

LA PRESSIONE

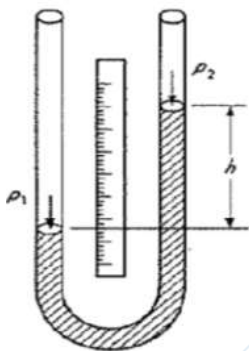
La pressione non è una grandezza fondamentale, ma si ricava dal rapporto tra la forza e l'area di contatto, le quali a loro volta sono grandezze derivate da massa, lunghezza e tempo.

Quando parliamo di pressione ci sono varie considerazioni da fare, la prima delle quali è se stiamo misurando una pressione **assoluta** o una **pressione relativa**. Generalmente la pressione che registriamo è una pressione relativa rispetto alla pressione atmosferica che prendiamo in realtà come una costante. Questo è già un primo errore perché la pressione atmosferica ha una variabilità enorme dovuta alle condizioni meteo, all'ora del giorno etc. ... Nelle macchine per avere quindi misure precise tenderemmo a ragionare sempre con pressioni relative a pressioni note o standardizzate. Se ovviamente facciamo riferimento invece alla pressione nulla, ovvero 0 Pa, otteniamo la misura assoluta della pressione.

Un altro metodo di misurazione della pressione può essere però la **pressione differenziale** che funziona grazie alla relazione di Stevin e l'uso del manometro ad U. Questa misurazione, come nel caso delle termocoppie non riesce a fornire una misurazione esatta della pressione, ma solo una differenza assoluta.

Vedremo quindi adesso diversi strumenti di misura per diverse situazioni, analizzando per ognuno di essi metodo di funzionamento ed errori di questi strumenti.

Manometro differenziale



In figura viene mostrato un tipico manometro differenziale il cui funzionamento si basa, come abbiamo detto sulla legge di Stevin. Preso quindi un tubo ad U, di sezione definita, ed inserito al suo interno un fluido **manometrico** incompressibile, immiscibile con quelli i fluidi da studiare, andiamo a misurare la differenza di pressione tra i due fluidi agenti sugli ingressi diversi del tubo come:

$$h = - \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} = \frac{P_1 - P_2}{\rho g}$$

Ovviamente il fluido maggiormente utilizzato in questo strumento resta l'acqua per le misurazioni di piccole variazioni pressione (fra gli 0,1 KPa e i 20 KPa). Superato queste differenze di pressione dovremmo ricorrere a colonne di acqua troppo grandi per cui conviene usare un fluido più pesante, per cui si ricorre in modo comune anche al mercurio.

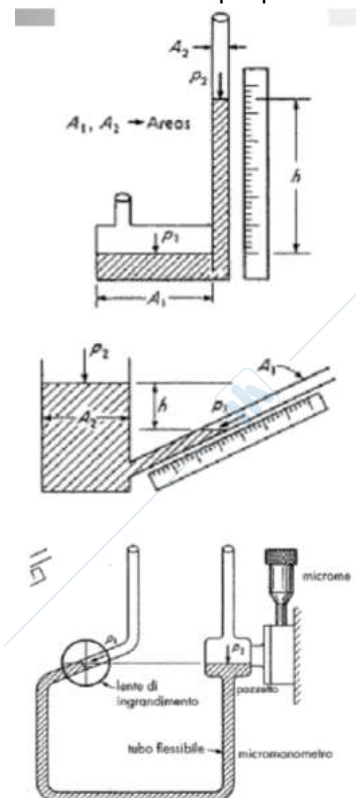
Il manometro differenziale può essere usato anche capovolto ricordando però che quando lo si usa in questo modo dobbiamo andare ad invertire il senso di lettura dell'altezza per cui avremo:

$$h = \frac{P_2 - P_1}{\rho g}$$

Un fonte di errore comune poi per il manometro ad U poi è quello di effettuare la misura in movimento facendo influenzare l'altezza dall'accelerazione relativa del corpo. Per ovviare a questo problema però, basta avere un supporto mobile per la struttura che vada quindi a bilanciare gli effetti del moto permettendo allo strumento stesso di muoversi solidale al corpo su cui esegue la misurazione.

I manometri differenziali possono poi essere di diversi tipi e generalmente più particolari di quello riportato sopra.

Il **manometro a pozzetto** è sicuramente uno dei più famosi in assoluto, molto semplice da usare e con una lettura istantanea del dato. Il suo funzionamento,



basato sullo stesso principio di quello ad U, prevede di allargare una delle due sezioni che prende il nome di **pozzetto** mentre si lascia a forma di tubo l'altro ingresso. In questo modo quando la pressione agisce sul sistema pozzetto si registrerà un piccolo ΔH al pozzetto mentre si registra un grande ΔH al tubo, facile da leggere.

Più particolare ancora è il **manometro a tubo inclinato** il quale aumenta ancora le sensibilità inclinando il tubo. In questo modo a parità di variazione di quota possiamo leggere una variazione nel tubo molto maggiore, che viene letta quindi in modo molto più facile anche per piccoli ΔP .

La misurazione più accurata comunque resta quella del **micromanometro**. Lo strumento è regolato in modo che quando $p_1 = p_2$ il menisco del tubo inclinato risulti in un punto di riferimento. L'applicazione della differenza di pressione causa lo spostamento del menisco dalla linea di riferimento; il menisco può essere riportato sulla linea di partenza alzando o abbassando il serbatoio con il micrometro. La differenza tra la lettura iniziale e finale fornisce la variazione di h e quindi la pressione.

Un problema di tutti questi strumenti è anche la così detta **remotizzazione**, ovvero il trasporto di segnale quando non abbiamo cavi, ma direttamente il fenomeno che si sposta. In generale se voglio fare una misurazione della pressione di una bombola, ad esempio, non è necessario farla sul posto, ma la pressione che leggo su di una valvola della bombola è la solita che leggerò a una distanza di 10 metri facendo fluire del fluido all'interno di un tubicino. Ora questo effetto è gradevole per una misura statica delle pressioni, ma se questa variasse nel tempo abbiamo l'introduzione di rumore **dovuta all'espansione dell'onda di pressione nel tubo che può far leggere valori estremamente diversi**.

I trasduttori

I trasduttori di pressioni sono strumenti capaci di convertire la pressione applicata in un segnale elettrico di tensione o di corrente. In generale la pressione viene fatta agire su di una superficie sensibile, generando una forza che a sua volta produce la deformazione di un elemento elastico. Il costo di un trasduttore è legato a più fattori: qualità dell'elettronica impiegata, dalla compatibilità con i liquidi che possono anche essere corrosivi e dal grado di miniaturizzazione.

La taratura viene fatta in laboratorio riproducendo il principio fisico che genera la pressione, con una macchina apposita formata da un pistone che comprime un fluido. Tale macchina, la quale strumentazione viene certificata per la durata di 1 - 2 anni è molto più precisa, almeno quattro volte più del trasduttore che vogliamo tarare.

I trasduttori si dividono in primari i quali vengono tarati per leggere direttamente la pressione e **secondari** per leggerla in funzione di una seconda grandezza.

Come in ogni altro strumento di misura, ai trasduttori di pressione è richiesto di avere buone caratteristiche di accuratezza (espressa in % sul fondo scala, in % sulla lettura di uscita o in valore assoluto), risoluzione, e ripetibilità, una bassa isteresi e una buona sensibilità.

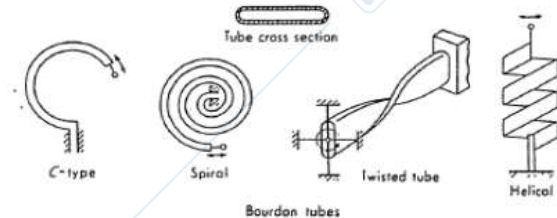
Si ricorda che:

La sensibilità è la derivata della curva di taratura dello strumento. La sensibilità permette il confronto tra diversi trasduttori riguardo la capacità di sentire le variazioni della grandezza in ingresso, mentre l'isteresi fornisce un'indicazione sull'attitudine di un trasduttore a produrre la stessa identica uscita sia nel caso che l'ingresso di riferimento sia raggiunto da valori inferiori sia che venga raggiunto da valori superiori.

L'isteresi sarà data dal valore max della differenza tra l'uscita assunta nella fase e l'uscita assunta nella fase decrescente in corrispondenza della stessa grandezza in ingresso

Tubo di Bourdon

Il tubo di Bourdon è un trasduttore primario, ovvero un oggetto che legge la pressione grazie a una modifica meccanica che subisce il tubetto. L'elemento di base in tutte le varianti del tubo di Bourdon è un tubo a sezione non circolare; una differenza di pressione tra l'interno e l'esterno del tubo (all'interno del tubo si ha la pressione più alta) fa sì che il tubo tenda ad assumere una sezione circolare. Questo si traduce in una deformazione lineare che porta ad un movimento secondo una traiettoria curvilinea dell'estremità libera della forma a C (anche se esistono forme alternative come quella a spirale o ad elica). Tale spostamento (di tipo elastico) viene convertito da un meccanismo nello spostamento di un ago su di un quadrante graduato.



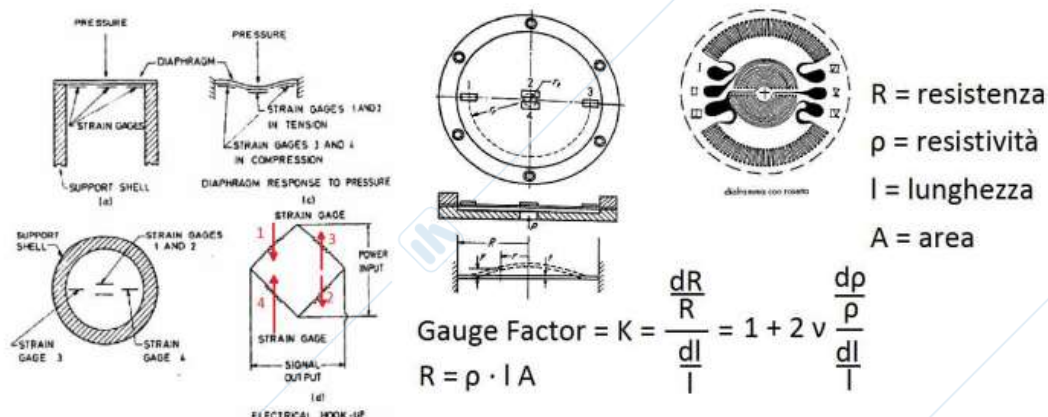
Shock tube

Quelli che abbiamo visto fino ad adesso sono tutti strumenti che vanno a leggere quelle che sono chiamate misure statiche ovvero che non cambiano nel tempo. Se la misura è dinamica però non posso ricorrere a questi strumenti in quanto mi potranno leggere solo la pressione che ad una determinata frequenza risultando ancora una misura costante mentre in realtà la pressione avrà una variazione oscillatoria nel tempo. Per riuscire a fare una misurazione variabile nel tempo dobbiamo utilizzare invece un tubo capace di campionare in diverse situazioni l'onda di pressione e dalla misurazione che fa ricostruirla.

Trasduttore estensimetrico

Sono i trasduttori più facili e semplici da costruire di quelli a nostra disposizione. Questi vanno a misurare in poche parole la deflessione in uscita, ovvero la deformazione causata dalla pressione, legata alla pressione da una relazione lineare.

Solitamente i trasduttori di pressione basati su estensimetri elettrici hanno gli estensimetri direttamente applicati su di una sottilissima membrana liscia di metallo che prende il nome di diaframma. Il diaframma è la componente più delicata di questi strumenti, in quanto affinché si abbia una buona precisione è necessario che questo sia molto sottile. Più sottile sarà quindi la lamiera maggiore sarà la precisione dello strumento in relazione al calo però del range massimo di misurazione eseguibile (non è necessario che il diaframma si rompa perché il sensore non funzioni, ma basta che questo arrivi a snervamento).



La membrana è quindi vincolata agli estremi e soggetta ad una differenza di pressione uniforme ΔP . Il diaframma, quindi, risente degli sforzi di compressione assiali e di trazione radiale. Sul diaframma quindi vengono posti, il più possibile vicino al centro, degli estensimetri a ponte completo in modo tale da avere misure più precise. In particolar modo, gli estensimetri 2 e 4 vengono orientati per leggere la tensione tangenziale, mentre 1 e 2 le tensioni radiali. Tutti gli errori ovviamente che derivano da questa applicazione sono i soliti che sono tipici degli estensimetri, tra questi anche il posizionamento degli

estensimetri. Per facilitarne quindi il posizionamento possiamo decidere di inserire direttamente delle rosette di estensimetri.

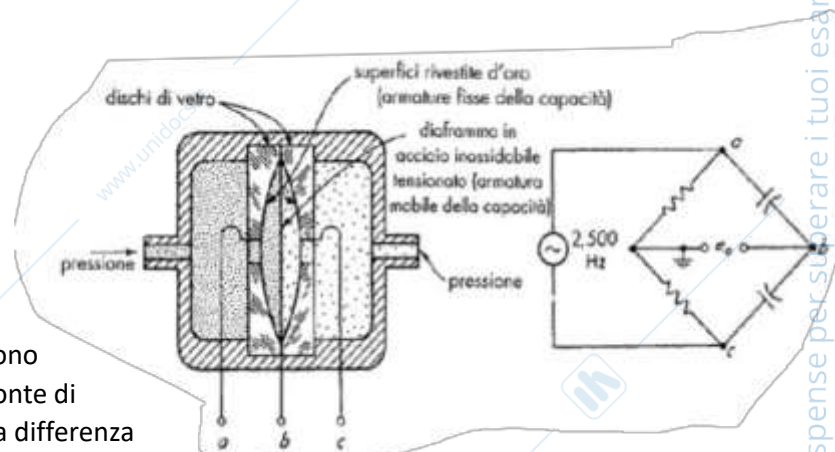
Trasduttori capacitivi.

Sono molto complessi da realizzare in quanto, come per il diaframma, gli viene richiesto di essere sensibili, ma resistenti per avere così un range di misurazione abbastanza grande. Solitamente la sensibilità che è richiesta è tra gli 0 e i 1250 Pa mentre il range di misura va dagli 0 fino anche ai 13,8 MPa. Oltretutto resta anche il problema di riuscire ad interfacciare il circuito elettrico con dei fluidi, principali soggetti della misurazione di pressione. Come indica il nome, questi si basano sull'integrazione di un condensatore all'interno di un circuito e sulla misura della sua capacità. C infatti varia in funzione della seguente relazione:

$$C = \frac{kA}{x} c$$

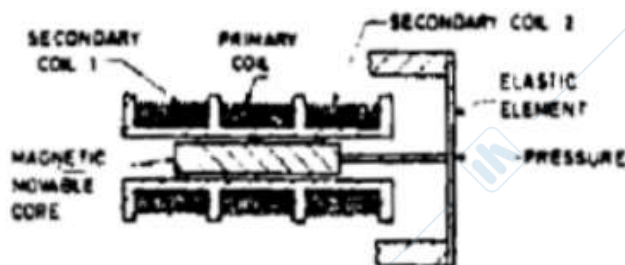
dove k e c sono costanti (costante dielettrica del mezzo e costante geometrica), A è l'area delle armature e x la distanza tra esse. All'agire di una pressione su di una delle armature la distanza si modifica registrando una variazione complessiva di C.

Come negli altri casi i condensatori solitamente sono più di uno ed ognuno disposto su un ramo di un ponte di Wheatstone che amplifica così il segnale ovvero la differenza di potenziale che registriamo ai capi dei morsetti liberi. Questi sensori sono molto molto sensibili e per questo motivo vengono usati per i microfoni.



Trasduttori induttivi

Possiamo in alternativa sfruttare il principio induttivo per cui, una serie di elementi (bobine) le quali generano un campo magnetico noto per il principio dell'induzione. Se inseriamo una lamella di materiale metallico nel campo magnetico libera di muoversi per effetto della variazione di pressione, questa registrerà una corrente interna sempre per il principio induttivo. Misurando la corrente o la caduta di potenziale, possiamo quindi relazionare tale effetto al moto della lamina e quindi alla variazione di pressione. Schematicamente in figura il sensore risulta essere:

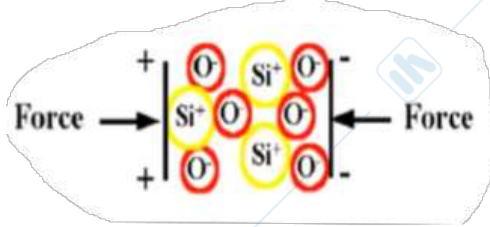


Come oggetti sono molto versatili, più resistenti e facili da costruire in quanto non abbiamo estensimetri. Ovviamente come pecca è che sono strumenti passivi. Possono essere costruiti sia come strumenti assoluti che differenziali.

Trasduttori piezoelettrici

Sono strumenti molto complessi e costosi, basati sul principio della piezoelettricità. Questo fenomeno fisico indica la capacità di alcuni cristalli di disporsi in modo tale da generare una differenza di potenziale sulle facce che lo compongono, se sottoposti a pressione. Quello che avviene in poche parole è che schiacciando questi cristalli, il materiale si deforma spostando gli ioni positivi in una direzione e quelli negativi nella

direzione opposta. Se le due facce vengono collegate tramite un circuito esterno viene quindi generata una corrente detta corrente piezoelettrica. La misurazione di questa corrente permette di misurare la pressione agente sulle facce quindi del materiale. Fra tutti i materiali che godano di queste proprietà sicuramente è il quarzo che essendo formato da silicio e ossigeno quasi interamente, che hanno una grande differenza di elettronegatività, riescano a generare correnti forti e facili da leggere. In alternativa vengono usati anche i Sali di Rochelle e cristalli sintetici o ceramiche ferroelectriche polarizzate artificialmente tramite l'applicazione di campi magnetici.



Come strumenti sono estremamente sensibili, capaci di resistere a grandi pressioni, con una risposta in frequenza molto più alta di ogni altro trasduttore di pressione che

possiamo costruire. Da qui sono nati una serie di altri sensori fondamentali per la tecnica di oggi come gli accelerometri che senza le capacità di risposta in frequenza di questi sistemi, prossime ai 4kHz non sarebbero mai nati (pensiamo che un sensore ad estensimetri arriva al massimo a 4/5 misurazioni al secondo). Sono di dimensioni ridotte e hanno range di lettura molto alto ($0,0001 \frac{m}{s^2} < a < 100 \frac{m}{s^2}$). Nella maggior parte dei casi l'elemento sensibile del trasduttore è incasellato e precaricato in una struttura rigida; questo non solo conferisce ai sensori la proprietà di un tempo di risposta brevissimo (qualche microsecondo) e di una frequenza di risonanza dell'ordine di centinaia di KHz, ma anche un facile impiego a livello industriale.

Paradossalmente l'unico loro difetto sta proprio nel fatto che sono adatti a misurazioni dove abbiamo una grande variabilità della pressione in piccoli intervalli di tempo. Se infatti lasciamo uno strumento del genere, sottoposto a pressione costante, sorge il problema della corrente di scarica, per cui il materiale si adatta e la corrente piezoelettrica tende ad attenuarsi con una legge esponenziale. Il tempo necessario al sistema di misura per attenuare il segnale, fino al 37% del valore originario prende il nome di discharge time constant DTC oppure costante di scarica. Tale effetto aumenta all'aumentare della grandezza del cristallo, quindi è necessario che il dispositivo sia molto piccolo. Per questo motivo i sensori di tipo piezoelettrico non possono essere utilizzati per misure di pressione costante.

Trasduttori piezoresistivi

Funzionano secondo il principio fisico della piezoresistività. Questa è la caratteristica che hanno tutti i materiali di variare la propria resistenza elettrica, se sottoposti all'azione di una forza esterna anche se il silicio resta il materiale più versatile in questo senso. Contrariamente ai trasduttori piezoelettrici, la variazione di resistenza avviene sia con forze statiche che dinamiche.

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

Ora per trovare la relazione tra le forze agenti, le deformazioni geometriche e le pressioni andiamo a differenziare la funzione di R.

$$\log(R) = \log(\rho) + \log(l) - \log(A)$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A}$$

dove essendo

$$A = \pi r^2 \text{ ottengo } \frac{dA}{A} = 2 \frac{dr}{r}$$

Dividendo poi tutto per $\frac{dr}{r}$ posso valutare:

$$-\frac{dr}{r} = -\frac{\epsilon_{rad}}{\epsilon_{tras}} \rightarrow \frac{dr}{r} = -v \frac{dl}{l} \rightarrow \frac{dA}{A} = -2v \frac{dl}{l}$$

Per cui, possiamo scrivere:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} + 2v \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \rightarrow \frac{dl}{l} = \epsilon$$

$$\frac{dR}{R} = \epsilon(1 + 2v) + \frac{d\rho}{\rho}$$

Per un semiconduttore, ovvero un corpo in silicio come nel caso di questi strumenti, la resistività è una funzione di una serie di parametri:

$$\rho = \frac{1}{N_i \cdot \mu m \cdot e} \quad \begin{cases} \mu m = \text{Mobilità media} \\ e = \text{Carica elettronica} \\ \rho = \text{Resistività} \\ N_i = \text{Numero di cariche} \end{cases}$$

dove anche la mobilità media e il numero di cariche dipendono dalle dimensioni del semiconduttore. Per una semplice tensione o compressione la variazione di ρ è data dalla:

$$\frac{d\rho}{\rho} = \pi_l \sigma$$

dove π_l è detto **coefficiente di piezoresistività longitudinale**.

Gage Factor è il termine usato per definire la variazione di resistenza elettrica dovuta alla forza applicata.

Tralasciando la dimostrazione quindi, sostituendo il differenziale della resistività ottengo:

$$G.F. = \frac{\Delta R}{R_0 \cdot \epsilon} = 1 + 2v + \pi_l \cdot E$$

Solitamente, l'azienda leader del settore, la Kulite produce sensori con un G.F. variabile tra i 45 e i 200.

Per i semiconduttori con più di 10^{20} cariche libere al suo interno, il G.F. non varia in funzione della temperatura, tali sensori sui cataloghi sono indicati solitamente dalla lettera L.

Nel caso non fosse così però, necessitiamo di un fattore di correzione del G.F. per cui lo esprimiamo come:

$$G.F. = \frac{T_0}{T} (G.F.)_0 + \frac{T_0}{T} \epsilon$$

I modelli sono molteplici e di diverse dimensioni e in funzione di questi si definiscano primari i sensori puri e secondari quelli con una copertura di applicazione industriale.

Analizzando il datasheet di un sensore piezoresistivi si vede come questi abbiano la capacità di lavorare a frequenze altissime (1000 KHz, cioè un milione di oscillazioni al secondo).



Misure di pressione – tipologia di pressione

Come abbiamo visto anche a fluido dinamica, abbiamo diverse tipologie di pressioni e quindi diverse misurazioni che possiamo fare.

La **pressione statica** è la forza esercitata da un fluido in quiete su ogni superficie a contatto con esso, la si può ottenere da un piccolo foro con assi perpendicolari ad una parete che delimita i confini del flusso. Dipende dalla densità del fluido e dall'altezza del pelo libero per cui:

$$\Delta P = \rho g \Delta H$$

La **pressione dinamica** indica invece l'incremento di pressione derivante dall'energia cinetica del fluido per cui:

$$P = \frac{1}{2} \rho c^2$$

Infine, abbiamo la **pressione totale o di ristagno**, che è la pressione che andremo a misurare se fermassimo un fluido in movimento attraverso un processo isoentropico ed adiabatico.

Nel caso poi di un flusso a densità costante, per cui o un liquido come l'acqua o per aeriformi se $M < 0.3$, la pressione totale la possiamo calcolare come somma della pressione dinamica e di quella statica, per cui:

$$P_{rist} = \rho g h + \frac{1}{2} \rho c^2$$

Se il flusso è comprimibile invece, la pressione totale è uguale a:

$$\frac{P_{rist}}{P} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)$$

con:

p_o = Pressione statica $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ = Rapporto dei calori specifici $M = \frac{v}{a}$ = Numero di Mach, rapporto fra la velocità del fluido e quella del suono $a = \sqrt{\gamma R T}$ = Velocità caratteristica adiabatica (velocità del suono) v = Velocità del flusso T = Temperatura del flusso R = Costante dei gas

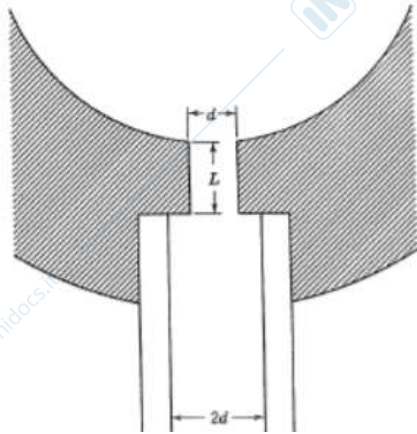
Misure di pressione statica

Come sappiamo da fluido dinamica, in un flusso interno, il campo di moto si stabilizza per la parte centrale, mentre risente degli effetti viscosi nella zona vicina alla parete. La zona vicino alla parete prende il nome di **strato limite** e la velocità del flusso ha un gradiente radiale, positivo alla diminuzione del raggio. La velocità si stabilizza poi al difuori dello strato limite per cui il flusso di dice sviluppato.

La pressione a parete del flusso poi, non variando la pressione lungo il raggio nello strato limite, coincide con la pressione statica del flusso stesso. Per cui per misurare la pressione statica di un flusso ci basta eseguire una misurazione della pressione a parete senza entrare nel flusso vero e proprio.

Il foro, che prende il nome di **wall tap**, può essere fatto in diversi modi e la metodologia con cui lo facciamo ne definisce la geometria e incide sulla nostra misurazione. Sono importanti poi anche le dimensioni del nostro foro, per cui più un foro è grande e più questo tenderà ad alterare il flusso e di conseguenza la

pressione. **Il foro, quindi, deve essere fatto molto piccolo. Conta poi anche la lunghezza del foro in quanto, per riuscire a riempire il foro mi occorrerà più tempo tanto più il foro è profondo.** Questo comporta quindi un **transitorio indesiderato** sulla lettura della pressione, soprattutto se questa è variabile nel flusso. **La soluzione ottimale, quindi, è quella rappresentata in figura, dove abbiamo in prossimità del fluido, un foro di diametro molto piccolo e con profondità molto ridotta, che poi andando verso l'esterno si allarga per permettere l'inserimento degli strumenti adatti al trasferimento del segnale.**

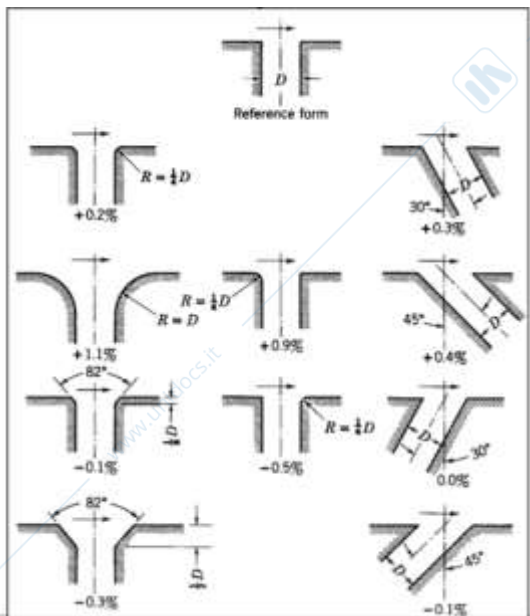


Teoricamente il foro dovrebbe essere puntiforme, ma questo non è tecnicamente possibile per cui sono stati individuati dei valori di ottimo del rapporto $\frac{L}{d}$ che mi indicano il campo in cui la misurazione è più precisa.

$$1.5 < \frac{L}{d} < 6$$

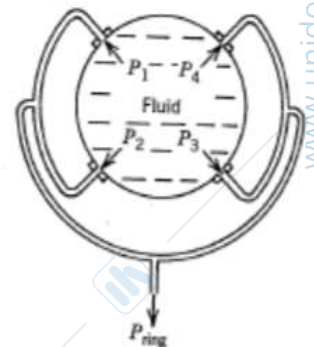
Tornando invece al problema della forma, **il buco interagisce il meno possibile con il flusso nel caso di spigoli vivi.** Per quanto si cerchi però di migliorare la tecnica, creare uno spigolo vivo al 100% non può esistere.

Non potendo realizzare il foro con spigolo vivo al 100% tanto vale che sia io a determinare come fare il foro per cui esistono diverse geometrie standardizzate per le quali possiamo calcolare l'errore fatto nella misurazione.



Come possiamo vedere, per ogni tipologia di foro abbiamo riportato gli errori che si commettono.

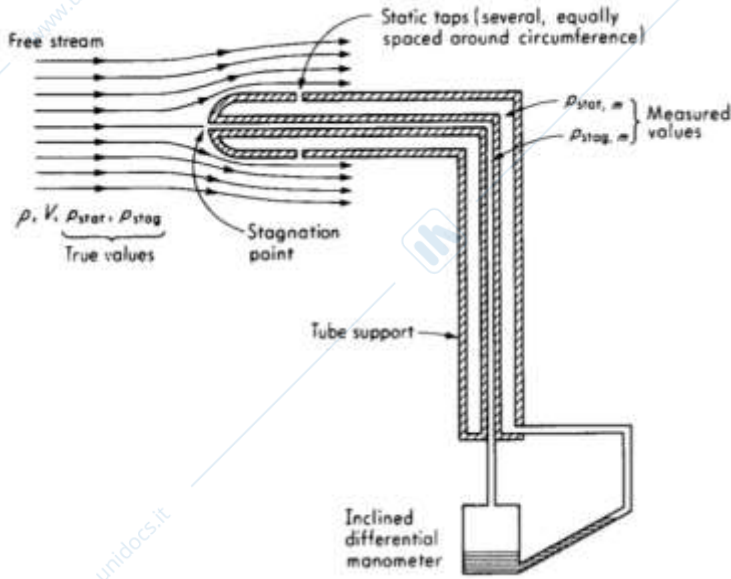
Se ho un condotto molto grosso a dire il vero, può diventare importante anche dove vado a fare il foro. In antichità si cercava di andare a fare diversi fori e valutarne una media, ma la misurazione era estremamente precisa a causa di una concatenazione di errori di misura rilevati su più misurazioni. Un truccetto può essere quindi quello di collegare più fori e canali di trasmissioni allo stesso sensore, in modo tale da avere in maniera diretta una media fisica automatica.



Tubo di Pitot

Il tubo di Pitot è uno strumento che, note la direzione e il verso locale del flusso, consente di rilevare il modulo della velocità del fluido attraverso le misure della pressione totale e della pressione statica.

Realizzato come in figura, **il tubo di Pitot consente di misurare la pressione statica sfruttando i fori che sono realizzati tangenzialmente alla superficie cilindrica, mentre permette la misurazione della pressione totale, rallentando completamente in maniera adiabatica il flusso che entra all'interno del piccolo foro capillare di punta allo strumento.**



Una volta infatti misurato entrambe le pressioni, per un flusso incompressibile sappiamo che:

$$P_{tot} = P_0 + \frac{\rho c^2}{2}$$

da cui possiamo calcolare la velocità.

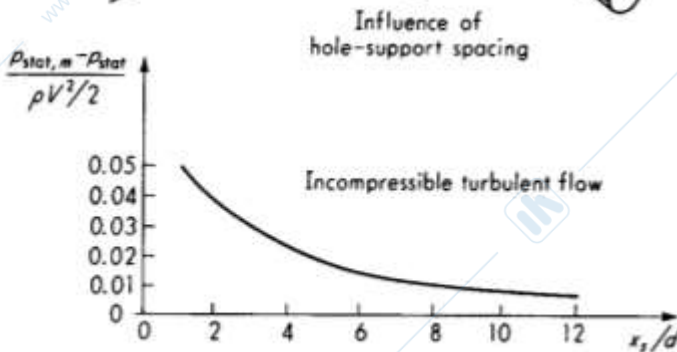
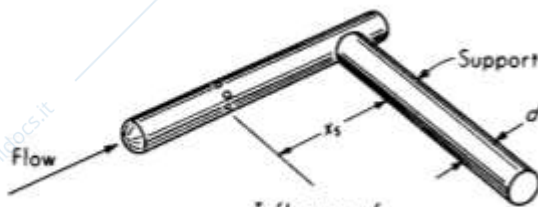
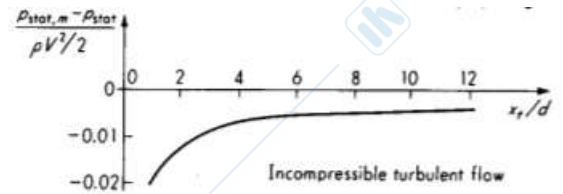
Le dimensioni dello strumento devono essere però di dimensioni sufficienti in particolare modo deve essere piuttosto lungo lo stelo. Se lo facciamo troppo corto infatti, la pressione in aumento nel capillare centrale si risentirà piano piano che questo si riempie anche nella zona esterna sulla bocchetta di ingresso. Questo effetto, detto **effetto stelo**, ovviamente è tanto più forte tanto è più corto

lo stelo (parte verticale del sensore). Oltretutto dobbiamo fare il naso sufficientemente lungo anche per permettere alle linee di flusso di riadde riaderire allo strumento e ricreare lo strato limite dopo la deviazione cusata dalla punta dello strumento andando a leggere una pressione statica inferiore

Se facciamo troppo corto lo stelo quindi leggeremo una sovrappressione totale e una sottopressione statica.

Se riporto l'effetto sulla pressione statica quindi, adimensionalizzata rispetto a $\frac{\rho c^2}{2}$ notiamo che l'errore tanto è più piccolo il rapporto naso/diametro.

Allo stesso modo possiamo valutare l'effetto sullo stelo.



Come possiamo osservare nei due grafici, per la pressione statica abbiamo un errore negativo, ovvero misuriamo una sottopressione, mentre per l'effetto stelo abbiamo un errore positivo e quindi una sovrappressione.

Se stiamo attenti però possiamo riuscire a misurare la pressione dinamica esatta, vera misurazione fatta dal tubo di Pitot.

ATTENZIONE quindi, il tubo di Pitot ci permette di misurare bene la pressione dinamica e quindi la velocità.

Fattori pregezzuali del tubo di Pitot

Esiste ovviamente una norma specifica che ci indica come deve essere costruito il tubo di Pitot per riuscire ad avere una misurazione precisa. La testa o naso, per normativa può assumere **forma conica o sferica** con un diametro massimo del Pito di un 1/30 del diametro della condotta in cui vado ad eseguire la misurazione. Il diametro interno invece deve essere per normativa 0,4 volte il diametro esterno del Pitot. Il tubetto interno viene poi guidato e sorretto fino all'uscita secondo normativa, in modo tale che questo non vibri e

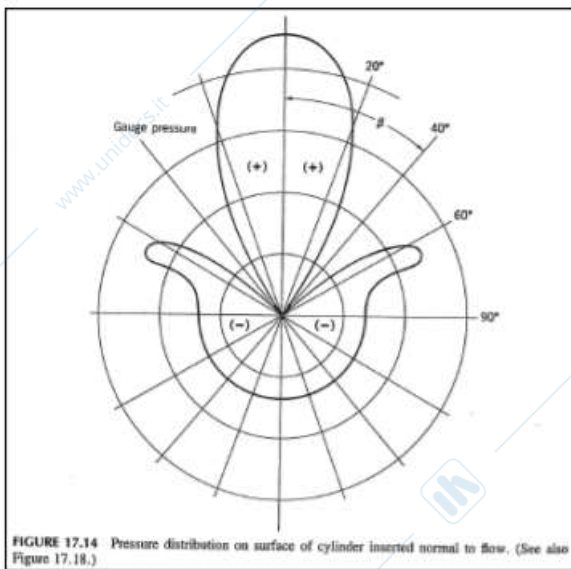
non vada ad occludere gli altri fori. I fori per la misurazione della statica invece devono essere 0,13 volte il diametro massimo del Pitot e di un numero compresi tra 8 e 10.

La curvatura del Pitot invece deve essere 3 volte il diametro massimo. La normativa definisce anche la rugosità massima che deve essere di $32 \mu\text{m}$ per i condotti interni.

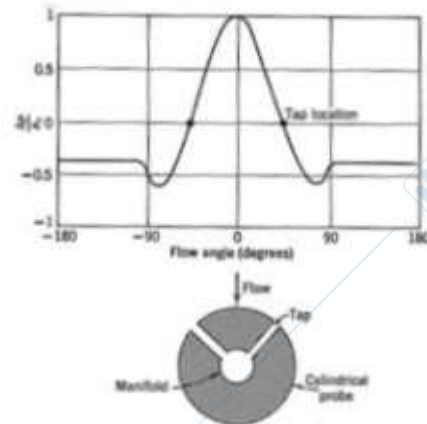
Il pitot se costruito così funziona così bene che non ha nemmeno bisogno di essere tarato.

Sonda direzionali

Se su di un cilindro eseguo un foro e vado ad immergere questo cilindro in un flusso, andando a valutare la pressione che si misura sulle pareti del tubo stesso posso osservare un andamento del tipo riportato in figura:

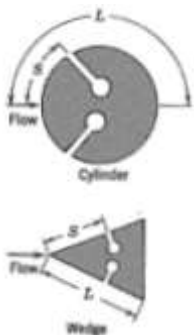


La misurazione viene effettuata ruotando il tubo di 360° all'interno del flusso stesso. La pressione ovviamente risulta essere 0 per gli angoli corrispondenti alla direzione opposta di avanzamento del fluido, mentre registro una pressione quando almeno uno dei fori è esposto al flusso.



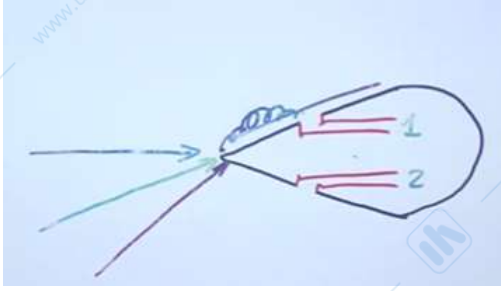
Al variare dell'angolo quindi registrerò diversi valori pressione, per cui la reale pressione statica coincide con la media delle pressioni misurate.

La taratura si basa sulla apertura che esiste tra i due fori praticati sulla sonda e nonostante nel grafico sia riportata una sonda con apertura $90^\circ/-90^\circ$ quelle migliori e solitamente più utilizzate sono quelle con apertura $30^\circ/-30^\circ$ (avvero di apertura 60°). La sonda poi non può neanche essere realizzata come in figura in quanto, abbiamo bisogno di un differenziale che registri la pressione effettiva e pertanto di un condotto di estrazione della pressione.



La sonda cilindrica ha la particolarità di essere poi una sonda direzionale, per cui se il Pitot mi indica solo il modulo e non la direzione del flusso questa invece mi indica una pressione media e la direzione.

Questa sonda risulterà tanto più sensibile, tanto maggiore è il grado di inclinazione della superficie, per cui esistano forme esasperate che posso utilizzare per migliorarne la sensibilità, attenzione però, se questo aumenta troppo si riduce il range di funzionamento in quanto si finisce nella zona di interdeterminazione della pressione. Tanto maggiore quindi è il rapporto S/L tanto maggiore sarà la sensibilità dello strumento e più piccolo il suo range di misurazione.



Una sonda infatti come quella a triangolo ha dei problemi, per cui se l'angolo di incidenza aumenta troppo vediamo che una delle due sonde perde il segnale o lo legge in modo difettoso. Una sonda più tondeggiante quindi mi permette di valutare bene le medie, ma male la direzione del flusso, mentre con le sonde strette posso valutare bene la direzione del flusso sapendo che, nella direzione della massima pressione sono allineato alla direzione del flusso e appena perdo il segnale ne sono uscito.

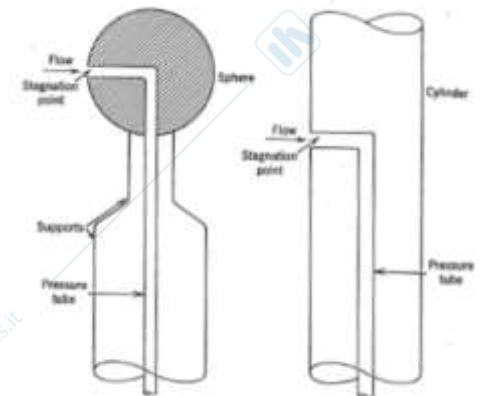
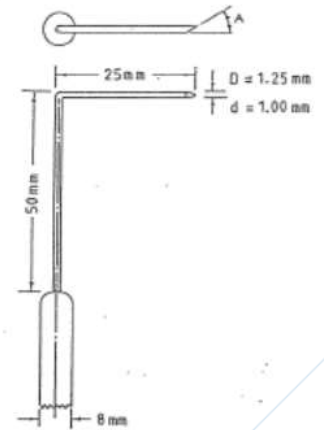
Questo strumento si ribadisce misura le direzione del flusso.

Tra le sonde direzionali abbiamo anche un'altra sonda detta **sonda a spigolo**. Una sonda a spigolo ha a forma come in figura, dove il naso è taglio nettamente con un angolo α ben definito. Questo sonde, come le cilindriche sono utilizzate per determinare il verso del flusso e leggeranno la pressione massima quando hanno il flusso perpendicolare alla direzione di taglio.

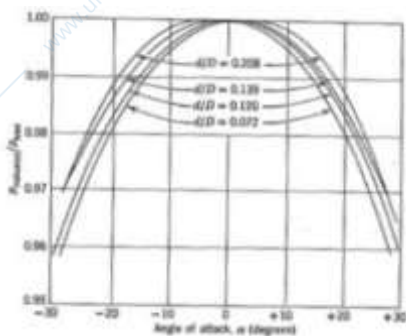
Come strumento la sonda cilindrica può anche misurare la pressione totale andando a direzionare le sonde non in direzione tangente al flusso ma perpendicolare ad esso. Questo mi permette di valutare la pressione totale del flusso.

Una volta determinato quindi la direzione del flusso con la sonda cilindrica, posso direzionarla in questo modo per riuscire a determinare la pressione totale. La sonda sarà allineata con il moto del fluido per l'angolo al quale nel diagramma è associato il valore massimo, tale angolo dovrà dunque essere uguale a 0° . Graficando quindi, in ascissa è riportato l'angolo di incidenza in ordnata il rapporto tra pressione letta e pressione totale.

Come possiamo vedere P_{tot} la vultaimo a 0 gradi.



Tipologia di sonde ed influenza del disallineamento



Il disallineamento è un fattore di cui tener conto ai fini di una corretta stima della pressione di ristagno. A causa del disallineamento non si riesce a creare infatti un vero e proprio punto di ristagno in corrispondenza del foro di misura, dato che la velocità non risulta nulla. A sua volta l'angolo di disallineamento dipende dalla tipologia di naso per cui ogni naso, in funzione della geometria che esso ha sarà adatto a una lettura specifica di una pressione. Graficando quindi il rapporto tra la differenza di pressione totale e quella registrata, sulla pressione misurata, rispetto all'angolo di incidenza del flusso per diverse geometrie possiamo vedere quali sono quelle più adatta alla misurazione della pressione totale.

Come possiamo osservare, lo 0 (ovvero la differenza nulla tra pressione misurata e pressione totale) lo raggiungano tutte, ma alcune lo mantonogano per angoli di lettura più grandi.

Per un angolo di disallineamento compreso tra +5 e -5 si nota poi come qualsiasi tipo di sonda sia in grado di fare ottime letture della pressione totale. Se vogliamo misurare la pressione con angoli di disallineamento maggiori invece abbiamo bisogno di altre geometrie più adatte e specifiche. Nel caso in cui il flusso abbia una direzione variabile potrei ricorrere alla sonda schermata o dette **sonde Kiel o sonde Rake di Kiel**.

Queste sonde sono costituite da un tubetto molto piccolo curvo, che viene inserito all'interno di un "bicchierino" la cui funzione è riallineare il flusso sempre con l'ingresso perpendicolare allo stelo. Quando abbiamo una ripetizione in serie del bicchierino di ingresso del fluido abbiamo una sonda Rake di Kiel.

La sonda Rake di Kiel deve essere usata per eseguire le misure in serie di pressione e per determinare eventuali distribuzioni della pressione totale del fluido.

Una sonda Rake di Kiel può anche arrivare a 10 sonde consecutive, ognuna delle quali ha un proprio tubo di lettura della pressione.

Ricapitolando quindi, abbiamo visto come misurare la pressione statica, come analizzare la velocità del fluido tramite il Pitot, la direzione con la sonda direzionale e la totale con la sonda Kiel. In poche parole abbiamo ricostruito per intero tramite la misurazione il fluido.

Ora la domanda è: ma queste misure le devo fare per forza singolarmente o le posso fare tutte insieme? La risposta è sì, le posso fare tutte insieme e vediamo come.

Sonde multiforo



L'impiego del classico tubo di Pitot è possibile a patto che sia nota con precisione la direzione del flusso di cui si vogliono analizzare le caratteristiche, poiché disallineamenti anche di piccola entità determinano significativi scostamenti delle misure dai loro valori reali. Quando, pur individuando intuitivamente l'andamento del flusso, non è noto il suo orientamento, è indispensabile l'utilizzo di una sonda multiforo planare o a testa sferica, con la quale ottenere dati accurati indipendentemente dal posizionamento della stessa.

Consideriamo adesso una sonda, fatta come quella riportata in figura, dove abbiamo tre fori diversi e tre tubi distinti di prelievo della misura, tale sonda prende il nome di sonda cobra. Questa sonda basa il proprio funzionamento sul principio del tubo di Pitot e vengono impiegate esclusivamente per misurare la direzione del

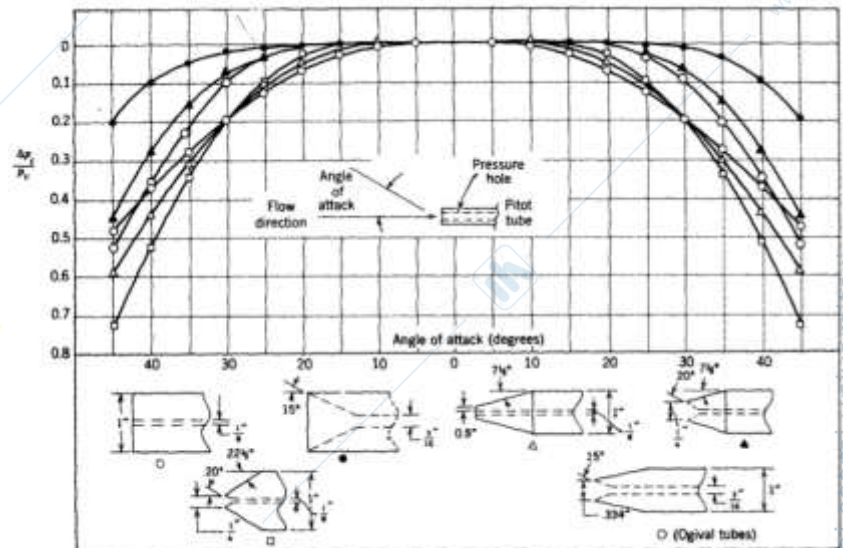
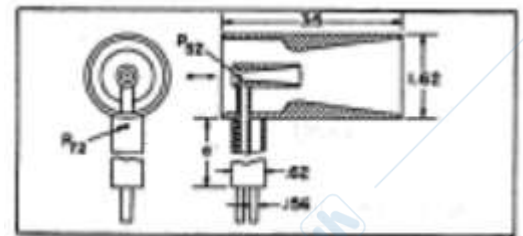


FIGURE 17.25 Characteristics of several Pitot tubes in regard to flow alignment. (Source: After Gracy et al. [29].)



Sonda Kiel e Rake di Kiel



flusso basandosi però sulla misurazione della pressione, statica, totale e dinamica oltre che sulla velocità. Questa sonda quindi è in grado di caratterizzare internamente il flusso a livello 3D.

Chiamate così per la loro forma, sono costituite da tre tubicini d'acciaio, del diametro non superiore al millimetro, posti l'uno accanto all'altro (complanari), uniti tra loro per mezzo di una brasatura, la cui estremità è opportunamente smussata e piegata, tramite una maschera di piegatura. Il tutto viene reso più robusto dalla presenza di uno stelo molto più spesso che può raggiungere anche i 6 mm di spessore.

Le sonde di questo tipo si possono dividere in due categorie, le "sonde tarate", dove l'angolo del flusso è ricavabile dalla taratura effettuata in galleria del vento, per cui leggendo la differenza di pressione dei due tubi laterali si ricava l'angolo di flusso e le "sonde a bilanciamento" per le quali la lettura dell'angolo è effettuata leggendo un goniometro posto sulla sonda, quando ruotando la sonda si rileva una differenza di pressione. La sonda ruotando quindi su se stessa all'interno del flusso riesce a misurare tutte le pressioni di nostro interesse più la velocità per cui riesce a ricostruire il flusso per intero. Esistono molteplici soluzioni a dire il vero e quella riportata qui è solo una di quelle più didatticamente comoda. Tutte le soluzioni in ogni caso prevedano di avere tre canali di accesso, talvolta alcune soluzioni prevedano anche più di tre fori.

Quella riportata qui in figura ad esempio è una sonda cobra a soluzione diversa da quella vista prima.

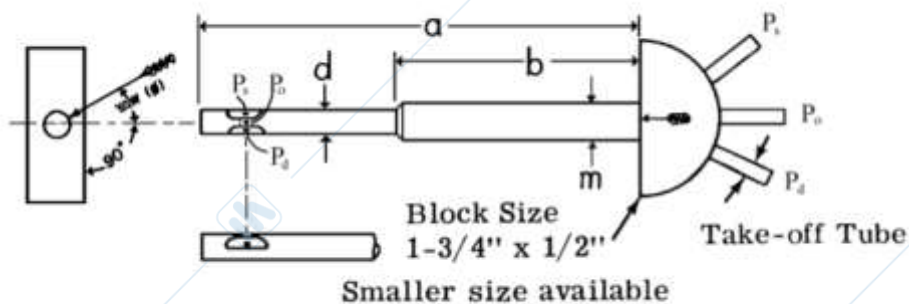
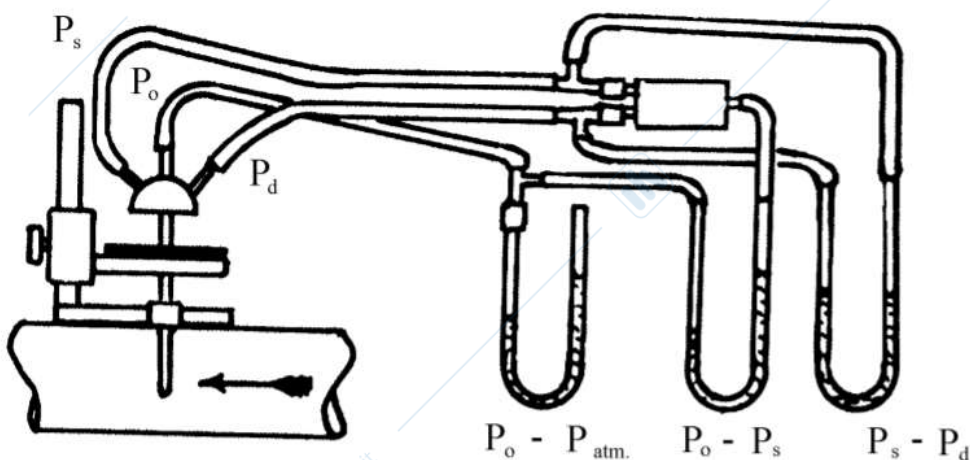


Fig.2 - Geometria di una sonda bidimensionale

A meno di altre specifiche, tutte le sonde sono realizzate in acciaio inossidabile resistente alla corrosione brasato con argento o, per impieghi ad alta temperatura e diametri dello stelo non troppo piccoli, saldato. Tutte queste sonde necessitano di una calibrazione individuale da effettuarsi in galleria del vento mediante la determinazione di tre coefficienti al variare dell'angolo di yaw.



Una volta infatti fissata la galleria del vento e note le condizioni del flusso interno ad essa, possiamo passare a collegare la sonda e i tre canali di uscita a tre manometri differenziali. In Questo modo otteniamo la differenza tra la pressione interna al flusso e quella atmosferica da cui la galleria del vento aspira l'aria. Le pressioni P_{tot} e $P_{statica}$ all'interno della galleria devono essere rilevate

mediante uno strumento di riferimento, ad esempio un tubo di Pitot oppure, disponendo della curva di

calibrazione del tunnel, ricavando la pressione totale dalla lettura della pressione atmosferica, e la pressione statica con prese di parete.

Adesso per andare a tarare la sonda con la specifica geometria presa in analisi devo considerare di prendere la mia sonda immersa nel flusso noto e di ruotarla fino a che non individuo il massimo valore della pressione sul foro centrale. Individuata questa posizione, la quale coincide con la direzione del flusso ovviamente in quanto la massima pressione che posso registrare è su tale ingresso la pressione totale, comincio a raccogliere un set di misure vario. A partire quindi dalla posizione 0, vado a misurare ruotando a destra e sinistra la sonda con intervalli di 2° registrando P_c , P_{sx} e P_{dx} in modo tale da poter valutare i coefficienti di interesse per caratterizzare lo strumento.

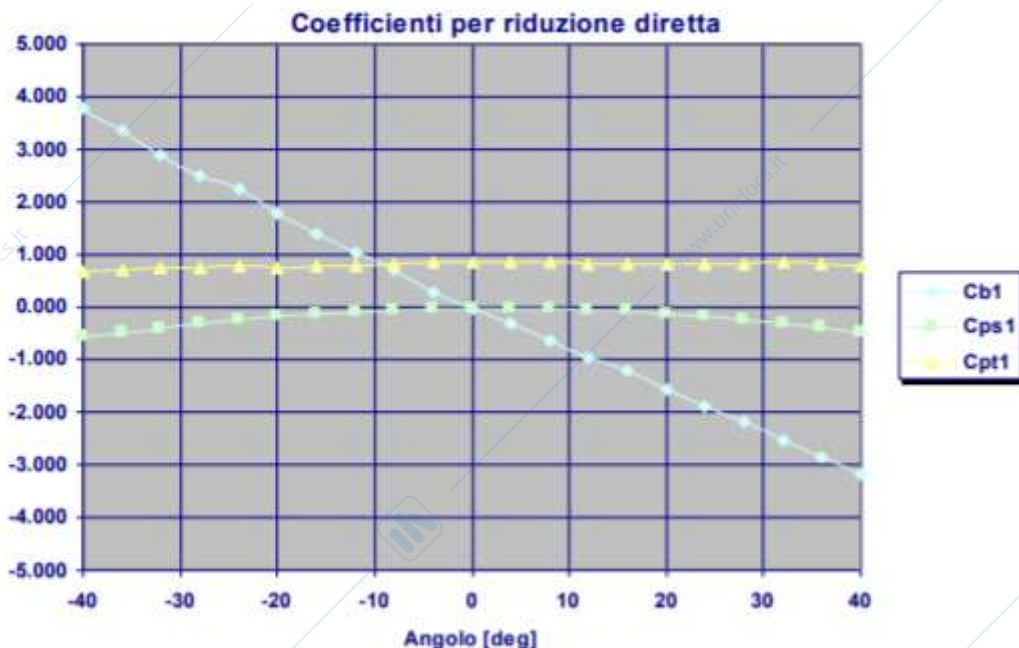
$$C_{b1} = \frac{P_{dx} \cdot P_{sx}}{P_c - \frac{P_{dx} + P_{sx}}{2}}$$

$$C_{ps1} = \frac{P_c - P_{tot}}{P_{tot} - P_{statica}}$$

$$C_{pt1} = \frac{P_c - \frac{P_{sx} - P_{dx}}{2}}{P_{tot} - P_{statica}}$$

In questo modo, abbiamo definito per ogni angolo di incidenza del flusso sulla testa, un tris di coefficienti. L'angolo di incidenza tra il flusso e la testa prende il nome di **yaw angle**. **Questi tre coefficienti ci occorrono perché vogliamo rendere indipendenti dalla velocità le misure fatte anche se la velocità è intrinseca alla pressione.**

Graficando i tre coefficienti in funzione dello yaw angle si ottengono curve simili a queste:



che ovviamente varieranno al variare delle geometria della sonda.

Questi coefficienti quindi mi permettano di misurare poi il flusso in ogni altro sistema. Ad esempio, se volessi eseguire una misurazione in un flusso non noto adesso mi sarebbe seguire i seguenti passaggi:

- Inserisco la sonda nel flusso e la ruoto fino a che non ottengo il massimo valore di P_c . Una volta ottenuto tale valore misuro anche P_{Dx} e P_{Sx} da cui calcolo C_{b1} .

- Una volta misurato C_{b1} quindi interpolando il grafico associato alla sonda posso ricavare anche i coefficienti C_{ps1} e C_{pt1} .
- Noti i coefficienti passo a valutare tramite un sistema di due equazioni in due incognite, le pressioni statica e la totale.

Preferibilmente le misure sono effettuate ruotando la sonda fin quando $P_{sx} = P_{dx}$; in questo modo la direzione del flusso (yaw angle) è indicata dal supporto graduato e la P_c indica, a meno delle limitazioni della sonda, la pressione totale (metodo per azzeramento).

Tale processo di taratura, dove abbiamo bisogno di un goniometro prende il nome di **taratura diretta**.

Ora, una sonda come quella appena esposta, avendo tutti i fori complanari, valuterà la velocità su di un piano singolo del flusso. Per questo motivo queste sonde prendono anche il **nome di sonde bidimensionali**. Quando voglio conoscere però tutte le componenti della velocità, comprese quelle verticali, dobbiamo andare a considerare l'uso di sonde con geometrie più complesse e con più fori disposti su piani diversi. In particolar modo ci occorreranno le sonde a testa sferica. **La sonda in oggetto è munita di cinque fori distribuiti sulla testa, ognuno dei quali fornisce un valore differente di pressione**, variabile a seconda del disallineamento tra asse sonda ed asse flusso. **Il foro centrale è attorniato da altre quattro prese di pressione, posizionate come in figura**. Come nel caso della sonda bidimensionale quindi, dai valori che la pressione assume nelle varie prese,

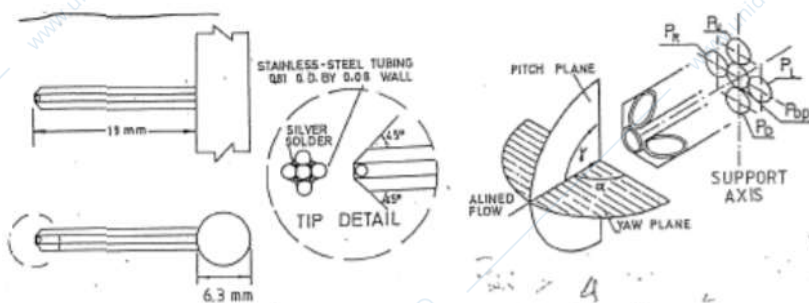


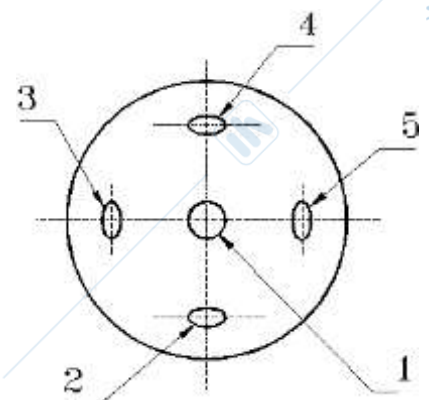
Fig. III.39 - Three dimensional flow direction probe

attraverso l'interpretazione di opportune curve di taratura che accompagnano la sonda, è possibile individuare la velocità del flusso e la sua direzione con buona precisione.

Per definire la configurazione spaziale rispetto al flusso incidente, si devono individuare due angoli:

- angolo di imbardata (yaw angle) α , positivo se la corrente giunge da destra, guardando la sonda di fronte.
- angolo di incidenza (pitch angle) β , positivo se la corrente giunge dalla parte del gambo;

Per la taratura procedo quindi come nel caso bidimensionale, fissando provvisoriamente un valore del pitch e facendo variare l'angolo di yaw di due gradi. Ad ogni campione raccolgo il set di misure che mi definisce le curve. Una volta raccolte le curve per un angolo di pitch definito, eseguo la stessa operazione variando anche l'angolo di pitch di due gradi. Le curve in questo caso verranno definite quindi al variare sia dello yaw che del pitch secondo le relazioni riportate:



$$C_{yaw} = \frac{p_r - p_l}{p_c - \frac{(p_l + p_r + p_u + p_d)}{4}}$$

$$C'_{yaw} = \frac{p_r - p_l}{p_t - p_s}$$

$$C_{pitch} = \frac{p_u - p_d}{p_c - \frac{(p_l + p_r + p_u + p_d)}{4}}$$

$$C'_{pitch} = \frac{p_u - p_d}{p_t - p_s}$$

$$C_{pt} = \frac{p_c - p_t}{p_c - \frac{(p_l + p_r + p_u + p_d)}{4}}$$

$$C'_{pt} = \frac{p_c - p_t}{p_t - p_s}$$

$$C_{pd} = \frac{p_t - p_s}{p_c - \frac{(p_l + p_r + p_u + p_d)}{4}}$$

$$C'_{pd} = \frac{p_c - \frac{(p_l + p_r + p_u + p_d)}{4}}{p_t - p_s}$$

p_c = pressure, central hole

p_r = pressure, right hole

p_l = pressure, left hole

p_u = pressure, up hole

p_d = pressure, down hole

p_s = effective static pressure

p_t = effective total pressure