



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE



Dipartimento di  
Ingegneria  
e Architettura

# Misure di Portata

Corso: MISURE MECCANICHE, TERMICHE E COLLAUDI [113MI]

Prof. Lucia Parussini

Prof. Rodolfo Taccani

Prof. Ronelly De Souza

**A.A. 2025-2026**

## Obiettivi della lezione:

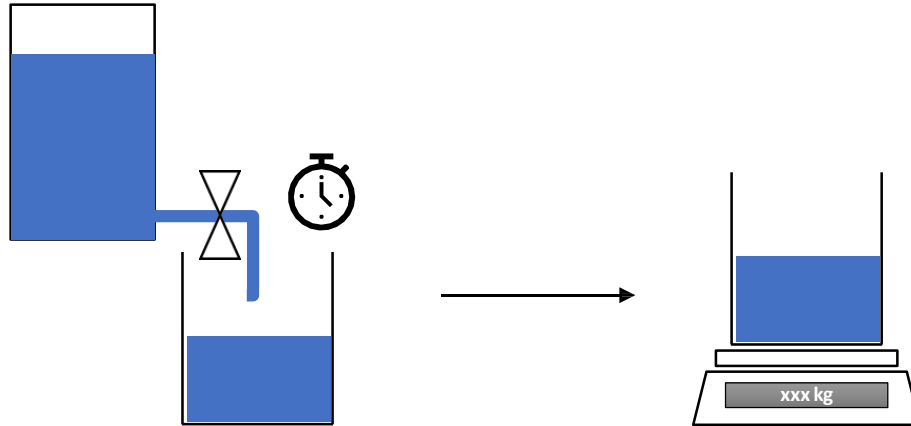
- Riprendere e chiarire i principi fondamentali alla base delle misure di portata.
- Comprendere il funzionamento e le applicazioni dei principali strumenti per la misura della portata, sia volumetrica che massica.

# Introduzione

Poiché Il concetto di portata si lega alla legge di conservazione della massa:

$$\frac{M_{in}}{\Delta t} = \frac{M_{out}}{\Delta t} \leftrightarrow \dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} \leftrightarrow \left( \frac{\rho V}{\Delta t} \right)_{in} = \left( \frac{\rho V}{\Delta t} \right)_{out}$$

Da questa definizione, si può illustrare il metodo più semplice ed efficace per la misura della portata nei fluidi (non universale, difficilmente applicabile ai gas ad esempio):



# Introduzione

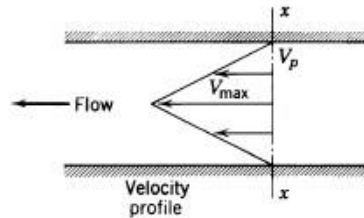
La portata è definita come la misura della quantità di fluido che attraversa una sezione A nell'unità di tempo. La portata corrisponde ad una classe di grandezze fisiche (quali una quantità chimica, una massa o un volume ad esempio). Si nota quindi come la portata sia legata alla velocità media del fluido:

$$\frac{\rho V}{\Delta t} = \rho \int \frac{\Delta x}{\Delta t} dA = \rho \int v_p dA$$

$$\bar{v} = \frac{\int v_p dA}{A}$$

Inoltre:

$$\dot{m} = \rho \bar{v} A = \text{costante}$$



# Introduzione

Nel tempo sono stati sviluppati uno svariato numero di strumenti per la misura della portata

## Portata volumetrica

A caduta di  
pressione variabile  
e ad area costante

A distacco di vortici

A turbina

A caduta di  
pressione costante  
e ad area variabile  
(rotametri)

A ultrasuoni

Tubo di Pitot

Laser

Elettromagnetici

## Portata massica

Misuratori di  
Coriolis

Misuratori  
termici

# Introduzione

Tali strumenti possono operare in due principali regimi di funzionamento: le misure di portata dirette e indirette.

Nelle misure di portata **dirette**, la portata viene misurata direttamente:

- Come portata volumetrica  $\dot{q} = A\bar{v} \left( \frac{m^3}{s} \right)$  (es. contatore del gas)
- Come portata massica  $\dot{m} = \rho A\bar{v} \left( \frac{kg}{s} \right)$

Queste due grandezza sono facilmente relazionabili tra loro tramite la relazione tra densità, massa e volume.

Le misure di portata **indirette** sono invece riconducibili:

- Ad una misura di pressione differenziale
- Ad un conteggio
- Ad una misura di frequenza

# Introduzione

Indipendentemente dal tipo di sensore, la misura della portata può essere disturbata da:

- **Profilo di velocità non uniforme**

Dovuto a curve, variazioni di diametro, raccordi, ostacoli nel percorso.

- **Gradiente di velocità sulla sezione**

Il flusso non è omogeneo lungo la sezione trasversale del tubo.

- **Variazioni di proprietà del fluido**

Densità e viscosità cambiano con la temperatura.

- **Difficoltà di taratura dei sensori**

Impossibilità di calibrare in condizioni reali.

# Misura di portata volumetrica



# Misuratori di portata volumetrica (interazione diretta con il fluido)

**Ad ostruzione e a flusso laminare**  
(area costante, misura di pressione differenziale)

**A tubo di Pitot**

**Rotametri**  
(misuratori a caduta ad area variabile)

**A turbina**

**Anemometri**

**A distacco di vortici**

**Misuratori ad ultrasuoni**

**Misuratori elettromagnetici**

**Misuratori ottici**

# Misuratori di portata volumetrica (interazione diretta con il fluido)

**Ad ostruzione e a flusso laminare**  
(area costante, misura di pressione differenziale)

**A tubo di Pitot**

**Rotametri**  
(misuratori a caduta ad area variabile)

**A turbina**

**Anemometri**

**A distacco di vortici**

**Misuratori ad ultrasuoni**

**Misuratori elettromagnetici**

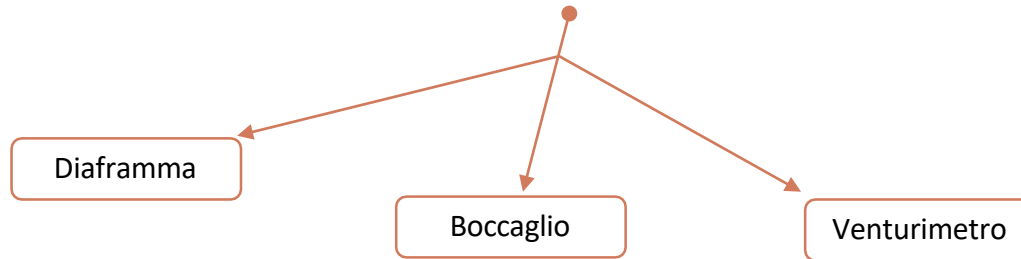
**Misuratori ottici**

# Misuratori ad ostruzione (area costante, caduta di pressione variabile)

Metodo di misura comunemente usato, si fa uso di una restrizione dell'area libera di efflusso nella condotta che trasporta il fluido.

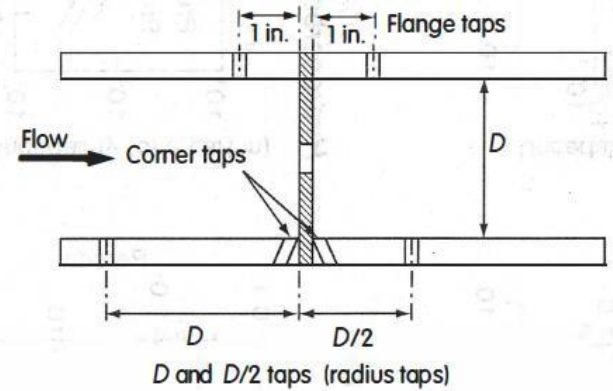
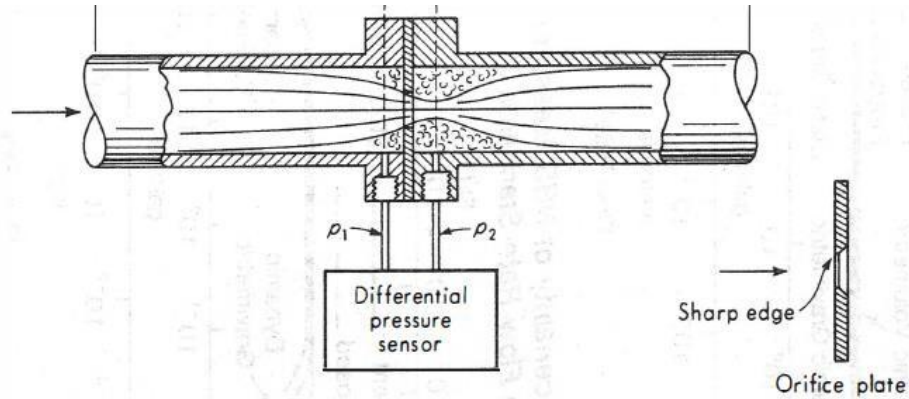
Questo restringimento del flusso causa una caduta di pressione che dipende dalla portata.

Rilevando la caduta di pressione, si risale quindi alla portata



Questo tipo di strumenti vengono solitamente inseriti in linea, in rami appositamente predisposti per la misura della portata.

# Misuratore di portata a diaframma



# Misuratore di portata a diaframma

Per fluidi incompressibili, che si propagano lungo una sola direzione ed in assenza di attrito, scambi di calore o variazione di quota, dalla legge di conservazione della massa:

$$\dot{m} = \rho \bar{v}_1 A_{1,f} = \rho \bar{v}_2 A_{2,f} \rightarrow \bar{v}_1 = \bar{v}_2 \frac{A_{2,f}}{A_{1,f}}$$

Mentre, essendo per la legge di Bernoulli  $p + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh = \text{costante}$ :

$$p_1 + \rho \frac{\bar{v}_1^2}{2} + \rho gh_1 = p_2 + \rho \frac{\bar{v}_2^2}{2} + \rho gh_2$$

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} (\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2) + \rho g \Delta h \Big|_{\Delta h=0} = \frac{\rho}{2} \bar{v}_2^2 \left( 1 - \left( \frac{A_{2,f}}{A_{1,f}} \right)^2 \right)$$

$$Q = \bar{v}_2 A_{2,f} = \frac{A_{2,f}}{\sqrt{1 - (A_{2,f}/A_{1,f})^2}} \sqrt{2 \frac{(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

# Misuratore di portata a diaframma

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

Nella relazione caratteristica del misuratore di portata **le aree  $A_{i,f}$  rappresentano le aree della sezione trasversale del flusso** ma non quella della sezione della condotta o del diaframma.

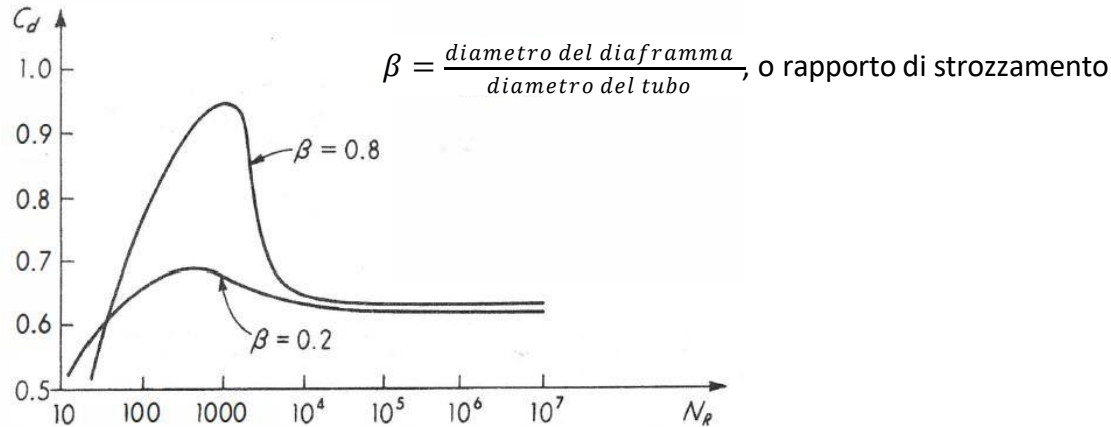
È pertanto necessario introdurre il **coefficiente di efflusso  $C_d$** , che mette in relazione la **portata reale e del dispositivo con quella teorica**. In questo modo nella relazione per il calcolo della portata, si possono introdurre le sezioni (note) di condotta e disco del diaframma.

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

# Misuratore di portata a diaframma

Il coefficiente di efflusso viene definito grazie un **processo di taratura** (univoco) e, per fluidi incompressibili, il suo valore è **funzione sia del rapporto di strozzamento,  $\beta$ , sia del numero di Reynolds**.

Per fluidi comprimibili, il suo valore dipende dal numero di Reynolds, dal rapporto tra le pressioni e dall'esponente isoentropico del gas.



# Misuratore di portata a diaframma – fluidi comprimibili

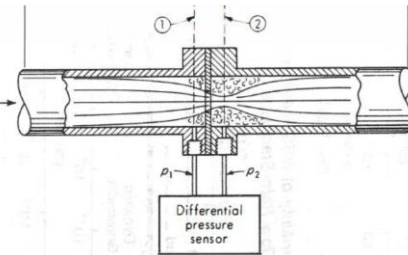
Per **fluidi comprimibili** l'equazione caratteristica dei misuratori a portata ( $Q = f(C_d, A_1, A_2, \Delta p, \rho)$ ) **non è più valida**, in quanto la **densità cambia** tra i punti di misura 1 e 2.

In condizioni isoentropiche, la portata (massica) può essere ottenuta dalla relazione:

$$Q_m = \frac{\alpha C Y_1 F_a d_2^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2(p_1 - p_2) \rho_1}$$

Dove:

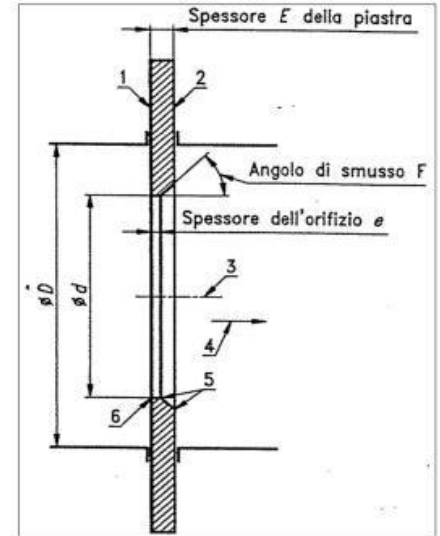
- $C$  è un coefficiente di efflusso ottenuto per via empirica (non ottenuto tramite un processo di taratura),
- $\alpha$  coefficiente specifico dello strumento,
- $F_a$  tiene conto delle dilatazioni termiche del diaframma (tabulato, in base al materiale), ed
- $Y_1$  è un coefficiente di comprimibilità (unitario per i liquidi).



# Misuratore di portata a diaframma – Diaframmi

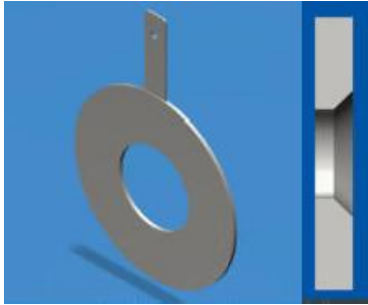
Le caratteristiche geometriche e di installazione dei diaframmi sono opportunamente normati (**UNI EN ISO 5167**) in relazione a:

- natura del fluido
- condizioni di flusso
- specifiche circuitali necessarie da rispettare a monte e a valle del diaframma
- circolarità del condotto
- geometria del dispositivo
- disposizione delle prese di pressione



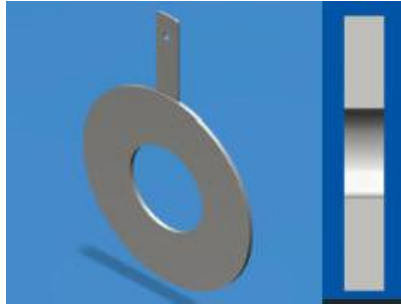
# Misuratore di portata a diaframma – Diaframmi secondo la ISO 5167

Diaframma classico



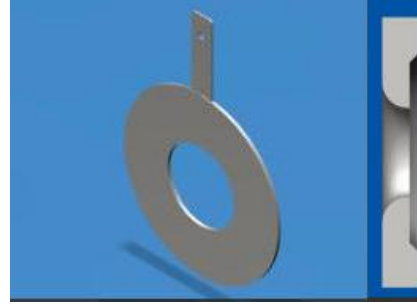
Tipologia principale

Diaframma simmetrico



Impiegato in misure di portata bidirezionali.

Diaframma a quarto di cerchio



Impiegati in fluidi molto viscosi, su tubazione con piccoli diametri ( $> 25$  mm) e su fluidi con basso numero di Reynold

Diaframma eccentrico

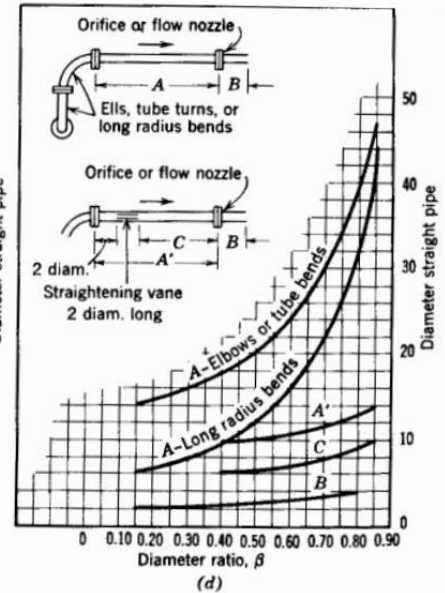
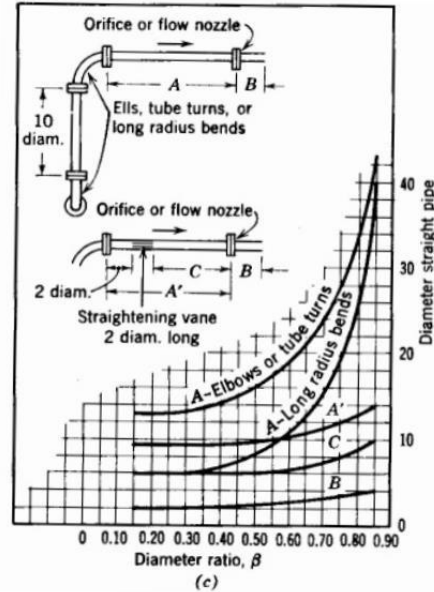
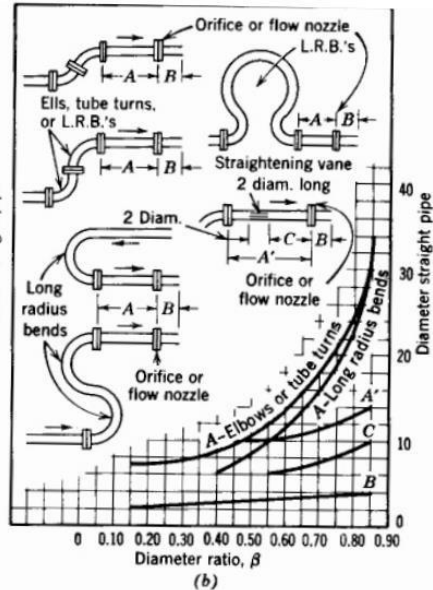
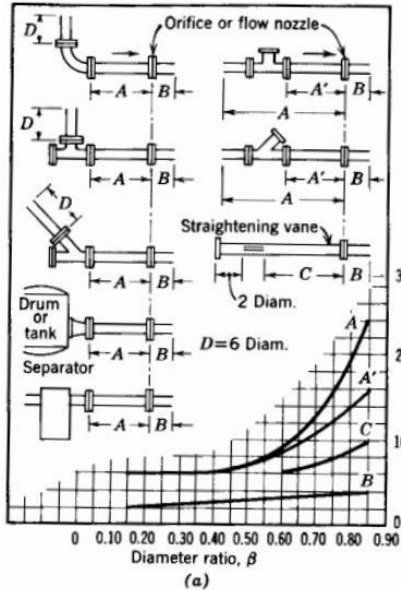


Progettato per essere utilizzato sulla misura di liquidi con solidi in sospensione, liquidi con gas disciolti o gas con liquidi trascinati.

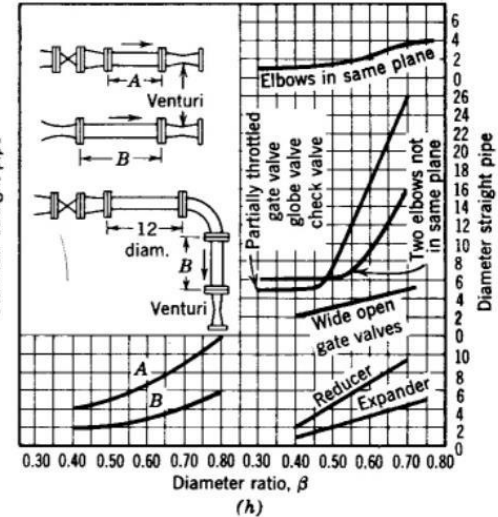
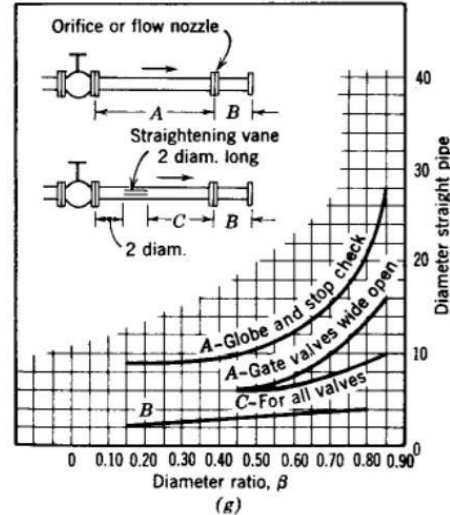
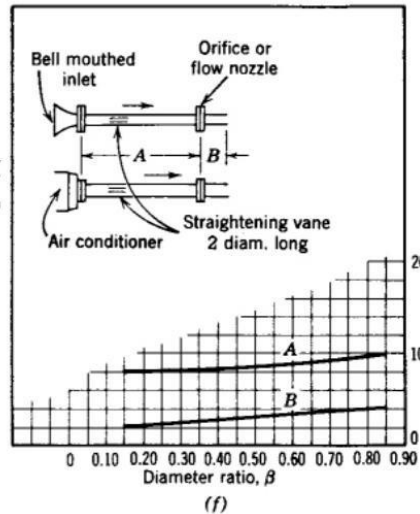
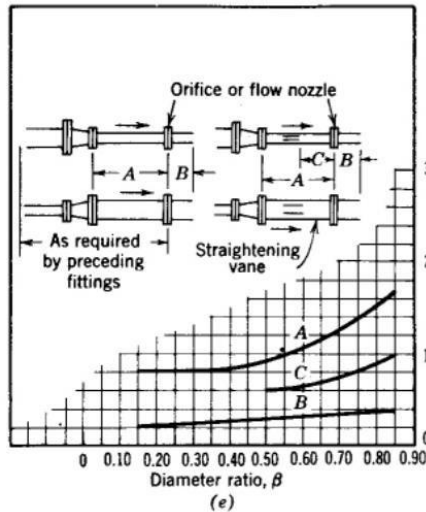


Impiegato in sostituzione dei diaframmi eccentrici, con fluidi a elevata concentrazione di solidi o di aria in sospensione

# Distanze richieste per l'installazione di diaframmi, bocchagli e venturimetri



# Distanze richieste per l'installazione di diaframmi, bocchelli e venturimetri

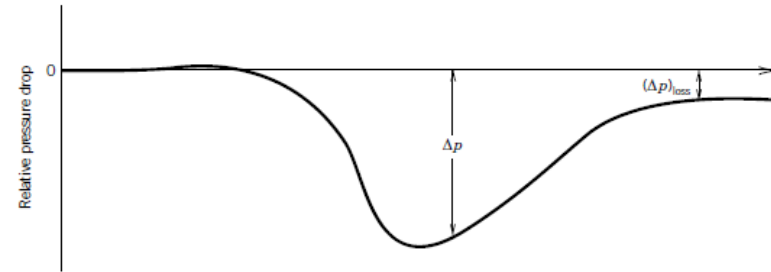
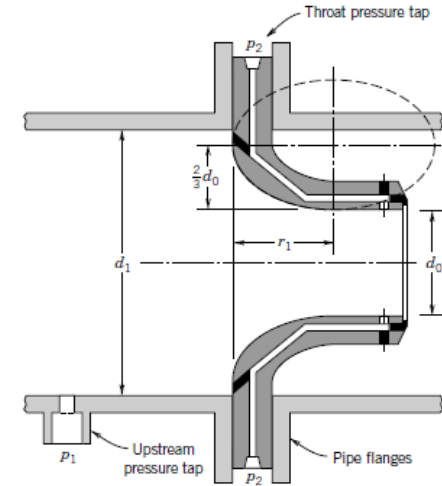
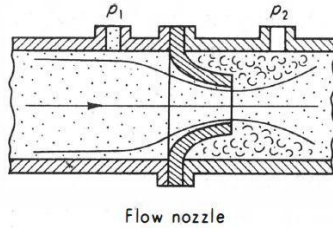


# Misuratore di portata a boccaglio

I boccagli sono **più costosi dei diaframmi** ma più economici dei venturimetri. Vengono **spesso usati per flussi di vapore ad alta velocità** in quanto maggiormente stabili in funzione di temperatura ed elevate velocità di propagazione dei fluidi.

Il boccaglio, come il diaframma, introduce una forte **perdita di carico** e presenta valori minori di rapporti di strozzamento.

Non possono infine essere usati quando il fluido misurato contiene una fase solida (es. pietrisco) in quanto si rischierebbe l'intasamento.



# Misuratore di portata a tubo venturi

## Progettazione:

- Variazioni di area meno repentine → riduzione delle turbolenze.
- Coefficiente di efflusso elevato: **fino a 0,99** (molto migliore rispetto a boccagli e diaframmi).

## Geometria:

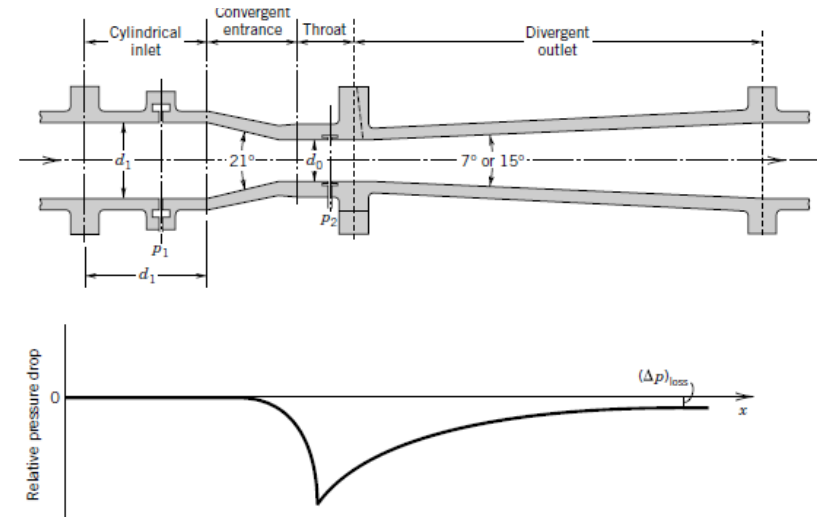
- Lato divergente più lungo di quello convergente

## Vantaggi:

- Perdite di carico ridotte → ideali per elevate portate (es. acquedotti).
- Utili quando non è possibile o vantaggioso aumentare la portata del flusso.

## Applicazioni:

- Misura di portata in **grandi condotte**.
- Misura della portata dei **ventilatori**.



# Misuratore di portata a tubo venturi

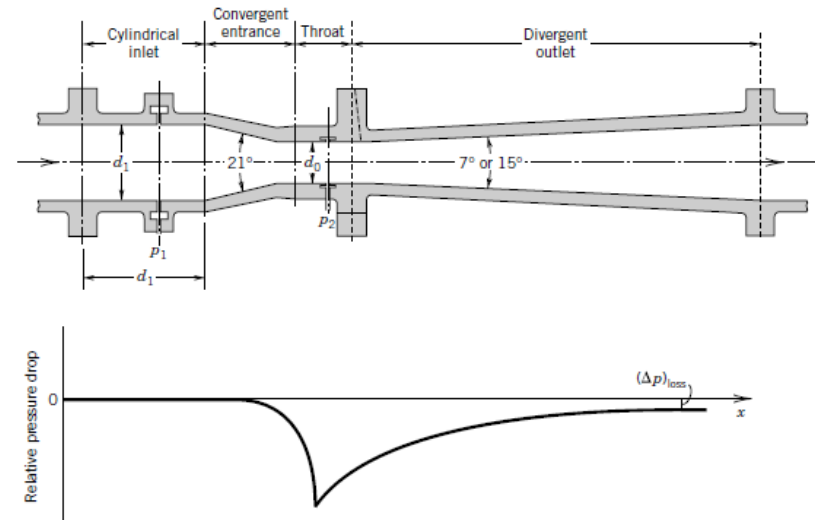
$$Q = \frac{A_1 A_2}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \sqrt{2 \frac{(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

## Vantaggi:

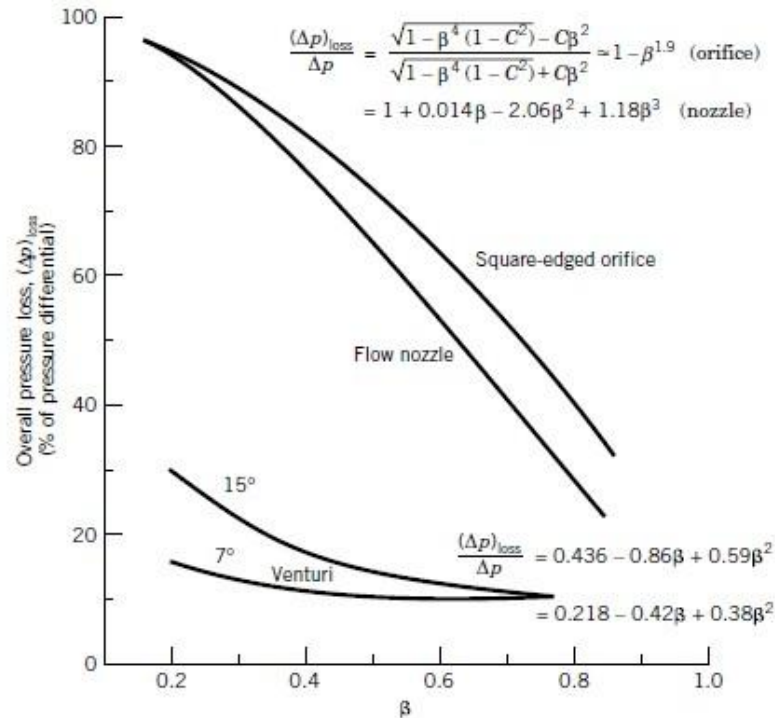
- **geometria interna regolare**, difficile l'intasamento (adatti per fluidi con solidi in sospensione)
- misure di **ottima precisione** su un vasto campo di portate (da poche unità a molte migliaia di m<sup>3</sup>/h).

## Svantaggi:

- notevole **distanza tra le prese di pressione** (presa di alta pressione a 7÷10 diametri a valle della strozzatura);
- sistema costoso e **ingombrante**

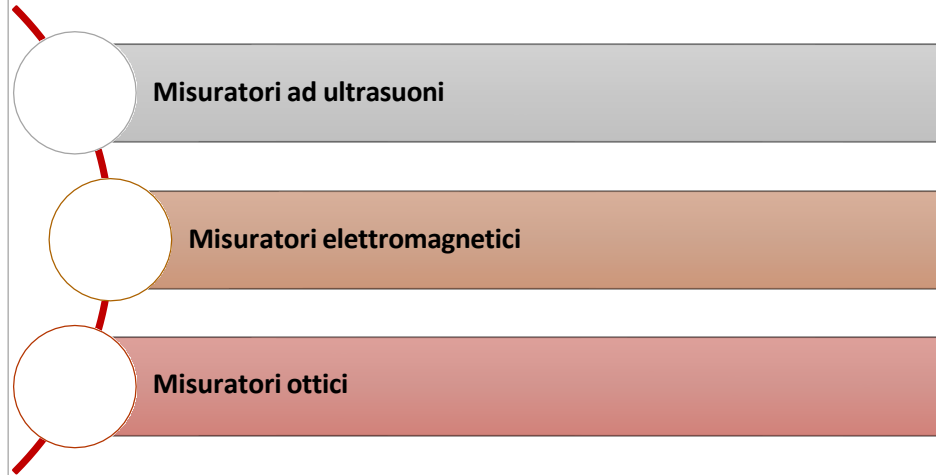
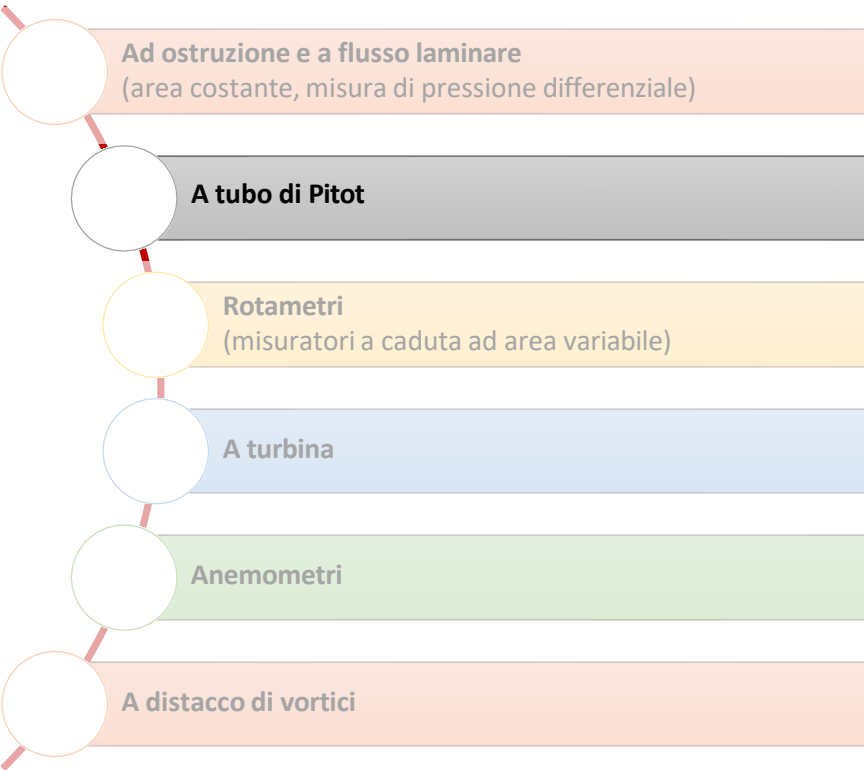


# Misuratore di portata – comparazione di perdite di carico



**Figure 10.7** The permanent pressure loss associated with flow through common obstruction meters. (Courtesy of American Society of Mechanical Engineers, New York, NY; compiled and reprinted from reference 1.)

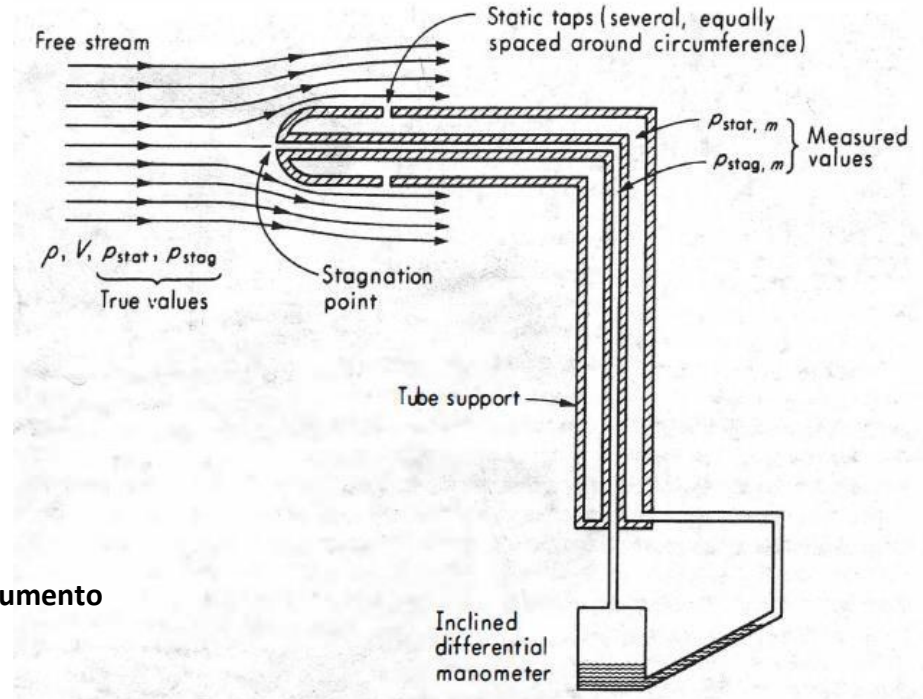
# Misuratori di portata volumetrica (interazione diretta con il fluido)



# Tubo di Pitot

- Il tubo di Pitot è uno strumento comunemente impiegato per **misurare il vettore velocità**, in quanto consente di misurare sia la velocità che la direzione nelle quali un fluido si propaga.
- Il tubo di Pitot è costituito da una sonda con un foro frontale e da quattro fori laterali, tra loro equi-spaziati lungo la circonferenza del tubo. Il foro anteriore si trova in coincidenza con il cosiddetto punto di ristagno e misura la pressione totale ( $p_{stag}$ ), mentre i quattro fori laterali misurano la cosiddetta pressione statica ( $p_{stat}$ ).

**Considerato il legame tra velocità e portata, tale strumento può anche essere impiegato per misure di portata.**



# Tubo di Pitot

Applicando il teorema di Bernoulli tra le sezioni relative al punto di ristagno (1) e di misura statica (2):

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho} = 0$$

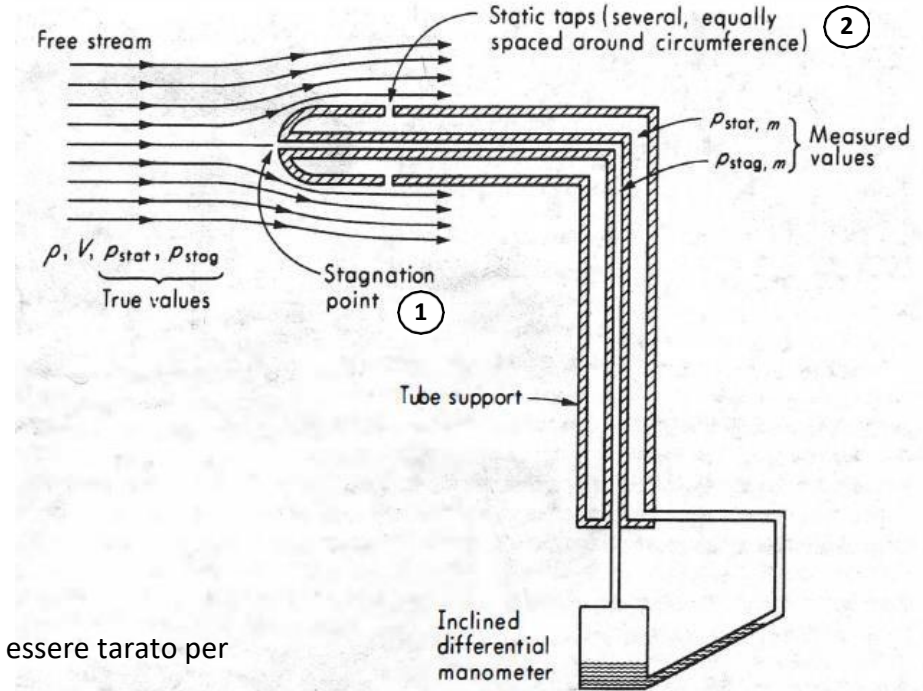
Nel punto di ristagno  $v_1 = 0$  e che la differenza di altezza è nulla ( $z_1 \cong z_2$ ), si ottiene:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p_2 - p_1}{\rho} = 0$$

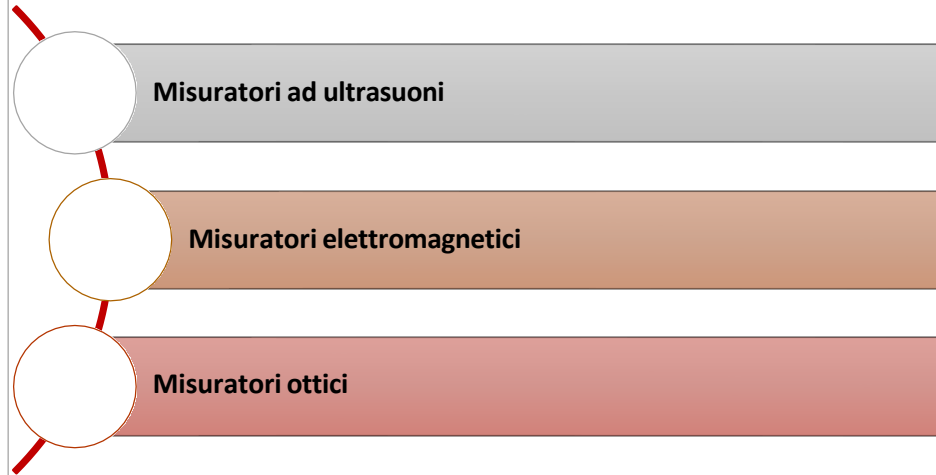
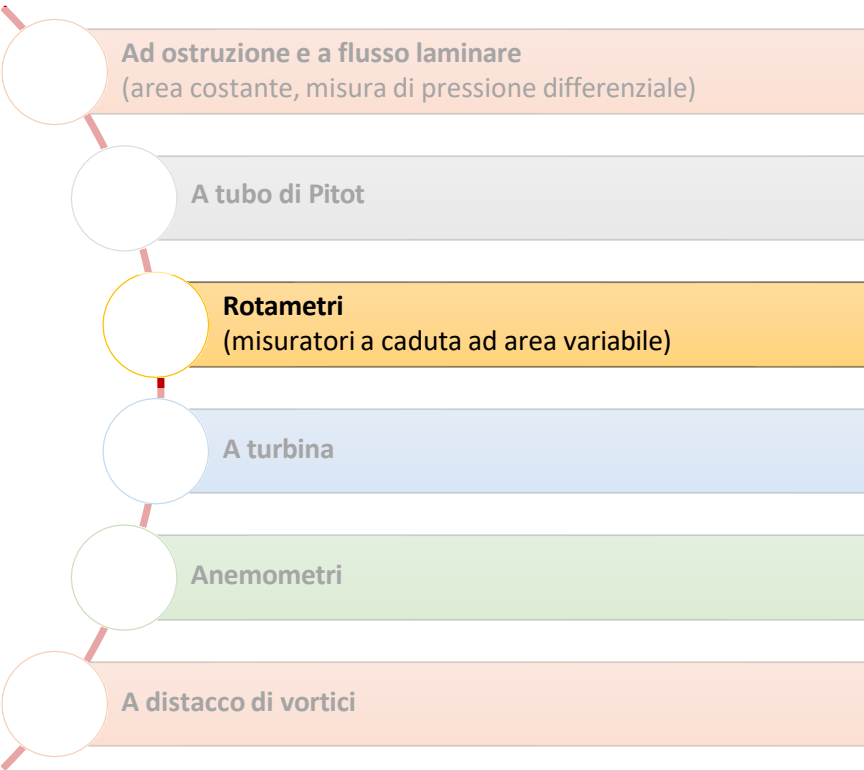
Da cui:

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

Il tubo di Pitot (sviluppato per misure di velocità puntuali) può quindi essere tarato per portate volumetriche, **se specificatamente posizionato all'interno del condotto.**

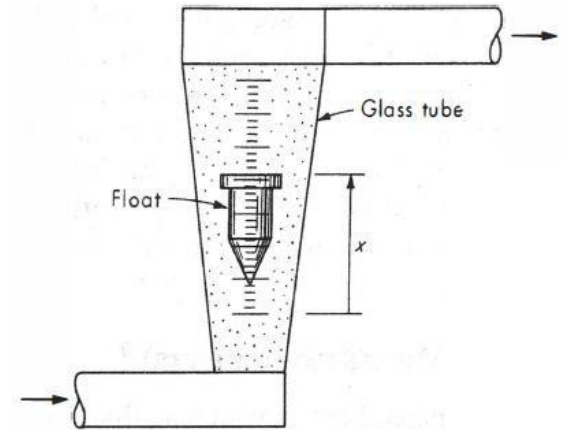


# Misuratori di portata volumetrica (interazione diretta con il fluido)



# Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

- Il rotametro è composto da un **tubo verticale avente forma conica** nel quale fluisce il fluido oggetto di misura; al suo interno è poi inserito **un galleggiante**.
- La **posizione del galleggiante** lungo la direzione verticale corrisponde ad un **valore di portata** che scorre nello strumento, inducendo una differenza di pressione localizzata, dovuta al **restringimento** della sezione di passaggio.
- Vista la variazione continua della sezione del tubo si può pensare al rotametro come ad un diaframma ad area variabile.



# Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

La posizione del galleggiante lungo l'asse della condotta è determinata dal bilanciamento tra le forze:

- Di gravità ( $\downarrow$ ),  $mg$
- Di galleggiamento ( $\uparrow$ ),  $\rho g V$
- Di attrito viscoso ( $\downarrow$ ),  $\beta v$
- Di pressione differenziale ( $\uparrow$ ),  $\Delta p A$

Il **tubo conico garantisce l'area variabile** che compensa le variazioni di pressione dovute alla variazione di portata che cambiano l'azione della forza legata alla differenza di pressione sulla sezione (fissa) del galleggiante.

Progettando opportunamente la condotta si riesce a garantire che lo strumento sia in grado di lavorare in condizioni di linearità. Ciò conferisce ai rotametri un campo di misura accurato, considerevolmente migliore rispetto ai diaframmi.

# Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

Per fluidi incompressibili, un modello semplificato del sistema permette di ricavare la portata come:

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

Dove:  $C_d$  rappresenta il **coefficiente di efflusso**,  $A_t$  e  $A_g$  le **aree**, rispettivamente, di condotta e galleggiante,  $V_g$  il **volume del galleggiante**, e  $w_g$  e  $w_f$  i **pesi specifici di galleggiante e fluido**, rispettivamente.

Se la variazione del coefficiente di efflusso con la posizione del galleggiante può essere considerata piccola e  $[(A_t - A_g)/A_g] \ll 1$ , allora il calcolo della portata può essere linearizzato come:

$$Q = K(A_t - A_g)$$

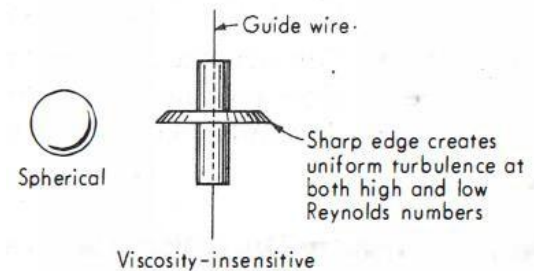
Se invece il tubo è progettato in modo che  $A_t$  vari linearmente con la posizione del galleggiante:

$$Q = K_1 + K_2x$$

# Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

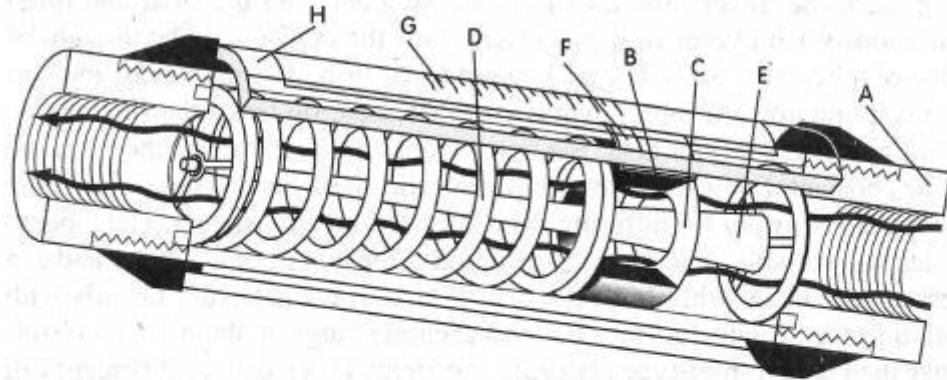
Se **sferico**, il galleggiante può essere semplicemente inserito nel tubo di misura. Ad ogni modo, il galleggiante può assumere anche altre forme che possono **richiedere l'inserimento di una guida**.

I tubi di misura sono in genere **realizzati in vetro ad alta resistenza** per permettere l'osservazione diretta della posizione del galleggiante.



# Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

In determinate condizioni possono essere invece impiegati tubi in metallo e la posizione del galleggiante è rilevata magneticamente e trasdotta elettricamente tramite un trasduttore di spostamento.



## OPERATING THEORY

Enclosed within a high pressure casing (A), a high strength magnet (B) in tandem with the sharp-edged annular orifice disk (C), is pressed towards the zero flow rate position by a linear rate compression spring (D). A tapered metering pin (E) is positioned concentrically within the annular orifice disk and provides a variable-area opening that increases by the square of linear displacement of the orifice disk. Fluid flow

creates a pressure differential across the orifice disk, pressing the magnet/orifice disk duo against the compression spring. Flow rate is read by aligning the magnetically coupled follower (F) with the graduated scale (G) located within the environmentally sealed window (H). The variable-area orifice design provides pressure differentials and orifice displacements that are linearly proportional to fluid flow rate.

# Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

Impiego:

- Rilievo di **piccole e medie portate** nelle industrie chimica, petrolchimica, farmaceutica, alimentare, trattamento delle acque.
- Richiedono un'**installazione verticale**, con il flusso che si muove dal **basso verso l'alto**
- Richiedono una **taratura** rispetto a **temperatura e pressione di esercizio**
- Si applicano a fluidi monofasici
- Economici



## Caratteristiche tecniche (Krohne)

Precisione: 1 – 2% FS

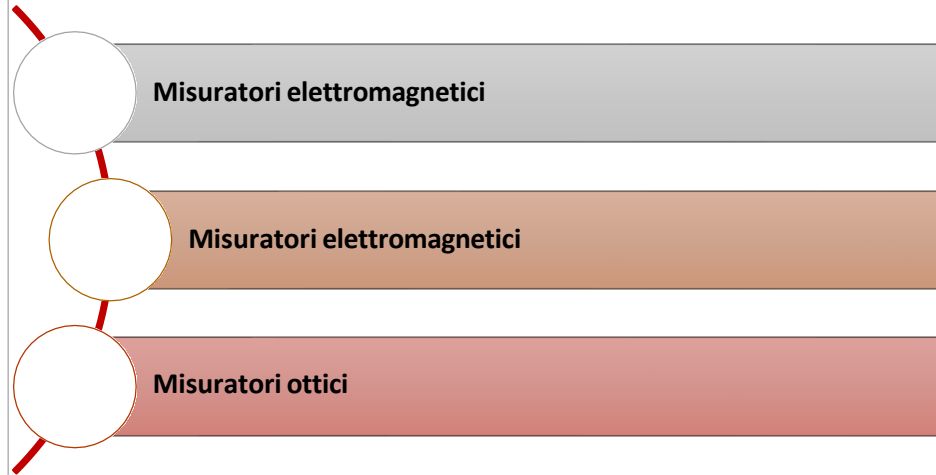
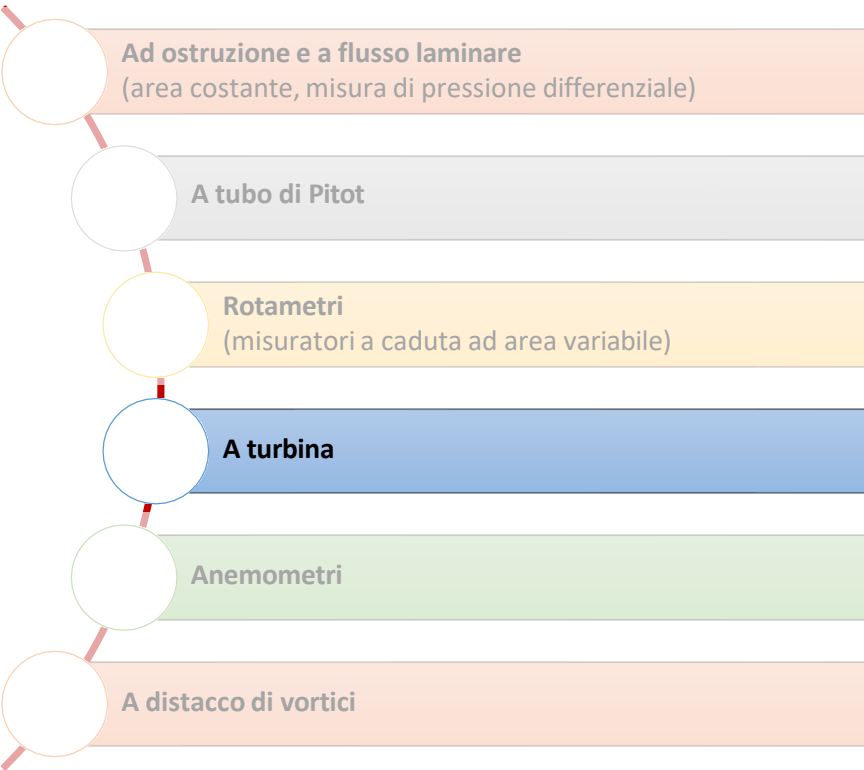
Portata: acqua: 0.4 – 10000 l/h

aria: 0.007 – 180 m<sup>3</sup>/h

Temperatura di processo: -40 – 100°C



# Misuratori di portata volumetrica (interazione diretta con il fluido)



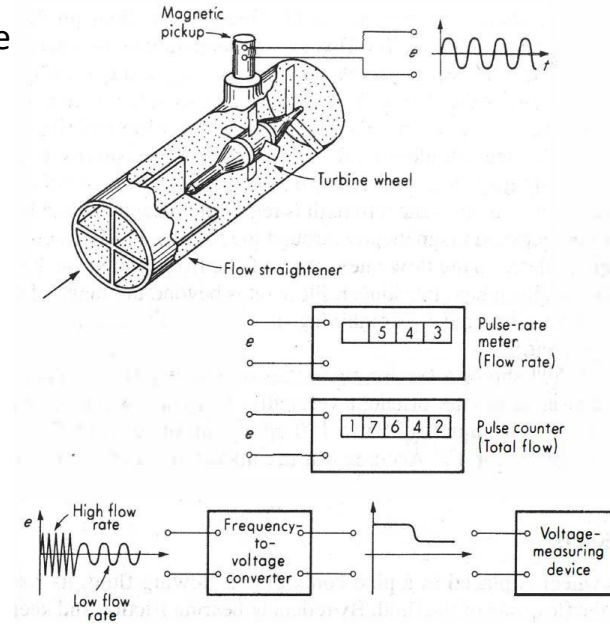
# Misuratori a turbina

## Struttura:

- Una turbina è inserita nella condotta di misura.
- Il flusso attraversa lo strumento senza perturbazioni significative (rotore progettato per non generare coppie indesiderate).

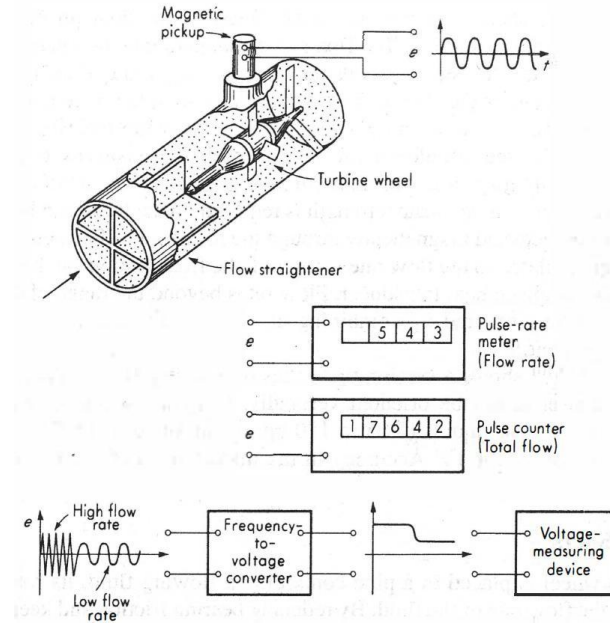
## Come funziona:

- Il fluido incide sulle pale della turbina, generando la rotazione del rotore.
- La velocità angolare del rotore ( $\omega$ ) è proporzionale alla velocità del fluido ( $v$ ).



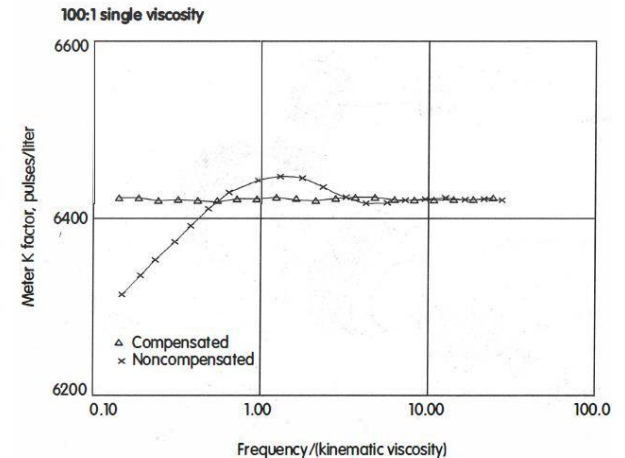
# Misuratori a turbina

- Pertanto, accoppiando la **turbina con un contatore**, è possibile misurarne il **numero di giri** alla quale la turbina ruota (solitamente tramite un convertitore frequenza/tensione) e, di conseguenza, ricavare **per via indiretta velocità e portata del fluido**.
- Tale tipo di dispositivo è caratterizzato da una funzione di trasferimento lineare a condizione di ridurre al minimo l'attrito dei cuscinetti e le altre perdite in generale.



# Misuratori a turbina

- Il principale fenomeno che porta ad una riduzione della linearità in questo strumento di misura è **dato dalla viscosità del fluido**. Tale misuratore richiede pertanto venga effettuato un **processo di taratura**.
- Il processo di taratura permette di introdurre un **circuito di compensazione** degli effetti legati alle variazioni di viscosità e temperatura, permettendo così di estendere l'intervallo di linearità del fattore K, che rappresenta la quantità di volume che attraversa il misuratore per ogni impulso.



# Misuratori ad elica (o ventola)

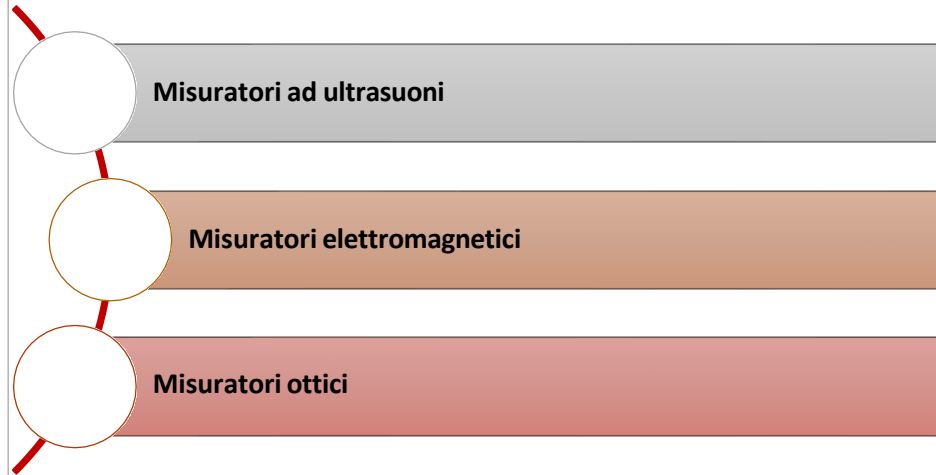
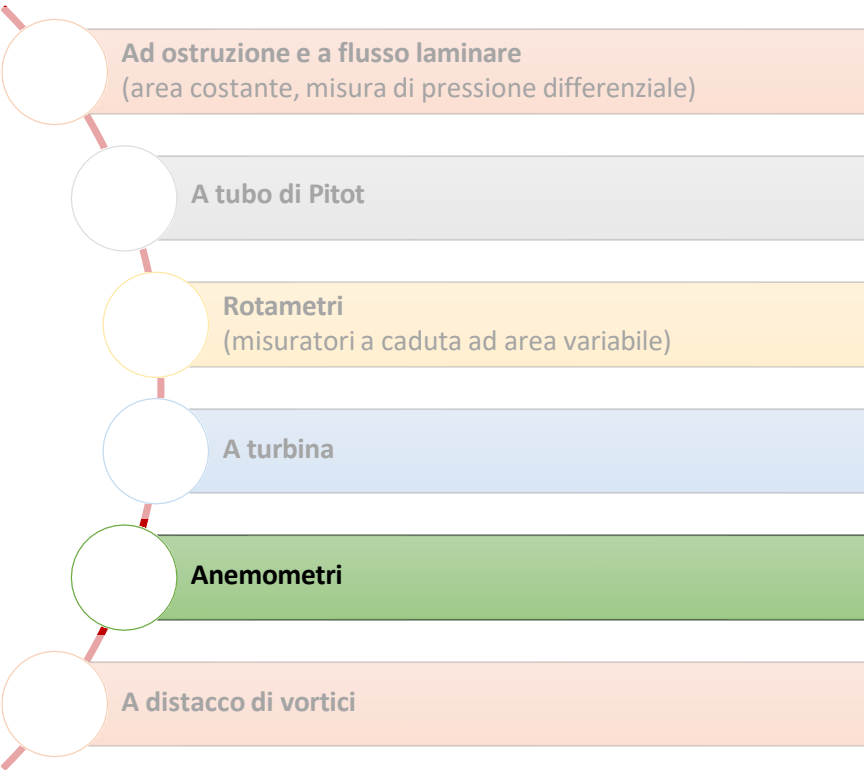
Per la **misura di fluidi allo stato gassoso**, sono misuratori di velocità puntuali, costituiti da un'elica sostenuta da un perno e collegato ad un anello di protezione, sul quale si innesta il manico.

Orientando lo strumento in modo che l'asse di rotazione dell'elica sia parallelo alla direzione del moto del fluido, attraverso un contascatti (analogico o digitale) si quantifica alla quale scorre il fluido.

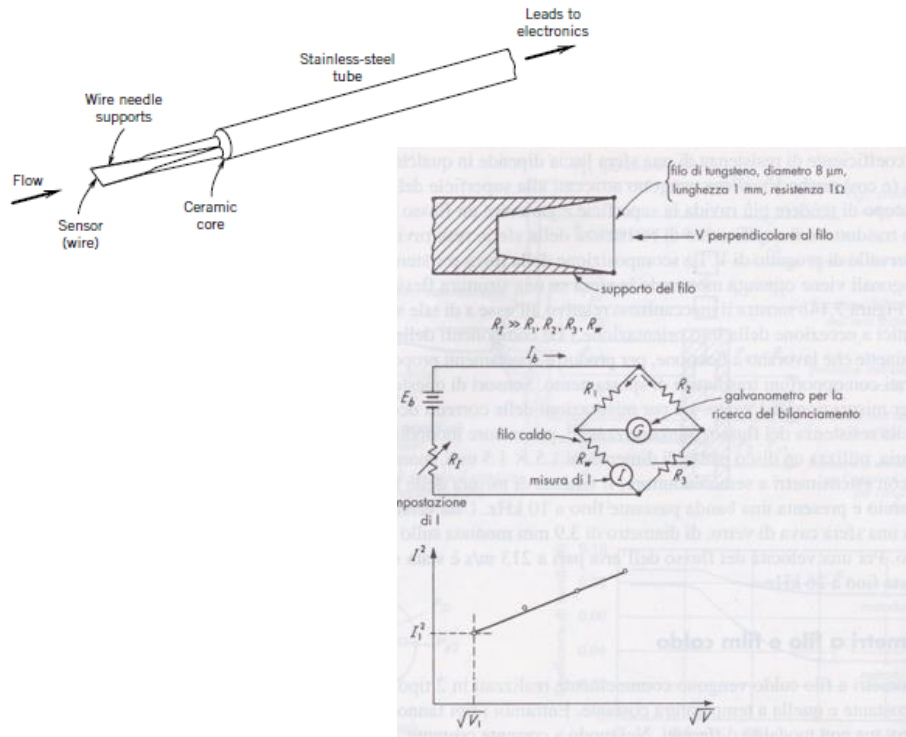
Questo dispositivi non trova grandi applicazioni industriali ma viene solitamente impiegato per il **monitoraggio degli impianti di riscaldamento e condizionamento**, sia all'interno che all'esterno delle bocchette di emissione.



# Misuratori di portata volumetrica (interazione diretta con il fluido)



# Anemometri a filo caldo



## Modello a corrente costante

Il filo viene percorso da una corrente costante; in condizioni di equilibrio il calore prodotto al suo interno per effetto Joule viene bilanciato dalle perdite di calore dovute ai fenomeni convettivi alla sua superficie:

$$i^2 R = hA(T_{wire} - T_{flow})$$

$h$  – coefficiente di scambio termico del sensore

$A$  – area di scambio termico

Poiché il coefficiente convettivo del sensore è funzione della velocità della vena, la temperatura di equilibrio può anche essere usata per una misura indiretta della velocità del flusso.

La misura di temperatura viene quindi ricavata da una misura della resistenza elettrica del filo

## Modello a temperatura costante

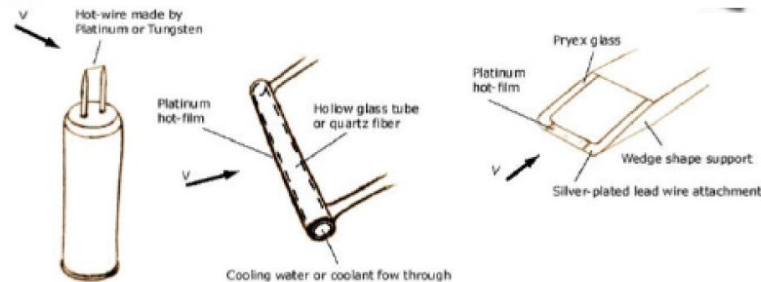
La temperatura è misurata a seguito di un bilanciamento della corrente che serve a mantenere costante la temperatura del sensore.

# Anemometri a filo caldo

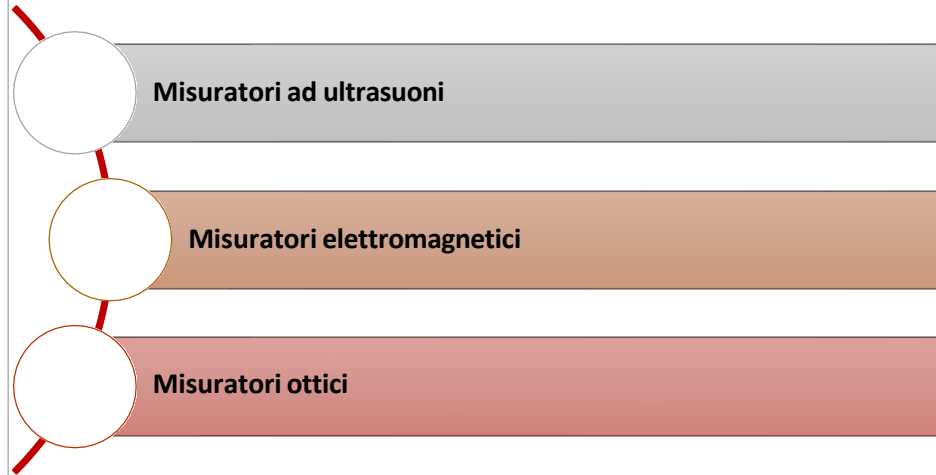
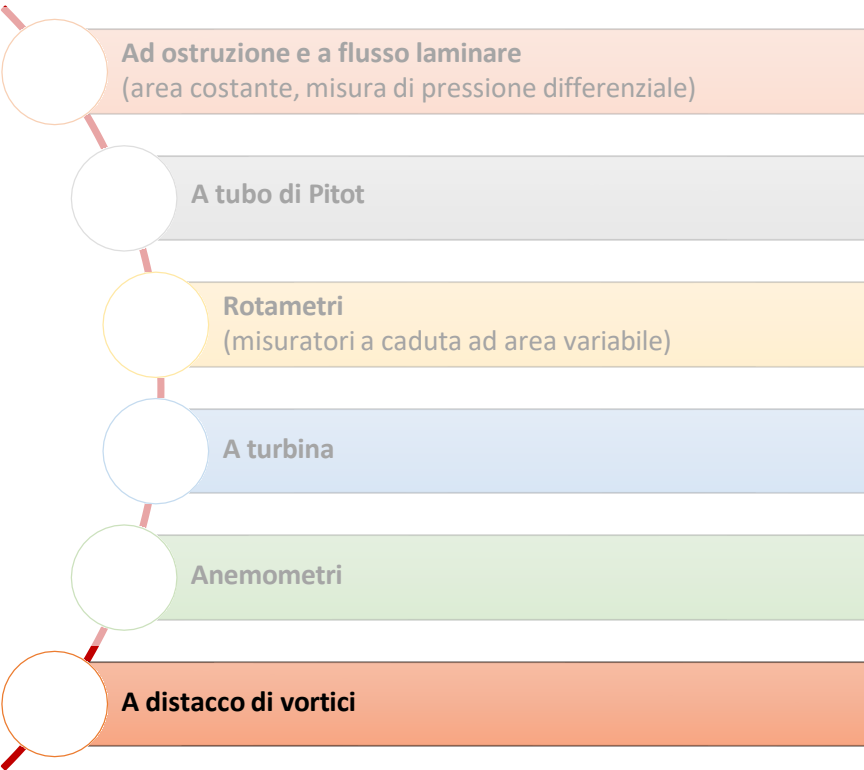
Gli anemometri a filo caldo sono usati sia per la **ricerca in fluidodinamica**, sia per misure e controlli di flussi d'aria nel campo del **condizionamento dell'aria**, della **qualità dell'aria**, e dell'**igiene industriale**.

I sistemi di misura per la ricerca in fluidodinamica utilizzano 1, 2 o 3 sensori molto sottili in grado di seguire anche flussi ad elevata turbolenza nel campo tridimensionale.

Nel campo della misura industriale si predilige invece un sensore più robusto che misura la velocità media.



# Misuratori di portata volumetrica (interazione diretta con il fluido)



# 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.

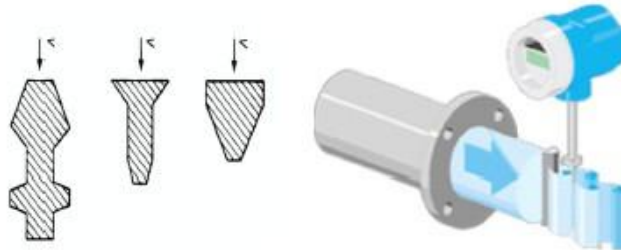
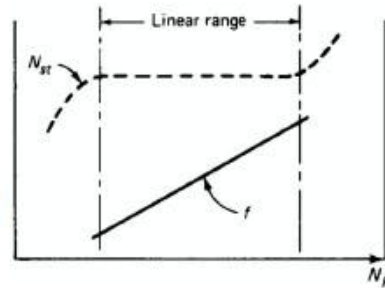
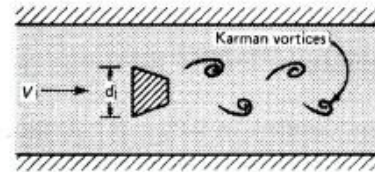
Se Reynolds  $> 10000$  si ha formazione di vortici con frequenza di distacco:

$$f = \frac{(N_{st}V)}{d}$$

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.

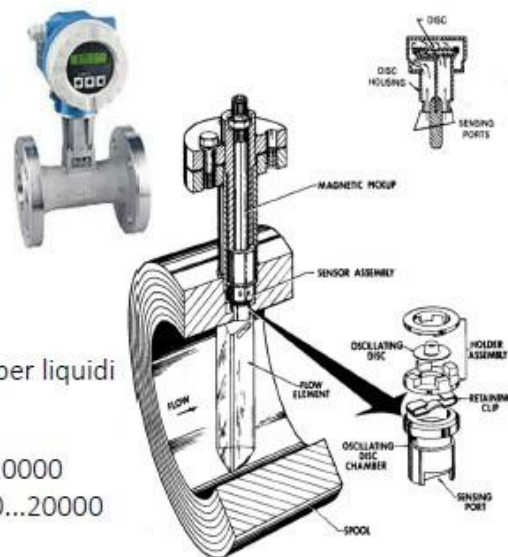
Quello in figura avverte la differenza di pressione per mezzo di un diaframma elastico

## Applicazioni e vantaggi

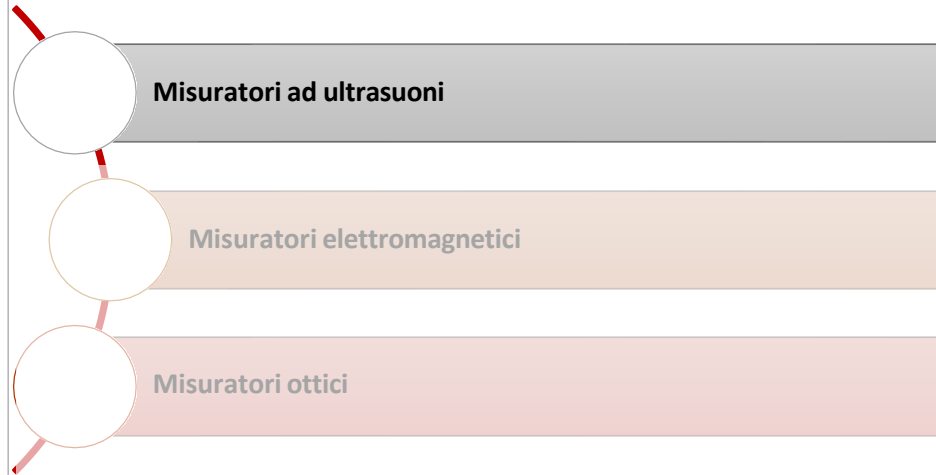
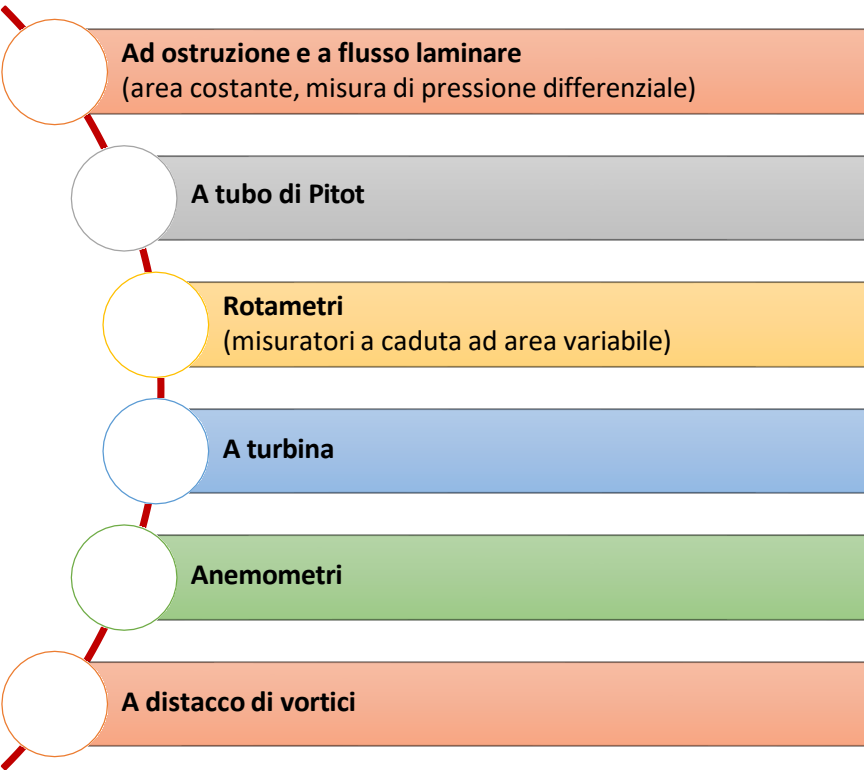
Misure volumetriche di vapore, gas e liquidi  
Non hanno bisogno di ricalibrazione  
Minime perdite di pressione  
Campo d'impiego 15:1 per gas e vapore, 40:1 per liquidi

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

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



# Misuratori di portata volumetrica (interazione diretta con il fluido)



# Misuratori ad 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.

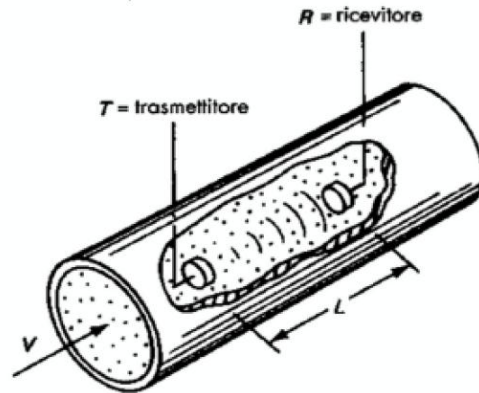
Vengono utilizzati brevi treni di onde sinusoidali (circa 10 MHz).

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.

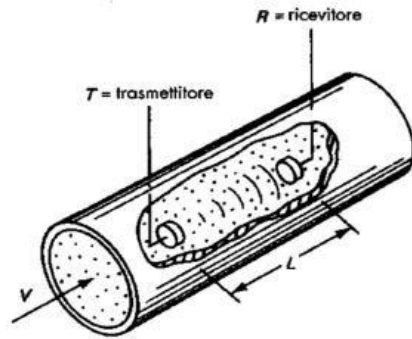
Il moto di vibrazione produce un segnale elettrico ad esso proporzionale.



A tempo di  
transito

Ad effetto  
Doppler

# Misuratori ad ultrasuoni a 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

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  $\Delta t$  è piccolo.

ad esempio in  $H_2O$ : se  $V = 3.05 \text{ m/s}$ ,  $L = 305 \text{ mm}$  e  $c \approx 1520 \text{ m/s}$  →  $\Delta t = 0.4 \mu\text{s}$

$t_1$ : tempo nella direz. del flusso

$t_2$ : tempo nella direz. opposta

$\Delta t$  è doppio rispetto a prima

Rimane la dipendenza da  $c^2$

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

# Misuratori ad ultrasuoni ad effetto Doppler

L'effetto Doppler consiste nella percezione apparente di una variazione di frequenza, rispetto alla frequenza originale emessa da una sorgente che si trovi in movimento rispetto all'osservatore stesso

Un emettitore manda un treno di onde alla frequenza  $f_1$  (circa 1 – 5 MHz) con angolo  $\alpha$  ( $\lambda=c/f_1$ ).

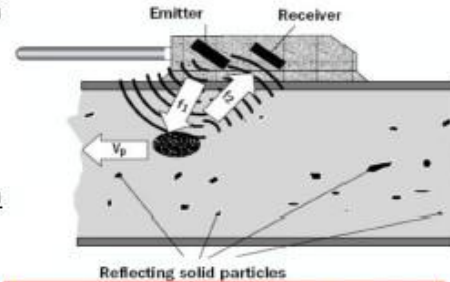
Le onde colpiscono le particelle che si muovono a velocità  $v_p$ .

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:

$$\lambda_p = \frac{(c - 2v_p \cos(\alpha))}{f_1} \quad f_2 = \frac{(f_1 \cdot c)}{(c - 2v_p \cos(\alpha))}$$

Misurando la differenza di frequenza abbiamo una misura della velocità del flusso.



$$f_1 - f_2 = \Delta f = \frac{(2v_p f_1 \cos \alpha)}{c}$$

Si misura la velocità delle particelle, non del liquido

Non invasivo, non ci sono parti in movimento

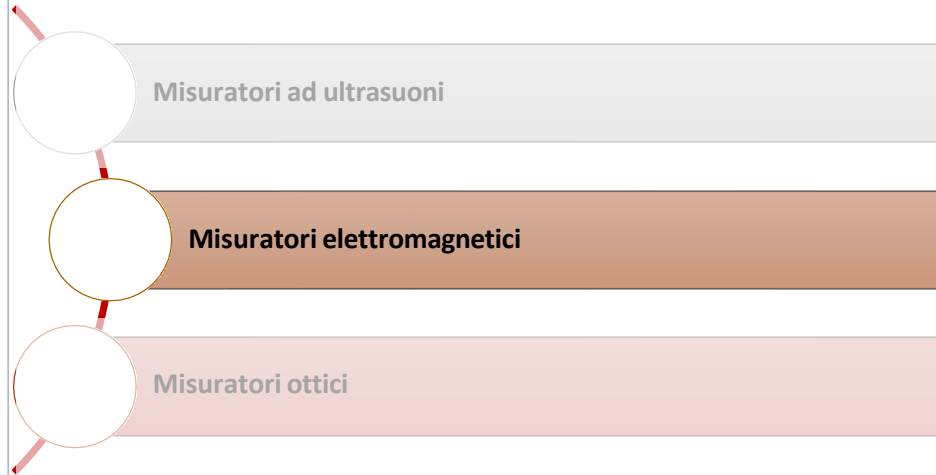
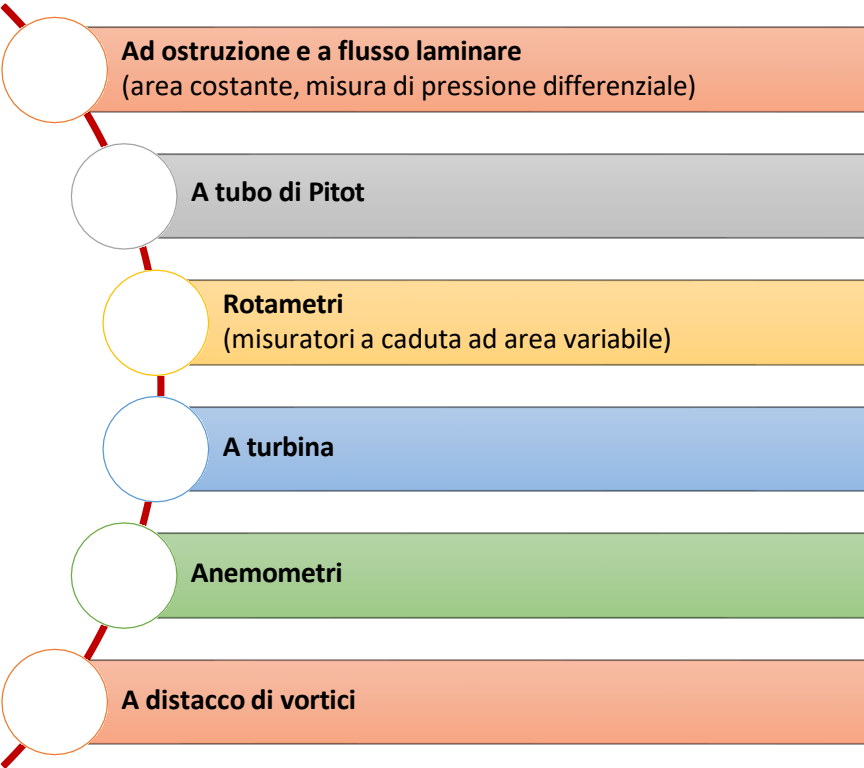
Ci deve essere un numero sufficiente di particelle riflettenti nel flusso

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 (20 D)

# Misuratori di portata volumetrica (interazione diretta con il fluido)

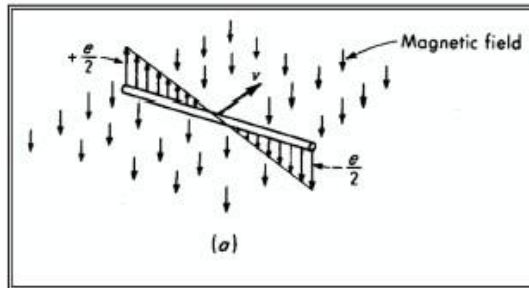


# Misuratori elettromagnetici

## 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  $B$  si genera una forza elettromotrice agente sulle particelle cariche del conduttore. Si induce così un gradiente di potenziale attraverso il conduttore.



Gradiente di potenziale attraverso il conduttore

$$e = B l v$$

$B$ : 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  $i$

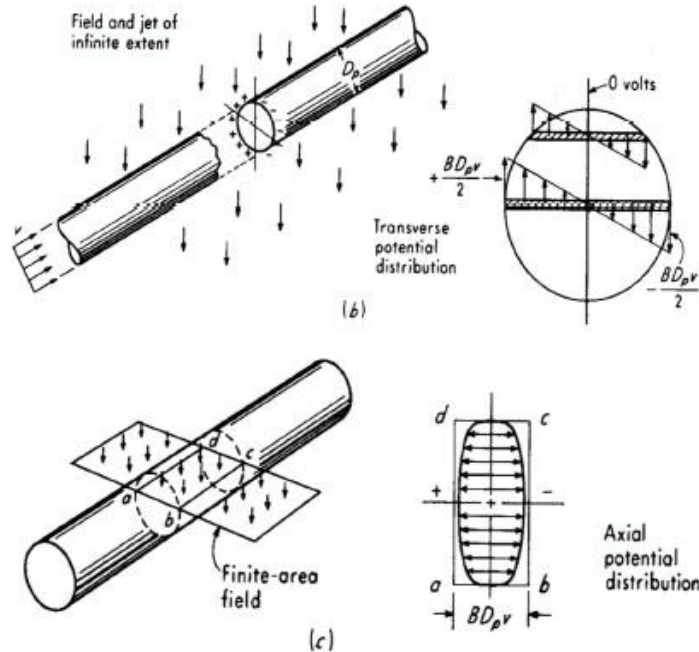
Il flusso di corrente attraverso il conduttore mobile, di resistenza  $R$ , genera una caduta di potenziale  $iR$

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 fluido che attraversa il campo magnetico è conduttore, una forza elettromotrice verrà indotta sul cilindro metallico, la quale produrrà una differenza di potenziale massima (pari a  $BD_p v$ ) ai lati diametralmente opposti del cilindro. Questo effetto è limitato all'area interessata e coperta dal campo magnetico.

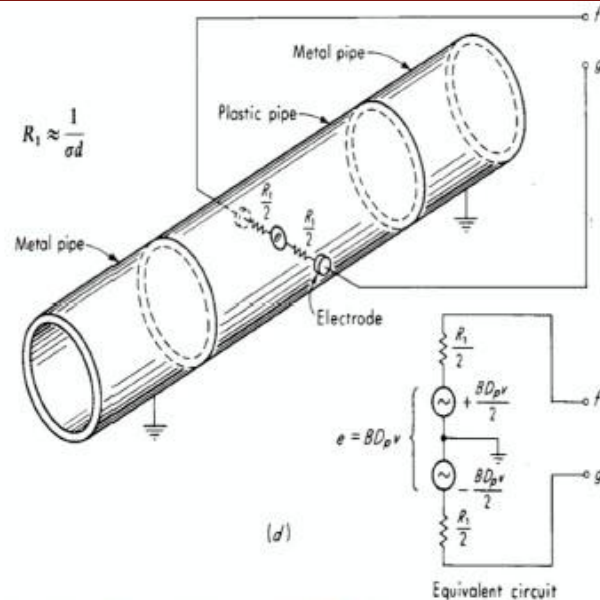


# Misuratori elettromagnetici

Condotta non magnetica in materiale non conduttore.

Due elettrodi posti nei punti a massima differenza di potenziale.

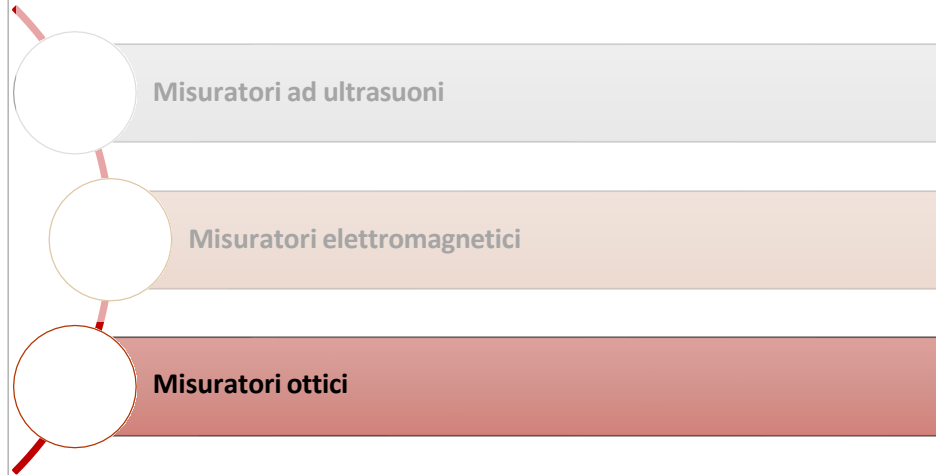
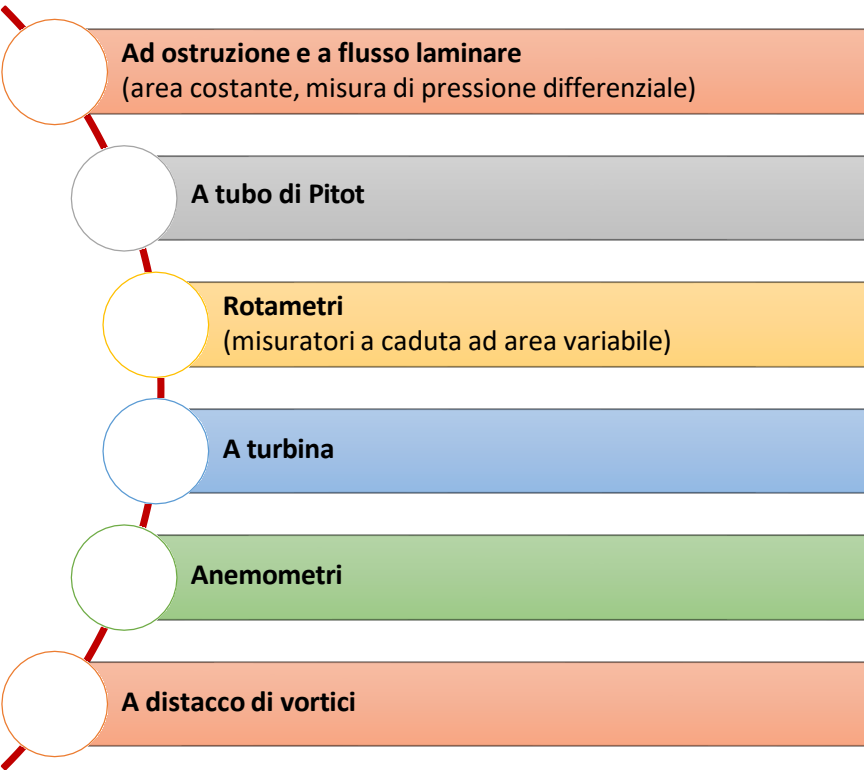
Essendo il fluido conduttore ci sarà un percorso di conduzione tra i due elettrodi che forniscono un segnale in tensione.



Il segnale in tensione risulta proporzionale alla velocità del fluido

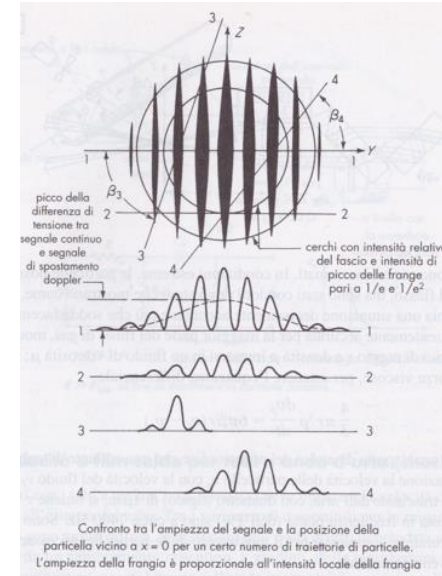
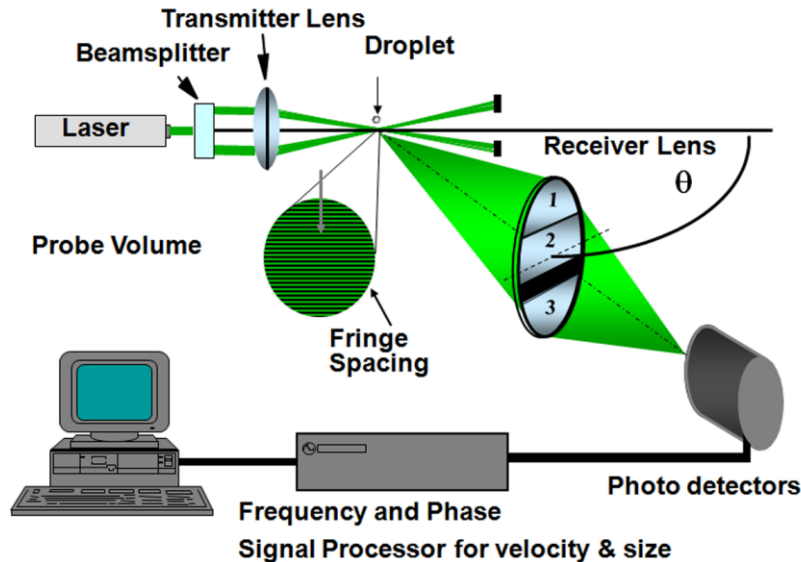
È stato dimostrato che  $e$  corrisponde alla velocità media di qualsiasi profilo simmetrico rispetto al centro del tubo.

# Misuratori di portata volumetrica (interazione diretta con il fluido)

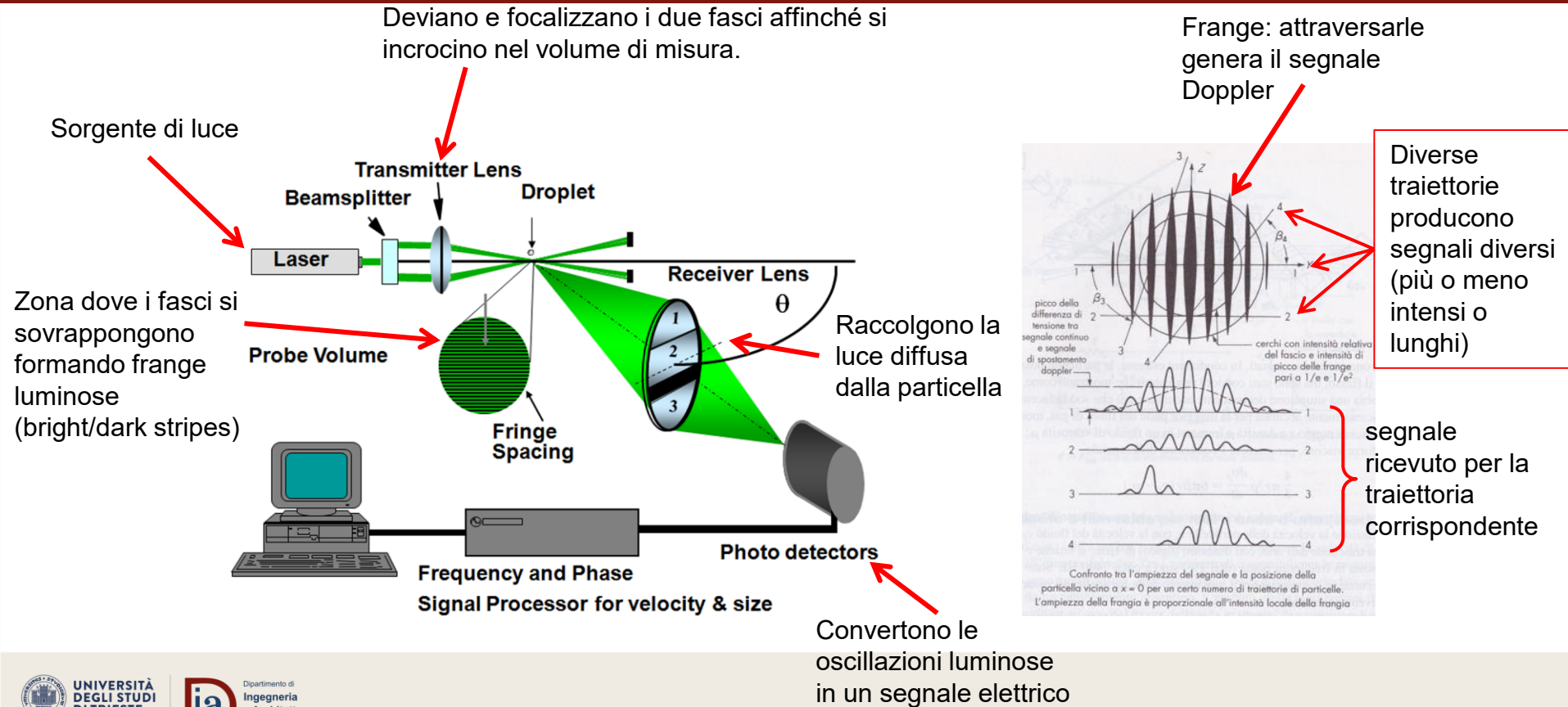


# Misuratori di portata laser – Anemometro laser - doppler

- Due **raggi laser** coerenti si intersecano **all'interno del flusso** → si creano **frange di interferenza**.
- Una **particella** (gocciolina, polvere, ecc.) **attraversa le frange** → diffonde la luce con una frequenza Doppler **proporzionale alla sua velocità**.
- Il rilevatore raccoglie la luce diffusa → l'elettronica la **converte in velocità**.



# Misuratori di portata laser – Anemometro laser - doppler



# Misuratori di portata laser – Anemometro laser - doppler

I principali **svantaggi** di questo sistema di misurazione sono:

- l'elevato costo
- il fatto che per effettuare la misura è necessario che fluido e condotto siano perfettamente trasparenti.

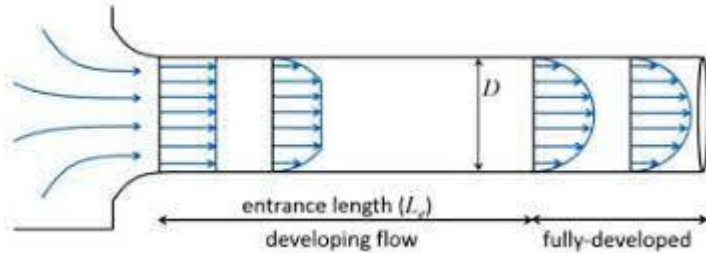
Nonostante ciò è uno strumento di **altissima precisione** nella misura della velocità, poiché riesce ad analizzare un'**area ristrettissima** (praticamente puntiforme) del condotto dal momento che la misura viene effettuata nel punto d'intersezione dei raggi laser.



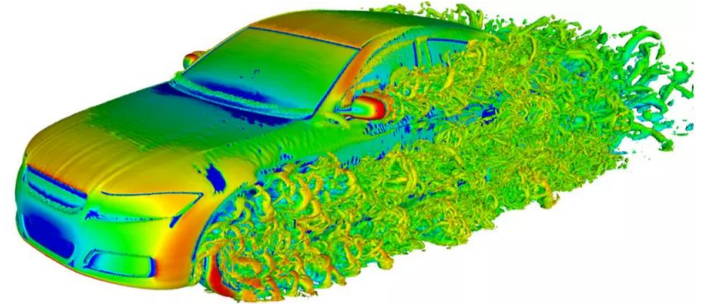
# Misuratori di portata laser – Anemometro laser - doppler

Principali applicazioni:

**Misure di profilo di velocità in condotti e getti**



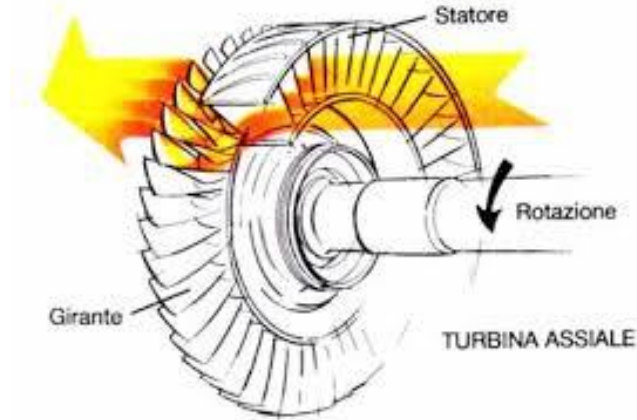
**Turbolenza: misure di fluttuazioni ad alta frequenza e aerodinamica sperimentale (punti critici, strati limite)**



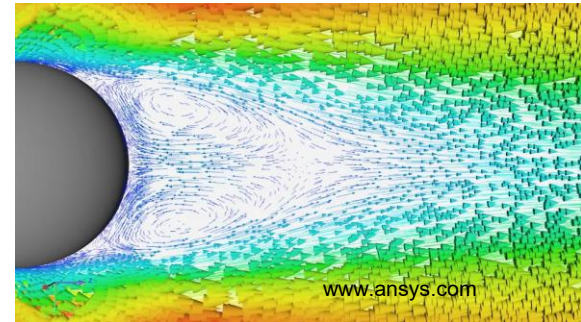
# Misuratori di portata laser – Anemometro laser - doppler

Principali applicazioni:

**Flussi in turbomacchine (compressori, turbine)**



**Validazione di modelli CFD (a scala locale)**



# Misuratori di portata laser – Particle Image Velocimetry

## PIV (Particle Image Velocimetry):

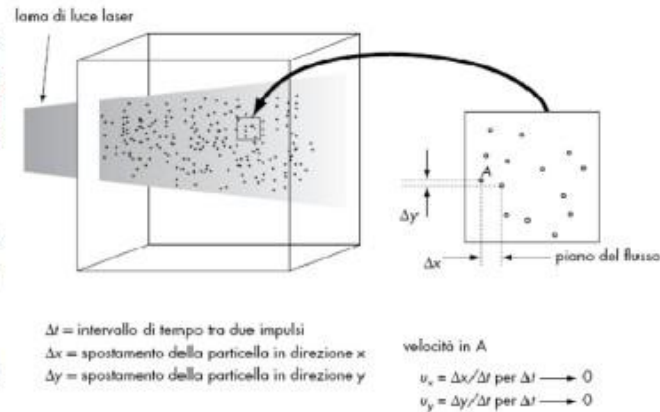
è una tecnica di misura di tipo quantitativo, più **s sofisticata** dell'anemometro laser-doppler, basata sulla **cross-correlazione di immagini digitali**.

Il **flusso viene inseminato** con delle **particelle traccianti** (seeding) con densità più prossima possibile a quella del fluido da studiare (spesso si usano vapori di olio), in modo da seguirne quanto più possibile il moto.

Si illumina la sezione da esaminare con **due impulsi consecutivi e ravvicinati di luce laser**, convertiti tramite un apparato ottico in **lame di luce**.

Le **particelle rifrangono la luce**, che viene catturata da una **telecamera**, con l'aiuto di un **sincronizzatore**.

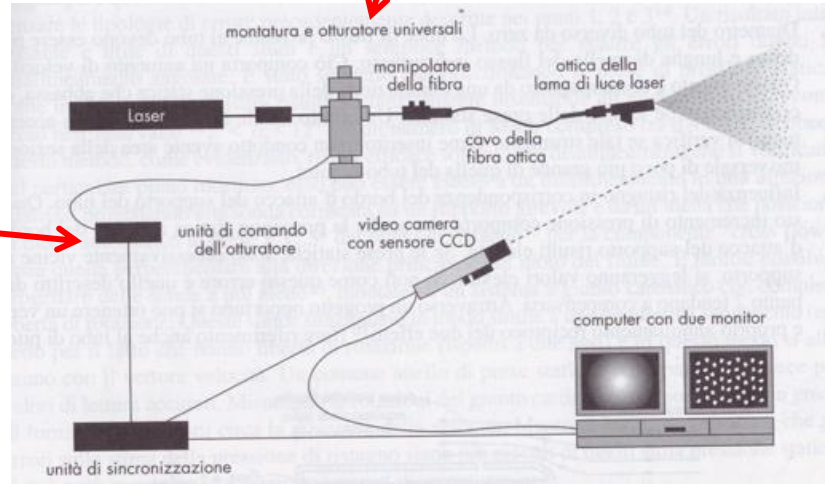
Si ottengono così **due immagini della posizione**.



# Misuratori di portata laser – Particle Image Velocimetry

Controlla l'emissione di luce (apertura/chiusura) o interrompe il fascio ottico

Modula la durata e la ripetizione degli impulsi luminosi  
(es. due lampi separati di  $\Delta t$  per una coppia di immagini PIV)



Cuore del timing del sistema. Invia segnali elettrici sincronizzati a: sorgente laser, otturatore e video camera

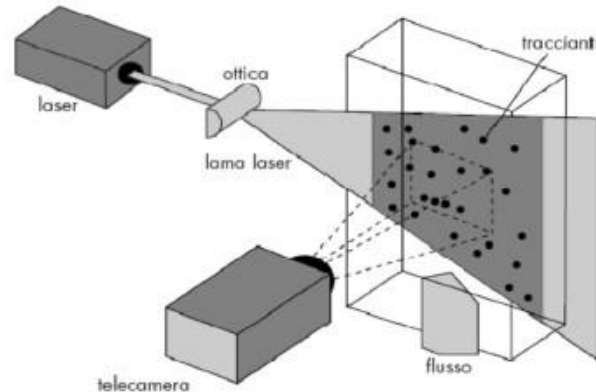
# Misuratori di portata laser – Particle Image Velocimetry

## Vantaggi:

- sistema molto preciso;

## Svantaggi:

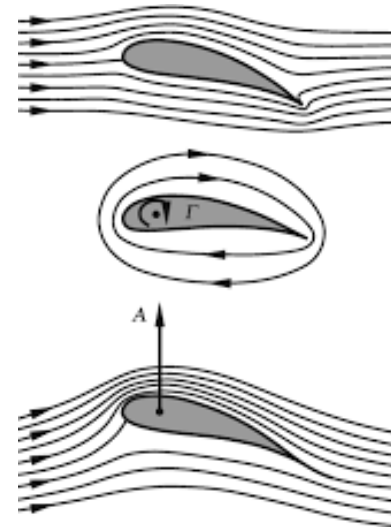
- molto costoso;
- la tubazione deve avere un accesso ottico trasparente;
- difficoltà riguardanti la concentrazione di particelle; poche particelle descrizione del campo di moto non esauriente mentre se le particelle sono troppe sarà difficile identificarle nelle immagini;
- non si possono misurare le componenti di velocità ortogonali al piano laser (campo di velocità solo bidimensionale);



# Misuratori di portata laser – Particle Image Velocimetry

Principali applicazioni:

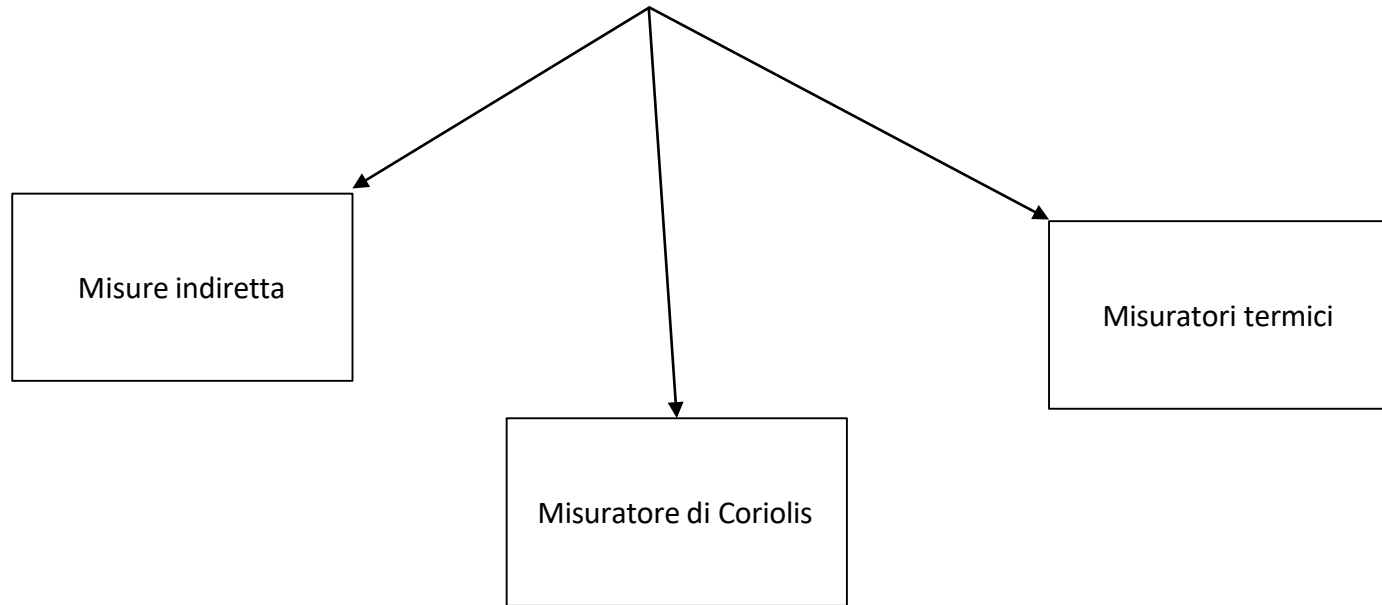
- **Aerodinamica (ala, profili, scie di veicoli)**
- **Studio di transizioni (laminare  $\rightarrow$  turbolento)**
- **Verifica e validazione CFD su tutto il dominio**
- **Flussi bifase (con adeguato seeding)**



# Misura di portata massica

# Misuratori di portata massici

In certe applicazioni è più importante misurare la portata massica rispetto a quella volumetrica. La portata massica può essere ricavata da quella volumetrica, nota la densità dell'oggetto di misura, oppure la portata massica può essere misurata per via diretta.



# Misuratore massico di 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

$$\vec{F}_C = -2m(\vec{\omega} \times \vec{v})$$

$F_C$  è la forza di Coriolis,  $m$  è la massa del corpo che si muove con velocità  $v$  rispetto al sistema di riferimento non inerziale rotante,  $\times$  rappresenta il prodotto vettoriale e  $\omega$  è la velocità angolare del sistema non inerziale, misurata rispetto a un sistema inerziale.

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  $\omega$  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). (Video Emerson)



# Misuratore massico di Coriolis



Figura 2.32 – Deformazioni indotte nella tubazione di misura

# Misuratore massico di Coriolis

I sensori di movimento installati nel tubo di Coriolis sono sensibili all'angolo di torsione  $\theta$ .

Un elemento infinitesimo di massa del fluido ( $dM$ ) avente densità  $\rho$ , induce una forza d'inerzia pari a:

$$dM(2\vec{\omega} \times \vec{v})$$

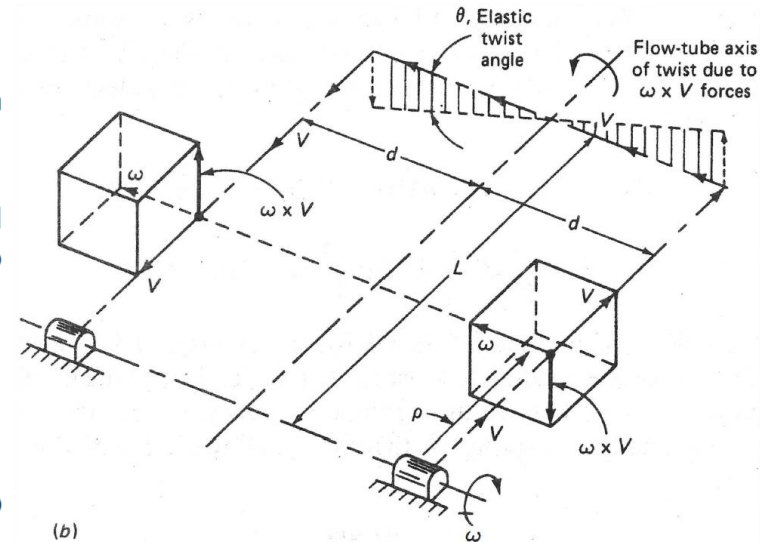
La forma a C del tubo fa sì che la velocità del fluido cambi segno tra ingresso ed uscita. Pertanto, una coppia di masse (una entrante e l'altra uscente) generano una coppia torsionale d'inerzia  $dT$

$$dT = 2(2\vec{\omega} \times \vec{v})dM * d$$

Da cui

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

Dove  $G$  è la portata massica. Pertanto la coppia  $T$  oscilla alla velocità angolare  $\omega$  che porta a torcere il tubo a C.



# Misure di portata massica – Misuratore massico di Coriolis

In queste condizioni il sistema agisce come una molla di rigidezza  $K_S$ , il cui angolo di torsione  $\theta$  è direttamente proporzionale alla portata massica:

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

Sensori di spostamento installati ai lati del tubo rilevano il passaggio dell'oscillazione dello stesso. Il ritardo di attivazione tra i due sensori (dovuto all'oscillazione del tubo) risulta quindi proporzionale all'angolo di torsione:

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

Pertanto, dal tempo di sfasamento si può risalire al valore di portata massica:

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

# Misuratore massico di Coriolis

## Tipologie costruttive

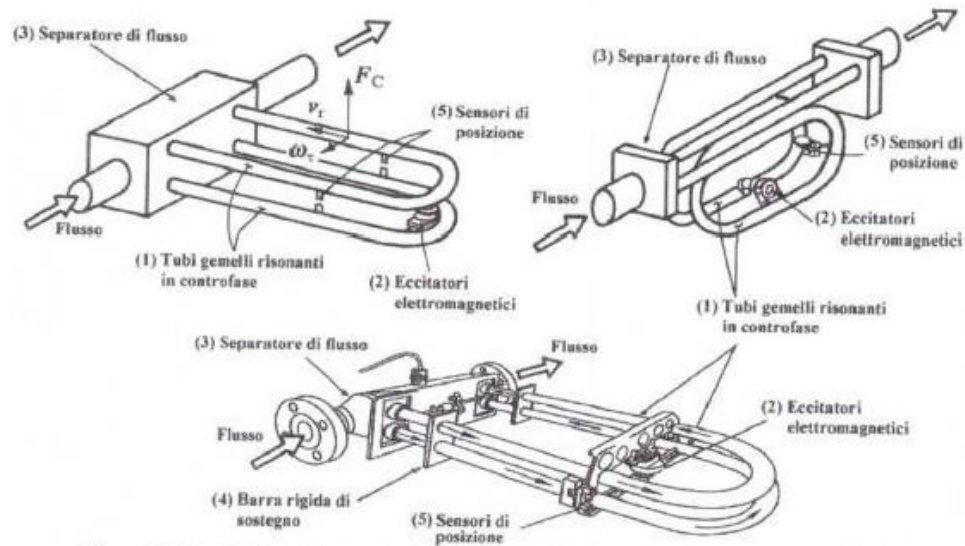
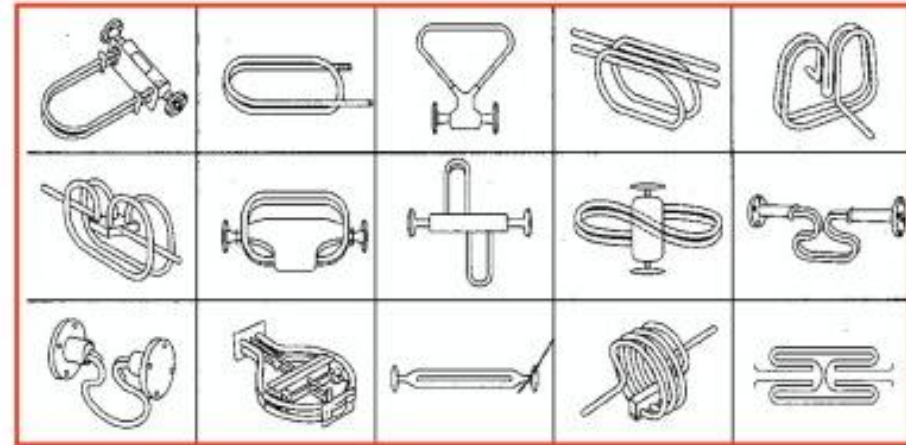


Figura 2.33 – Differenti tecnologie costruttive dei misuratori ad effetto Coriolis



# Misuratore massico di Coriolis

## Caratteristiche tecniche (Endress+Hauser Yokogawa)

Range di portata: fino a 2200 t/h

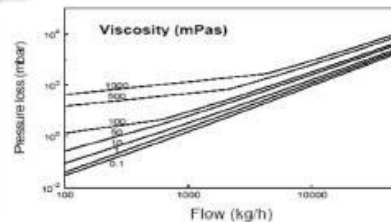
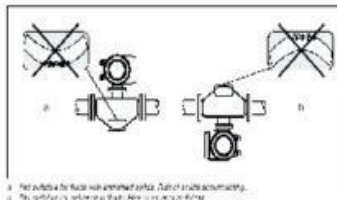
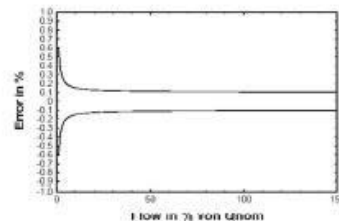
Range di temperatura: -40 a 150°C (possibilità di elettronica separata -200°C a 150°C).

Uscita: 4 – 20 mA

Alimentazione: 220 VAC

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

Gas:  $\pm 0.5\%$  o.r.



# Misuratore massico termico

## Principio di funzionamento (corrente costante)

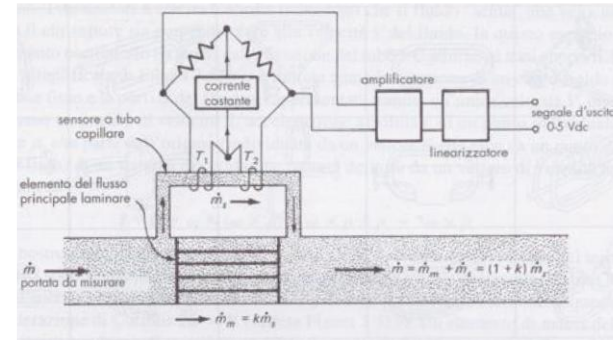
Il principio di funzionamento si basa sui principi della trasmissione di calore.

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 risultato viene poi moltiplicato per un fattore di proporzionalità (fisso e noto).

Sia la condotta di scorrimento che quella di misura sono progettate in modo da garantire un flusso laminare in modo da garantire la scalabilità del risultato di misura tramite il fattore di proporzionalità, considerato che la caduta di pressione è proporzionale per tutti gli elementi costitutivi del flusso laminare.



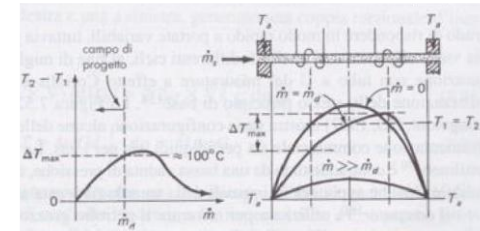
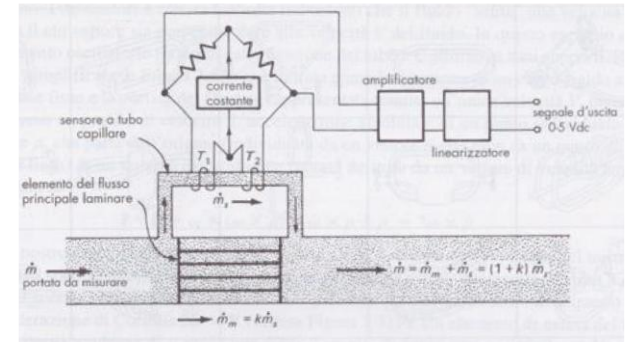
# Misuratore massico termico

Il tubo capillare ha diametro di 0.787 mm e lunghezza tra 50 e 100 volte il diametro (portata = 20 cm<sup>3</sup>/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.

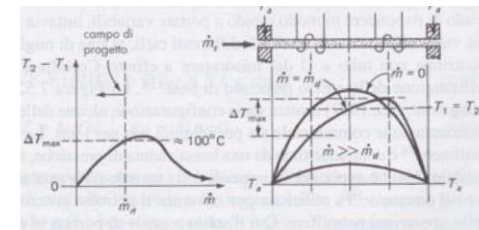
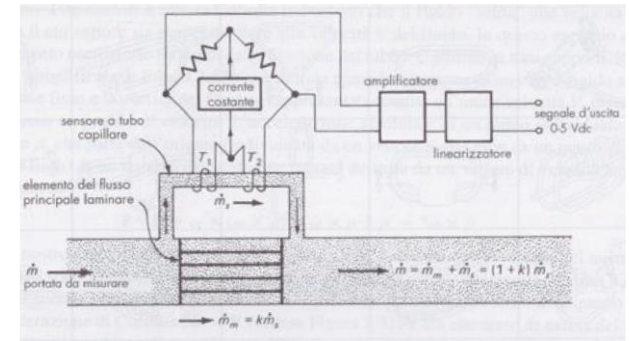


# Misuratore massico termico

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  $T_a$  ( $T_1 - T_2 = 0$ ).

- Facciamo fluire una portata  $\dot{m}$
- Il flusso, inizialmente a temperatura  $T_a$ , riceve calore dal tubetto, si scalda e lasciando la prima zona si porta via energia secondo:  $m\dot{c}_p T_1$
- $T_1$  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 – un esempio commerciale

## Caratteristiche tecniche (temperatura costante)

[https://www.youtube.com/watch?v=-VUL0xWUeY&feature=emb\\_rel\\_end](https://www.youtube.com/watch?v=-VUL0xWUeY&feature=emb_rel_end)

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**



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



# Misuratore massico termico – un esempio commerciale

## Caratteristiche tecniche (Endress+Hauser)

Errore:  $\pm 2\% R \pm 0.5\% FS$

Range di temperatura:  $-10 \dots +100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Rangeability: 100 : 1

Uscita: 4 – 20 mA

Aliment.: 20 – 30 VDC

Consumo:  $< 3\text{ W}$



## Caratteristiche tecniche (Honeywell)

Errore:  $\pm 1\%$  o.f.s.

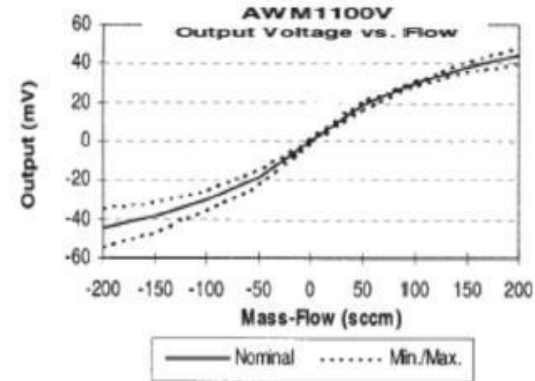
Range di portata:  $-600 \dots +1000\text{ sccm}$

Range di temperatura:  $-25^{\circ}\text{C} \dots +85^{\circ}\text{C}$

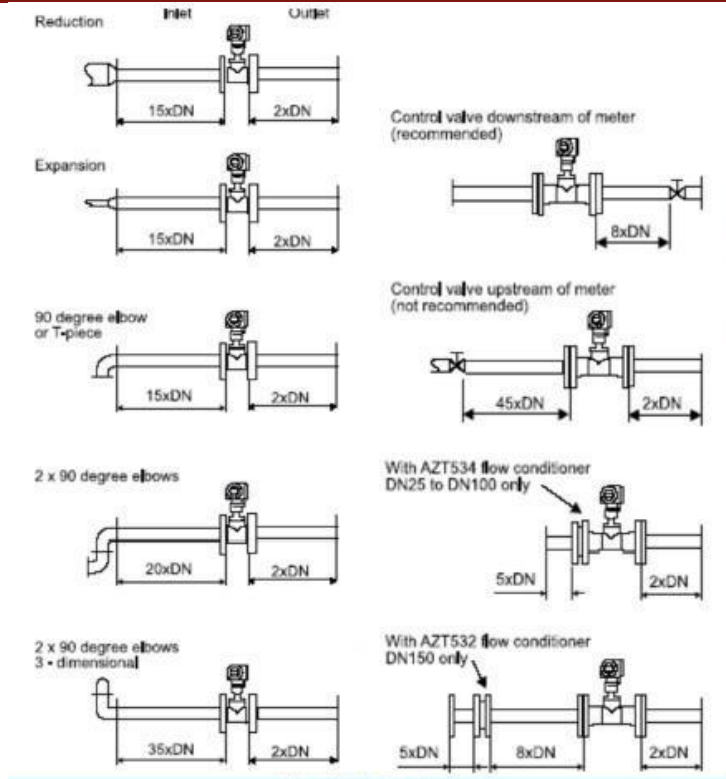
Uscita: mV

Alimentazione: 8-15 VDC

Consumo: 30 mW



# 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

