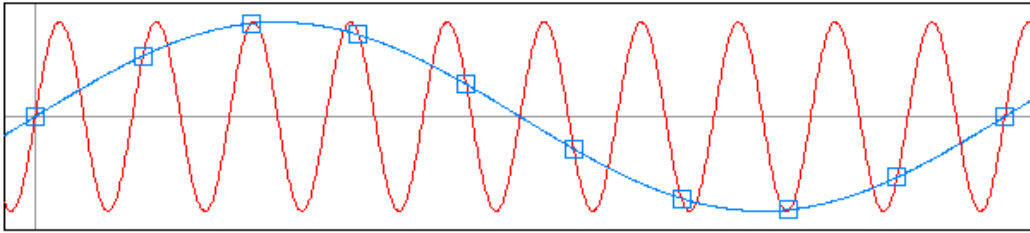


Figura n. 5

Poiché l'errore di aliasing non è correggibile a posteriori, vengono inseriti opportuni filtri sul segnale da campionare, i quali tagliano tutte le frequenze f_l del segnale che sono superiori a $f_c/2$ talvolta per evitare l'aliasing si alza la frequenza di campionamento f_c .

2.5 I sistemi diagnostici

Nell'ambito delle procedure di collaudo di sistemi meccanici, comunque complessi, si è andato sempre più affermando l'utilizzo di sistemi diagnostici, i quali stanno assumendo una notevole importanza anche nel contesto delle politiche manutentive avanzate.

Un sistema diagnostico si prefigge lo scopo di definire lo stato di degrado di un componente o di una macchina tramite la misurazione di alcune grandezze caratteristiche.

Il principio di funzionamento di un sistema diagnostico consiste quindi nel monitorare, durante il normale ciclo di esercizio, uno o più parametri di controllo e di segnalarne tramite un opportuno dispositivo di allarme il superamento di limiti prestabiliti. Durante la fase di monitoraggio si ha la misurazione e la registrazione dei valori dei parametri significativi della macchina o dell'impianto ad intervalli temporali prestabiliti o su richiesta dell'operatore.

Le principali caratteristiche che deve possedere un sistema diagnostico sono:

- flessibilità;
- semplicità;

- affidabilità.

Nei sistemi meccanici assume forte valenza l'analisi dei fenomeni vibratorii, data la loro stretta correlazione con le problematiche di mal funzionamento.

Durante le operazioni di collaudo di una macchina occorre definire la condizione in cui sta operando il sistema sotto esame e si devono rilevare i valori di parametri capaci di individuare in maniera univoca la situazione di funzionamento.

La procedura di collaudo che va dalla definizione di quali componenti del sistema analizzare fino alla prognosi di un danno al macchinario può essere standardizzata e suddivisa nei seguenti passi:

- campionamento;
- rilevamento;
- diagnosi.

Il campionamento rappresenta una parte fondamentale nella procedura di collaudo in quanto un errato campionamento può portare a risultati fuorvianti. Le tecniche di campionamento sono oggetto di specifiche normative e sono descritte ad esempio nelle norme ISO 4021.

Il rilevamento rappresenta una parte in cui si opera la scelta dei componenti da sottoporre a monitoraggio, nonché la scelta dei parametri con cui monitorare il sistema. E' fondamentale nel rilevamento controllare più parametri, ognuno dei quali capace, da solo, di descrivere opportunamente un eventuale condizione di danneggiamento. Solo in tal modo si riesce a disporre di dati ridondanti, per poter stabilire con certezza lo stato del macchinario. Così come per il medico è difficile accettare che le condizioni del malato siano determinate sulla base di un unico sintomo, anche per il collaudatore è opportuno individuare un set minimo di parametri in grado di offrire elementi certi di valutazione.

Una volta rilevati i dati, avendo avuto l'accortezza di campionarli secondo criteri che non invalidino le informazioni, si può passare alla diagnosi. Essa rappresenta l'occasione per esprimere una valutazione, il più possibile oggettiva, sulla condizione del sistema sottoposto a collaudo, basandosi anche sul confronto tra i sintomi riscontrati e i sintomi tipici di sindromi note.

Al fine di esprimere un giudizio valido sulle condizioni del sistema meccanico, il collaudatore deve possedere un ampio database di sindromi e dei

relativi sintomi. Di norma questi database contenenti i valori critici dei vari parametri misurati sono forniti dalle case produttrici. Ad esempio, per i cuscinetti, la diagnosi consiste nella verifica del fatto che l'armonica che i dati storici associano a un determinato problema è aumentata di ampiezza. Pertanto il collaudatore deve essere particolarmente esperto o deve avvalersi di tecnici particolarmente esperti nell'interpretazione degli spettri dei segnali acquisiti.

2.6 Analisi delle vibrazioni

Oggi esistono numerose possibilità di stabilire le condizioni dei macchinari attraverso le analisi delle vibrazioni, i cui dati vengono acquisiti di norma attraverso accelerometri posti sulle casse esterne degli apparecchi da monitorare.

La scelta del punto in cui posizionare l'accelerometro è una fase critica del processo di collaudo, in quanto il corretto posizionamento ha notevole influenza sulle informazioni che si possono estrarre dall'analisi delle vibrazioni.

Dall'esame dei dati acquisiti si procede, in prima istanza, con un'analisi del valore quadratico medio della velocità di vibrazione misurata, seguente le norme ISO 2372, che permettono di stabilire, a partire da tale dato le condizioni del macchinario.

Tale approccio metodologico è molto semplice e fornisce prime e buone indicazioni sullo stato globale della macchina, ma nel caso in cui si individui un malfunzionamento il collaudatore non è in grado di risalire dalla sola analisi della velocità di vibrazione a quale sia il componente danneggiato. La ricerca di tale componente può essere fatta solo grazie alla relazione, più volte verificata, che esiste tra la nascita di particolari picchi sullo spettro del segnale acquisito e il guasto di alcuni componenti del sistema meccanico.

Pertanto l'analisi dello spettro è fondamentale per l'individuazione del citato componente e richiede la presenza di un database con le frequenze a cui si manifestano comunemente i danneggiamenti dei vari componenti.

Tale analisi richiede quindi la conoscenza specifica del macchinario in esame o la presenza di un tecnico competente che è in grado di relazionare lo spettro acquisito con il database dei dati storici.

E' facilmente comprensibile la difficoltà di esecuzione di tale analisi in quanto occorre avere una particolare sensibilità per individuare i vari picchi che si manifestano, la cui interpretazione è spesso complicata da fenomeni secondari, dalla modulazione del segnale da parte delle componenti rotazionali delle macchine e dal filtraggio di cui spesso è responsabile la cassa esterna.

Questo secondo livello di analisi non è utile per poter stabilire il grado di danneggiamento dei componenti che sono risultati fonti di vibrazione.

Oltre alle problematiche connesse alla interpretazione dei risultati provenienti dall'applicazione delle metodologie con la trasformata di FOURIER esistono numerosi limiti al riguardo delle informazioni che possono essere estratte dall'utilizzo di tale strumento. Infatti i segnali analizzati quasi sempre non rispettano completamente le condizioni poste da Fourier e i fenomeni vibratorii non si ripetono ogni volta allo stesso modo.

Attualmente esistono due filoni di ricerca: il primo teso ad individuare tecniche di elaborazione dei segnali di vibrazione che consentano una migliore visualizzazione dei fenomeni di danneggiamento e l'altro teso ad individuare sistemi in grado di rendere automatica e obiettiva l'interpretazione dei risultati. A tale proposito va ricordato che notevoli progressi sono stati ottenuti con l'utilizzo di reti neurali artificiali. Queste già vengono utilizzate con successo per l'identificazione dei guasti sia in diversi settori produttivi sia in ambito ferroviario, sia nel settore avionico e della motoristica.

Le reti neurali artificiali hanno già dimostrato di essere strumenti validissimi per la diagnosi in svariati settori, compreso quello medico. Tali sistemi operano sulla base dell'analisi di un elevato numero di casi reali e cercano di penetrare nelle leggi fisiche senza però conoscere le relazioni matematiche intercorrenti tra le grandezze in gioco.

I campi di applicazione sono tutti quelli dove l'analisi statistica delle variabili di un problema risulta dispendiosa o difficoltosa.

Attualmente le tecniche diagnostiche utilizzate in sede di collaudo si basano sull'analisi del sistema attraverso controlli non distruttivi e la diagnosi è affidata agli operatori.

Il controllo delle vibrazioni è quindi una delle tecniche più diffuse e più generalmente applicate. Acquisiti i dati, il collaudatore o il tecnico competente ha a disposizione un database di dati storici delle frequenze caratteristiche dei vari tipi di danno.

In base alla sua sensibilità suppone un tipo di cedimento ed esegue un controllo visivo tra lo spettro acquisito e lo spettro con la frequenza del danno ipotizzato. In virtù dell'esperienza posseduta determina la fonte del problema.

Appare evidente che tale approccio presenta alcune limitazioni:

- il vincolo della sensibilità soggettiva e dell'esperienza dell'operatore;
- la presenza di rumore nei segnali acquisiti che rende complicata la loro lettura per la sovrapposizione di armoniche a frequenze multiple della frequenza fondamentale della vibrazione generata dal danno specifico e dalla contemporanea presenza di segnali modulanti (come ad esempio la frequenza di rotazione dell'albero) che intervengono sul segnale acquisito generando numerose bande laterali e "sporcando" lo spettro.

L'impiego di reti neurali artificiali si rivela particolarmente efficace quando i dati in ingresso presentano caratteristiche simili. E' infatti una finalità propria delle reti neurali artificiali la capacità di apprendere dall'ambiente in cui esse sono inserite.

Una rete neurale artificiale, espletata la fase di apprendimento, è in grado di determinare la soluzione anche in casi non perfettamente uguali ai casi previsti, giungendo a soluzione anche in presenza di disturbi ed è in grado di acquisire e assimilare ulteriori conoscenze nel tempo dai nuovi casi che si presentano diventando così uno strumento di diagnostica sempre più esperto ed adattato all'ambiente in cui opera.

CAPITOLO 3

TARATURA STATICA DEGLI STRUMENTI

3.1 Generalità

La taratura statica di uno strumento è l'analisi delle caratteristiche statiche di un sistema di misura o di un singolo trasduttore, una volta che essi siano stati posti in un ambiente controllato.

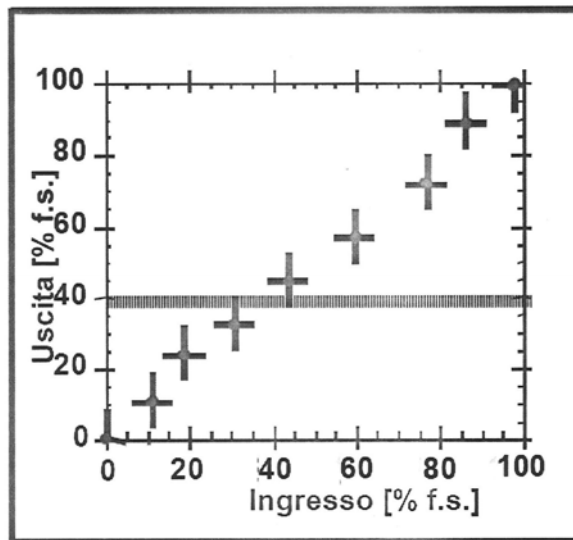
In altri termini il trasduttore viene isolato da ciò che lo circonda, ponendolo in un ambiente in cui sono misurati e controllati tutti i parametri fisici che possono influenzare la misura stessa.

L'operazione di taratura consiste nel far variare tutte le grandezze di ingresso significative, una per volta, mantenendo costanti le altre e registrando le corrispondenti uscite.

Le grandezze di ingresso sono misurate con strumenti in grado di fornire misure con incertezze minori di almeno un ordine di grandezza di quella dello strumento da tarare. In altri termini nella taratura statica si stabilisce una relazione tra ingresso ed uscita, nella quale l'ingresso viene variato, in un certo campo di valori costanti, e l'uscita corrispondente varierà in un certo campo sempre di valori costanti che vengono accuratamente misurati.

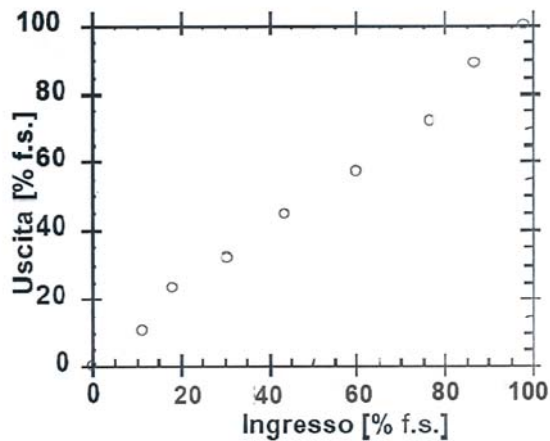
3.2 Curva di taratura

Registrando ed analizzando l'uscita per ingressi noti si ricava un grafico rappresentativo della taratura. Nella figura seguente sono riportate le grandezze rilevate in un grafico, nel quale, in ascisse sono evidenziati gli ingressi, in percentuale del fondo scala, e l'ordinata le uscite sempre in percentuale del fondo scala.

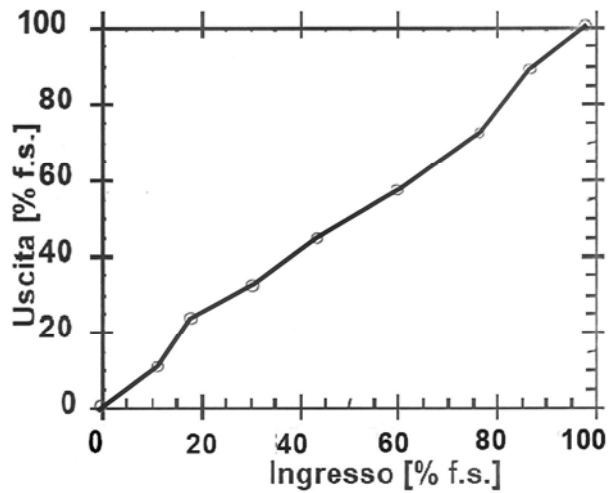


Nella figura sono anche evidenziate le bande di incertezza dell'ingresso e dell'uscita e appare chiaro come le incertezze dell'ingresso sono più piccole di quelle dell'uscita stessa.

Considerando solamente le letture e cioè i valori centrali della fascia si può ottenere un grafico come il seguente.

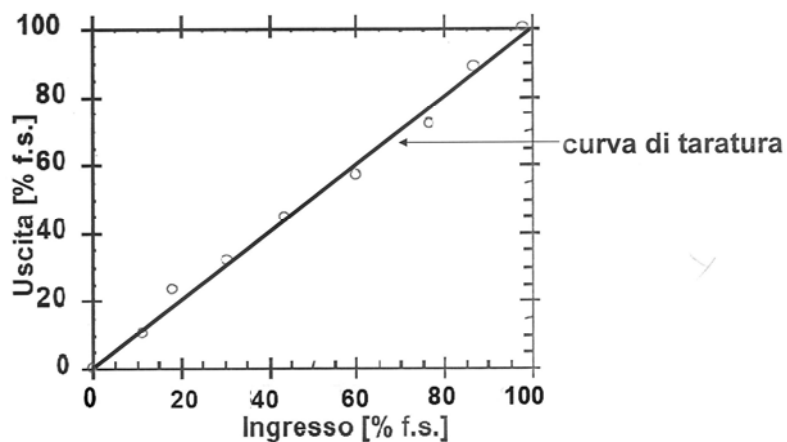


Collegando i punti rappresentativi delle risultanze sperimentali con una curva si ottiene una spezzata, come la curva di taratura rappresentata in figura.



Solitamente però per pervenire alla curva di taratura si utilizzano metodi ai minimi quadrati ipotizzando una dipendenza fra grandezze di ingresso e grandezze di uscita di tipo lineare.

In altri termini la curva di taratura viene assimilata ad una retta, che è solitamente una retta di regressione ai minimi quadrati (vedasi figura).



Si definisce sensibilità statica assoluta S_a la pendenza della curva di taratura. In altri termini dette g_i le grandezze in ingresso g_u le grandezze in uscita si ha:

$$S_a = \frac{dg_u}{dg_i}$$

Se la curva di taratura è una retta tale formula diventa

$$S_a = \frac{g_u}{g_i}$$

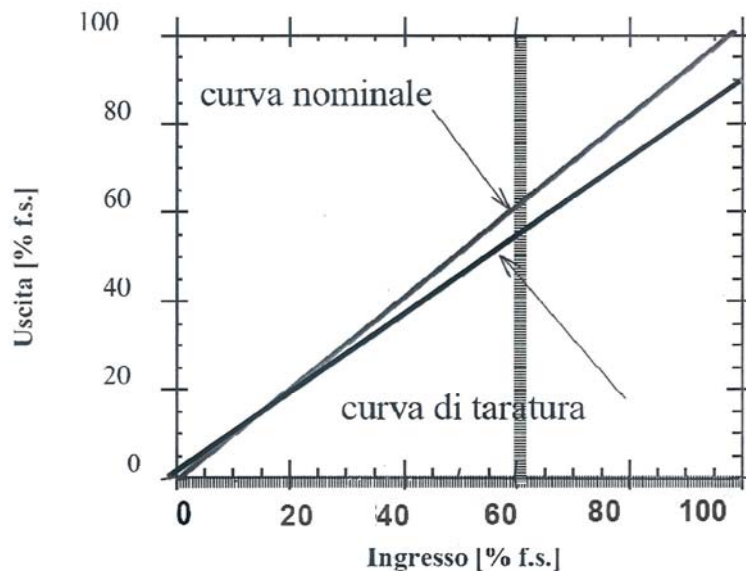
Quando in uno strumento la relazione tra g_u e g_i non è perfettamente lineare, ma la curva di taratura, in un certo campo di valori, può essere approssimato da un segmento di retta, lo strumento, entro tale campo può considerarsi lineare.

3.3 Errori ed incertezze

Per esaminare i fattori che influenzano l'incertezza di una misura, spesso si fa riferimento a "errori" di sensibilità, ripetibilità, isteresi, ecc.

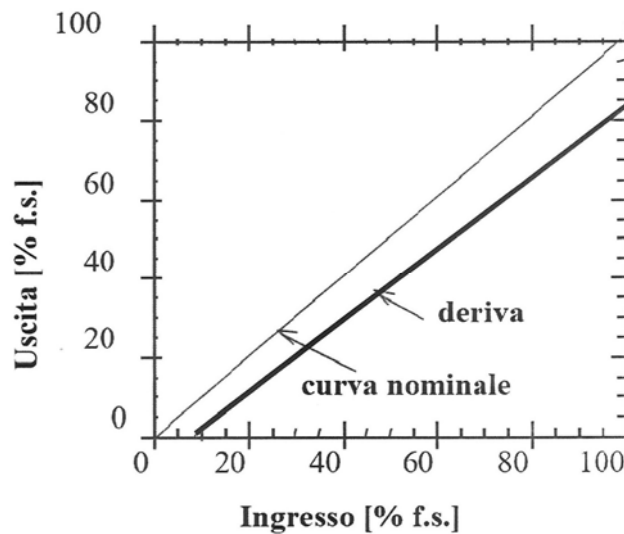
Ancora una volta si chiarisce che con tale termine "errore" non si intende la differenza tra valore misurato e valore vero, che non trova ospitalità nella moderna teoria della misurazione, ma si intende la differenza tra il valore misurato durante la taratura e la curva nominale di riferimento ritenuta nota a meno di un'incertezza non nulla ma determinabile.

Si parlerà di errore di sensibilità allorché la curva di taratura ha pendenza diversa dalla curva nominale, come nel caso in figura.

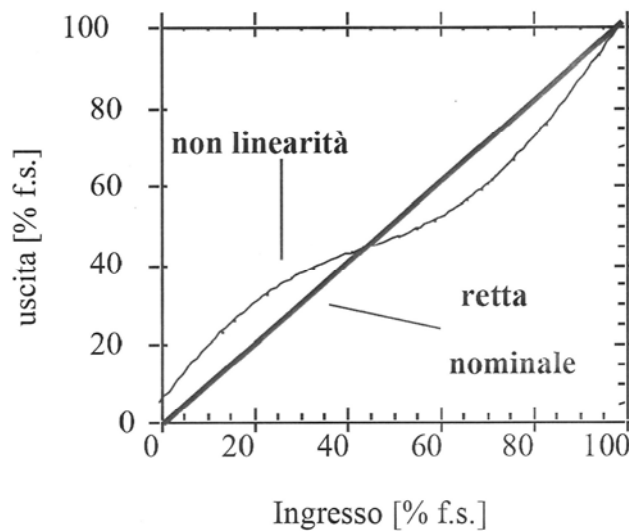


Si ha invece errore di deriva allorché le uscite dello strumento non sono stabili nel tempo, ma tendono a derivare. Tale per esempio l'errore tipico degli

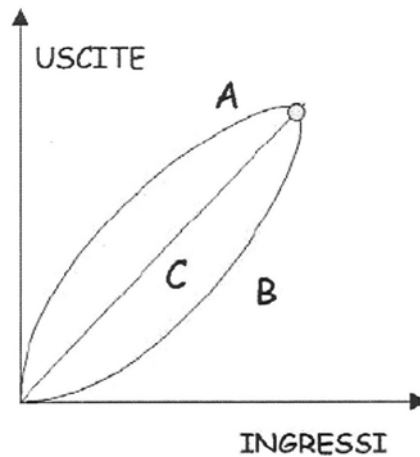
strumenti elettrici, per i quali è necessario mandare a regime termico i componenti prima di effettuare la misura.



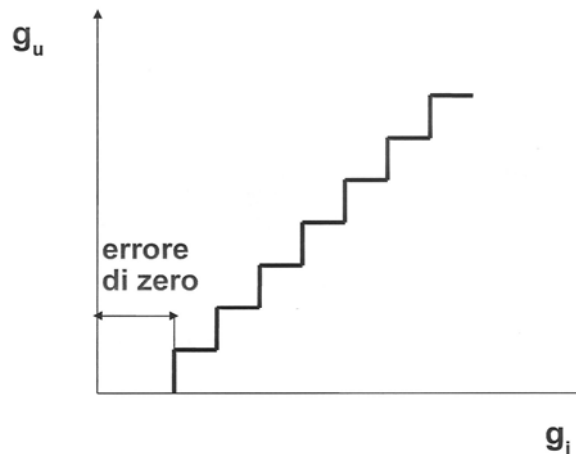
L'errore di linearità si ha ogni qualvolta la curva non lineare si discosta dalla retta nominale.



L'errore di isteresi è invece presente ogni qualvolta la curva di taratura per valori di ingresso crescenti è diversa dalla curva di taratura ottenuta per valori decrescenti (vedasi figura seguente).

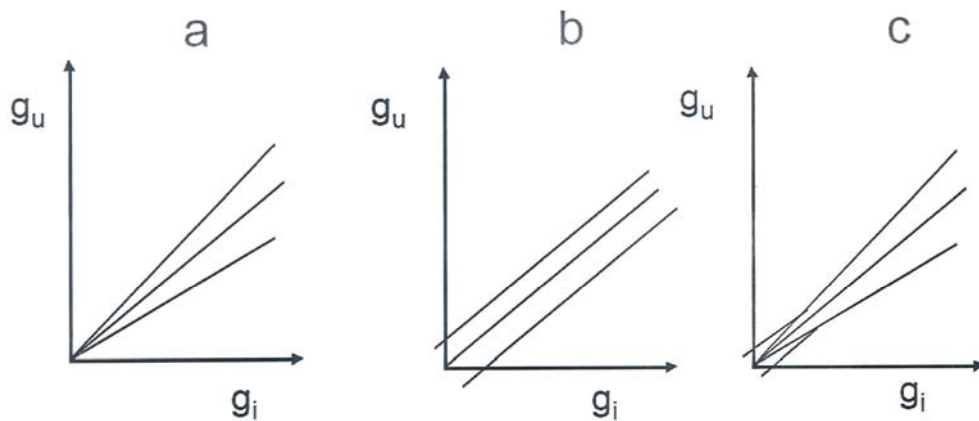


Si parla invece di errore di risoluzione allorquando lo strumento non riesce ad apprezzare piccole variazioni dell'ingresso (vedasi figura seguente).



Tutte le fonti di errore evidenziate in precedenza devono essere opportunamente combinate per assegnare ad ogni valore dell'ingresso un errore o l'incertezza dello strumento tarato.

L'errore può essere espresso come percentuale della lettura (caso a), come percentuale della lettura del fondo scala (caso b), o come sovrapposizione delle due espressioni (caso c) – Vedasi figura seguente.



Nella vecchia terminologia della Teoria delle misure era introdotta anche la classe di precisione. Essa, per uno strumento analogico, rappresentava l'incertezza di lettura espressa come percentuale del fondo scala.

Ad esempio ad un Voltmetro con un fondo scala 300V e classe di precisione 0,05 si assegnava una incertezza di lettura di

$$\frac{0,05}{100} \cdot 300 = 0,15V$$

3.4 Esercizi

3.4.1 Esercizio n. 1

La caratteristica di un trasduttore non lineare nel campo di valori $0 \leq g_i \leq 10$ ed è rappresentata dalla legge

$$g_u = 4g_i + 0,021g_i^2 - 0,001g_i^3$$

Determinare la sensibilità minima e massima.

Calcolare l'errore assoluto e relativo massimo che si commette, approssimando la caratteristica con una retta passante per gli estremi della curva.

Svolgimento

Ricordo che

$$S_a = \frac{dg_u}{dg_i} = 4 + 0,042 g_i - 0,003 g_i^2$$

$$\text{Impongo } \frac{dsa}{dgi} = 0$$

$$0,042 - 0,006g_i = 0$$

da cui $g_i = \frac{0,042}{0,006} = 7$ per tale valore $S_a = 4,147$ ed assume il valore massimo.

Mentre la sensibilità è minima per $g_i = 0$ ed è pari a 4.

Tanto si ricava considerando che l'espressione della sensibilità è una funzione di g_i rappresentativa di una parabola con la concavità rivolta verso il basso.

Per calcolare l'errore assoluto e relativo massimo occorre considerare il valore della grandezza in uscita agli estremi dell'intervallo in cui ricade il g_i .

Si rimette all'Allievo il completamento dell'esercizio.

CAPITOLO 4

MISURE DI DEFORMAZIONE ED ESTENSIMETRI

4.1 Generalità

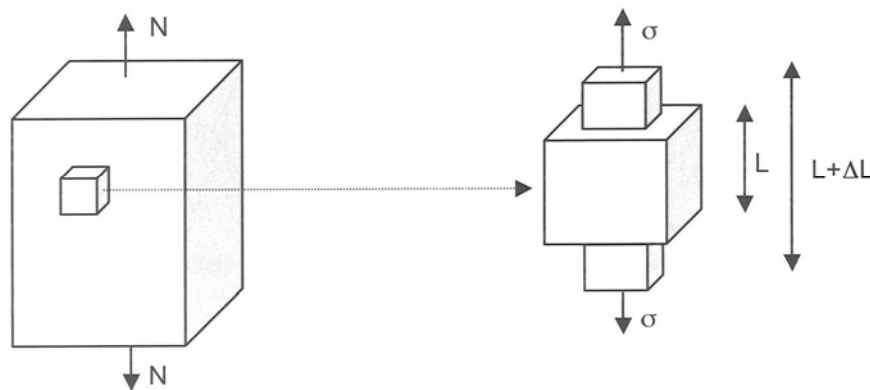
Si ricorda che per un corpo elastico, omogeneo ed isotopo sottoposto ad una forza di trazione F e che presenti un'area A della sua sezione retta lo sforzo di trazione uniforme N è pari

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

La deformazione conseguente allo sforzo di trazione è in senso longitudinale

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta L}{L}$$

Ove con L è indicata la lunghezza iniziale e ΔL la variazione di lunghezza determinata dallo sforzo di trazione (vedasi figura).



La deformazione ε_l è ovviamente adimensionale e viene espressa in $[\mu m / m]$ o in $[ppm]$ (parti per milione).

Si ricorda ancora che detto E il modulo di Young sussiste la seguente relazione tra la deformazione ε e la corrispondente tensione σ .

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Inoltre ad un allungamento in una direzione ε_l corrisponde un parziale accorciamento nelle direzioni ad essa ortogonali ε_t secondo la relazione

$$\varepsilon_t = -\nu\varepsilon_l$$

ove ν è il modulo di Poisson.

I ragionamenti fin qui sviluppati concerno deformazioni unidirezionali, mentre in uno stato piano di tensione occorre tener conto delle due tensioni agenti secondo gli assi x e y e delle deformazioni relative.

4.2 Estensimetri

Gli estensimetri sono strumenti in grado di convertire un segnale in ingresso (una deformazione lineare) in un segnale di uscita di natura diversa.

Essi sono quindi in grado di consentire la misura di spostamenti relativi fra due generici punti di una superficie di un corpo sottoposto a carichi statici o a carichi dinamici.

L'estensimetro generalmente è uno strumento di misura monoassiale, cioè in grado di registrare deformazioni dovute ad una tensione agente lungo una direzione.

Nel caso in cui invece coesistono sollecitazioni semplici che deformano il corpo in varie direzioni occorre utilizzare un gruppo di estensimetri o delle rosette estensimetriche che sono costituite da più estensimetri montati sullo stesso supporto.

Esistono diverse categorie di estensimetri (estensimetri meccanici, acustici, pneumatici, elettrici, ecc.) ma tra quelli più utilizzati bisogna annoverare quelli elettrici (tipo capacitivo, induttivo o a resistenza).

Si prendono in considerazione per lo più estensimetri elettrici a resistenza, i quali presentano una semplicità di utilizzo coniugata ad un'alta affidabilità e con risposte lineari in un campo sufficientemente ampio di portate.

Generalmente un estensimetro è costituito da:

- **una griglia** di materiale metallico dello spessore di qualche decina di micron, ottenuto per lo più mediante procedimento fotografico;
- **un supporto** in resina in grado di trasmettere le deformazioni dell'elemento elastico su cui viene incollato;
- **adesivo**, di piccolissimo spessore, per lo più bicomponente che lega il supporto all'elemento elastico;
- **protezione** della griglia, costituita da cera o resina, per evitare il danneggiamento del materiale metallico.

Le caratteristiche metrologiche degli estensimetri sono per lo più costituite da:

- **resistenza elettrica** R , che dipende dalla resistività del materiale ρ , dalla sezione della griglia S e dalla sua lunghezza L secondo la legge $R = \rho L/S$;
- Sensibilità della deformazione data dal **fattore di taratura** o gage factor definito come $K = (\Delta R/R) / (\Delta L/L)$. Di norma esso viene determinato per via statistica estraendo un campione significativo di estensimetri dall'intera produzione industriale;
- **Sensibilità alla temperatura** data dal fattore $\alpha = (\Delta R/R) / \Delta T$ ove ΔT è la variazione della temperatura e α è tipico del materiale considerato.;
- **Portata** che definisce il campo di utilizzo degli estensimetri, di norma variabile tra 0 e 3000ppm;
- **Sensibilità trasversale** definita dal rapporto tra il fattore di taratura e il fattore di dilatazione trasversale;
- **Accuratezza** data dalla combinazione delle caratteristiche metrologiche dell'estensimetro, del suo incollaggio sull'elemento elastico e della catena di misura su cui è inserito il sensore.

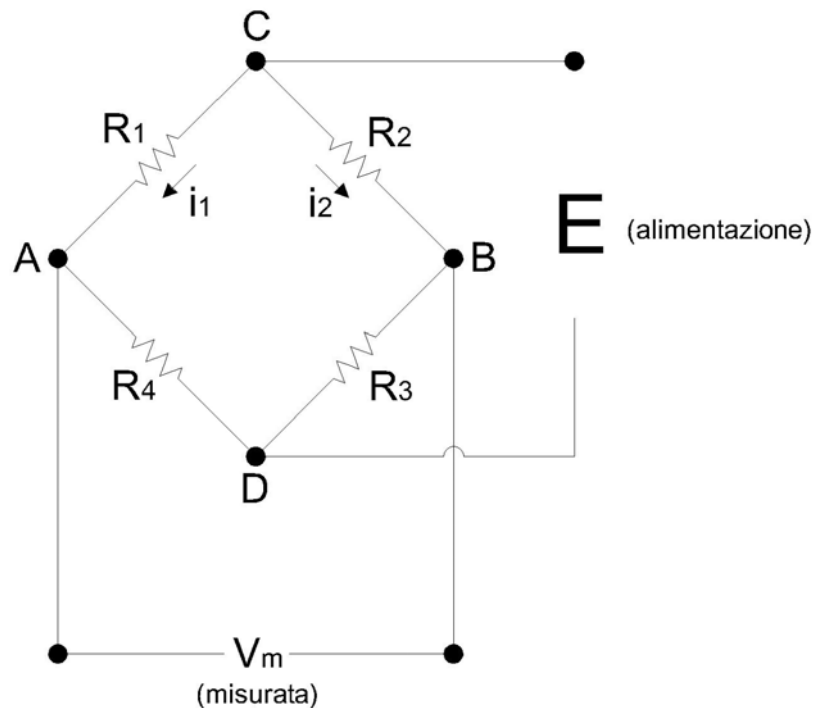
4.3 Ponte di Wheatstone

Un normale estensimetro fornisce variazioni di resistenza talmente modeste che non sono facilmente determinabili con un normale ohmetro.

Ad esempio se un estensimetro ha una resistenza di 120 ohm e un fattore di taratura $k = 2$, esso è tale che una deformazione di 3 ppm comporta una variazione di resistenza così calcolabile dalla definizione del fattore di taratura.

$$\Delta R = K \left(\frac{\Delta L}{L} \right) R = 2 \times 3 \times 10^{-6} \times 120 \Omega = 720 \mu\Omega$$

Appare evidente quindi che occorre utilizzare strumenti di misura diversi dal normale ohmetro. Per tale motivo si fa ricorso al ponte di Wheatstone rappresentato in figura.



Dove al posto delle resistenza R_1 , R_2 , R_3 e R_4 vengono sostituiti uno o più estensimetri.

Nel caso in cui si abbia un solo estensimetro il circuito prende il nome di quarto di ponte, per due estensimetri si ha un circuito a mezzo ponte, utilizzando quattro estensimetri si ha un circuito a ponte completo.

Si azzerava il ponte in modo che il prodotto $R_1 R_2$ sia uguale a R_3 ed R_4 .

Se il ponte è equilibrato

$$I_1 \left(\frac{E}{R_1 + R_4} \right) \quad I_2 \left(\frac{E}{R_2 + R_3} \right)$$

$$V_A - V_C = iR = I_1 R_1$$

$$V_A - V_C = \frac{E}{R_1 + R_4} R_1$$

$$V_B - V_C = \frac{E}{R_2 + R_3} R_2$$

$$V_m = (V_A - V_C) - (V_B - V_C) = E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right)$$

$$\frac{V_m}{E} = \left(\frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)} \right)$$

Se il ponte viene squilibrato per una piccola variazione ΔR_1 di R_1 si avrà un ΔV_m tale che

$$\frac{V_m + \Delta V_m}{E} = \frac{(R_1 + \Delta R_1)R_3 + R_2 R_4}{(R_1 + \Delta R_1 + R_4)(R_2 + R_3)}$$

Il ponte è equilibrato.

$$V_m = 0 \quad R_1 R_3 = R_2 R_4$$

$$\frac{\Delta V_m}{E} = \frac{\Delta R_1 R_3}{(R_1 + \Delta R_1 + R_4)(R_2 + R_3)}$$

Il $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ e ΔR_1 trascurabile rispetto a R

$$\frac{\Delta V_m}{E} = \frac{\Delta R_1 \cdot R}{(R + R)(R + R)} = \frac{\Delta R_1 \cdot R}{4R^2} = \frac{\Delta R_1}{4R}$$

$$\frac{\Delta V_m}{E} = \frac{\Delta R_1}{4R}$$

Ragionando allo stesso modo lungo il ramo CBD

$$\frac{\Delta V_m}{E} = \frac{-\Delta R_2}{4R}$$

Sommando i contributi delle variazioni delle 4 resistenze

$$\frac{\Delta V_m}{E} = \sum_{i=1}^4 \frac{\Delta V_{mi}}{E} = \frac{\Delta R_1}{4R} - \frac{\Delta R_2}{4R} + \frac{\Delta R_3}{4R} - \frac{\Delta R_4}{4R}$$

Nell'estensimetro ($R = \rho l/A$)

La sensibilità alla deformazione (fattore di taratura)

$$K = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)}{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)} = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon}$$

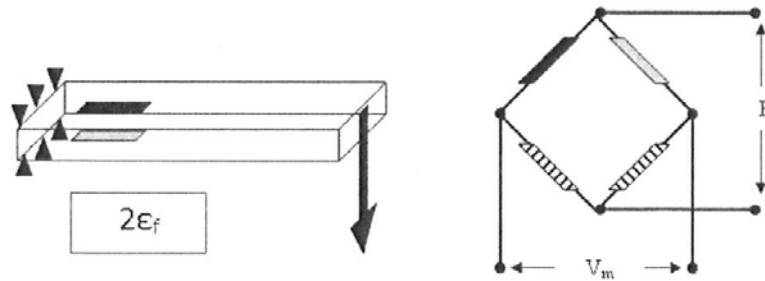
Per cui $\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon$

$$\frac{\Delta V_m}{E} \cong \frac{K}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

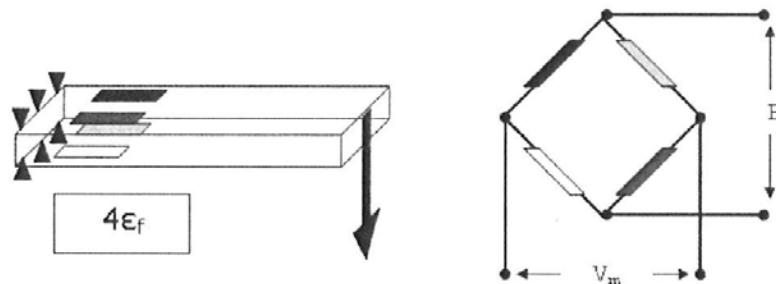
Tale formula esprime la relazione che intercorre tra le deformazioni misurate dai quattro estensimetri a ponte completo e la differenza di tensione misurata ΔV_m .

Per quanto concerne la disposizione degli estensimetri, esistono alcune configurazioni consigliate allorquando si è in presenza di flessione, sforzo normale e torsione.

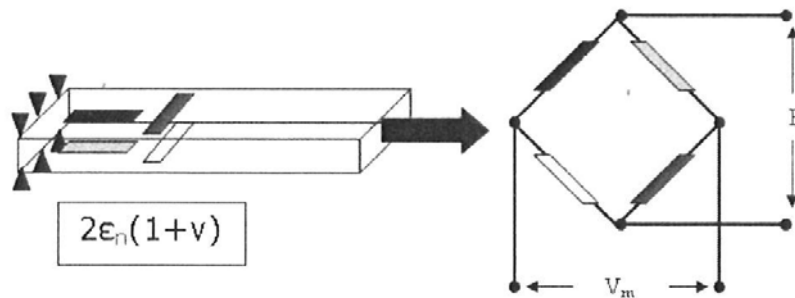
Tali configurazioni consigliate sono rappresentate nelle seguenti figure:



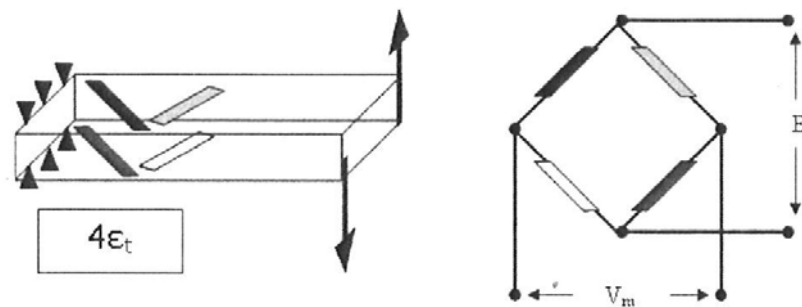
Flessione: posizionamento degli estensimetri e schema a mezzo ponte



Flessione: posizionamento degli estensimetri e schema a ponte completo



Trazione: posizionamento degli estensimetri e schema a ponte completo



Torsione: posizionamento degli estensimetri e schema a ponte completo

In tali disposizioni, sia con il ponte completo, sia con il mezzo ponte, si è in grado di ottenere la cancellazione degli effetti dovuti alla temperatura, nonché la cancellazione di eventuali effetti dovuti alla presenza di forze di compressione o di trazione.

Come è noto l'inserimento di uno strumento di misura in un circuito comporta inevitabilmente il sistema venga perturbato dal misuratore stesso, in quanto quest'ultimo assorbe energia.

Pertanto, ogni qualvolta si inserisce uno strumento di misura all'interno di un ponte di Wheatstone si è in presenza di un errore di inserzione, in quanto il voltmetro introdotto per quantificare l'entità dello sbilanciamento del ponte incide sul misurando (tensione).

Per tale motivo, al fine di contenere gli effetti di inserzione, si utilizzano voltmetri con impedenza interna abbastanza elevata rispetto a quella che caratterizza il ponte nel suo complesso.

L'errore di inserzione ε può essere valutato mediante la seguente formula

$$\varepsilon = -\frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_e}}$$

ove

R_i è la resistenza interna del voltmetro

R_e è la resistenza equivalente che caratterizza il ponte di Wheatstone, ossia è la resistenza complessiva vista dal voltmetro ai capi dei morsetti cui questo è collegato.

Per ricavare il valore di R_e occorre riportarsi a noti problemi di elettrotecnica, ipotizzando di staccare il voltmetro e staccare il generatore di tensione che alimenta il ponte.

In virtù di tale circuito modificato si ricava la resistenza equivalente rispetto ai cavi dei morsetti di collegamento del voltmetro con il ponte.

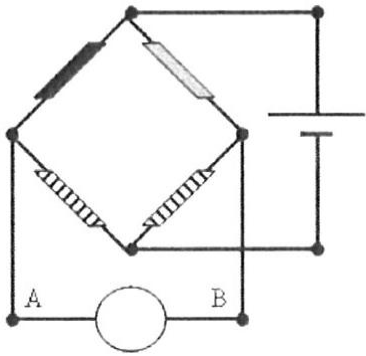
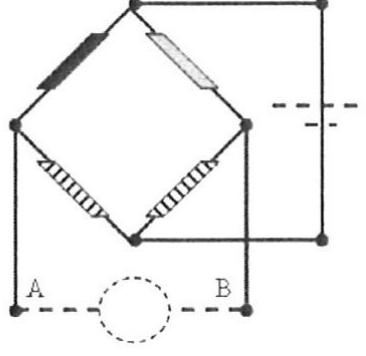
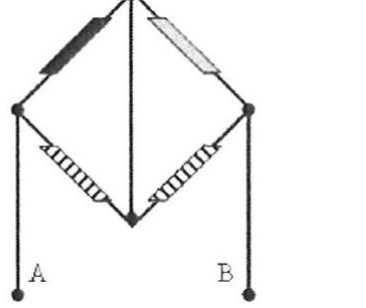
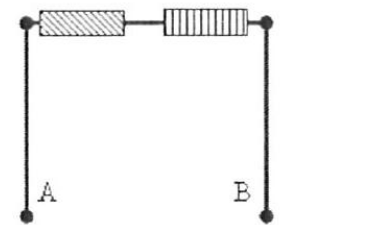
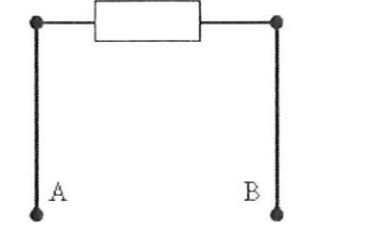
Pertanto si può affermare che la tensione V_m misurata dal voltmetro è minore di quella effettiva a causa dell'errore di inserzione.

Per ottenere l'effettivo valore di V_m e cioè $V_{meffettivo}$ si può utilizzare l'espressione

$$V_{meffettivo} = \frac{V_m}{1 + \varepsilon}$$

Ove ε è una grandezza presa con il proprio segno.

Nelle figure seguenti sono riportati gli schemi cui occorre far riferimento per la determinazione della resistenza equivalente R_e .

	<p><i>Configurazione iniziale del ponte di Wheatstone</i></p>
	<p><i>Configurazione del ponte annullando il voltmetro e il generatore di tensione</i></p>
	<p><i>Circuito modificato con il distacco del voltmetro e del generatore</i></p>
	<p><i>Circuito equivalente ricavato secondo le regole delle resistenze elettriche</i></p>
	<p><i>Circuito con l'inserimento della sola resistenza equivalente vista dal voltmetro ai capi dei morsetti cui è collegato.</i></p>

4.4 Esercizi

4.4.1 Esercizio n. 1

Al fine di procedere alla misura del carico F agente in direzione assiale, si consideri un tirante tubolare di una struttura reticolare, sul quale vengono collocati quattro estensimetri.

Determinare lo sforzo normale F corrispondente ad una lettura di 10 mV di sbilanciamento con il ponte alimentato a 10V e con i seguenti dati:

- Diametro esterno tubo: 26 mm;
- Diametro interno del tubo: 20,32 mm;
- Modulo elastico: 205 Gpa;
- Modulo di Poisson ν : 0,30;

Le caratteristiche degli estensimetri adoperati sono

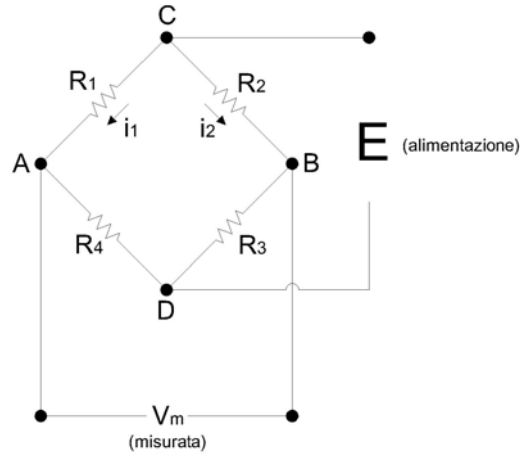
$$\text{Fattore di taratura } K = 2,055 \pm 0,5\%$$

$$R_0 = 120 \pm 0,3\% \Omega$$

Due estensimetri sono disposti lungo l'asse longitudinale (su due generatrici opposte del cilindro) e tali trasduttori saranno collegati su rami opposti del ponte di Wheatstone (R_1 R_3), mentre gli ulteriori due estensimetri (R_2 R_4) saranno disposti ortogonalmente all'asse della sollecitazione per compensare gli ingressi interferenti dovuti alla temperatura.

Svolgimento

In riferimento alla figura sotto riportata,



potremo scrivere $\frac{\Delta R_1}{R_1} = K \cdot \varepsilon_l$, $\frac{\Delta R_3}{R_3} = K \cdot \varepsilon_l$ ove $\varepsilon_l = \frac{\sigma}{E}$ con $\sigma = \frac{F}{A}$

Mentre per gli estensimetri 2 e 4 dovremo considerare la deformazione $\varepsilon_t = -\nu \varepsilon_l$ e le variazioni seguenti

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = K \cdot \varepsilon_t$$

$$\frac{\Delta R_4}{R_4} = K \cdot \varepsilon_t$$

Supponendo di impiegare estensimetri uguali con lo stesso fattore di taratura K dalla relazione di sbilanciamento del ponte si ha

$$\frac{\Delta V_m}{E} \cong \frac{K}{4} (\varepsilon_l - \varepsilon_t + \varepsilon_l - \varepsilon_t) = \frac{K}{4} \cdot 2\varepsilon_l (1 + \nu) = \frac{K}{2} \varepsilon_l (1 + \nu)$$

Da tale formula si ricava

$$\varepsilon_l = \left(\frac{\Delta V_n}{E} \right) \frac{2}{K(1 + \nu)} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{10} \cdot \frac{2}{2.055(1 + 0.3)} = 748,6 \cdot 10^{-6} \frac{m}{m} = 748,6 \frac{\mu m}{m}$$

Ricavata la deformazione si può determinare la forza esterna nel seguente modo:

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4}(26^2 - 20,32^2) \cdot 10^{-6} m^2$$

$$\sigma = E \varepsilon_l = 205 \cdot 10^9 \cdot 748,6 \cdot 10^{-6} N/m^2$$

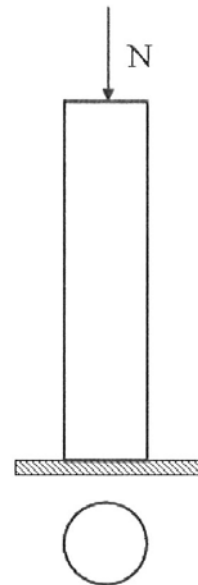
$$F = \sigma \cdot A = 31.711 N$$

4.4.2 Esercizio n. 2

Una cella di carico è costituita da quattro estensimetri elettrici a resistenza incollati su un cilindro di diametro D e misura il carico N in direzione assiale come schematizzato in figura.

Sapendo che:

- a) il diametro $D = 50$ mm;
- b) modulo di Young $E = 205$ GPa;
- c) coefficiente di Poisson $\nu = 0,30$;
- d) fattore di taratura $K = 2,055 \pm 0,3\%$;
- e) tensione di alimentazione del ponte $E = 10$ V



Si determini la sensibilità della cella e l'errore relativo di inserzione dovuto all'utilizzo di un voltmetro con impedenza interna $1k\Omega$.

Svolgimento

Si suppone che gli estensimetri siano collocati in modo da cancellare gli effetti interferenti dovuti alla temperatura e alla flessione.

Si ricorda che la sensibilità $S = \frac{\Delta V_m}{N}$ e che sotto il carico N si ha una deformazione assiale pari a $\frac{N}{EA}$.

Utilizzando l'espressione degli estensimetri ed indicando con E la tensione che alimenta il ponte, si ha:

$$\frac{\Delta V_m}{E} = \frac{K}{4} \left(\frac{N}{EA} + \nu \frac{N}{EA} + \frac{N}{EA} + \nu \frac{E}{EA} \right) = \frac{K}{2} \frac{N}{EA} (1 + \nu)$$

da cui segue

$$S = \frac{\Delta V_m}{N} = \frac{K}{2} \frac{1 + \nu}{EA}$$

Essendo l'area $A = 1,962 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, si avrà:

$$S = \frac{2,055 \times 10 \times (1 + 0,3)}{2 \times 205 \times 10^9 \times 1,962 \times 10^{-3}} = 3,10 \times 10^{-8}$$

CAPITOLO 5

L'ATTIVITA' DI COLLAUDO

5.1 Generalità

Così come già evidenziato l'attività di collaudo rappresenta la fase finale di ogni processo costruttivo, in quanto esso si concretizza in varie operazioni tese a verificare che l'oggetto del collaudo soddisfi le specifiche di progetto o quelle di legge, oppure quelle contrattuali.

Ogni operazione di collaudo termina quindi con un giudizio emesso dal collaudatore e, nel caso di esito positivo, occorre che le costruzioni o gli oggetti abbiano superato “cum laude” l'esame o la verifica.

L'attività di collaudo è quindi un'attività professionale che richiede non solo la profonda conoscenza dei processi progettuali ed esecutivi, ma anche quella relativa alle normative che presiedono alla costruzione delle opere, degli impianti e degli oggetti, nonché agli aspetti più squisitamente contrattuali.

E' importante precisare che le normative di natura tecnica e giuridica sono numerose e quindi non si prestano a essere riportate in un testo teso a svolgere le funzioni di ausilio didattico.

Ma non si può sottacere l'importanza, per il collaudatore, di reperire e comprendere tutte le normative che presiedono alla costruzione dell'oggetto da collaudare, anche se, nei tempi attuali, la “schizofrenia legislativa” che ha spesso caratterizzato il nostro Paese, rende ardua e complessa tale ricerca. Non sfuggirà all'Allievo ingegnere l'importanza di acquisire tutti i dati normativi, che sono, unitamente a quelli contrattuali, la base fondamentale per l'attività di collaudo.

5.2 Classificazione dei collaudi

Esistono varie possibilità di classificare i collaudi, sia in relazione all'oggetto da collaudare sia in riferimento al tipo di prove che devono essere eseguite, sia infine alle finalità che si prefigge l'atto di collaudo.

Una elencazione, seppure non esaustiva, dei collaudi in funzione dell'oggetto da collaudare è la seguente:

- collaudo di macchine utensili (macchine a controllo numerico, ecc.);
- collaudo di macchine motrici (pompe, motori a combustione interna, ecc.);
- collaudo di macchine generatrici;
- collaudo di macchine di sollevamento e trasporto (gru, autogru, ecc.);
- collaudo di impianti antincendio;
- collaudo di impianti di riscaldamento, condizionamento e refrigerazione;
- collaudo di strumenti di misura;
- collaudo di generatori di vapore;
- collaudo di strutture metalliche;
- collaudo di saldature;
- collaudo di impianti di distribuzione gas.

Altri collaudi, classificati in base alla tipologia delle prove, possono essere:

- collaudi dimensionali;
- collaudi geometrici;
- collaudi dinamici;
- collaudi termici;
- collaudi di rumorosità.

Infine, in relazione alla finalità che persegue il collaudo, essi, possono classificarsi in:

- collaudi tecnico-amministrativi;
- collaudi statici;
- collaudi funzionali.

Se i collaudi vengono eseguiti, a costruzione ultimata, vengono denominati Collaudi Finali. Se invece il collaudatore segue l'opera in ogni fase costruttiva, si parlerà di Collaudi in Corso d'Opera.

5.3 Strumentazioni e tecniche di collaudo

Le strumentazioni da adoperare nelle attività di collaudo sono estremamente numerose e diversificate e pertanto non si prestano ad una puntuale elencazione. Di seguito si riportano le strumentazioni più usuali che vengono utilizzate nell'ambito dei collaudi statici e dinamici.

Nel caso dei collaudi statici, gli strumenti più usati sono:

- livelle e clinometri;
- strumenti topografici in generale;
- estensimetri elettrici, meccanici, acustici;
- calibri;
- celle di carico;
- comparatori;
- durometri;
- flessimetri.

Mentre nell'ambito di misure dinamiche vengono usati:

- tachimetri;
- accelerometri;
- vibrometri;
- trasduttori vari (potenziometrici, capacitivi, ecc.);
- strumentazione stroboscopica;
- strumentazione di vibrometria a laser.

Di norma i vari dati vengono acquisiti ed elaborati, anche mediante sistemi computerizzati. Ad esempio tra quelli più utilizzati vi sono gli analizzatori di spettro, che consentono di eseguire direttamente le trasformazioni di Fourier.

Tra i metodi più utilizzati per l'esecuzione dei collaudi possono annoverarsi:

- metodo visivo;
- misura della temperatura;
- misura del rumore;
- misura della portata;
- misure ultrasoniche;
- misure di vibrazioni;
- analisi sui materiali e sui lubrificanti.

Particolare importanza assume il metodo visivo, che, a prima vista, potrebbe sembrare affetto da numerosi e gravi imprecisioni.

Invece esso costituisce per il collaudatore il primo metodo per percepire anomalie o difetti, soprattutto in virtù delle pregresse esperienze acquisite. Gli attuali strumenti che sono in grado di migliorare la percezione visiva (microscopi, endoscopi, stroboscopi, ecc.) rappresentano un valido ausilio per il collaudatore il quale viene spesso posto in grado, anche mediante di sistemi di visione artificiale, di eseguire i primi controlli.

Particolare importanza assumono poi i cosiddetti controlli non distruttivi, cioè quei controlli che non comportano la distruzione del campione su cui vengono eseguiti. Basti pensare per esempio all'accertamento delle caratteristiche meccaniche dei materiali, che comprende una vasta serie di prove distruttive concernenti le sollecitazioni statiche di trazione, di taglio, di flessione, di fatica, ecc.

Gli esami non distruttivi invece possono essere eseguiti direttamente sui pezzi finiti sia in fase di lavorazione per il controllo della qualità, sia in fase di manutenzione per accertare l'integrità dei pezzi nell'impiego.

Appare evidente che le prove distruttive, per le produzioni in serie, vengono effettuate su un piccolo numero di pezzi con le procedure proprie della statistica, in modo da contenere i costi e da avere indicazioni sulla qualità dell'intera produzione. Talvolta, se sono in gioco problemi connessi alla sicurezza, le prove distruttive

concernono tutti gli elementi della produzione. Un esempio è costituito dai serbatoi per GPL destinati alle autovetture, che, in virtù di precise e severe normative, devono essere tutti, nessuno escluso, collaudati alla pressione di 45 bar e cioè circa 10 volte la pressione di esercizio. Inoltre solo l'un per cento dei serbatoi, scelto a caso, viene sottoposto ad una prova distruttiva che dimostri l'effettiva resistenza oltre la pressione di 100 bar.

Le prove non distruttive sono soprattutto tese a verificare la presenza di difetti superficiali, discontinuità interne, inclusioni di gas, inclusioni di solidi, fessurazioni, segregazioni, attraverso metodologie standardizzate.

Poiché le tecniche che possono essere utilizzate per tali prove sono numerose, il collaudatore deve essere in grado di scegliere anche la tecnica più opportuna per diagnosticare un difetto.

Tale scelta è influenzata sia dal tipo di anomalia da rilevare, sia dal tipo di materiale, sia dalle caratteristiche geometriche e di accessibilità delle zone di indagine.

CAPITOLO 6

COLLAUDO DI IMPIANTI INDUSTRIALI

6.1 Generalità

Il collaudo degli impianti industriali si pone, di norma, tra le attività più qualificanti dell'ingegnere industriale, che dovrà pertanto conoscere anche gli aspetti produttivi che l'impianto dovrà realizzare.

Soprattutto nell'era moderna, in cui esistono numerosissime normative e disposizioni legislative in materia di attività industriale, occorre che il collaudatore prima di procedere alle attività di collaudo prenda visione puntuale di tutti gli elaborati progettuali e approfondisca tutte le normative che concernono l'attività.

A titolo meramente esemplificativo, si riportano le principali materie nelle quali il nostro Paese e l'Unione Europea hanno introdotto numerose disposizioni, che danno luogo anche ad una notevole serie di adempimenti:

- prevenzione degli infortuni;
- igiene del lavoro;
- urbanistica;
- tutela del paesaggio;
- opere in conglomerato cementizio armato e strutture metalliche;
- costruzioni in zona sismica;
- contenimento dei consumi energetici;
- inquinamento acustico;
- scarichi d'acqua;
- scarichi di gas;
- rifiuti solidi industriali;
- antincendio;
- generatori di calore;
- apparecchi a pressione.

Indipendentemente dalle norme di legge e di buona tecnica, il collaudatore dovrà sempre tener presente che la sua attività è tesa a esercitare il controllo sui mezzi, gli impianti, gli ambienti utilizzati nelle singole attività industriali, al fine di tutelare soprattutto quel diritto naturale dell’Uomo a godere della sua incolumità.

L’attività di collaudo di un impianto industriale presuppone quindi non solo l’ampia conoscenza delle normative che regolano tale attività, ma anche la conoscenza dei processi di produzione e degli impianti coinvolgendo attività multidisciplinari, che potrebbero richiedere l’apporto anche di altri professionisti.

6.2 Fasi del collaudo

Prima di procedere all’attività di collaudo vera e propria, è necessario che venga effettuato un **controllo finale del corretto montaggio** degli impianti, delle macchine e delle attrezzature, mediante una serie di atti, che possono così riassumersi:

- ispezione visiva dell’insieme dei macchinari costituenti l’impianto al fine di accertare che ogni parte e tutti gli equipaggiamenti relativi siano stati montati in conformità alle specifiche, disegni ed istruzioni dei progettisti e costruttori;
- ispezione all’interno di serbatoi, riduttori, circuiti di lubrificazione, circuiti di raffreddamento ed accurata pulizia degli stessi prima di procedere al riempimento;
- controllo che le apparecchiature elettriche non siano posizionate in modo da causare impedimento alla manutenzione di altre apparecchiature o in aree dove possano essere danneggiate dai mezzi di manutenzione o da dispositivi dell’impianto stesso (per esempio in prossimità di scarichi di valvole di sicurezza);
- controllo della messa a terra di tutte le apparecchiature, quadri, motori, conduits, passerelle porta cavi;
- controllo targhette di identificazione;

- controllo della corretta dislocazione di tutti i segnali antinfortunistici prescritti dalle norme o ritenuti necessari per la sicurezza del personale.

Una volta effettuato il controllo finale del corretto montaggio, è necessario assicurarsi, mediante **prove in bianco**, della funzionalità degli impianti. Tali prove afferiscono, di norma, **parti meccaniche** e **parti elettriche**. Di seguito si espongono i principali controlli da effettuarsi per quanti attiene le due parti:

a) parte meccanica

- controllo che tutte le operazioni di pulizia delle macchine, la lubrificazione dei punti di ingrassaggio manuale, il riempimento dei serbatoi, dei riduttori, dei circuiti di lubrificazione e dei giunti idraulici, siano stati eseguiti con fluidi ed i lubrificanti prescritti dai costruttori;
- controllo, con i motori scollegati, che tutti i cinematismi siano sbloccati e liberi di muoversi;
- decapaggio, pulizia, flussaggio, prove di pressione e tenuta delle tubazioni;

b) parte elettrica

- prove di isolamento degli olii isolanti e degli avvolgimenti;
- controllo degli impianti di messa a terra;
- verifiche del corretto livello dell'olio nei trasformatori e nelle altre apparecchiature isolate in olio, nonché controllo di eventuali perdite;
- controllo che nei quadri non vi siano conduttori elettrici non isolati o collegati provvisoriamente;

Completata la fase delle prove in bianco occorre procedere alle **prove a vuoto**. Esse vengono eseguite sull'intero impianto o su parti di esso in assenza di materia prima o di prodotti da trasformare mediante l'utilizzo delle fonti energetiche ed in particolare dell'energia elettrica.

Scopo di tali prove è quello di verificare, simulando le condizioni operative, i cinematismi degli organi meccanici ed elettrici, la sincronizzazione dei movimenti, la sequenza dei cicli operativi, la funzionalità dei segnali di allarme e di emergenza.

In particolare esse prevedono:

a) *per la parte meccanica:*

- verifica del funzionamento e dell'efficienza di tutti i servizi ausiliari;

- controllo degli accoppiamenti e del giusto senso di rotazione dei motori elettrici;
 - registrazione meccanica di tutte le apparecchiature quali freni, fine corsa, ecc.;
 - esecuzione, ove previsto, del rodaggio delle singole macchine;
- b) per la parte elettrico strumentale:*

- controllo ed accertamento della corretta funzionalità dei sistemi di comando, consenso e blocco;
- prove di continuità della circolazione della corrente elettrica in cavi e conduttori;
- verifica della funzionalità dei circuiti di commutazione dalla rete di alimentazione normale a quella di emergenza;

Solo dopo aver verificato il funzionamento con le prove a vuoto si procede, mediante **prove sotto carico**, a verificare il funzionamento dell'impianto nel suo insieme con la presenza di materia prima o di prodotti da trasformare.

In occasione di tali prove vengono verificati essenzialmente:

- i parametri produttivi;
- le sequenze funzionali;
- gli allarmi e gli interventi di emergenza;
- gli azionamenti idraulici;
- gli azionamenti oleodinamici e pneumatici.

6.3 Collaudo provvisorio e definitivo

Una volta espletate con esito favorevole le prove descritte nel precedente paragrafo, si può passare alla fase vera e propria di collaudo, durante la quale il collaudatore effettuerà tutti quei controlli, prove ed esami atti ad accertare la reale e corrispondenza dell'impianto alle normative di legge, al progetto e agli obblighi contrattuali.

Di norma il committente ha la possibilità di distinguere la fase di collaudo in due sottofasi: la prima, detta di **Collaudo provvisorio**, e la seconda di **Collaudo definitivo**.

Con l'esito positivo del Collaudo provvisorio l'impianto viene di norma accettato provvisoriamente dal committente, rimanendo alle imprese esecutrici l'obbligo della manutenzione e della conservazione sino al collaudo definitivo.

La manutenzione e la conservazione consistono di tutti gli interventi e le prestazioni per mantenere le opere civili, le strutture metalliche, i macchinari e gli equipaggiamenti componenti l'impianto efficienti ed in buono stato d'uso.

In questo periodo l'impresa è altresì tenuta ad eliminare difetti e manchevolezze che fossero divenuti evidenti dopo l'esecuzione del collaudo provvisorio.

Entro i termini contrattualmente previsti (in genere 12 mesi dal collaudo provvisorio) avrà luogo il **Collaudo definitivo**. Esso accerterà la rispondenza alle prescrizioni contrattuali delle opere civili e degli impianti montati e verificherà che le eventuali modifiche o riparazioni, concordate nel corso del collaudo provvisorio, siano state eseguite. Verrà quindi emesso, a collaudo favorevole, il Certificato di Accettazione Definitiva, che, di norma, libera le somme trattenute a garanzia ed eventuali fidejussioni.

Occorre ricordare che il collaudatore dovrà approfondire ogni impegno, affinché le prove siano eseguite correttamente, in quanto è proprio nel momento in cui l'impianto comincia a funzionare che possono emergere difficoltà legate alla progettazione ed alla costruzione degli equipaggiamenti e dei macchinari che lo compongono.

Difetti dovuti a materiali inadatti o incompatibili, spessori non adeguati, isolamenti non difettosi, saldature non correttamente eseguite, ecc., dovrebbero essere stati individuati e/o ridotti al minimo, qualora le prove siano state svolte in maniera adeguata.

L'eventuale riduzione od omissione di attività fondamentali quali radiografie di saldature, prove con gli ultrasuoni, operazioni di flussaggio, prove idrauliche ed altre procedure di avviamento, comporterebbe un consistente aggravamento del rischio.

E' inoltre raccomandabile che alle operazioni di avviamento siano presenti i fornitori delle macchine principali che, oltre a supervisionare le operazioni stesse, sono in grado di affrontare e risolvere con tempestività quegli imprevisti normalmente collegati al collaudo di macchine ed impianti di nuova costruzione.

CAPITOLO 7

MISURE DEI PARAMETRI INERENTI I GENERATORI DI VAPORE

7.1 Generalità

Un generatore di vapore è costituito da un assieme di organi che servono a produrre calore e a trasferirlo ad un fluido che deve essere riscaldato e vaporizzato.

I fluidi utilizzati possono essere diversi (mercurio, glicol etilenico, acqua, ecc.). Nel presente capitolo si farà riferimento ai generatori di vapore di acqua, i quali vengono utilizzati ampiamente per ottenere energia meccanica, energia elettrica e per fornire il calore necessario a vari processi industriali.

Si ritiene opportuno ricordare di seguito la definizione degli elementi caratteristici di un generatore di vapore:

- a) **Potenza**: rappresenta la quantità di vapore prodotta in 1 ora e viene per lo più misurata in Kg/h. E' ovviamente necessario precisare lo stato termodinamico del vapore e cioè la sua pressione e la sua temperatura. In tal caso, noto il contenuto termico del Kg di vapore prodotto, la potenza può essere convenientemente espressa in Watt.
- b) **Potenza specifica**: rapporto tra i Kg di vapore prodotti in 1 ora e la superficie di riscaldamento (Kg/mqh).
- c) **Pressione di bollo**: rappresenta la pressione effettiva massima alla quale il generatore può funzionare regolarmente. L'unità di misura può essere espressa in Pascal, bar, Kp/cmq. Il valore della pressione di bollo è rilevabile dal

Libretto Matricola dell'apparecchio e dall'apposito bollo esistente al centro della targa apposta sul generatore.

- d) **Pressione di esercizio**: rappresenta la pressione, minore o uguale a quella di bollo, alla quale di norma viene fatto funzionare il generatore.
- e) **Superficie di riscaldamento**: è l'area espressa in m² della superficie lambita da un lato dai fumi e dall'altro dall'acqua. Viene misurata dalla parte esposta ai fumi.
- f) **Carico termico volumetrico della camera di combustione**: rapporto tra la quantità di calore sviluppata dalla combustione nell'unità di tempo e il volume della camera di combustione (W/m³ o Kcal/m³h).
- g) **Carico termico superficiale della camera di combustione**: rapporto tra la quantità di calore sviluppata nella camera di combustione nell'unità di tempo e la superficie di riscaldamento della camera di combustione (W/m² o Kcal/m²h).
- h) **Rendimento del generatore**: rapporto tra calore trasmesso al fluido e calore sviluppato dalla combustione.
- i) **Indice di vaporizzazione**: rapporto tra la massa di vapore prodotta e la massa di combustibile bruciata nello stesso tempo (Kg vapore/Kg combustibile).

7.2 Classificazione dei generatori di vapore.

I generatori di vapore possono essere classificati in vario modo, cioè in riferimento alle modalità di installazione, ai valori della pressione, al tipo di combustibile, all'ubicazione del focolare o al volume d'acqua in essi contenuto.

Con riferimento all'installazione i generatori si distinguono in:

- Generatori fissi;
- Generatori semifissi;
- Generatori mobili.

Con riferimento alla pressione di esercizio, essi si distinguono in:

- generatori a bassa pressione fino a 1 bar;
- generatori a media pressione da 1 a 15 bar;
- generatori ad alta pressione da 15 a 100 bar;
- generatori ad altissima pressione oltre 100 bar.

In relazione al tipo di combustibile utilizzato, si hanno:

- generatori a combustibile solido (in pezzatura o polverizzato);
- generatori a combustibile liquido;
- generatori a combustibile gassoso.

Con riferimento all'ubicazione del focolare, i generatori sono così suddivisi:

- generatori a focolare interno (il focolare entra tutto a far parte della superficie di riscaldamento);
- generatori a focolare esterno.

Con riferimento al volume d'acqua in essi contenuto si ha:

- generatore a grande volume d'acqua da 130 a 250 lt. per mq di superficie riscaldata;
- generatore a medio volume d'acqua da 70 a 130 lt.;
- generatore a piccolo volume d'acqua meno di 70 lt.

Spesso si adoperano ulteriori classificazioni in relazione al percorso effettuato dai fumi, ai valori della pressione in camera di combustione ed al tipo di movimento dell'acqua dell'interno del generatore.

Con riferimento al percorso dei fumi, i generatori vengono distinti in:

- generatori a tubi di fumo se l'acqua bagna la parete esterna dei tubi al cui interno circolano i fumi caldi;
- generatori a tubi d'acqua se l'acqua passa nell'interno dei tubi e i fumi all'esterno.

Per quanto concerne la pressione della camera di combustione si avranno:

- generatori con camera in depressione (tiraggio naturale e tiraggio bilanciato);
- generatori con camera in pressione.

In riferimento al movimento dell'acqua nell'interno del generatore, si avranno vari tipi di circolazione e cioè:

- a circolazione naturale;
- a circolazione accelerata;
- a circolazione forzata (unico circuito).

7.3 Principali norme sulla costruzione dei generatori di vapore

Al fine di garantire la massima sicurezza di esercizio, in relazione alle notevoli pressioni interne, sia in relazione alle sollecitazioni cui sono sottoposti i vari componenti, la progettazione, la costruzione, l'esercizio dei generatori di vapori sono sottoposti, per legge, al controllo di vari enti pubblici o di enti autorizzati (ISPESL, ASL, Organismi certificati, ecc.).

Prima della costruzione, il progetto di un generatore, firmato da un tecnico abilitato per legge, deve essere debitamente approvato.

Le principali norme cui occorre fare riferimento sulla costruzione e sul collaudo dei generatori di vapore sono:

- Direttiva PED 97/23 EC;
- Linee guida 08/15 della Direttiva PED 97/23 EC;
- Norme armonizzate EN 12952;
- D.M. 21.11.1972;
- Raccolta VSR per apparecchi a pressione;

- Raccolta VSG per generatori di vapore;
- Raccolta S per le saldature;
- Raccolta M per i materiali.

L'attività di collaudo di un generatore di vapore si articola in varie prove:

- prove di collaudo eseguite per controllare le risposdenze del funzionamento del generatore al progetto o alle clausole dei contratti di fornitura;
- prove di collaudo eseguite su singole parti;
- prove di collaudo eseguite dopo lavori di riparazione, che abbiano comportato lo smontaggio o la sostituzioni di parti o di elementi essenziali;
- prove sperimentali per accertare il comportamento del generatore se sottoposto a sollecitazioni superiori a quelle del normale esercizio.

Le norme prevedono anche le modalità di effettuazione dei collaudi.

7.4 Prove di collaudo inerenti la determinazione del rendimento.

Nel presente paragrafo si vuole illustrare la metodologia da adoperarsi per effettuare la prova idonea ad accertare la conformità dei valori del rendimento a quanto dichiarato dal Costruttore.

A tal proposito si ricorda che il rendimento termico percentuale di un generatore di calore è rappresentato dal rapporto fra la quantità di energia utilizzata e la quantità di energia spesa.

La conoscenza del rendimento è fondamentale in quanto essa permette di esprimere valutazioni di merito in riferimento alla qualità del generatore.

Allorquando occorre procedere alla valutazione sul campo del rendimento del generatore, occorre effettuare un bilancio di energia per valutare la quantità di energia fornita dalla combustione del combustibile e la quantità di energia assorbita dall'acqua per riscaldarsi e trasformarsi in vapore saturo, o nel caso di generatori con surriscaldatore, la quantità di calore assorbita dal vapore per surriscaldarsi.

La misura della quantità di calore trasferito all'acqua per portarla allo stato di vapore surriscaldato si effettua determinando:

- a) la quantità di vapore prodotto;
- b) il titolo;
- c) la pressione;
- d) la temperatura se si tratta di vapore surriscaldato.

Ovviamente è necessario conoscere anche la temperatura dell'acqua di ingresso al fine di tener conto dell'energia fornita all'acqua prima di entrare in caldaia.

Si vuole di seguito fare un esempio per la determinazione del rendimento, nel caso in cui il generatore sia così caratterizzato:

- Produzione: 10 t/h di vapore surriscaldato a 40 bar assoluti e 500°C;
- Temperatura acqua di alimentazione: 120°C;
- Consumo olio combustibile: 805 kg/h riscaldato a 100°C;
- Potere calorifico inferiore dell'olio combustibile 40,8 MJ/kg.

Nelle condizioni indicate, dalle tabelle del vapore surriscaldato si ricava che 1 kg di vapore è caratterizzato da una quantità di energia pari a 3,44 MJ, mentre un 1 kg di acqua alle condizioni su esposte è contraddistinto da circa 0,5 MJ.

Pertanto per ogni kg di vapore prodotto, la quantità di energia utilizzata è pari a

$$3,44 - 0,5 = 2,94 \text{ MJ/kg}$$

Essendo la produzione pari a 10 t/h e cioè 10.000 kg di vapore all'ora, la potenza termica utilizzata sarà

$$2,94 \times 10.000 / 3.600 = 8,16 \text{ MW}$$

La quantità di energia fornita dal combustibile è pari alla somma del calore sensibile per il preriscaldamento dell'unità di massa e del potere calorifico inferiore del combustibile stesso.

Essendo il combustibile preriscaldato a 100°C e considerando il calore specifico medio dell'olio combustibile pari a $0,00193 \text{ MJ/kg}^{\circ}\text{C}$, si può facilmente calcolare il calore sensibile relativo alla temperatura di 100°C . Esso risulta essere:

$$q_s = 0,00193 \text{ MJ/kg}^{\circ}\text{C} \cdot 100^{\circ}\text{C} = 0,193 \text{ MJ/kg}$$

Sommando tale valore al potere calorifero inferiore $H_i = 40,8 \text{ MJ/kg}$ si ha che la quantità di calore introdotta in camera di combustione con l'ingresso di 1 kg di combustibile è pari a:

$$0,193 + 40,8 = 40,99 \text{ MJ/kg}$$

Poiché il consumo è pari a 805 Kg/h la potenza termica spesa sarà:

$$40,99 \cdot 805 / 3600 = 9,17 \text{ MW}$$

Ragionando in termini di potenze termiche, la differenza tra potenza spesa e quella utilizzata è pari a

$$9,17 \text{ MW} - 8,16 \text{ MW} = 1,01 \text{ MW}$$

Tale valore rappresenta l'entità della potenza termica persa. Pertanto il rendimento percentuale η sarà:

$$\eta = \frac{8,16}{9,17} \times 100 = 89\%$$

Da quanto precedentemente esposto è evidente che, per procedere alla verifica dei valori di tale rendimento, il collaudatore dovrà verificare con idonea strumentazione i seguenti parametri:

- portata di vapore prodotto;
- pressione di vapore prodotto;
- temperatura del vapore prodotto;
- temperatura dell'acqua di alimento;
- portata del combustibile consumato;
- temperatura del combustibile all'ingresso del generatore;
- potere calorifero inferiore del combustibile.

L'Allievo farà utile esercizio redigendo un verbale di accertamento del rendimento termico nel quale, dopo aver descritto il programma delle prove, identificherà analiticamente la strumentazione da utilizzare ed i parametri da rilevare.

CAPITOLO 8

IL COLLAUDO DI UNA MACCHINA PROTOTIPALE

8.1 Introduzione

Nel presente capitolo si vuole prendere in esame un particolare tipo di collaudo relativo ad una macchina prototipale realizzata dal Centro Italiano Ricerche Aerospaziali di Capua e che ha visto l'autore svolgere le funzioni di Direttore dei lavori.

Tale macchina, denominata LISA "Laboratory of Impact Tests on Aerospace Structure", è stata costruita dalla FERRARI S.p.A. Progetti Speciali di Modena, che ne ha curato anche la progettazione esecutiva. Il collaudo è stato effettuato dal Prof. Mariano CANNAVIELLO dell'Università di Napoli.

La citata macchina, la cui descrizione sarà effettuata in seguito, rappresenta un utile esempio didattico per stimolare l'attenzione degli Allievi verso le procedure di collaudo funzionale e prestazionale di sistemi complessi.

Essa, per le sue caratteristiche tipologiche e costruttive, rappresenta un importante modello di sistema complesso che coinvolge conoscenze non solo di carattere meccanico ma anche di carattere elettronico.

Finalità della macchina è l'esecuzione di prove di impatto, per lo più distruttive, nelle quali un oggetto di prova (aeromobile, veicoli spaziali, ecc.) viene portato, con angoli e velocità predeterminate ad urtare con l'ausilio di un sistema di accelerazione tre differenti superfici di impatto: superficie dura (in conglomerato cementizio), superficie soffice (erba) e superficie d'acqua.

8.2 Descrizione della macchina

La macchina in questione è costituita da un insieme di macrostrutture e di vari sottosistemi che, opportunamente utilizzati, consentono di eseguire le prove di impatto. In riferimento alla figura, ove è illustrata l'intera struttura si distingue un portale, un sistema di elevazione del portale, un sistema di sollevamento del carrello, un sistema di frenatura del carrello stesso, torre di appoggio e un sistema idraulico associato al sistema di elevazione del portale.

Il portale a mezzo dei suoi piedritti costituisce la guida al moto del carrello e quindi determina, con le sue caratteristiche geometriche di rigidità, la traiettoria dell'oggetto di prova.

Il portale stesso è vincolato a terra attraverso due cerniere poste ai piedi dei piedritti, che consentono di variare l'inclinazione da 5° a 90°.

Il sistema di elevazione consente di movimentare l'intero portale



dalla posizione di riposo (5° rispetto all'orizzontale) in appoggio sulle torri di sostegno, fino all'angolazione richiesta per la prova stessa.

Il sistema è costituito da due coppie di attuatori: la prima coppia relativa a degli attuatori principali agisce per l'intera corsa del portale, mentre la coppia di attuatori secondari collabora all'elevazione solo nella prima fase e cioè per angoli compresi tra 5° e 20°.

8.3 Sistema di monitoraggio e controllo

Tale sistema costituisce il cuore dell'intero impianto in quanto esso assicura l'esecuzione di tutte le procedure di controllo pre e post prova e unitamente al simulatore di prova permettono da una parte la ottimizzazione della prova e dall'altra l'ottimizzazione della manutenzione.

Vale la pena ricordare che le prove di impatto eseguite mediante l'impianto LISA sono caratterizzate da oggetti di prova di elevatissimo costo ed è quindi indispensabile assicurare che la prova non fallisca e cioè che avvenga la distruzione dell'oggetto senza il rilevamento e l'acquisizione dei dati di prova.

Se ciò non accadesse il danno economico risultante sarebbe ingente.

In generale si possono così elencare le principali componenti del sistema:

- un insieme di sensori in grado di misurare le grandezze caratteristiche dell'impianto;
- un sistema di controllo necessario per la movimentazione e lo sgancio del carrello;
- un sistema di acquisizione e di memorizzazione dei dati di prova;
- un sistema di controllo e di inibizione delle varie fasi pre-prova;
- dispositivi di visualizzazione e stampa di tutte le grandezze sotto controllo;
- un sistema in grado di evidenziare, per il gestore dell'impianto, criticità concernenti la sicurezza della prova e delle aree di prova.

Le principali funzioni svolte dal sistema sono:

- monitoraggio e acquisizione dei dati inerenti le grandezze caratterizzanti l'impianto;
- gestione di tutti i comandi per il posizionamento del portale e del carrello nonché dei comandi del compressore di caricamento aria per il sistema di accelerazione del carrello;

- registrazione, durante la prova di tutti i parametri di configurazione dell'impianto delle condizioni di prova e di qualsiasi altra grandezza necessaria alla caratterizzazione univoca della prova stessa;
- controllo e azionamento del sistema di acquisizione dei dati e del sistema di ripresa veloce mediante telecamere;
- gestione dei comandi relativi allo sgancio del carrello e al rilascio dell'oggetto da provare.

Il sistema è altresì integrato da un apposito software in grado di elaborare i dati acquisiti nella prova, di monitorare le condizioni di efficienza e di manutenzione, di ottimizzare la prova stessa.


8.4 Le operazioni di collaudo del LISA

Il collaudo dell'impianto è stato effettuato anche in corso d'opera, mediante l'esecuzione di numerosi controlli necessari per verificare la conformità dell'esecuzione alle regole dell'arte e alle prescrizioni contenute nel Capitolato Speciale d'Appalto. Il collaudo ha riguardato due profili: quello tecnico-funzionale e quello amministrativo.

Per il collaudo tecnico-funzionale, nel corso dei lavori sono stati compiuti numerosi controlli e prove, sia dell'intero sistema che dei suoi sottosistemi.

A puro esemplificativo si riportano di seguito alcuni esempi di controlli effettuati in corso d'opera.

Nella figura successiva è rappresentato il controllo radiografico effettuato su un serbatoio

 CIRA <small>S.C.p.A. CENTRO ITALIANO RISERCHES AEROSPAZIALI</small>	LISA PROGRAMMA GENERALE DELLE ATTIVITÀ	DOCUMENT NUMBER
		IDENTIFICATIVO
		MC-4B-2837-7-PL-0004
		REV. 2
		DATE 31/01/1999
		PAG. 5

Nel presente documento sono riportate le certificazioni di seguito elencate relative all'esecuzione del portale Impianto LISA:

- ☐ Certificati materiali di origine
- ☐ Rintracciabilità materiali utilizzati
- ☐ Certificati di controllo visivo e dimensionale
- ☐ Certificati di controllo magnetoscopico
- ☐ Certificati di controllo ultrasonoro
- ☐ Certificato di controllo verniciatura
- ☐ Specifiche e qualifiche dei procedimenti di saldatura
- ☐ Qualifiche dei saldatori e degli operatori per controlli non distruttivi


QC 18	
EUROTRAVI TRAVI SALDATE	LISTA DOCUMENTI CONTENUTI DOCUMENT LIST CONTENTS
CLIENTE/CUSTOMER RUGGERINI PIETRO S.r.L.	
ORDINE CLIENTE/PURCHASE ORDER 98060-98061	
OGGETTO/OBJECT PORTALE PER IMPIANTO GRANDI PROVE DI CRASH	
ITEM TRAVI COMPOSTE SALDATE SCATOLARI	
PROGETTO/PROGET LABORATORIO "LISA"	
P.F.C. N° CDF1 03/99/951	
FASE N°/STEP N° 18	
<input checked="" type="checkbox"/> CERTIFICATI MATERIALI DI ORIGINE <input checked="" type="checkbox"/> RINTRACCIABILITÀ MATERIALI <input checked="" type="checkbox"/> CERTIFICATI CONTROLLO VISIVO E DIMENSIONALE CERTIFICATI CONTROLLI NON DISTRUTTIVI <input checked="" type="checkbox"/> CERTIFICATO CONTROLLI MAGNETOSCOPICI <input checked="" type="checkbox"/> CERTIFICATO CONTROLLI ULTRASONORI <input type="checkbox"/> CERTIFICATO CONTROLLI LIQUIDI PENETRANTI <input type="checkbox"/> CERTIFICATO CONTROLLO RADIOGRAFICO CERTIFICATI CONTROLLI DISTRUTTIVI <input type="checkbox"/> CERTIFICATO PROVE MECCANICHE <input type="checkbox"/> CERTIFICATO ANALISI CHIMICHE CERTIFICATI CONTROLLO TRATTAMENTI PROTETTIVI <input checked="" type="checkbox"/> CERTIFICATO CONTROLLO VERNICIATURA <input type="checkbox"/> CERTIFICATO CONTROLLO ZINCATURA A CALDO QUADERNO DI SALDATURA <input checked="" type="checkbox"/> SPECIFICHE PROCEDIMENTI DI SALDATURA <input type="checkbox"/> LISTA SPECIFICHE DI SALDATURA <input checked="" type="checkbox"/> QUALIFICHE PROCEDIMENTI DI SALDATURA <input checked="" type="checkbox"/> QUALIFICHE SALDATORI <input type="checkbox"/> ELENCO SALDATORI QUALIFICATI <input checked="" type="checkbox"/> QUALIFICHE OPERATORI CONTROLLI NON DISTRUTTIVI	
CONTROLLO QUALITÀ QUALITY CONTROL EUROTRAVI S.R.L. UFFICIO CONTROLLO QUALITÀ QUALITY CONTROL OFFICE DATA/DATE: 20/07/99	ISPETTORE CLIENTE CUSTOMER INSPECTOR DATA/DATE:
ENTE ISPETTIVO TESTING AUTHORITY DATA/DATE:	

Nella figura successiva sono riportati invece i verbali di controllo delle verniciature nonché quello relativo del controllo magnetoscopico effettuato sulle travi saldate.


EUROTRAVI		VERBALE DI CONTROLLO VERNICIATURA		N° 337/99			
TRAVI SALDATE		PAINTING TEST REPORT		FOGLIO 1 DI 1 SHEET OF			
CLIENTE/CUSTOMER RUGGERINI PIETRO		ITEM LABORATORIO "LISA"	COMMESSA/JOB A951				
ORDINE CLIENTE/PURCHASE ORDER 98061-98060		PROGETTO/PROGET COLONNE MARCA B6-B7					
PREPARAZIONE DELLA SUPERFICE/SURFACE PREPARATION							
SA 1		SA 2 1/2	3	ALTRO/OTHER			
TIPO DI ABRASIVO : GRANIGLIA METALLICA ABRASIVE TYPE :							
VERNICIATURA/COATING MANO N°/ COAT N°		1	2	3			
TIPO DI VERNICE : PAINTING TYPE :		MUKI Z 3000	PENGUARD				
MARCA : TRADE NAME :		JOTUN	JOTUN				
SPESS. PELLICOLA : THK.FILM :		40 MICRON	40 MICRON				
COLORE/RAL N° : COLOUR/RAL N° :		GRIGIO	ROSSO OSSIDO				
DATA ISPEZIONE : INSPECTION DATE :		19/07/99	20/07/99				
VERNICIATURA/COATING MANO N°/ COAT N°		4	5	6			
TIPO DI VERNICE : PAINTING TYPE :							
MARCA : TRADE NAME :							
SPESS. PELLICOLA : THK.FILM :							
COLORE/RAL N° : COLOUR/RAL N° :							
DATA ISPEZIONE : INSPECTION DATE :							
SPESSORE TOTALE RISCONTRATO A FILM SECCO : MICRONS. THICKNESSES BUILD AT DRY FILM : MICRONS.							
MANO/COAT-MICRONS	1	2	3	4	5	6	TOT.
	50	40					90
PEZZI/MARCHE VERIFICATE-ITEMS/MARKS CHECKED							
TRONCO COLONNA MARCA B6 N° 1							
TRONCO COLONNA MARCA B7 N° 1							
P.F.C. N° CDF1 N° 03/99/951		FASE 17					
CONTROLLO QUALITA' QUALITY CONTROL EUROTRAVI S.R.L. UFFICIO CONTROLLO QUALITA' QUALITY CONTROL OFFICE		ISPETTORE CLIENTE CUSTOMER INSPECTOR		ENTE ISPETTIVO TESTING AUTHORITY			
DATA/DATE 20/07/99		DATA/DATE		DATA/DATE			

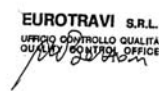
109

Infine è raffigurato un certificato di collaudo relativo alle caratteristiche meccaniche e all'analisi chimica di lamiere.

 Trametal s.p.a. <small>STABILIMENTO 35039 SAN GIORGIO DI NOGARO (UD) - VIA ENRICO FERMI, 44 - TELEFONO 0431/629987 (R.C. AUT.) TELEFAX 0431/629985 (R.C. AUT.) SEDE LEGALE: 35100 ALEGRE - VIA MONTENAPOLEONE, 21 CAP. SOC. 1.185.000.000 I.V. - C.C.I.A.A. IM.H. R.E.A. 312155 P. IVA 01182735151 - C.F. 0302990106 - REG. IMP. IM 50343</small>		CERTIFICATO DI COLLAUDO Inspection Certificate		<small>3.1. EU 21</small> <small>Data/Date 01/04/99</small>									
CLIENTE/CUSTOMER EUROTRAVI S.R.L. <small>Bolla 99002784 Del 31/03/99</small>		ORDINE/ORDER <small>Va. = 1 20 070 9</small> <small>Ns. 99001147</small>											
PRODOTTO/PRODUCT FE 510B													
COLATA N. LOTTO Heat	DIMENSIONI	CARATTERISTICHE MECCANICHE Mechanical Test						ANALISI CHIMICA Chemical Analysis					
		R_uH - (fy) N/mm²	Rm - (ft) N/mm²	A %	KV	a J	°C +20	C	Mn	Si	P	S	Al
2T2865/07/05A	020x1200x16570	378	582	28	96	101	104	0.170	1.510	0.270	0.012	0.007	0.037
2T2866/01/04A	020x1200x16360	355	547	28	135	129	115	0.180	1.520	0.260	0.014	0.003	0.046
2T2866/01/03A	020x1200x16360	355	547	28	135	129	115	0.180	1.520	0.260	0.014	0.003	0.046
2T2866/01/02A	020x1200x16360	355	547	28	135	129	115	0.180	1.520	0.260	0.014	0.003	0.046
2T2866/01/01A	020x1200x16360	355	547	28	135	129	115	0.180	1.520	0.260	0.014	0.003	0.046

CERTIFICHIAMO che il prodotto sopra elencato è conforme alla prescrizione dell'ordine: che i controlli della marcatura dell'aspetto superficiale e dimensionale hanno dato esito positivo.

CAPO COLLAUDO QUALITÀ
TRAMETAL S.P.A.
 IL COLLAUDATORE QUALITÀ


EUROTRAVI S.R.L.
 UFFICIO CONTROLLO QUALITÀ
 QUALITY CONTROL OFFICE


Ovviamente le figure sopra riportate vogliono solo illustrare la tipologia dei controlli effettuati, che sono stati numerosissimi per tutti i sottosistemi e i componenti dell'impianto.

Dopo aver effettuato i suddetti collaudi e controlli, sono state eseguite tutta una serie di prove sull'impianto completo.

Le prime hanno riguardato la verifica funzionale e strutturale dell'impianto integrato mediante l'esecuzione di:

- prova di azionamento e sostentamento del portale;
- prova del sistema di frenatura dei carrelli;
- prova del sistema di monitoraggio e controllo;
- prova del sistema di accelerazione;
- prova di cadute per gravità.

La prima prova era finalizzata alla verifica della capacità del sistema di posizionare il portale all'angolo prestabilito, compreso tra 5° e 90°, rispettando tutti i requisiti di prestazioni e di sicurezza riportati nel capitolato speciale di appalto e nelle specifiche di progetto.

Le parti dell'impianto sottoposte a prova sono state il portale, le torri di appoggio, i sistemi di azionamento e sostegno del portale con i relativi comandi.

Le modalità di effettuazione della prova sono state quelle di portare il portale dapprima dall'angolo di 5° a quello di 20° e poi, con l'intervento dei cilindri secondari, all'angolo massimo di 90°.

La prova di frenatura dei carrelli, oltre ad aver testato i sistemi e i sottosistemi prima elencati, ha interessato anche il carrello crash montato sul portale, il sistema di sgancio, il sistema di frenatura e il dispositivo di accelerazione.

La prova era finalizzata alla verifica della capacità del sistema di frenatura di assolvere i compiti previsti in piena sicurezza.

La prova è stata effettuata con il portale in posizione verticale e carrello alla massima altezza.

Da tale punto è stata comandata la caduta del carrello, accelerandolo fino alla velocità massima e poi valutando la capacità di frenatura.

La prova del sistema di monitoraggio e controllo era finalizzata alla verifica della sua capacità di effettuare tutti i comandi previsti sull'impianto, di monitorare le grandezze di stato, di memorizzare tutte le grandezze idonee per la verifica e la caratterizzazione strutturale dell'impianto.

La prova di accelerazione è stata invece eseguita allorquando era nella piena disponibilità l'intero impianto integrato in tutte le sue parti. Sono stati simulati ed eseguiti vari profili di prova con la verifica di tutte le prestazioni previste.

La prova di caduta per gravità è stata ovviamente effettuata con il posizionamento del portale a 90°, dal quale è stato sganciato il carrello.

E' opportuno evidenziare che prima e dopo le operazioni delle prove sopra citate sono state eseguite tutte le numerosissime procedure previste anche mediante controlli pre e post prova.