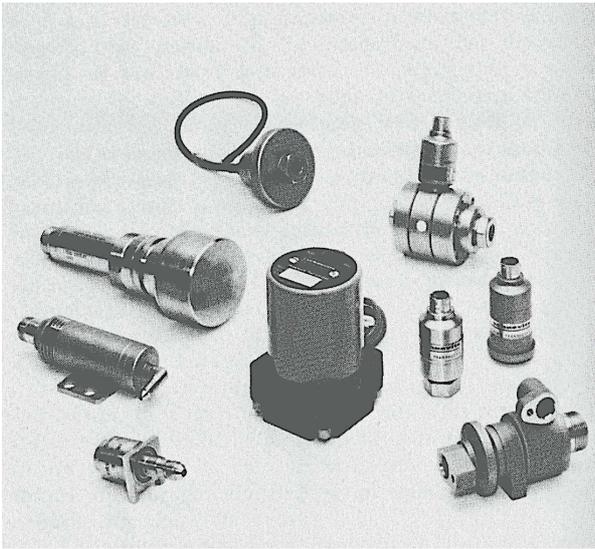


## Misura di pressione di un fluido

Storicamente, i primi strumenti che utilizzavano un LVDT furono i trasduttori di pressione. Oggi, i trasduttori di pressione ad LVDT sono dispositivi molto popolari per effettuare misurazioni di pressione di un fluido. Prima di parlare della costruzione e delle caratteristiche di questi tipi di trasduttori in maniera più specifica, vale la pena di considerare le misurazioni di pressione in generale. Fig.11



Alcuni modelli di trasduttori di pressione.

### La misurazione della pressione

La pressione è il carico di una forza per l'area unitaria. La pressione è spesso espressa in unità che riflettono la natura fisica della pressione come il pollice al quadrato (psi) o chilogrammi per centimetro quadrato ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ ). Può anche essere espressa in unità indirette come l'altezza di una colonna di un liquido di peso specifico conosciuto su cui grava la forza di gravità. Questo da origine ad altre unità come pollici di acqua, pollici di mercurio o millimetri di mercurio. I fattori per convertire la pressione da una unità in un'altra sono contenuti nell'Appendice D. Le misurazioni di pressione sono specificate in termini di pressione assoluta, pressione relativa o pressione differenziale. La differenza tra queste è il modo con cui è riferita la pressione di zero. Le misurazioni di **pressione assoluta** (psi) sono fatte su una scala di pressione che ha lo zero alla pressione assoluta. La pressione assoluta è definita come assenza completa di ogni pressione, inclusa l'atmosfera. In altre parole, la pressione zero assoluta è la misura del vuoto perfetto. La pressione assoluta è sempre una quantità positiva. La pressione atmosferica (barometrica) è generalmente espressa come pressione assoluta. Tipici valori della pressione barometrica al livello del mare, sono 14,7 psia o

30" Hg. La scala della pressione assoluta è mostrata in Fig. 11.1.

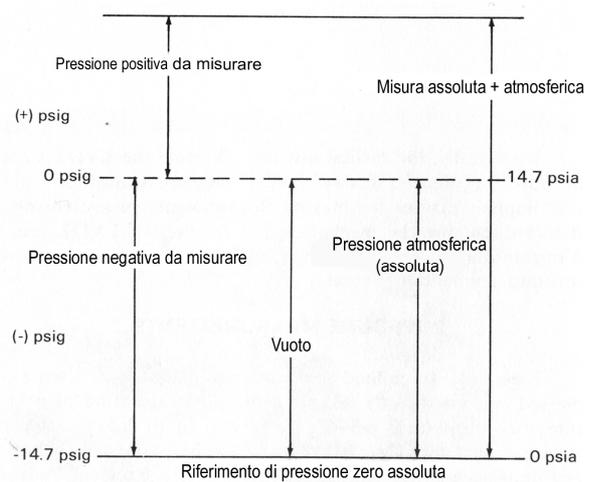


Fig.11.1 Relazioni tra le pressioni assoluta e relativa

**La pressione relativa** (psig) ha lo zero riferito alla pressione atmosferica. Se solo la pressione atmosferica agisce su un corpo, esso ha una pressione relativa di 0 psig. Un vuoto o una pressione più bassa dell'atmosfera, è considerata una pressione relativa negativa. Allora, il termine "relativa" o "vuoto", quando applicato ad un'unità di pressione, si riferisce ad una scala di pressione avente la pressione di riferimento zero alla pressione atmosferica, come mostrato in Fig. 11.1. Poiché la pressione atmosferica (barometrica) varia con le condizioni climatiche e l'altitudine, la pressione di zero relativa non sempre ha lo stesso valore su una scala di pressione assoluta. Mediamente, tuttavia, 0 psig è uguale a circa 14,7 psia o 30" Hg. Il confronto tra pressione relativa ed assoluta è mostrato in Fig.11.1. La pressione relativa può essere convertita in pressione assoluta aggiungendo la pressione atmosferica, 14,7 psi o 30" Hg (approssimativamente), al valore della pressione relativa. Viceversa si può ottenere una pressione relativa sottraendo la pressione atmosferica dalla pressione assoluta. Se è richiesta la massima precisione, si dovrebbe conoscere la pressione atmosferica del luogo. Per la maggior parte delle applicazioni, sono soddisfacenti i valori di 14,7 psi o 30" Hg.

**La pressione differenziale** (psid) è la differenza algebrica tra due pressioni qualsiasi. Una pressione è arbitrariamente selezionata o scelta come pressione di riferimento. Allora, la pressione differenziale può essere sia positiva che negativa, in funzione dell'ampiezza assoluta delle due pressioni interessate. Tutti gli strumenti che misurano direttamente la pressione sono fondamentalmente dispositivi di pressione differenziali. Uno strumento di pressione assoluta è, in effetti, uno strumento di misura di una pressione differenziale con una atmosfera di vuoto come pressione di riferimento.

Uno strumento di pressione relativa è effettivamente un dispositivo di pressione differenziale con la pressione atmosferica come sua pressione di riferimento.

### Trasduttori di pressione LVDT

Il fatto che la pressione sia una forza che agisce su un'area unitaria suggerisce qualche similitudine tra i trasduttori di pressione e di forza. Ma mentre un trasduttore di forza ha un elemento elasticamente deformabile che risponde ad un carico della forza in maniera unidirezionale, un trasduttore di pressione richiede un elemento elastico deformabile che possa rispondere alla pressione del fluido in ogni direzione. Quindi lo spostamento di tali elementi elastici dovuto alla pressione possono essere misurati con un LVDT.

In pratica i trasduttori di pressione usano, come elementi elastici deformabili, i tubi di Bourdon, soffietti metallici, diaframmi piatti oppure ondulati o capsule di pressione, come mostrato in Fig. 11.2.

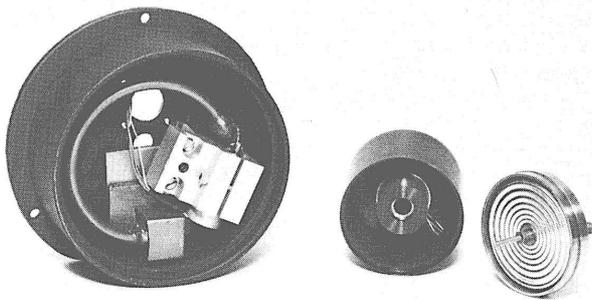


Fig.11.2 Trasduttori di pressione ad LVDT, smontati per mostrare gli elementi elastici

### Tubi di Bourdon

È un tubo metallico di sezione ellittica con l'asse disposto secondo un cerchio. Una estremità del tubo, quella in cui viene esercitata la pressione incognita, è fissata al corpo del manometro, mentre l'altra è lasciata libera e chiusa ermeticamente. Il suo principio di funzionamento è il seguente: il tubo metallico soggetto alla pressione interna, modifica drasticamente la forma ellittica della sua sezione trasversale cercando di assumere quella circolare, e poiché la lunghezza del tubo resta costante esso tende a disporsi con l'asse rettilineo. In tal modo l'azione della pressione si traduce in uno spostamento dell'estremità libera del tubo metallico. Se la pressione aumenta anche il raggio di curvatura aumenta. I quattro più comuni tipi di tubi Bourdon, sono a "C", a spirale, elico e attorcigliato come mostrati in Fig. 11.3.

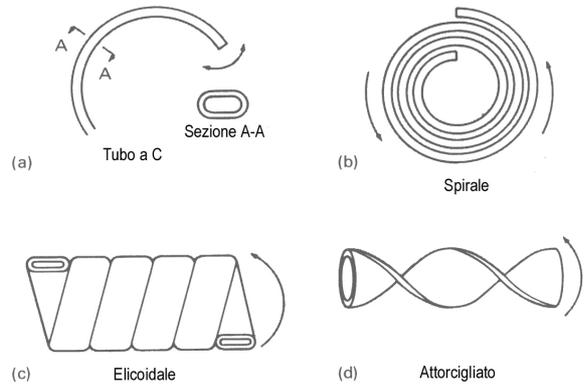


Fig. 11.3 Quattro tipi più comuni di tubi di Bourdon.

Nel tubo a "C", Fig. 11.3a, la pressione d'ingresso è nella parte estrema bloccata dal corpo del trasduttore, mentre la parte opposta è libera di muoversi. Questo tipo di tubo di Bourdon è il più comunemente usato nei trasduttori di pressione. Il *tubo a spirale*, Fig. 11.3b è simile al precedente eccetto che il suo raggio di curvatura, che cambia lungo tutta la lunghezza del tubo, creando una lunghezza del tubo più grande per una data circonferenza. Il numero dei giri della spirale possono cambiare. Poiché la lunghezza del tubo è maggiore, lo spostamento risultante è più grande. Tuttavia questa deformazione circolare più grande causa una non linearità maggiore all'uscita rispetto al tubo a "C".

Il *tubo elicoidale*, Fig. 11.3c, ammette l'utilizzo di un tubo più lungo con un raggio costante di curvatura. Mediamente il tubo può avere da due a sei giri. Il movimento della punta è più grande di quello di un tubo a "C" ed è più vicino ad essere circolare. L'aumento in lunghezza del tubo elicoidale è trascurabile. Il percorso della punta rimane nel piano perpendicolare rispetto alla mezzeria dell'ellisse, aumentando la lunghezza attiva del tubo. Lo spostamento della punta è dello stesso ordine di ampiezza (a parità di lunghezza di tubo) di quello in un tubo a "C". Il *tubo attorcigliato*, Fig. 11.3d, mantiene la mezzeria diritta lungo tutta la lunghezza del tubo, ma è attorcigliato rispetto alla mezzeria in modo uniforme. L'espansione del tubo dovuta alla pressione interna provoca lo svolgimento del tubo in maniera angolare intorno alla sua mezzeria. L'angolo di rotazione è proporzionale alla pressione applicata. La variazione di lunghezza del tubo sotto pressione, è trascurabile. Differenti angoli di curvatura alterano la rotazione angolare per ogni singola pressione e lunghezza del tubo.

### Trasduttori a tubo di Bourdon

La meccanica di un tipico trasduttore con tubo di Bourdon ad LVDT è mostrata in Fig. 11.4. Il nucleo dell' LVDT è attaccato al terminale libero del tubo

di Bourdon. La bobina è fissata sullo stesso blocco che trattiene la parte iniziale del tubo e la porta d'ingresso della pressione. Una molla a mensola ed una prolunga non magnetica mantengono il nucleo nel centro del trasformatore. Come si immette la pressione nel tubo, il suo raggio di curvatura aumenta, e la punta del tubo tira il nucleo verso l'alto. Se la deformazione del tubo è relativamente piccola, lo spostamento del nucleo è una funzione essenzialmente lineare della pressione d'ingresso. Fig.11.4

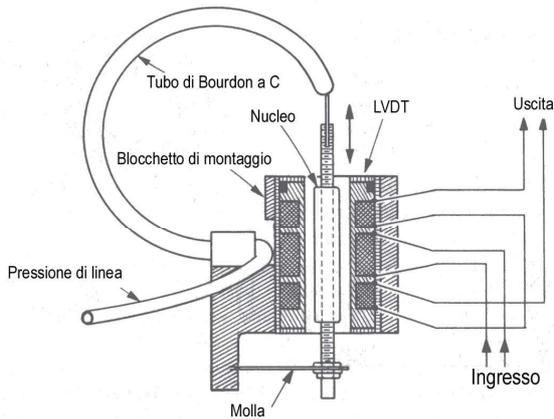


Fig.11.4 Schema di un trasduttore di pressione con tubo di Bourdon.

Trasduttori di pressione possono essere costruiti anche con tubi di Bourdon elicoidali od attorcigliati connettendo un trasduttore RVDT. Benché queste forme siano abbastanza rare comparate ai trasduttori che utilizzano il tubo a "C", le loro prestazioni sono comparabili a questi tipi di trasduttori.

### Caratteristiche dei trasduttori con il tubo di Bourbon

Questi tipi di trasduttori sono robusti e di lunga durata. Il materiale con cui i tubi sono costruiti includono l'acciaio inossidabile AISI 304 e 316, K-Monel ed Inconel X. Questi materiali permettono di utilizzare la maggior parte dei fluidi. I trasduttori a tubo di Bourdon possono coprire campi di pressione da 15 psig a 10.000 psig con un extra campo del 50%. L'assenza di perni e sorgenti di frizione determinano un'isteresi trascurabile ed una lunga vita di funzionamento. La tipica linearità è dello 0,2% può essere ottenuta sia applicando gli LVDT AC che gli LVDT DC. La frequenza naturale di un tubo di Bourdon cambia in funzione del campo di pressione, tende in ogni caso ad essere abbastanza bassa. Questo fattore, combinato con il volume del tubo, sconsigliano l'uso di questi trasduttori per frequenze alte o per misurazioni dinamiche. Per le normali applicazioni industriali a bassa frequenza sono tuttavia pienamente soddisfacenti.

### Trasduttori di bassa pressione

Soffietti ondulati assialmente, diaframmi ondulati radialmente, diaframmi lisci e capsule di pressione saldate sono alternative al tubo di Bourdon usati come elementi sensibili per il rilevamento di pressioni di basso livello. con i trasduttori a LVDT. Tutti questi elementi, mostrati in Fig. 11.5, reagiscono alla pressione deformandosi elasticamente nella direzione assiale. Fig.11.5

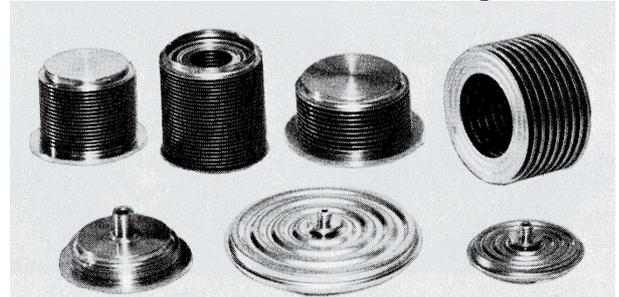


Fig.11.5 Tipici soffiotti, diaframmi e capsule per trasduttori di bassa pressione ad LVDT

Questo spostamento viene misurato da un LVDT. La differenza basilare tra soffiotti, diaframmi e capsule è la deflessione di ognuno per una data pressione e grandezza dell'elemento. Sottoposti a condizioni identiche di pressione, un diaframma ondulato si può deformare molto di più che uno piatto, il soffiotto si deforma di più sia di una capsula che di un diaframma ondulato. Fig.11.6

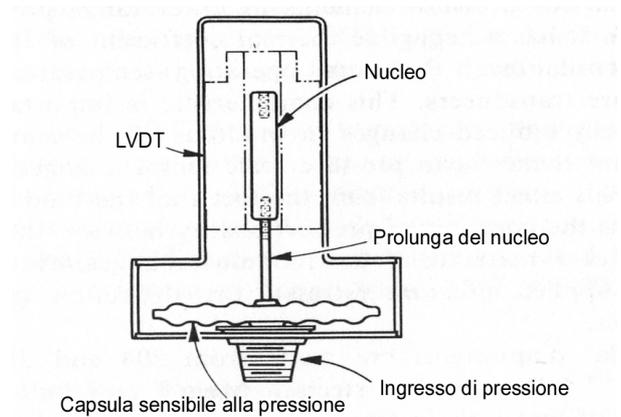


Fig. 11.6 Schema di un trasduttore di pressione ad LVDT con capsula.

Questi elementi sono usati generalmente nei trasduttori di bassa pressione, perché sviluppano una deformazione sufficiente per fare funzionare un LVDT, anche con pressioni di una frazione di psi. Per contro, i diaframmi piatti richiedono pressioni sostanzialmente più significative e quindi il loro utilizzo è destinato per pressioni elevate. La grande rigidità del diaframma piatto determina una caratteristica di risposta dinamica più elevata nei trasduttori che utilizzano questo elemento elastico.

## Materiali utilizzati per gli elementi elastici

Soffietti, capsule e diaframmi ondulati usati per i trasduttori di pressione sono fatti in acciaio inossidabile 304 o 17-4 PH o 17-7 PH, in bronzo fosforoso, o K-Monel o Ni-Span C. A meno che la corrosione sia la caratteristica maggiormente richiesta, il materiale preferenziale da utilizzare per l'elemento elastico per la misurazione di basse pressioni, è il Ni-Span C. Esso ha un coefficiente termico del modulo di elasticità trascurabile nel campo di temperatura operativo di un trasduttore di pressione. La caratteristica è importante, perché la variazione termica produce cambiamenti nel fattore di scala del trasduttore con conseguente variazione di uscita. Questo effetto deriva dal fatto che il modulo di elasticità non è costante ma variabile sia con la pressione che la temperatura, e rappresenta la proporzionalità tra tensione e deformazione del materiale. Se il modulo cambia, anche con una pressione applicata costante (tensione), la deflessione (deformazione) cambia di conseguenza. Tuttavia, teniamo presente che il valore del modulo di elasticità assume un valore abbastanza grande per cui occorrono grandi variazioni di pressione per ottenere variazioni sensibili di volume. I diaframmi piatti vengono costruiti in acciaio inossidabile tipo 304 e 316, 17-4 PH, K-Monel ed Inconel X. La scelta del materiale è fatta sulla base di fattori quali la vita a fatica e la resistenza alla corrosione. Sia l'acciaio inossidabile 17-4 PH che l'Inconel X-750 sono comunemente usati, ma il massimo della resistenza alla corrosione si ottiene con l'acciaio inossidabile 316. Alcuni di questi trasduttori per bassa pressione hanno dei fermi meccanici all'interno, ma gli elementi elastici possono essere rovinati da sovra pressioni intollerabili. Per questa ragione, si consiglia di porre attenzione al valore dell'extra pressione, durante la scelta del trasduttore.

## Caratteristiche dei trasduttori di bassa pressione a LVDT

I trasduttori di bassa pressione a LVDT che usano soffiotti o diaframmi ondulati hanno campi di pressione da  $10''\text{H}_2\text{O}$  (0,36 psi) a  $1000''\text{H}_2\text{O}$  (36 psi), sia per misure di pressione relativa, assoluta o differenziale, con una linearità tipica dello 0,5% ed una isteresi inferiore allo 0,1%. La capacità di sopportare una extra pressione cambia con il campo di funzionamento. Pertanto sarebbe opportuno considerare l'uso di fermi dove è necessario. Le stesse considerazioni nei riguardi delle misurazioni dinamiche fatte per i trasduttori con tubo di Bourdon possono essere estese ai trasduttori a C, soffiotti o capsule. I trasduttori con diaframma piatto o con capsula di pressione coprono un campo di funzionamento da 15 psig a 500 psig, sempre con

una linearità tipica dello 0,5% del fondo scala. La frequenza naturale è decisamente più alta che per i precedenti trasduttori a bassa pressione ed il loro volume interno è abbastanza piccolo. Quindi, questo tipo di trasduttore di pressione a LVDT è più adatto per misurazioni a frequenza più elevata e per visualizzare la rampa di salita della variazione della pressione. Tutti i tipi di trasduttori descritti in precedenza sono disponibili sia in AC che DC con condizionatore di segnale integrato (uscita del segnale in tensione). Il campo di temperatura operativo si estende da  $-65^\circ\text{F}$  a  $200^\circ\text{F}$  od oltre.

## Trasmettitori di pressione a due fili.

In aggiunta ai modelli con funzionamento in DC, sono disponibili trasmettitori di pressione per applicazioni di controllo remoto di processo. L'alimentazione va da 28 a 50 Vdc e con uscita 4-20mA proporzionale alla pressione applicata. L'uscita può essere letta sui controllori di processo normalmente utilizzati nell'industria. La precisione è dello 0,5% del fondo scala, mentre ripetibilità ed isteresi sono uguali o migliori dello 0,1% del fondo scala. Un'ulteriore discussione del trasmettitore di corrente a 2 fili si può trovare nel capitolo 7.

## Calibrazione dei trasduttori di pressione

Ci sono parecchi modi e con precisione differente per tarare un sistema di misura di pressione. Le scelte comprendono *apparecchi di misura a pesi liberi, bilance di pressione, indicatori di prova di precisione e manometri*.

## Calibratori a peso

Questo tipo di apparecchiatura è il più comune calibratore per i trasduttori di media ed alta pressione. Esso incorpora sia un generatore di pressione statica con una pompa manuale che un pistone con area conosciuta caricato con pesi accuratamente calibrati. Fig.11.7

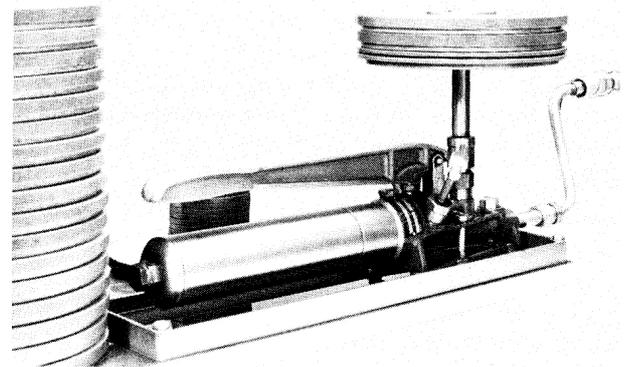


Fig.11.7 Tipico calibratore a peso per la taratura di trasduttori di pressione.

Il trasduttore di pressione che deve essere calibrato è connesso all'uscita del generatore di pressione. La stessa pressione è applicata al pistone caricato con i pesi che vengono predisposti su un adattatore per poterli cambiare facilmente. Quando il generatore di pressione ha sviluppato una pressione che bilancia la forza (peso) sull'area nota, il pistone comincerà ad alzarsi. Il pistone è costruito in maniera tale che scorre nella sua sede senza perdite e senza necessità di guarnizioni di tenuta. Non vi è quindi frizione dovuta alle guarnizioni. Il pistone generalmente può ruotare sia manualmente che tramite un motore per eliminare ogni effetto della frizione statica. Se i pesi usati sono calibrati con precisione, la sola reale limitazione alla precisione del calibratore è la precisione dell'area del pistone. È importante che il calibratore sia in piano cosicché la forza di carico dovuta ai pesi si trovi sull'asse verticale del pistone. Se il piano del calibratore non fosse perfetto, si sviluppano due errori. Primo, la forza applicata sul pistone è modificata dal coseno dell'angolo d'inclinazione rispetto alla verticale del peso (come già osservato nella discussione sulle celle di carico nel capitolo 10). Gli stessi fattori d'errore si applicano anche al calibratore di pressione a peso: ad  $1^\circ$  d'inclinazione si avrà un errore dello 0,015% sulla calibrazione;  $2^\circ$  viceversa producono un errore dello 0,06%.

Il secondo errore è lontano dall'essere prevedibile. Il pistone tende ad alzarsi nella sua sede precisa, con il risultato di ottenere effetti non desiderati di frizione. Allora la pressione non è bilanciata dal vero carico dei pesi liberi, perché parte di questa forza è persa in attrito. Questo tipo di calibratore può produrre pressioni di riferimento molto precise da 25 a 10000 psig. Una precisione dello 0,01% della lettura, o migliore, è abbastanza comune.

### Bilance di pressione

La costruzione di questo tipo di calibratore assomiglia a quella di un calibratore a peso. La maggior differenza è che il pistone è connesso tramite un collegamento articolato ad una bilancia del tipo a stadera. Questo rende possibile sviluppare pressioni tra i punti d'incremento fisso del calibratore a pesi liberi, ma l'attrito della giunzione tende a ridurre la precisione globale del sistema.

### Strumenti di prova di precisione

I calibratori a peso o le bilance di pressione si trovano generalmente solo nei laboratori. Infatti sono calibratori poco adatti per effettuare delle calibrazioni in campo. Un metodo pratico è, allora, utilizzare un trasduttore di precisione campione che sia stato tarato su un calibratore a peso. Il trasduttore diventa il punto di riferimento. Tipicamente i trasduttori campione hanno una

precisione di taratura dello 0,25% FS, ma è possibile ottenere dei trasduttori campione, da usare come riferimenti secondari, con una precisione dello 0,05% FS. Tali trasduttori devono essere trattati con cura per evitare urti che potrebbero metterli fuori uso compromettendo la taratura o danneggiando le parti interne.

### Manometri

Mentre i calibratori a peso e dispositivi simili sono eccellenti per la calibrazione di trasduttori di media ed alta pressione non così lo sono per quei trasduttori che misurano bassa pressione, assoluta, differenziale o il vuoto. La calibrazione di questi tipi di trasduttori è generalmente affidata ai manometri. Un manometro è uno strumento che misura l'altezza della colonna di un liquido con peso specifico conosciuto, su cui grava la forza di gravità. I tipi usati per scopi di calibrazione sono: manometri a tubo verticale, manometri con tubo inclinato e i micro manometri.

fig.11.8

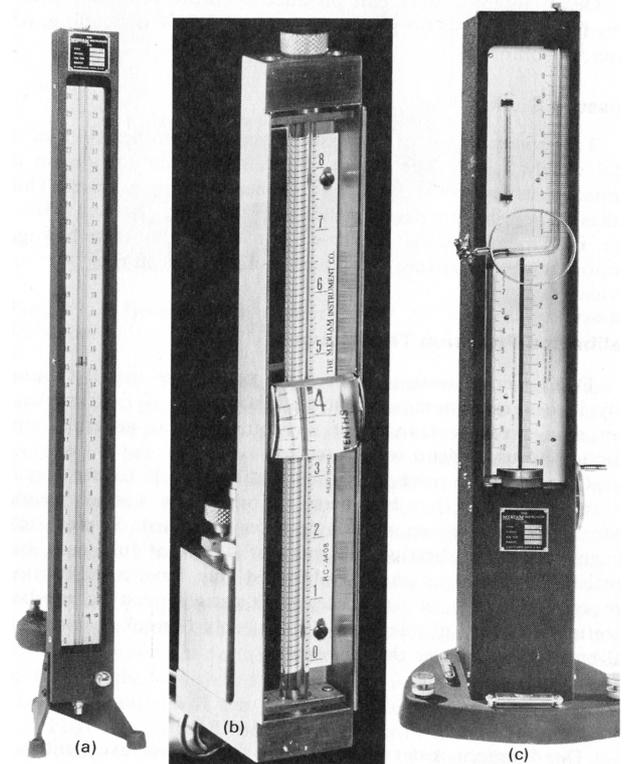


Fig. 11.8 Manometri per la calibrazione di trasduttori di pressione : un manometro a colonna per laboratorio, (a), un manometro portatile, (b), per tarature in campo ed un micromanometro, (c), per tarature di estrema precisione per basse pressioni.

Un tipico manometro a tubo verticale per uso generale di laboratorio è mostrato in Fig. 11.8a. Questo tipo di strumento è disponibile in parecchi fondo scala, tipicamente nel campo da 12" a 100", e può essere calibrato per l'uso con vari fluidi con peso specifico diverso. Inoltre possono funzionare fino ad una moderata pressione di linea, tipicamente

fino a 250 psig. Spesso si possono ottenere scale multiple, permettendo ad un singolo strumento di avere più di un fondo scala, cambiando il peso specifico del fluido utilizzato. È pratica comune calibrare la scala del manometro in pollici di H<sub>2</sub>O mentre si usa mercurio come fluido del manometro. Un manometro da laboratorio come quello di Fig. 11.8a non è molto maneggevole per la taratura in campo. Invece, viene utilizzato un manometro portatile come quello mostrato in Fig.11.8b. Questo tipo di manometro è compatto e robusto. La precisione è mantenuta usando un cursore lenticolare per aumentare la leggibilità della scala e una scala a specchio per eliminare gli errori di parallasse. Queste specifiche lo rendono adatto a letture di pressione entro lo 0,050 di un pollice dell'altezza della colonna. Sono costruiti normalmente in acciaio inossidabile ed usano valvole e tappi per evitare la fuori uscita del fluido durante il trasporto.

La temperatura ambiente è un fattore importante nelle misurazioni della pressione fatte con i manometri perché il peso specifico del fluido varia con la temperatura e si ha un'espansione volumetrica. Invece gli effetti della temperatura sulla struttura del manometro sono trascurabili rispetto all'influenza che hanno sul fluido. Un'altra considerazione sulla precisione è la variazione dell'accelerazione di gravità dovuta alla località geografica. Per la massima precisione è necessario conoscere il valore in *g* nella località in cui viene effettuata la taratura. Una tabella dei valori di *g* per differenti località può essere trovata nell'Appendice D.

Tuttavia, per la maggior parte delle tarature per mezzo di manometri, questo fattore può essere trascurato.

### Manometri con tubo inclinato.

Se un trasduttore di pressione richiede una taratura più accurata di quella ottenibile con i manometri da laboratorio ad uso generale con il tubo diritto è necessario, passare ad un manometro a tubo inclinato, come quello mostrato in Fig.11.9. È un manometro a colonna di liquido impiegato per misurare differenze di pressione molto piccole. Esso è formato da un serbatoio, sul quale grava la pressione  $P_1$  e in cui pesca un tubo di vetro inclinato di un angolo  $\alpha$  e comunicante col recipiente a pressione  $P_2$  o lasciato alla pressione atmosferica. Si ottiene così un allungamento della scala di misura proporzionale a  $\text{sen}\alpha$  essendo il dislivello pari a  $l\text{sen}\alpha$  dove  $l$  è lo spostamento del menisco quando il manometro entra in pressione. La leggibilità di un manometro a tubo inclinato è più grande in quanto vi sono più graduazioni per unità rispetto al tubo verticale. I manometri a colonna inclinata hanno frequentemente scale graduate che

arrivano a 0,010" o 0,25mm. Devono essere livellati accuratamente e possono funzionare con pressioni di linea moderate. Sconsigliabile è il loro uso per tarature in campo. Fig.11.9

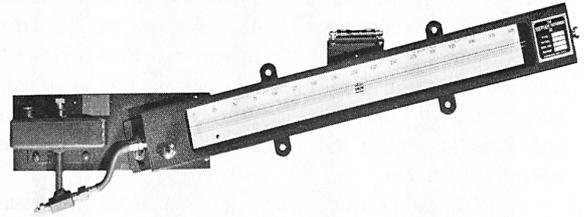


Fig. 11.9 Tipico manometro a tubo inclinato con montaggio a parete.

### Micro manometri

Calibrazione di pressione con estrema precisione si ottengono con i micro manometri. Un tipico esempio è mostrato in Fig. 11.8c, è un manometro primario che può indicare pressioni relative o differenziali o il vuoto con una precisione di 0,001" o 0,001 mm. Un micro manometro incorpora una speciale colonna che può muoversi in verticale tramite un elemento a vite di precisione. Il movimento verticale del tubo è indicato da un puntatore attaccato al tubo stesso che si muove lungo la scala uniformemente graduata e anche da un micrometro connesso direttamente all'elemento a vite di precisione. Questa vite può essere ruotata tramite un manovellismo con interposto un sistema di ingranaggi. L'insieme degli ingranaggi e il loro gioco non influenzano la precisione della lettura perché esso provvede solo alla necessaria coppia per far muovere la vite. Il tubo in vetro indicatore del micro manometro, Fig. 11.8c, è rigidamente supportato all'interno del corpo dello strumento. La porzione inclinata del tubo è posizionata alla minima pendenza per permettere un'accurata risoluzione della posizione del menisco del fluido indicatore. Una linea dello spessore di un capello, con una lente d'ingrandimento separata è incisa nel tubo indicatore come riferimento fisso per tutte le misurazioni. Il tubo indicatore è collegato alla colonna mobile tramite un tubo flessibile. La regolazione dello zero avviene spostando la colonna in senso verticale indipendentemente dalla vite di testa. La posizione di zero viene quindi bloccata per evitare errori durante le misurazioni. Prima dell'uso lo strumento è livellato con grande precisione. Il micro manometro funziona come uno strumento indicatore di zero. Inizialmente, il menisco del fluido indicatore è posizionato con esattezza sull'incisione della porzione inclinata del tubo indicatore. Si applica la pressione, cambiando l'altezza della colonna. Il manovellismo è allora ruotato per muovere la colonna nella direzione che tende ad restaurare la colonna al suo primo livello fino a che il menisco è ancora collocato esattamente

sulla linea sottile come un capello. Il movimento della colonna è allora letto dal puntatore della scala dal micrometro. Questa distanza è l'altezza della colonna prodotta dalla pressione applicata. Un trattamento più dettagliato dei micrometri si può trovare in alcune referenze listate nell'Appendice A. Il principio del bilanciamento a zero usato nei micro manometri è stato adottato su altri tipi di calibratori primari di pressione. Tra quelli correntemente disponibili ci sono calibratore di

pressione con tubo risonante al quarzo, i manometri servo assistiti ed i calibratori a peso.

Dott. Edward E. Herceg  
Handbook of Measurement and Control