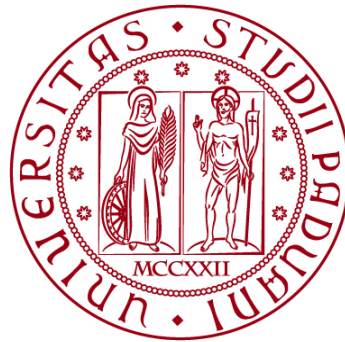


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE  
*Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



**TESI DI LAUREA**

## **TUBO DI PITOT: ANALISI E APPLICAZIONI**

**Relatore: Chiar.mo Prof. Daniele Pietro Viero**

**Laureando: Samuele Zambon**

**Anno accademico: 2022-2023**



# Indice

<b><u>INTRODUZIONE</u></b> .....	<b>1</b>
<b><u>CAPITOLO 1</u></b> .....	<b>3</b>
DESCRIZIONE E SVILUPPO DEL TUBO DI PITOT .....	3
PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO.....	4
DEFINIZIONE DEL NUMERO DI EULERO E COEFFICIENTE A .....	6
<b><u>CAPITOLO 2</u></b> .....	<b>9</b>
ANALISI DIMENSIONALE.....	9
DIPENDENZA DA REYNOLDS .....	12
<b><u>CAPITOLO 3</u></b> .....	<b>15</b>
TARATURA .....	15
ERRORI NELLE MISURAZIONI .....	16
<b><u>CAPITOLO 4</u></b> .....	<b>21</b>
PROBLEMA DI ICING E INCIDENTI RECENTI.....	21
<b><u>CONCLUSIONE</u></b> .....	<b>27</b>
<b><u>BIBLIOGRAFIA</u></b> .....	<b>29</b>



## **Introduzione**

Questo elaborato nasce dalla volontà di approfondire la conoscenza del tubo di Pitot come strumento di misura della velocità di un fluido. Dopo una breve introduzione e descrizione dello strumento, l'analisi si concentra sulla dipendenza delle misure eseguite con il tubo di Pitot da alcune variabili fluidodinamiche, ponendo principale attenzione alla dipendenza dal numero di Reynolds. Viene poi trattato il tema degli errori di misura associati a tale strumento, pur sottolineando come le relazioni che vengono adottate per stimare l'errore associato al tubo di Pitot siano a volte eccessivamente semplificative.

Nell'ultima parte dell'elaborato è trattato il tema della formazione di ghiaccio all'interno del tubo di Pitot quando viene utilizzato ad alte quote, e di come questo influisca per esempio nei voli di linea, causando talvolta avvenimenti catastrofici. Emerge come l'avanzamento tecnologico non sia sempre in grado di considerare la complessità dei fenomeni che, con circostanze impreviste, possono portare a gravi conseguenze.



## Capitolo 1

### Descrizione e sviluppo del tubo di Pitot

Il Tubo di Pitot fu inventato nel 1732 da Henri Pitot, un fisico e ingegnere francese che dal 1740 fu a capo di numerose opere idrauliche negli stati della Linguadoca (Treccani, 2014). Pitot ha realizzato lo strumento per determinare la velocità dell'acqua e delle navi, sfruttando la misura di una differenza di pressione. Il dispositivo si componeva di due tubi cilindrici di diametro ridotto disposti su un telaio. Uno di questi era dritto mentre il secondo presentava uno stretto gomito ad angolo retto alla sua estremità. Dei piccoli fori e una scala graduata permettevano di calcolare la differenza di pressione all'interno dello strumento, così da poter ricavare la velocità del mezzo nel quale lo strumento è immerso.

Storicamente, i primi strumenti realizzati prevedevano una parte iniziale del tubo a forma di imbuto, che però modificava l'andamento del fluido in cui era immerso, provocando di fatto disturbi fluidodinamici e alterando la misurazione. Il dispositivo nella forma in cui lo conosciamo oggi è stato sviluppato solo il secolo successivo da Henry D'Arcy, uno scienziato inglese (F. Cascetta, 1995).

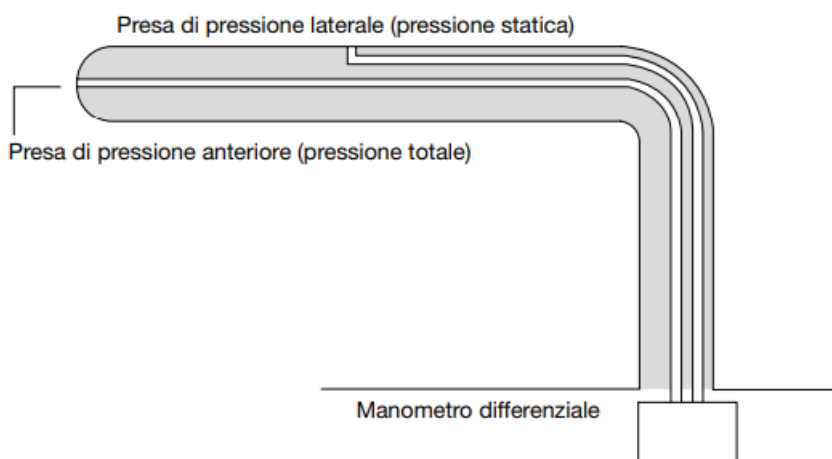


Figura 1 - Tubo di Pitot, Zanichelli 2012.

Il tubo di Pitot è essenzialmente un corpo immerso in una corrente; si compone di una struttura ad L che contiene due tubi di piccolo calibro che presentano due piccoli fori. Uno dei due prevede il foro nel punto di ristagno del sistema, il secondo invece deve averlo in un

punto dove le linee di corrente possono dirsi orizzontali. L'asse dello strumento è posizionato parallelo alla direzione delle linee di corrente, così da avere nella presa di pressione anteriore, in testa allo strumento, la pressione massima, e sulla presa laterale la sola pressione statica.

### Principio di funzionamento

Il funzionamento di questo strumento è molto semplice e se si considerano a priori alcune ipotesi semplificative diventa facile ricavare i dati di interesse. Si basa sull'equazione di Bernoulli nell'ipotesi di fluido incompressibile, con viscosità nulla, privo quindi di attriti interni e se si considera il tubo di Pitot immerso in un fluido orizzontale.

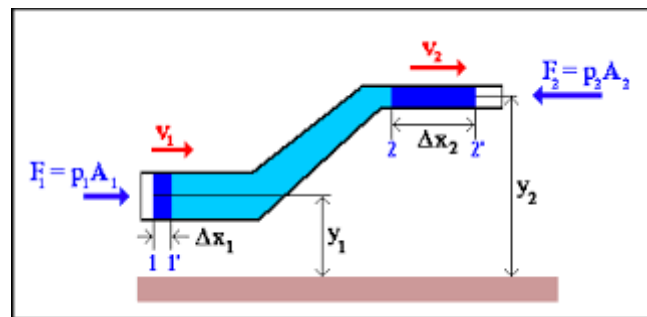


Figura 2 - Effetto Bernoulli – ISHTAR 1999

L'equazione di Bernoulli deriva da una descrizione matematica dell'effetto Bernoulli, nel quale si studia un fluido ideale che scorre su un tubo di flusso variabile in spessore e quota. Allo scorrere del fluido, dopo un intervallo di tempo  $\Delta t$ , la massa di fluido al punto 1 si sposterà nel punto 1', e lo stesso vale per il punto 2 e 2'. Grazie all'ipotesi di incompressibilità del fluido i volumi  $V_1$  e  $V_2$  sono uguali. La forza  $F_1$  esercita un lavoro positivo nella sezione 1, mentre la forza  $F_2$  compie un lavoro negativo nella sezione 2'. Il lavoro totale delle due forze è dato da:

$$L_{tot} = p_1\Delta V + p_2\Delta V = (p_1 - p_2)\Delta V$$

Dal teorema dell'energia cinetica, è possibile definire il lavoro come

$$L_{tot} = \Delta U + \Delta E_{cin}$$

Definendo l'energia potenziale  $\Delta U$  e l'energia cinetica  $\Delta E_{cin}$  come

$$\Delta U = \rho\Delta Vg(y_2 - y_1)$$



$$\Delta E_{cin} = \frac{1}{2} \rho \Delta V (v_2^2 - v_1^2)$$

Inserendo queste due equazioni nella relazione del lavoro totale, si ottiene

$$P_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

Potendo applicare lo stesso ragionamento per ogni punto del tubo di flusso, è possibile infine concludere

$$P + \rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2 = costante$$

Nella quale  $P$  indica la pressione,  $\rho$  la densità del fluido,  $g$  l'accelerazione di gravità,  $h$  l'altezza rispetto alla quota di riferimento e  $v$  la velocità del fluido.

Il termine  $P + \rho g h$  viene definito “pressione statica” mentre  $\frac{1}{2} \rho v^2$  è definito “pressione dinamica”.

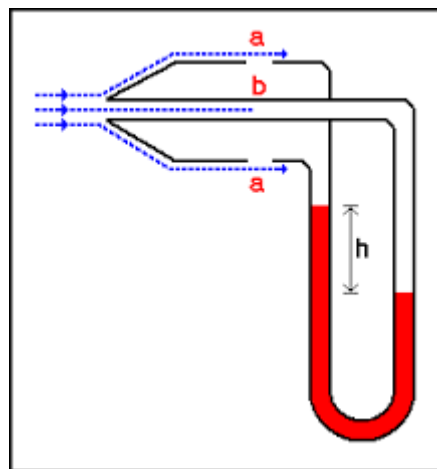


Figura 3 – ISHTAR UniBo 1999

Con l'equazione appena descritta è ora possibile fare un bilancio tra le due prese di pressione dello strumento. L'equazione si semplifica ulteriormente, poiché l'altezza delle due prese di pressione è pressoché la medesima ed è quindi possibile trascurarla ai fini applicativi. Inoltre, anche l'accelerazione di gravità e la densità del fluido rimangono invariati tra i due punti di osservazione ed è possibile così semplificare l'intero secondo termine dell'equazione. Infine, in  $b$  si ha il punto di ristagno, dove la pressione è massima e la velocità nulla. Si ottiene

$$P_b = P_a + \frac{1}{2} \rho v_a^2$$

Che è possibile riscrivere come

$$\frac{P_b}{\gamma} = \frac{P_a}{\gamma} + \frac{v_a^2}{2g}$$

dove  $\gamma$  è il peso specifico del fluido.

Si ricava quindi l'equazione caratteristica dello strumento

$$v_a = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Che permette di ricavare la velocità del fluido misurando la differenza di pressione.

### Definizione del numero di Eulero e coefficiente $\alpha$

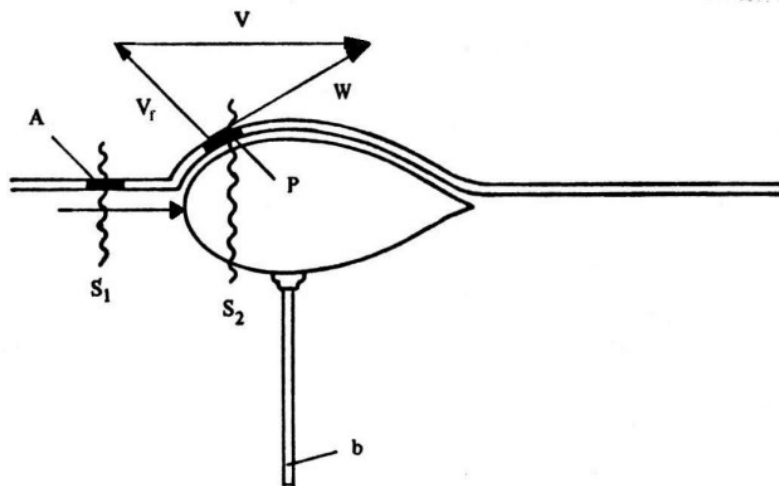


Figura 4-schema sondino - Branca F.P. "misure meccaniche" ed.ESA 1988

Nella figura è rappresentato uno schema elementare di un sondino immerso in un fluido, nel quale si riconoscono le sezioni  $S_1$  e  $S_2$ . Nella prima sezione il fluido si trova indisturbato e ha velocità  $v$ , mentre nella sezione 2 il fluido è costretto a deviare il suo moto e la sua traiettoria. In questo caso ha velocità  $w$ , minore della velocità  $v$  di una quantità indicata  $v_f$  componente di frenata. Si può allora descrivere il fenomeno e i ragionamenti che portano alla scelta della forma e al funzionamento del dispositivo applicando il Teorema di Bernoulli alle due sezioni, ottenendo

$$p_s + \frac{1}{2}\rho v^2 = p + \frac{1}{2}\rho w^2$$

Da cui segue

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

Dove  $p$  è la pressione generica di riferimento in un punto indisturbato del fluido,  $p_s$  è la pressione statica e  $p \neq p_s$ .

Si definisce ora il termine tra parentesi Numero di Eulero  $Eu = 1 - \frac{w^2}{v^2} = \frac{2(p-p_s)}{\rho v^2}$ . Il numero di Eulero risulta importante per la scelta delle posizioni nelle quali porre le prese di pressione del tubo di Pitot.  $Eu$  è massimo, pari ad 1, quando il fluido si arresta completamente, ovvero in coincidenza con il punto di ristagno. In questo punto si ha dunque la massima pressione, ed è quindi il posto giusto per posizionare la presa dinamica di pressione  $P_d$ . Viceversa,  $Eu$  è minimo, pari a 0, quando il fluido risulta indisturbato e il suo moto non viene deviato. Si ha la pressione statica ed è quindi il posto giusto per posizionare la presa statica di pressione  $P_s$  (Università La Sapienza, Roma 2013).

Noti i valori del numero di Eulero per i punti in corrispondenza delle prese di pressione, si ottiene:

$$Eu_1 - Eu_2 = \frac{p_1 - p_0}{\rho v_0^2} - \frac{p_2 - p_0}{\rho v_0^2} = \frac{\Delta p}{\rho \frac{v_0^2}{2}}$$

Dove  $p_0$  e  $v_0$  sono la pressione e la velocità nel punto di riferimento mentre i punti 1 e 2 sono quelli relativi alle prese di pressione. Da questa relazione segue:

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{Eu_1 - Eu_2}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \alpha \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Il coefficiente  $\alpha$  appena definito dipende univocamente dai valori del numero di Eulero. In questo modo si definisce meglio allora la validità della relazione semplificativa vista all'inizio. In essa, infatti, era ugualmente presente il coefficiente  $\alpha$ , ma si è analizzato il miglior caso possibile, nel quale le prese di pressione sono state posizionate idealmente, e quindi i relativi numeri di Eulero risultano 1 e 0, il coefficiente  $\alpha$  vale 1. Questa trattazione è valida in prima approssimazione, in quanto nella realtà vengono meno alcune ipotesi e nello specifico:

- Il fluido non è perfetto.
- La velocità di riferimento  $v_0$ , assunta come indisturbata, non è uniforme.
- Il moto è turbolento.

Per queste caratteristiche che possono indurre ad errore è utile ricorrere all'analisi dimensionale, così da definire meglio quali parametri adimensionali intervengono nell'equazione che caratterizza lo strumento (D. Viero, L. Carniello 2023).

## Capitolo 2

### Analisi dimensionale

In fluidodinamica è utile definire dei parametri adimensionali in modo da poter estendere le considerazioni fatte su un caso specifico ad altri casi simili, un intero gruppo di casi con dimensioni diverse ma accumulati tra loro per una similitudine dinamica. Per ottenere questa similitudine è importante e necessario che venga rispettata la geometria del sistema e che i parametri adimensionali di interesse, come per esempio proprio il numero di Eulero, siano uguali. Tale analisi è utile anche per eliminare alcune variabili o accorparne più di una assieme per ottenere un modello che possa essere descritto da meno parametri, e quindi più semplice da studiare (W. Ambrosini, 2010).

Un teorema fondamentale dell'analisi dimensionale è il Teorema di Buckingham, detto anche Teorema del Pi-greco  $\Pi$ , il quale dimostra che, “date  $m$  grandezze dimensionali e indicando con  $n$  il numero di grandezze fondamentali, esistono  $m-n$  parametri adimensionali dai quali dipende il fenomeno” (D. Viero, 2023).

Il fenomeno descritto finora è retto da una funzione

$$f = f(\Delta p, \rho, v_0, \mu, d, E)$$

Avendo indicato con  $d$  la dimensione di riferimento del corpo immerso (per esempio il diametro se il tubo è cilindrico) e con  $E$  il modulo elastico del fluido.

Grazie al teorema del Pi-greco, assumendo come grandezze fondamentali  $d$ ,  $v_0$  e  $\rho$ , è possibile quindi riarrangiare i 6 parametri della funzione in soli 3 gruppi adimensionali, ottenendo la funzione:

$$\Phi = \Phi\left(\frac{\text{forma}}{d}, \frac{\Delta p}{\rho \frac{v_0^2}{2}}, \frac{\rho v_0 d}{\mu}, \frac{E}{\rho v_0}\right)$$

In particolare, il secondo termine è proprio il numero di Eulero,  $\frac{\rho v_0 d}{\mu}$  è il numero di Reynolds e l'ultimo termine è il l'inverso del quadrato del numero di Mach. Si esplicita quindi rispetto numero di Eulero, il secondo termine, e si ricava

$$\Phi^* = \Phi^* \left( \frac{\text{forma}}{d}, Re, Ma \right)$$

In questo modo si è ottenuta una funzione che essenzialmente rappresenta un numero di Eulero, e che quindi non dipende dal medesimo. Infine, si può riscrivere il coefficiente  $\alpha$  come funzione di  $\Phi^*$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{\Phi^*}} = \alpha \left( \frac{\text{forma}}{d}, Re, Ma \right)$$

Il coefficiente di proporzionalità non è quindi costante, ma dipende sostanzialmente dal numero di Reynolds e da quello di Mach, una volta definita la geometria. Nei liquidi, inoltre, il numero di Mach è trascurabile, quindi a geometria nota,  $\alpha$  è funzione del solo numero di Reynolds. Il risultato ottenuto, non banale, è molto utile perché dimostra che due strumenti di dimensioni diverse ma simili tra loro geometricamente, sono definiti dallo stesso coefficiente  $\alpha$  a parità del numero di Reynolds. Grazie a questa dimostrazione, è possibile quindi adottare delle forme standardizzate del tubo di Pitot, le cui forme e geometrie sono definite dettagliatamente. Una volta costruito lo strumento base di forma nota che farà da modello per quelli successivi, si studia la variazione del coefficiente di proporzionalità al variare del numero di Reynolds, e il risultato ottenuto dalla taratura è valido sempre e in linea del tutto generale.

Sono state quindi standardizzate delle forme comuni, è possibile trovarle nella Standard Practice for Calibration of Type S Pitot Tubes (ASTM D3796 del 22 settembre 2016). Le forme più diffuse sono quelle di tipo Rehbock, Prandtl, che ha l'estremità semisferica, e Brabbé, che ha l'estremità a tronco di cono. Gli ultimi due sono i più utilizzati e diffusi, ma tutti e tre hanno il coefficiente  $\alpha$  pari circa a 1 per Reynolds sufficientemente elevanti (D. Viero, L. Carniello, 2023).

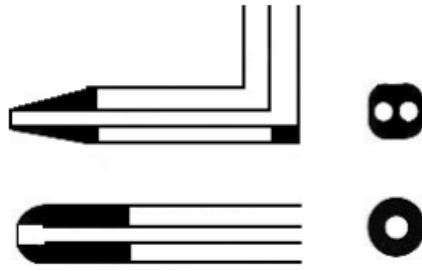


Figura 5-sopra Brabbé, sotto Prandtl. M. Salsi, M. Gaggelli 2003

Il tubo di Pitot può quindi avere diverse misure, con lunghezze che possono variare anche di molto tra loro, e in generale è composto da acciaio inox. La parte ortogonale alle linee di corrente viene detta gambo, mentre quella parallela è la testa, e normalmente ha una lunghezza proporzionale al diametro, qualche decina. Per il suo corretto utilizzo, va puntato nella direzione opposta al verso del fluido. Una volta inserito, il fluido entra nel tubo parallelo alle linee di corrente, ma una volta che questo si è riempito è come se lo strumento avesse la testa chiusa; quindi, il fluido impattando è costretto a cambiare la sua traiettoria, e si forma il punto di ristagno (M. Salsi, M. Gaggelli, 2003). La corretta installazione del dispositivo e la sua precisa costruzione è normata e descritta puntualmente nella standard ISO 3966-2020. Nella norma sono anche definiti dettagli tecnici sulla realizzazione, per esempio il diametro del foro della presa statica che non deve superare 1.6mm, oppure la sua distanza da alcuni punti di riferimento in proporzione al diametro. Definisce quali sono gli errori dati, per esempio, dal posizionamento o dalla calibrazione, e la loro percentuale accettabile (ISO 3966-2020).

## Dipendenza da Reynolds

Se per Reynolds sufficientemente elevanti, il coefficiente è in buona approssimazione pari a 1, per Reynolds bassi, per velocità molto elevata o per fluidi molto viscosi, la trattazione fatta deve essere corretta con alcuni parametri e il tubo di Pitot potrebbe non risultare più così conveniente per la misura della velocità. Sono stati svolti diversi esperimenti per misurare la dipendenza del tubo di Pitot dal numero di Reynolds, e per la correzione dell'equazione caratteristica dello strumento al variare di  $Re$ . Uno studio in particolare, pubblicato da Boetcher e Sparrow nel 2007, ha dimostrato come per bassi valori di  $Re$ , il coefficiente di pressione non è più approssimabile ad 1. In particolare, il loro studio è finalizzato a trovare quel valore di Reynolds per il quale l'equazione di Bernoulli non è più applicabile.

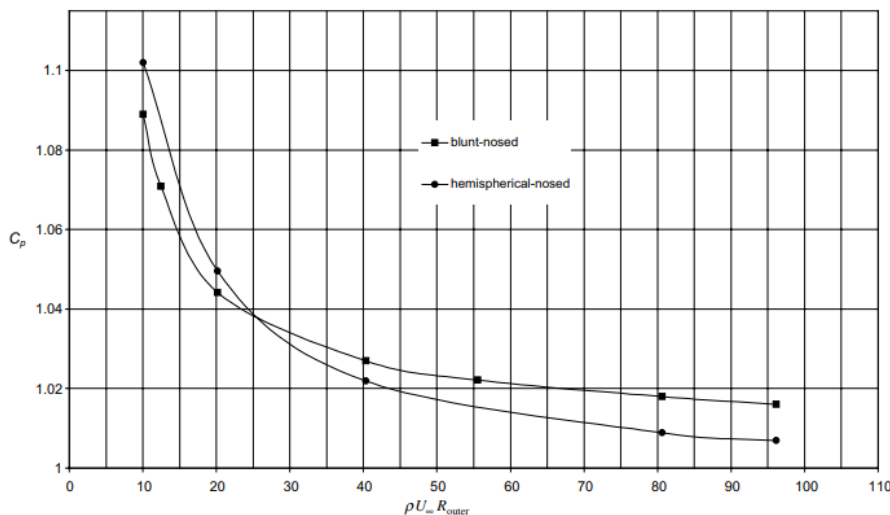


Figura 6 - Andamento del coefficiente di pressione - Boetcher and Sparrow 2007

Il grafico rappresenta la relazione trovata da Boetcher e Sparrow nel loro studio e contiene la variazione del coefficiente di pressione al variare del numero di Reynolds per tubi di Pitot con punta emisferica e quello con l'estremità più appuntita. Inoltre, il numero di Reynolds calcolato per il loro studio è basato sul raggio esterno del tubo di Pitot. Si noti che per il range dei valori di  $Re$  preso in considerazione, il coefficiente di pressione è maggiore di 1 e, in generale, più è basso  $Re$  e più cresce il valore di  $C_p$ . La tendenza che si osserva è comunque un appiattimento della curva per valori di  $Re$  superiori al 100, con valori di  $C_p$  che si avvicinano ad 1. I due studiosi hanno pensato di definire il numero di Reynolds di transizione  $Re_t$ , quel valore di  $Re$  per il quale il coefficiente di pressione vale 1.02 nei due casi. La variazione del 2% del  $C_p$  consente di avere un errore dell'1% nel calcolo della velocità, che risulta ancora accettabile. Il valore di  $Re_t$  varia in base al tubo di Pitot preso in considerazione e, anche graficamente, si nota come il tubo di Pitot con la testa appuntita



abbia un  $Re_t$  superiore al tubo di Pitot emisferico, rispettivamente  $Re_{t,app} = 65$ ,  $Re_{t,emis} = 45$  circa. Questo mostra che il tubo di Pitot emisferico ha una corrispondenza maggiore all'approssimazione di  $C_p = 1$ , per un range di valori di  $Re$  maggiore. In entrambi gli esempi, per  $Re$  di valore 10 circa, il coefficiente di pressione ha valore 1.1, che porta ad un errore nel calcolo della velocità mediante il teorema di Bernoulli del 5% (Boetcher e Sparrow, 2007).

L'SRC Pipe Flow Technology Centre<sup>TM</sup> ha condotto degli esperimenti con più di 700 valori di Reynolds compresi tra 3 e 120, utilizzando due tubi di Pitot di grandezze diverse e forma emisferica. Si è notato come per  $Re$  inferiori a 40, l'approssimazione dell'equazione di Bernoulli che porta ad un coefficiente di pressione pari a 1 non è più appropriata, e si hanno dei valori di Reynolds di transizione, come nello studio descritto precedentemente, ma basati sul diametro del tubo. Ryan B. Spelay et al. hanno analizzato tale studio e messo a confronto con altri studi precedenti, come quelli di Homann e Chambre e i loro studi basati sulla dipendenza dalla viscosità del fluido, e quelli di Folsom e Perry, basati sulla dipendenza dal diametro esterno del tubo di Pitot, quelli sul diametro interno di MacMillan, quelli di Mikhailova e Repik sul rapporto tra i diametri e altri ancora sui fluidi incomprimibili.

Facendo una correlazione per ottenere una funzione che descriva l'andamento del coefficiente di pressione, per  $Re$  inferiori a 35, emerge un'equazione simile a quella che precedentemente avevano ricavato anche Homann e Chambre

$$C_p = 1 + \frac{6}{Re_d + aRe_d^b}$$

Dove  $Re_d$  è il numero di Reynolds basato sul diametro.

I valori dei parametri che meglio si adattano ai dati raccolti dallo studio sono  $a = 0.00217$  e  $b = 3.12$ . Questi parametri dipendono dalla forma e dalla geometria del tubo di Pitot in esame, e quindi valgono per tubi di Pitot di punta emisferica, simili a quelli usati per l'esperimento in questione, ma sono estremamente compatibili con i dati ottenuti da tutti gli altri studi se vengono ricavati in funzione del numero di Reynolds basato sul diametro interno  $Re_d$  piuttosto che sul numero di Reynolds basato sul diametro esterno  $Re_D$ . Gli studi di Mikhailova e Repik hanno però dimostrato l'importanza del rapporto tra i diametri  $D_1/D_2$  sulla caratterizzazione del  $C_p$ , ed è importante tenerne conto. Ryan B. Spelay et al. hanno quindi confrontato tutti i dati in letteratura e calcolato in seguito l'errore quadratico medio per valutare la bontà dell'adattamento.

Ne è emerso che per  $D_1/D_2 \geq 0,6$ , il diametro esterno del tubo (e quindi  $Re_D$ ) dovrebbe essere usato come parametro di correlazione per determinare il coefficiente di pressione; quando invece  $D_1/D_2 < 0,6$ , dovrebbe essere usato il diametro di apertura (e quindi  $Re_d$ ) (Ryan B. Spelay et al., 2015).

Dallo studio emerge quindi una correlazione accurata del fenomeno in presenza di bassi numeri di Reynolds, in particolare con rapporti tra i diametri inferiori a 0.6. I valori del coefficiente di pressione, dall'analisi svolta risulta:

- Per  $Re_d < 10$ ,  $C_p = 6/Re$
- Per  $Re_d > 35$  (ovvero Reynolds di transizione). Si riduce a  $C_p = 1$ .

Si ricorda però che la trattazione è limitata a tubi di Pitot a punta emisferica, con aperture circolari e immersi in un fluido newtoniano. L'analisi svolta è importante perché ha ricavato una correlazione semi-empirica per i tubi di Pitot a punta emisferica, che si riduce alla legge di Stokes per  $Re$  molto bassi, e all'equazione di Bernoulli per casi ideali con  $Re$  sufficientemente alti, sopra i  $Re$  di transizione, ma quando  $Re$  è inferiore a 35 non è possibile avere una misura accurata delle velocità (Ryan B. Spelay et al., 2015).

Per quanto riguarda invece Reynolds elevati, diversi studi hanno dimostrato che le fluttuazioni del coefficiente di pressione non sono significative e le prestazioni dei tubi di Pitot sono stabili. In particolare, uno studio condotto da Yong Moi Choi et al. (2021), ha voluto sperimentare la validità delle relazioni applicate finora per alti valori di  $Re$ , calcolato anche in questo caso come  $Re_d$ , dimostrando che per  $Re$  superiori a 600, rimane stabile la caratteristica dello strumento. Per  $Re$  compresi tra  $10^3$  e  $10^5$ , il valore del coefficiente  $\alpha$  rimane stabile. Un aspetto interessante da notare sui risultati dello studio è la discrepanza tra i suggerimenti della norma ISO 3966, relativa alle misurazioni nei fluidi con il tubo di Pitot, e la realtà. La norma infatti suggerisce un range di operatività con Reynolds superiori a 200, ma già con Reynolds inferiori a 700, i coefficienti del tubo di Pitot non seguono una linearità e risultano poco affidabili. Ad un valore del numero di Reynolds elevato è associata un moto turbolento del fluido, che incide sulla misurazione. Quando lo strumento è immerso in un moto turbolento, è sottoposto ad una velocità non più costante, ma si hanno delle fluttuazioni nel tempo delle grandezze del moto. Nonostante la fluttuazione turbolenta abbia valore medio nullo, lo strumento è sottoposto ugualmente ad errore a causa delle pulsazioni di pressione di valore medio non nullo, e si riscontra una caratteristica non lineare dello strumento. Il fenomeno è stato in parte studiato nel caso di turbolenza isotropa, e si è notato che l'errore dipende anche dalla scala dei vortici (A. Adami).

## Capitolo 3

### Taratura

Come ogni strumento, per avere una corretta misurazione, evitare imprecisioni e correggere eventuali isteresi, anche il tubo di Pitot va tarato, per trovare l'equazione caratteristica che lo descrive. La taratura, più precisamente, è l'operazione con la quale “si determina, entro limiti noti di precisione, la legge di corrispondenza fra le indicazioni dello strumento e i valori della grandezza che lo strumento deve misurare” (Treccani, 2020). Il processo viene eseguito da laboratori accreditati, secondo la norma ISO/IEC 17025, e viene eseguita confrontando i valori misurati dallo strumento da tarare con i valori misurati con strumenti di riferimento di livello maggiore. Una volta eseguita la taratura viene rilasciato un certificato che contiene una relazione che consente di correggere le misure effettuate con lo strumento (Accredia). Di norma, viene eseguita sempre una volta realizzato lo strumento prima che venga immesso nel mercato, quando uno strumento viene sottoposto a riparazioni o quando il committente lo richiede.

Il tubo di Pitot può essere tarato ponendo lo strumento su un carrello mobile che viene fatto scorrere a velocità nota e costante all'interno di un fluido del quale sono conosciute le caratteristiche. In questo modo se si osserva il sistema relativo, è indifferente che a muoversi sia il fluido o lo strumento perché la differenza di pressione misurata è la medesima nei due casi; ne consegue che anche la velocità che si ricava è la stessa. Quindi il fluido in cui lo strumento rimane fermo, ed è lo strumento a muoversi, con velocità costante e per un tempo stabilito. Risulta una misura più affidabile perché è più semplice conoscere a priori la velocità del carrellino piuttosto che la velocità del fluido in un punto specifico all'interno del canale in cui scorre. Un'altra accortezza da considerare è quella di avere un canale abbastanza lungo così da permettere che la velocità del carrello arrivi ad assumere moto stazionario prima di essere costretta a decelerare per l'arrivo alla fine del canale. Inoltre, è necessario escludere dalla lettura delle velocità misurate dal tubo di pitot che si sta tarando, quelle ricavate a moto non stazionario, quindi in fase di accelerazione e decelerazione. Anche la velocità in cui si fa scorrere il carrello nel quale si installa il tubo di Pitot è importante e

dipende dalla sensibilità dello strumento e dalla dipendenza dell'equazione caratteristica del tubo di Pitot dal numero di Reynolds, come visto, e quindi dalla velocità del fluido.

### Errori nelle misurazioni

Per quanto si faccia attenzione nella misurazione con tubo di Pitot, spesso questa è soggetta da errori sistematici che non sempre si possono evitare. Gli errori più comuni nelle misurazioni sono:

- Imperfetto allineamento. Infatti, il tubo di Pitot è un misuratore del modulo del vettore velocità del fluido, ma non ne misura la direzione e il verso, che vanno quindi impostati prima di prendere la misura. Un errore può essere quello di non allineare perfettamente la testa e il gambo dello strumento con il moto del fluido di cui si vuole rilevare la velocità. (Zhiqiang Sun et al., 2009) Questo errore dipende dalla forma dello strumento e si può trovare una relazione che lega l'errore nella misurazione e l'angolo di deriva al quale si è posto lo strumento. Dallo studio di questa relazione si è visto che il profilo Brabbé è piuttosto sensibile all'errore, mentre il profilo Prandl è meno sensibile dando un errore dell'1% circa per deviazioni fino a  $8-10^\circ$  (A. Adami, 2023).

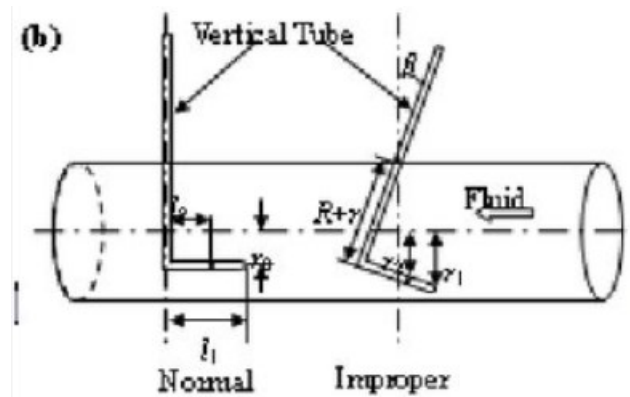


Figura 7 - Improper Installation

- Effetto della viscosità. Questo errore è legato alla dipendenza del coefficiente di pressione dal numero di Reynolds. Come accennato del capitolo precedente, si ha un errore più basso per  $Re$  sufficientemente elevati, mentre viene rilevato un errore inferiore quando il valore del numero di Reynolds è basso. In particolare, per  $Re < 300$  si registra un errore dell'1% circa, mentre per valori di  $Re$  superiori l'errore

diminuisce. Per correggere la misura si può ricorrere alla taratura per ricavare l'andamento sperimentale di  $\alpha$  al variare del numero di Reynolds, come visto. In particolare, lo stesso studio di Folsom citato nel secondo capitolo mostra alcune di queste relazioni, come per esempio, nel caso di profilo di tipo Prandtl, la formula di Baker

$$\alpha = 1 + \frac{3}{Re}$$

Per ricavare queste relazioni, è necessario andare un po' per tentativi, compiendo una taratura mediante procedimento iterativo, in quanto la velocità stessa che si cerca di misurare entra nel numero di Reynolds, quindi vi è sempre un'approssimazione.

- Velocità non uniforme. In questo caso l'errore consiste nel fatto che la presenza di un gradiente di velocità comporta una pressione nella presa dinamica non costante e uniforme. Si ha dunque un  $\frac{\partial p}{\partial y}$  indicando un  $p$  la pressione e con  $y$  una coordinata spaziale. Questo genera un moto secondario che si aggiunge a quello uniforme, generando vortici, portando a misurare una pressione nel punto di ristagno leggermente superiore a quella che si misurerebbe in assenza del gradiente di velocità, e quindi se la pressione fosse uniforme.
- Vibrazione del gambo. Come altri corpi immersi in un fluido in movimento (come, per esempio, i piloni dei ponti), anche il tubo di Pitot provoca una scia con un distacco alternato dei vortici. Se i vortici si distaccano con una frequenza simile alla naturale oscillazione del gambo, si determina una distribuzione delle pressioni non uniforme, facendo quindi rilevare un errore come nel punto precedente.
- Cavitazione. Quando il fluido nel quale il tubo di Pitot è immerso è caratterizzato da una velocità elevata e bassa pressione si rischia di insorgere al fenomeno della cavitazione, che rende inoperabile lo strumento falsando completamente la misurazione. Il numero di Thoma è il parametro adimensionale cui valori definiscono se si verifica la cavitazione. Viene definito come

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\rho \frac{v_0^2}{2}}$$

esiste un valore del numero di Thoma critico,  $\sigma_{crit}$  che indica il valore minimo per il quale inizia la cavitazione. Se  $\sigma$  è di molto inferiore a questo valore, si formano delle sacche di vapore, che falsano la misura. Il valore di  $\sigma_{crit}$  dipende dal tipo di tubo di

Pitot che si sta considerando, per esempio per il profilo Prandtl è circa pari ad 1, e già un  $\sigma$  misurato di 0.4 comporta un errore di circa l'1%.

Un'attenzione va necessariamente posta se ci si trova in un fluido comprimibile. L'equazione caratteristica di partenza, infatti, è stata ricavata con l'applicazione del principio di Bernoulli nell'ipotesi di fluido incomprimibile. Se viene meno questa ipotesi, il principio di Bernoulli vale se scritto in forma differenziale. Tale equazione può essere risolta se integrata con un'equazione di stato lungo una linea di corrente. Si ha dunque:

$$\frac{dp}{\rho} + vdv = 0$$

$$\frac{p}{\rho^k} = \text{costante}$$

La prima è l'equazione relativa al principio di Bernoulli per fluido comprimibile. Il termine  $gdh$  può essere trascurato perché nel caso dell'aria è possibile trascurarne il peso, mentre per l'acqua, risulta incomprimibile e dunque non si ha il problema. Integrando ponendo come estremi di integrazione le prese di pressione statica e dinamica si ottiene:

$$\frac{p_{din}}{p_0} = \frac{\rho_{din}}{\rho_0} \left( 1 + \frac{1}{2} (k + 1) \frac{v_0^2}{k \frac{p_0}{\rho_0}} \right)$$

Ora si osserva che l'ultimo termine è il quadrato del numero di Mach. Andando a sostituire all'interno dell'equazione, sapendo che:

$$\frac{p_0}{p_{din}} = \left( \frac{\rho_0}{\rho_{din}} \right)^{1/k}$$

Si ottiene:

$$\frac{p_{din}}{p_0} = \left( 1 + \frac{1}{2} (k - 1) Ma^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Con  $p_{din}$  la pressione della presa dinamica,  $p_0$  la pressione della presa statica,  $Ma$  è il numero di Mach.

Questa equazione è valida per numeri di Mach molto piccoli, altrimenti non vale più la conservazione dell'energia. Si può allora sviluppare in serie di potenze l'espressione tra le parentesi, ottenendo infine la differenza di pressione tra le due prese in presenza di un fluido comprimibile:

$$\Delta p = p_o - p_{din} = \frac{\rho v_0^2}{2} \left( 1 + \frac{Ma^2}{4} + \dots \right)$$

Se  $Ma = 0$ , l'equazione ricavata coincide con l'equazione vista per i fluidi incomprimibili. Nel caso in cui Mach sia piccolo, l'effetto della comprimibilità può essere trascurato. Per esempio, se  $Ma = 0.2$ , l'errore è di circa l'1% (A. Adami).





## Capitolo 4

### Il problema dell'icing e incidenti recenti

Dalla descrizione dello strumento si può intuire quali sono le sue molteplici applicazioni. Il tubo di Pitot si rivela infatti un dispositivo estremamente versatile, e lo troviamo installato lì dove è di interesse il calcolo della velocità relativa tra un fluido e un mezzo inserito al suo interno. Un esempio è la sua installazione nelle macchine di Formula 1, nelle quali viene posto in genere sulla parte davanti, e trasmette il segnale registrato al pannello di controllo del pilota. Allo stesso modo viene impiegato nelle imbarcazioni, applicazione per la quale nel 1732, Henry Pitot lo ha originariamente progettato. Un'altra applicazione molto importante è l'installazione del tubo di Pitot negli aerei, nei quali se ne installano 3: un sensore Pitot per il comandante, uno per il primo ufficiale e uno, definito stand-by. Ci sono quindi tre rilevazioni che devono essere sempre concordi, in questo modo se uno dovesse smettere di funzionare bene sarebbe facile trovare quale sia grazie alla concordanza degli altri due. Inoltre, due prese statiche intercomunicanti vengono poste in entrambi i lati dell'aereo, perché nel caso di virate dell'aereo, se ce ne fosse una sola si leggerebbe una misura falsata della differenza di pressione a causa della rotazione del mezzo, quindi potrebbe alterare il segnale.

Il tubo di Pitot è un dispositivo essenziale nell'aviazione dato che permette di misurare con molta precisione le velocità dell'aria, necessarie per compiere le operazioni più critiche in volo. Viene impiegato anche nello sviluppo e nella progettazione degli aerei perché permette di calcolare i flussi d'aria nelle pareti dell'aereo, così da migliorare le prestazioni e massimizzarne l'efficienza nella fase di progettazione (M. Durgut, 2020).

L'installazione del tubo di Pitot sugli aerei deve però tenere conto anche di altre condizioni che in altre situazioni possono non essere considerate. Una di queste è il problema del congelamento e della formazione di ghiaccio all'interno del tubo quando l'aereo vola ad alte temperature. Questa è una situazione che fino alla Seconda guerra mondiale non veniva considerata, ma che con il miglioramento delle tecnologie e con l'avanzamento della tecnica è doveroso oggi prevederla. In generale, le condizioni meteorologiche che portano alla

formazione di ghiaccio sugli aerei sono una temperatura  $T$  inferiore a  $273K$  e se l'atmosfera contiene acqua allo stato liquido. Nella maggior parte delle situazioni, se la temperatura delle nubi è sotto lo zero l'acqua inizia a cristallizzare ed è quindi poco probabile che si formi ghiaccio sulle superfici degli aerei. La formazione di ghiaccio invece è tanto più probabile quanto più la temperatura ambiente sia prossima alla temperatura di congelamento. L'International Civil Aviation Organization (ICAO) e l'International Standard Atmosphere (ISA), hanno prodotto alcuni rapporti per mettere in relazione l'altitudine geopotenziale, la temperatura, pressione e altre variabili. La formazione di ghiaccio sugli aerei avviene principalmente nelle nubi cumuliformi e stratiformi. Quando si verifica la formazione di ghiaccio, è necessario analizzare il tasso di accumulo di ghiaccio sull'aeromobile. La Federal Aviation Administration (FAA) stabilisce alcune linee guida con l'obiettivo di evitare incidenti di volo (R. Jäcket et al., 2021).

Per capire come evitare il problema ci sono stati vari studi nel corso dell'ultimo secolo. Il primo importante risultato lo ha proposto Kollsman, progettando un tubo di Pitot, poi brevettato, con un elemento riscaldante, composto sostanzialmente da un resistore termico nella parte anteriore, che prevedeva anche la presenza di un interruttore per interrompere il passaggio di corrente nel caso il tubo avesse mostrato problemi di riscaldamento (P. Kollsman, 1940).

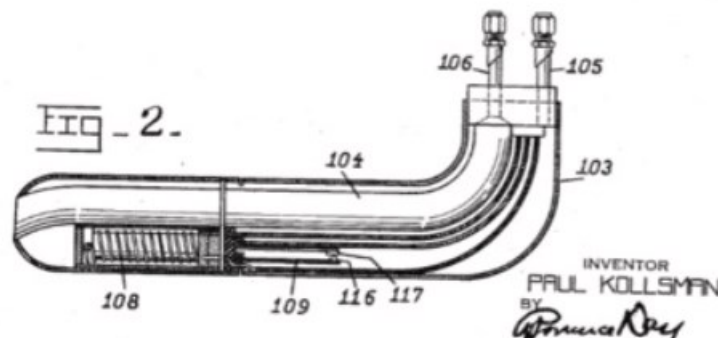


Figura 8 – Brevetto Kollsman 1940 – R. Jackel et al., 2021

Il brevetto di Kollsman è poi stato migliorato da Carbonara, che ha osservato come un solo elemento riscaldante posto nella parte anteriore porta, in situazione estreme di ghiaccio, ad un accumulo di ghiaccio nella parte posteriore, per espandersi successivamente fino alle prese statiche, finendo con il coprire l'intero tubo. Carbonara propone un modello del tubo di Pitot che preveda un secondo elemento riscaldante nella parte posteriore, il quale evita il congelamento anche di quell'acqua che potrebbe accumularsi all'interno del tubo (V.E. Carbonara, 1942).

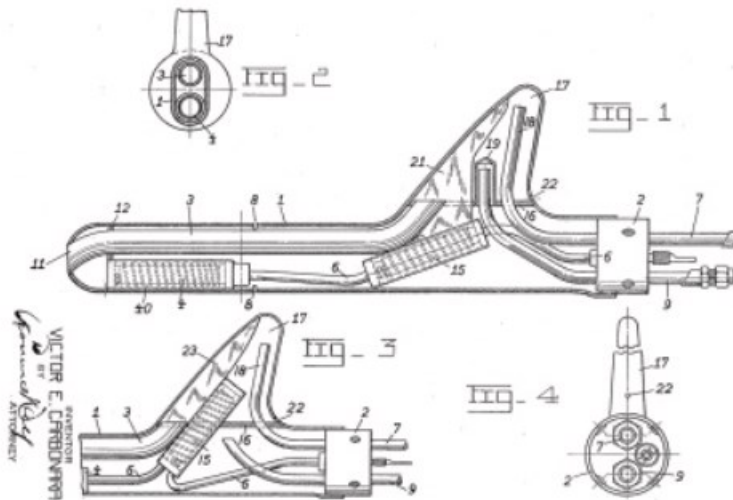


Figura 9 - Brevetto Carbonara 1942 - R. Jackel et al., 2021

Gli attuali tubi di Pitot che vengono installati negli aerei sono basati sul brevetto di Carbonara e su un secondo progetto, quello di George Larkin, del 1950. Quest'ultimo definisce meglio gli strumenti, la geometria delle resistenze interne, i materiali e il loro collocamento preciso all'interno del tubo di pitot. Per esempio, mostra come materiali con resistenze termiche diverse e la struttura radiale delle resistenze all'interno del tubo di Pitot, migliorino l'efficienza del sistema di riscaldamento (G. R. Larkin, 1950).

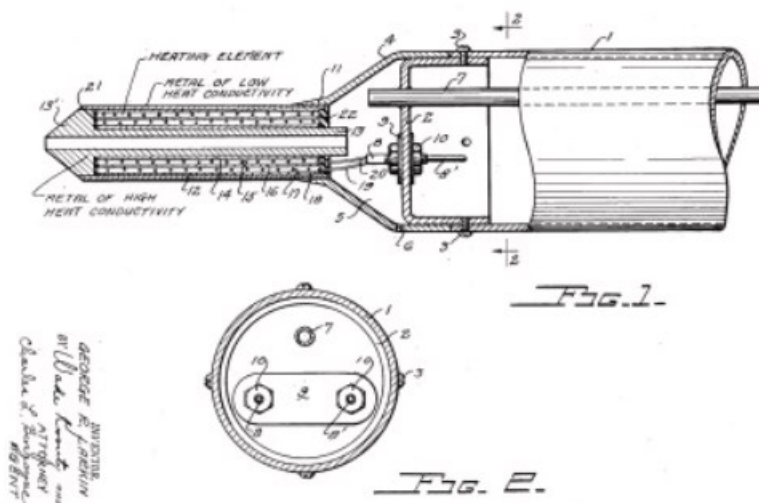


Figura 10 - Brevetto Larkin 1950 - R. Jackel et al., 2021

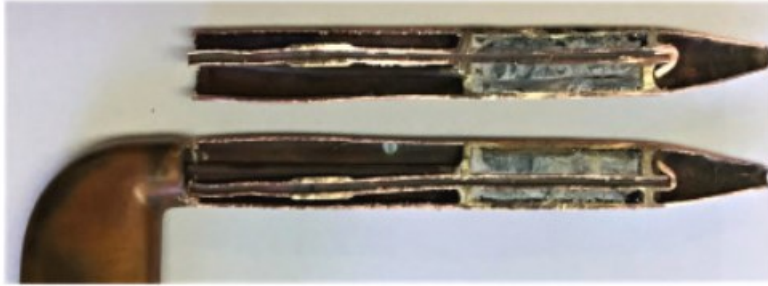


Figura 11 - esempio di attuale tubo di Pitot per aerei - R. Jackel et al., 2021

Nel caso dovesse esserci un guasto al sistema di riscaldamento del tubo di Pitot, viene trasmesso un segnale al pilota tramite il computer di bordo, e il pilota è tenuto a direzionare il volo verso zone atmosferiche che hanno condizioni meteorologiche più favorevoli e c'è meno rischio di formazione di ghiaccio. Questo perché bastano un periodo breve con segnali alterati del tubo di Pitot e si possono verificare incidenti piuttosto gravi.

Un esempio dell'importanza di queste considerazioni è l'incidente del volo AirFrance 447, avvenuto nel giugno del 2009, in cui sul computer di bordo sono stati trasmessi dati errati per soli 29 secondi, ma che sono stati sufficienti a creare confusione nella cabina di pilotaggio (MEDTL, 2012). L'aereo era partito regolarmente da Rio de Janeiro con destinazione Parigi e le condizioni prevedevano una forte turbolenza, come è abbastanza comune in quel periodo dell'anno in quella zona. La turbolenza ha spinto i piloti a deviare la rotta per evitarla, cosa che non era mai avvenuta e senza cambiare quota. Poco dopo però l'indicatore della velocità dell'aria ha perso affidabilità e ha cominciato a funzionare male, producendo così un guasto all'autopilota. L'aereo entrò così in uno stallo ad alta velocità che si concluse con l'impatto in mare dell'aereo e la conseguente morte di tutti i passeggeri e l'equipaggio. La spiegazione più probabile è proprio la formazione di ghiaccio sul tubo di Pitot nonostante la presenza degli elementi riscaldanti (R. Jäckel et al., 2021).

Un ulteriore esempio, ancora più recente, di un incidente avvenuto probabilmente per queste cause, è l'aereo Saratov Airlines 703, che si è schiantato in Russia provocando 71 vittime. Le condizioni meteorologiche erano sfavorevoli, con visibilità limitata, basse temperature e nuvole. Nonostante questo, prima della partenza non era stato attivato il sistema di riscaldamento del tubo di Pitot. Dopo pochi minuti, gli indicatori delle velocità hanno mostrato discrepanze che sono perdurate anche dopo la disattivazione dell'autopilota da parte dell'equipaggio, arrivando a segnare velocità nulla al momento dell'impatto al suolo.

Risulta evidente quindi che, per quanto il tubo di Pitot sia uno strumento essenziale in molteplici campi, è necessaria altra ricerca in merito. Essendo il sistema dell'aviazione ormai

fortemente automatizzato, può essere pericolosa la grande dipendenza del sistema da fattori umani. Sarebbe anche auspicabile una ricerca su ulteriori strumenti di misura che non abbiano questo tipo di problemi, oppure di migliorare ed efficientare il sistema corrente così da non vedere altre vite perse per la mancata attivazione manuale del sistema di riscaldamento, o a causa dei mancati esperimenti in condizioni estreme durante la fase di progettazione (R. Jäckel et al., 2021).



## **Conclusioni**

Il tubo di Pitot è uno strumento molto affidabile e ha il vantaggio che, se si rimane all'interno delle forme unificate (le forme standard) e delle norme che le definiscono, lo strumento non ha bisogno di taratura, poiché per geometria si conoscono già le relazioni di interesse. L'errore globale dello strumento è dato dalla somma degli errori sistematici e vale circa il 2-3% della misura effettuata. Il tubo di Pitot, inoltre, ha un ampio campo di applicazione, nel quale il limite superiore viene dato dalla resistenza meccanica dello strumento, per esempio dai materiali di cui è composto, mentre quello inferiore è in genere dato dalla sensibilità del manometro differenziale che calcola la differenza di pressione tra le due prese. Tra le sue applicazioni in acqua, la velocità minima di rilevamento è di un metro al secondo, mentre quella massima di 20 m/s.

Attualmente, il tubo di Pitot trova applicazioni essenzialmente in aria, dalle auto di Formula 1 agli aerei. Utilizzato in alta quota, può essere soggetto al problema dell'icing, che in passato ha portato a conseguenze catastrofiche

Per concludere, il tubo di Pitot risulta essere uno strumento ancora valido, pur essendo stato inventato ormai 350 anni fa. Miglioramenti tecnologici possono consentire la sua applicazione anche in situazioni che si collocano oltre ai suoi classici limiti di applicabilità.





## Bibliografia

- A. Adami, appunti dalle lezioni di Misure e Controlli Idraulici, Università degli Studi di Padova
- A. Farina, 2010, dispense di Fisica Tecnica, Università degli Studi di Parma
- D. Viero, L. Carniello, 2023, appunti dal corso “Misure e Controlli Idraulici”, Università degli Studi di Padova
- F. Cascetta, 1995, “Short history of the flowmetering”, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001905789500021Q>
- F. Homann The effect of high viscosity on the flow around a cylinder and around a sphere, University of California, Berkeley
- F. P. Branca, 1988, “Misure Meccaniche” ed. ESA
- G. R. Larkin, brevetto numero US2510986A, <https://patents.google.com/patent/US2510986A/en>
- ISO 3966-2020, 2020, International Organization for Standardization <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/75508/83d383be14ec499984ed1ea327b30dd1/ISO-3966-2020.pdf>
- M. Durgut, 2020, “Pitot Tube, Working Principle”, [https://www.aviationfile.com/pitot-tube-working-principle/#google\\_vignette](https://www.aviationfile.com/pitot-tube-working-principle/#google_vignette)
- Ministère de l’Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 2012, Final Report, <https://bea.aero/docspa/2009/f-cp090601.en/pdf/f-cp090601.en.pdf>
- M. Salsi, M. Gaggelli, 2003, corso di “Misure Fluidodinamiche”, Università degli Studi di Parma
- P. Kollsman, 1940, brevetto numero US2221547, <https://patents.google.com/patent/US2221547A/en>
- P.L. Chambre The theory of the impact tube in a viscous compressible gas, In: Inst. Eng. Res., UC Berkeley

- R. G. Folsom, 1956, review on the Pitot Tube, <https://tribology.asmedigitalcollection.asme.org/fluidsengineering/article/78/7/1447/1137467/Review-of-the-Pitot-Tube>
- R. Jäckel et al., 2021, “a review on Pitot Tube icing in aeronautics: Research -design and characterization – future trends”, [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598621001394?casa\\_token=nVr7m5-JMdkAAAAA:NezQLCPCsRz\\_tqTosWExYrWB4P8HeuWEVuUGM4X\\_z9eWBEuQqCIBTuOKUShtp8QvaBT0dC\\_mh\\_Nt#sec7](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598621001394?casa_token=nVr7m5-JMdkAAAAA:NezQLCPCsRz_tqTosWExYrWB4P8HeuWEVuUGM4X_z9eWBEuQqCIBTuOKUShtp8QvaBT0dC_mh_Nt#sec7)
- Ryan B. Spelay et al., 2015 “Flow Measurement and instrumentation”, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095559861500062X>
- S. K. S. Boetcher, E. M. Sparrow, 2006, Limitations of the standard Bernoulli equation method for evaluating Pitot/impact tube data, International Journal of Heat and Mass transfer <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931006001396>
- Treccani, 2014 <https://www.treccani.it/enciclopedia/henri-pitot>
- Università di Bologna, 1999, ISHTAR <http://ishtar.df.unibo.it/mflu/html/bernoulli.html>
- Università La Sapienza, Roma, 2013, appunti del corso “misure meccaniche e termiche”, LM in ingegneria meccanica
- V. E. Carbonara, 1942, brevetto numero US2306684A, <https://patents.google.com/patent/US2306684A/en>
- W. Ambrosini, 2010, appunti dal corso “Termofluidodinamica ed elementi di CDF”, università di Pisa
- Zhiqiang Sun et al., 2009, International Conference on Industrial Mechatronics and Automation, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5156558>