

Capitolo 8

Alcuni strumenti per misure di portata e velocità

8.1 Metodi sperimentali per misure di velocità

Alcune delle principali tecniche che si utilizzano in fluidodinamica per misure di velocità (o portata) sono riassunte come segue:

Misure di portata

- Tubo di Venturi
- Asametro

Misure locali di velocità

- Tubo di Pitot
- Anemometro a filo caldo (mono e multi-componente)
- Anemometro Laser-Doppler (mono e multi-componente)

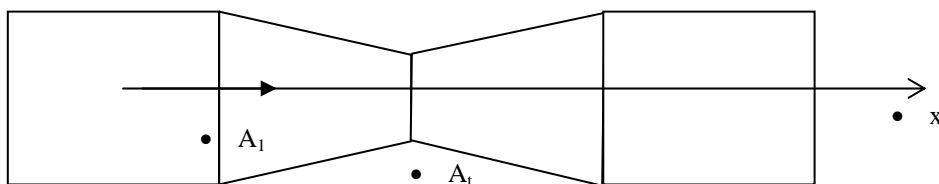
Misure di campi di velocità

- Particle Image Velocimetry (PIV)
- Particle Tracking (PTV)
- DPIV
-

Nei prossimi paragrafi daremo qualche dettaglio su alcuni dei metodi di misura sopra elencati. Gli strumenti che vedremo risultano essere particolarmente interessanti in quanto utilizzano le equazioni di bilancio già viste nei capitoli precedenti.

8.2 Tubo di Venturi

Si consideri un flusso di aria in un condotto convergente-divergente. Si indichi con A_t la sezione di gola, e A_1 la sezione del condotto entrante. La presenza della strozzatura permette di calcolare la velocità media nel condotto.



Supponiamo di misurare la pressione nella sezione A_1 e A_t che indichiamo rispettivamente con P_1 e P_t . Noto il rapporto di contrazione A_1 / A_t è possibile innanzitutto esprimere la velocità nella sezione di gola (V_t) in termini della velocità media del flusso entrante (V_1):

$$V_t = \frac{A_1}{A_t} \cdot V_1$$

Possiamo applicare ora l'equazione di Bernoulli tra A_1 e A_t e ricavare V_1 :

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_t + \frac{1}{2} \rho V_t^2$$

$$P_1 - P_t = \frac{1}{2} \rho V_t^2 - \frac{1}{2} \rho V_1^2$$

$$V_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_1 - P_t)}{\rho \cdot \left[\left(\frac{A_1}{A_t} \right)^2 - 1 \right]}}$$

Quindi, dalla misura della pressione, che può essere effettuata utilizzando ad esempio un manometro differenziale ad "U", e dal rapporto di contrazione (che è una quantità geometrica nota), ci si può calcolare la velocità media nel condotto. È necessario notare che la quantità misurata rappresenta una media sulla sezione. L'unica quantità che si misura esattamente, è la portata (in volume o massa) che sarà data da:

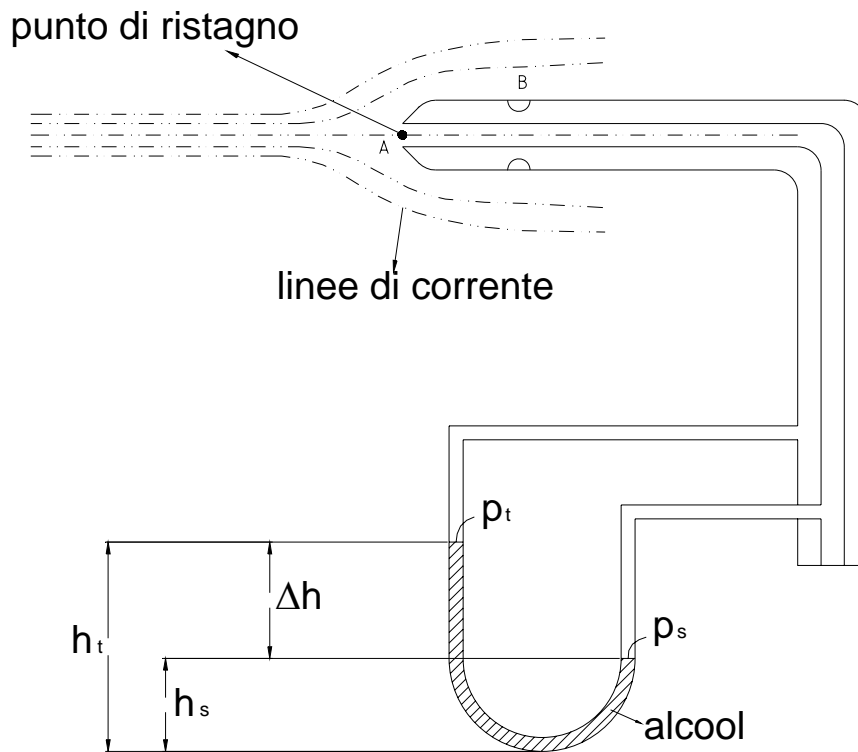
$$Q = A_1 \sqrt{\frac{2 \cdot (P_1 - P_t)}{\rho \cdot \left[\left(\frac{A_1}{A_t} \right)^2 - 1 \right]}} \quad \text{Portata in volume}$$

$$m = \rho A_1 \sqrt{\frac{2 \cdot (P_1 - P_t)}{\rho \cdot \left[\left(\frac{A_1}{A_t} \right)^2 - 1 \right]}} \quad \text{Portata in massa}$$

Il tubo di Venturi, non consentendo misure locali di velocità, è uno strumento molto usato per la misura della portata in condotti (ad es. in impianti idraulici).

8.3 Tubo di Pitot

Il tubo di Pitot è uno strumento costituito da due tubi concentrici uniti ad una estremità e disposti con gli assi paralleli alla direzione della velocità. Una serie di piccoli fori sono disposti sul tubo esterno mentre il tubo interno è forato solo all'estremità dove il fluido impatta (punto di ristagno). Il tubo esterno si trova quindi ad una pressione pari alla pressione statica del flusso (P_s) mentre quello interno si trova alla pressione pari alla pressione totale (P_t).



In genere alle uscite dei due tubi viene collegato un manometro differenziale ad “U” che supponiamo essere riempito, in genere, di un liquido di densità ρ_l (in genere acqua o alcool o miscele di acqua e alcool). Supponiamo che il manometro ad “U” fornisca una differenza di quota tra i peli liberi di liquido pari a Δh . Questo valore è una quantità nota in quanto viene misurata direttamente dallo sperimentatore. Tenendo conto che le due prese del manometro sono collegate rispettivamente alla P_s e alla P_t , è possibile determinare la velocità del fluido. Applicando la conservazione dell'energia tra i due peli liberi del liquido nel manometro (che si trovano rispettivamente ad una quota h_t e h_s), si ottiene:

$$P_s + \rho_l g h_s = P_t + \rho_l g h_t \Rightarrow P_t - P_s = \rho_l g \cdot \Delta h$$

ma sappiamo che la differenza tra pressione totale e pressione statica è la pressione dinamica, e quindi:

$\frac{1}{2} \rho V^2 = \rho_l g \cdot \Delta h$ essendo ρ la densità dell'aria e V la velocità del fluido nel punto di misura. Si ottiene quindi:

$$V = \sqrt{\frac{2g\rho_l \cdot \Delta h}{\rho}}$$

Attraverso il tubo di Pitot è quindi possibile misurare la velocità locale di un flusso. Questo è uno strumento molto usato in pratica per misure anemometriche, ad esempio in gallerie del vento. Data la sua limitata risposta dinamica tale strumento non è però adatto per misure di turbolenza ma viene molto usato, data anche la semplicità d'uso, per misure di velocità media. Da notare che anche la scelta del liquido da utilizzare nel manometro differenziale è un parametro importante in quanto la sensibilità dello strumento dipende dalla densità del liquido utilizzato (minore è la densità e maggiore è la sensibilità perché Δh è proporzionale a $1/\rho_l$). Inoltre, a seconda del tipo di liquido, cambia l'angolo di contatto con la parete dei tubi del manometro e quindi la precisione nella lettura del Δh .

Maggiore precisione nella misura può essere comunque ottenuta se si utilizzano dei trasduttori di pressione per la misura di $P_t - P_s$ piuttosto che il manometro differenziale ad "U".

Il tubo di Pitot che viene applicato alle monoposto di formula uno sia in occasione dei test che delle qualifiche, è indispensabile per avere una serie di riscontri costanti, comunicati via radio, sui valori di velocità della vettura.



Esempio di Tubo di Pitot applicato sul musetto di una Ferrari da Gran Premio F1

Sugli aerei il Pitot si può trovare sia sull'ogiva (anche di tipo "retrattile", utile per il parcheggio), sia sulle estremità alari sia anche sulla fusoliera al di sotto dei finestrini del pilota.



Esempio di Tubo di Pitot applicato sull'ogiva di un aereo militare



Esempi di Tubo di Pitot applicato sull'ogiva di aerei militari



Esempi di Tubo di Pitot applicato sulle ali di aerei

8.4 Misuratore di portata

Uno strumento molto usato è il misuratore di portata generalmente chiamato "Asametro". All'interno di un tubo di vetro tronco conico, inserito in serie al condotto di cui si vuole misurare la portata, è inserito un ostacolo che viene spostato dal fluido in moto. Le forze che agiscono sull'ostacolo sono:

Forza Peso: $F_p = \rho_c V_c g$

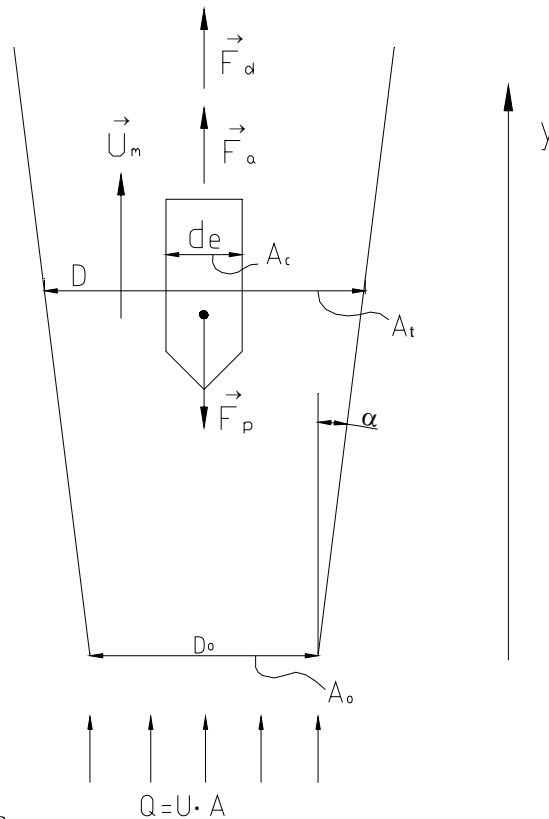
dove V_c e ρ_c rappresentano rispettivamente il volume e la densità dell'ostacolo

Forza di Archimede: $F_a = \rho_F V_c g$

dove ρ_F rappresenta la densità del fluido.

Forza di resistenza aerodinamica: $F_D = \frac{1}{2} \rho_F U_m^2 c_D A_c$

dove U_m rappresenta la velocità media che si vuole misurare, c_D il coefficiente di resistenza aerodinamica dell'ostacolo (parametro che si considera noto), A_c l'area della sezione trasversale corpo.



Si suppone che il coefficiente di resistenza aerodinamica c_D sia costante. Si può individuare dalla condizione di bilancio delle forze:

il diametro $D(y)$ che possiamo

$$\vec{F}_D + \vec{F}_p + \vec{F}_a = 0 \Rightarrow \frac{1}{2} \rho_F U_m^2 c_D A_c = (\rho_c - \rho_F) V_c g \quad 8.1$$

Teniamo conto che il condotto dove è posto l'ostacolo è tronco-conico, per cui la legge di variazione del diametro sarà:

$D(y) = D_0 + \alpha y$ dove D_0 rappresenta il diametro della sezione di ingresso, e α è l'angolo di inclinazione della superficie laterale rispetto alla verticale, ed è una quantità

ovviamente nota. In termini di area della sezione trasversale del condotto, A_t , la legge di variazione con y sarà ovviamente:

$$A_t(y) = \frac{\pi}{4}(D_0 + \alpha y)^2$$

La portata relativa alla sezione trasversale del condotto dove si è posizionato l'ostacolo sarà:

$$Q(y) = [A_t(y) - A_c] \cdot U_m \quad 8.2$$

La quantità U_m può essere ricavata dal bilancio delle forze (eq. 8.1):

$$U_m = \sqrt{\frac{(\rho_c - \rho_F) 2V_c g}{\rho_F c_D A_C}} = \text{cost.}$$

e quindi:

$$Q(y) = [D_0^2 - d_c^2 + \alpha^2 y^2 + 2D_0 \alpha y] \cdot \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{(\rho_c - \rho_F) 2V_c g}{\rho_F c_D A_C}} \quad 8.3$$

Dove con d_c si è indicato il diametro caratteristico dell'ostacolo ($A_c = \pi d_c^2 / 4$).

L'eq. (8.3) ci dà il valore della portata in base alla posizione y , essendo tutti gli altri, dei parametri noti. Poiché l'angolo α è in genere molto piccolo, il termine in α^2 può essere trascurato, e la dipendenza di $Q(y)$ da α è lineare. In genere sul vetro dell'asometro è riportata una scala graduata lineare che in base alla posizione dell'ostacolo dà possibilità di leggere direttamente i valori della portata (ad es. in litri/ora).

Da notare che se il condotto non fosse stato conico, qualsiasi posizione y sarebbe stata di equilibrio (equilibrio indifferente). Un modo alternativo si può avere utilizzando un condotto cilindrico (a sezione costante) e collegando l'ostacolo ad un dinamometro. Questa configurazione è però più complicata (e più costosa) rispetto all'asometro visto sopra.