

UNITA' 7 – ALLEGATO 1

7. MISURE FLUIDODINAMICHE

7.1. MISURE DI PORTATA IN CONDOTTI

7.1.1. Metodologie di misura

7.2. DISPOSITIVI A CONTRAZIONE DELLA VENA

7.2.1. Relazione teorica di base

7.2.2. Relazioni per il calcolo secondo norma

7.2.3. Diaframma normalizzato

7.2.4. Boccaglio normalizzato

7.2.5. Venturimetro normalizzato

7.3. MISURE DI VELOCITÀ NEI FLUIDI

7.3.1. Metodologie di misura

7.4. DISPOSITIVI A TUBO DI PITOT

7.4.1. Generalità

7.4.2. Tubo di pitot

7.1. MISURE DI PORTATA IN CONDOTTI

Per la misura della portata di fluidi in condotti si utilizzano molteplici tecniche, più o meno sofisticate. Nel seguito se ne presentano alcune tra quelle di più largo impiego pratico.

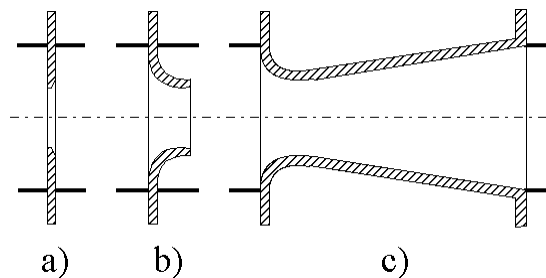
In linea di principio, anche le tecniche per la misura locale della velocità dei fluidi (trattate nei § 7.3 e § 7.4) possono essere impiegate per eseguire misure di portata in condotti, mediante la determinazione del profilo di velocità e l'integrazione sulla sezione di passaggio del flusso.

7.1.1. Metodologie di misura

– Dispositivi a contrazione della vena.

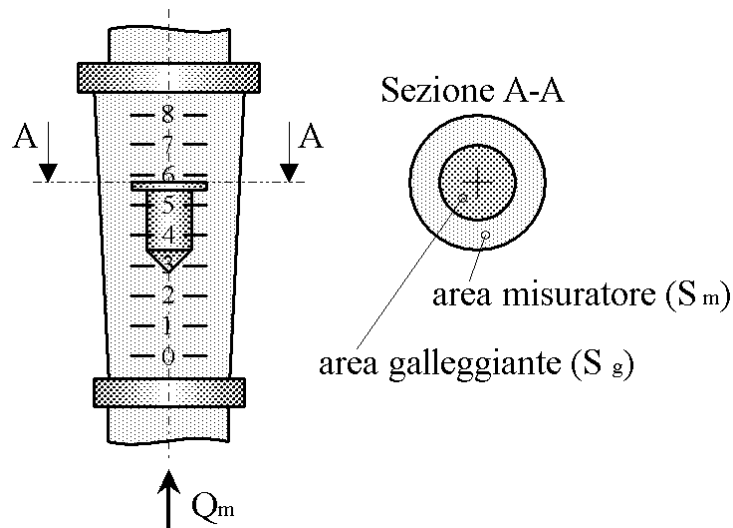
Sono basati sulla misura della caduta di pressione provocata da uno strozzamento della corrente di fluido. I tre tipi fondamentali sono:

- a) diaframma
- b) boccaglio
- c) tubo di Venturi (o venturimetro)



Tali dispositivi, di particolare importanza applicativa, sono trattati diffusamente nel § 7.2, a cui si rimanda.

– Dispositivi ad area variabile (flussimetri)



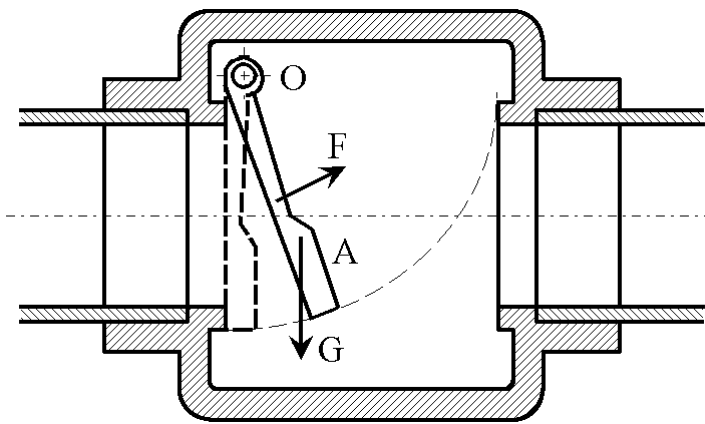
Il fluido scorre verso l'alto in un tubo a tronco di cono e spinge l'elemento sensibile, un galleggiante opportunamente conformato, tanto più in alto quanto maggiore è la portata.

La misura si esegue rilevando la posizione del galleggiante attraverso le pareti, trasparenti, del tubo.

Nei dispositivi ad area variabile, l'area della sezione di passaggio tra galleggiante e pareti del tubo (S_m-S_g) aumenta all'aumentare della quota del galleggiante. La caduta di pressione tra monte e valle del galleggiante è invece costante ed induce sul galleggiante una spinta verso l'alto che, assieme alla spinta di Archimede, ne va a contrastare il peso. Per un dato valore della portata (Q_m), il galleggiante raggiunge una posizione di equilibrio stabile quando l'area della sezione di passaggio è tale che spinta verso l'alto conseguente alla caduta di pressione e la spinta di Archimede bilanciano perfettamente il peso.

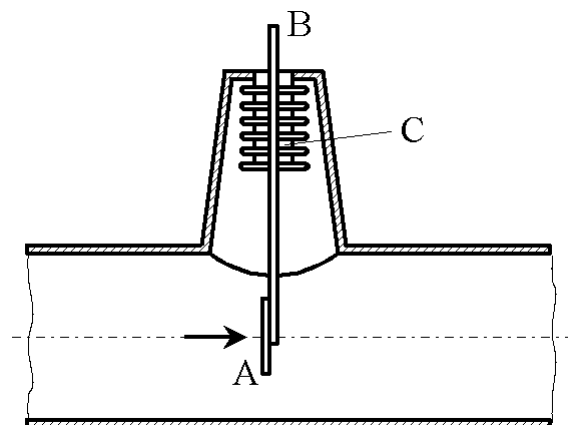
Sono dispositivi adatti a misure di portata sia in liquidi che in gas.

– Dispositivi a spinta di fluido



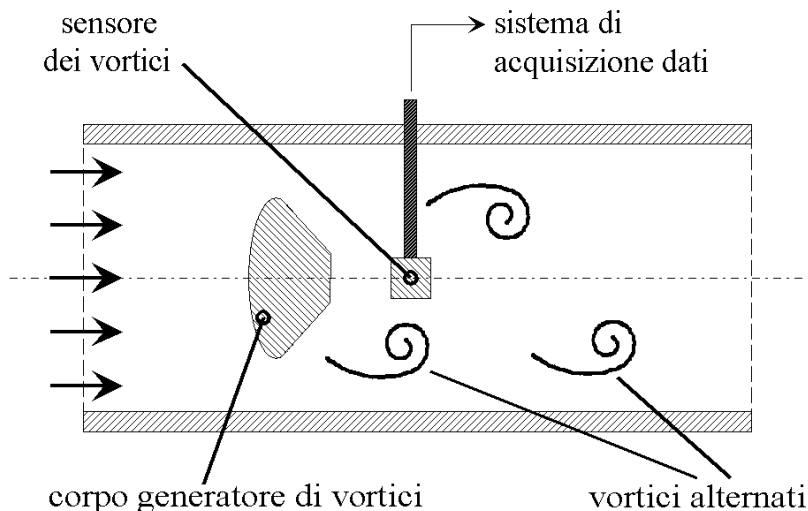
Lo strumento in figura fornisce informazioni qualitative sulla portata: il piattello A si apre in misura tanto maggiore quanto più è elevata la portata.

Il fluido che scorre nel condotto esercita sul piattello A una spinta crescente con la portata. Detta spinta si traduce in spostamenti di B (permessi dall'elasticità del soffiato C), che vengono rilevati o trasdotti elettricamente.



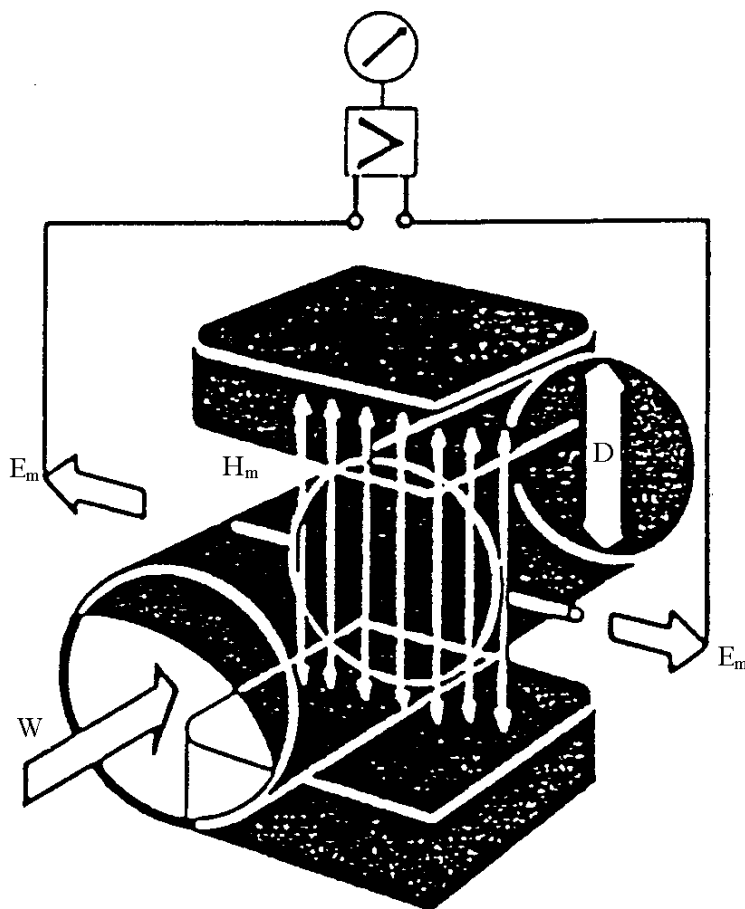
- Dispositivi a distacco di vortici

Da un corpo opportunamente profilato, inserito in una tubazione, si distaccano vortici alternati, come schematizzato in figura. Per $Re_D > 10000$, la frequenza di generazione dei vortici, rilevata da un sensore, è linearmente proporzionale a Re_D , cioè alla velocità media e, quindi, alla portata del fluido.



- Dispositivi elettromagnetici

Sono impiegabili per fluidi elettricamente conduttori, come l'acqua. Si basano sulla legge di Faraday dell'induzione elettromagnetica, che stabilisce che un conduttore (in questo caso, il liquido stesso), immerso in un campo elettromagnetico (H_m), produce ai suoi estremi una differenza di potenziale elettrico (E_m) linearmente proporzionale alla velocità media (W) con cui il conduttore attraversa le linee di flusso.



$$E_m = kH_m WD$$

ove

E_m = d.d.p. misurata

H_m = intensità di induzione magnetica applicata

W = velocità media del fluido

D = diametro tubazione

(separazione tra i capi del circuito di misura)

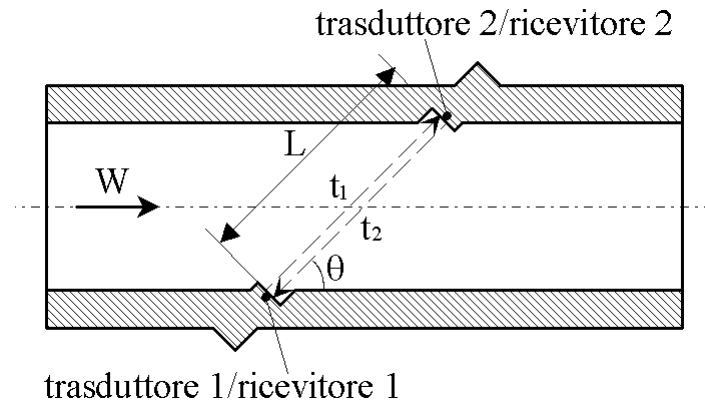
k = costante di proporzionalità

Se ne ricava:

$$Q_m = \rho WS = \frac{\pi \rho E_m D}{4 k H_m}$$

– Dispositivi ad ultrasuoni (metodo del tempo di percorrenza)

Questi dispositivi sfruttano il fatto che l'effettiva velocità di propagazione di un impulso ultrasonico in un fluido è data dalla sovrapposizione della propagazione dell'impulso alla velocità del suono e del campo di moto del fluido.



Un impulso ultrasonico, emesso dal trasduttore elettroacustico 1 (generalmente con frequenza compresa tra 0.5 e 5 MHz), percorre la distanza L fino al ricevitore 2 in un tempo t_1 pari a:

$$t_1 = \frac{L}{c + W \cdot \cos(\theta)}$$

nella relazione, c è la velocità del suono nel fluido e $W \cos(\theta)$ è la componente lungo L della velocità del fluido W , assunta uniforme sulla sezione di passaggio della tubazione.

Il tempo $t_2 (>t_1)$ in cui un impulso ultrasonico emesso dal trasduttore elettroacustico 2 percorre la distanza L fino al ricevitore 1 è invece pari a:

$$t_2 = \frac{L}{c - W \cdot \cos(\theta)}$$

Combinando le due relazioni precedenti, è possibile ricavare una formula che correla la velocità media del fluido ai due tempi di percorrenza:

$$W = \frac{L}{2 \cos(\theta)} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right)$$

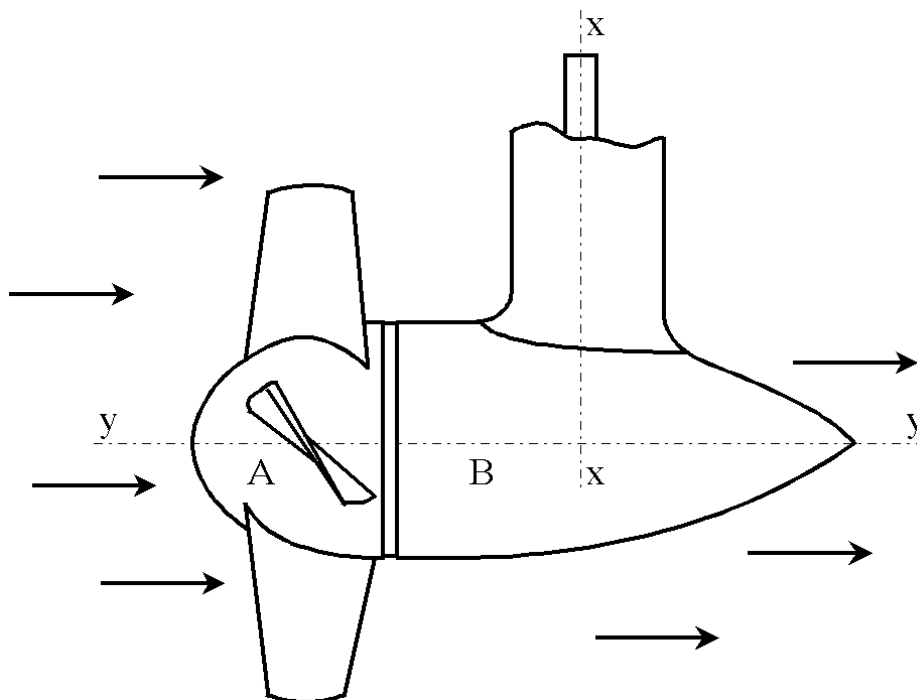
Si noti che la relazione è indipendente dalla velocità del suono nel fluido, c , la cui conoscenza non è quindi necessaria.

La portata è in definitiva pari a:

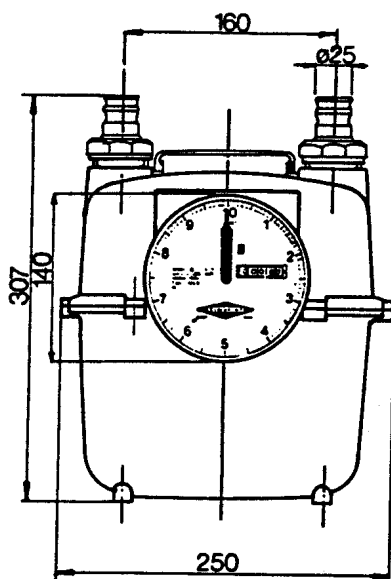
$$Q_m = \rho S W = \frac{\rho S L}{2 \cos(\theta)} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right)$$

– Dispositivi a turbina

Il dispositivo rappresentato in figura rappresenta un mulinello che, inserito in un condotto, consente la misura della portata. La velocità di rotazione del mulinello A attorno all'asse y-y, trasmessa mediante un sistema a ingranaggi dall'alberino del mulinello ad un alberino rotante attorno all'asse x-x e misurata all'estremità superiore di questo, è correlata alla velocità del fluido. La correlazione è pressoché lineare per $Re_D > 10000$.



– Dispositivi a contatore



Sono dispositivi che registrano la quantità di fluido che li attraversa. Non consentono quindi la misura istantanea della portata.

Nel caso di liquidi, al contatore (analogico) è collegato, tramite un riduttore ad ingranaggi o a vite senza fine, un misuratore di portata a mulinello. Nel caso di gas, si utilizzano invece dispositivi volumetrici del tipo raffigurato a lato.

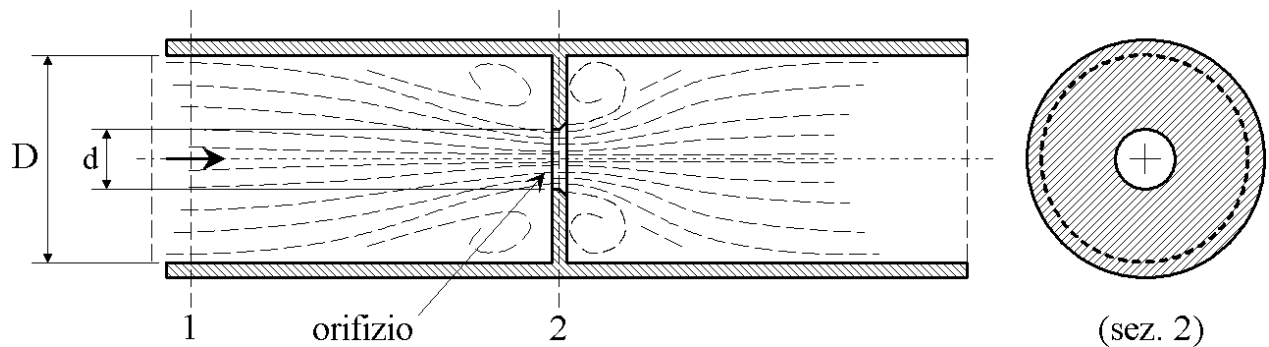
Il valore visualizzato rappresenta dunque la quantità di fluido che ha attraversato il misuratore a partire dall'azzeramento del contatore.

7.2. DISPOSITIVI A CONTRAZIONE DELLA VENA

Sono basati sulla misura della variazione di pressione tra sezione a monte (indisturbata) e sezione contratta di uno strozzamento della corrente. Il principio comune su cui si basano è quello di provocare artificialmente tra le sezioni di misura un'accelerazione della vena, a cui corrisponde, in base all'equazione di Bernoulli, una differenza di pressione di entità sufficiente da consentire una misura di buona qualità. Gli organi di strozzamento sono normalizzati dalle norme CNR-UNI 10023 ("Misure di portata di correnti fluide a mezzo di diaframmi, bocchelli o venturimetri inseriti su condotte in pressione a sezione costante") e ISO 5167.

7.2.1. Relazione teorica di base

Si consideri un tratto di tubazione orizzontale, con sezione circolare e diametro interno D , attraversato da una portata di un fluido ideale e incompressibile in moto stazionario. Nel tratto di tubazione è inserito uno strozzamento a diaframma con diametro dell'orifizio d (in pratica, un disco rigido con al centro un'apertura circolare).



L'equazione di bilancio delle masse per un fluido incompressibile in moto stazionario, applicata tra le sezioni 1 (in cui la sezione di passaggio presenta diametro D) e 2 (in cui la sezione di passaggio ha diametro d), restituisce:

$$Q_{v,1} = Q_{v,2}$$

ovvero

$$W_1 \pi \frac{D^2}{4} = W_2 \pi \frac{d^2}{4}$$

L'equazione di bilancio dell'energia meccanica per un fluido ideale ed incompressibile in moto stazionario, applicata tra le sezioni 1 e 2, assume la forma:

$$\frac{W_2^2 - W_1^2}{2} + \frac{P_2 - P_1}{\rho} = 0$$

ovvero

$$\frac{W_2^2}{2} (1 - \beta^4) = \frac{P_1 - P_2}{\rho}$$

in cui β è il rapporto di contrazione, definito come:

$$\beta = \frac{d}{D}$$

La portata in massa che attraversa lo strozzamento può essere in definitiva correlata alla variazione di pressione tra le sezioni 1 e 2:

$$Q_m = \rho S_2 W_2 = \pi \frac{d^2}{4} \sqrt{\frac{2\rho(p_1 - p_2)}{1 - \beta^4}}$$

7.2.2. Relazioni per il calcolo secondo norma

- La correlazione tra portata e caduta di pressione presentata nel § 7.2.1 è valida solo per un fluido incomprimibile ideale. Una relazione applicabile a fluidi incomprimibili reali, in cui cioè gli attriti viscosi non sono trascurabili, è ottenuta conglobando gli effetti della viscosità in un coefficiente di efflusso C , correttivo della portata teorica.

$$Q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}$$

Le formule per la stima del coefficiente di efflusso, che variano con il tipo di strozzamento, presentano C come funzione del numero di Reynolds basato sul diametro del condotto, Re_D , e del rapporto di contrazione β :

$$C = C(Re_D, \beta)$$

ove

$$Re_D = \frac{WD}{\nu}$$

$$\beta = \frac{d}{D}$$

Il coefficiente di efflusso ed il termine a denominatore della relazione per il calcolo della portata sono spesso riuniti in un coefficiente di portata α , definito come:

$$\alpha = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

- Una relazione simile alla precedente, ma applicabile a fluidi reali comprimibili (gas e vapori), si ottiene conglobando gli effetti della comprimibilità in un coefficiente di influenza della comprimibilità ε , correttivo della portata teorica:

$$Q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\rho_1 \Delta p} = \alpha \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\rho_1 \Delta p}$$

Le formule per la stima di ε , che variano con il tipo di strozzamento, sono in generale funzioni del numero di Reynolds, del rapporto di contrazione β , del rapporto tra caduta di pressione causata dallo strozzamento ($\Delta p = p_1 - p_2$) e pressione assoluta a monte dello strozzamento (p_1), dell'esponente dell'adiabatica k per il fluido considerato:

$$\varepsilon = \varepsilon(Re_D, \beta, \Delta p / p_1, k)$$

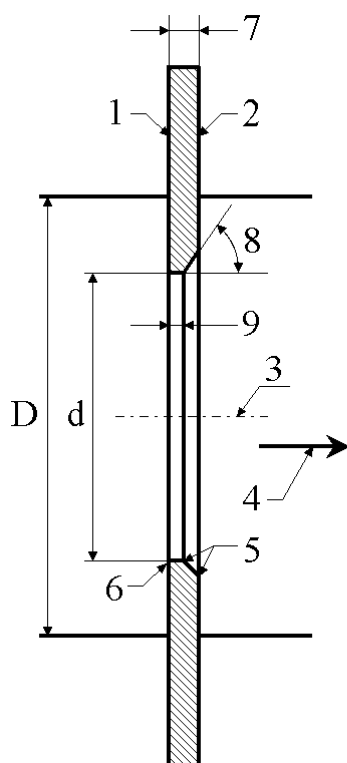
in cui $k=1.31$ per vapori surriscaldati, $k=1.41$ per aria e gas biatomici.

- Per tutti i dispositivi a strozzamento di vena, le norme prevedono l’inserimento, a monte e a valle dello strozzamento, di tratti rettilinei di condotto (raddrizzatori), al fine di smorzare eventuali moti trasversali o rotatori indotti da curve o accidentalità. Le lunghezze di detti tratti rettilinei sono prescritte dalle norme.
- Si noti che, in un fluido ideale, la caduta di pressione è completamente recuperata a valle del diaframma, quando la sezione di passaggio del flusso ritorna uguale a quella che si aveva a monte. In un fluido reale, invece, si recupera solo una frazione della caduta di pressione allo strozzamento, variabile a seconda del tipo di strozzamento utilizzato (vedi § 7.2.5).

Si noti anche che, in un misuratore di portata a diaframma, la sezione di massima contrazione della vena fluida non si ha, per un fluido reale, in corrispondenza dell’orifizio del diaframma, ma leggermente a valle di questo.

7.2.3. Diaframma normalizzato

Un diaframma normalizzato è essenzialmente costituito da una piastra circolare in cui è praticato un orifizio, smussato a valle del flusso di un angolo assegnato. Le tolleranze di lavorazione sono prescritte dalle norme di riferimento.

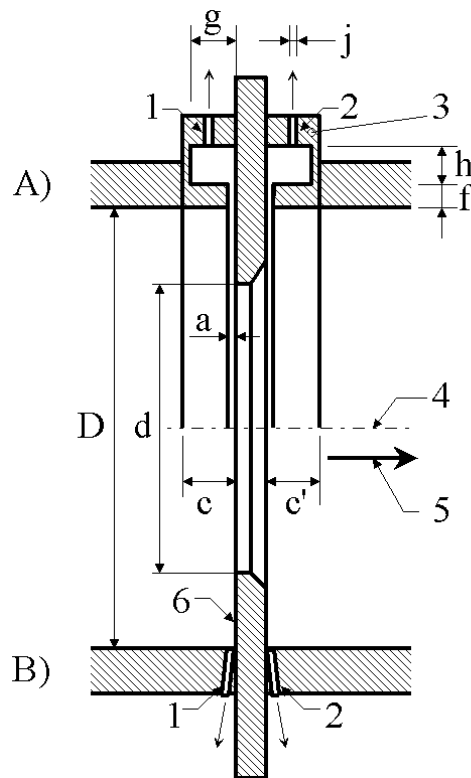


Legenda

- 1 faccia a monte
- 2 faccia a valle
- 3 asse di simmetria
- 4 direzione del flusso
- 5 spigoli a valle
- 6 spigolo a monte
- 7 spessore della piastra
- 8 angolo di smusso
- 9 spessore dell'orifizio

Le prese di pressione possono essere innestate su due camere anulari (configurazione A nella figura seguente), che sono in comunicazione con l’interno del condotto tramite due fessure anulari alla base del diaframma, realizzate immediatamente a monte e a valle di questo. Le dimensioni delle camere e delle fessure sono prescritte dalle norme.

In alternativa, si possono usare prese di pressione singole agli angoli (configurazione B), innestate sulla parete del condotto, a monte e a valle del diaframma, in prossimità degli angoli tra parete e diaframma.



Legenda

- 1 presa di pressione a monte
- 2 presa di pressione a valle
- 3 anello portante
- 4 asse di simmetria
- 5 direzione del flusso
- 6 diaframma

- a larghezza della fessura anulare o diametro della presa singola
- b diametro dell'anello portante
- c lunghezza dell'anello a monte
- c' lunghezza dell'anello a valle
- d lunghezza dell'anello a valle
- f altezza della fessura
- g lunghezza della camera anulare
- h altezza della camera anulare

A seconda della configurazione scelta, variano le relazioni per il calcolo del coefficiente di efflusso.

– Per la configurazione A (prese di pressione su camere con fessure anulari) si ha:

$$C = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5} (10^6 / Re_D)^{0.75} + 0.090(25.4/D)\beta^4(1 - \beta^4)^{-1} - 0.0337(25.4/D)\beta^3$$

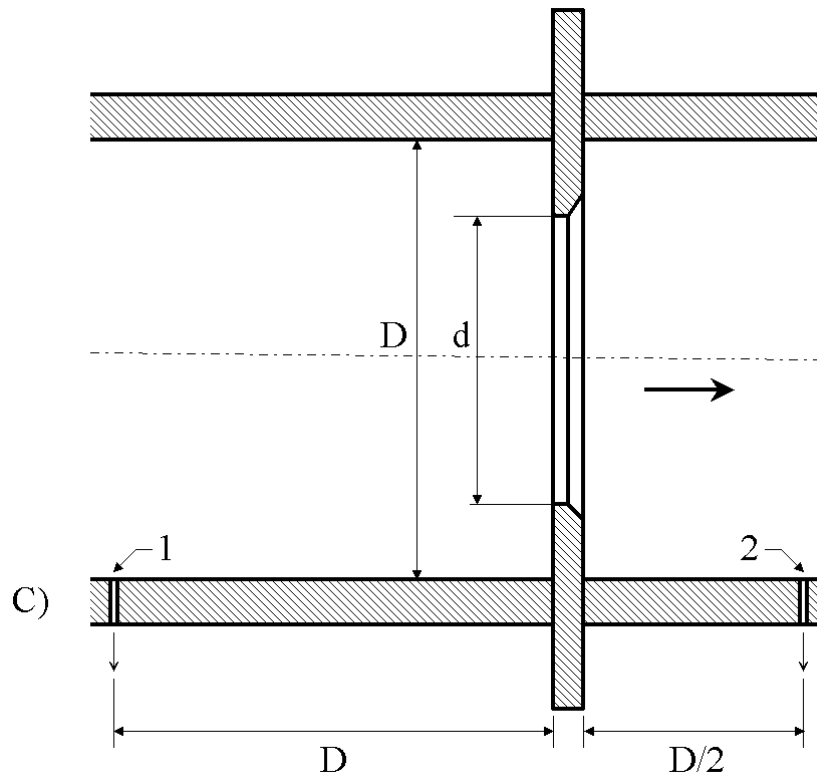
La relazione vale se $D > 58.62$ mm, altrimenti cambia il coefficiente di $(25.4/D)\beta^4(1 - \beta^4)^{-1}$:

$$C = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5} (10^6 / Re_D)^{0.75} + 0.039(25.4/D)\beta^4(1 - \beta^4)^{-1} - 0.0337(25.4/D)\beta^3$$

– Per la configurazione B (prese di pressione agli angoli) si ha:

$$C = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5} (10^6 / Re_D)^{0.75}$$

- Un'ulteriore configurazione, schematizzata nella figura seguente (configurazione C), prevede che le prese di pressione siano collocate a distanza D a monte del diaframma e a distanza $D/2$ a valle (sezioni 1 e 2, rispettivamente).



La relazione per il calcolo del coefficiente di efflusso nella configurazione C (prese di pressione a distanza D e $D/2$ rispettivamente a monte e a valle del diaframma) è:

$$C = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5} \left(10^6 / Re_D\right)^{0.75} + 0.039\beta^4 (1 - \beta^4)^{-1} - 0.015039\beta^3$$

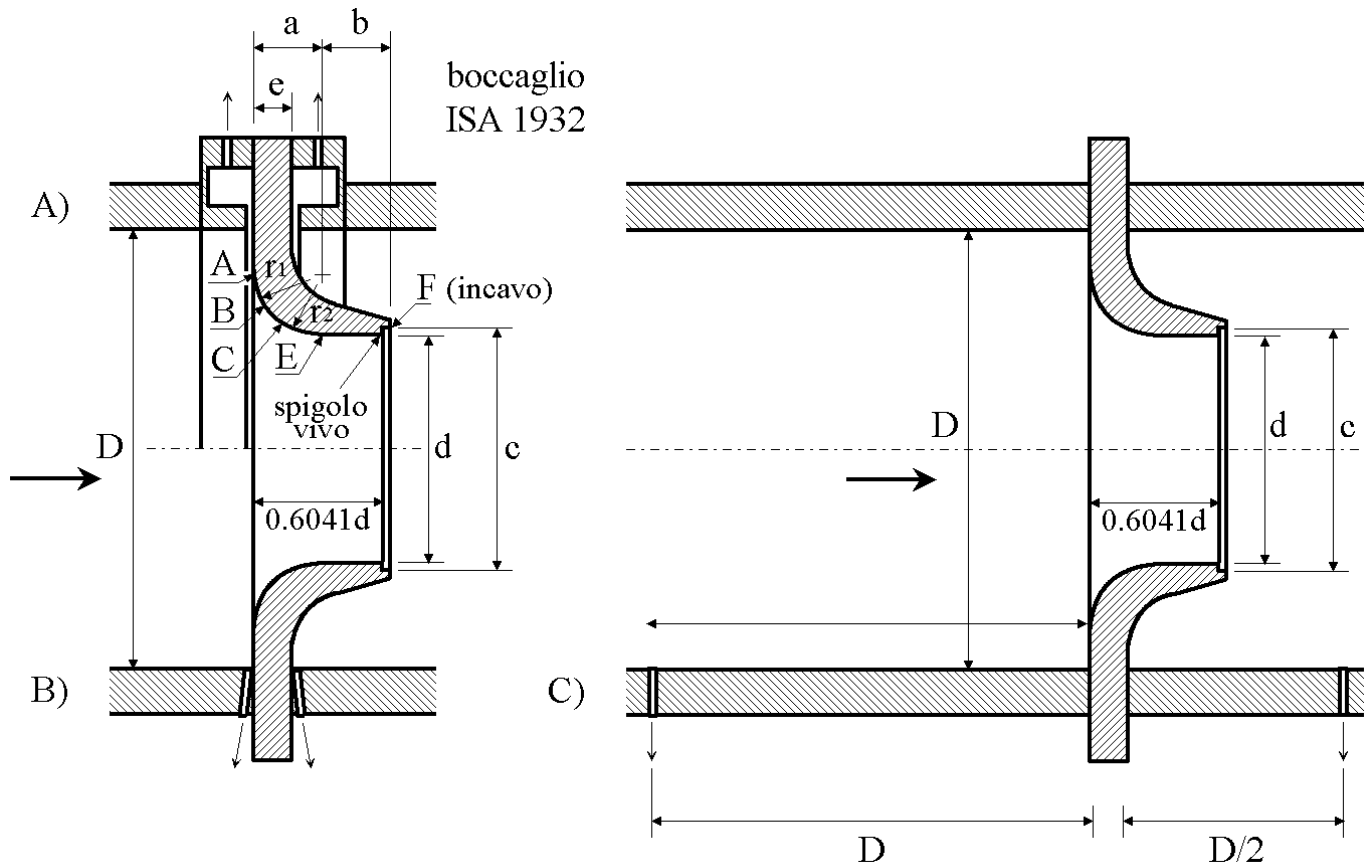
- Per tutte le configurazioni dei misuratori di portata a diaframma, la relazione per il calcolo del coefficiente di influenza della comprimibilità ε è la seguente:

$$\varepsilon = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{\Delta p}{k \cdot p_1}$$

in cui k è l'esponente isoentropico del fluido (gas o vapore), p_1 è la pressione assoluta nel flusso indisturbato a monte del diaframma e Δp è la caduta di pressione tra le prese a monte e a valle

I misuratori di portata a diaframma sono accurati e relativamente poco costosi, ma causano una consistente perdita di carico non recuperabile, praticamente pari alla caduta di pressione attraverso lo strozzamento. Sono quindi adatti alla caratterizzazione su banco prova di dispositivi quali pompe, ventilatori, valvole, ecc., ma non al monitoraggio in linea di processi a flusso continuo, in cui non si vogliono generalmente introdurre perdite di carico rilevanti.

7.2.4. Boccaglio normalizzato



Il boccaglio è costituito da una parte convergente, da un profilo arrotondato, e da una strozzatura o gola cilindrica. Il profilo del boccaglio, normalizzato, può essere quindi caratterizzato distinguendo:

- una parte piana di imbocco A, perpendicolare all'asse di simmetria
- una parte convergente, definita da due archi di circonferenza B e C con raggi di curvatura r_1 e r_2 , rispettivamente
- una gola cilindrica E
- un incavo F (con diametro c), necessario solo se si temono danni allo spigolo vivo interno

La parte del boccaglio che si trova all'interno del condotto presenta simmetria assiale.

Come per il diaframma, le prese di pressione possono essere su camere con fessure anulari (configurazione A), agli angoli (configurazione B) o a distanza D a monte e $D/2$ a valle (configurazione C).

- La relazione per il calcolo del coefficiente di efflusso, C , è uguale per tutte le configurazioni delle prese di pressione, ma dipende dal raggio di curvatura del boccaglio. Per boccagli a corto raggio si ha:

$$C = 0.9900 - 0.2262\beta^{4.1} + (0.000215 - 0.00125\beta + 0.002490\beta^{4.7}) \left(10^6 / Re_D\right)^{1.15}$$

Per boccagli a lungo raggio si ha:

$$C = 0.9965 - 0.00653\beta^{0.5} \left(10^6 / Re_D\right)^{0.5}$$

- In tutti i casi, la relazione per il calcolo del coefficiente di influenza della comprimibilità ε è la seguente:

$$\varepsilon = \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/k} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \frac{1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k}}{1 - p_2/p_1} \cdot \frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 (p_2/p_1)^{2/k}} \right]^{1/2}$$

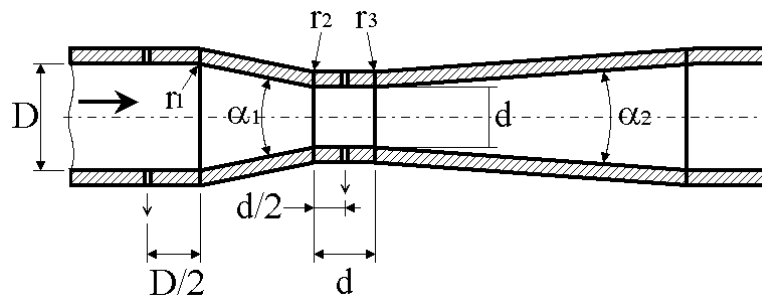
ove p_2/p_1 è il rapporto tra le pressioni assolute alle sezioni a valle e a monte, rispettivamente.

I misuratori di portata a boccaglio sono accurati quasi quanto quelli a diaframma, ma più costosi a causa delle lavorazioni necessarie ad ottenere superfici a doppia curvatura rispettando le tolleranze richieste dalle norme. Causano però una minore caduta di pressione permanente e, quindi, si prestano meglio dei diaframmi al monitoraggio in linea di processi a flusso continuo.

7.2.5. Venturimetro normalizzato

- Venturimetro classico

È costituito da un tratto divergente conico (con $\alpha_1 = 21^\circ \pm 1^\circ$), una gola cilindrica (con lunghezza pari al diametro d della gola stessa) ed un tratto convergente conico (con α_2 compreso tra 7° e 15°), posti in serie.



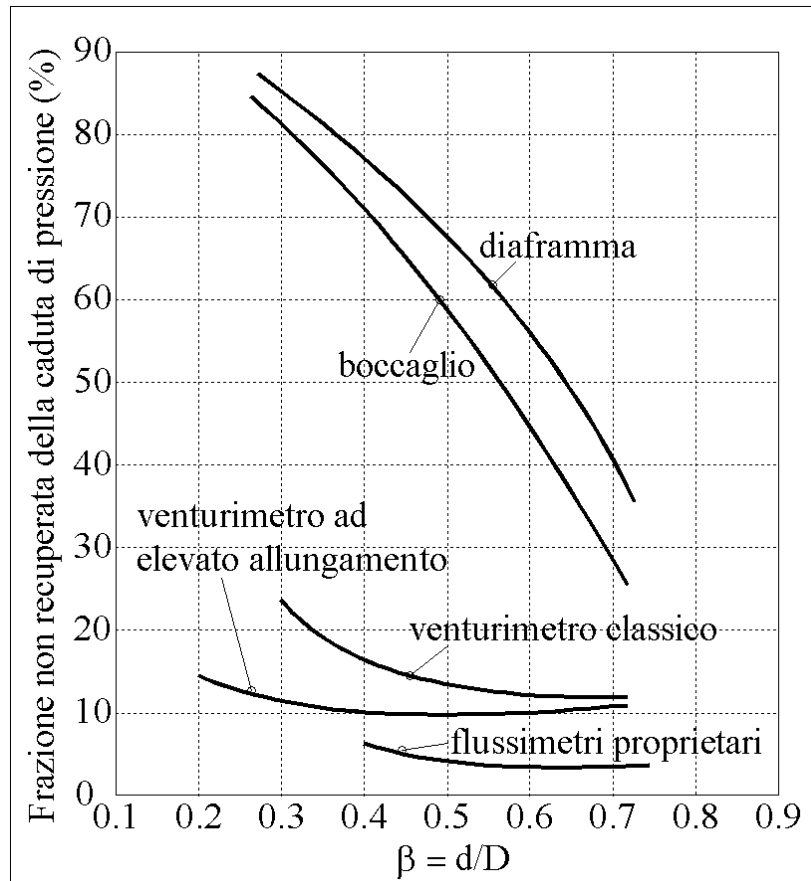
Le prese di pressione sono a monte del convergente, a distanza $D/2$, e a metà della gola. Il divergente presenta un elevato allungamento per evitare, in prossimità delle pareti, fenomeni di stallo e distacco della vena fluida.

Il coefficiente di efflusso, C , è indipendente dal numero di Reynolds e varia tra 0.984 (venturimetro classico, fuso o saldato) a 0.995 (venturimetro classico lavorato).

Il coefficiente di influenza della comprimibilità, ε , può essere calcolato tramite la stessa relazione presentata nel § 7.2.4 per i misuratori di portata a boccaglio.

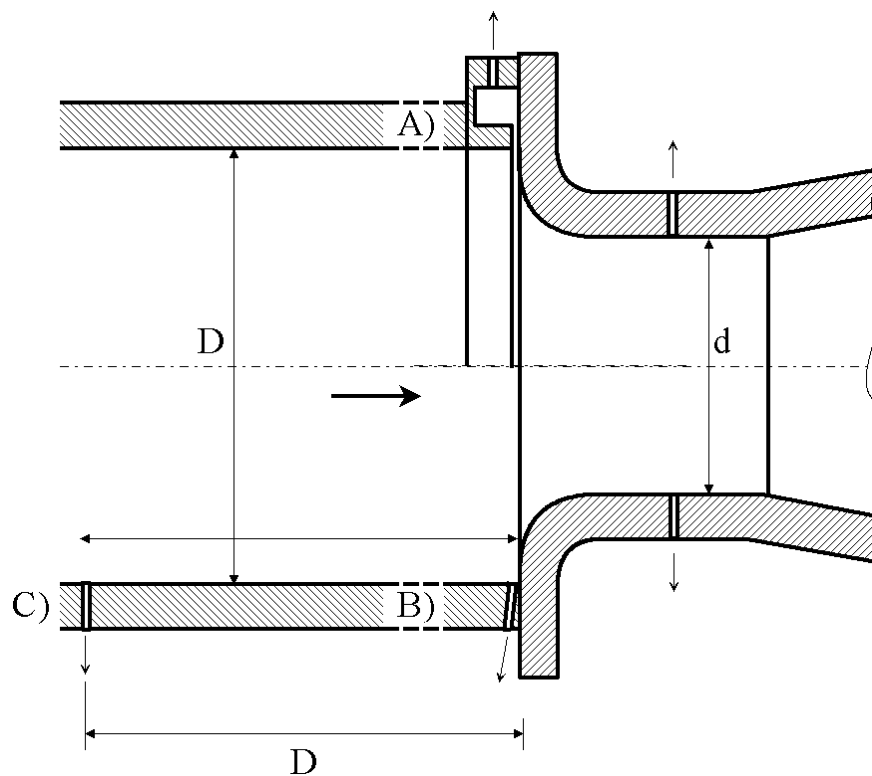
$$\varepsilon = \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/k} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \frac{1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k}}{1 - p_2/p_1} \cdot \frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 (p_2/p_1)^{2/k}} \right]^{1/2}$$

I misuratori di portata a tubo di Venturi sono accurati quanto quelli a diaframma o a boccaglio, ma ancora più costosi dei boccagli a causa delle lavorazioni richieste. Sono però tra i dispositivi che causano la più bassa caduta di pressione permanente, come indicato nel diagramma seguente.



– Venturimetro boccaglio

È una via di mezzo tra un venturimetro ed un boccaglio. In pratica, è costituito da un boccaglio, la cui sezione di efflusso, anziché essere a spigolo vivo, è raccordata con il condotto principale a valle mediante un divergente tronco-conico (vedi figura).



La presa di pressione a valle è sempre nella gola, mentre le prese a monte possono essere dei tre tipi già visti per i diaframmi ed i boccagli, vale a dire su camere con fessure anulari (configurazione A), agli angoli (configurazione B) e a distanza D a monte (configurazione C).

La relazione per il calcolo del coefficiente di efflusso, C, è uguale per tutte le configurazioni:

$$C = 0.9958 - 0.196\beta^{4.5}$$

Il coefficiente di influenza della comprimibilità, ϵ , può essere calcolato tramite la stessa relazione utilizzata per i misuratori di portata a boccaglio e a tubo di Venturi.

7.3. MISURE DI VELOCITÀ NEI FLUIDI

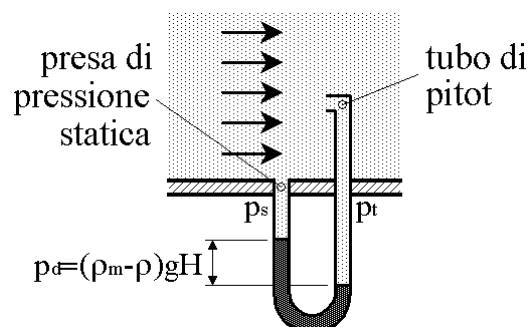
Per la misura della velocità dei fluidi sono utilizzate svariate tecniche, alcune molto semplici e che consentono misure puntuali di una sola componente della velocità, altre particolarmente sofisticate ed atte a determinare il campo di moto tridimensionale in tutto il dominio di indagine.

Nel seguito si presentano le tecniche di più largo impiego pratico, rimandando alla letteratura specializzata per quelle caratterizzate da maggior livello di sofisticazione.

7.3.1. Metodologie di misura

– Dispositivi a tubo di pitot

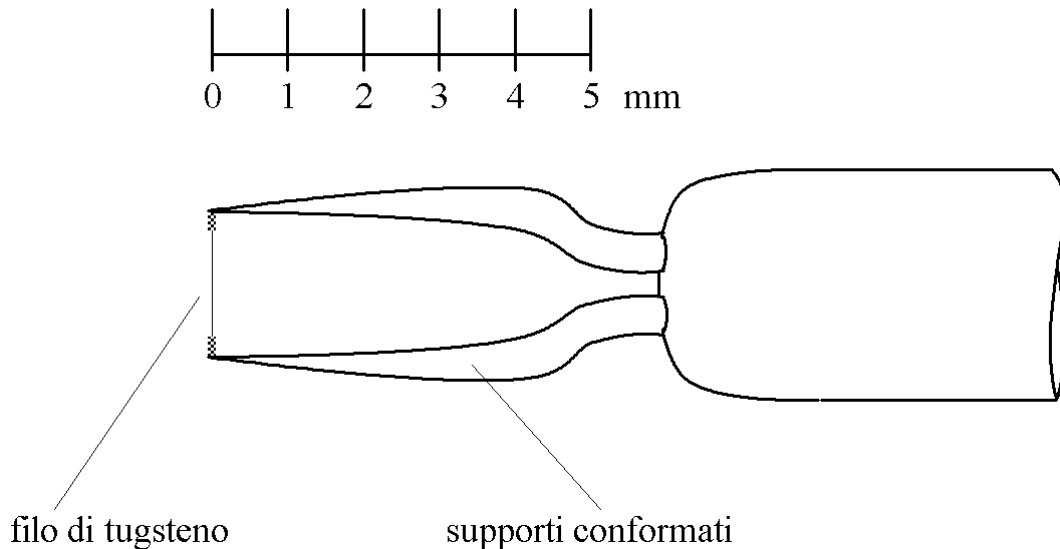
Sono basati sulla legge di Bernoulli e permettono di correlare la velocità alla pressione dinamica del fluido, cioè alla differenza tra la pressione totale, rilevata mediante una presa di pressione con sezione di ingresso ortogonale alla direzione del moto (il tubo di pitot), e la pressione statica, rilevabile mediante una presa di pressione con sezione di ingresso tangente alla direzione del moto.



Il dispositivo viene presentato in dettaglio nel § 7.4.

– Anemometro a filo caldo (hotwire anemometer)

L'anemometro a filo caldo è impiegato per misure di velocità negli aeriformi. Esso consiste di un sottilissimo filo conduttore elettrico (in tungsteno, nichel o platino), attraversato da una corrente elettrica continua ed esposto al flusso del fluido di cui si vuole misurare la velocità. Lo strumento è completato da un apparato elettronico di controllo e misura.



Il filo, che ha lunghezza tipica 1÷3 mm e diametro inferiore a 5 μm , si riscalda per effetto Joule quando è percorso da una corrente elettrica. L'apparato elettronico di controllo e misura varia la corrente erogata in modo da mantenere costantemente pari ad un valore predeterminato la temperatura del filo, che è proporzionale alla resistenza elettrica del filo stesso e può essere agevolmente rilevata.

Il principio di funzionamento è il seguente: la potenza termica scambiata tra il filo (caldo) ed il fluido (freddo) che lo lambisce è all'equilibrio pari alla potenza termica dissipata nel filo per effetto Joule:

$$\dot{Q} = \Delta V \cdot I = R \cdot I^2$$

La potenza termica scambiata è anche correlata alla velocità del fluido e, più precisamente, alla componente normale al filo della velocità, u , attraverso il coefficiente di convezione h .

$$\dot{Q} = h(u) \cdot A \cdot (T_{\text{filo}} - T_{\text{fluido}})$$

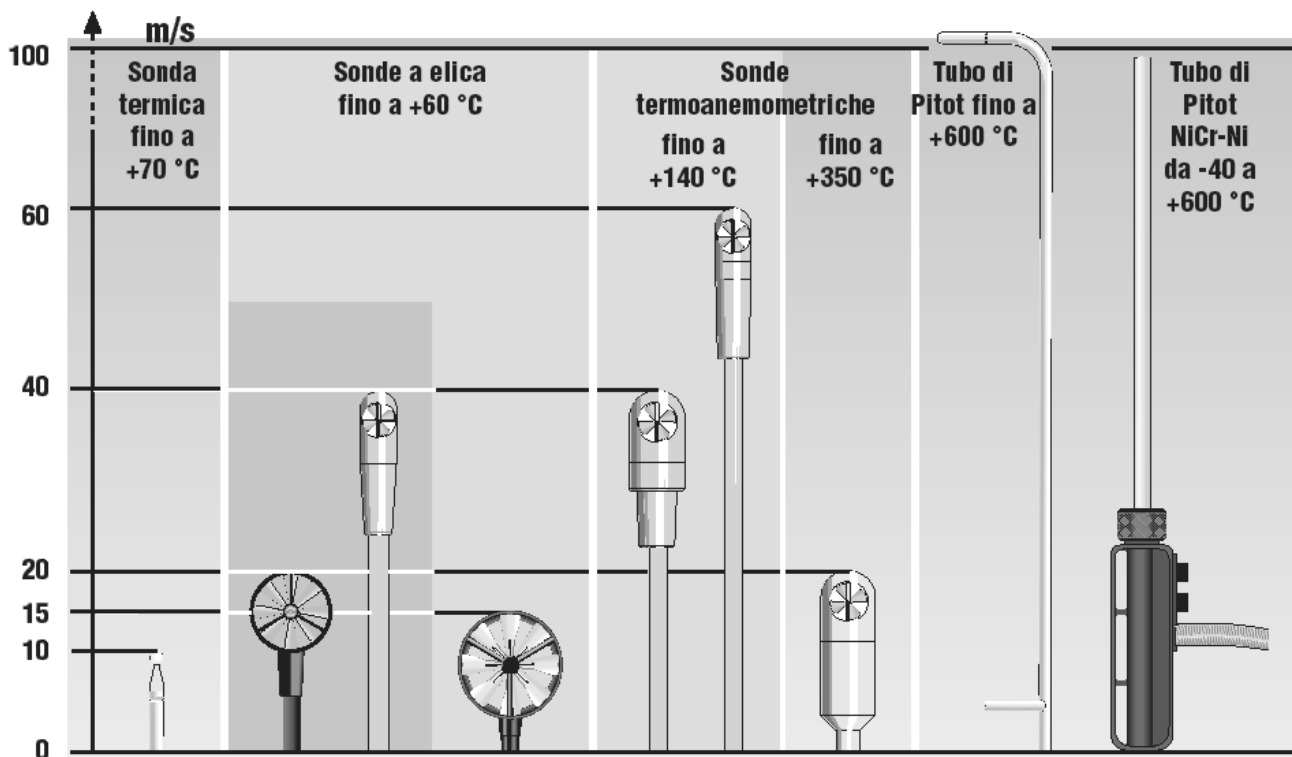
Lo strumento rileva, tramite misure della corrente (I) e della tensione (ΔV) applicate, la resistenza elettrica del filo caldo ($R = \Delta V / I$), a cui è correlabile la temperatura del filo stesso (T_{filo}). La corrente o la tensione vengono di solito regolate in modo da stabilizzare la temperatura del filo ad un valore prefissato (filo caldo a temperatura controllata). Inoltre, la temperatura del fluido (T_{fluido}) viene misurata mediante un opportuno sensore termico, ad esempio un termistore. In tali condizioni, la componente della velocità normale al filo (u) può essere correlata alla corrente applicata.

Il filo caldo è meccanicamente delicato e moderatamente invasivo. Esso consente misure agevoli ed accurate, anche in presenza di transitori veloci e/o fluttuazioni ad alta frequenza del moto. Combinando sonde a due-tre fili opportunamente disposti, è inoltre possibile rilevare tutte le componenti del vettore velocità.

- Dispositivi a elica

Sono costituiti da un corpo palettato simile a quello di un ventilatore, con asse di rotazione che, di solito, deve essere allineato alla direzione del moto del fluido. Il corpo palettato è posto in movimento dal fluido con frequenza di rotazione che, entro un dato intervallo (dipendente dalla conformazione delle palette), è proporzionale alla velocità del fluido stesso.

Sono particolarmente robusti e si impiegano per misurare la velocità di gas (solitamente aria) in campo aperto, in ambiti quali, ad esempio, la meteorologia, la climatizzazione di ambienti o la ventilazione di forni.



Campi di misura delle sonde di velocità: sonde a filo caldo (sonde termiche), a elica (incluse le sonde termooanemometriche per misura simultanea della velocità e della temperatura) e pitot (fonte: www.testo.de).

7.4. DISPOSITIVI A TUBO DI PITOT

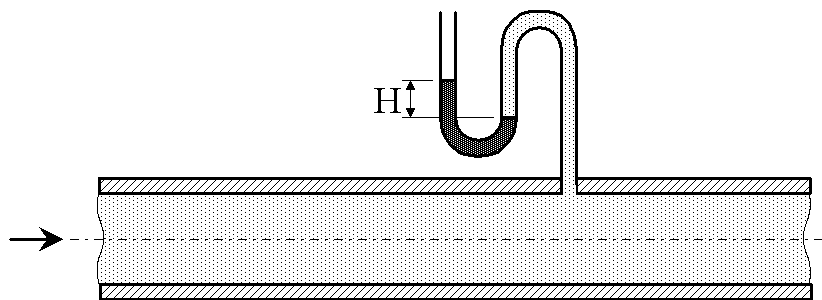
7.4.1. Generalità

– Pressione statica

È la pressione (relativa) misurabile in un condotto mediante un manometro differenziale come quello schematizzato in figura, in cui un'estremità è innestata sul condotto, con sezione di ingresso tangente alla direzione del moto, e l'altra estremità è aperta all'atmosfera.

$$p_s = (\rho_m - \rho)gH$$

Nella relazione, ρ è la densità del fluido nel condotto e ρ_m è la densità del fluido manometrico.

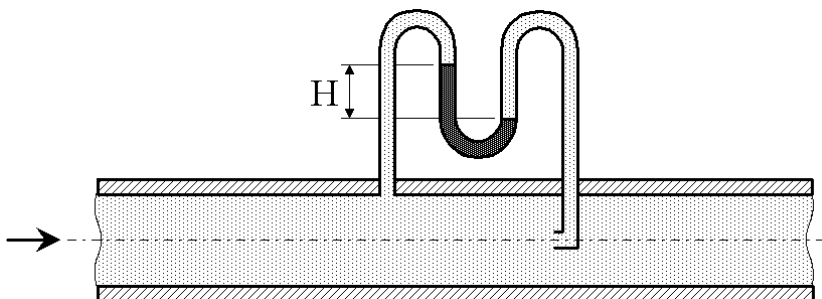


In pratica, la pressione statica è quella che si rileverebbe con un dispositivo di misura della pressione in moto con il fluido.

– Pressione dinamica

È la differenza di pressione misurabile in un condotto mediante un manometro differenziale come quello schematizzato in figura, in cui entrambe le estremità sono innestate sul condotto, con sezioni di ingresso l'una tangente e l'altra ortogonale alla direzione del moto.

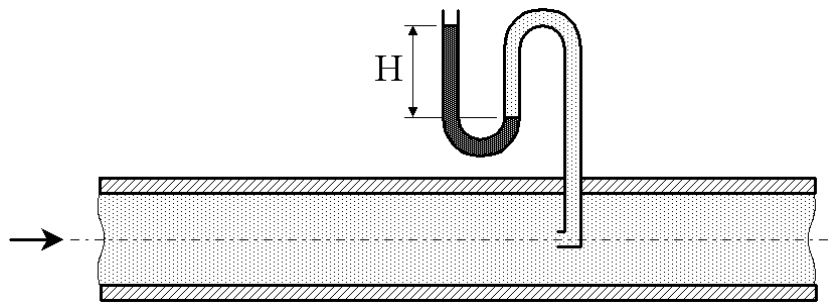
$$p_d = (\rho_m - \rho)gH = \rho \frac{u^2}{2}$$



– Pressione totale (o pressione di ristagno)

È la pressione (relativa) misurabile in un condotto mediante un manometro differenziale come quello schematizzato in figura, in cui un'estremità è innestata sul condotto, con sezione di ingresso ortogonale alla direzione del moto, e l'altra estremità è aperta all'atmosfera. È di fatto pari alla somma della pressione statica e della pressione dinamica.

$$p_t = (\rho_m - \rho)gH = p_s + p_d$$



La pressione totale o di ristagno è, più in generale, definita come la pressione che un fluido in moto eserciterebbe su una superficie ortogonale alla velocità locale del fluido stesso dopo un processo di decelerazione in cui non si hanno dissipazioni viscosi (processo isoentropico), fino ad avere velocità nulla.

7.4.2. Tubo di pitot

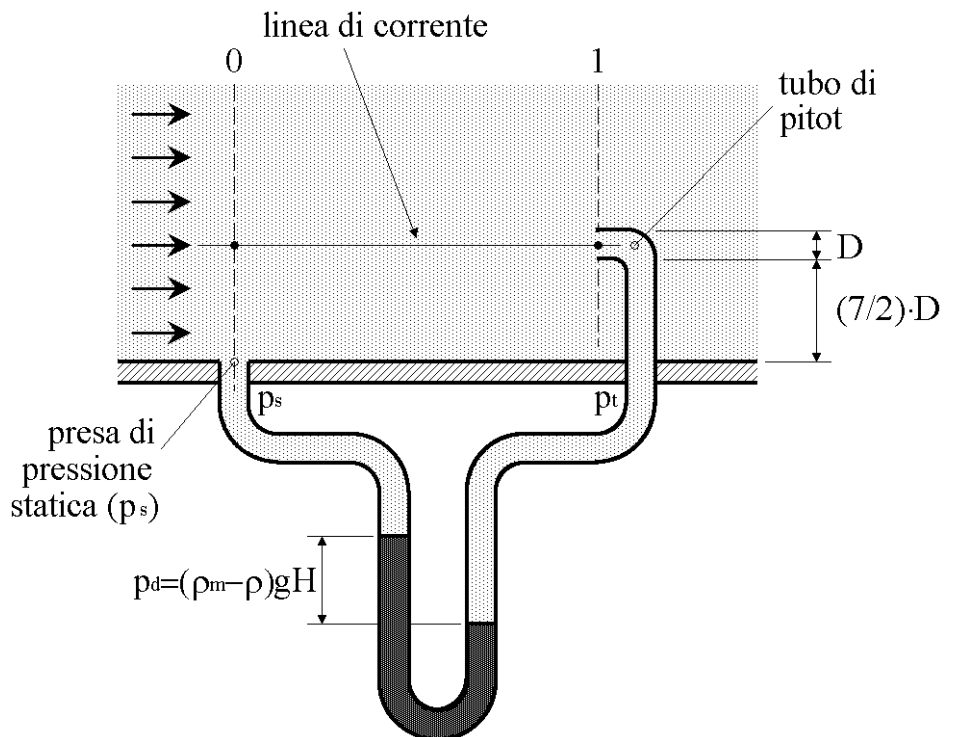
– Applicando l'equazione di Bernoulli lungo la linea di corrente evidenziata in figura, tra le posizioni 0 e 1 (in cui 1 è un punto di ristagno), si ottiene:

$$\frac{u_0^2}{2} + \frac{p_0}{\rho} = \frac{p_1}{\rho}$$

ove

$$p_0 = p_s$$

$$p_1 = p_t$$



Risolvendo rispetto a u_0 l'equazione precedente, valida per un fluido incompressibile (per cui $\rho =$ costante), si ricava:

$$u_0 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

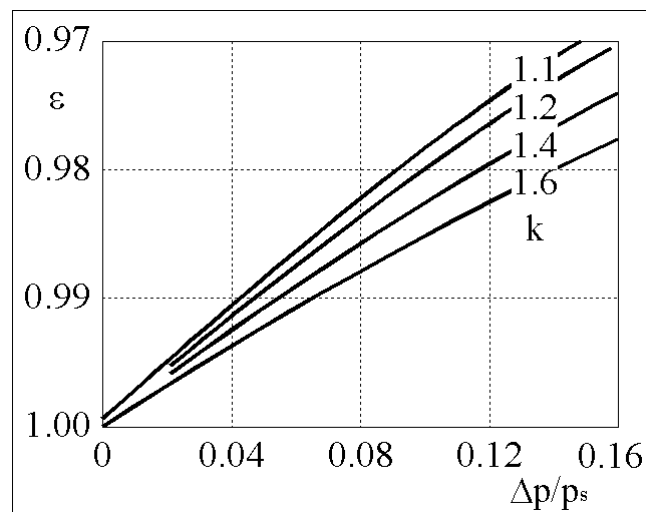
In altri termini, si può risalire alla velocità del fluido a partire dalla misura della differenza di pressione $\Delta p = (p_1 - p_0)$. Tale differenza di pressione, se le perdite di carico nella direzione del moto sono trascurabili, è quella misurata tra una presa di pressione totale a tubo di pitot ed una presa di pressione statica.

- Una relazione simile alla precedente, ma applicabile a fluidi comprimibili, si ottiene conglobando gli effetti della comprimibilità in un coefficiente di influenza della comprimibilità ε , correttivo della velocità teorica:

$$u_0 = \varepsilon \sqrt{\frac{2(p_1 - p_0)}{\rho_0}}$$

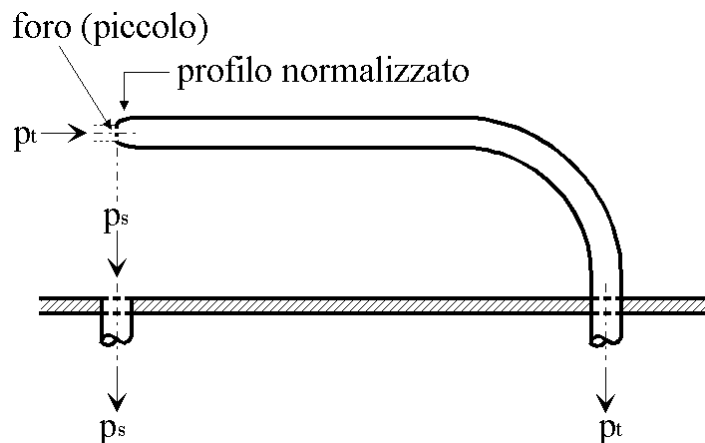
Il coefficiente ε , che dipende dall'esponente dell'adiabatica k per il fluido considerato e dal rapporto tra differenza di pressione misurata Δp (pressione dinamica) e pressione statica (assoluta) p_s , può essere stimato mediante la relazione o il diagramma riportati di seguito.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_s}{\Delta p} \left[\left(1 + \frac{\Delta p}{p_s} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}$$



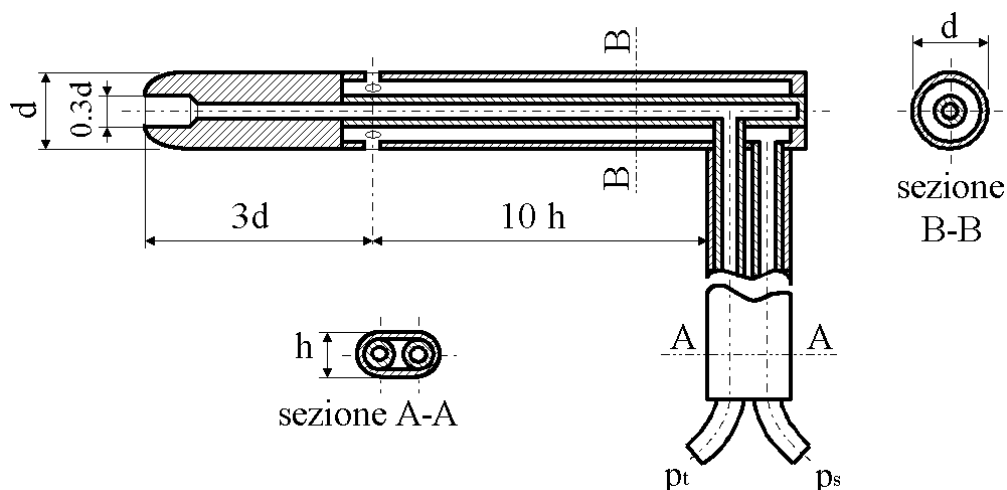
– Schemi costruttivi

I dispositivi di misura della velocità a tubo di pitot possono essere realizzati utilizzando una presa di pressione statica a parete ed una presa di pressione totale a tubo di pitot, collocate in corrispondenza di una stessa sezione di passaggio del flusso. L'asta del tubo di pitot è posta a valle della sezione di misura per minimizzare le perturbazioni che essa induce nel moto del fluido.



Per evitare la formazione di vortici turbolenti, l'estremità della presa a tubo di pitot deve essere opportunamente profilata. I profili da utilizzare e, più in generale, le caratteristiche costruttive di entrambe le prese di pressione sono specificati dalle norme di riferimento.

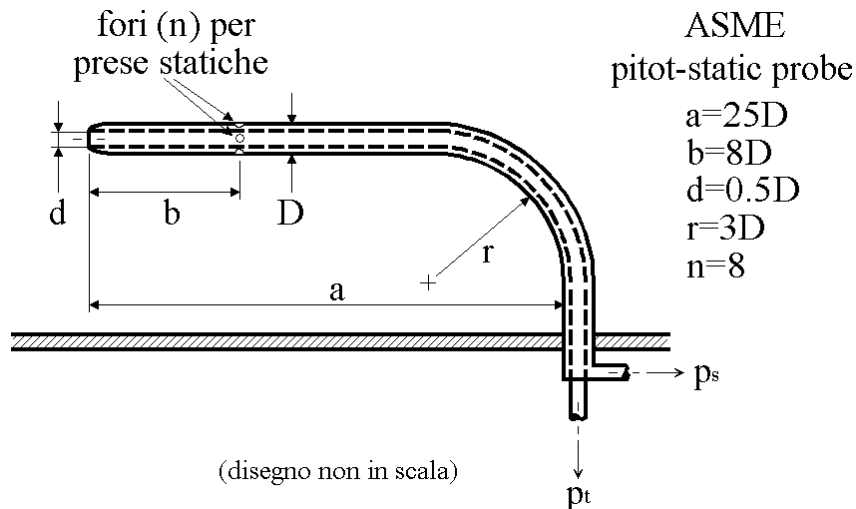
In alternativa, è possibile realizzare un dispositivo di misura della velocità secondo il disegno di Prandtl (schematizzato nella figura seguente), che raccoglie in un'unica sonda le due prese di pressione, statica e totale.



La sonda è costituita da due tubi concentrici, quello interno a sezione circolare e quello esterno a sezione anulare. Come nei dispositivi a tubo di pitot semplice, il tubo interno è utilizzato per rilevare la pressione totale tramite un'apertura posta ad un'estremità del tubo stesso ed ortogonale alla direzione del moto. La pressione statica è invece rilevata mediante una serie di fori aperti sul tubo anulare esterno, aventi sezione tangente alla direzione del moto.

Per evitare la formazione di vortici turbolenti, l'estremità del tubo di pitot deve essere opportunamente profilata. Inoltre, per non risentire delle perturbazioni del campo di moto che comunque si verificano, le prese di pressione statica devono essere poste ad una distanza adeguata dalla presa di pressione totale, il che comporta che la sonda possa essere utilizzata solo nei casi in cui la pressione statica non subisce variazioni significative lungo la direzione del flusso.

Anche per questo schema costruttivo, le caratteristiche costruttive delle prese di pressione sono specificate dalle norme (vedi figura seguente).



Oltre alle due configurazioni principali, precedentemente illustrate, dei dispositivi a tubo di pitot sono state realizzate innumerevoli varianti come, ad esempio, sonde che integrano numerose prese di pressione totale a pitot, disposte "a rastrello", per rilevare la velocità in diversi punti sulla sezione di passaggio del flusso e, quindi, ricostruire il profilo di velocità. Oppure, sono state realizzate sonde per rilevare la direzione del flusso come quella schematizzata nella figura seguente, in cui l'asse y-y, orientabile a piacere, coincide con la direzione dei filetti fluidi quando le pressioni alle quattro prese simmetriche, a, b, c e d, sono uguali fra loro.

