



Misure di portata

- Versione: **2.00.02**
- Ultimo aggiornamento: Dicembre 2017
- Realizzato da: De Lucia - C. Cinelli
- Originale C.P. Mengoni e C. Cinelli
- Riferimenti Maurizio DE LUCIA (delucia@unifi.it)



➤ **Misuratori di tipo volumetrico**

- ⇒ misuratori ad area costante e a caduta di pressione
- ⇒ tubi di pitot per misure medie
- ⇒ misuratori a caduta di pressione costante ed ad area variabile (rotametri)
- ⇒ misuratori a turbina
- ⇒ misuratori elettromagnetici
- ⇒ misuratori ultrasonici
- ⇒ misuratori a distacco di vortici

➤ **Misuratori di tipo massico**

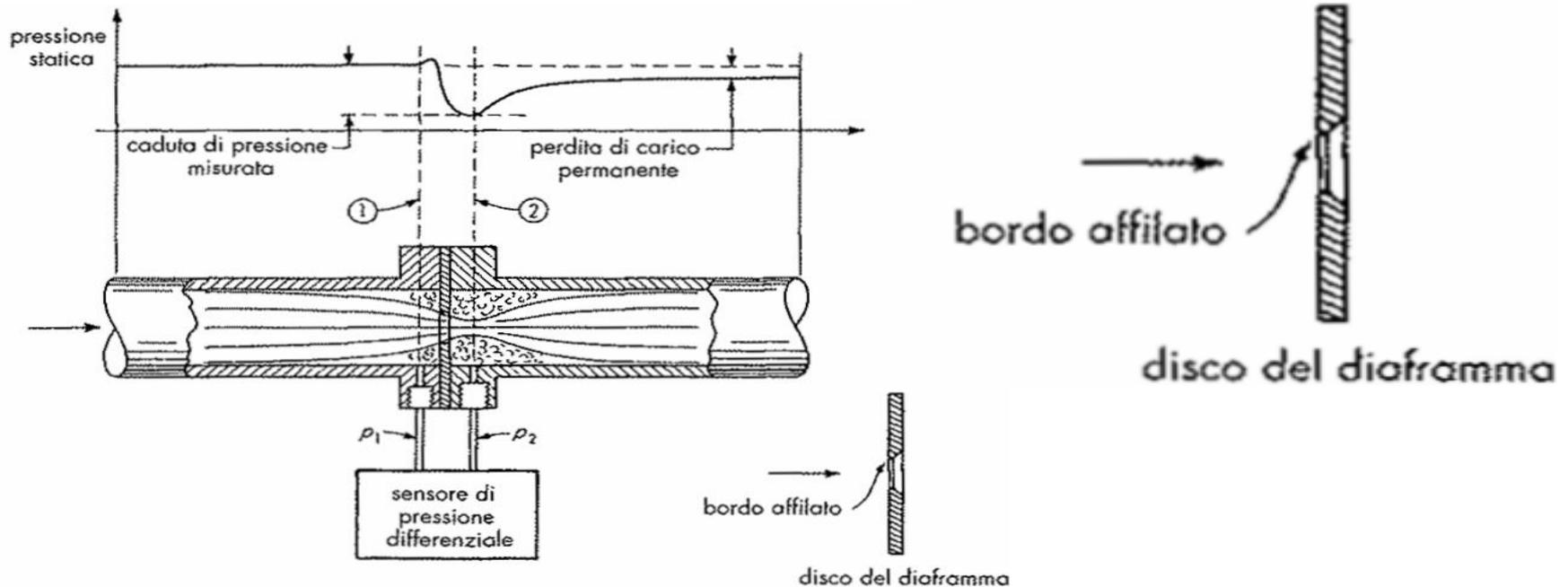
- ⇒ misuratori “Coriolis”
- ⇒ misuratori “termici”

Misuratori ad area costante e a caduta di pressione variabile

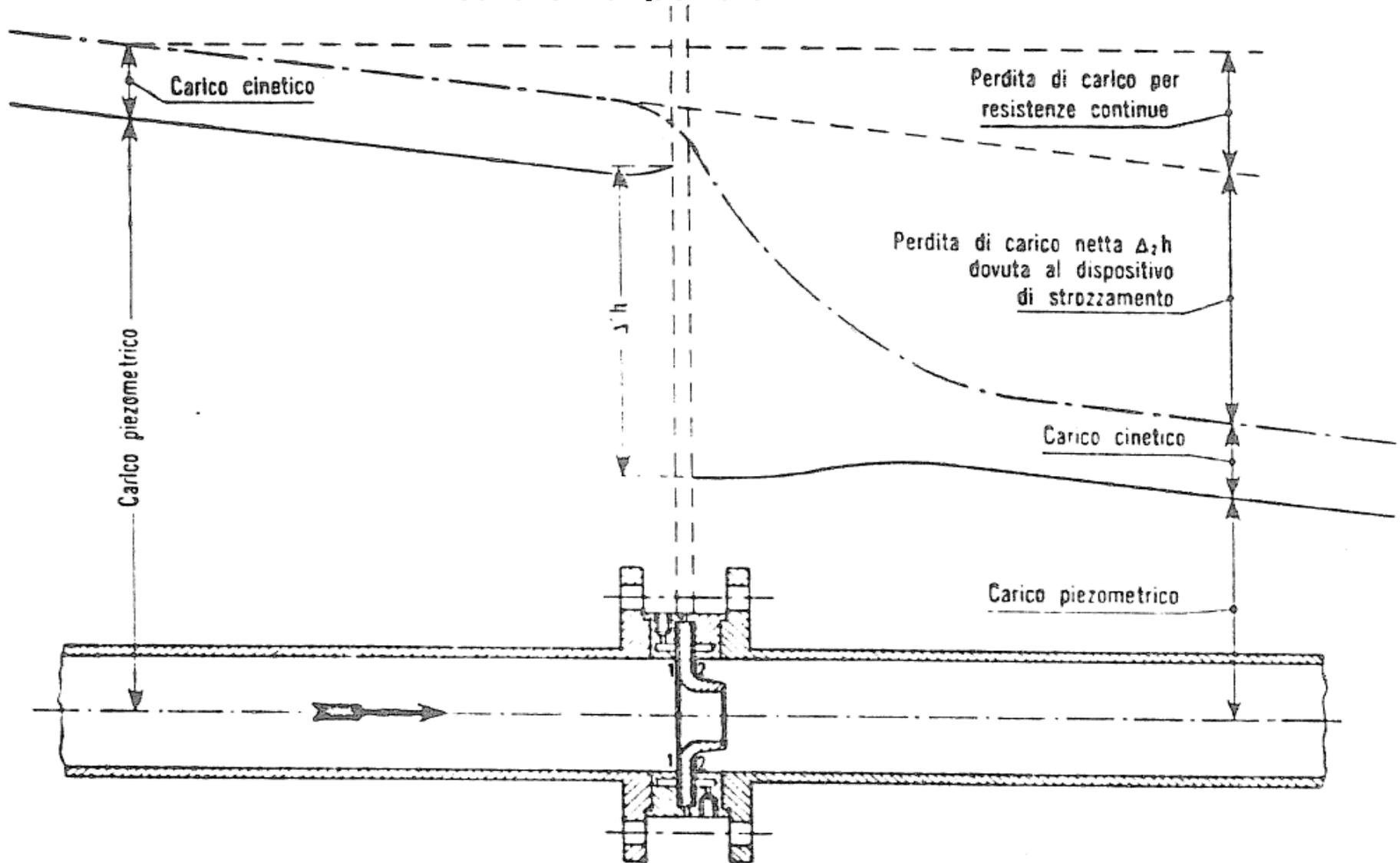
- Si crea una strizione dell'area libera di efflusso nella condotta che trasporta il fluido.
- Questo restringimento causa una caduta di pressione che dipende dalla portata; misurando la caduta di pressione è possibile risalire alla portata.

Diaframma

- È l'elemento più usato, semplice, di basso costo



Misuratori di portata



Misuratori di portata Diaframma

$$Q_t = \frac{A_{2f}}{\sqrt{1 - (A_{2f}/A_{1f})^2}} \cdot \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

A_{1f}, A_{2f} = area della sez. trasversale
dove si misurano p_1 e p_2 , [m²]
 ρ = densità del fluido, [kg/m³]
 p_1, p_2 = pressioni statiche, [Pa]

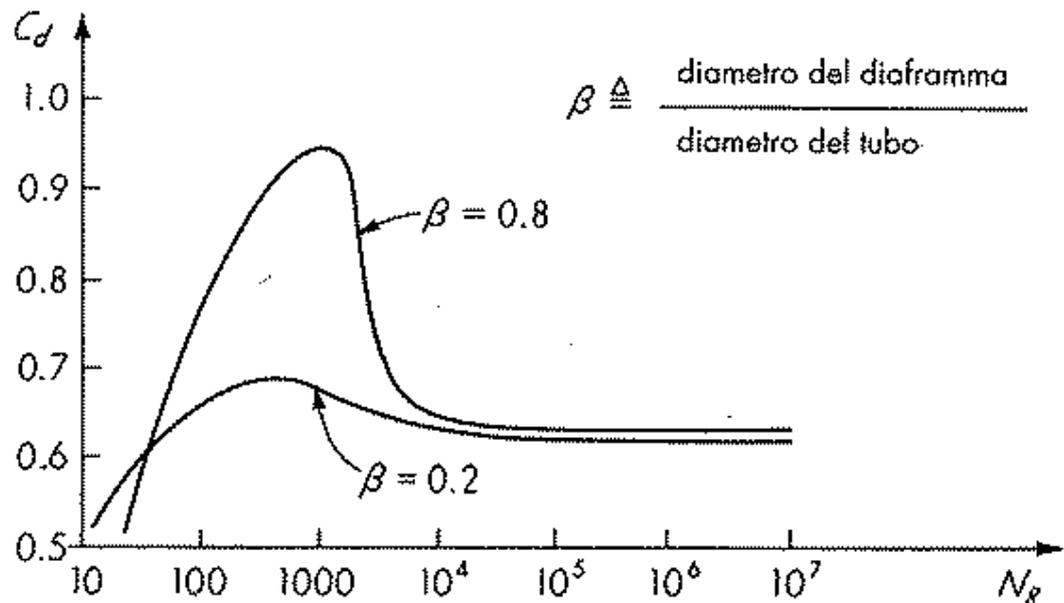
- Le aree A_{1f} e A_{2f} sono le aree della sezione trasversale del flusso e non l'area della sezione del tubo o del diaframma.
- Per una valutazione corretta della portata abbiamo bisogno di coefficienti correttivi (variano al variare della portata).
- Si definisce un coefficiente di efflusso C_d che mette in relazione la portata reale attraverso il dispositivo con quella teorica:

$$Q_a = \frac{C_d A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Dove Q_a è la portata reale di flusso.

Diaframma

- Per un flusso incomprimibile C_d varia solo con il numero di Reynolds
- Per un fluido comprimibile C_d dipende da Reynolds, dal rapporto delle pressioni e dall'esponente isoentropico del gas.
- Si definisce un coefficiente ε di comprimibilità.
- Si può fare la taratura con un fluido comprimibile (acqua) e se il Reynolds resta invariato si può assumere valida anche per un gas moltiplicando C_d per ε .
- Fluido incomprimibile $\varepsilon=1$
- Fluido comprimibile $\varepsilon<1$



Misuratori di portata

Numero di Reynolds

- Il **numero di Reynolds** (Re) è un gruppo adimensionale usato in fluidodinamica, dato dal rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscosse.

$$Re = \frac{\rho v L}{\eta} \quad \text{oppure:} \quad Re = \frac{v L}{\nu}$$

dove:

v - velocità media del fluido,

η - viscosità dinamica,

ν - viscosità cinematica: $\nu = \eta / \rho$,

ρ - densità del fluido,

L - lunghezza caratteristica (equivale al diametro $2r$ se la sezione del condotto è circolare; se la sezione non è circolare è il cosiddetto diametro equivalente $De=4S/P$ dove S = area sezione, P = perimetro bagnato).

- Esso può indicare se un fluido sia in regime laminare o turbolento. In un condotto un fluido viene considerato in regime laminare se il valore numerico di Re è inferiore a 2000, turbolento se superiore a 10000. Se $2000 < Re < 10000$ si è in regime di transizione.

Misuratori di portata

Diaframma

Per un fluido comprimibile la portata è data dalla relazione:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon_1 \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta P / \rho_1}$$

$$\beta = \frac{d}{D} \quad \text{Rapporto di strozzamento}$$

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

$$\varepsilon_1 = 1 - \left(0.41 + 0.35\beta^4\right) \frac{\Delta p}{k p_1} \quad \text{Coefficiente di comprimibilità}$$

- Il coeff. di efflusso è molto sensibile alle condizioni del bordo del foro che guarda verso monte, l'usura può comportare una variazione significativa → va cambiato periodicamente.

Per un diaframma il coefficiente di efflusso è dato da:

$$C = 0,5959 + 0,0312\beta^{2,1} - 0,1840\beta^8 + 0,0029\beta^{2,5} \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0,75} +$$
$$+ 0,0900L_1\beta^4(1-\beta^4)^{-1} - 0,0337L'_2\beta^3$$

Si vede la dipendenza dalla geometria e dalla velocità (Re)

→ si procede in modo iterativo (converge in 2-3 iterazioni).

Misuratori di portata Diaframma

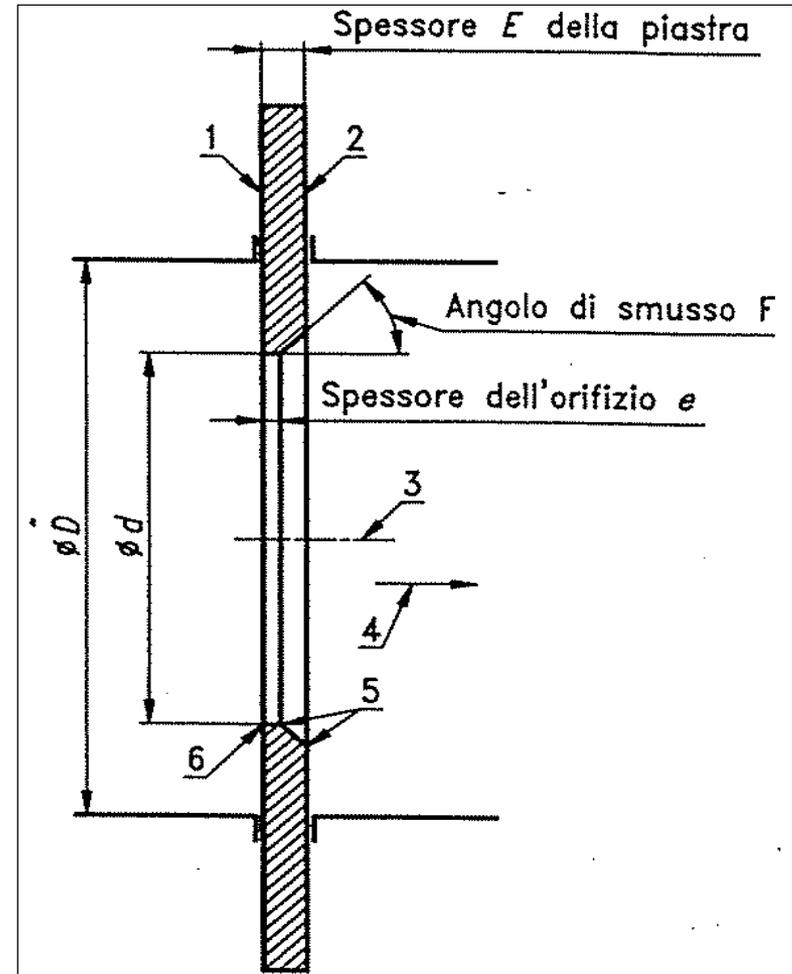
Problema	$q =$
Per determinati valori di	$\mu_1, \rho_1, D, d, \Delta p$
Si trovi	$q_m \text{ e } q_v$
Invariante	$A_1 = \frac{\varepsilon_1 d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1}}{\mu D \sqrt{1 - \beta^4}}$
Equazione iterativa	$\frac{Re_D}{C} = A_1$
Variabile dell'algoritmo lineare	$X = Re_D = CA_1$
Criterio di precisione (dove n è scelto dall'utilizzatore)	$\left \frac{A_1 - \frac{X}{C}}{A_1} \right < 1 \times 10^{-n}$
Prima stima	$C = C_{..}$
Risultati	$q_m = \frac{\pi}{4} \mu D X$ $q_v = \frac{q_m}{\rho_1}$

Misuratori di portata

Diaframma

Esiste una normativa (UNI EN ISO5167) che regola le caratteristiche geometriche e l'installazione dei diaframmi e che da indicazioni riguardo:

- Natura del fluido
- Condizioni di flusso
- Tratti minimi rettilinei a monte e valle
- Geometrie dei condizionatori di flusso
- Circolarità del condotto
- Geometria del dispositivo
- Prese di pressione

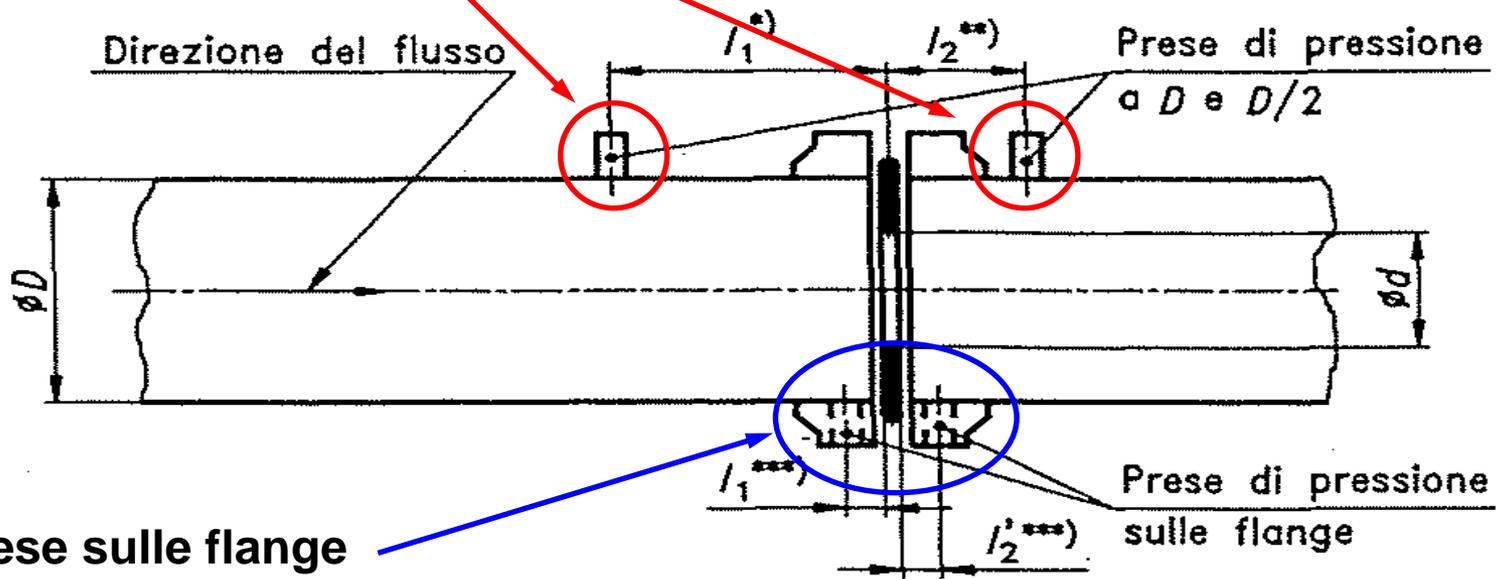


Misuratori di portata Diaframma

Prese di pressione

➤ Prese a D e $D/2$

⇒ Più economico, non si devono modificare le flange



➤ Prese sulle flange

Misuratori di portata Diaframma

Prese di pressione

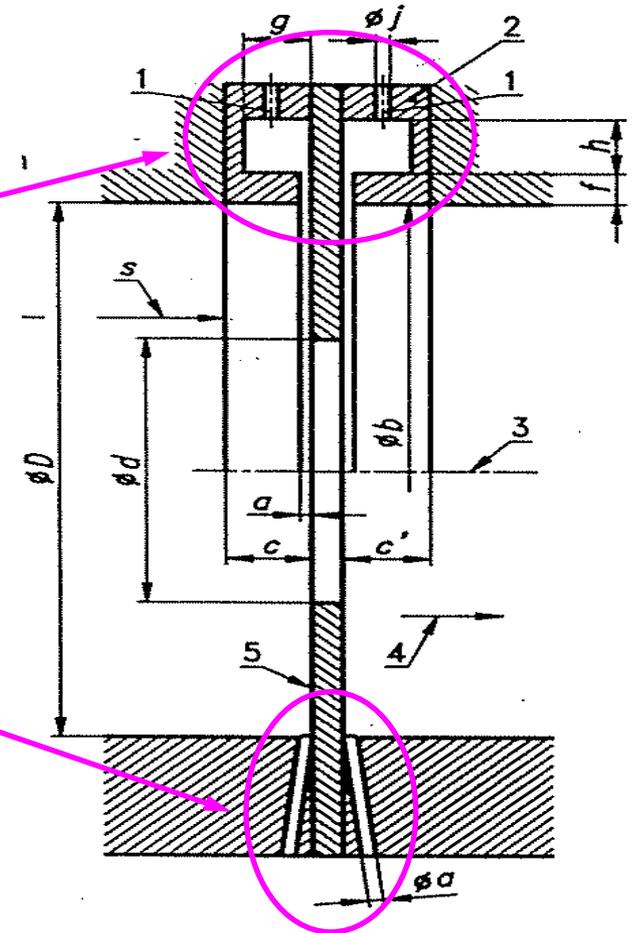
➤ Prese agli angoli

- ⇒ Anello portante con fessura anulare
 - ⇒ Sono più stabili, l'effetto di smorzamento non si presta per misure dinamiche

- ⇒ Prese singole
 - ⇒ Sentono il ΔP maggiore → sistema più sensibile
 - ⇒ Problemi di flusso non uniformato, discontinuità

La normativa da indicazioni sulla incertezza
del coefficiente di efflusso:

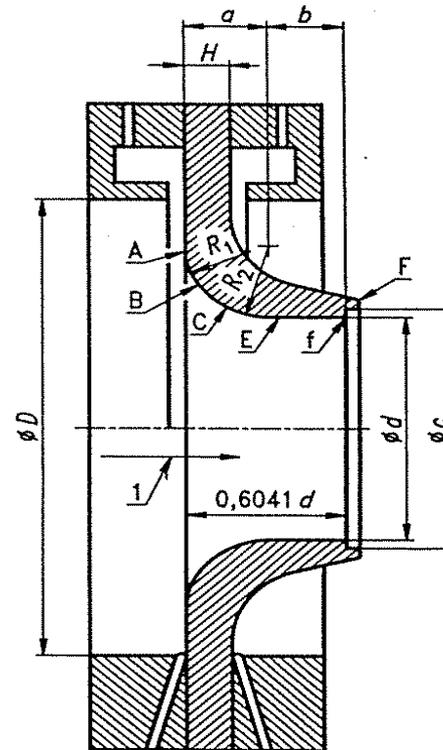
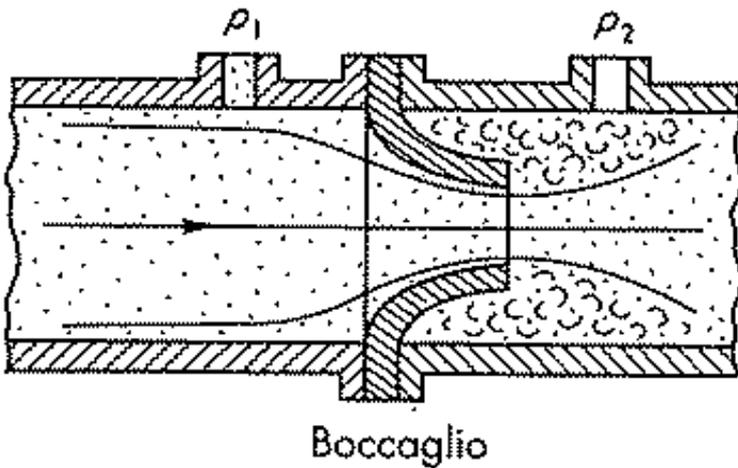
$$0.6\% \text{ per } \beta \leq 0,6 \quad - \quad \beta\% \text{ per } 0,6 < \beta < 0.75$$



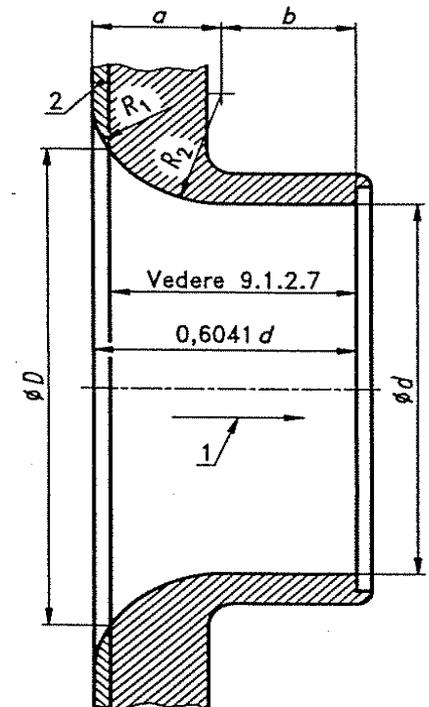
Misuratori di portata Boccaglio

➤ Più costosi dei diaframmi ma più economici dei venturi.

Vengono spesso usati per flussi di vapore ad alta velocità (più stabili rispetto ai diaframmi).



a) $d \leq \frac{2}{3} D$

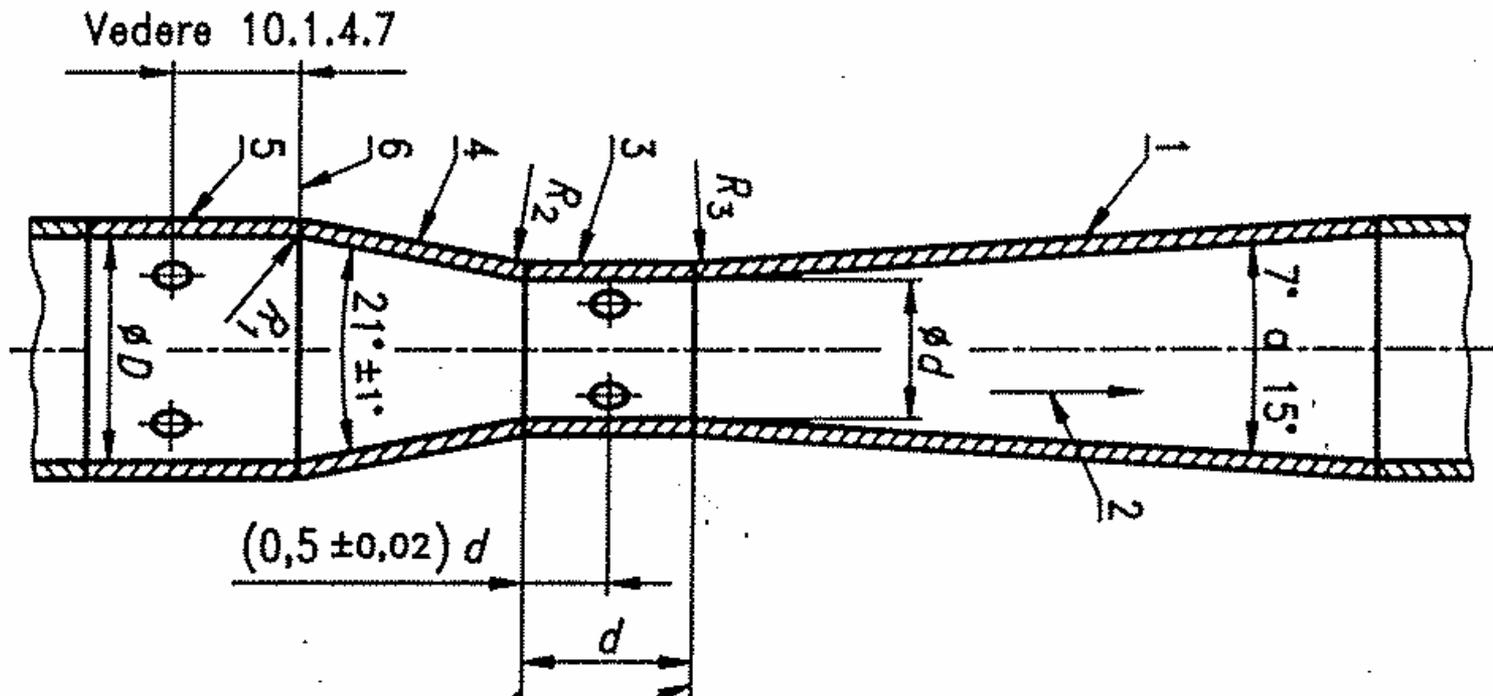


b) $d > \frac{2}{3} D$

Venturi

Misuratori di portata Venturi

- Variazioni di area meno repentine, hanno coefficienti di efflusso maggiori (fino a 0.99). Possono avere una perdita di carico molto bassa quindi sono preferiti quando ci sono grosse portate, negli acquedotti ad esempio, dove si può ottenere grossi risparmi sul pompaggio.

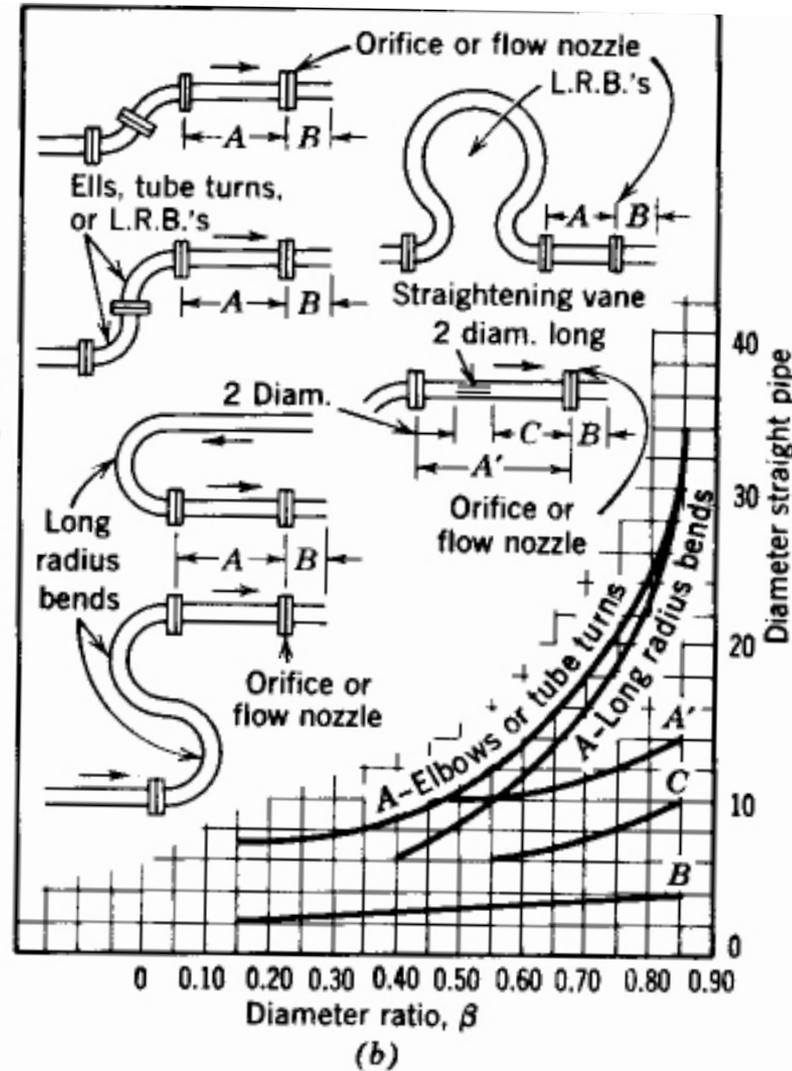
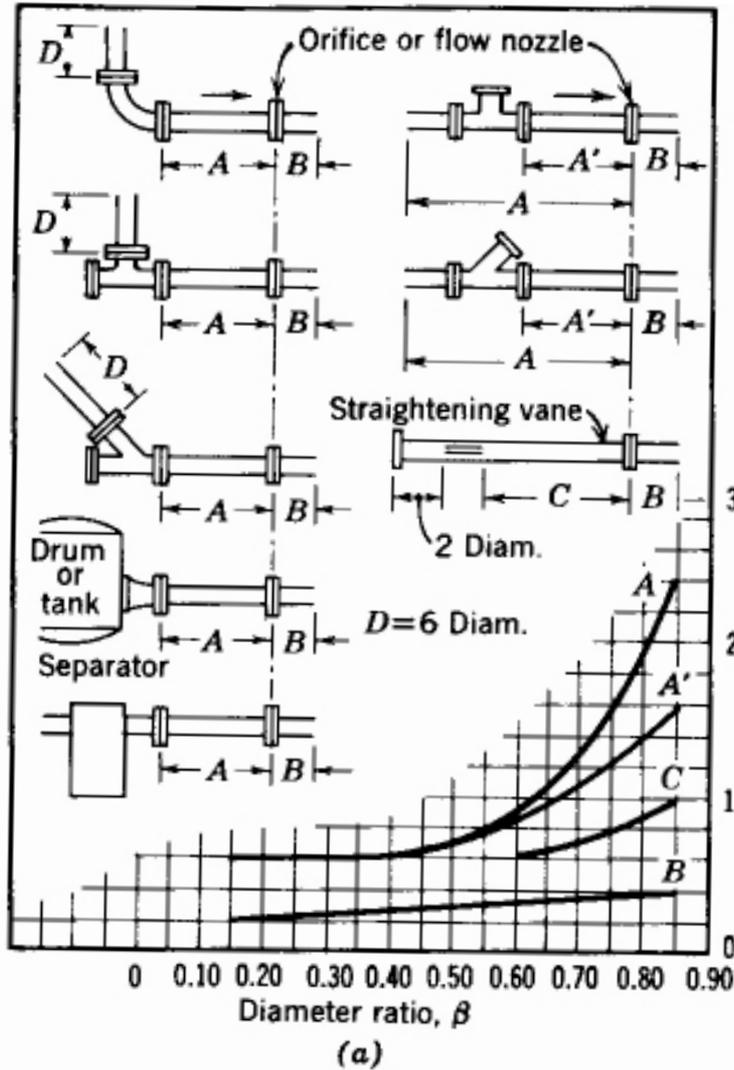


Le lunghezze devono essere misurate a partire dalla faccia a monte e a valle dell'elemento primario e sono date in multipli del diametro D .

Rapporto dei diametri β	Lunghezza minima a monte dell'elemento primario *							Lunghezza minima a valle *
	Curva semplice a 90° o pezzo a T (deflusso in un solo ramo)	Due o più curve a 90° complanari	Due o più curve a 90° in piani differenti	Allargamento da 0,5D a D su una lunghezza da D a 2D	Riduzione da 2D a D su una lunghezza da 1,5D a 3D	Valvola con otturatore completamente aperto	Saracinesca completamente aperta	Per qualunque situazione
$\leq 0,20$	10 (6)	14 (7)	34 (17)	16 (8)	5	18 (9)	12 (6)	4 (2)
0,25	10 (6)	14 (7)	34 (17)	16 (8)	5	18 (9)	12 (6)	4 (2)
0,30	10 (6)	16 (8)	34 (17)	16 (8)	5	18 (9)	12 (6)	5 (2,5)
0,35	12 (6)	16 (8)	36 (18)	16 (8)	5	18 (9)	12 (6)	5 (2,5)
0,40	14 (7)	18 (9)	36 (18)	16 (8)	5	20 (10)	12 (6)	6 (3)
0,45	14 (7)	18 (9)	38 (19)	17 (9)	5	20 (10)	12 (6)	6 (3)
0,50	14 (7)	20 (10)	40 (20)	18 (9)	6 (5)	22 (11)	12 (6)	6 (3)
0,55	16 (8)	22 (11)	44 (22)	20 (10)	8 (5)	24 (12)	14 (7)	6 (3)
0,60	18 (9)	26 (13)	48 (24)	22 (11)	9 (5)	26 (13)	14 (7)	7 (3,5)
0,65	22 (11)	32 (16)	54 (27)	25 (13)	11 (6)	28 (14)	16 (8)	7 (3,5)
0,70	28 (14)	36 (18)	62 (31)	30 (15)	14 (7)	32 (16)	20 (10)	7 (3,5)
0,75	36 (18)	42 (21)	70 (35)	38 (19)	22 (11)	36 (18)	24 (12)	8 (4)
0,80	46 (23)	50 (25)	80 (40)	54 (27)	30 (15)	44 (22)	30 (15)	8 (4)
Per tutti i valori di β	Pezzi speciali				Lunghezza minima a monte*			
	Brusca riduzione del diametro ($D_1/D_2 \geq 0,5$)				30 (15)			
	Postazione termometrica diametro $\leq 0,03 D$ $0,03 D \leq$ diametro $\leq 0,13 D$				5 (3) 20 (10)			
* I valori senza parentesi sono quelli per un errore probabile supplementare nullo; quelli tra parentesi sono per un errore probabile supplementare di $\pm 0,5\%$.								

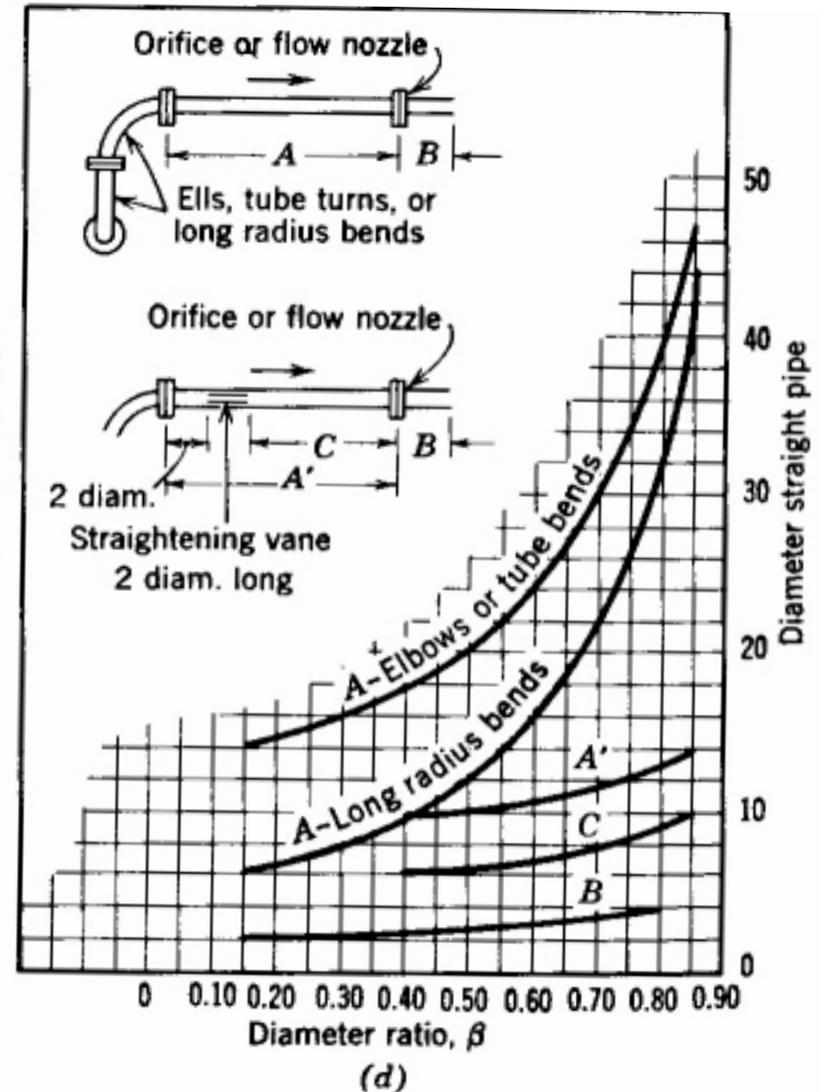
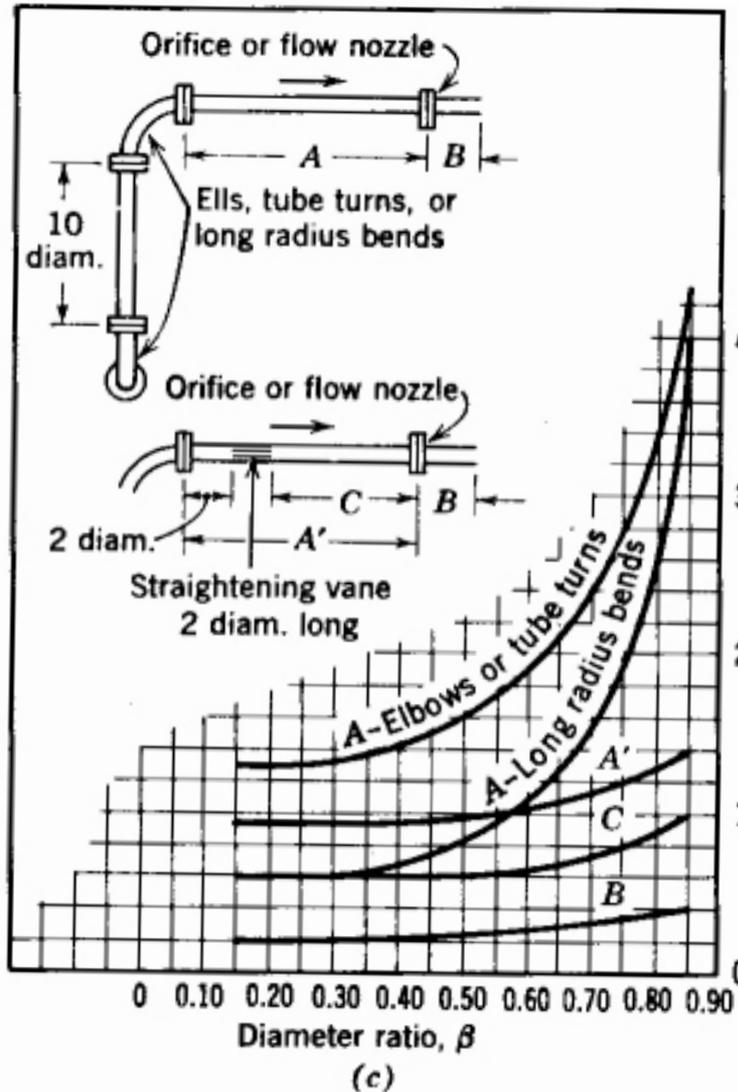
Misuratori di portata

Distanze richieste per installazione di diaframmi, boccagli e venturimetri



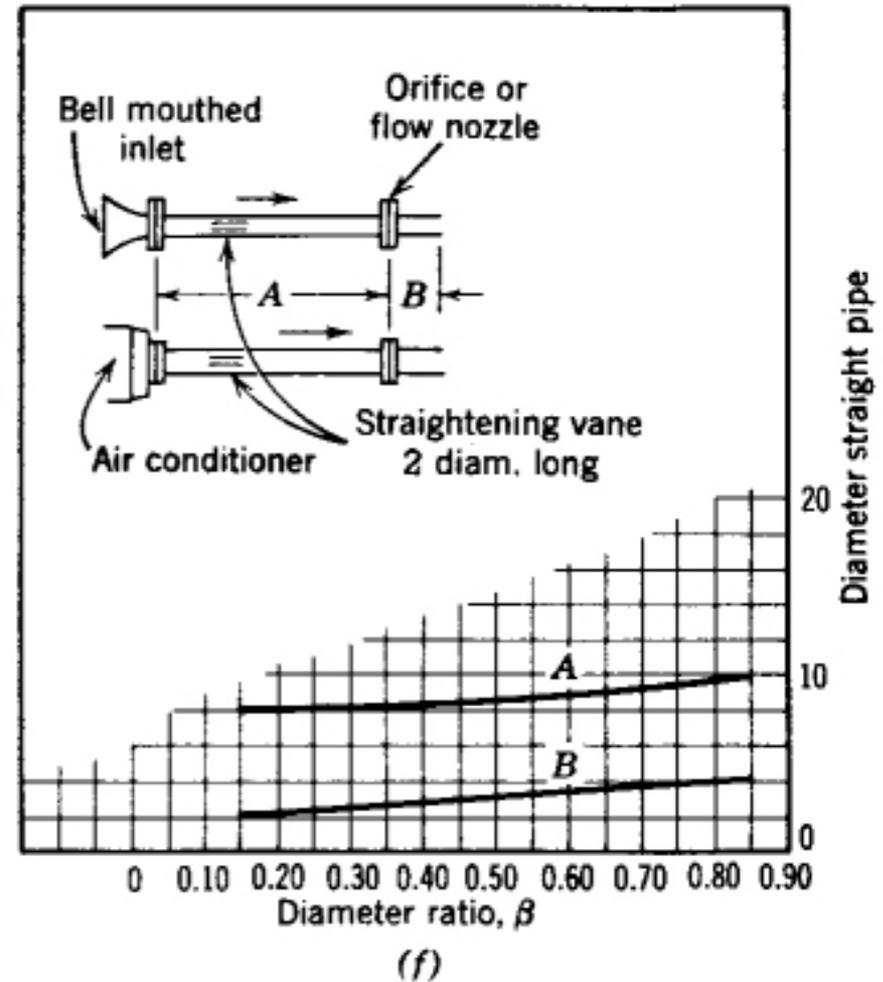
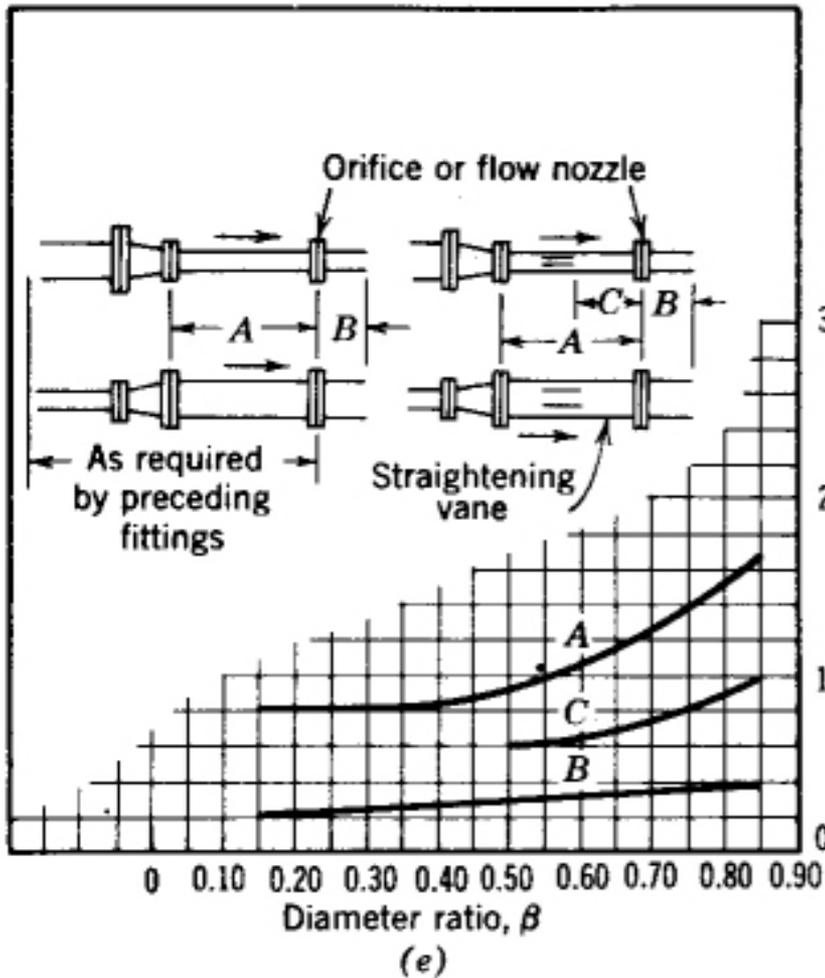
Misuratori di portata

Distanze richieste per installazione di diaframmi, boccagli e venturimetri



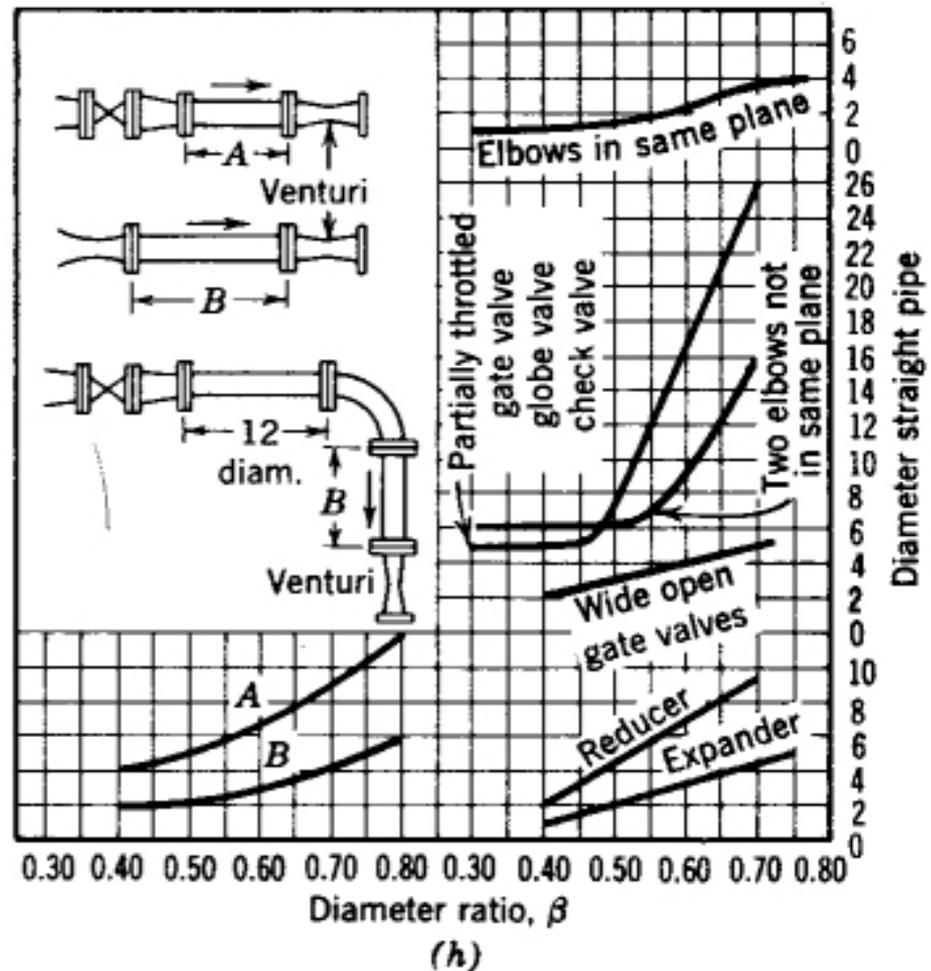
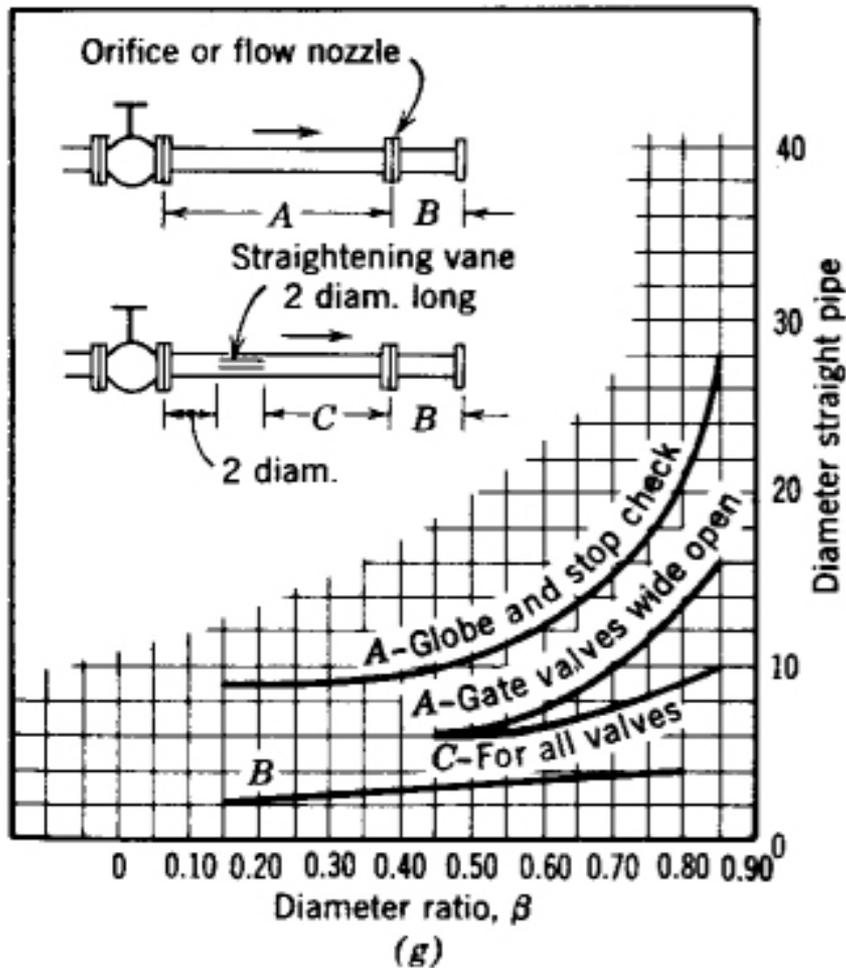
Misuratori di portata

Distanze richieste per installazione di diaframmi, boccagli e venturimetri



Misuratori di portata

Distanze richieste per installazione di diaframmi, bocchagli e venturimetri



Misuratori ad area costante e a caduta di pressione variabile: elementi a flusso laminare

- Sono progettati per operare nel regime di flusso laminare $Re < 2000$.
- La forma più semplice di un elemento a flusso laminare è un tubo di piccolo diametro (capillare).
- Per $Re < 2000$ la relazione di Hagen-Poiseuille per il flusso viscoso per fluidi incomprimibili dà:

$$Q = \frac{\pi D^4}{128 \mu L} \Delta p$$

Q = portata volumica [m³/s]

D = diametro interno del tubo [m]

μ = viscosità del fluido [N s/m²]

L = lunghezza del tubo tra le prese di pressione [m]

Δp = perdita di carico [Pa]

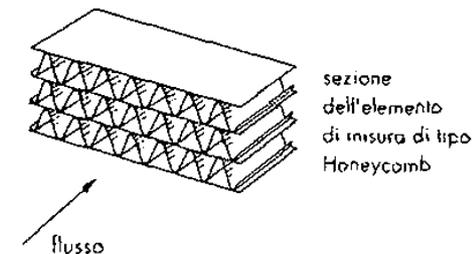
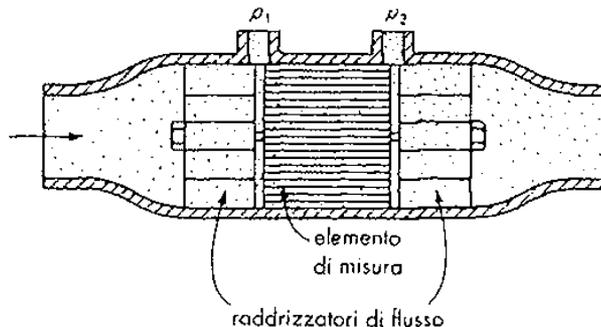
- Il singolo tubo capillare può trattare solo piccole portate per Re tali da mantenere il flusso in campo laminare.
- Per portate maggiori si possono utilizzare più capillari in parallelo, tubi grandi riempiti di piccole sfere, elementi tipo honeycomb

↑ relazione lineare tra la portata e la caduta di pressione

↓ intasamento a causa di fluidi sporchi

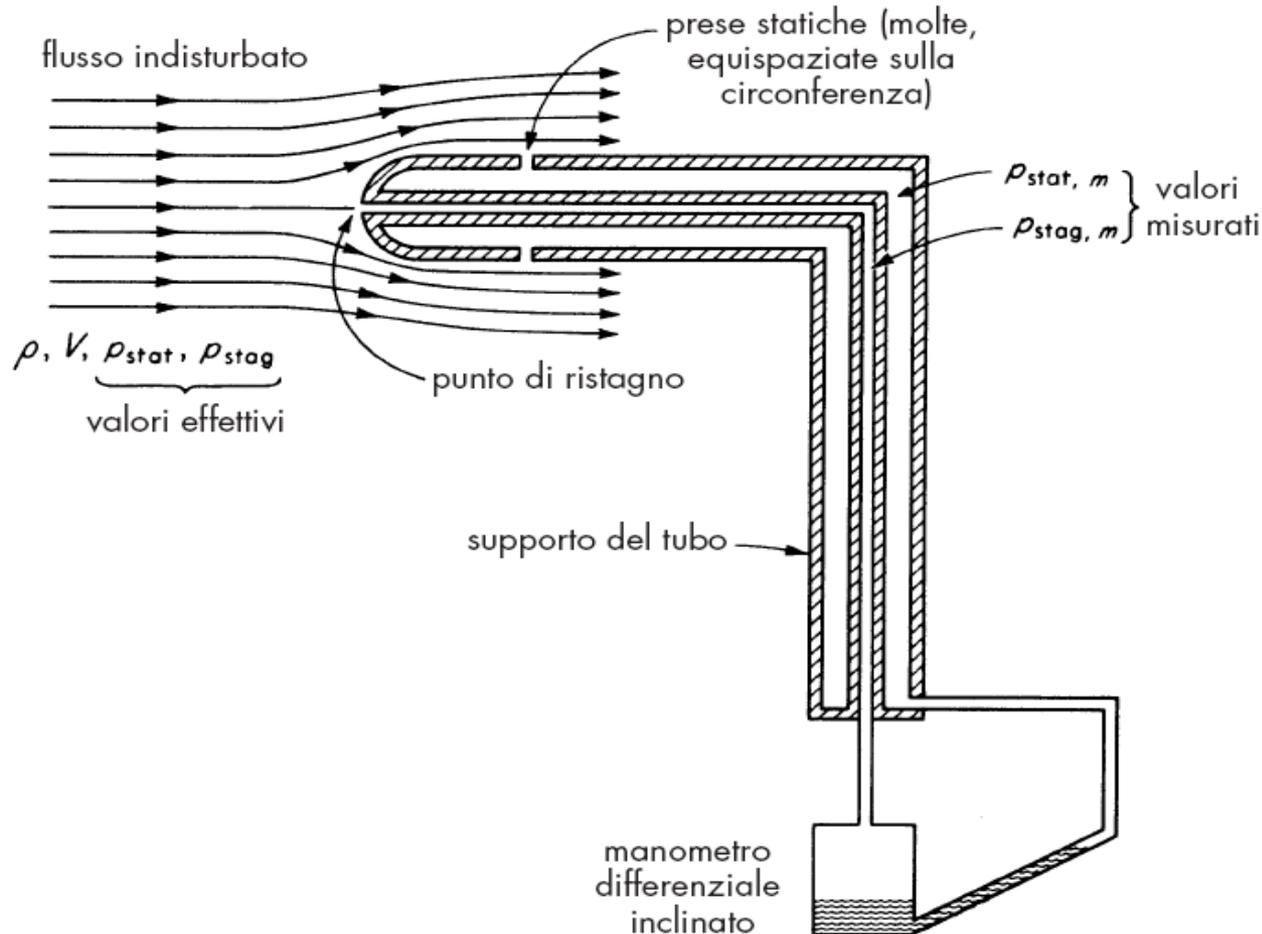
↓ costo elevato

↓ elevate perdite di carico



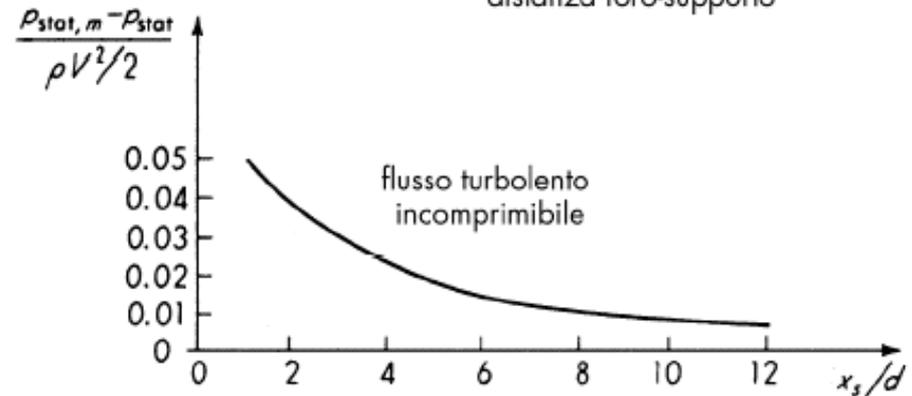
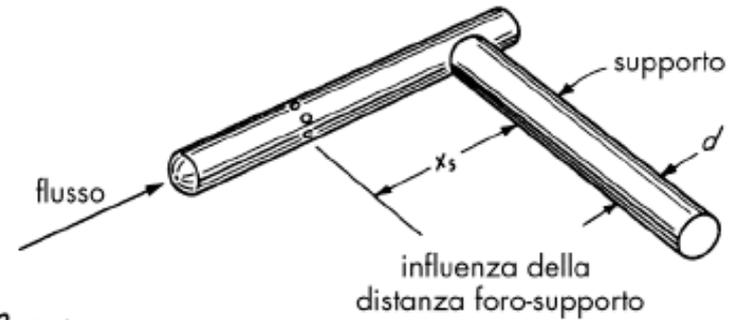
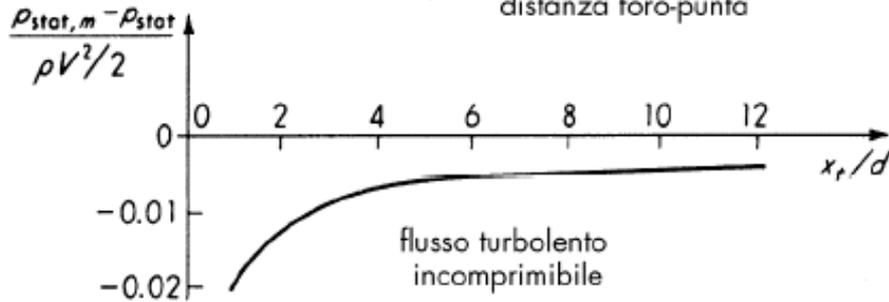
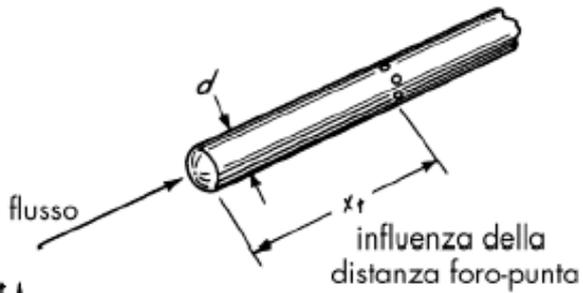
Tubo di pitot

- Lo strumento più comune per la misura della velocità di un flusso è il tubo di Pitot, costituito da una sonda con un foro frontale per la pressione totale e 4 fori laterali, a distanza opportuna dalla testa della sonda, per la misura della pressione statica. I due segnali di pressione vengono portati all'esterno tramite due tubi concentrici (quello interno per la pressione totale).



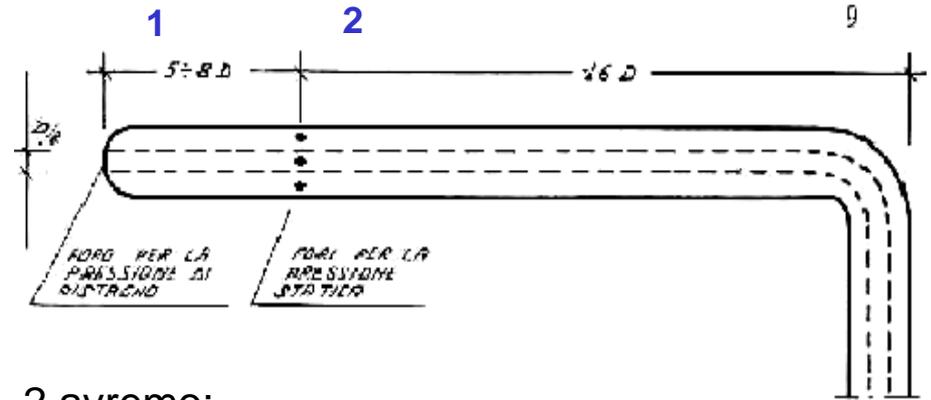
Tube di pitot

Errori sulla misura della pressione statica



Tubo di pitot

- Il collegamento ad un manometro o trasduttore differenziale consente di calcolare il modulo della velocità.



- Applicando Bernoulli tra la sez 1 e la sez. 2 avremo:

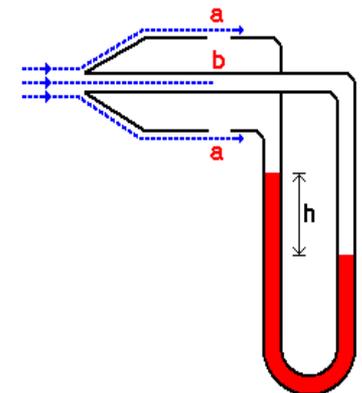
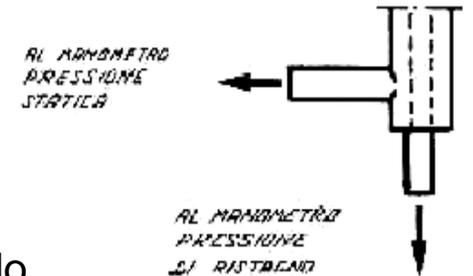
$$\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho_F} = 0$$

- Considerando inoltre, che la velocità interna (u_1) è quella del liquido di ristagno, perciò nulla, e che non vi è differenza di altezza ($z_2 = z_1$) ottengo un'equazione di Bernoulli del tipo:

$$\frac{u_2^2}{2} = \frac{P_2 - P_1}{\rho_F}$$

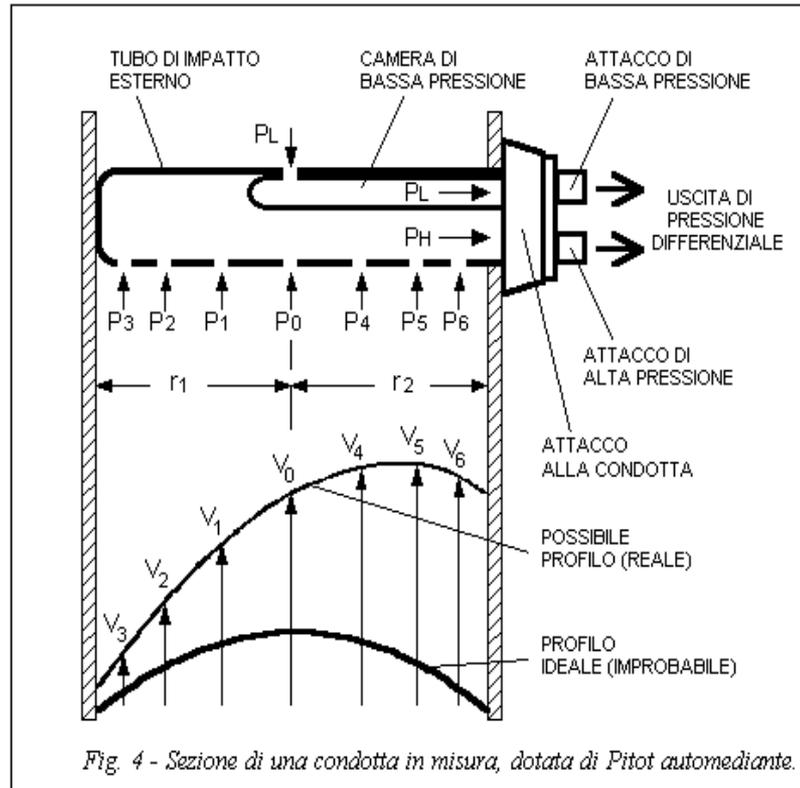


$$u_2 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_F}}$$



Tubi di pitot per misure medie

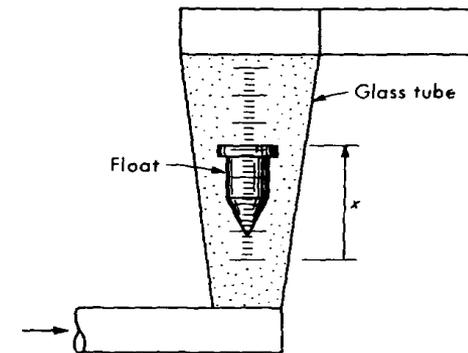
- Il tubo di pitot usato per misure puntuali può essere utilizzato per portate volumetriche.
- Si suddivide l'area del flusso totale in tanti anelli di area costante, con diversi affondamenti del pitot si misura la velocità locale al centro delle aree e si somma le singole portate per ottenere quella totale.
- Va bene come strumento da laboratorio.
- In alternativa si può usare un tubo di pitot "automediante"
- Il tubo è dotato di un determinato numero di forellini (prese di pressione), disposte lungo la sua lunghezza, in modo che le pressioni generate da ognuno di essi (imputabili alle diverse velocità componenti il profilo), vengano ad essere mescolate dentro il tubo, determinando così una pressione mediata per la misura.
- Il valore statico viene rilevato da un foro disposto a valle del senso di flusso.
(precisione. 1-2%)



Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

Principio di funzionamento

- Un rotametro è composto da un tubo verticale con forma conica, in cui un galleggiante assume una determinata posizione lungo la direzione verticale, corrispondente ad una data portata che scorre nel tubo.
- Il fluido, percorrendo il rotametro dal basso verso l'alto investe il galleggiante e l'oltrepassa.
- Il galleggiante crea una perdita di pressione localizzata dovuta al restringimento della sezione di passaggio.
- Per una certa portata, quando si bilanciano le forze verticali di pressione differenziale, di gravità, di viscosità e di galleggiamento, il galleggiante rimane in equilibrio.
 - ⇒ Forza gravità – forza di galleggiamento = cost
 - ⇒ la forza diretta verso l'alto data dalla caduta di pressione (ΔP) * l'area della sezione trasversale del galleggiante = cost
 - ⇒ area galleggiante = cost → $\Delta P = \text{cost}$
- Per un'area di passaggio del flusso fissata, ΔP varia con la il quadrato della portata, quindi, per mantenere il $\Delta P = \text{cost}$ al variare della portata, l'area deve variare.
- L'area del misuratore varia con continuità con lo spostamento verticale.
- La posizione del galleggiante è l'uscita del misuratore; può essere resa lineare con la portata facendo variare l'area della sezione del tubo in modo lineare con lo spostamento verticale.



Misuratori ad area variabile (rotametri)

- Per un fluido incomprimibile si ottiene il seguente risultato:

$$Q = \frac{C_d (A_t - A_f)}{\sqrt{1 - [(A_t - A_f)/A_t]^2}} \sqrt{2gV_f \frac{w_f - w_{ff}}{A_f w_{ff}}}$$

Q = portata volumetrica, m³/s

C_d = coefficiente di efflusso

A_t = area del tubo, m²

A_f = area del galleggiante, m²

V_f = volume del galleggiante, m³

w_f = peso specifico del galleggiante, kg/m³

w_{ff} = peso specifico del fluido, kg/m³

- Se la variazione di C_d con la posizione del galleggiante è piccola e se [(A_t-A_f)/A_t]² è sempre molto minore di uno, allora abbiamo: Q=K(A_t-A_f)
- Se il tubo è costruito in modo tale che A_t vari in modo lineare con la posizione del galleggiante x abbiamo: Q=K₁+K₂x
- Il galleggiante viene realizzato in materiali differenti per ottenere la differenza di densità.
- Alcune forme, come la sfera, non richiedono guide, altre sono mantenute in posizione centrale da fili di guida.
- I tubi in genere sono realizzati in vetro ad alta resistenza per permettere l'osservazione diretta della posizione del galleggiante.
- Quando è necessaria una resistenza maggiore si usano tubi in metallo e la posizione viene rilevata magneticamente.
- Se si desidera un segnale elettrico correlato alla posizione del galleggiante si usa un trasduttore di spostamento.

Misuratori ad area variabile (rotametri)

- Usati per piccole e medie portate
- Industria chimica, petrolchimica, farmaceutica, alimentare, trattamento acque
- Necessitano un'installazione verticale (flusso dal basso verso l'alto).
- Richiedono una taratura rispetto a pressione e temperatura standard di riferimento.
 - ⇒ Con opportune correzioni possono essere poi usati in condizioni di esercizio differenti.
- Applicazioni a fluidi monofasici
- Economici



Caratteristiche tecniche (Krohne)

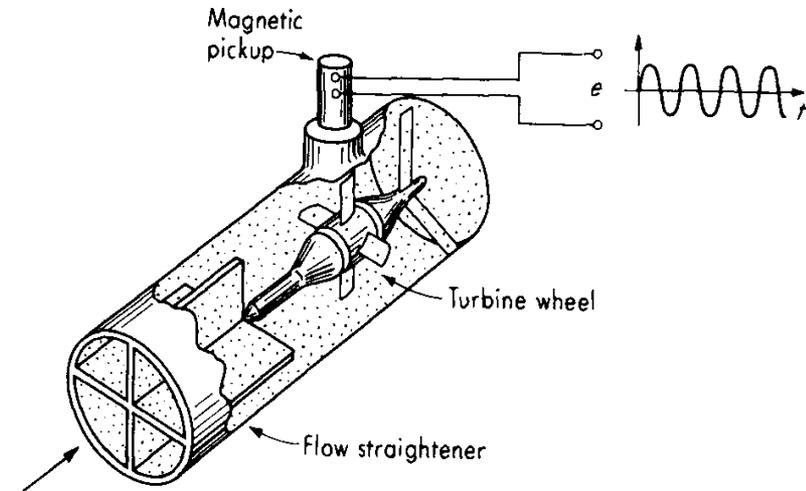
- Precisione: 1-2% FS
- Portata: acqua: 0.4-10000 l/h
aria: 0.007-180 m³/h
- Rangeability: 10:1
- Temperatura di processo: -40-100°C



Misuratori a turbina

Principio di funzionamento

- Se si inserisce una turbina in un tubo contenente fluido in movimento la velocità di rotazione della turbina dipenderà dalla portata del fluido.
- Riducendo l'attrito dei cuscinetti e mantenendo le perdite al minimo si può progettare una turbina la cui velocità vari linearmente con la portata.
- La velocità si misura misurando la frequenza con cui le palette della turbina passano per un determinato punto usando un dispositivo magnetico di prossimità.
- Se si vuole un segnale analogico in uscita gli impulsi possono essere inseriti in un convertitore frequenza-tensione.



Caratteristiche tecniche

Campi di portata: min 0,3 l/min ... max 60 l/min

Viscosità: 0,5 ÷ 1,5 cp

Condizioni di esercizio:

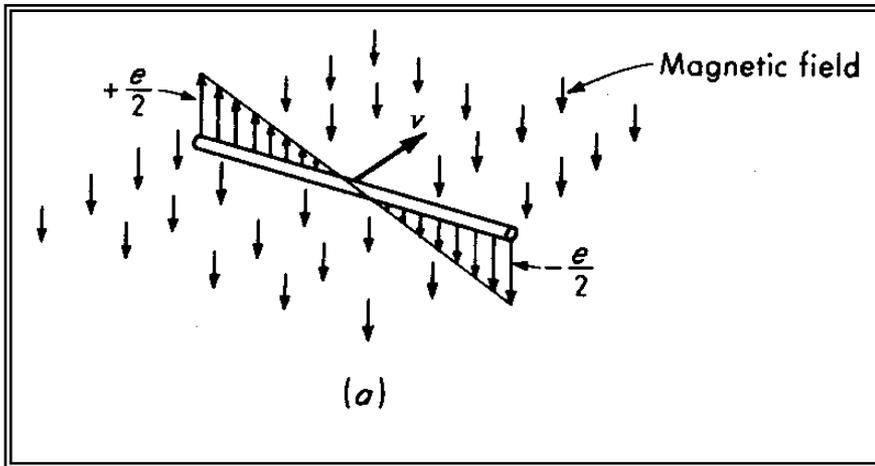
- Temperatura: -20°C ÷ + 80° C
- Pressione: max 10 bar per fluidi a T=20°C



Misuratori elettromagnetici

Principio di funzionamento

- I misuratori di portata elettromagnetici si basano sul principio di induzione.
- Se un conduttore di lunghezza l si muove con una velocità trasversale v attraverso un campo magnetico di intensità B verranno prodotte delle forze sulle particelle cariche del conduttore che muoveranno le cariche positive e negative verso le estremità del conduttore.



➔ Gradiente di potenziale attraverso il conduttore

$$e = B / v$$

B : densità del flusso di campo

l : lunghezza del conduttore

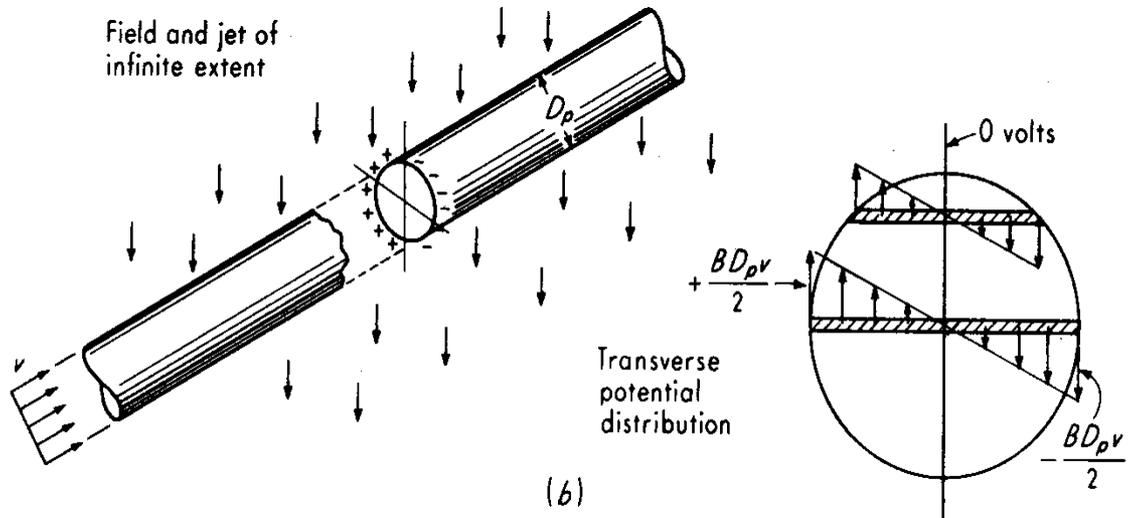
V : velocità del conduttore

- Collegando le estremità ad un circuito esterno la tensione indotta produrrà un flusso di corrente i
- Il flusso di corrente attraverso il conduttore mobile, di resistenza R , genera una caduta di potenziale iR
- Ai terminali del conduttore avremo una tensione $e - iR$

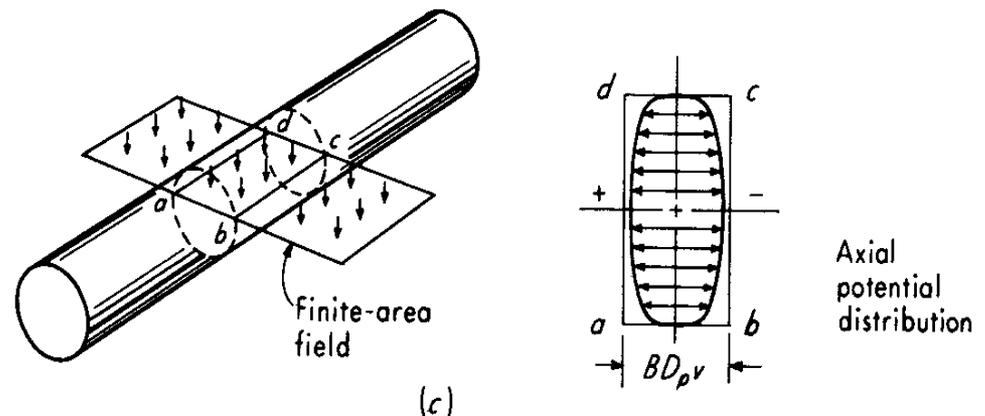
Misuratori elettromagnetici

- Consideriamo un flusso cilindrico di **fluido conduttore** con profilo di velocità uniforme che attraversa un campo magnetico

- Se il liquido è conduttore avremo uno spostamento degli ioni positivi e negativi ai lati del getto
 $e = BDv$

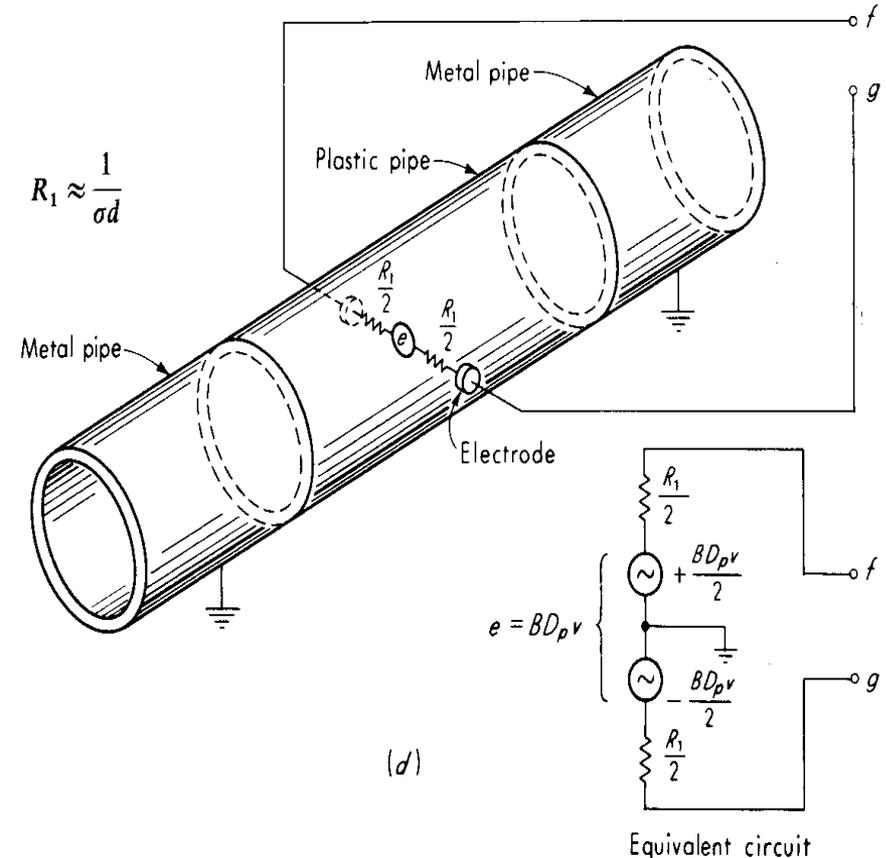


- In realtà il campo magnetico è di estensione limitata.



Misuratori elettromagnetici

- Condotta non magnetica in materiale non conduttore.
- Due elettrodi posti nei punti a massima differenza di potenziale.
- Essendo il fluido conduttore ci sarà un percorso di conduzione tra i due elettrodi che forniscono un segnale in tensione.



- Il segnale in tensione risulta proporzionale alla velocità del fluido
- È stato dimostrato che e corrisponde alla velocità media di qualsiasi profilo simmetrico rispetto al centro del tubo.

Misuratori elettromagnetici Applicazioni e vantaggi

- Sono utilizzati da più di 50 anni
- Possono misurare la velocità di un qualsiasi fluido conduttore ($> 1 \mu\text{S/cm}$)
- Non hanno parti in movimento
- Non alterano il campo di moto
- Non portano strizioni di diametro quindi non aggiungono perdite



Caratteristiche tecniche (Yokogawa)

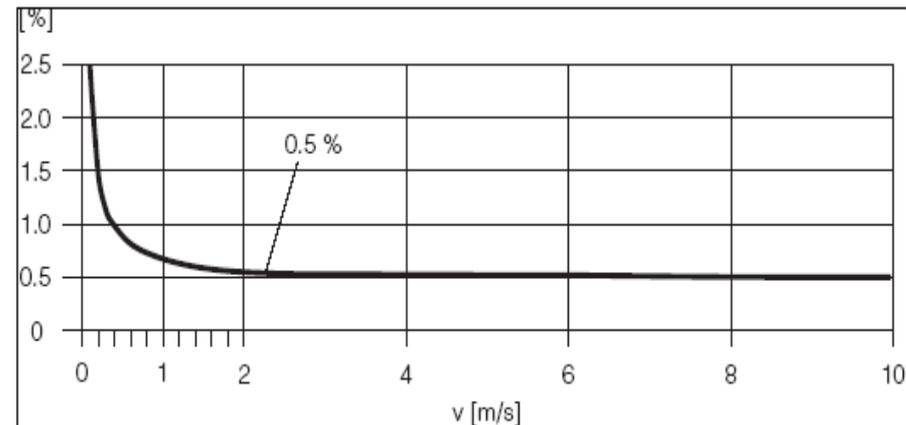
Errore: 0.5% o.r

Portate: 0.2 - 1000 m³/h

Consumo: 10W

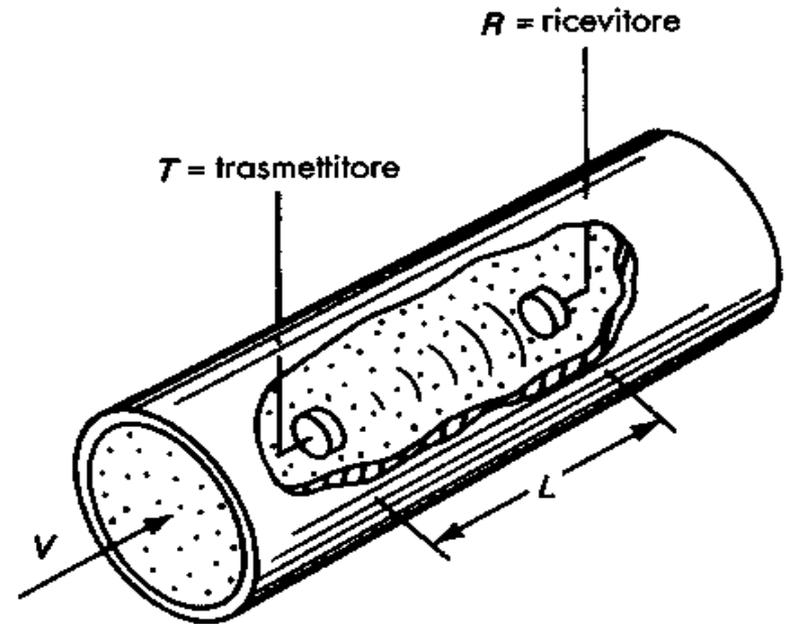
Uscita: 4-20 mA

Alimentazione: 200-240 VAC o 24 VAC/DC



Misuratori a ultrasuoni - Principio di funzionamento

- Il principio operativo si basa sulla modalità di propagazione di un disturbo di pressione attraverso un fluido.
- La velocità con cui si propagano i disturbi dipende infatti dalle caratteristiche del fluido e dalla sua velocità.
- Vengono utilizzati brevi treni di onde sinusoidali (circa 10 MHz).
- Comunemente si usano trasduttori a cristalli piezoelettrici. Al cristallo trasmettitore viene data energia elettrica sotto forma di brevi impulsi di tensione ad alta frequenza che mettono in vibrazione il cristallo.
- La vibrazione viene comunicata al fluido e si propagherà attraverso di esso.
- Il cristallo ricevitore è esposto alle fluttuazioni e risponde vibrando.
- Il moto di vibrazione produce un segnale elettrico ad esso proporzionale.



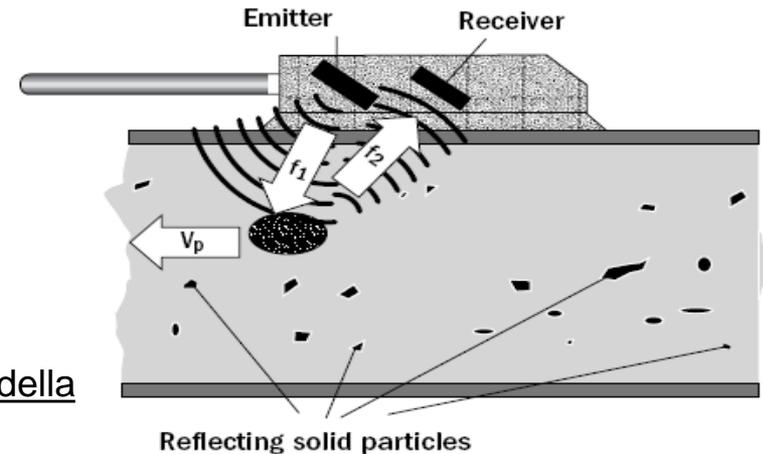
Misuratori a ultrasuoni

1. **Doppler**: misura la variazione di frequenza degli impulsi riflessi dalle particelle sospese nel flusso.
2. **Tempo di transito**: misura la differenza di tempo necessaria ad attraversare diagonalmente il flusso.

Doppler

- Un emettitore manda un treno di onde alla frequenza f_1 (circa 1-5 MHz) con angolo α ($\lambda=c/f_1$).
- Le onde colpiscono le particelle che si muovono a velocità v_p .
- Le particelle che si allontanano dall'emettitore vedono una lunghezza d'onda $\lambda_p=(c-v_p \cos \alpha)/f_1$.
- Il ricevitore vede una lunghezza d'onda:

$$\lambda_p=(c-2v_p \cos \alpha)/f_1 \quad f_2=(f_1 * c)/(c-2v_p \cos \alpha)$$
- Misurando la differenza di frequenza abbiamo una misura della velocità del flusso.



$$f_1 - f_2 = \Delta f = (2V_p f_1 \cos \alpha) / c$$

- Si misura la velocità delle particelle, non del liquido
- Non invasivo, non ci sono parti in movimento
- Ci deve essere un numero sufficiente di particelle riflettenti nel flusso
- Le particelle devono avere diametro grosso per avere una buona riflessione
- La velocità del suono delle particelle deve essere nettamente differente da quella del liquido
- Per avere una misura corretta necessita di molti diametri a monte (20xD)

Misuratori ultrasuoni – Tempo di transito

- Con velocità di flusso nulla il tempo t_0 di passaggio degli impulsi risulta:

$$t_0 = \frac{L}{c}$$

L = distanza tra trasmettitore e ricevitore
 c = velocità del suono nel fluido

- Se il fluido si muove con velocità V il tempo di passaggio t diventa:

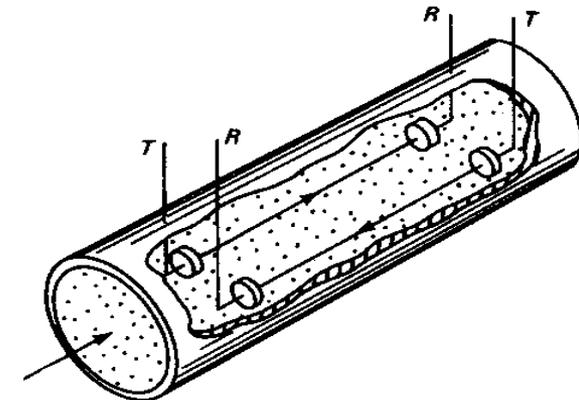
$$t = \frac{L}{c+V} = L \left(\frac{1}{c} - \frac{V}{c^2} + \frac{V^2}{c^3} - \dots \right) \approx \frac{L}{c} \left(1 - \frac{V}{c} \right)$$

$$\Delta t = t - t_0 = \frac{LV}{c^2}$$

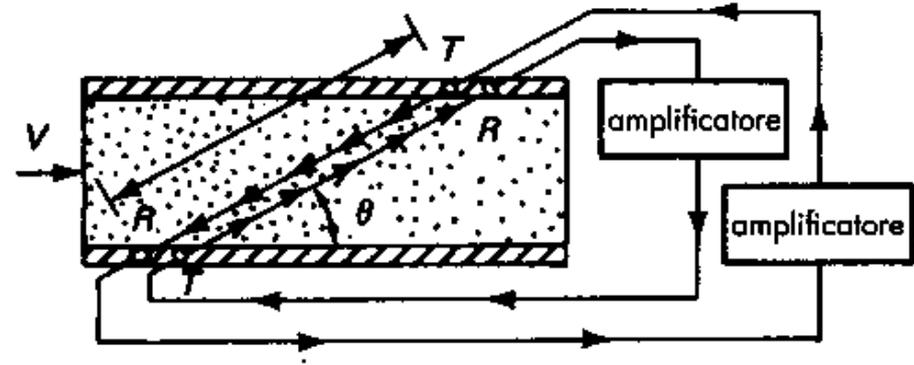
- L = cost, c varia con la temperatura → errore significativo perché compare al quadrato, inoltre Δt è piccolo.
 - ⇒ ad esempio in H₂O: se $V = 3.05$ m/s, $L = 305$ mm e $c \approx 1520$ m/s → $\Delta t = 0.4$ μ s
- Si può usare una configurazione come quella in figura: un sistema oscillante che utilizza gli impulsi ricevuti per triggerare quelli trasmessi

- ⇒ t_1 : tempo nella direz. del flusso
- ⇒ t_2 : tempo nella direz. Opposta
- ⇒ Δt è doppio rispetto a prima
- ⇒ Rimane la dipendenza da c^2

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2LV}{c^2 - V^2} \approx \frac{2VL}{c^2}$$



- La frequenza di ripetizione degli impulsi nell'anello di propagazione in avanti è $1/t_1$, mentre quella all'indietro è $1/t_2$
 - $t_1 = L / (c + V \cos \theta)$
 - $t_2 = L / (c - V \cos \theta)$
- ⇒ Misurando la differenza tra le due frequenze sparisce la dipendenza da c!



$$\Delta f = \frac{2V \cos \theta}{L}$$

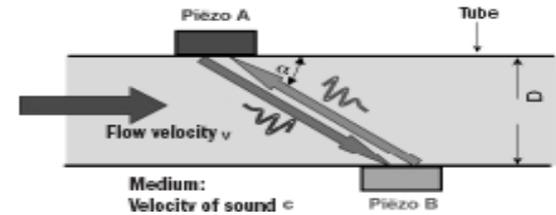
Caratteristiche tecniche (Yokogawa)

- Fluido: velocità del suono 800-3500 m/s
- Range di velocità: 0.01 - 25 m/s
- Risoluzione: 0.025 cm/s
- Accuratezza: 1-3% o.r.
- Diametri a monte: 10-50

Misuratori a ultrasuoni

- La misurazione della differenza di frequenza è stata usata per molti anni ma adesso è stata rimpiazzata da metodi basati su misure dirette dei due tempi di volo e sulla seguente rielaborazione dei dati:

$$T_{A \rightarrow B} = \frac{D}{\sin \alpha} \cdot \frac{1}{(c + v \cos \alpha)} \quad T_{B \rightarrow A} = \frac{D}{\sin \alpha} \cdot \frac{1}{(c - v \cos \alpha)}$$



- La differenza tra i due tempi diventa:

$$\Delta T = T_{B \rightarrow A} - T_{A \rightarrow B} = v \cdot \frac{T_{B \rightarrow A} \cdot T_{A \rightarrow B} \cdot \sin(2\alpha)}{D}$$

$$v = \frac{D}{\sin(2\alpha)} \cdot \frac{T_{B \rightarrow A} - T_{A \rightarrow B}}{T_{B \rightarrow A} \cdot T_{A \rightarrow B}}$$

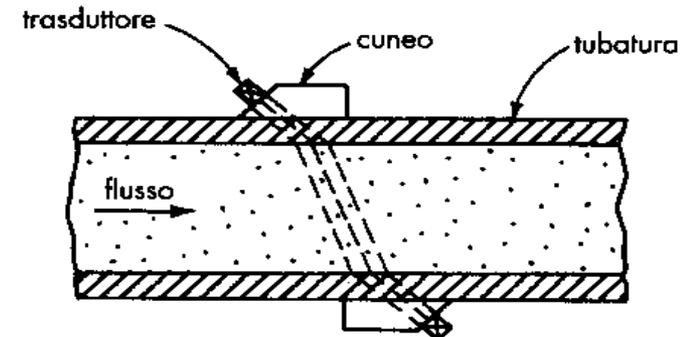
Examples of transit times, transit time differences:

Inside tube diameter:	100 mm	Transit time difference ΔT : 91.29 ns
Angle of incidence α :	45°	For resolution 0.5%: time resolution <500 ps needed!
Process product	water	The transit time measurement of ...
Sound velocity	1480 m/s	$T_{A \rightarrow B} = 95.4949 \mu\text{s}$ und
Flow velocity	1 m/s	$T_{B \rightarrow A} = 95.5862 \mu\text{s}$ muss sehr genau sein!
Transit time with the current	95.49 μs	
Transit time against the current	95.59 μs	

- Si può usare la somma totale del tempo di transito per determinare la velocità del suono:

$$\sum T = T_{B \rightarrow A} + T_{A \rightarrow B} = \frac{1}{c} \cdot \frac{2D}{\sin \alpha} \quad c = \frac{2D}{\sin \alpha} \cdot \frac{1}{T_{B \rightarrow A} + T_{A \rightarrow B}}$$

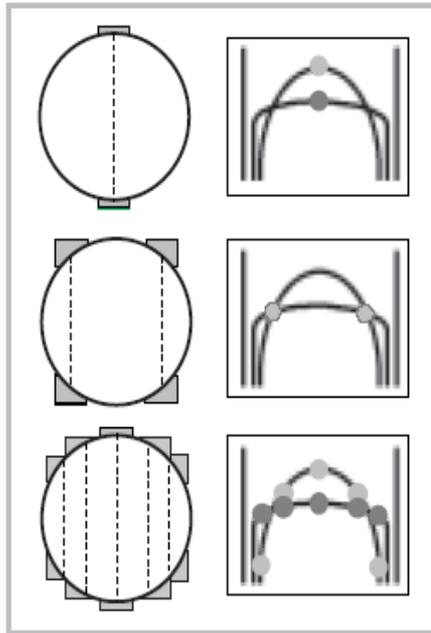
- Limiti sulla quantità di gas o di particelle solide presenti nel liquido
- Limiti sulla viscosità del liquido
- Misuratore ultrasonico tipo "clamp-on"
 - ⇒ Installazione più semplice
 - ⇒ No problemi si sporcia
 - ⇒ Variazioni del percorso del "raggio acustico" per slittamento sensori o dilatazioni termiche



Misuratori a ultrasuoni

Larger number of measuring paths = greater measuring accuracy at varying Reynolds number

Fig. 9 shows on the left in each case the position of the measuring paths, and on the right a longitudinal section through the tube with implied laminar and turbulent flow profiles in the tube centreline. The values sensed by the measuring beams at laminar flow are marked with dots on the respective profile line.



Single-beam ultrasonic flowmeters, at the top in Fig. 9, are used mostly for turbulent flows, e.g. for water. They show an error of measurement of approx. 30% at the transition from turbulent to laminar flow.

Dual-beam ultrasonic flowmeters, Fig. 9 (centre), show an error of measurement of only 0.5% at this turbulent/laminar transition. They have been used for more than 15 years for process measurements. They are also used for monitoring officially calibrated differential-pressure flowmeters that are subject to wear from the dirt particles in crude oil and then have noticeable measurement errors.

The ALTOSONIC V ultrasonic volumetric meter with 5 measuring paths (at the bottom in Fig. 9) senses

the flow profile so well that it can completely compensate for its effects on measuring accuracy and also, given changes from "laminar" to "turbulent", stays well within its allowable error of measurement of $\pm 0.15\%$.

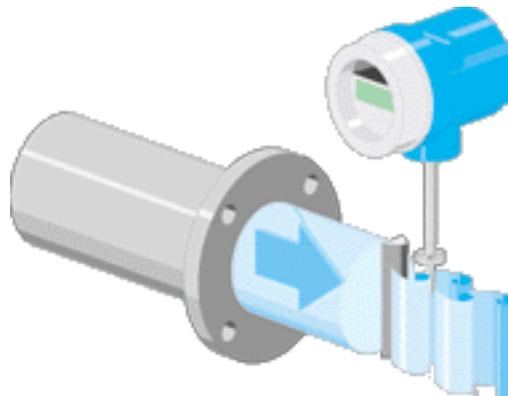
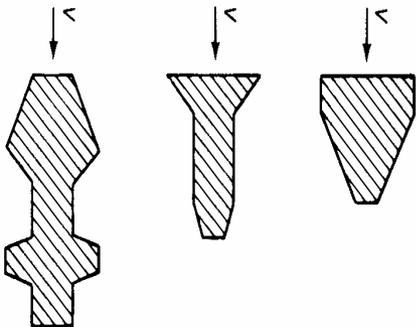
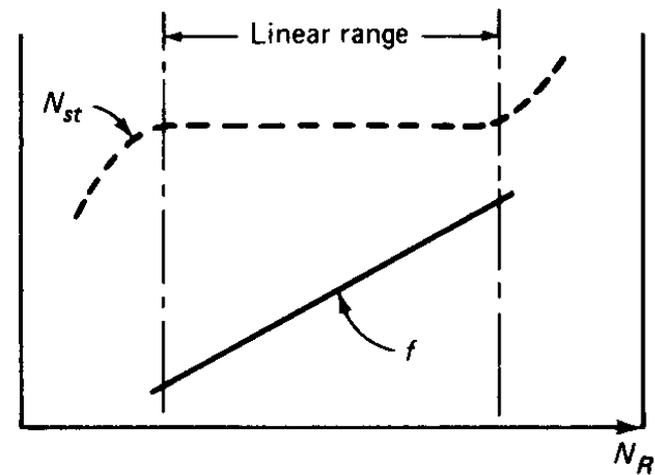
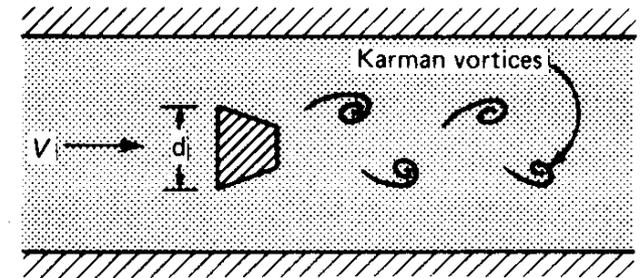
- Sensibilità al profilo del flusso
- Si può usare più traiettorie e mediare i risultati ottenuti.



Misuratori a distacco di vortici

- Il principio di funzionamento si basa sul fenomeno di distacco di vortici (karman vortex) a valle di un corpo solido dai bordi smussati immerso in una vena fluida investito da un flusso stazionario.
- Se $Re > 10000$ si ha formazione di vortici con frequenza di distacco:

$$f = (N_{st} V) / d$$
- Per opportune forme del corpo $N_{st} = \text{cost}$ su un vasto intervallo di Reynolds
- Quindi f proporzionale a V
- Ci sono diverse forme per i corpi da cui si ha il distacco di vortici.



Misuratori a distacco di vortici

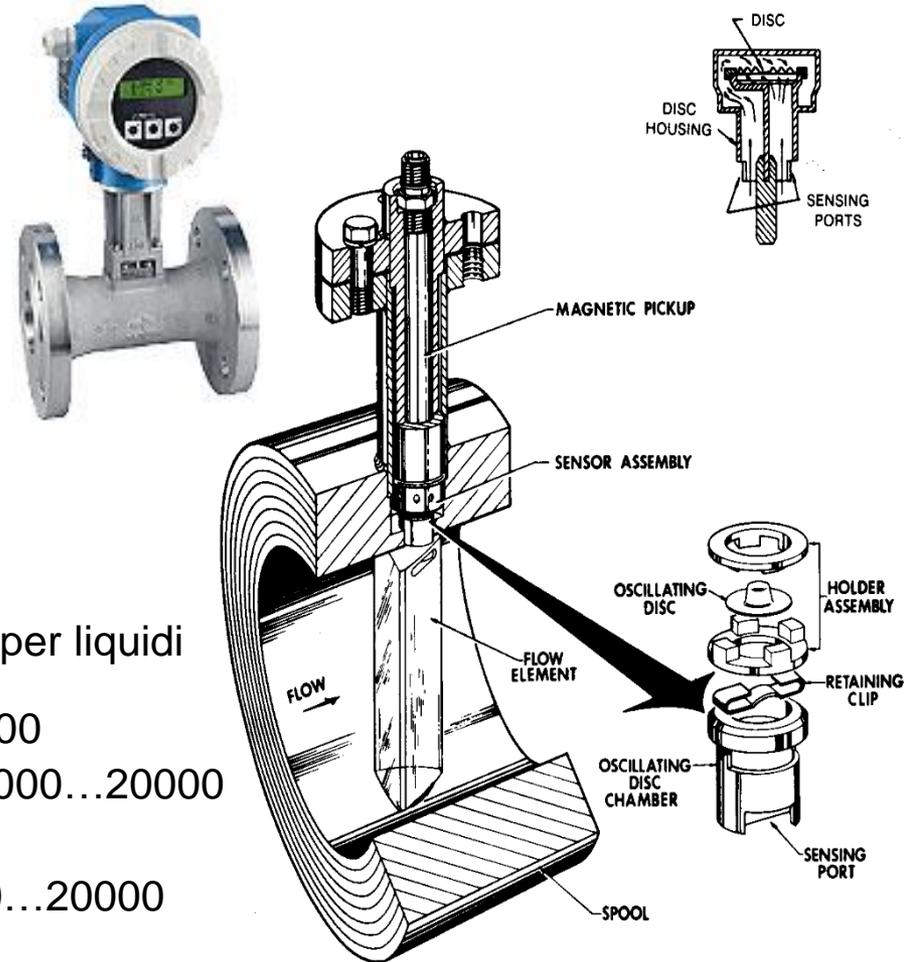
- Per la misura della frequenza si possono usare materiali piezoelettrici, piezoresistivi, si può monitorare l'interruzione, dovuta al passaggio dei vortici, di fasci ultrasonici.

Quello in figura avverte la differenza di pressione per mezzo di un diaframma elastico

Applicazioni e vantaggi

- Misure volumetriche di vapore, gas e liquidi
- Non hanno bisogno di ricalibrazione
- Minime perdite di pressione
- Campo d'impiego 15:1 per gas e vapore, 40:1 per liquidi

Errore:	Liquidi:	$<0.75\% \text{ o.r. } Re > 20000$
		$<0.75 \text{ o.f.s } Re \text{ tra } 4000 \dots 20000$
	Gas/vapore	$<1\% \text{ o.r. } Re > 20000$
		$<1 \text{ o.f.s } Re \text{ tra } 4000 \dots 20000$

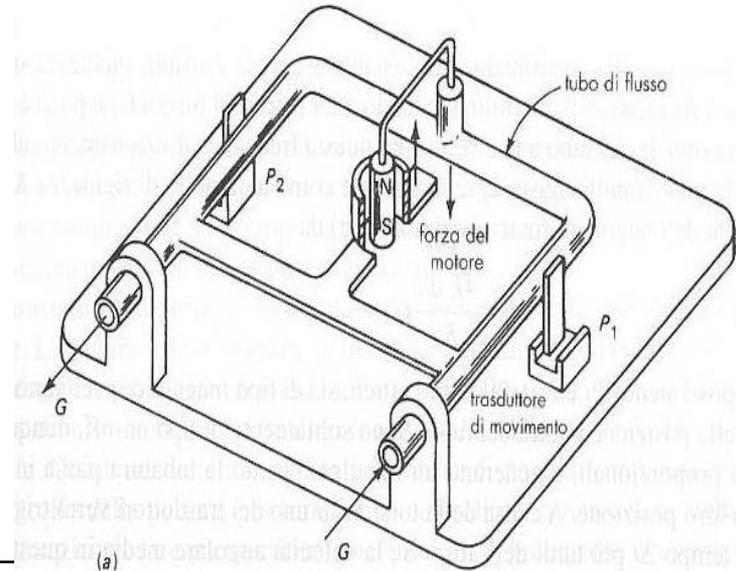


Misuratore massico Coriolis - Principio di funzionamento

- Il principio di funzionamento si basa sulla generazione controllata di forze di Coriolis
- La forza di coriolis è presente ogni qualvolta abbiamo la sovrapposizione di un moto rotatorio e di una traslazione

$$F_c = 2 * G * (\vec{v} * \vec{\omega})$$

- Il fluido con una portata massica di G kg viene fatto passare attraverso una tubatura a forma di C supportata da due staffe.
- Il tubo è mantenuto in vibrazione flessionale stazionaria con un regime sinusoidale (alla frequenza propria di 50-80 Hz, modellandolo come una mensola) da un sistema elettromagnetico retroazionato (lavora sempre alla frequenza propria della mensola e quindi con richiesta di potenza minima).
- Il fluido deve sentire una velocità angolare ω il cui vettore sia perpendicolare alla velocità v del fluido
- (in questo caso è un movimento oscillatorio prodotto dalla flessione del tubo a C attorno ai suoi supporti).



Misuratore massico Coriolis

- ω è vista come la rotazione di un corpo rigido attorno ad un asse fisso e la velocità del fluido è rappresentata da V assunta costante sul profilo.

⇒ Un elemento di massa dM causa una forza: $dM(2 \omega \times V)$

- V cambia di segno tra un ramo e l'altro quindi si genera una coppia torsionale d'inerzia dT :

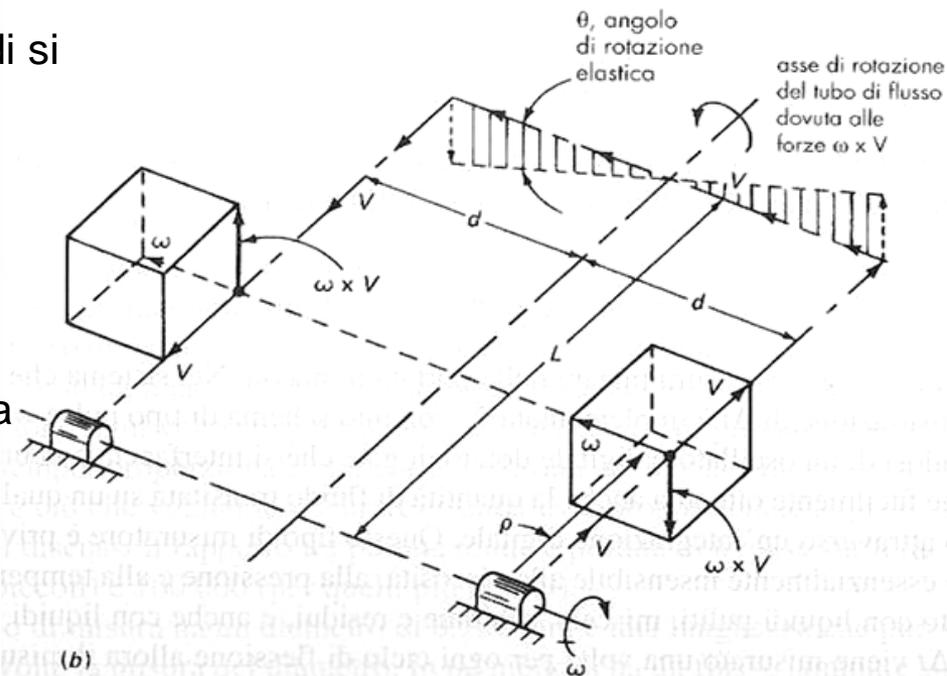
$$dT = 2(2 \omega \times V)(dM)d = 2(2 \omega \times V)(G/Vd\rho)d$$

$$T = \int_0^L dT = 4\omega Gd \int_0^L d\rho = 4Ld\omega G$$

- Il sistema agisce come una molla di rigidezza K_s

$$\theta = \frac{4Ld\omega}{K_s} G$$

- I trasduttori di spostamento generano un impulso quando la tubatura passa in corrispondenza della loro posizione
- Quindi attraverso la misura del Δt tra un impulso e l'altro abbiamo una misura lineare della portata in massa.



Misuratore massico Coriolis

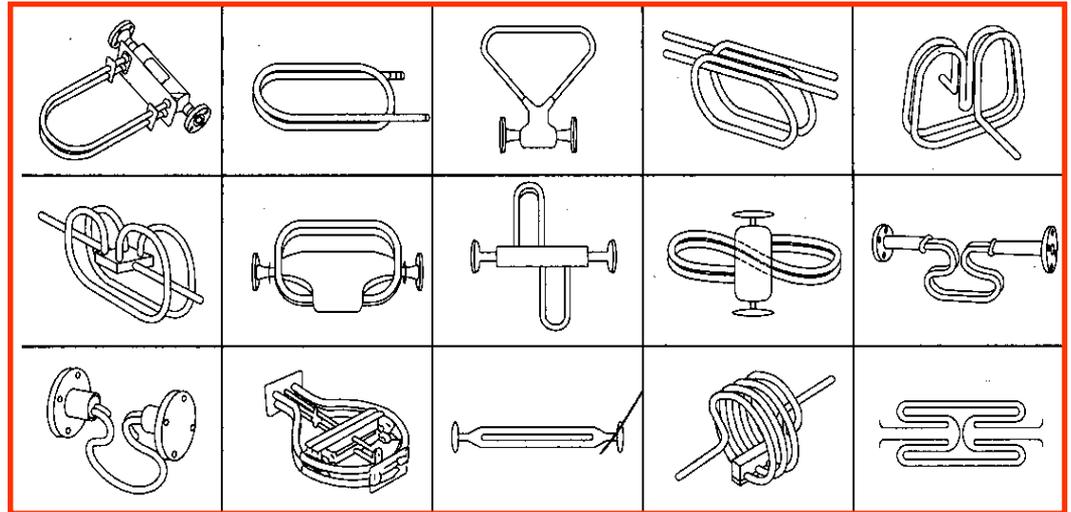
➤ A causa di θ ci sarà un Δt tra i due segnali:

$$\theta = \frac{L\omega\Delta t}{2d}$$

⇒ Combinando le due equazioni (1) e (2):

$$G = \frac{K_s}{8d^2} \Delta t$$

Possibili geometrie dei misuratori Coriolis



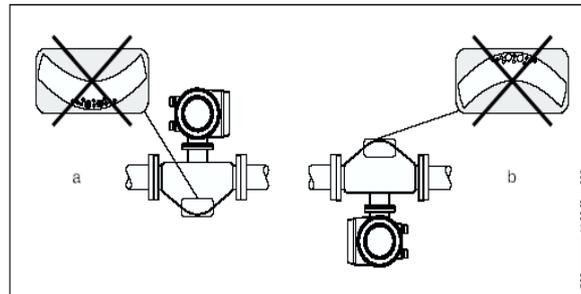
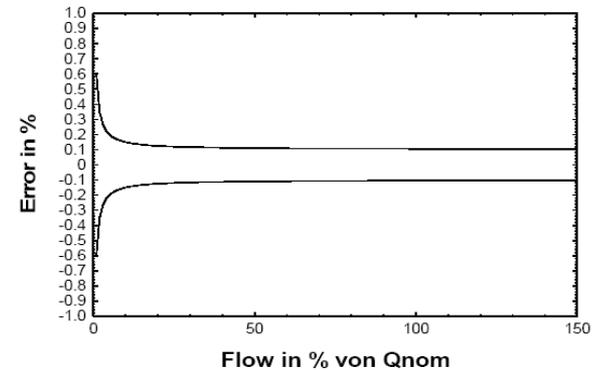
- Privo di ostruzioni
- Insensibile alla viscosità, alla pressione e alla temperatura
- Si può usare con liquidi puliti, miscele, schiume, residui e liquidi contenenti gas.

Misuratore massico Coriolis

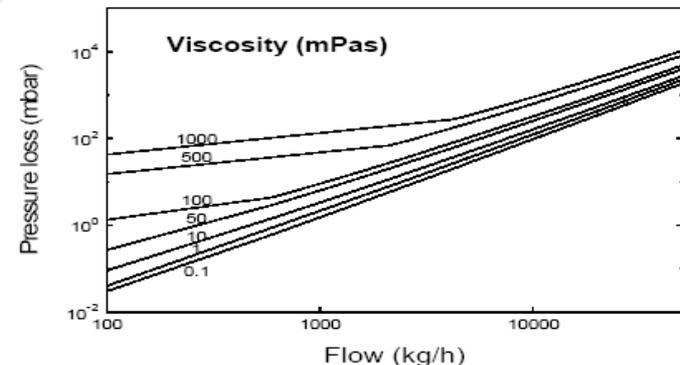
Caratteristiche tecniche (Endress+Hauser Yokogawa)

- Range di portata: fino a 2200 t/h
- Range di temperatura: -40 to 150°C (possibilità di elettronica separata -200°C to 150°C).
- Uscita: 4-20 mA
- Alimentazione: 220 VAC

Errore: Liquidi: $\pm 0.1\%$ o.r.
Gas: $\pm 0.5\%$ o.r.



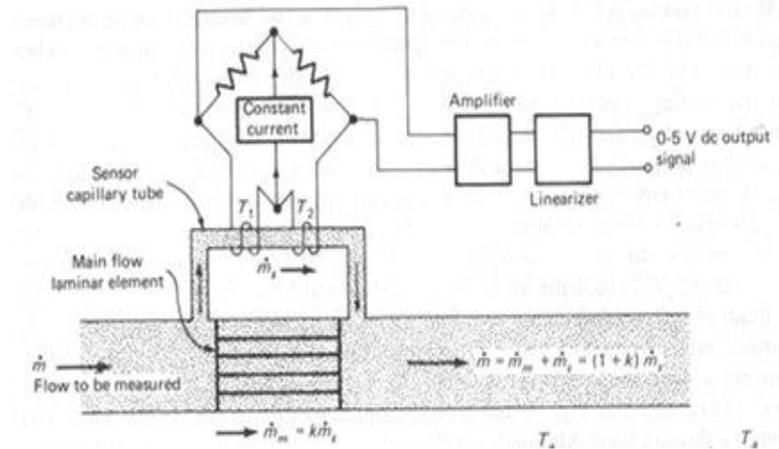
a Not suitable for fluids with entrained solids. Risk of solids accumulating.
b Not suitable for outgassing fluids. Risk of air accumulating.



Misuratore massico termico

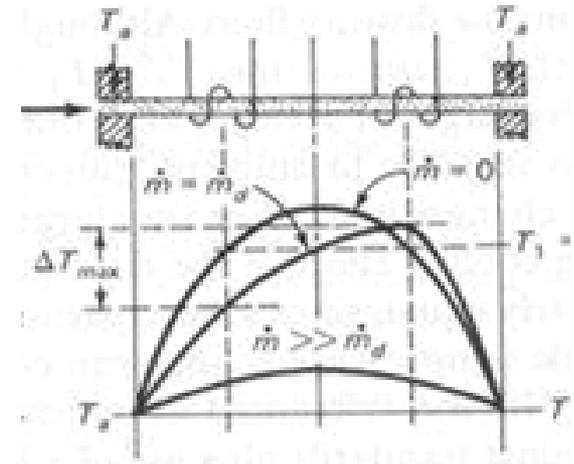
Principio di funzionamento (corrente costante)

- Il principio di funzionamento si basa sui principi della trasmissione di calore.
- Il misuratore riportato in figura sfrutta il sistema del bypass.
- Viene misurata solo una frazione della portata totale, in questo modo possiamo fare misure di portata maggiore con un misuratore più piccolo ed economico
- Il tubo capillare ha diametro di 0.787 mm e lunghezza tra 50 e 100 volte il diametro (portata = 20 cm³/min).
- Entrambe le zone sono progettate per avere flusso laminare
 - ⇒ Vengono usate canalette sottili di sezione rettangolare
- Ci sono due avvolgimenti elettrici posti attorno alla superficie esterna del sensore a tubi che fanno sia da riscaldatori (heater) che da sensori di resistenza-temperatura e forniscono una quantità di calore costante al tubo per qualsiasi valore di portata.
- I due avvolgimenti sono su due lati adiacenti di un circuito a ponte e le resistenze del ponte sono tali che questo sia bilanciato per una portata nulla.



Misuratore massico termico

- Per una portata nulla il sistema è “termicamente simmetrico”
- Tutto il calore fornito dalle resistenze elettriche viene utilizzato per bilanciare la perdita di calore del tubo verso lo spazio circostante che si suppone rimanga a temperatura T_a ($T_1 - T_2 = 0$).
 - ⇒ In fig è rappresentata la temperatura del tubo alle varie portate.



- Facciamo fluire una portata m
- Il flusso, inizialmente a temperatura T_a , riceve calore dal tubetto, si scalda e lasciando la prima zona si porta via energia secondo: $mcpT_1$
- T_1 diminuisce (vedi grafico)
- La diminuzione di T_1 è proporzionale a m
- Il ponte si squilibra, si genera un nuovo equilibrio termico.
- T_2 resta circa costante perché riceve e perde più o meno la stessa quantità di calore dal fluido che scorre.
- Se la portata \gg della portata di progetto l'effetto di raffreddamento del fluido rende T_1 e T_2 molto basse e simili (si raffreddano entrambe).
- La portata in massa è legata a T_1 ma è meglio utilizzare il segnale $T_2 - T_1$ (reso disponibile dal circuito a ponte) perché dà uscita nulla per portata nulla e rende lo strumento meno sensibile alla temperatura esterna (T_1 e T_2 risentono nello stesso modo della variazione di T_a).

Misuratore massico termico

Caratteristiche tecniche (temperatura costante)

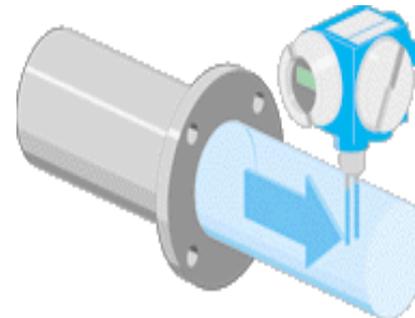
- Il flusso passa su due termoresistenze PT100
 - ⇒ Una è usata come sensore di temperatura di riferimento e legge la temperatura del fluido
 - ⇒ l'altra funziona da heater; facendo variare la corrente al suo interno, è mantenuta ad una differenza di temperatura costante rispetto alla prima.
- Maggiore è la portata che fluisce, maggiore è la quantità di calore asportata dal fluido e maggiore è la corrente da spendere per mantenere la differenza di temperatura tra le due PT100 costante.

$$Q = mc_p \Delta T = RI^2$$

- Misurando la corrente richiesta per mantenere il profilo voluto ho una misura della portata m che sta fluendo.

- Migliora la linearità e il tempo di risposta.

**Flanged version,
DN 15...150**

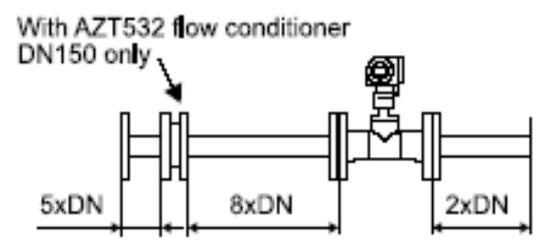
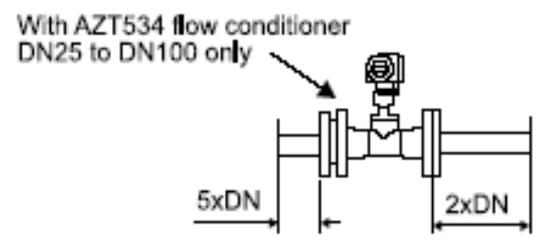
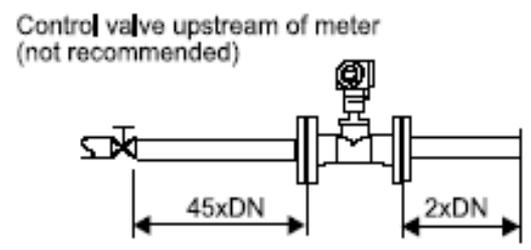
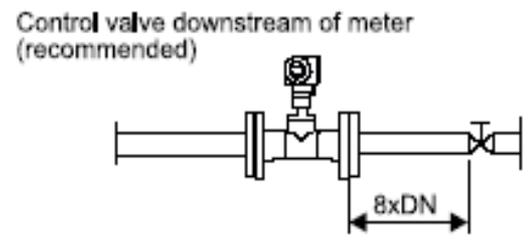
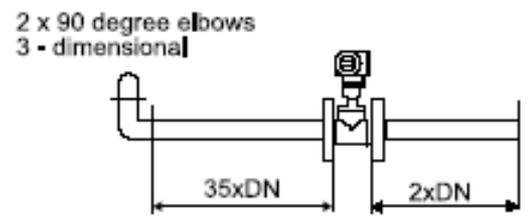
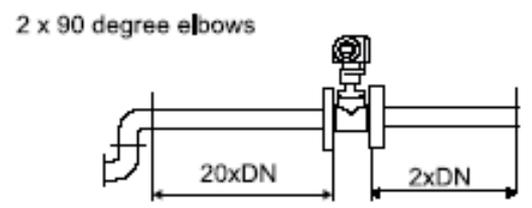
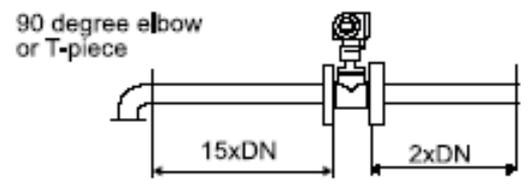
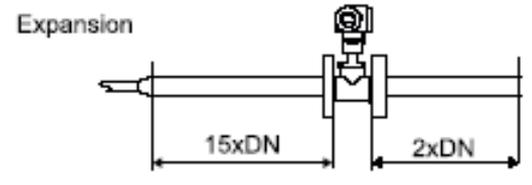
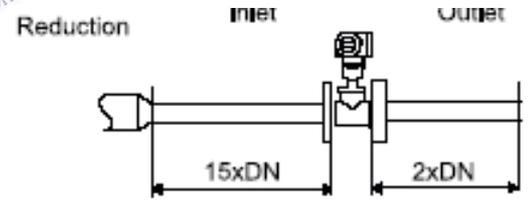


(Endress+Hauser)

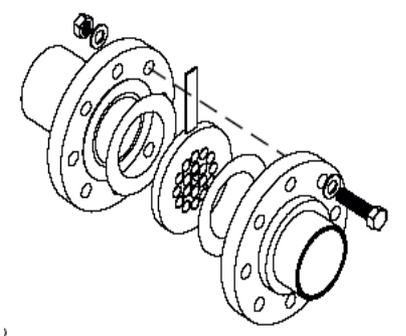
Insertion version for large
pipe diameters,
DN 80...1000



Misuratore massico termico: installazione



Quando il diametro del tubo è largo e ci sono problemi di spazio si può usare un condizionatore di flusso che consente di ridurre i diametri a monte



Misuratore massico termico

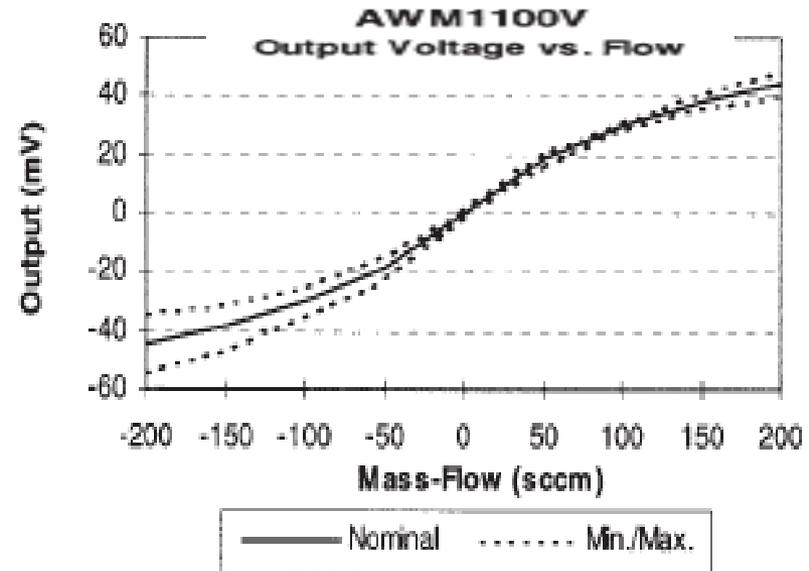
Caratteristiche tecniche (Endress+Hauser)

- Errore: $\pm 2\% R$ $\pm 0.5\% FS$ $+2\% R$
- Range di temperatura: $-10...+100\text{ }^\circ\text{C}$
- Rangeability: 100:1
- Uscita: 4-20 mA
- Aliment.: 20-30 VDC
- Consumo: $<3W$



Caratteristiche tecniche (Honeywell)

- Errore: $\pm 1\%$ o.f.s.
- Range di portata: $-600 +1000\text{ sccm}$
- Range di temperatura: $-25^\circ\text{C} +85^\circ\text{C}$
- Uscita: mV
- Alimentazione: 8-15 VDC
- Consumo: 30mW





	VENTOLINE (Turbine)	VORTEX	TERMICI	MAGNETICI	ULTRA - SONICI	AREA VARIABILI	MASSICI CORIOLS
RANGE velocità portata Min - max in gas e [liquid]	[0,01] 0,2..120m/sec [0,025]0,15 l/m.illimitato	0,5..45m/sec [2,3.. 9500l/m]	0,01.. 70m/sec	0,1..7m/sec	0,1.. 40m/sec [0,1..7 m/sec]	1ml/min.. 340m3/h	0,09.. 1023kg/min
USCITA	analogica, digitale (frequenza)	analogica, digitale	analogica, digitale, on-off, rele'	analogica, digitale	analogica, digitale	analogica on-off, rele'	analogica, digitale, frequenza
INDICAZIONE	digitale o cieco	digitale o cieco	digitale o cieco	digitale o cieco	digitale o cieco	analogica, digitale	digitale o cieco
PRECISIONE	1,5% (0,5%)	0,5...1%	0,5..5%	0,2..1%	0,1..5%	1...5%	0,15..1%
RISOLUZIONE	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,25%	0,025%
TEMPO DI RISPOSTA	0,1..1sec	0,2..1,5sec.	0,2..2sec	0,2..2sec	0,2..2sec	0,2..2sec	0,2..2sec
FLUIDI O SOLIDI MISURABILI	gas,liquidi, vapore non condensante	gas,(liquidi)	gas,liquidi	liquidi conduttivi	liquidi,gas, polveri	liquidi,gas	liquidi,gas
VISCOSITA'	bassa	bassa	bassa	bassa - alta	bassa - alta	bassa - media	bassa - alta

	VENTOLINE (Turbine)	VORTEX	TERMICI	MAGNETICI	ULTRA - SONICI	AREA VARIABILI	MASSICI CORIOLS
PARTI IN SOSPENSIONE	no	poche	poche	poche, medie	anche molte	no	poche, medie
PERDITA DI CARICO	trascurabile	bassa	nulla, bassa	trascurabile, bassa	nulla, bassa	bassa, media	bassa, media
INSTALLAZIONE - In linea - A inserzione	in linea, a inserzione	a inserzione in linea	a inserzione in linea	a inserzione in linea	Non invasiva, a inserzione	in linea	in linea
LIMITI OPERATIVI - Temp. - Press.	-90...+550°C 12(345)bar	-25...+205°C (95)4(10)bar	-40...+250°C 0...70bar	0...94°C 13.8bar	0...204°C 0...illimitato	204°C 135bar	204°C 0...207 bar (oltre)
RESISTENZA A CORROSIONI	buona - ottima	buona - ottima	buona	buona	buona - ottima	buona - ottima	buona - ottima
DIAMETRI min e max misurabili	6mm... illimitato	6mm... illimitato	6mm... illimitato	12mm... illimitato	6mm... illimitato	3...200mm	6...100mm
MATERIALI TUBI AMMISSIBILI	tutti	tutti	tutti	tutti	est = no cemento e inserti ins = tutti	tutti	tutti
CERTIFICAZIONE (3)	EX,SIT	EX,SIT, (CSA)	EX,SIT,FM, CSA	SIT	SIT,EX,FM	EX,SIT, FM,CSA	EX,FM,SIT
COSTO	medio	medio,alto	basso, medio,alto	medio	medio,alto	basso, medio	medio,alto



GRAZIE
per
L'ATTENZIONE

