

## STRUMENTI DI MISURA DELLA FLUIDODINAMICA

Le misure della velocità dei fluidi vengono usualmente divise in misure di valore locale e misure di valore medio (detto anche *portata*).

Gli strumenti che misurano velocità locali sono in genere detti *anemometri*, mentre i misuratori di portata vengono definiti *contaflusso*.

Il loro diverso utilizzo dipende dal tipo di misurazioni che interessa ottenere.

Le apparecchiature e le tecniche sperimentali di impiego più frequente sono le seguenti:

- a) **metodo della pesata**
- b) **tubo di Pitot**
- c) **tubo di Venturi**
- d) **diaframma o boccaglio**
- e) **rotametro**
- f) **turbine**
- g) **anemometro a filo caldo**
- h) **misuratore di portata ad effetto Coriolis**
- i) **misuratore magnetico di portata**
- j) **anemometro laser - Doppler**

## METODO DELLA PESATA

Si tratta di un misuratore di portata: viene pesata la quantità di fluido  $M$  che esce da un tubo in un certo intervallo di tempo; la si divide quindi per l'intervallo di tempo  $\Delta T$  e si ottiene la portata per unità di tempo  $\dot{M}$ .

La precisione di questa tecnica di misura è ovviamente legata all'accuratezza con cui si provvede alla raccolta della massa  $M$  e alla precisione degli strumenti di misura (bilancia e cronometro).

In genere l'errore globale è inferiore all' 1%.

# TUBO DI PITOT

Questo strumento è un anemometro, un misuratore puntuale della velocità del fluido.

Può essere di diverse misure, in relazione alle situazioni in cui si trova ad operare; generalmente si va da lunghezze di un metro e diametro di qualche centimetro, a lunghezze di pochi centimetri e diametro di qualche millimetro.

Ha la forma di una L ruotata di 180°; la parte più lunga è detta *gambo*, e la sua lunghezza è ininfluente ai fini della misura; la parte orizzontale al terreno è invece detta *testa*, e la sua lunghezza è di circa una ventina di diametri.

Il tubo di Pitot è generalmente costruito in acciaio inox, per questioni di durata nel tempo.

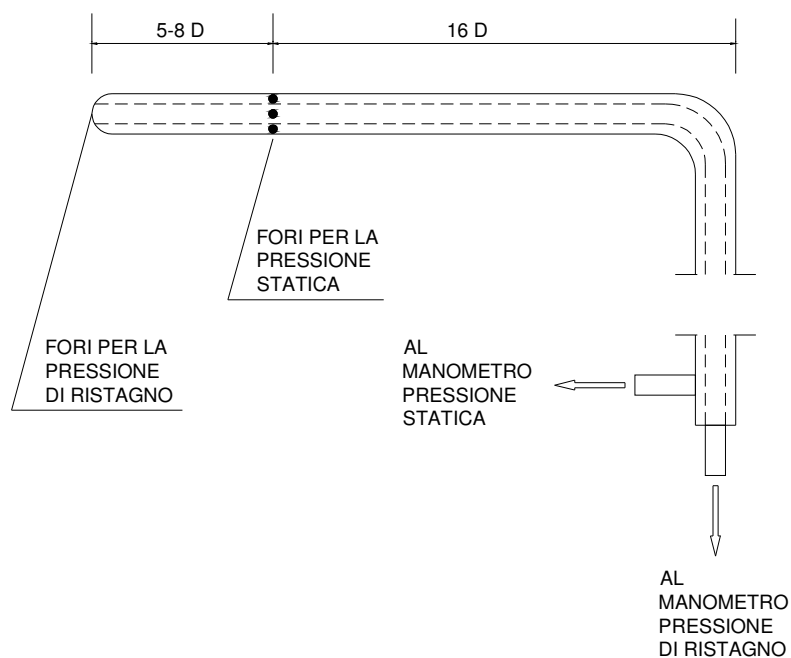


FIGURA 1: tubo di Pitot, vista laterale

Il tubo di Pitot è costituito da 2 tubi concentrici e coassiali, come messo in evidenza dalla figura 2.

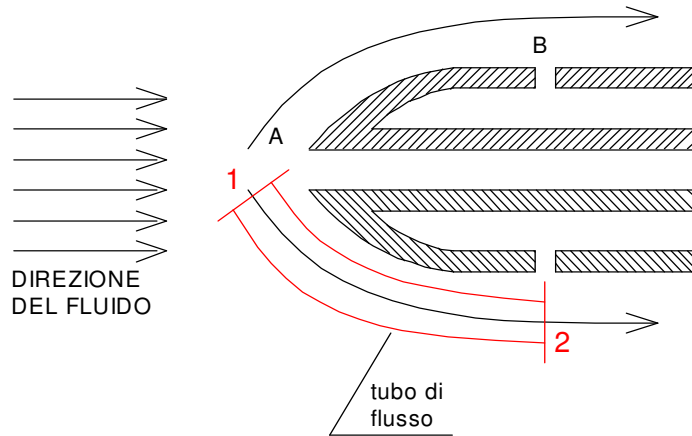


FIGURA 2: tubo di Pitot, sezione laterale, dettaglio della testa

Lo strumento va puntato con la testa nella direzione in cui scorre il fluido di cui si vuole misurare la velocità.

Come si nota in figura 1, il tubo è chiuso all'estremità opposta alla testa, all'inizio del gambo, in quanto vi è il manometro; il fluido entra all'inizio nel tubo, ma una volta riempiti gambo e testa, vede il tubo come chiuso frontalmente.

E' costretto quindi a girare intorno alla punta della testa, come indicato in figura 2.

All'imboccatura della testa si ha evidentemente velocità nulla, e di conseguenza un massimo di pressione; ad una distanza dalla punta di circa 5-8 diametri, in corrispondenza dei fori laterali, il fluido ha riacquisito la velocità che aveva all'infinito, prima di arrivare alla testa, e in questo punto viene presa la pressione statica.

Ora, se si prende un tubo di flusso del tipo mostrato in figura 2, come sezione 1 quella al punto di ristagno e come sezione 2 quella davanti ai fori, si può scrivere l'equazione di **Bernoulli**; il tubo è infinitesimo, quindi non si usa la velocità media, ma la velocità locale.

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(h_2 - h_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho} + R = 0 \quad (1)$$

L'equazione viene posta uguale a zero in quanto lungo il tubo di flusso considerato non sono presenti pompe o ventole di alcun genere.

Sono possibili alcune semplificazioni, in particolare:

- si possono trascurare le perdite di carico **R**, in virtù del fatto che il percorso è molto corto, e che lo strumento è progettato per favorire uno scorrimento aerodinamico del fluido;
- si può trascurare la variazione di quota **h<sub>2</sub>-h<sub>1</sub>**; per la disposizione geometrica dei fori, posti intorno alla testa, il baricentro del tubo di flusso è alla stessa quota;
- la velocità **V<sub>1</sub>** è nulla in quanto 1 è un punto di ristagno.

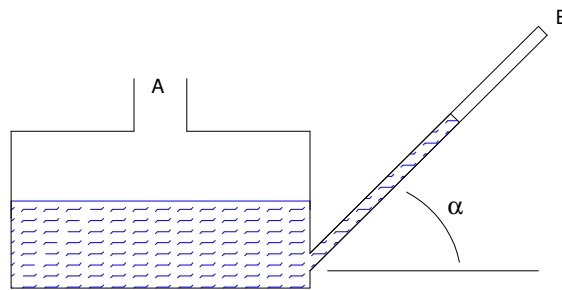
Semplificando otteniamo quindi:

$$\frac{V_2^2}{2} + \frac{p_2 - p_1}{\rho} = 0 \quad (2)$$

da cui si ricava immediatamente l'espressione della velocità  $V_2$ :

$$V_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (3)$$

In sostanza si tratta di effettuare una misura di pressione differenziale, che viene normalmente fatta con un micromanometro a tubo inclinato di tipo idraulico. E' uno strumento che si presta molto bene a misure della pressione degli aeriformi; ne viene di seguito fornita una breve descrizione.



*FIGURA 3: micromanometro a tubo inclinato*

E' costituito da un serbatoio con un vasto pelo libero, comunicante con un tubo capillare di vetro inclinato.

Il serbatoio ed il tubo comunicano (attraverso A e B) con gli ambienti nei quali sussistono le pressioni  $p_1$  e  $p_2$ .

Sul tubo è disposta una scala di lettura; dall'entità dello spostamento verticale del liquido nel tubo si risale alla differenza di pressione  $p_2 - p_1$ .

Lo strumento aumenta o diminuisce la sua sensibilità al variare dell'angolo  $\alpha$ ; è in generale molto preciso, ma il suo intervallo di misura non oltrepassa il fattore 10.

Il tubo di Pitot è uno strumento adatto a rilevare velocità elevate; lavorando prevalentemente con aria, le differenze di pressione sono infatti minime, e quindi difficilmente misurabili; aumentando la velocità, queste aumentano, rendendone più agevole la misura.

## TUBO DI VENTURI

E' un misuratore di portata, ovvero di velocità media.

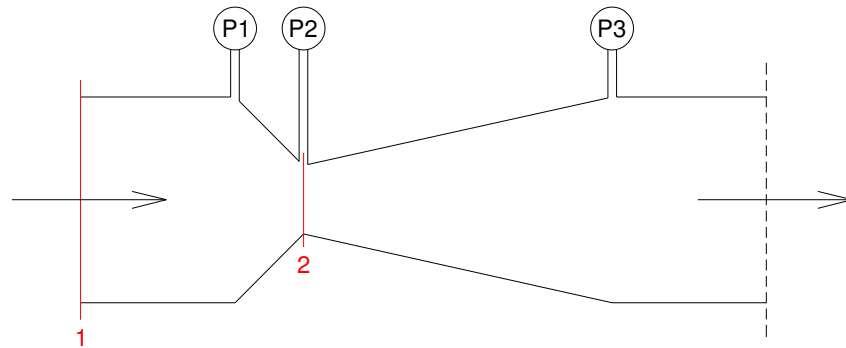


FIGURA 4: tubo di Venturi, sezione laterale

Come si può osservare in figura 4, lo strumento è costituito da un tubo con una brusca riduzione di sezione nella zona tra 1 e 2, e da un ritorno molto più graduale alla sezione iniziale, tra 2 e 3.

Il manometro 3 non è di utilità diretta nella misura della velocità, in quanto serve per controllare che la pressione sia ritornata la stessa che si ha in 1; questo è necessario in quanto il tubo di Venturi è uno strumento che non deve dar luogo a perdite di carico lungo il circuito idraulico.

In questo caso viene calcolata la velocità media, mettendola in relazione con la pressione, tramite l'equazione di continuità; tale equazione viene scritta per il tubo di flusso che ha come sezione iniziale e finale le sezioni 1 e 2, e come profilo laterale lo stesso tubo. Dall'equazione di **Bernoulli**, supposto il condotto orizzontale ed il fluido incomprimibile, si ha:

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + \frac{p_2 - p_1}{\rho} = 0 \quad (4)$$

Il problema, rispetto al tubo di Pitot, è che in questo caso compaiono due velocità; si tratta quindi di esprimere una velocità in funzione dell'altra, tramite una relazione ottenuta dall'equazione di conservazione della massa.

$$\dot{M}_1 = \dot{M}_2 \quad (5)$$

da cui:

$$\rho \cdot V_1 \cdot S_1 = \rho \cdot V_2 \cdot S_2 \quad (6)$$

dove  $S_1$  e  $S_2$  sono le aree delle superfici delle sezioni di entrata e di uscita.

Se la densità  $\rho$  viene supposta costante (fluido incomprimibile), è possibile semplificarla.

Trattandosi di sezioni circolari, la superficie è proporzionale al quadrato dei raggi, quindi:

$$V_1 \cdot D_1^2 = V_2 \cdot D_2^2 \quad (7)$$

da cui si ricava la velocità  $V_2$  in funzione di  $V_1$ :

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad (8)$$

Si sostituisce ora l'espressione della velocità  $V_2$  nell'equazione (4):

$$V_1^2 \left( \frac{D_1^4}{D_2^4} - 1 \right) = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} \quad (9)$$

In questo modo si ottiene l'espressione della velocità  $V_1$ :

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left( \frac{D_1^4}{D_2^4} - 1 \right)}} \quad (10)$$

Anche nel caso del tubo di Venturi, per quanto riguarda la misura di pressione su fluidi gassosi, si utilizza generalmente un micromanometro a tubo inclinato.

Se invece si opera sui liquidi, si utilizza un manometro differenziale a diaframma: le due porzioni di fluido, tra le quali sussiste la differenza di pressione, vengono messe a contatto, separate solo da un diaframma; questo è costituito da un materiale elastico e sensibile, che si deforma per effetto della differenza di pressione; per mezzo di appositi trasduttori, questa deformazione viene elaborata da strumenti che forniscono in uscita il valore della differenza di pressione.

Un possibile problema dei tubi di Venturi si verifica quando la strozzatura della sezione 2 è troppo piccola; la velocità del liquido infatti aumenta bruscamente, e di conseguenza diminuisce la pressione; se tale pressione scende sotto la pressione di saturazione, il liquido vaporizza dando luogo ad un fenomeno di *cavitazione*: si formano delle interruzioni della continuità liquida, occupate dal vapore; i risultati di questo fenomeno sono perdite di carico notevoli e formazione di fenomeni turbolenti; quando la pressione torna a salire, le bolle collassano su se stesse, e implodono provocando rumore e vibrazioni che possono danneggiare il condotto.

I tubi di Venturi sono quindi progettati per un intervallo definito di portate, in quanto se la portata è troppo piccola non avrà differenze di pressioni misurabili, viceversa avverrà il fenomeno della cavitazione.

## DIAFRAMMA O BOCCAGLIO

Sono due misuratori di portata molto simili, basati sull'intruduzione volontaria in un condotto di una perdita di carico concentrata.

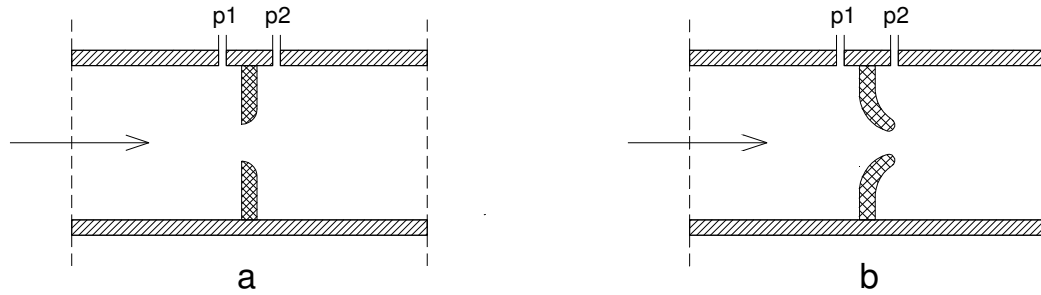


FIGURA 5: diaframma (a) e boccaglio (b), sezioni laterali

Se l'accidentalità che deve dar luogo alla perdita di carico è un disco forato, lo strumento viene detto *diaframma*; se invece si utilizza un convergente a forma di campana, viene detto *boccaglio*.

Tramite i piccoli tubi che stanno a monte e a valle dell'ostacolo si rileva una differenza di pressione  $\Delta p$ , precisamente:

$$\Delta p = \rho \cdot \beta \cdot \frac{w^2}{2} \quad (11)$$

da cui si ricava la velocità  $V$ :

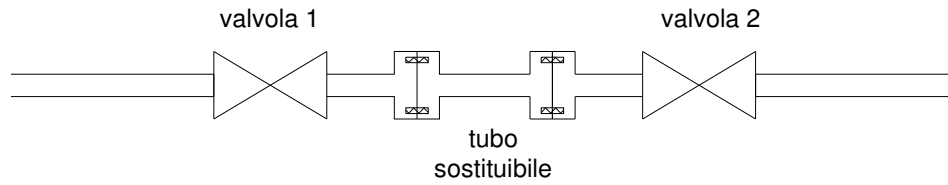
$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot \beta}} \quad (12)$$

Il valore del *coefficiente di perdita concentrata*  $\beta$  viene posto a corredo dello strumento.

Il funzionamento, visto da fuori, e' identico a quello del tubo di Venturi; la differenza è che il tubo di Venturi introduce una perdita di carico trascurabile, mentre il boccaglio introduce una forte perdita di carico.

Può essere messo permanentemente nel circuito idraulico: in questo caso non altera la misura, in quanto, essendo parte del circuito, la sua perdita viene calcolata insieme alle altre perdite nel progetto della pompa.

Può anche essere usato per una misura estemporanea: in questo caso, in una parte del circuito idraulico viene posto un sistema del tipo mostrato in figura 6:



*FIGURA 6: sistema per misura estemporanea*

L'elemento centrale è un tubo imbullonato, facilmente asportabile; chiudendo le valvole, il flusso viene interrotto; dopo aver smontato il tubo, si monta il diaframma e si riaprono le valvole; a questo punto si effettua la misura.

Da notare che in questo caso viene introdotta una perdita di carico considerevole, che implica una misura della portata sistematicamente più bassa di quella reale; per questo lo si preferisce inserire permanentemente.

## ROTAMETRO

E' un misuratore di portata di scarsa precisione, usato comunemente nelle centrali termiche.

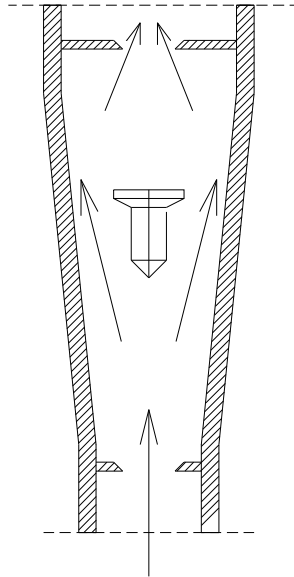


FIGURA 7: rotametro, sezione laterale

E' composto da un tratto di tubo verticale, di forma tronco-conica, fatto di vetro, quindi trasparente, graduato; all'interno del segmento vi è un *galleggiante*; in assenza di flusso, il galleggiante cade verso il basso, fermato dalla troncatura del tubo; quando viene aperta la valvola, il fluido, mettendosi in movimento, esercita una forza di tipo tangenziale sul galleggiante, trascinandolo verso l'alto, in misura proporzionale alla quantità di fluido che in quel momento attraversa il tubo.

Il condotto nel quale è posto il galleggiante ha una forma debolmente conica, per favorire una stabilizzazione del galleggiante stesso, e per avere una perdita di carico il più possibile costante; se il vetro viene opportunamente tarato, sul rotametro viene letta direttamente la portata.

Il problema maggiore è che il galleggiante non colpisca sistematicamente il vetro, in quanto questa azione può provocare fenomeni di smerigliatura del vetro che impediscono di vedere all'interno.

E' un dispositivo permanente.

Uno dei pregi di questo strumento è la facilità di lettura; si capisce immediatamente se il fluido è in movimento.

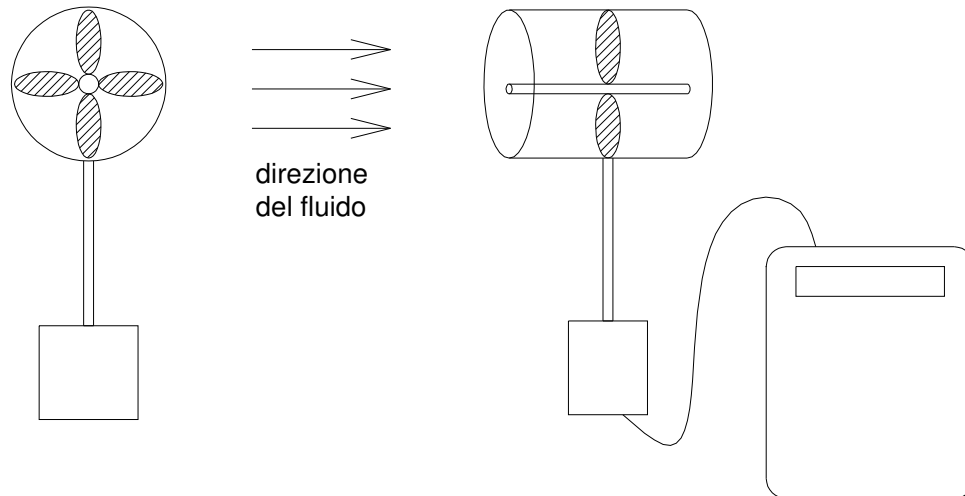
## TURBINE

Vengono divise in due classi, a seconda che il fluido di cui devono misurare la velocità sia gassoso o liquido.

Le turbine che operano sui gas sono dette più propriamente *ventole*, e sono misuratori puntuali di velocità.

Sono costituite da un'elica sostenuta da un perno, collegato ad un anello di protezione, sul quale viene innestato il manico.

Per effettuare la misura, si orienta lo strumento in modo che l'asse di rotazione dell'elica sia parallelo alla direzione del moto del fluido.



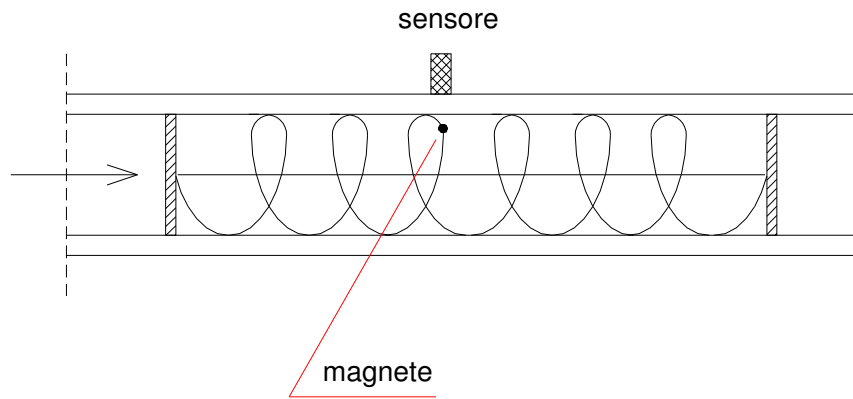
*FIGURA 8: turbina aerea*

L'elica è molto sensibile all'azione del fluido; attraverso un contattatore meccanico o digitale si registra il moto dell'elica; in questo modo lo strumento fornisce in uscita direttamente la velocità.

Vi sono poi le turbine che operano sui liquidi; sono dei misuratori di portata, ovvero di velocità media.

Sono poste permanentemente all'interno del circuito idraulico, e assumono la forma del condotto.

Sono formate da una turbina elicoidale, sostenuta da un perno.



*FIGURA 9: turbina idraulica, sezione laterale*

La lettura della velocità di rotazione della turbina viene effettuata per mezzo di un contascatti elettronico; viene annegato un piccolo magnete all'interno di una pala della turbina; all'esterno del condotto è posto un sensore che registra il passaggio del magnete, fornendo in uscita direttamente il valore della velocità del fluido.

## **ANEMOMETRO A FILO CALDO**

E' un misuratore puntuale di velocità.

Il funzionamento di questo strumento è basato sullo scambio termico, pertanto ne viene qui fornita una descrizione prevalentemente qualitativa.

E' composto da un piccolo tubo lungo il cui diametro è teso un filamento di platino; il tubo è poi montato su un supporto avente la funzione di manico.

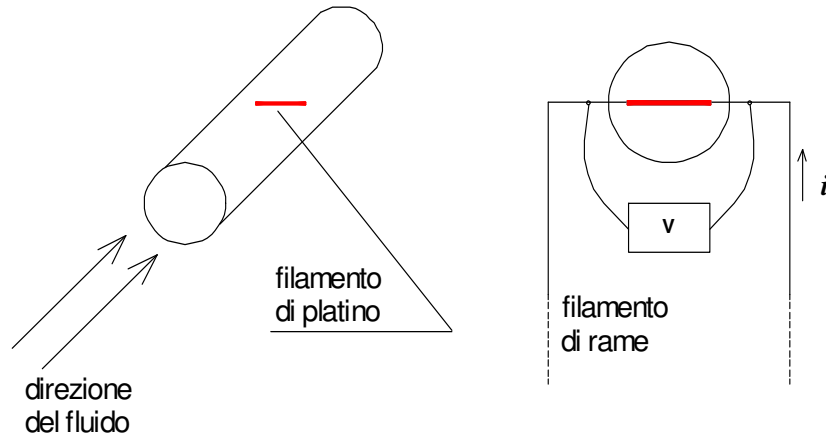


FIGURA 10: anemometro a filo caldo, prospettiva e sezione frontale

Viene applicata al filo di platino una corrente  $i$ , attraverso una coppia di filamenti di rame la cui resistenza è trascurabile.

Tramite una seconda coppia di fili, viene misurata la tensione  $V$ , ai capi del filo di platino.

Dalla legge di Ohm:

$$\frac{V}{i} = R = R(T) \quad (13)$$

La resistenza del filo di platino varia in maniera pressoché lineare con la temperatura, quindi, dalla misura della resistenza, è possibile risalire alla temperatura  $T_{\text{filo}}$  a cui si trova il platino.

Inoltre, è possibile conoscere il calore  $\dot{Q}$  dissipato per effetto Joule:

$$\dot{Q} = I \cdot V \quad (14)$$

Dalle relazioni sullo scambio termico si ha:

$$Q = h \cdot \Delta T \cdot S_{\text{filo}} \quad (15)$$

dove  $h$  è il *coefficiente di convezione* che rappresenta il legame di proporzionalità tra la potenza che viene dissipata e il salto di temperatura  $\Delta T$  moltiplicato per la superficie del filo  $S_{\text{filo}}$ .

Chiaramente:

$$\Delta T = T_{filo} - T_{aria} \quad (16)$$

Il coefficiente di convezione  $h$  è funzione di alcuni parametri, tra cui la velocità  $u$  del fluido; il legame non è in generale lineare, ma piuttosto complesso; vengono quindi fornite delle tabelle in cui si mette in relazione la velocità  $u$  ed il rapporto

$$\dot{Q}/\Delta T.$$

L'anemometro a filo caldo viene collegato a strumenti che hanno in memoria questa tabella di taratura, pertanto forniscono in uscita direttamente il valore della velocità.

È uno strumento molto sensibile anche a piccole variazioni di velocità; inoltre, non entrando nel calcolo della velocità la radice quadrata, ha un intervallo di misura molto ampio, in genere di due ordini di grandezza.

## MISURATORE DI PORTATA AD EFFETTO CORIOLIS

Questo strumento viene realizzato aggiungendo al condotto un tratto "a ferro di cavallo" sul piano parallelo al terreno.

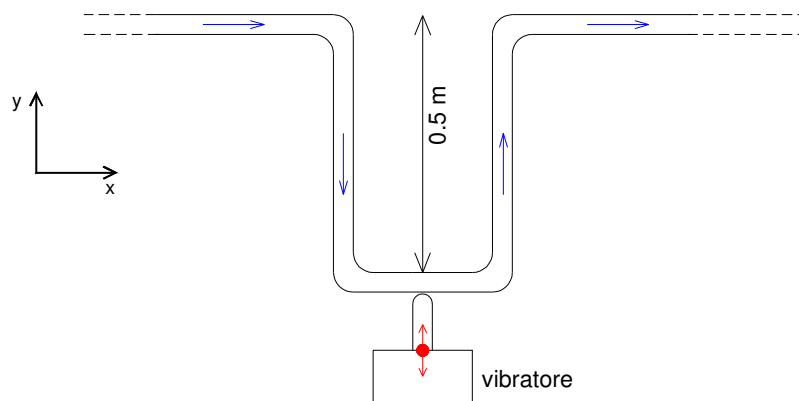


FIGURA 11: misuratore di portata ad effetto Coriolis, vista verticale

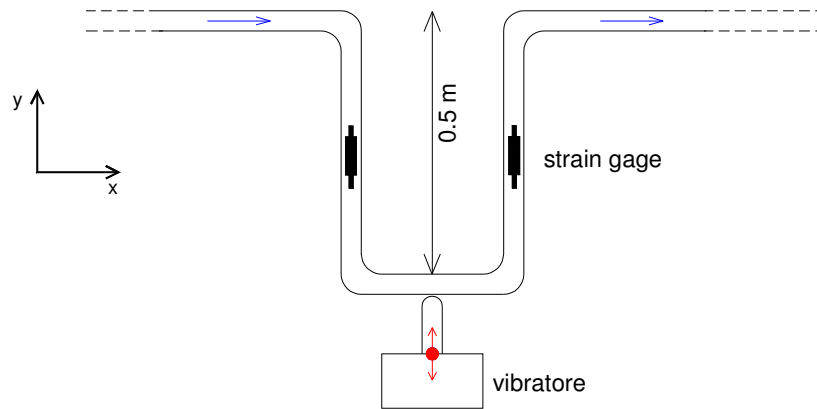
Il tratto di tubo sporgente viene fatto oscillare meccanicamente, in direzione perpendicolare al terreno, mediante un vibratore posto al vertice del tratto curvo, come mostrato in figura 11.

La forza imposta è del tipo:

$$F = F_0 \cdot \text{sen } \omega t \quad (17)$$

Per rispettare la conservazione della quantità di moto si ha una coppia di forze che torce il condotto; tale forza è dovuta all'effetto Coriolis.

Da considerazioni fisiche si osserva che la velocità del fluido è proporzionale alla coppia di torsione; la torsione del condotto viene misurata per mezzo di *strain gage*, che vengono montati sul condotto come mostrato in figura 12.



*FIGURA 12: misuratore di portata ad effetto Coriolis con strain gage*

Questi sensori forniscono in uscita un segnale elettrico proporzionale alla torsione dell'acciaio di cui è composto il condotto.

In questo modo si ottiene sia la portata che il verso del condotto.

Seppure non abbia una precisione elevata, questo strumento è molto usato in ambito industriale, in quanto non deve essere ritardato per ogni tipo di fluido che scorre nel condotto; infatti l'effetto Coriolis è di tipo gravitazionale, pertanto misura la massa.

Il limite di questo strumento è che non può essere utilizzato nelle regioni equatoriali, dove l'effetto Coriolis è assente.

## MISURATORE MAGNETICO DI PORTATA

Esteriormente, questo strumento è una piccola scatola che avvolge il condotto in cui scorre il fluido.

Al suo interno, vengono avvolte al tubo delle spire di materiale conduttore, nelle quali viene fatta passare una corrente variabile nel tempo. In questo modo nel condotto vi è un campo magnetico oscillante; se il fluido che scorre è paramagnetico (come l'acqua), il campo magnetico viene perturbato; dalla misura dell'intensità di queste variazioni è possibile risalire alla velocità del fluido, e quindi alla portata.

Questo strumento non misura il verso, ma le molecole paramagnetiche presenti nel fluido; quindi, in presenza di soluzioni acquose, lo strumento conta solo le molecole d'acqua.

Questo può essere un aspetto interessante dal punto di vista applicativo; se infatti il misuratore magnetico viene messo in serie ad uno strumento che misura la portata totale, è possibile conoscere la percentuale di soluto presente nel fluido.

Il suo limite è evidentemente quello di funzionare solo con fluidi paramagnetici.

## ANEMOMETRO LASER - DOPPLER

E' un misuratore puntuale di velocità di tipo ottico, basato su una sorgente di luce laser.

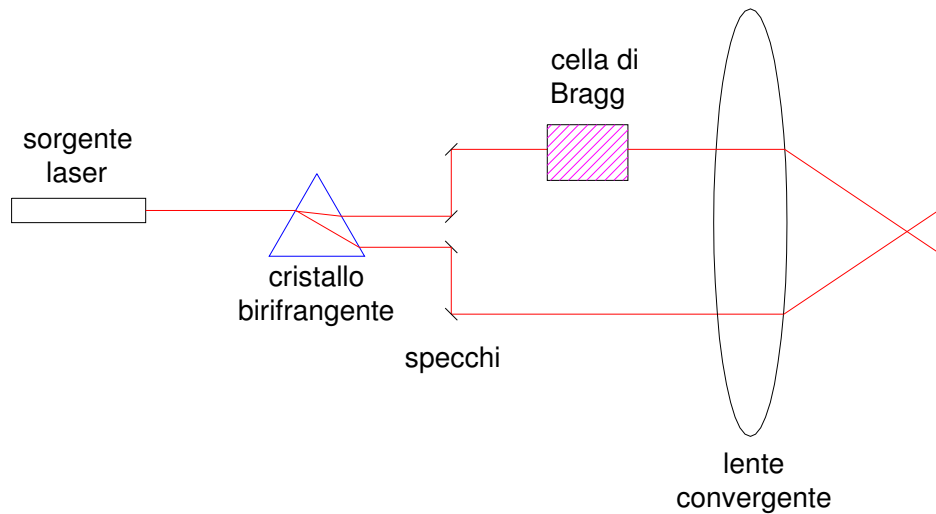


FIGURA 13: anemometro laser-Doppler, schema

Lo strumento lavora con due sorgenti laser perfettamente in fase; per ottenerle, si sdoppia un unico fascio di luce laser mediante un *prisma birifrangente* (avente cioè due indici di rifrazione); vengono quindi generati due raggi rifratti paralleli tra loro, che possono essere ulteriormente separati attraverso un sistema di specchi.

I raggi devono convergere in un unico punto; si ottiene ciò ponendogli davanti una lente convergente; i raggi deviano e si incontrano.

E' necessario ora vedere in dettaglio cosa accade nel punto di incidenza.

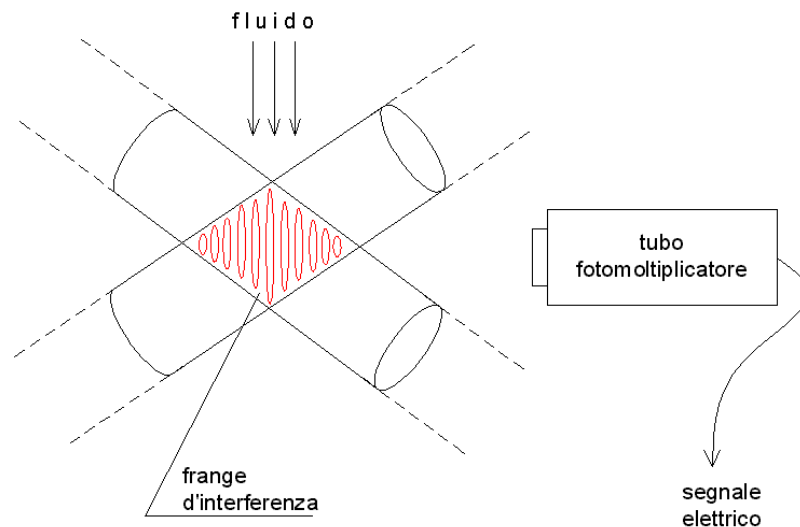


FIGURA 14: ingrandimento del punto di incidenza dei raggi

Nel punto di intersezione si generano dei fenomeni di interferenza, che generano frange chiare e frange scure (zone di luce alternate a zone d'ombra).

Se si pone in questa zona il fluido che scorre, le impurità presenti nel liquido verranno illuminate e oscurate, in corrispondenza delle frange chiare e scure.

Tramite un cannocchiale ed un fotomoltiplicatore, focalizzati nella zona d'interferenza, si ottengono in uscita dei segnali elettrici di intensità proporzionale alla luce ricevuta dal cannocchiale; se tali segnali vengono visualizzati su un apposito strumento, ad esempio un oscilloscopio, si ottiene un grafico del tipo mostrato in figura 14.

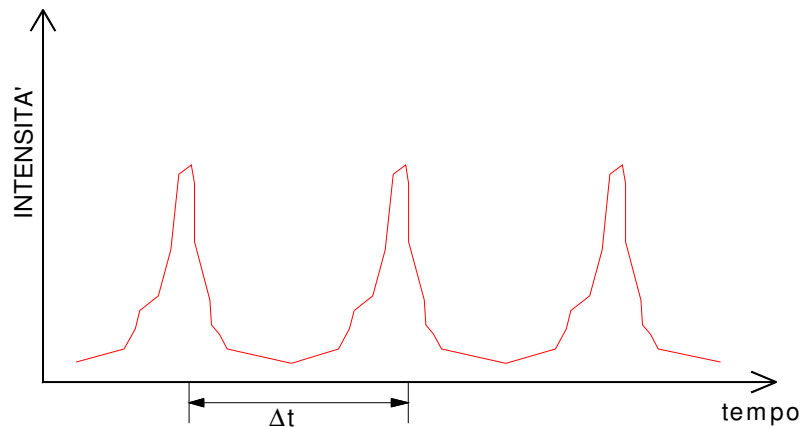


FIGURA 15: grafico intensità / tempo

Maggiore è la velocità del fluido, maggiore sarà il susseguirsi degli impulsi; dal grafico è possibile estrarre la frequenza  $\nu$  degli impulsi, essendo:

$$\nu = \frac{1}{\Delta T} \quad (18)$$

dove  $\Delta T$  è il tempo trascorso fra due distinti impulsi luminosi.

Tale frequenza  $\nu$  è proporzionale alla velocità delle particelle che passano, tramite un fattore dipendente dalla spaziatura delle frange, grandezza derivata dall'angolo di incidenza dei raggi.

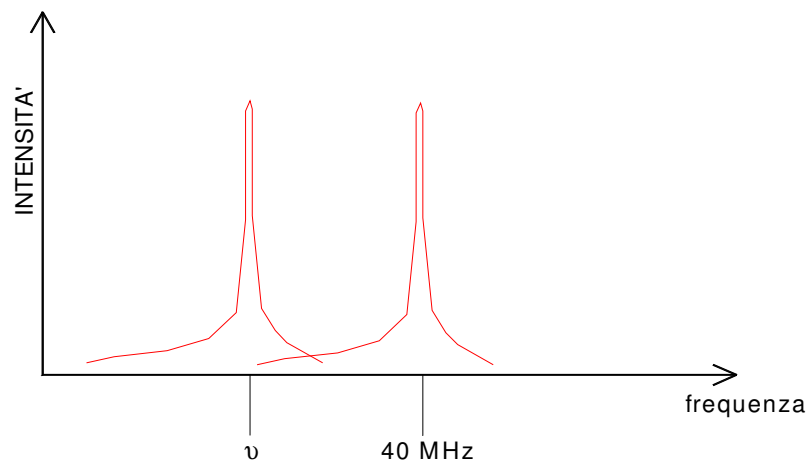
Realizzato in questo modo, lo strumento ha due difetti: non sente il verso del fluido e non rileva se il fluido è fermo, in quanto in questo caso non fornisce alcuna informazione; non è possibile sapere quindi se il fluido è fermo o lo strumento non è ben tarato.

Per ovviare a questi inconvenienti, si fa passare uno dei due raggi attraverso una cella di Bragg, avente la proprietà di imporre al raggio uno *shift in frequenza* di 40 MHz.

In questo modo se il fluido è fermo, la frequenza  $\nu$  di emissione della luce da parte delle particelle è 40 MHz, cioè la frequenza di movimento delle frange stesse imposta dalla cella di Bragg.

Se il fluido è in movimento, si verifica l'effetto Doppler, dovuto al contemporaneo movimento del fluido e delle frange: se la frequenza registrata è minore di 40 MHz, significa che la particella (e quindi il fluido) si sta muovendo in senso opposto al verso di scorrimento delle frange, mentre se la frequenza è maggiore, il fluido si muove in verso concorde a quello delle frange.

Dalla misura della frequenza  $\nu$  si riesce poi a risalire alla velocità del fluido, essendo questi due valori proporzionali tra loro.



*FIGURA 16: grafico della variazione della frequenza di emissione degli impulsi luminosi con il fluido in moto*

E' uno strumento molto preciso, ma la sua messa a punto risulta essere molto difficoltosa.

Ha inoltre il difetto di non poter lavorare su fluidi perfettamente trasparenti o su condotti non trasparenti alla radiazione laser.