

## Strumenti di misura

Gli strumenti di misura della fluidodinamica si possono sostanzialmente dividere in due tipi :

- Strumenti per misurare la *velocità media (o portata)* di un fluido.
- Strumenti per misurare la *velocità locale* di un fluido.

## Il metodo della pesata

E' il metodo più semplice che mi permette di determinare la portata di un fluido, e quindi la sua velocità media (appartiene al primo tipo di strumento) .

Il funzionamento è dato da un recipiente graduato in cui finisce il fluido di cui si vuole misurare la velocità. Conoscendo la quantità di liquido che riempie il recipiente in un dato periodo di tempo siamo in grado di calcolarci la portata in massa tramite la formula elementare :

$$\dot{M} = \Delta M / \Delta T$$

Questo metodo, ha grossi limiti dal punto di vista della precisione, infatti non è per niente facile sincronizzare l'inizio del tempo della misura con l'arrivo del liquido nel recipiente.

Infatti si capisce che al tempo iniziale  $T=0$  a cui corrisponde l'apertura della valvola il flusso dell' acqua non arriverà subito a “regime”, ma ci sarà un “transitorio” di tempo in cui il flusso del liquido uscirà più piano.

## Tubo di Pitot

Strumento di misura della velocità locale in un fluido in moto.

Il *Tubo di Pitot* si basa sulla considerazione sperimentale effettuata da *H. Pitot (1732)*

che , immergendo in una corrente liquida un tubo, piegato ad angolo retto, aperto da ambedue le estremità, una delle quali rivolta controcorrente, il liquido sale in esso al di sopra del livello statico di una altezza proporzionale all' altezza cinetica  $W^2/2g$  , ove  $W$  è la velocità del fluido nel punto considerato e  $g$  è la accelerazione di gravità.

*H. Darcy* unì due tubi uno rivolto contro corrente e l' altro in senso opposto .

Il dislivello tra i due menischi (peli liberi nei due tubi) è ancora proporzionale all' altezza cinetica e la velocità può essere calcolata mediante la formula :

$$W = K \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_2 - h_1)}$$

ove con  $h_1 - h_2$  si è indicato il dislivello tra i due menischi e con  $K$  un coefficiente di velocità che dipende dalla forma dell' estremità, dal tipo di fluido e dalle condizioni di moto.

I tubi di Pitot che attualmente si usano attualmente sono due : il tipo *Prandtl*, che ha l'estremità emisferica (fig. 2a), ed il tipo *Brabbè*, che ha l'estremità tronco conica (fig. 2b).

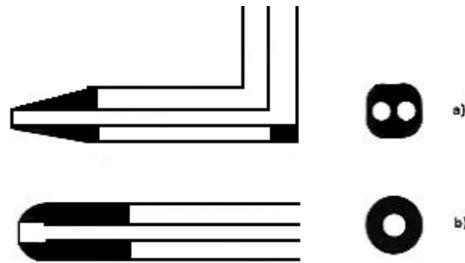


Figura 1: Tubo di Brabbè (a) e di Prandtl (b) , sezioni laterali

Entrambi i tipi sono formati da due tubi coassiali. Il tubo esterno presenta dei fori paralleli alla direzione della velocità (*presa statica*). Essi sono posti in modo tale che la pressione all'interno è pari alla pressione corrispondente al livello statico. Il tubo interno ha l'estremità controcorrente (*presa dinamica*).

Generalmente di acciaio inox può essere di diverse misure, si va da lunghezze di qualche centimetro e diametro di qualche millimetro a lunghezze di un metro e diametro di qualche centimetro.

La parte perpendicolare al terreno è detta *gambo*, mentre quella orizzontale al terreno è detta *testa* e può essere lunga una ventina di diametri.

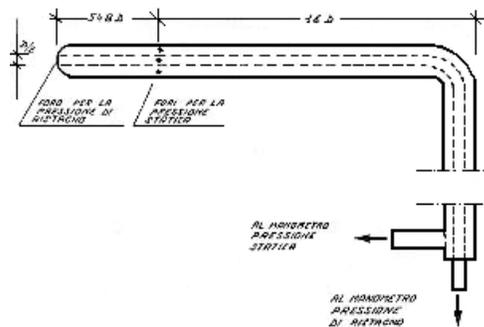


Figura 2 : tubo di Pitot , sezione laterale.

Lo strumento va puntato nella direzione opposta al verso del fluido di cui si vuole misurare la velocità. Come si nota in figura 3 il tubo è chiuso nella parte finale del gambo da un manometro; il fluido entra dalla testa del tubo, ma una volta riempiti gambo e testa è come se lo strumento fosse chiuso nella parte frontale, e quindi il fluido si vede costretto a girare attorno alla punta della testa. Nella parte iniziale della testa si ha evidentemente velocità nulla (punto di ristagno) e di conseguenza un massimo di pressione. Ad una distanza dalla punta della testa di circa 5-8 D (diametri) il fluido ha riacquisito la sua velocità, e qui grazie ai fori per la pressione statica viene presa la pressione suddetta.

Vediamo ora di risalire alla formula che mi permette di risalire al calcolo della velocità  $W$  del fluido partendo dall'equazione di Bernulli :

$$\frac{W_2^2 - W_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + R = -l$$

Innanzitutto individuiamo 2 sezioni, una all'ingresso del tubo e una all'altezza dei fori della pressione statica.

Vediamo quali termini dell'equazione possiamo trascurare ; il *lavoro*  $l$  perché non presente all'interno del nostro sistema , le *perdite di carico*  $R$  perché il tubo è costruito in modo ( bassa resistenza aerodinamica...) che possano essere trascurate.

Anche il termine  $g(z_2 - z_1)$  può essere trascurato in virtù del fatto che la posizione dei fori per la presa statica e l'asse del tubo stesso sono alla stessa quota, e poi la velocità  $W_1$  nella sezione 1 in quanto l'ingresso è un punto di ristagno e quindi  $W_1 = 0$ .

Quindi con le seguenti semplificazioni l'equazione diventa :

$$\frac{W_2^2}{2} + \frac{P_2 - P_1}{\rho} = 0$$

da cui :

$$W_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_1 - P_2)}{\rho}}$$

Quindi abbiamo che per determinare la  $W_2$  basta determinare la differenza di pressione tra le due sezioni prese in esame.

Per fare questo ci serviamo di un manometro.

### Manometro a tubo inclinato

E' un manometro a colonna di liquido impiegato per misurare differenze di pressione molto piccole. Esso è formato da un serbatoio, sul quale grava la pressione  $P_1$  e in cui pesca un tubo di vetro inclinato di un angolo  $\alpha$  e comunicante col recipiente a pressione  $P_2$  o lasciato alla pressione atmosferica. Si ottiene così un allungamento della scala di misura proporzionale a  $\sin \alpha$  essendo il dislivello pari a  $l \sin \alpha$  dove  $l$  è lo spostamento del menisco quando il manometro entra in pressione.

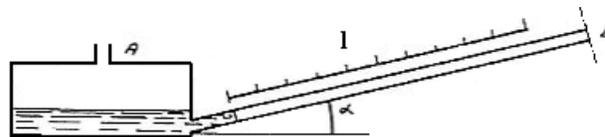


Figura 3: Manometro a tubo inclinato, sezione laterale.

## Manometro differenziale a membrana

In questo manometro vi è un elemento sensibile costituito da una membrana deformabile sotto pressione, la quale trasmette il suo movimento ad un *leveraggio* che aziona l'indice di una scala graduata (vedi figura 5).

I manometri a membrana sono utilizzati per misurare pressioni statiche relativamente basse (inferiori a 50 bar).

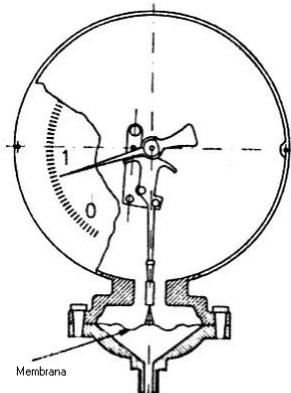


Figura 4: Manometro a membrana, sezione frontale.

A volte però al posto del leveraggio vengono usati *trasduttori di pressione*, cioè strumenti in cui la deformazione di una membrana produce un segnale elettrico che aziona l'indice di uno strumento o viene inviato ad un registratore o ad una apparecchiatura di controllo. A seconda di come il segnale elettrico viene prodotto si distinguono :

- *trasduttori piezoelettrici*,

che sono basati sulla proprietà delle sostanze piezoelettriche (quarzo) di emettere cariche elettriche quando vengono sottoposte a deformazioni meccaniche : tali cariche vengono raccolte su armature metalliche e producono un segnale di tensione proporzionale alla pressione (figura)

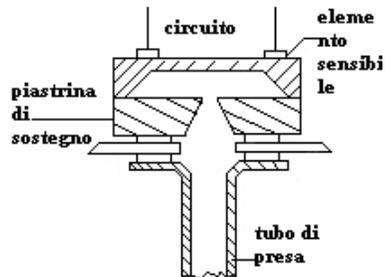


Figura 5: Trasduttore piezoelettrico, vista laterale.

- *estensimetri o strain gauge*,

il cui funzionamento è basato su una variazione di resistenza derivante dalla deformazione di un elemento sensibile di tipo metallico. Dalla seconda legge di Ohm risulta  $R = \sigma (L/A)$  per cui la resistenza di un conduttore è funzione, oltreché della resistività, anche delle dimensioni (lunghezza e sezione) del medesimo. Nel circuito di misura, nota la corrente, tale variazione di resistenza si traduce in una variazione di pressione proporzionale alla tensione.

## Anemometro

Strumento per la misura della velocità del vento. L'anemometro non viene usato solo in meteorologia, ma in senso più lato indica un misuratore di velocità di correnti gassose in un tunnel, gallerie aerodinamiche, condotti di impianti industriali, ecc. Esso, inoltre, installato a bordo degli aerei permette la misurazione della vera velocità di volo.

Si hanno due tipi di anemometri :

- *a coppe*
- *a pale*.

L'*anemometro a coppe*, usato soprattutto all'aperto per misurazioni meteorologiche, è costituito da un mulinello che su tre o quattro bracci orizzontali porta altrettante coppe metalliche semisferiche. Investito dal vento che esercita una pressione maggiore sulla superficie concava delle coppe, il mulinello entra in rotazione girando sempre nello stesso senso qualunque sia la direzione del vento con una velocità proporzionale a quella del vento.

L'*anemometro a pale* è simile al precedente, salvo che ora il mulinello porta sei o otto palette orizzontali; questo anemometro è particolarmente usato per la misura della velocità alle bocchette di ventilazione degli impianti industriali di condizionamento e ventilazione.

## Venturimetro

Strumento di misura della portata transiente in una condotta, detto anche "contatore di Venturi".

Il venturimetro è costituito da due tronchi, il primo convergente ed il secondo divergente vedi figura 9.

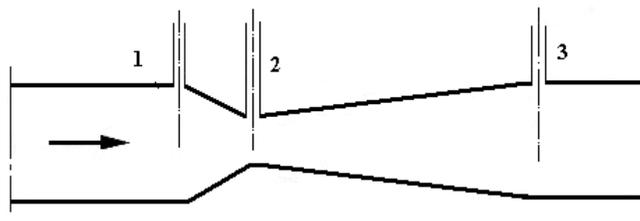


Figura 6 : Venturimetro , vista laterale

Come si può osservare in figura 9, lo strumento è costituito da tre manometri situati nei tre punti indicati in figura (1,2,3), e da un tubo con una brusca riduzione di sezione nella zona tra 1 e 2, e da un allargamento 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 (di solito viene recuperata circa il 90% della potenza che c'è in uno) ; 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:

$$\frac{W_2^2 - W_1^2}{2} + \frac{P_2 - P_1}{\rho} = 0$$

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.

$$\dot{M}_1 = \dot{M}_2$$

da cui:

$$\rho \cdot W_1 \cdot A_1 = \rho \cdot W_2 \cdot A_2$$

dove  $A_1$  e  $A_2$  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:

$$W_1 \cdot D_1^2 = W_2 \cdot D_2^2$$

da cui si ricava la velocità  $W_2$  in funzione di  $W_1$ :

$$W_2 = W_1 \cdot \frac{D_1^2}{D_2^2}$$

Si sostituisce ora l'espressione della velocità  $W_2$  nell'equazione :

$$W_1^2 \left( \frac{D_1^4}{D_2^4} - 1 \right) = \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}$$

In questo modo si ottiene l'espressione della velocità  $W_1$ :

$$W_1 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left( \frac{D_1^4}{D_2^4} - 1 \right)}}$$

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, mentre nel caso di liquidi, si è soliti usare manometri a membrana.

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 avrò differenze di pressioni misurabili, viceversa avverrà il fenomeno della cavitazione.

## Diaframmi e boccagli

Tutti e due questi strumenti in sfruttano la perdita di carico concentrata ottenuta per mezzo di un restringimento e successivo allargamento della sezione del tubo. Applicando la forma operativa dell'equazione di Bernoulli a questo semplice sistema risulta:

$$\Delta p = \rho \cdot \beta \cdot \frac{W^2}{2}$$

ove è possibile ottenere la misura di  $\Delta p$  per mezzo di un manometro differenziale, da cui :

$$W = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot \beta}}$$

ove  $\rho$  è la densità del fluido e  $\beta$ , coefficiente di perdita concentrata, che è una caratteristica propria dello strumento data dal costruttore.

Questo tipo di misuratori di portata presenta il vantaggio di essere facilmente intercambiabile e con un range di velocità  $W$  misurabili più ampio (grazie a diversi valori di  $\beta$  che può assumere lo strumento) rispetto ai tubi di Venturi, anche se quest'ultimo nonostante il maggior costo di boccali e diaframmi è maggiormente usato per i seguenti vantaggi che ha rispetto a questi :

- La forma del venturimetro assicura l'omogeneità e la simmetria assiale della vena, con la conseguenza di migliorare le condizioni di lavoro della presa di pressione, dalle quali dipende innanzitutto la precisione della misura della portata;
- La variazione del contorno interno del venturimetro, le piccole imprecisioni nella esecuzione della superficie interna e le piccole eccentricità che si possono verificare nella installazione non hanno molta influenza sulle misure;
- Il venturimetro presenta una maggiore invariabilità di indicazioni nel tempo, poiché le piccole scalfitture dovute all'azione delle particelle solide trasportate dal fluido esercitano una minore influenza sulle indicazioni dello strumento ;
- A parità di rapporto di strozzatura le perdite di carico idraulico che si hanno sul venturimetro sono molto minori.
- Non hanno l'enorme svantaggio di interferire col moto del fluido; come ad esempio nel campo di applicazioni alimentari in cui vi può essere l'accumulo di residui alimentari lungo il condotto (vedi diaframmi e boccali).

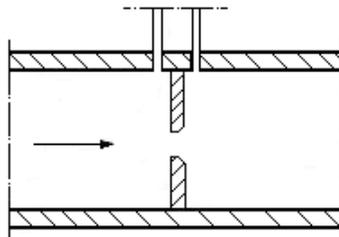


Figura 7: Diaframma , sezione laterale.

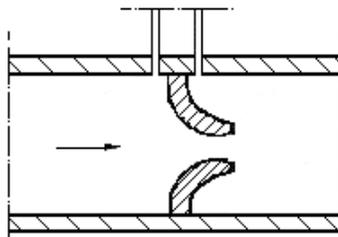


Figura 8: Bocaglio , sezione laterale.

### Trasduttore di tipo magnetico

Si avvolgono delle spire attorno al condotto e vi si fa scorrere una corrente variabile nel tempo in maniera tale che nel condotto vi sia un campo magnetico oscillante. Questo campo magnetico viene perturbato (cioè si genera una forza elettromagnetica) dal passaggio di fluido paramagnetico nel condotto (come ad esempio l'acqua).

Dalla formula :

$$\dot{M} = A \frac{E_m}{K_n H_n d} \rho$$

dove A è la sezione del condotto  $E_m$  è la forza elettromotrice  $K_n$  è la costante di proporzionalità  $H_n$  è il campo magnetico applicato e da misure dell'intensità della perturbazione è possibile risalire alla velocità e quindi alla portata del fluido .

Risulta evidente dalla descrizione il limite del funzionamento di questo trasduttore: esso funziona solamente in presenza di fluido paramagnetico.

## Rotametro

I flussometri sono strumenti idonei alla misura di portate piccole o medie. Essi sono costituiti da un tubo di vetro conico entro cui si trova un galleggiante, che può avere sezione conica, come è indicato in figura 12 ,o sferica.

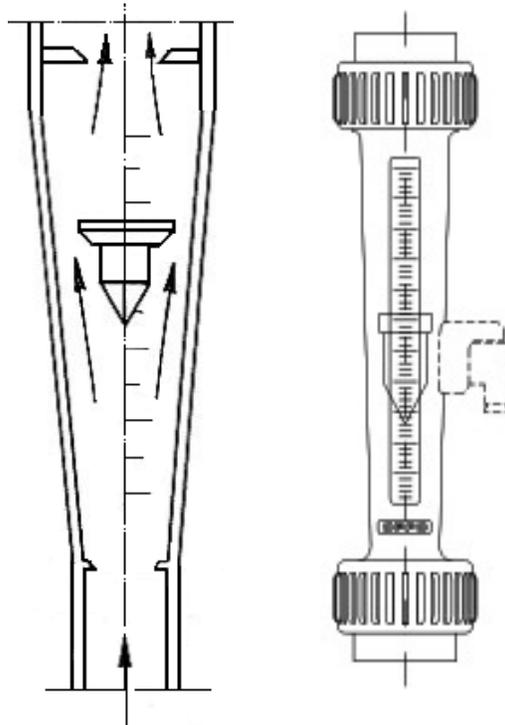


Figura 9: Rotametro, vista frontale.

Il rotametro è dispositivo verticalmente con l'entrata in basso e l'uscita in alto. La misura si basa sul fatto che l'aria, percorrendo il rotametro, investe il galleggiante e l'oltrepassa. Il galleggiante diventa per tanto un ostacolo che crea una perdita di pressione localizzata, dovuta al restringimento della sezione di passaggio. Si ottiene quindi un equilibrio tra la spinta dovuta alla differenza di pressione a monte e a valle del galleggiante ed il peso del galleggiante stesso. Essendo questo costante, se il flusso

aumenta rispetto ad una certa condizione di equilibrio, si ha un incremento della caduta di pressione che provoca il sollevamento del galleggiante fino ad nuovo equilibrio. Si stabilisce allora una relazione tra la portata e la posizione del galleggiante. La posizione viene letta su una scala graduata incisa sul tubo di vetro o affiancata ad esso.

I rotametri richiedono una taratura rispetto a condizioni di pressione e di temperatura standard di riferimento. Con formule di correzione possono però essere utilizzati in condizioni di esercizio differenti. La portata che forniscono è comunque una portata di massa, espressa per lo più in volumi normali.

I rotametri possono anche essere utilizzati in relazioni con diaframmi per realizzare un misuratore in cui l'elemento primario per la misura della portata è il diaframma, e il manometro differenziale è costituito da un rotometro la cui indicazione, proporzionale al flusso che lo attraversa e quindi alla caduta di pressione, dà il valore della portata che percorre la tubazione principale.

## Misuratori a turbina

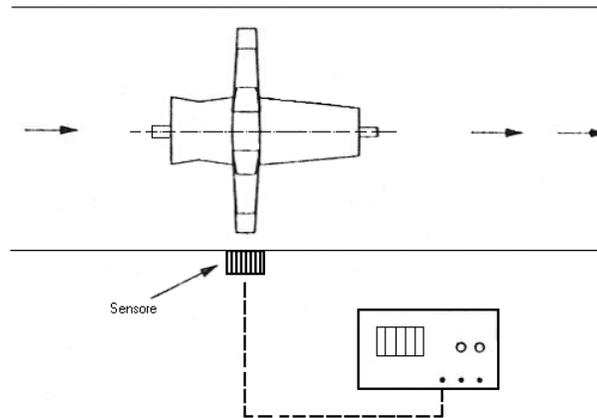


Figura 10: Misuratore a turbina, vista laterale.

Le turbine che operano sui liquidi sono dei misuratori di velocità media (di portata). In un corpo cavo da montare in linea sulla tubazione è calettata una turbina che ruota per effetto del flusso, compiendo nell'unità di tempo un numero di giri proporzionale alla portata. Di fronte alle palette della turbina è inserito un misuratore induttivo, che conta il numero di palette che gli passano davanti nell'unità di tempo. Le indicazioni digitali del trasduttore vengono convertite in un segnale analogico continuo proporzionale alla portata. I misuratori a turbina offrono un vastissimo campo di impiego, che a seconda delle dimensioni dell'apparecchiatura da frazioni di 1/min a 10000 1/min.

## Ventoline

Per velocità molto piccole si usano le ventoline o anemometri a pale, costituite da una ventola che viene esposta al flusso, il quale mette in movimento la ventola che fornisce impulsi elettrici attraverso un magnete posto su una pala e un sensore sul

supporto, generando un'onda che elaborata matematicamente fornisce il valore della velocità.

E' tipico il loro utilizzo negli impianti aerazione perché avendo una superficie abbastanza elevata possono mediare automaticamente l'effetto del flusso disuniforme.



Figura18. Ventoline portatili elettroniche

## Anemometri

### Anemometro a filo caldo

Questo strumento è un misuratore puntuale di velocità. Il suo principio di funzionamento si basa sullo scambio di calore che avviene tra il filamento di platino in cui circola corrente e il fluido che attraversa il tubo.

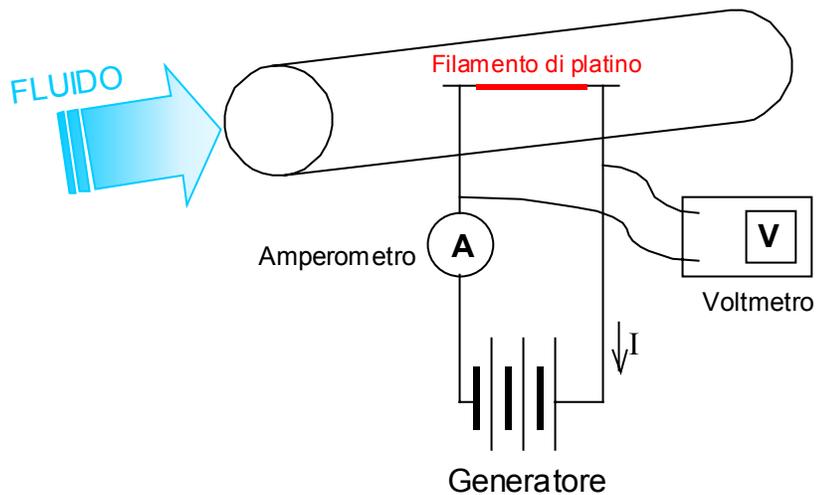


Fig. 1 – Anemometro a filo caldo.

All'interno del tubo viene teso un filo di platino nel quale viene fatta passare una corrente  $I$ . Utilizzando un voltmetro e un amperometro misuriamo il rapporto fra la tensione ai capi del filo  $\Delta V$  e la corrente  $I$ ; riusciamo così a conoscere il valore della resistenza elettrica  $R$ :

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Sappiamo anche che la resistenza elettrica di un conduttore ohmico dipende in modo lineare dalla temperatura:

$$R = R(T) \quad (2)$$

Quindi siamo in grado di determinare la temperatura del filo  $T_{\text{filo}}$ .

Inoltre dal prodotto  $\Delta V \cdot I$  sappiamo il calore dissipato per effetto Joule per unità di tempo; dalle relazioni sullo scambio termico si ha:

$$\Delta V \cdot I = \dot{Q} = h \cdot S_{\text{filo}} \cdot \Delta T \quad (3)$$

Ove  $S_{\text{filo}}$  è la superficie del filo,  $\Delta T$  è la differenza di temperatura tra il filo e la temperatura del fluido ad un'adeguata distanza, mentre  $h$  è l'unica incognita che possiamo così determinare.  $h$ , che viene chiamato coefficiente di convezione, è funzione di alcuni parametri tra cui la velocità del fluido  $W$ . Solitamente il legame tra  $h$  e  $W$  non è lineare; esistono delle opportune tabelle però che permettono di conoscere  $h$  sapendo il valore del rapporto  $\dot{Q}/\Delta T$ .

L'anemometro a filo caldo è collegato a degli strumenti elettronici che hanno in memoria le tabelle necessarie al calcolo di  $h$ . In questo modo lo strumento riporta direttamente come valore in uscita la velocità del fluido.

Questo anemometro presenta il vantaggio di essere piuttosto piccolo se confrontato con altri trasduttori di portata, è quindi utilizzabile in condotti stretti, anche se le ridotte dimensioni del filo di platino lo rendono molto fragile.

### Anemometro Laser-Doppler

Questo strumento è un misuratore puntuale di velocità basato sul fenomeno dell'interferenza e sull'effetto Doppler. Il tipo di radiazione elettromagnetica utilizzata è la luce laser.

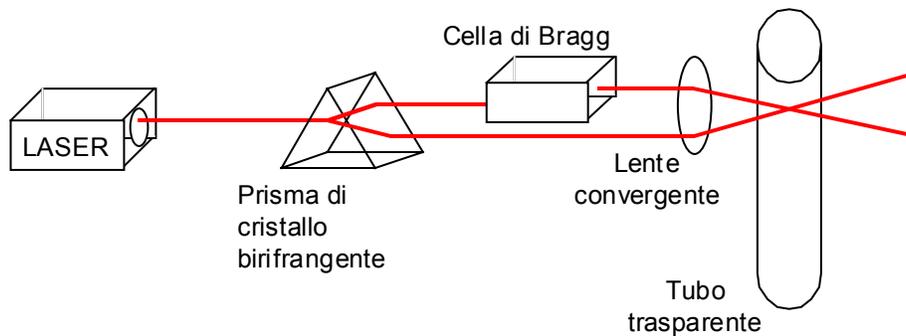


Fig. 2 – Percorso della luce laser.

Lo strumento è costituito da una sorgente laser che produce un fascio coerente (cioè tutti i fotoni mantengono una differenza di fase costante fra loro) che viene sdoppiato da un cristallo birifrangente (cioè con due indici di rifrazione) in modo da avere a disposizione due fasci coerenti. Uno dei due fasci subisce uno shift in frequenza (cioè viene portato ad una frequenza pari a 40 MHz) passando in una Cella di Bragg; infine i due raggi passano in una lente convergente che focalizza il fascio in un punto interno al condotto in cui voglio misurare la velocità  $W$  del fluido.

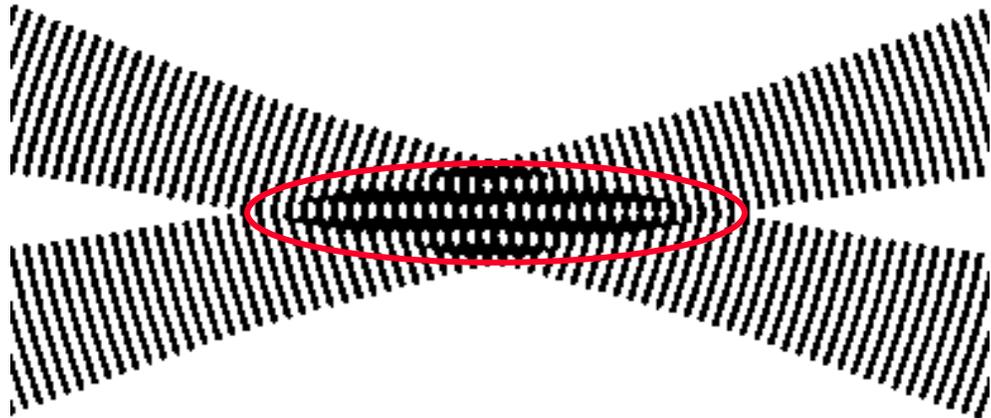


Fig. 3 – Frange di interferenza della luce laser nel punto di incidenza dei due raggi

Nel punto di intersezione si hanno fenomeni di interferenza. Significa che nascono frange chiare e frange scure (cioè luoghi distinti in cui vi è luce e in cui vi è buio che si alternano fra loro); è importante notare che siccome i due raggi diversa hanno diversa frequenza si potrà osservare un costante movimento delle frange in un determinato verso.

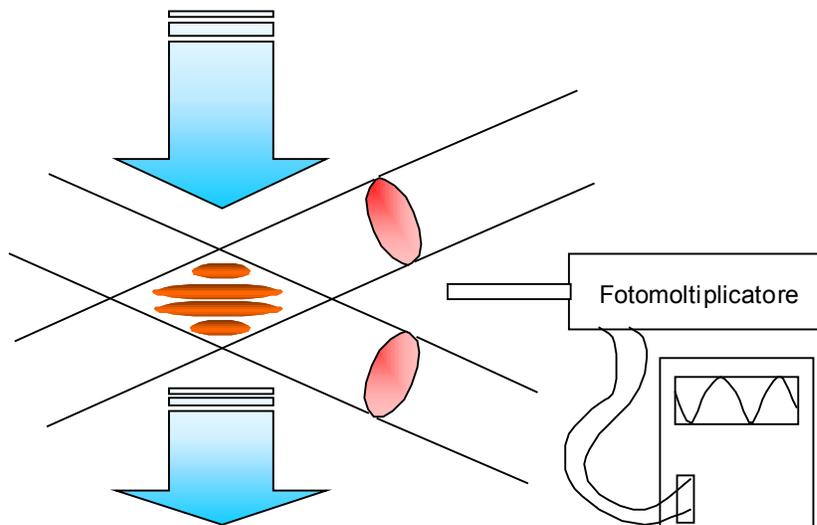


Fig. 4 – Zona di interferenza del laser nel tubo

Il fluido transita nel tubo in direzione normale rispetto al piano formato dalle frange di interferenza. Se il tubo in cui transita il fluido è trasparente alla luce laser e il fluido è trasparente e contenente delle particelle o polveri fotoluminescenti (capaci cioè di emettere luce quando illuminate) quando queste passano attraverso una frangia chiara riflettono la luce, generando così un impulso luminoso, mentre quando attraversano la frangia scura non danno luogo a riflessione.

Un fotomoltiplicatore è un trasduttore fotonico-elettrico cioè uno strumento in grado di trasformare gli impulsi luminosi che riceve in impulsi elettrici. Se, utilizzando un opportuno gruppo di lenti, focalizziamo il fotomoltiplicatore nel punto in cui i due fasci laser si incontrano possiamo misurare, collegando il fotomoltiplicatore ad un oscilloscopio, il tempo  $\Delta\tau$  fra due distinti impulsi luminosi emessi dalla particella fotoluminescente. Otteniamo quindi la frequenza  $\nu$  di emissione con la nota formula:

$$\nu = \frac{1}{\Delta\tau} \quad (4)$$

Per il corretto funzionamento dello strumento la Cella di Bragg è indispensabile. Se il fluido nel condotto fosse fermo, le particelle fotoluminescenti non attraverserebbero le frange chiare e quindi non si avrebbe emissione di impulsi luminosi di alcun tipo. Grazie alla differenza di frequenza di 40 MHz tra i due fasci dovuta alla Cella di Bragg invece le frange di interferenza si muovono e con il fotomoltiplicatore misuriamo una frequenza  $\nu_0$  di 40 MHz.

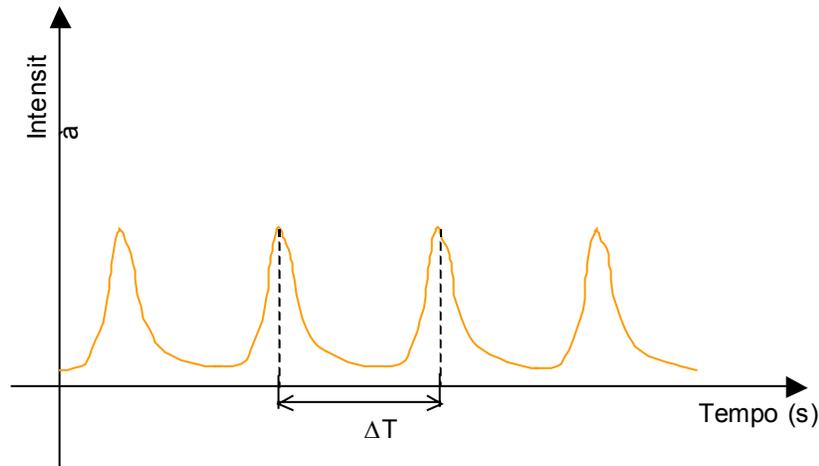


Fig. 5 – Emissioni luminose rilevate dal tubo fotomoltiplicatore (senza shift in frequenza di uno dei due raggi)

Senza l'effetto della Cella di Bragg non si riuscirebbe nemmeno a determinare il verso del movimento del fluido nel condotto. Quando il fluido è in movimento si ha l'effetto Doppler dovuto al contemporaneo movimento sia del fluido che delle frange: se la frequenza  $\nu$  di emissione degli impulsi luminosi dovuti alle particelle è maggiore di 40 MHz significa che la particella fotoluminescente e quindi con essa il fluido si sta muovendo in senso opposto rispetto al verso di scorrimento della frange. Dalla misura di

$v$  si riesce a risalire alla velocità  $W$  del fluido in quanto essa è proporzionale a  $v$ . Più precisamente, una volta nota la distanza  $d$  tra due frange di interferenza la velocità è  $W = d \cdot v$ .

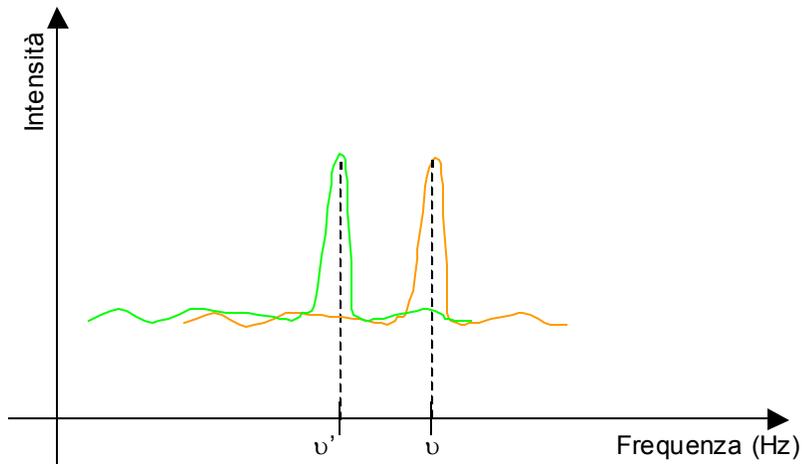


Fig. 6 – Emissioni luminose rilevate dal fotomoltiplicatore (utilizzando la Cella di Bragg); fluido in moto ( $v'$ ) e fluido fermo ( $v = 40$  MHz).

Purtroppo questo dispositivo è molto costoso e funziona solo con fluidi trasparenti, nei quali è possibile introdurre particelle fotoluminescenti, e che possono essere contenuti in tubi anch'essi trasparenti ai raggi laser.

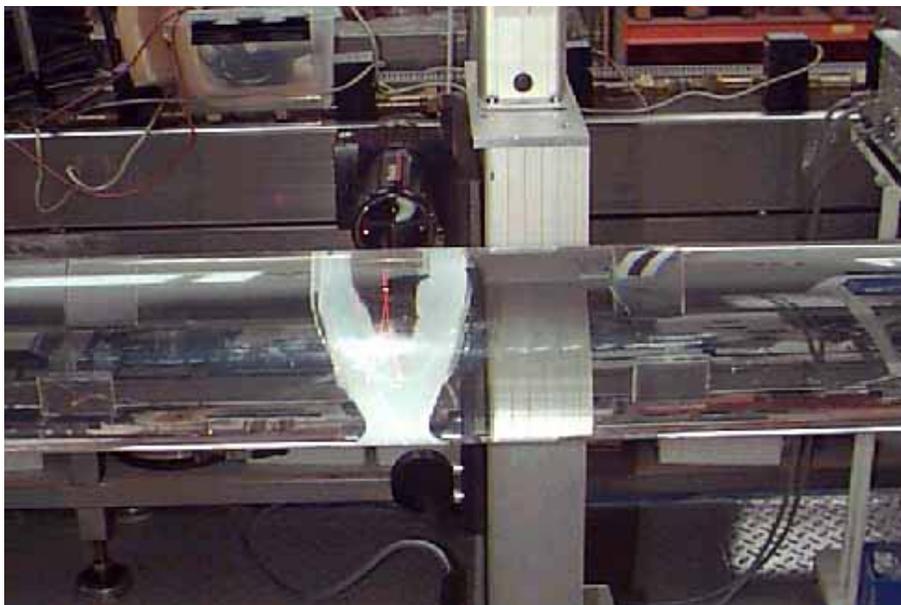


Fig. 7 – Un esempio di anemometro prodotto dalla Dantec che misura la velocità del fluido all'interno di un tubo trasparente.

Nonostante questi svantaggi è uno strumento di altissima precisione nella misura della velocità, che non richiede calibratura e che riesce ad analizzare un'area ristrettissima (praticamente puntiforme) del condotto, quindi dotato di un'altissima risoluzione spaziale, poiché la misura viene effettuata nel punto d'intersezione dei raggi laser. Infine è da notare come appunto grazie alla natura stessa della radiazione luminosa il flusso che viene esaminato non viene contaminato in alcun modo.