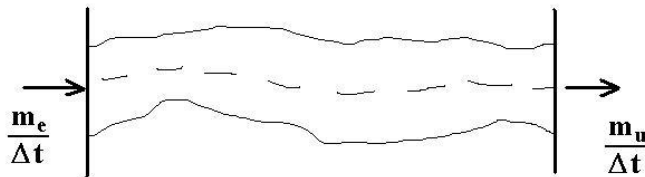




LEZIONE # 17

Le **misure di portata** sono basate sul *principio di conservazione della massa* del fluido in movimento. In un tubo di flusso generico, in assenza di **sorgenti** o di **perdite**, per ogni intervallo di tempo Δt , si può scrivere:



$$\text{massa entrante} = \text{massa uscente}$$

$$m_e = m_u$$

$$\left(\frac{\rho V}{\Delta t} \right)_e = \left(\frac{\rho V}{\Delta t} \right)_u$$

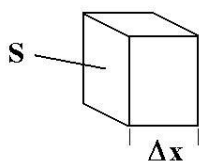
E' possibile dare diverse definizioni della portata, a seconda che nella definizione venga inclusa o meno la *densità* ρ e l'*accelerazione di gravità* g :

Portata in massa: $Q_m = \frac{\rho V}{\Delta t}$

Portata in peso: $Q_p = \frac{\rho g V}{\Delta t}$

Portata in volume: $Q_v = \frac{V}{\Delta t}$

Si osservi che se si prende in considerazione una superficie nominale S come nello schema sotto, il fluido che attraversa la superficie S nel tempo Δt percorre mediamente uno spazio Δx :



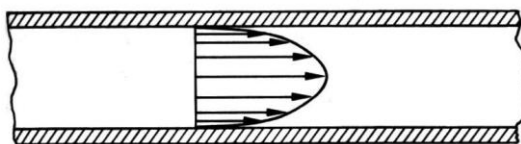
$$\text{Volume} = S \cdot \Delta x \quad \rightarrow \quad \frac{S \cdot \Delta x}{\Delta t} = S \cdot v = Q_v$$

con $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$

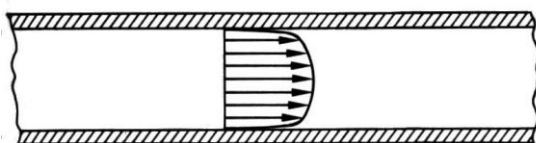
velocità dell'elemento fluido.

La misura della portata Q nei laboratori viene eseguita mediante la misura diretta delle grandezze che compaiono nelle definizioni. In ambito industriale, ovvero nelle condotte, la misura della

portata Q viene fatta con riferimento alla portata volumetrica $Q_v = S \cdot v$. La sezione S della tubazione è in genere una grandezza nota. Il problema è che non altrettanto nota risulta la velocità v del fluido dentro la tubazione.



(a)



(b)

Il *profilo delle velocità* del fluido dentro la tubazione assume forma parabolica, come in figura 17.1 (a) se il flusso rimane in regime laminare e forma anche più complessa, come in figura 17.1 (b) se il flusso "scade" nel regime turbolento.

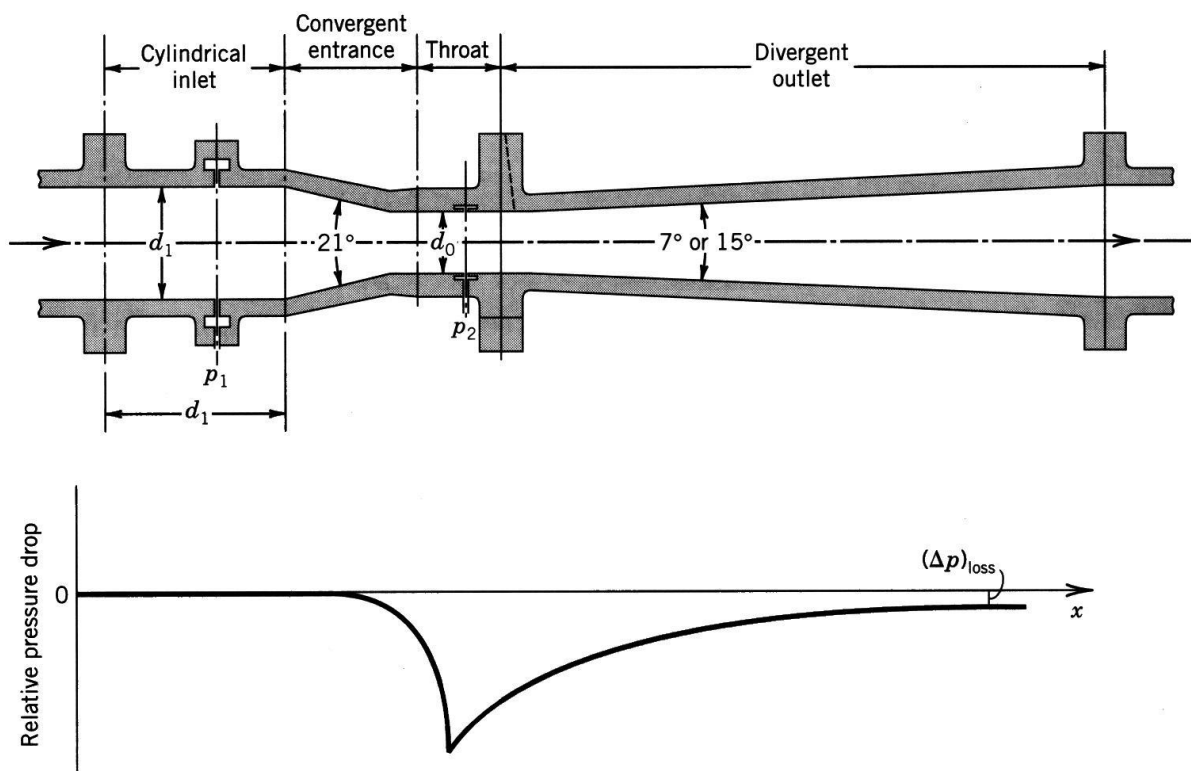
Figura 17.1



Nel caso di *fluidi incompressibili* ($\rho = \text{cost}$), occorre "misurare" in qualche modo il profilo delle velocità e ricavare la velocità media \bar{v} in modo da poter scrivere: $Q_v = S \cdot \bar{v} = \pi r^2 \cdot \bar{v}$.

Se la tubazione ha un diametro ampio e il fluido si muove nel tubo con velocità sufficientemente elevata, è possibile pensare di introdurre nella tubazione un tubo di Pitot e di rilevare le velocità del fluido a diverse distanze dal raggio. Per interpolazione si calcola quindi la velocità media \bar{v} .

Quando il diametro della tubazione è insufficiente e, soprattutto, quando le velocità del fluido all'interno del tubo sono basse ($\bar{v} < 3 \div 4 \text{ m/s}$), si impiegano i **metodi deprimogeni** che mirano a determinare la velocità \bar{v} nel condotto per mezzo di una *depressione* Δp prodotta artificialmente nella vena fluida.



Herschel venturi meter with the associated flow pressure drop along its axis.

Figura 17.2

Nel *venturimetro*, rappresentato in figura 17.2, la portata Q_v è costante in *ogni* sezione, ovvero $Q_v = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$. Per i fluidi incompressibili, essendo la sezione $S_2 < S_1$ si ottiene quindi la velocità $v_2 > v_1$. Nella *sezione contratta* la velocità è più alta. Si applichi ora il **teorema di Bernoulli** di conservazione dell'energia tra le sezioni S_1 e S_2 :

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

si definisce *coefficiente di strozzamento*: $Z = \frac{S_2}{S_1} < 1$ ed essendo: $v_1 = \frac{S_2}{S_1} v_2$ $v_1 = Z \cdot v_2$



Il coefficiente Z è un fattore geometrico. In genere, è fornito dal costruttore oppure è facilmente calcolabile.

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 (1 - Z^2)$$

$$v_2^2 = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - Z^2)} \quad \rightarrow \quad v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - Z^2)}}$$

la velocità v_2 nella “sezione contratta” è ottenuta attraverso la misura della depressione Δp provocata dalla strozzatura. A questo punto, per la portata in volume si ottiene facilmente:

$$Q_v = S_2 \cdot v_2 = S_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - Z^2)}}$$

e per la portata in peso altrettanto facilmente si ricava:

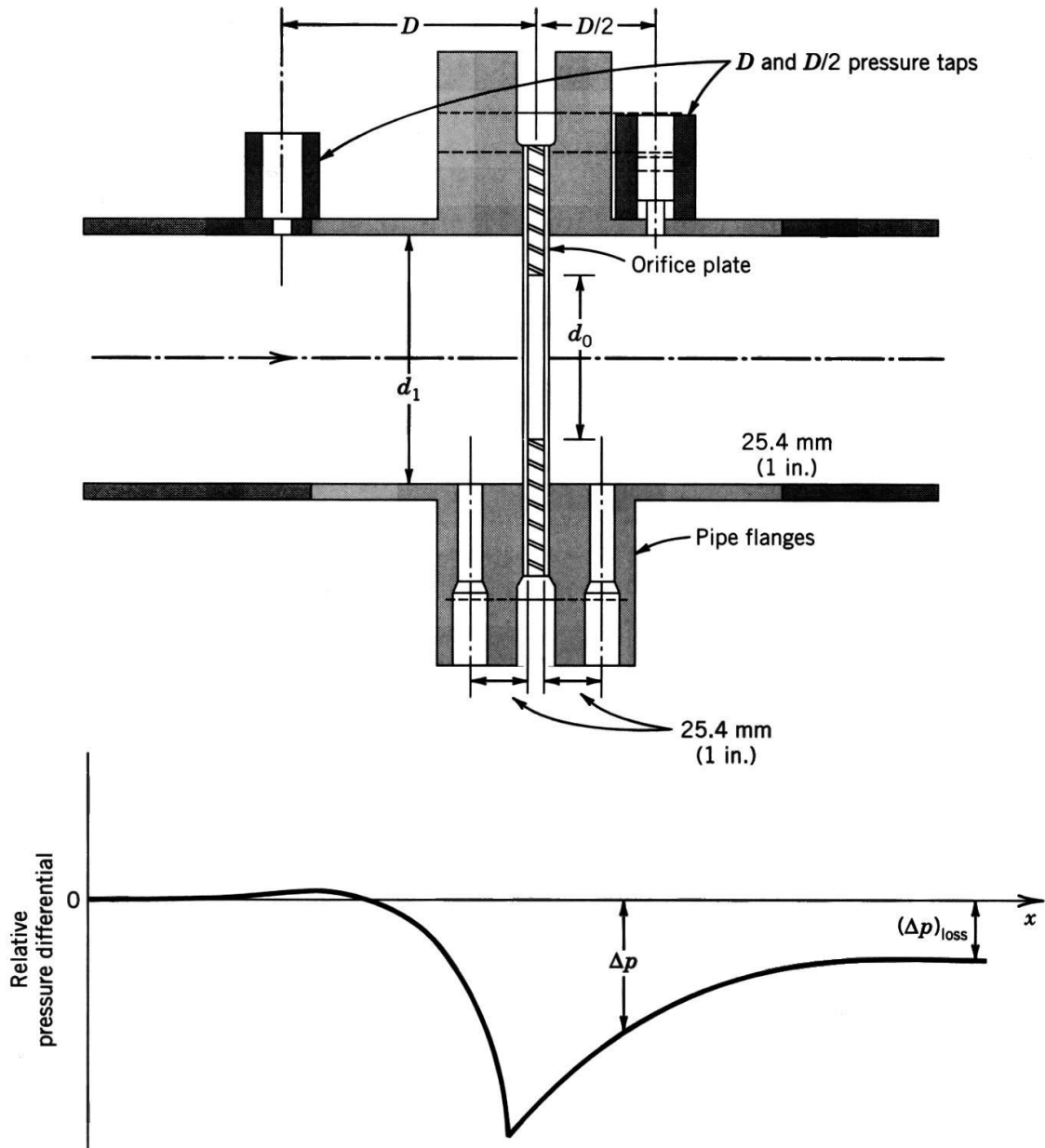
$$Q_p = \rho g S_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - Z^2)}} = g S_2 \sqrt{\frac{2\rho(p_1 - p_2)}{1 - Z^2}}$$

con i termini ρ , G , S_2 , v_2 che sono noti e il Δp che viene misurato da un manometro collegato alle prese p_1 e p_2 segnate in figura 17.2. Nella pratica sono sempre presenti delle *perdite* tra le sezioni di misura S_1 ed S_2 che sono portate in conto mediante un **coefficiente di efflusso** $C = \frac{Q_{reale}}{Q_{ideale}} < 1$.

Inoltre, lo stesso coefficiente di efflusso non è costante, ma dipende dal *numero di Reynolds* del fluido. Il coefficiente $C = C(Re)$ è tabellato ed è fornito dai costruttori di venturimetri. Valori di $C > 0.9$ non sono infrequenti. Il punto debole principale del venturimetro è la lunghezza, dovuta alla presenza del tratto divergente, dove viene recuperata la pressione (quasi tutta). Per non indurre distacchi di vena e provocare turbolenze nel flusso, la conicità del tratto divergente è limitata a pochi gradi ($7^\circ \div 15^\circ$) e questa circostanza allunga di molto la dimensione assiale dello strumento. Si tenga presente che il venturimetro deve essere inserito al posto di un tratto di tubazione. Si osservi anche che, alla fine del tratto divergente non tutto il carico (pressione) viene recuperato, rimane un Δp negativo che rappresenta la *perdita di carico* complessiva dovuta alla presenza dello strumento sulla linea. Se questa perdita di carico non viene compensata con l'erogazione di un “supplemento di pressione” da parte della pompa che spinge il fluido, la portata misurata risulta minore di quella che si avrebbe avuto in assenza del venturimetro. La perdita di carico viene ad essere direttamente proporzionale all'*errore d'inserzione* dello strumento.

Se non si ha a disposizione lo spazio per inserire sulla tubazione un venturimetro, si può tentare la misura della portata mediante uno **strumento a diaframma**, riportato sotto nella figura 17.3.

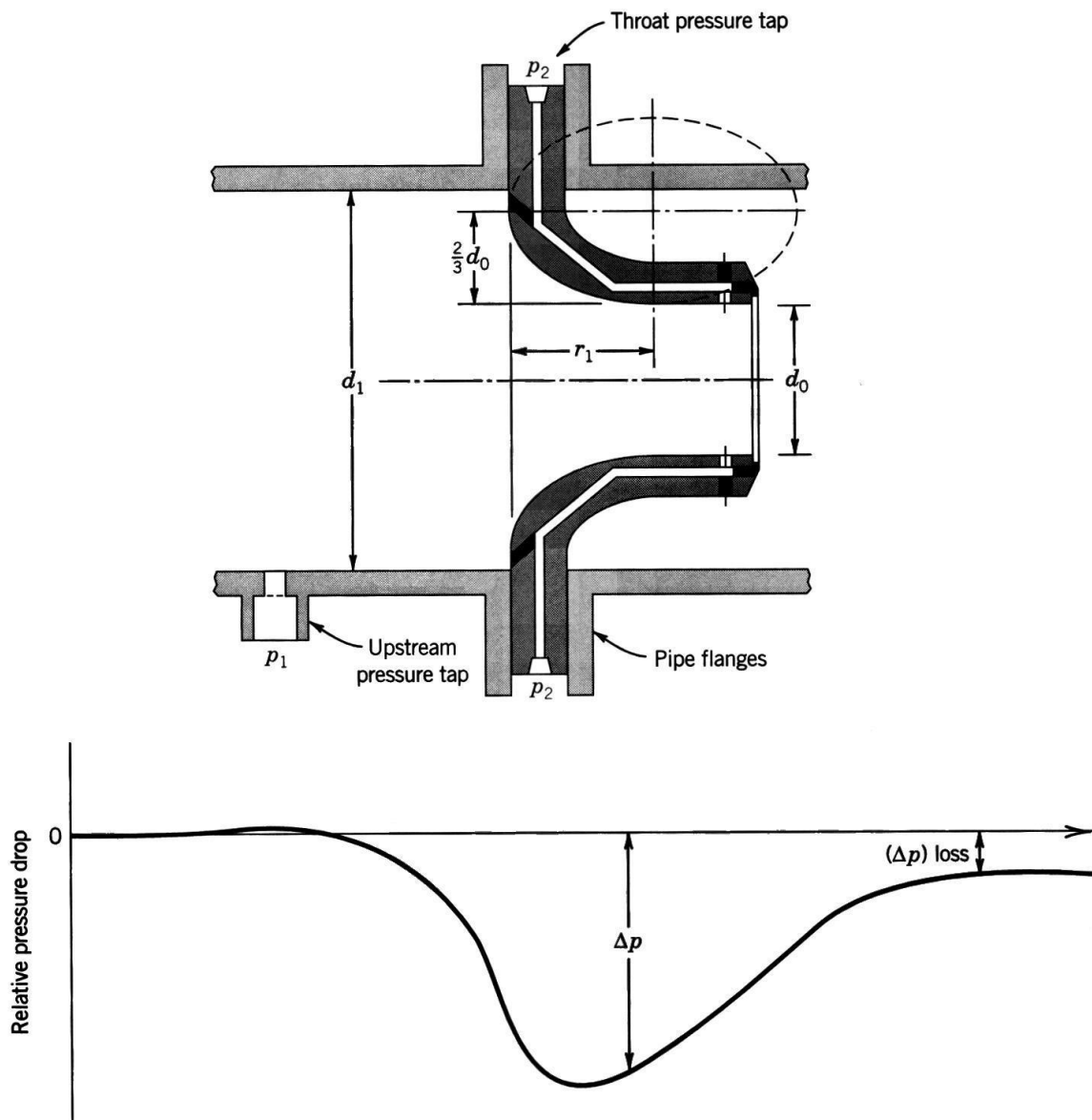
La *curva di graduazione* è la medesima del venturimetro, ma il coefficiente di efflusso C tiene conto delle notevoli perdite di carico finali, che possono raggiungere anche il 40%. La posizione della sezione di *vena contratta* è delicata e può essere alterata da disturbi nel flusso. Per tutti questi motivi, il coefficiente di efflusso qui è funzione di più parametri: $C = C(Re, Z, \text{posizione prese di } p)$. I misuratori a diaframma sono costruiti seguendo una rigida normalizzazione, e sono venduti con le tabelle dei coefficienti di efflusso allegate.



Square-edged orifice meter installed in a pipeline with optional one pipe and one-half pipe diameters, and flange pressure taps shown. Relative flow pressure drop along the pipe axis is shown.

Figura 17.3

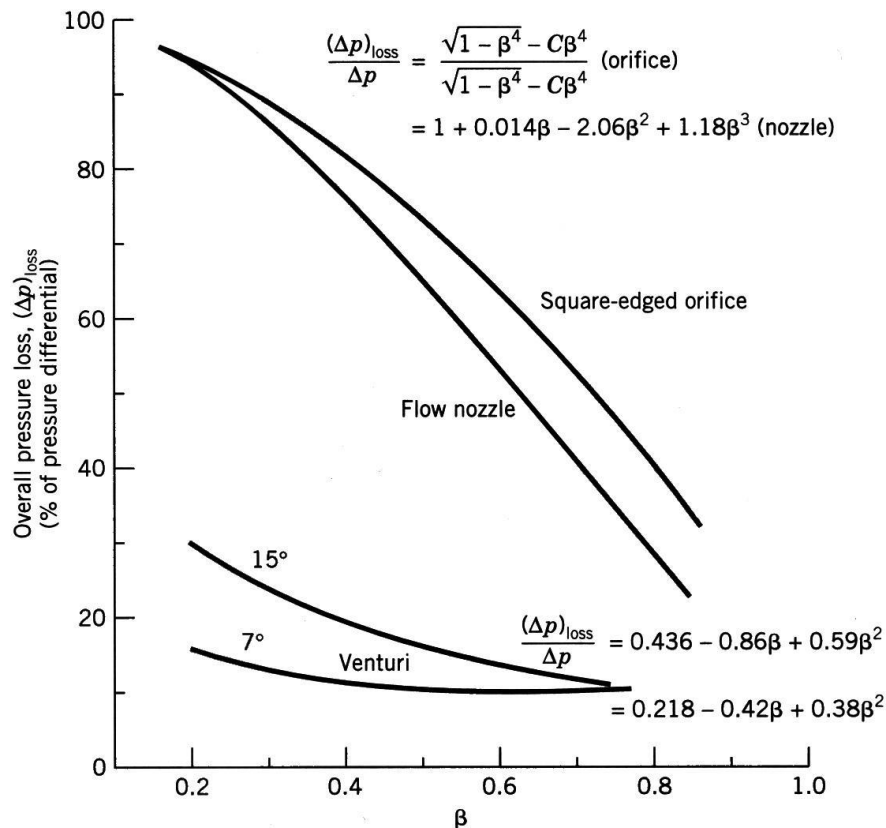
Se si dispone di poco spazio ma è anche necessario limitare le perdite di carico finali, occorre fare una scelta di compromesso e si può installare un misuratore di portata a **boccaglio**, che rappresenta una via di mezzo tra il venturimetro e il diaframma. Le perdite di carico finali sono dell'ordine del 15÷20% . La curva di graduazione è sempre la stessa del venturimetro perché il fenomeno fisico alla base non cambia. Una sezione di misuratore a boccaglio è riportata di sotto nella figura 17.4.



ASME long-radius nozzle with the associated flow pressure drop along its axis.

Figura 17.4

Un grafico che mostra le perdite di carico a confronto per i tre metodi deprimogeni della misura di portata è riportato nella figura 17.5 seguente, dove $\beta = \frac{d_2}{d_1} < 1$ è il rapporto tra i diametri delle due sezioni, ed è direttamente proporzionale al coefficiente di strozzamento Z .



The permanent pressure loss associated with flow through common obstruction meters. (Courtesy of the American Society of Mechanical Engineers, New York)

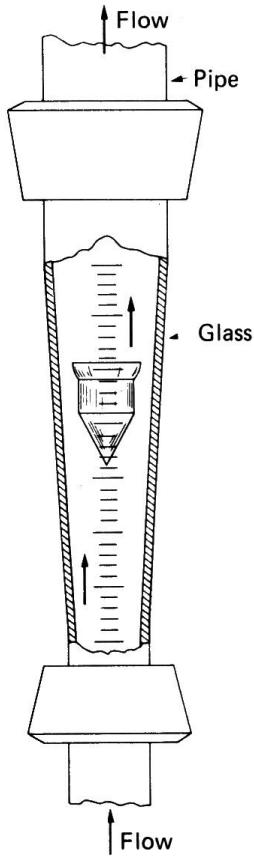
Figura 17.5

I metodi deprimogeni qui esposti non esauriscono di certo tutte le possibilità per la misura della portata. Esistono metodi *a turbina*, metodi *elettromagnetici* e metodi *ultrasonori ad effetto doppler* che consentono di avere in uscita direttamente un segnale elettrico. Lo studio dettagliato di questi dispositivi è rimandato ai corsi specialistici.

Per concludere l'argomento si desidera però accennare al principio di funzionamento di un misuratore di portata particolare, completamente meccanico, basato sul "galleggiamento" di un indicatore in rotazione dentro il flusso: il **flussimetro**.

Con riferimento alla figura 17.6, il flussimetro è costituito da un tubo di vetro o di materiale plastico trasparente con forma lievemente troncoconica. Esso viene inserito in posizione verticale sul tubo di erogazione del fluido. Come si vede anche nell'esempio di figura 17.6, sulla parte esterna del tubo è incisa la "graduazione". All'interno del tubo troncoconico è inserito un galleggiante di materiale e di forma opportuni. Quando non vi è passaggio di fluido ($Q=0$) il galleggiante è adagiato sul fondo del tubo trasparente. Quando invece viene fatto passare il fluido, il galleggiante viene sollevato dal flusso e, a seconda della portata Q , si posiziona ad una certa altezza in corrispondenza della quale l'operatore legge direttamente il valore della portata sulla scala graduata.

La curva di graduazione è basata sulla semplice relazione di equilibrio tra le forze: *peso del galleggiante (in acqua) = spinta del flusso*.



$$\text{Peso del galleggiante (in "acqua")} = \rho^* g V_c$$

con $\rho^* = \rho_c - \rho_f$ (densità del galleggiante – densità del fluido) e V_c volume del galleggiante.

$$\text{Spinta del fluido} = (p_1 - p_2)A$$

con $p_1 - p_2$ differenza di pressione esistente tra le zone “prima” e “dopo” il galleggiante e A sezione massima del galleggiante.

$$(\rho_c - \rho_f) g V_c = (p_1 - p_2) A$$

$$(\rho_c - \rho_f) \frac{g V_c}{A} = p_1 - p_2 \rightarrow \Delta p = \text{cost}$$

essendo tutte le grandezze che figurano nel termine a sinistra dell’equazione “costanti”, risulta costante anche la differenza di pressione tra “sotto” e “sopra” il galleggiante. Tra l’altro, il Δp dipende solo da fattori geometrici e dalla differenza costante di densità tra galleggiante e fluido, quindi non dipende dalla quota raggiunta dal galleggiante.

Si applichi ora il teorema di Bernoulli per la conservazione dell’energia: $p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho_f v^2$

Figura 17.6

La velocità v che compare in questa relazione è relativa alla *sezione anulare* di passaggio del fluido che si viene a creare tra il galleggiante e il tubo troncoconico, proprio in virtù dell’elevazione del galleggiante. Essendo il Δp costante, dall’equazione di Bernoulli si riconosce che anche la velocità v del flusso in corrispondenza della *sezione anulare* è costante, e questo vale per qualunque sezione anulare ovvero, per qualunque quota raggiunta dal galleggiante. Inserendo quindi la relazione di Bernoulli nell’equazione di sopra si ottiene:

$$(\rho_c - \rho_f) \frac{g V_c}{A} = \frac{1}{2} \rho_f v^2$$

$$v^2 = \frac{2 g V_c \cdot \rho_c - \rho_f}{A \rho_f}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 g V_c \cdot \rho_c - \rho_f}{A \rho_f}}$$

Se v è costante per ogni sezione anulare ovvero, per ogni quota del galleggiante, essendo $Q_v = S \cdot v$, con S sezione anulare, al variare di Q deve variare proporzionalmente la sezione anulare S , ecco perché è assolutamente necessario costruire il condotto trasparente con forma troncoconica. Per la portata del fluido si ottiene quindi:



$$Q_v = C \cdot S \cdot v = C \cdot S \cdot \sqrt{\frac{2gV_c}{A} \cdot \frac{\rho_c - \rho_f}{\rho_f}} \quad \text{curva di graduazione lineare !}$$

dove C è il ben noto *coefficiente di efflusso*. I flussometri sono misuratori di portata estremamente semplici ed affidabili, funzionano bene anche per piccole portate e sono utilizzati specialmente nelle applicazioni dove occorre avere la “certezza” del flusso (ad es. la misura della portata di ossigeno o di aria medica nelle camere operatorie).

Note:

Figure 17.1, 17.2, 17.6 courtesy of:

Bechwith, Marangoni, Lienhard – *Mechanical Measurements* – Addison & Wesley

Figure 17.2, 17.3, 17.4, 17.5 courtesy of:

Figliola, Beasley – *Theory and Design for Mechanical Measurement* – John Wiley & Sons, Inc.