



LEZIONE # 16

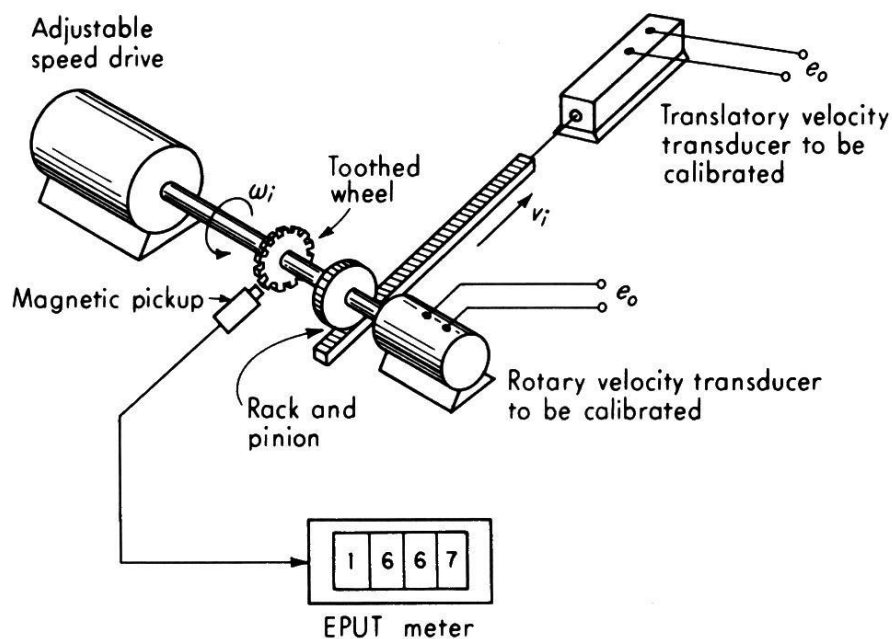
Le **misure di velocità** possono essere eseguite con modalità molto diverse, a seconda del tipo di elemento o di situazione per i quali siamo interessati a conoscere la velocità.

Le **velocità lineari** v sono importanti soprattutto con riferimento agli *spostamenti dei veicoli terrestri*: autoveicoli, veicoli ferroviari, carri di qualunque tipo, movimentati per mezzo di ruote su strada, su rotaie, su funi e altro ...

Le **velocità angolari** ω sono importanti quando si è interessati a *misurare la potenza* erogata dai motori attraverso un albero rotante (di qualunque tipo) oppure la potenza assorbita da una qualunque macchina operatrice.

Ma le **velocità lineari** v sono importanti anche quando si vuole conoscere l'entità dello *spostamento di una massa di fluido*, sia nei casi in cui si è interessati alla *misura della velocità o della portata di un fluido* oppure quando si desidera misurare la velocità relativa di un mezzo (navale o aereo) immerso nel fluido (acqua o aria).

Si rifletta subito sul fatto che la *misura della velocità per veicoli* è una tra le operazioni di misura più diffuse e frequenti che si possano trovare nell'ingegneria. Basti pensare all'enorme numero di veicoli di ogni tipo in circolazione nel mondo. La "quasi totalità" di essi è equipaggiata a bordo con almeno un dispositivo per la misura della velocità. Poiché la quasi totalità dei veicoli terrestri (salvo rarissime eccezioni) è movimentata attraverso ruote, si riconosce subito che la quasi totalità delle misure di velocità per i veicoli può essere effettuata attraverso la *misura della velocità angolare* dell'albero o del mozzo che collega una delle ruote al veicolo. La velocità di avanzamento del veicolo, in condizioni di non strisciamento delle ruote, deriva immediatamente dalla semplicissima relazione $v = \omega \cdot r$ dove r è il raggio (nominale) della ruota strumentata. La dipendenza diretta tra v ed ω , attraverso il raggio r di una ruota, è illustrata anche nella figura 16.1, dove sono schematizzati contemporaneamente alcuni metodi e strumenti dedicati alla misura di velocità lineare ed angolare.



Velocity-calibration setup.

Figura 16.1

Per questo motivo, si illustreranno qui i principi di funzionamento solamente di alcuni misuratori di velocità angolari ω , molto diffusi nell'ingegneria meccanica.

Lo strumento più semplice che si può immaginare è il contagiri meccanico ovvero, un congegno che, in qualche modo, *conta le rotazioni* (i giri) dell'albero φ effettuate in un intervallo di tempo Δt prefissato. La velocità angolare risulta immediatamente dalla $\omega = \varphi / \Delta t$. Qualunque sia la tecnica utilizzata per registrare i giri compiuti dall'albero (metodo meccanico, elettrico o ottico), in uscita dallo strumento si ottiene solamente una misura della *velocità media* nell'intervallo di tempo Δt .

Lo schema di uno strumento meccanico capace di rilevare velocità angolari ω che abbiano anche una "certa dinamica" è riportato sotto nella figura 16.2.

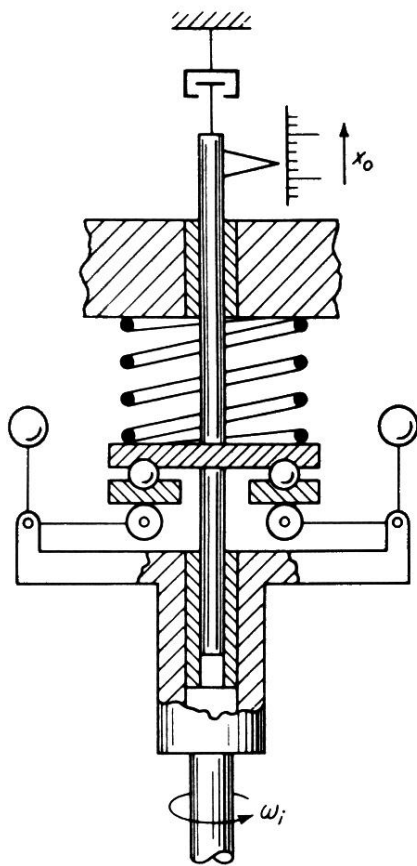


Figura 16.2

Lo strumento è basato sulla **forza centrifuga** $F_c = mr\omega^2$ che agisce sulle due sfere laterali di massa m , distanti r dall'asse di rotazione, quando lo strumento è posto in rotazione alla medesima velocità angolare incognita dell'albero ω .

L'effetto della forza centrifuga è di allontanare le sfere dall'asse di rotazione dell'albero in modo proporzionale alla velocità angolare e, conseguentemente, di elevare l'indicatore x ad una quota che rappresenta la misura di ω . La forza centrifuga è equilibrata dalla **forza elastica** di compressione della molla $F_e = kx$. Un cuscinetto reggispinta disaccoppia la parte (bassa) rotante dello strumento da quella (alta) fissa. La **curva di graduazione** ha origine dall'equilibrio delle forze $F_c = F_e$ che vale:

$$mr\omega^2 = kx \quad \text{ovvero:} \quad x = \frac{mr}{k} \cdot \omega^2$$

Lo strumento non è lineare e, tra l'altro, la distanza delle masse m dall'asse di rotazione $r = r(\omega)$ non è neppure costante, ma dipende dalla velocità angolare. Questa limitazione si supera con una operazione di taratura del trasduttore. Compatibilmente con l'inerzia delle masse in gioco, è comunque uno strumento in grado di effettuare misure di velocità angolari istantanee.

Per la misura delle velocità angolari esistono tutta una serie di strumenti elettrici basati su principi fisici assai diversi tra loro. Si desidera qui solamente richiamare le **dinamo tachimetriche** in quanto, questi strumenti sono largamente diffusi nel settore industriale per la misura ed il controllo delle velocità angolari dei motori e delle macchine operatrici.

Un **generatore tachimetrico in corrente continua** (DC), equipaggiato con un magnete permanente o con un elettromagnete, produce in uscita un segnale in tensione e_o proporzionale alla velocità angolare ω_i . La legge fisica di base sulla quale si fonda il funzionamento delle dinamo tachimetriche è $e_o = Blv_i$, dove B indica l'intensità del campo magnetico, l la lunghezza nominale delle bobine e v la velocità relativa delle bobina rispetto al campo magnetico. Le dinamo tachimetriche sono strumenti la cui progettazione meccanica è mirata all'ottenimento di un segnale e_o quanto più alto possibile (alta *sensibilità*) anche per ω basse. La relazione operativa della **curva**

di graduazione generalmente assume la forma: $e_o = \frac{n_p n_c \phi}{60 n_{pp}} \cdot N$ dove n_p indica il numero di poli, n_c

il numero di conduttori in armatura, Φ il flusso magnetico per polo o linea, N la velocità angolare in giri al minuto, n_{pp} il numero di percorsi paralleli tra spazzole positive e negative. Come tutte le dinamo, sono strumenti che, alle basse velocità, soffrono di un'ondulazione residua sovrapposta al segnale di uscita che risulta difficile da filtrare.

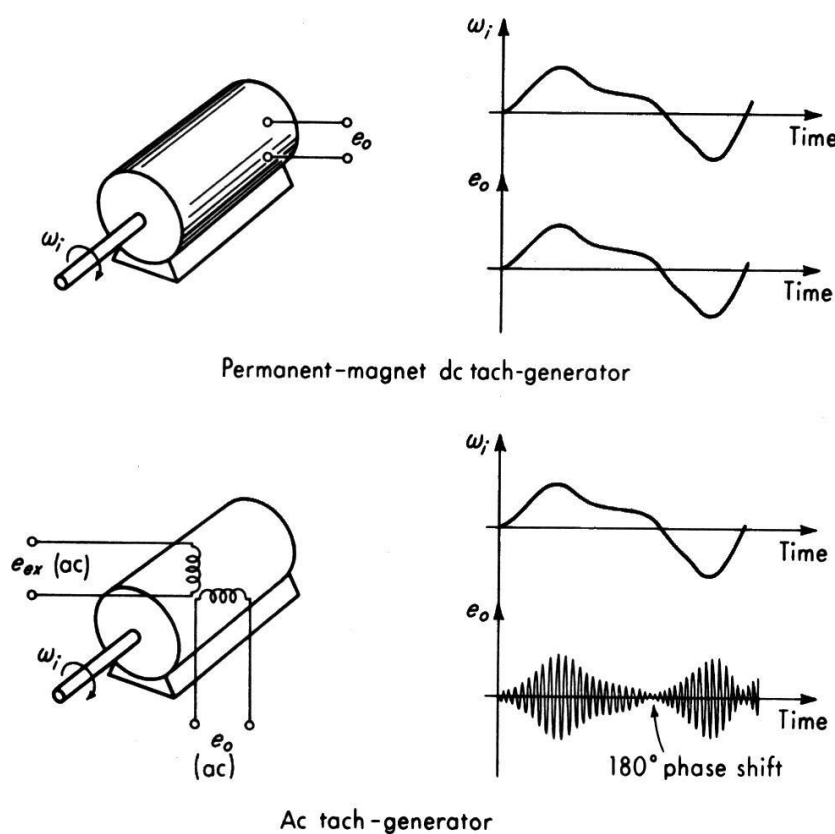


Figura 16.3

Un *generatore tachimetrico in corrente alternata (AC)* è uno strumento ad induzione, dove la tensione alternata generata dagli avvolgimenti primari viene trasferita agli avvolgimenti del secondario per mezzo di un rotore a gabbia di scoiattolo. Il segnale in uscita (e_o) è una tensione alternata che possiede la stessa frequenza della alimentazione primaria (e_{ex}) ed ha un'intensità proporzionale alla velocità angolare del rotore. Anche qui la legge fisica alla base del funzionamento è $e_o = Blv_p$ dove con v_p si è indicata la velocità periferica delle barre della gabbia di scoiattolo $v_p = \omega \cdot r$. Si tratta in sostanza di uno *strumento carrier modulatore in ampiezza*.

L'uscita in alternata dello strumento manifesta un salto di fase di 180° quando la velocità angolare dell'albero si inverte. Sono strumenti semplici e intrinsecamente robusti, che non prevedono contatti striscianti soggetti ad usura. Le dinamo tachimetriche AC sono strumenti che però, come tutti gli strumenti carrier a modulazione, hanno una banda passante limitata dalla frequenza della portante. Per ovviare a tale limite si trovano in commercio strumenti con avvolgimento primario alimentato a 400Hz, che per le variazioni usuali sulle velocità angolari in ingresso ω_i è più che soddisfacente. Gli schemi di principio con i diagrammi degli ingressi e delle uscite di due dinamo tachimetriche sono riportati nella figura 16.3.

Gli strumenti visti fin qui, e molti altri in commercio, hanno tutti l'inconveniente di dover essere connessi meccanicamente con l'albero che ruota alla velocità angolare incognita ω . Ciò significa che la coppia che pone in rotazione lo strumento viene prelevata dall'albero in esame. Questa circostanza influisce sulla *finezza* dello strumento e potrebbe essere non tollerata.

Un metodo per misurare la ω che non richiede il contatto con l'albero è il seguente: sulla testa dell'albero rotante viene applicato un piccolo disco bianco con una tacca nera incisa sulla periferia, come indicato in figura 16.4.

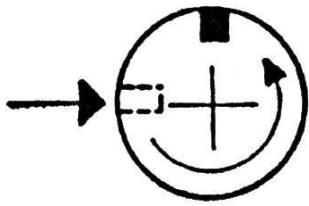


Figura 16.4

Ad una certa distanza, perpendicolarmente al disco, viene posta una lampada capace di scaricare ad intermittenza, che produce dei lampi di luce con una durata dell'ordine dei $10 \mu\text{s}$ (10^{-5} s). Si ottiene così una illuminazione del disco intermittente a "flash".

L'operatore è in grado di variare la frequenza delle scariche della lampada per mezzo di un apposito dispositivo (vedi oltre).

La lampada si accende quindi con frequenza f_g *variabile*, mentre il

disco ruota alla frequenza $f = \frac{\omega}{2\pi}$ *incognita*.

Quando l'operatore riesce a regolare la frequenza della lampada in modo da avere $f_g = f$, si ottiene un effetto ottico che fa "apparire la tacca ferma" sempre nella stessa posizione. Di fatto, la lampada emette un lampo di luce da $10 \mu\text{s}$ sempre e solo quando la tacca scura ripassa, nel suo moto rotatorio, esattamente per la medesima posizione. L'effetto ottico è "aiutato" dal tempo di persistenza delle immagini sulla retina dell'occhio umano, che è dell'ordine di $1/25$ di secondo, molto superiore al tempo di accensione della lampada.

Se l'operatore dovesse impostare una frequenza di accensione della lampada f_g *leggermente inferiore* alla frequenza di rotazione f del disco, l'effetto ottico sarebbe di osservare la tacca muoversi lentamente in avanti, ovvero nel verso concorde con la rotazione del disco. Questo perché in ogni periodo $1/f_g$ impiegato dalla lampada per emettere un altro flash, la tacca sul disco avrà avuto il tempo di compiere un giro completo, più un piccolo angolo supplementare, la cui ampiezza dipende proprio dalla differenza dei due periodi $1/f_g - 1/f$.

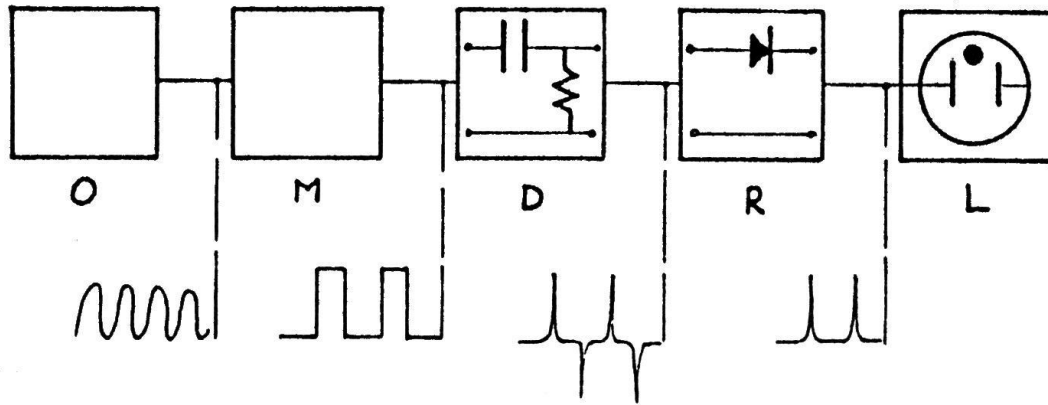
Se l'operatore dovesse impostare una frequenza di accensione della lampada f_g *leggermente superiore* alla frequenza di rotazione f del disco, l'effetto ottico sarebbe di osservare la tacca muoversi lentamente all'indietro, ovvero nel verso opposto a quello della rotazione del disco. Questo effetto, apparentemente sorprendente, dipende dal fatto che nel periodo $1/f_g$ tra due accensioni successive della lampada, la tacca non fa a tempo a riportarsi esattamente sulla posizione di partenza e, rispetto all'accensione del flash, ad ogni giro "rimane indietro" di un piccolo angolo, la cui ampiezza dipende ancora dalla differenza dei due periodi $1/f - 1/f_g$.

L'effetto ottico appena descritto è **l'effetto stroboscopio** che può essere utilizzato per la misura senza contatto della velocità angolare $\omega = 2\pi f$ di un albero.

Si faccia attenzione al fatto che, se le frequenze in gioco sono elevate, è possibile osservare la tacca ferma anche con una frequenza della lampada $f_g = \frac{1}{2}f$. Infatti, in questa condizione la tacca ha il

tempo di compiere esattamente due giri. Per $f_g = 2 \cdot f$ invece, si osservano due tacche ferme, diametralmente opposte; in questa condizione la tacca ha il tempo di compiere solamente mezzo giro. Per evitare errori di giudizio grossolani, è buona norma iniziare a variare la frequenza della lampada a partire da frequenze alte e scendere mano mano, fino ad osservare un'unica tacca ferma.

Per l'albero viene quindi misurata la velocità $\omega = 2\pi f_g$. Più che uno strumento vero e proprio, lo stroboscopio è un *metodo di misura* che richiede l'intervento e il giudizio dell'operatore. Esso viene utilizzato tutt'oggi soprattutto per il monitoraggio continuo di quelle velocità angolari che devono rimanere rigorosamente costanti. La parte strumentale è costituita unicamente dal dispositivo di alimentazione e controllo della frequenza della lampada. Uno schema semplice di come è realizzata la catena di controllo della lampada e riportato sotto nella figura 16.5.



O - oscillatore , M - multivibratore , D - differenziatore , R - raddrizzatore , L - lampada a gas

Figura 16.5

Lo stroboscopio è un metodo preciso e molto sensibile, perché consente letteralmente di “vedere” il comportamento della ω (osservazione delle fluttuazioni: *wow and flutter*). E’ capace di misurare velocità ω molto elevate, ben oltre i valori consueti delle applicazioni industriali, ha quindi un campo di misura molto esteso. E’ però un metodo che “non ha banda passante” ovvero, è un metodo per la misura di ω praticamente costanti. Si faccia bene attenzione a non confondere il “valore numerico” della frequenza di rotazione $f = \omega/2\pi$ con la “variazione della velocità” $\omega(t)$ che è la grandezza in ingresso.

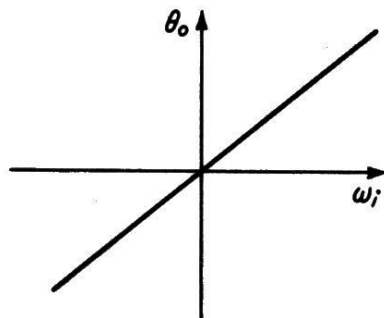
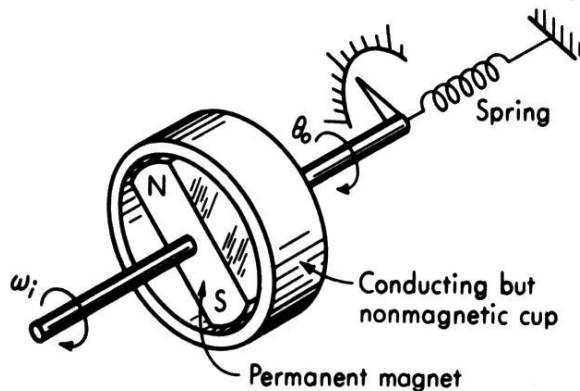


Figura 16.6

Uno degli strumenti più diffusi per la misura della velocità angolare ω , soprattutto in virtù del suo impiego nel settore dell’automazione, è certamente il **tachimetro** o **contagiri magnetico**. Gli elementi fondamentali dello strumento, illustrati nella figura 16.6 di lato, sono due alberi folli tra loro. Ad uno degli alberi è collegata una cappa a forma di bicchierino cilindrico, con la parte cilindrica esterna fatta di materiale conduttore. Questo è l’albero al quale è collegato l’indice (in figura), ed esso è fermato al telaio per mezzo di una molla elastica di richiamo. L’altro albero, ad un estremo è collegato meccanicamente all’albero che ruota con la velocità incognita ω mentre, all’altro estremo viene fissato un magnetino permanente che gira dentro la cappa cilindrica.

Il magnetico e la cappa non hanno alcun contatto meccanico. Quando il magnetino è posto in rotazione alla velocità ω dentro alla cappa, induce nel circuito elettrico che questa costituisce le *correnti parassite* i . Le correnti indotte nella cappa si oppongono al moto del



magnetino con la forza $F = Bli$. In realtà, le forze agiscono in prossimità delle espansioni polari del magnetico per cui viene a crearsi una coppia di forze $C = F \cdot b = Bil \cdot b$ che si oppone al moto relativo, con b braccio della coppia. Le correnti parassite i non sono di agevole determinazione. Ma per esprimere la f.e.m. indotta nella cappa vale sempre la relazione $e = Blv$ con $v = \omega \cdot b/2$, velocità periferica della rotazione. E' quindi possibile esprimere la corrente $i = \frac{e}{R} = \frac{Blv}{R} = \frac{Blb \cdot \omega}{2R}$

Sostituendo quest'ultima relazione in quella della coppia scritta poco sopra, si ottiene:

$$C = Blb \cdot \frac{Blb \cdot \omega}{2R} = \frac{(Blb)^2 \cdot \omega}{2R}$$

La coppia frenante tenderebbe a trascinare nella rotazione la cappa, ma questa è richiamata dalla coppia elastica $C_e = k\theta$.

L'equazione di equilibrio dinamico, per ogni valore della velocità angolare ω , è quindi $C = C_e$

ovvero: $\frac{(Blb)^2 \cdot \omega}{2R} = k \cdot \theta$ lo strumento indica in uscita un angolo θ proporzionale alla velocità

angolare ω . La *curva di graduazione* è lineare: $\theta = \frac{(Blb)^2}{2Rk} \cdot \omega$, ed è riportata anche in figura 16.6.

Per la **misura della velocità di un fluido**, occorre considerare in principio *fluidi incompressibili* ovvero, liquidi o gas in movimento con velocità $v \ll v_s$ molto inferiori a quella del suono.

Per misurare la velocità di un fluido, una prima idea potrebbe essere quella di immettere nella corrente fluida dei corpuscoli solidi che, una volta immersi, vengono trascinati dal flusso e svolgono la funzione di "indicatori" della velocità del fluido. Per quanto elementare possa sembrare questa tecnica, si invita a riflettere che su di essa sono basate alcune delle misure di velocità per fluidi tecnologicamente più avanzate come, ad esempio, la *fluoroangiografia* per la misura della velocità del sangue nelle arterie e nelle vene, eseguita con l'ausilio di traccianti radio-opachi immessi nel flusso sanguigno, oppure la PIV (*Particle Image Velocimetry*), con la quale è possibile effettuare la ricostruzione dinamica dell'intero campo delle velocità o delle vorticosità in una regione d'interesse del fluido. Queste tecniche di misura sono troppo complesse per esser trattate in un corso di base ma invitano a non sottovalutare mai le potenzialità di un metodo di misura, anche quando, a priori, potrebbe apparire troppo elementare.

Uno degli strumenti più utilizzati nelle applicazioni comuni è il **tubo di Pitot**. Per semplicità, si farà riferimento inizialmente ad un liquido che scorre in una canalina a cielo aperto, come schematizzato nella figura 16.7.

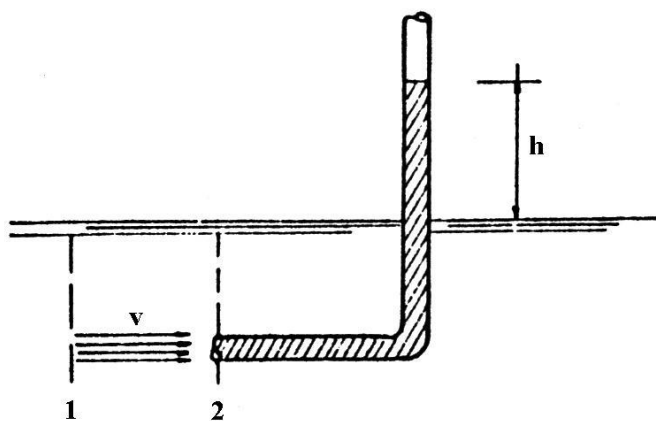


Figura 16.7

In corrispondenza della sezione (1) il fluido avanza indisturbato con velocità v . Quando l'elemento di fluido, in condizioni di regime, giunge in prossimità della sezione (2) risente degli effetti di un ostacolo, l'imbocco del tubo, e rallenta fino a fermarsi completamente, proprio davanti alla presa del tubo. L'energia cinetica dell'elemento di fluido si è trasformata in energia potenziale ed ha prodotto un innalzamento h del menisco fluido nella parte di tubo che emerge dal pelo libero. Indicando con ρ la densità del fluido, valgono le relazioni energetiche seguenti:



- sez. (1) $E = p_{st} + \frac{1}{2} \rho v^2$ energia di pressione + energia cinetica
sez. (2) $E = p_{TOT}$ energia totale di pressione (detta *di ristagno*)

L'energia del fluido per unità di volume nelle sezioni (1) e (2) può essere considerata in prima approssimazione la medesima quindi, si può scrivere il bilancio energetico nella forma

$$p_{st} + \frac{1}{2} \rho v^2 = p_{TOT} \text{ che rappresenta la ben nota } \mathbf{equazione \textit{di Bernoulli}}.$$

Nella relazione $\frac{1}{2} \rho v^2 = p_{TOT} - p_{st}$ è possibile sostituire $p_{TOT} - p_{st} = \rho gh$ che è la *legge di Stevino*

per le pressioni idrostatiche e si ottiene la *curva di graduazione*: $\frac{1}{2} \rho v^2 = \rho gh \rightarrow h = \frac{1}{2g} v^2$

La quota h del menisco è un indice diretto della velocità v^2 e lo strumento non è lineare !

Con una piccola modifica costruttiva è possibile impiegare un simile dispositivo anche per la misura della velocità di fluidi dentro tubi in pressione. Uno schema di principio è riportato sotto nella figura 16.8.

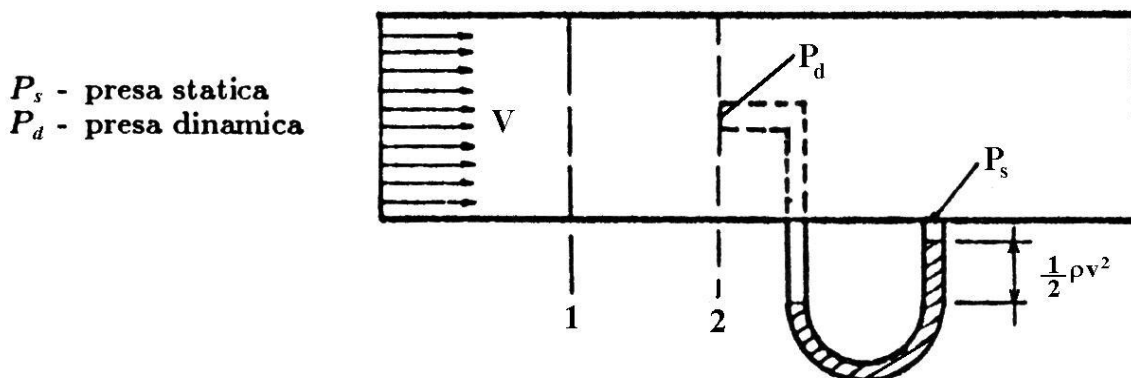


Figura 16.8

Si vede dalla figura che, in questo caso, rimangono individuate due prese P_s e P_d che prendono il nome di *presa statica* e *presa dinamica*. Si faccia attenzione al fatto che, in questo caso, la densità del fluido che scorre nella tubazione $\rho \neq \rho^*$ è diversa dalla densità del fluido manometrico. Per la

curva di graduazione si ha quindi: $v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho^* gh}{\rho}}$

La difficoltà operativa principale nell'utilizzo di tale dispositivo risiede soprattutto nella realizzazione accurata della presa statica. Quando la differenza di densità dei due fluidi non è marcata, occorre sostituire il manometro a liquido con un manometro a membrana.

Il problema del reperimento di una presa dinamica e di una presa statica nelle posizioni corrette, è un problema fondamentale per la progettazione della sonda di uno strumento autonomo.

Con riferimento allo schema della figura 16.9, si consideri un sondino di "forma aerodinamica", perfettamente liscio, che non induca turbolenze nel flusso. Esso è sostenuto dallo stelo b e viene investito da una corrente fluida alla velocità v . Lo stesso identico schema è valido anche se è il sondino che si muove alla velocità v in un fluido fermo.



Si consideri l'elemento del filetto fluido (A) indicato in figura 16.9 in moto laminare. Nella sezione S_1 , prima di incontrare il sondino, esso possiede la velocità indisturbata \vec{v} . Nella sezione generica S_2 , quando l'elemento fluido è stato costretto a deviare la propria traiettoria ed è in contatto con la superficie del sondino, esso possiede la velocità $\vec{w} = \vec{v} + \vec{v}_f$. Il fluido è incompressibile e, nella generica sezione S_2 , la velocità dell'elemento fluido $|\vec{w}| < |\vec{v}|$ è minore della velocità indisturbata a causa della "componente di frenamento" \vec{v}_f , che è sempre ortogonale alla superficie del sondino.

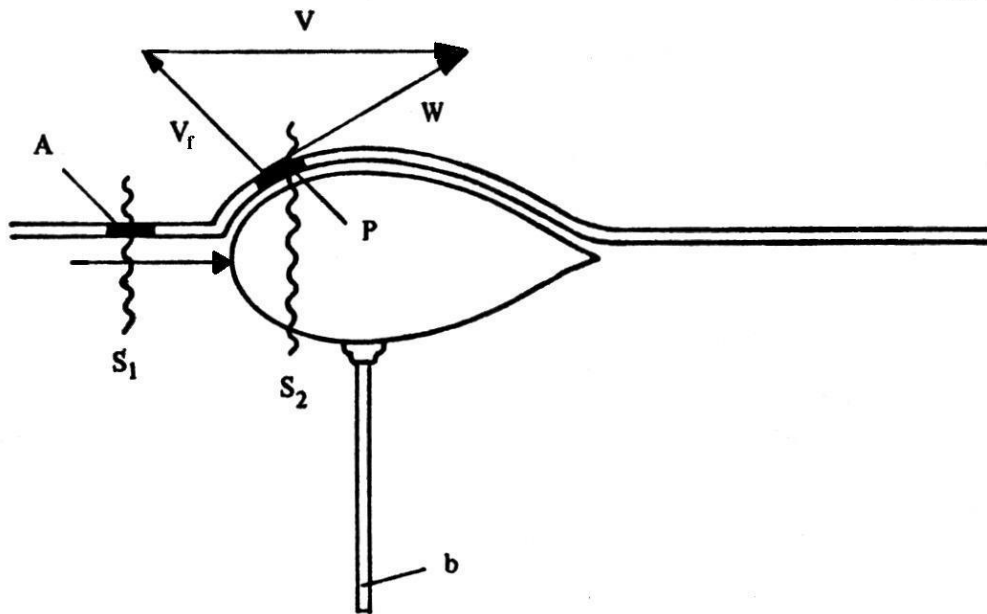


Figura 16.9

Si applichi ora il **teorema di Bernoulli** che esprime la conservazione dell'energia nelle due sezioni generiche considerate in figura 16.9:

$$S_1) \quad E_{Tot} = p_{st} + \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$S_2) \quad E_{Tot} = p + \frac{1}{2} \rho w^2 \quad \text{con} \quad p \neq p_{st} \quad p = \text{pressione generica}$$

Risulta:
$$p_{st} + \frac{1}{2} \rho v^2 = p + \frac{1}{2} \rho w^2$$

$$p - p_{st} = \frac{1}{2} \rho (v^2 - w^2)$$

$$p - p_{st} = \frac{1}{2} \rho v^2 \left(1 - \frac{w^2}{v^2} \right)$$

Il termine tra parentesi $K_p = 1 - \frac{w^2}{v^2} = \frac{2(p - p_{st})}{\rho v^2}$ prende il nome di **coefficiente di pressione** ed è importante per la determinazione delle posizioni corrette delle prese statica e dinamica sul sondino.



K_p è massimo (=1) quando $w = 0$, ovvero $v = -v_f$ e tutta la velocità dell'elemento fluido viene frenata. Questa situazione accade solamente sulla punta del sondino, in corrispondenza dell'asse. In tale punto la pressione generica $p = p_{Tot}$ è massima. E' il sito giusto per posizionare la presa dinamica P_d .

K_p è nullo (=0) quando $w = v$, ovvero $v_f = 0$ la dove la superficie del sondino non provoca alcun "frenamento" all'elemento fluido. In tale punto la pressione generica $p = p_{st}$ è la pressione statica. E' il sito giusto per posizionare la presa statica P_s .

Si osservi che il K_p può assumere valori negativi nelle zone di coda del sondino, quando $w > v$ e $p < p_{st}$, ovvero nelle zone di depressione dove il fluido accelera per riformare la configurazione indisturbata del campo fluidodinamico.

Identificate così le posizioni corrette delle prese statica e dinamica, il sondino può immediatamente essere utilizzato, in accoppiamento con un manometro differenziale, per misure di velocità del

fluido. La *curva di graduazione* di tale strumento (il sondino) è: $p_{TOT} - p_{st} = \frac{1}{2} \rho v^2$

Il sondino appena studiato è un prototipo del **tubo di Pitot** commerciale. Lo schema costruttivo di un tubo di Pitot reale è riportato nella figura 16.10 della pagina seguente. La forma è decisamente affusolata ed anche lo stelo di sostegno è sempre conformato ad ala, in modo da perturbare il meno possibile il flusso. Si riconosce facilmente la posizione delle prese statica e dinamica. Sulla punta dello strumento è tracciato il diagramma polare delle pressioni e, subito sotto, il diagramma cartesiano del K_p in funzione dello sviluppo assiale del tubo. Per evitare di allungare troppo lo strumento sarebbe anche possibile posizionare le prese statiche vicino alla punta, in corrispondenza dell'angolo indicato di 48° ma, in tal caso, basterebbe un minimo disassamento dello strumento per far uscire la presa statica dalla posizione corretta ($K_p = 0$). Le prese statiche sono perciò posizionate ad una distanza di 5-6 diametri dalla punta, dove gli effetti sul K_p dovuti alla punta ed allo stelo si compensano.

esempio: se si utilizza il Pitot in accoppiamento con un manometro differenziale ad acqua per

misurare la velocità dell'aria, nella curva di graduazione $v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$ è possibile

effettuare la misura delle pressioni direttamente in mmH_2O .

Infatti $1mmH_2O \cong 1kg_f/m^2$ e basta esprimere la densità dell'aria nel sistema tecnico

$$\rho_{aria} = 1.29 kg/m^3 = \frac{1.29 M_p}{9.81 m^3} = 0.13 \frac{kg_f s^2}{m^4} \cong \frac{1}{8} \frac{kg_f s^2}{m^4}$$

$$\text{e si ottiene: } v = \sqrt{\frac{2}{1/8}} \cdot 1 = \sqrt{16} = 4m/s$$

Dall'esempio appena svolto, si osservi che una velocità dell'aria di $4m/s$ produce un innalzamento del menisco d'acqua di 1 solo millimetro (circa 10Pa). Il tubo di Pitot non è uno strumento lineare ed è poco sensibile per valori bassi della velocità. Non è perciò uno strumento idoneo per misure di velocità basse. Esso è invece uno strumento fondamentale nel settore aeronautico, dove grazie alle elevate velocità in gioco, i limiti di sensibilità alle basse velocità non incidono minimamente nell'utilizzo. Se mai, si dovrà prestare attenzione a che l'ipotesi di fluido incompressibile sia ancora verificata (vedi oltre).

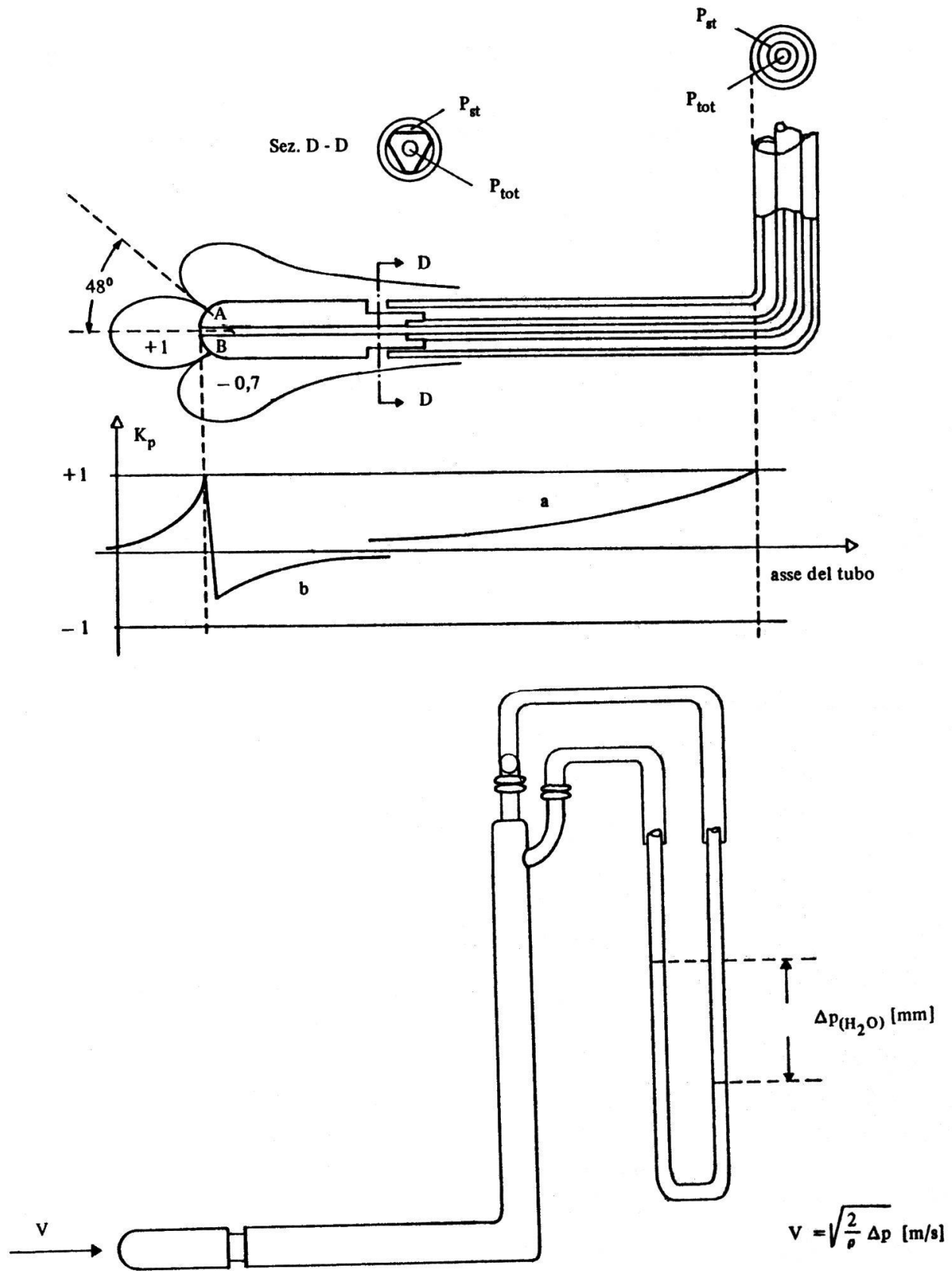


Figura 16.10



Si tenga presente infine che K_p è un parametro che dipende anche dal *numero di Reynolds*, questa circostanza permette di tarare il Tubo di Pitot con fluidi differenti da quelli per i quali sono destinati all'uso.

In conclusione si vuole solamente accennare al fatto che per fluidi compressibili ($Ma \geq 1$) occorre eseguire una correzione della curva di graduazione con il **numero di Mach** $Ma = \frac{v}{c}$, dove v è la velocità del fluido e c è la velocità del suono.

Al punto di ristagno vale $p_o = p + \frac{1}{2} \rho v^2 [1 + f(Ma)]$ e di questa *equazione di Bernoulli "estesa"* risente anche il coefficiente di pressione K_p . In altri termini, per velocità con valori del numero di Mach intorno a 0.8, con le relazioni per fluidi incompressibili si commette già un errore di circa il 20%.

Per $Ma = 1$ si è in condizione di *onda d'urto normale*, le equazioni scritte non valgono più ma la trattazione rigorosa di questo caso importante esula dai limiti di un corso elementare. Ciò non di meno, si tenga presente che, con i dovuti accorgimenti, il tubo di Pitot funziona egregiamente con flussi supersonici.

Note:

Figure 16.4, 16.5, 16.7, 16.8, 16.9, 16.10 courtesy of:
Branca F.P. – *Misure Meccaniche* – ed. ESA

Figure 16.1, 16.2, 16.3, 16.6 courtesy of:
Doebelin E.O. – *Measurement systems, application and design* – McGraw Hill