

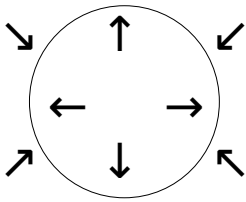
PROGETTO LAUREE SCIENTIFICHE “LA FISICA DEL VOLO”

LA PRESSIONE DEL FLUIDO

La pressione è il rapporto tra la forza che agisce perpendicolarmente alla superficie e la superficie stessa.

LA PRESSIONE STATICA

Agisce uniformemente su tutta la superficie.

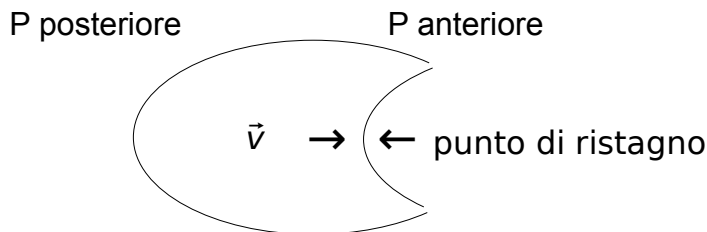


Palloncino con superficie elastica, pressione interna > pressione esterna.

Per poter osservare la pressione dinamica (Pd) dobbiamo utilizzare un palloncino con superficie non elastica.

PRESSIONE DINAMICA A VELOCITÀ COSTANTE

La pressione del sacchetto è uguale alla pressione atmosferica.



Nel momento in cui mettiamo in moto il sacchetto applichiamo una forza che genera un'accelerazione per poi raggiungere una sua velocità di regime e quindi un moto rettilineo uniforme.

Prendiamo in esame il moto uniforme del sacchetto.

Notiamo una deformazione del sacchetto, ovvero una depressione nella parte anteriore e un rigonfiamento nella parte posteriore; deduciamo quindi una variazione di pressione caratterizzata da una zona di alta pressione anteriormente e una zona di bassa pressione posteriormente.

Questo fenomeno ci porta a considerare un altro tipo di pressione da aggiungere a quella statica, ovvero la pressione dinamica.

La pressione dinamica viene esercitata lungo la linea di flusso, che sono le linee immaginarie lungo le quali il fluido scorre, e si somma, attraverso una sua componente vettoriale, alla pressione statica (P_s). Per spiegare l'interazione tra due pressioni introduciamo il principio di Bernoulli secondo il quale:

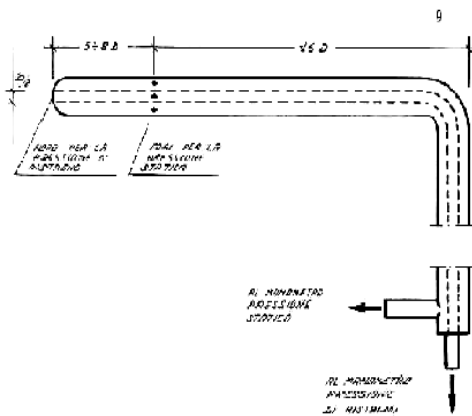
$$P_t = P_s + P_d = \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2$$

dove P_t corrisponde alla pressione totale.

Se consideriamo la variazione di pressione totale (ΔP_t) e di pressione dinamica (ΔP_d)

rileviamo che $\Delta P_t = \Delta P_d$ ed è possibile tralasciare la pressione statica in quanto costante. La pressione totale è massima nel punto di ristagno dove la velocità relativa del fluido è zero. La posizione non è calcolabile a priori e varia a seconda dell'inclinazione del corpo. Quando il sacchetto è in moto avviene uno spostamento d'aria dalla zona di alta pressione a quella di bassa pressione, percepibile come vento, che presenta la stessa velocità del sacchetto durante il moto rettilineo uniforme.

TUBO DI PITOT



A verifica delle teorie precedentemente espresse, abbiamo utilizzato il tubo di Pitot, strumento composto da due canule forate diversamente, inclinate a 90° . La canula forata alle estremità rileva la pressione totale, mentre quella che rileva la pressione statica presenta due fori laterali ed è chiusa ad un'estremità. Le estremità libere delle canule sono collegate ad un manometro attraverso due tubi. Facendo passare attraverso questo sistema un getto di fluido siamo in grado di calcolare la pressione dinamica applicando il principio di Bernoulli e ottenendo quindi $P_d = P_t - P_s$ e di conseguenza la velocità del fluido, sapendo che $P_d = \frac{1}{2}\rho v^2$.

Si rileva lo stesso valore di pressione totale scollegando il tubo dalla canula che misura la pressione statica, poiché essa coincide con la pressione atmosferica.

ANEMOMETRO



Ad ulteriore rilevamento della velocità del fluido abbiamo utilizzato un anemometro. L'anemometro è composto da una ventola che rileva la velocità dell'aria e da un dispositivo che illustra le variazioni di velocità e di pressione.

Abbiamo posizionato la ventola davanti al getto d'aria e abbiamo verificato che la velocità misurata con l'anemometro corrispondeva a quella misurata con il manometro.

VISCOSITÀ E NON-SLIP CONDITION

Una caratteristica dei fluidi è la viscosità, ovvero la resistenza del fluido alle forze a cui è sottoposto.

Un'implicazione della viscosità del fluido è la condizione di non slittamento (non-slip condition) secondo la quale la velocità relativa tra il fluido a contatto con la superficie e la superficie stessa è zero.

Lo strato di fluido che aderisce alla superficie del corpo viene chiamato strato limite; allontanandosi da esso la velocità dei successivi strati fluidi aumenta fino a raggiungere il suo valore massimo: la velocità limite. Parlando delle quantità di fluido aderenti alle superfici si fa riferimento alle particelle di fluido, ovvero insieme di molecole per le quali è possibile stabilire una velocità media. La particella di fluido a contatto con la superficie è mediamente ferma, mentre la molecola di fluido è in continuo movimento.

-Per spiegare in modo pratico la condizione di non slittamento ci siamo serviti di un barattolo a forma cilindrica in latta sporcato con della polvere di gesso.

Con un getto di aria compressa abbiamo provato a togliere la polvere e abbiamo

constatato che ciò non basta, nemmeno l'acqua, un fluido più viscoso dell'aria, era sufficiente a rimuovere la polvere. L'unico modo per toglierla è strofinare.

-Un ulteriore esperimento relativo alla condizione di non slittamento è stato realizzato con la glicerina, un cilindro e l'inchiostro.

Abbiamo riempito una vaschetta circolare con la glicerina posizionando al centro un cilindro. Utilizzando una siringa abbiamo collegato il bordo del cilindro al bordo della vaschetta con una linea di inchiostro.

Ruotando il cilindro è stato possibile notare l'aderenza dell'inchiostro contenuto nello strato limite al cilindro e la deformazione della striscia di inchiostro allontanandosi dalla superficie del cilindro, a dimostrazione della velocità relativa nulla tra fluido e superficie.

EFFETTO MAGNUS vs COANDA

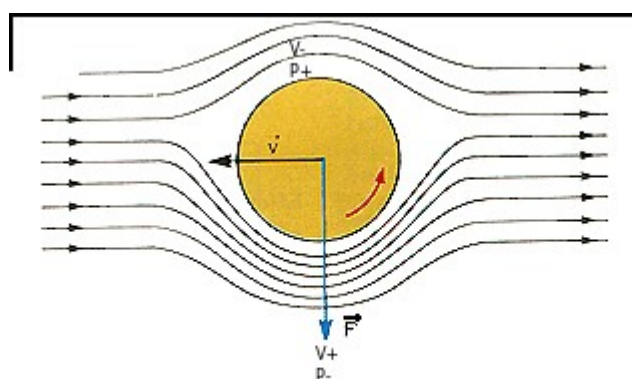
EFFETTO MAGNUS

Vi siete mai chiesti come mai durante una partita di tennis la pallina, colpita di taglio, assume una variazione della traiettoria? Ciò accade perché il tennista imprime una rotazione sull'asse che determina la curvatura della traiettoria.

Questo effetto assume il nome di EFFETTO MAGNUS, che è responsabile della variazione della traiettoria di un corpo rotante completamente immerso in un fluido in movimento, ed è causato da un'asimmetria presente nel corpo immerso nel fluido che a sua volta crea un'asimmetria nei valori che assumono velocità e pressione (vedi immagine sottostante).

Anche grazie alla condizione di non slittamento (no-slip condition) in un corpo dotato di moto rotatorio e di moto traslatorio, la velocità e la pressione del fluido aumentano superiormente o inferiormente a seconda del verso di rotazione del corpo.

Se il corpo colpito dal fluido ruota in senso orario la velocità del fluido stesso sarà minore nella parte inferiore del corpo e maggiore nella parte superiore; al contrario invece la pressione assumerà valori maggiori nella parte inferiore e minori in quella superiore. Il corpo si sposterà quindi verso l'alto. Se il corpo girasse in senso antiorario i valori di velocità e pressione sarebbero invertiti e quindi il corpo tenderebbe verso il basso (vedi esperimento n°3).



Per rendere più chiara la spiegazione vi proponiamo in seguito alcuni esperimenti.

- 1) Nel gioco del ping pong colpendo la pallina di taglio essa assume una rotazione nel senso in cui viene colpita e la sua traiettoria seguirà un andamento curvilineo.

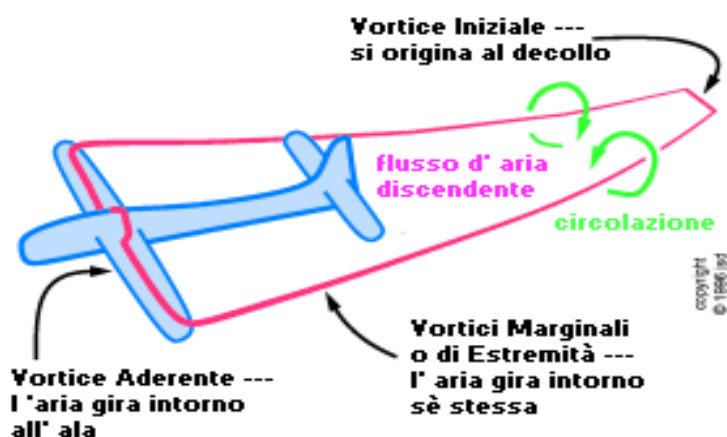
La traiettoria della pallina è causata dalla differenza di pressione e di velocità che variano inferiormente e superiormente al corpo, come spiegato nel paragrafo precedente. La stessa cosa avviene anche nella pallavolo in cui il giocatore imprime alla palla un colpo ad effetto che provoca variazioni di moto simili a quelle della pallina da ping pong.





Come possiamo notare dall'immagine lo stesso effetto lo otteniamo nel gioco del calcio

- 2) Per il secondo esperimento ci siamo muniti di una vaschetta contenente acqua e sale (soluzione che aumenta l'effetto di galleggiamento) in cui abbiamo immerso, non completamente, una sezione di ala. Abbiamo messo delle gocce di inchiostro in prossimità del bordo d'uscita della sezione alare. Traslando la sezione abbiamo potuto notare la formazione di un vortice d'inchiostro. Questo esperimento descrive i vortici d'aria generati dalla portanza durante il decollo e l'atterraggio dell'aereo. I vortici provocati all'atterraggio sono opposti a quelli del decollo e ciò avviene grazie al principio di conservazione dell'energia.



- 3) Per il terzo esperimento ci siamo serviti di un cilindro ruotante a basso attrito, di un carrello come base su cui poggiare il cilindro e di una sorgente d'aria. Il cilindro è inserito in un perno in modo da poter girare attorno al suo asse ed è posto perpendicolarmente al piano del carrello. Il nostro esperimento è iniziato mettendo in rotazione il cilindro fino al raggiungimento di una velocità sufficiente, ma mantenendo il carrello fermo. Dopodiché abbiamo azionato la nostra sorgente

d'aria (un ventilatore) lasciando che il carrello si muovesse liberamente fino ad essere completamente immerso nel flusso. Abbiamo potuto notare che la direzione del moto del carrello è perpendicolare alla direzione del flusso d'aria. Inoltre la direzione del carrello varia a seconda della rotazione del cilindro (in senso orario o antiorario) come abbiamo spiegato nella parte teorica.

Per evidenziare le differenze tra l'effetto Magnus e l'effetto Coanda abbiamo riprodotto il terzo esperimento variando le dimensioni della sorgente del flusso d'aria.

Per questo esperimento abbiamo adoperato gli stessi materiali dell'esperimento precedente, ma utilizzando appunto un flusso d'aria più piccolo del corpo rotante, per ricreare l'effetto Coanda. In questo caso il cilindro viene colpito solo in parte dal fluido che ne determina il verso dello spostamento.

A differenza dell'effetto Magnus la rotazione del corpo (che sia oraria o antioraria) non influisce sul verso.

Ne deduciamo che l'unico fattore che determina il verso è il punto di incisione del flusso d'aria sul corpo.

Nella tabella seguente abbiamo schematizzato le principali differenze tra i due effetti da noi analizzati:

Effetto Magnus	Effetto Coanda
Sorgente del fluido → di dimensioni maggiori rispetto a quelle del corpo	Sorgente del fluido → di dimensioni minori rispetto a quelle del corpo
Corpo totalmente immerso nel fluido	Corpo colpito dal fluido solamente in una piccola e determinata porzione
La direzione del corpo varia a seconda della sua stessa rotazione una volta colpito dal getto	La direzione del corpo non dipende dalla rotazione di esso, ma dalla provenienza del getto

Ora che abbiamo analizzato gli aspetti sperimentali dell'effetto Magnus e dell'effetto Coanda e li abbiamo confrontati, possiamo tracciare anche i caratteri generali dell'effetto Coanda.

EFFETTO COANDA

La principale caratteristica dell'effetto Coanda è la dimensione della sorgente del fluido, che contrariamente a quella dell'effetto Magnus è di dimensioni minori rispetto a quelle del corpo.

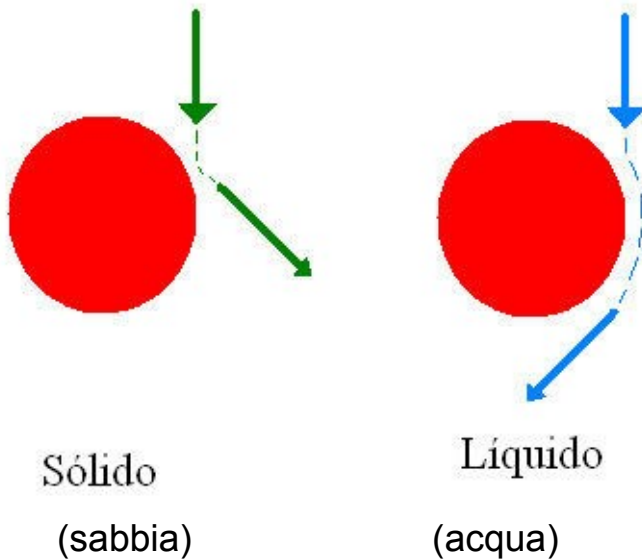
Il fluido colpisce il corpo solamente su una parte di esso e ne determina così la direzione.

I fluidi in movimento, come l'aria o l'acqua, se a contatto con una superficie curva tendono a seguirne la curvatura. Questo è chiamato effetto Coanda.

Questo effetto deriva direttamente dalla condizione di non slittamento (no-slip condition): lo strato limite, cioè lo strato che aderisce alla superficie del corpo, ruota insieme ad esso trascinandosi dietro tutti gli strati attigui.

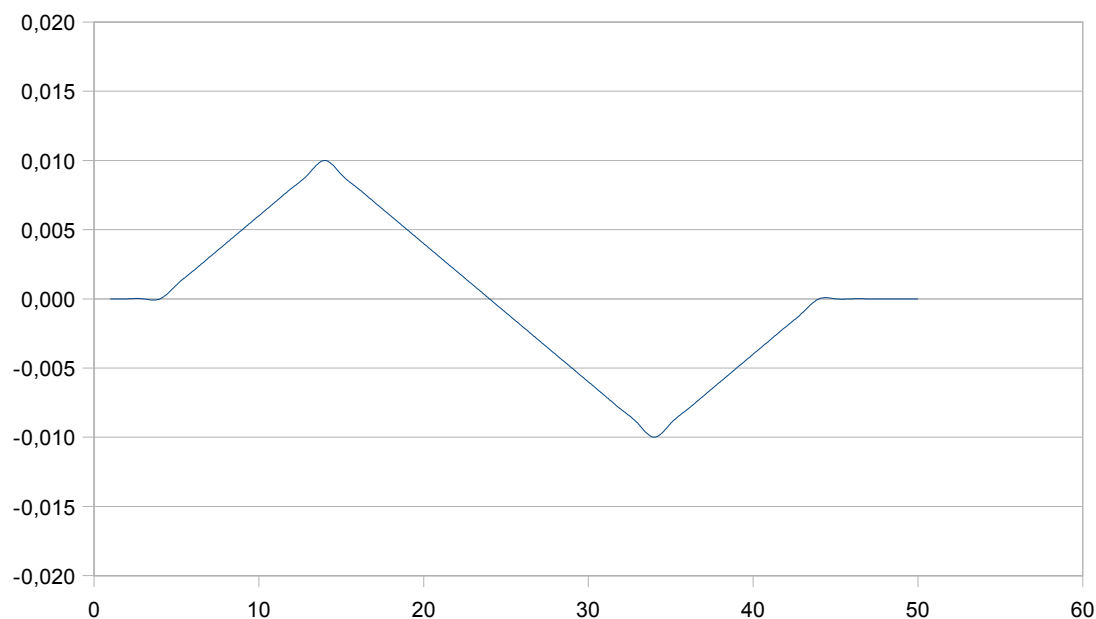
Questo effetto lo possiamo facilmente verificare avvicinando un corpo di forma cilindrica, ad esempio un bicchiere, ad un getto d' acqua. Quando l' acqua incontra il bicchiere il suo flusso cambia direzione e si avvolge intorno ad esso. Questo fenomeno è dovuto alla viscosità del fluido e alla no-slip condition. Per quanto riguarda la pressione, essa aumenta man mano che ci si allontana dal centro di curvatura del bicchiere spingendo dunque il fluido verso di esso.

Se al posto dell'acqua utilizziamo la sabbia possiamo notare che la direzione de suo flusso non segue la curvatura della superficie del corpo, ma viene deviata perché le particelle di sabbia non sono tenute unite da alcuna forza: non interagiscono.



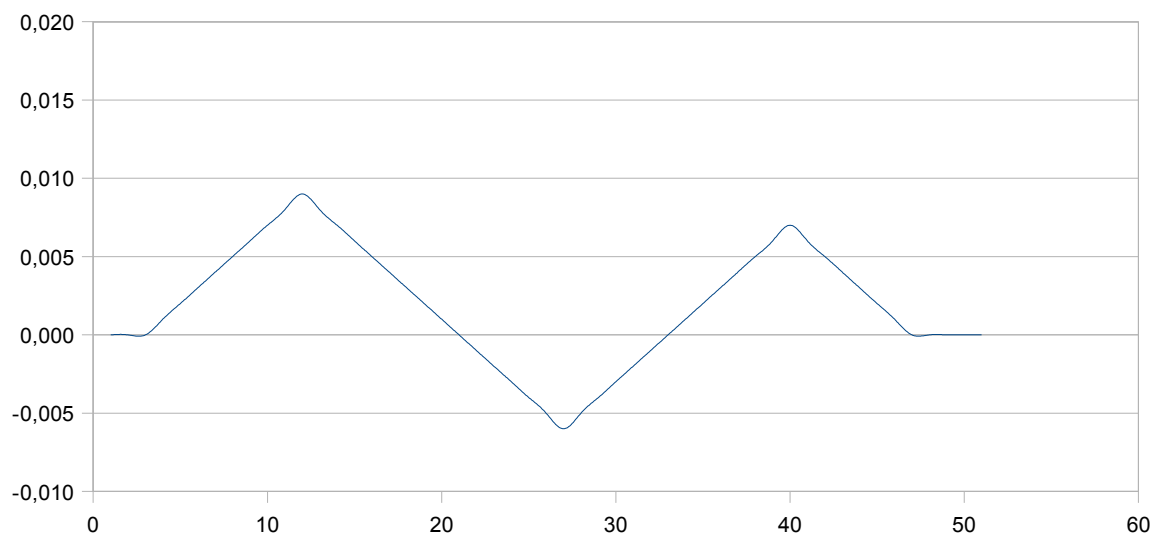
ESPERIMENTO MAGNUS vs COANDA

Per osservare le differenze tra l'effetto Coanda e l'effetto Magnus ci procuriamo un cilindro posto su delle rotelle (quindi libero di muoversi lungo una rotaia) e due getti d'aria di dimensione diversa. Il cilindro è collegato a un rilevatore di posizione che ci permette di analizzare i dati ricavati sul computer. Colpendo il cilindro su un lato con un getto ridotto, si verifica l'effetto Coanda, infatti il cilindro si sposta. Spostando il getto verso il centro, l'effetto Coanda a destra e sinistra è uniforme, quindi il cilindro rimane fermo cioè in una posizione di equilibrio. Dopo l'elaborazione dei dati ricavati otteniamo il seguente grafico:



In A e E il getto è lontano dal cilindro e quindi non esercita alcuna forza su di esso e rimane fermo. In B e D il getto è vicino al cilindro, quindi per l'effetto Coanda lo muove avanti o indietro lungo la rotaia. In C il getto lo avvolge uniformemente perciò l'effetto Coanda complessivo è nullo e il cilindro resta immobile.

Cambiamo getto d'aria, prendendone uno più grande. Ripetiamo l'esperimento precedente e, osservando i dati, ricaviamo le nostre conclusioni:

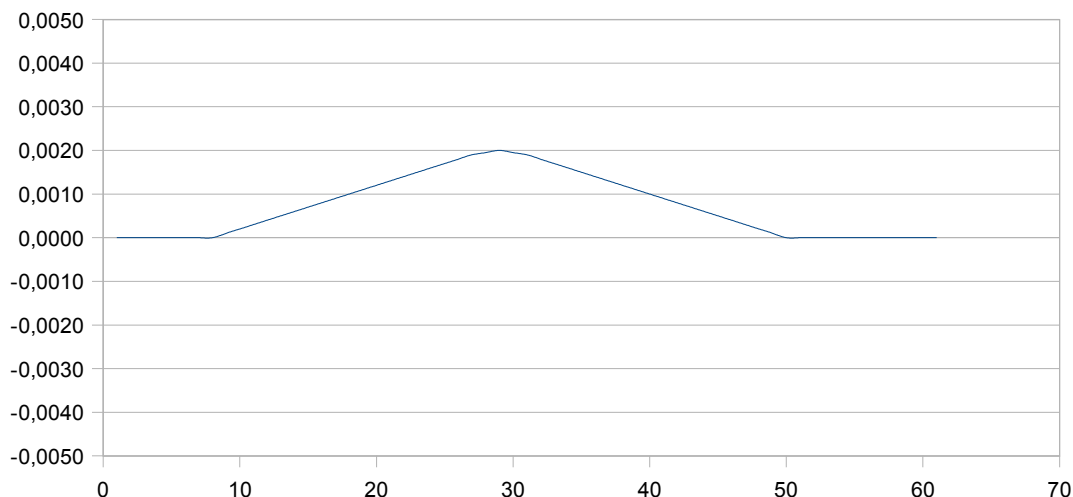


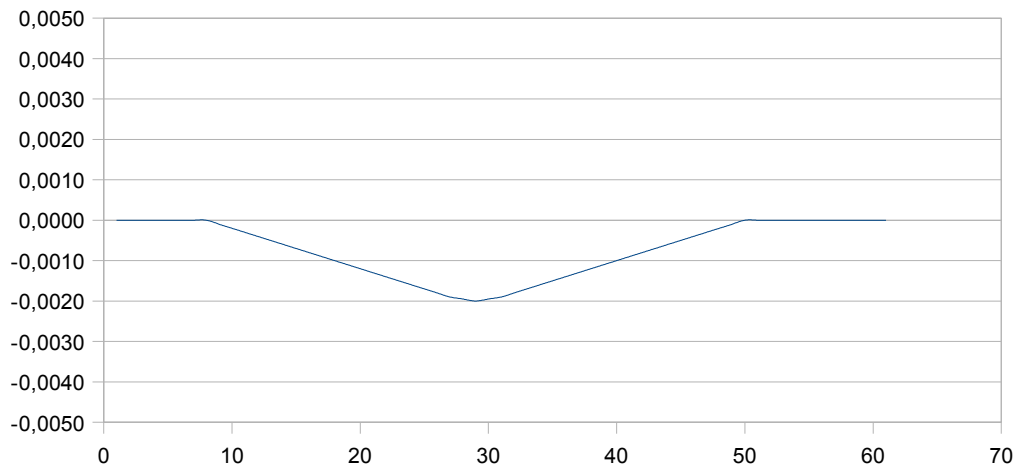
In A il cilindro è fermo, in quanto il getto non lo colpisce. In B e C il getto si avvicina al cilindro senza però colpirlo direttamente. Da B a C il cilindro è completamente immerso nel fluido (il getto colpisce interamente il cilindro) e l'effetto Magnus crea delle turbolenze, che sono rappresentate dalla variazione di velocità nel grafico. Queste turbolenze sono dovute a delle asimmetrie che possono riguardare il cilindro o il getto d'aria: è possibile infatti che il getto non colpisca uniformemente il cilindro e che si creino quindi delle depressioni su un lato piuttosto che sull'altro. Questo causa il movimento turbolento del cilindro.

ESPERIMENTO PER LA MISURA DELL'EFFETTO COANDA

Dopo aver parlato del effetto Coanda, proviamo ad eseguire una misura quantitativa delle forze in gioco. Per fare ciò ci siamo procurati la bottiglia di Mariotte, un dinamometro elettronico e un corpo cilindrico cavo. La bottiglia presenta alla sommità un tappo forato nel quale inseriamo un tubicino rigido verticale. La bottiglia contiene acqua. Dalla bottiglia, posta su un sostegno sopraelevato da terra esce un tubo che termina con un rubinetto. Fissiamo il rubinetto in modo tale che il getto d'acqua colpisca sempre nello stesso punto il cilindro sottostante. Quest'ultimo è attaccato orizzontalmente a un asta metallica, che a sua volta è collegata al dinamometro elettronico.

Quando il getto di acqua colpisce la superficie laterale del cilindro si verifica l'effetto Coanda: l'acqua per la condizione di non slittamento (no-slip condition) aderisce alla superficie e devia il suo corso seguendo la curvatura del cilindro. Dato che l'acqua devia il suo corso c'è una forza che provoca tale deviazione e l'esistenza di questa forza è dimostrata dalla misura del dinamometro. Il dinamometro è tarato secondo il seguente criterio: si considerano positive le forze che allontanano il cilindro dal dinamometro e negative quelle che lo avvicinano. I seguenti grafici illustrano le variazioni delle forze (Δf) agenti sul cilindro in funzione del tempo (t).





Nel primo caso abbiamo una forza positiva (è il caso in cui il getto colpisce la superficie esterna); nel secondo caso la forza è negativa (il getto colpisce la superficie opposta). Il modulo delle due forze è uguale e corrisponde a 0.002 N ($2 \times 10^{-3} \text{ N}$). Per effettuare correttamente questo esperimento abbiamo bisogno di un getto costante (in velocità e pressione) di acqua altrimenti neanche le forze rilevate sono costanti, perciò le misure non possono essere precise e attendibili. Per questo motivo abbiamo utilizzato la bottiglia Mariotte, se avessimo preso una bottiglia senza tappo, solo forata in basso le pressioni in gioco sarebbero state la pressione atmosferica e la pressione idrostatica (ρgh). La pressione totale (cioè la pressione che ha l'acqua quando esce dal foro) è uguale alla somma delle p_0 e p idrostatica tuttavia quest'ultima dipende dall'altezza della colonna di acqua. La p idrostatica non è costante, poiché quando l'acqua esce dal foro, l'altezza della colonna d'acqua diminuisce progressivamente. Invece nella bottiglia di Mariotte abbiamo la seguente situazione: l'aria entra nella cannuccia ed esercita una pressione ($p_a =$ pressione atmosferica) sulla superficie di acqua al livello della fine della cannuccia. Poiché siamo in una situazione statica (il livello dell'acqua è fisso e non entra acqua nella cannuccia), c'è un equilibrio di pressioni: la pressione p_0 è controbilanciata da un'altra pressione che è quella atmosferica pari ad essa. Tale pressione p_0 è generata dalla somma dell'aria contenuta nella bottiglia e dalla pressione dovuta alla colonna di acqua sovrastante il livello della fine della cannuccia. Aprendo il rubinetto (passando ad una situazione dinamica), l'acqua esce dalla bottiglia con una certa pressione, questa pressione è dovuta alla pressione atmosferica più la pressione esercitata dalla colonna di acqua compresa tra la fine della cannuccia e il foro. La pressione atmosferica non cambia neanche quella idrostatica fino a quando l'acqua non raggiunge l'altezza compresa tra quella del foro e quella della cannuccia. Fino a quel momento il getto d'acqua rimane costante e così possiamo effettuare delle misure abbastanza precise e attendibili.

MISURA DI PRESSIONE SUL MEZZO CILINDRO E PROFILO ALARE

Lo scopo dell'esperimento è osservare la differenza di pressione nei vari punti di un profilo semicilindrico investito da un getto d'aria.

Il semicilindro da noi utilizzato ha diametro di 8 cm, uno spessore di 5 cm ed è suddiviso in 9 settori di 20° di ampiezza ciascuno, 7 dei quali sono collegati ad un manometro ad alcol.

Foro	Angolo (°)	ΔP (hPa)
1	30	-0,25
2	50	-0,68
3	70	0,60
4	90	1,22
5	110	1,34
6	130	1,10
7	150	0,60

Nella tabella la colonna “ ΔP ” indica la variazione di pressione rispetto alla pressione atmosferica, ovvero quella dinamica, e analizzando i dati possiamo quindi osservare che il punto soggetto alla pressione più alta è il foro numero 5, cioè quello investito maggiormente dal getto d'aria. La parte invece soggetta alla pressione minore è quella attorno ai fori 1 e 2.

Con le pressioni misurate è possibile determinare la forza che agisce perpendicolarmente alle varie porzioni di cilindro, moltiplicando ΔP per la superficie dell'area colpita dal getto. A questo punto è possibile scomporre la forza nelle sue componenti orizzontali e verticali moltiplicandola rispettivamente per il coseno e seno dell'angolo di inclinazione del foro.

Foro	Δp (hPa)	angolo (°)	F_{\perp} (N)	F_y (N)
1	-0,25	30	-0,02	-0,0087
2	-0,68	50	-0,05	-0,0364
3	0,60	70	0,04	0,0394
4	1,22	90	0,09	0,0852
5	1,34	110	0,09	0,0879
6	1,10	130	0,08	0,0588
7	0,60	150	0,04	0,0209

$$F_{y, \text{totale}}(\text{N}) = 0,2471 \text{ N}$$

La bilancia posta sotto al semicilindro registrava $-20,0 \pm 0,2$ g, ovvero una spinta verso l'alto di circa 0,20 N che corrispondono (a meno degli errori) ai dati calcolati.

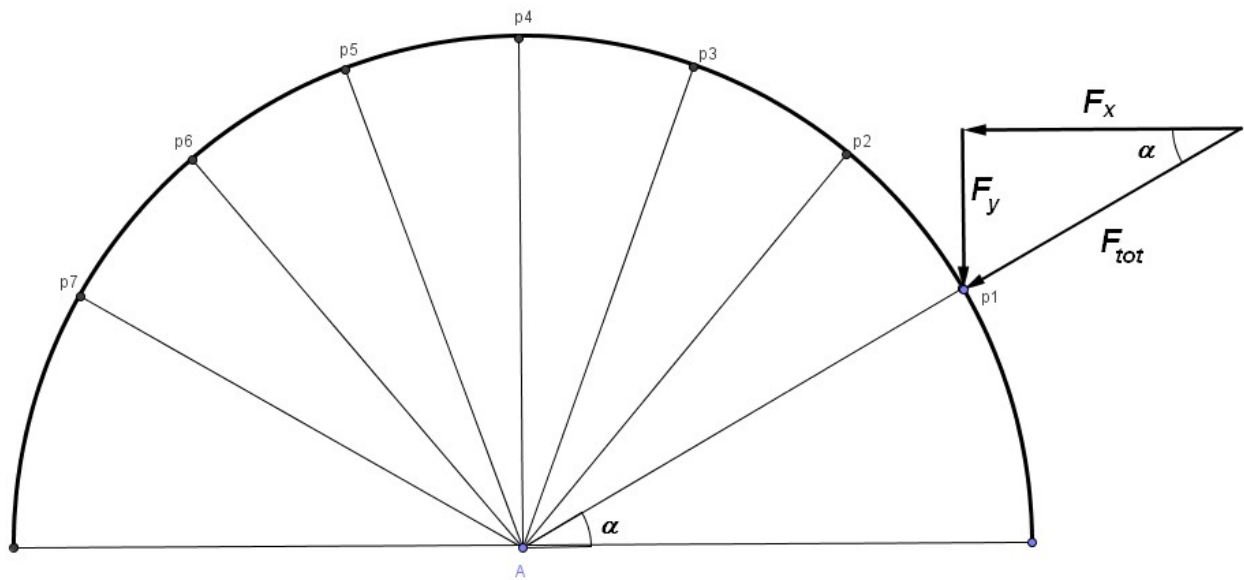
Indirizzando invece il getto orizzontalmente vengono colpiti direttamente il foro 1 mentre quelli superiori (3, 4 e 5) subiscono una pressione inferiore. Questo genera una spinta

verso l'alto che è possibile osservare ponendo sotto il semicilindro una bilancia, la quale misurerà un valore negativo.

Tutto ciò si verifica grazie all'effetto Coanda, che è causato dalla no-slip condition.

Lo stesso concetto è applicabile ad un profilo alare. Anche qui infatti osserviamo che la parte superiore dell'ala subisce una pressione negativa e quindi una spinta verso l'alto.

Modificando l'angolo d'attacco, ovvero l'inclinazione dell'ala, è possibile osservare che le pressioni cambiano, generando una variazione della spinta verso l'alto.

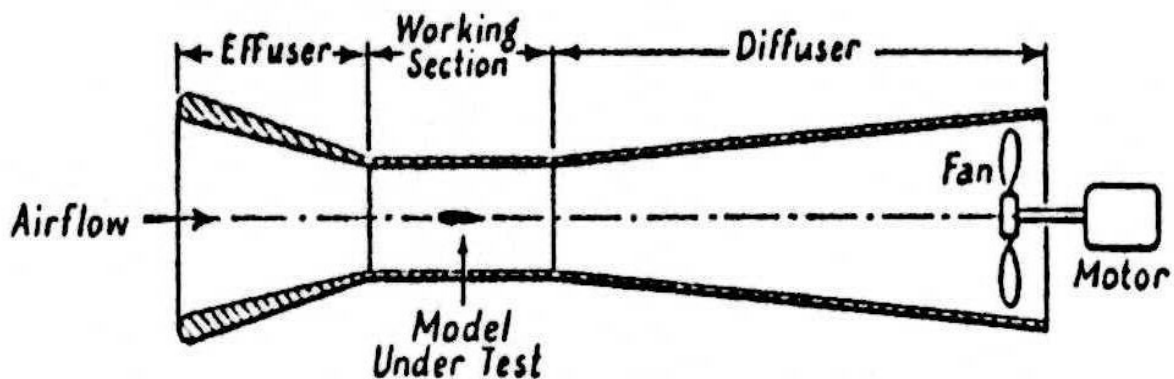


LA GALLERIA DEL VENTO

Per simulare le forze che agiscono su un profilo alare durante il volo viene usata la galleria del vento.

La galleria del vento è una camera a sezione costante nella quale viene inserito il modello dell'oggetto di cui si vuole studiare la fluidodinamica. Grazie alla ventola posta a valle della camera, l'aria viene risucchiata creando un flusso che evita complicazioni dovute ai vortici e alle turbolenze che si avrebbero con un flusso diretto.

Nella camera è possibile inserire un profilo alare, posto su un binario verticale e collegato ad un dinamometro, il quale consente di misurare le forze agenti sul profilo. Queste forze causano un abbassamento o un innalzamento dell'ala.



Inoltre, grazie a una scala graduata posta vicino al profilo, è possibile osservare la relazione tra l'inclinazione dell'ala e le forze agenti su di essa.

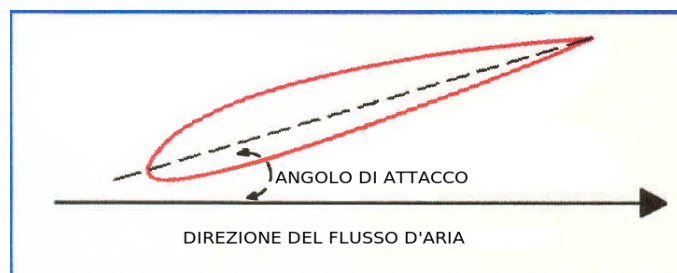
A seconda dell'inclinazione in cui è posto il profilo alare possono verificarsi due eventi:

- se l'angolo di attacco è pari o maggiore a zero, si ha una portanza positiva ed un conseguente innalzamento del profilo alare;
- se l'angolo di attacco è minore di zero, si ha una portanza negativa e il profilo alare si abbassa.



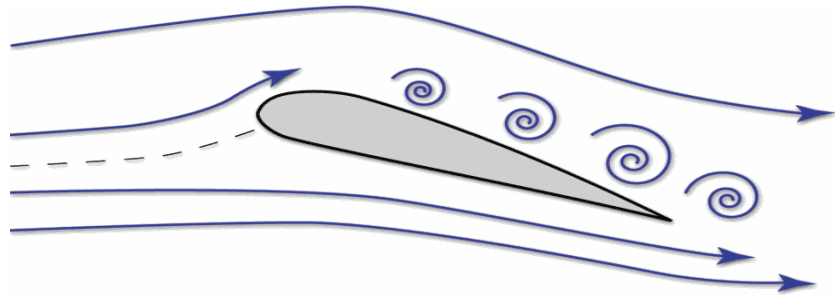
Angolo di attacco positivo

Angolo di attacco negativo

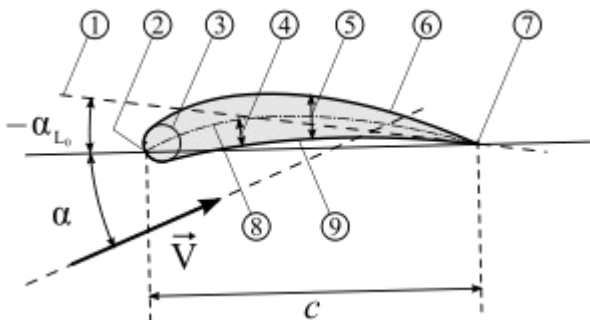


Abbiamo comunque osservato che per volare, l'ala di un aereo deve avere un'inclinazione positiva. Tuttavia un angolo d'attacco troppo ampio dà luogo a delle eccessive turbolenze o addirittura una situazione di stallo dell'aereo. Lo stallo si ha quando l'ala viene posta con un'angolazione eccessivamente positiva, rispetto al flusso d'aria, dando origine così ad eccessive turbolenze causate dallo spostamento in avanti del punto di distacco; in questo modo l'effetto del downwash si riduce, diminuendo di molto la portanza.

Situazione di stallo



Lo schema seguente ci offre la visione di un profilo alare:



α : incidenza geometrica

c : corda

1: linea di portanza nulla

2: bordo d'attacco

3: cerchio osculatore del bordo d'attacco

4: curvatura

5: spessore

6: dorso

7: bordo d'uscita

8: linea d'inarcamento media

9: ventre.

NUMERO DI REYNOLDS

Possiamo affermare che il movimento di un oggetto in un fluido dipenda solamente dalla sua inclinazione e quindi dall'angolo di attacco del fluido?

Oppure tale movimento è influenzato anche da altri parametri, come forma e dimensione? Un ottimo esempio che ci consente di rispondere a queste domande è quello della balena e del paramecio: entrambi si muovono nel medesimo fluido, l'acqua; mentre alla balena è sufficiente un minimo dispendio di energia per percorrere un tragitto abbastanza lungo, in proporzione alle sue dimensioni, il paramecio deve continuare a muovere le sue ciglia per non fermarsi.

La balena riesce a contrastare meglio la viscosità dell'acqua poiché, avendo una massa considerevole, il rapporto fra la sua forza di inerzia e la forza di viscosità è elevato.

Nel caso del paramecio invece tale rapporto è molto basso.

Nel movimento della balena prevale dunque la forza di inerzia mentre nel movimento del paramecio prevale la forza di viscosità.

Il movimento di un oggetto in un fluido dipende quindi dai seguenti parametri:

- Per quanto riguarda l'oggetto
 - forma
 - dimensioni (lunghezza, l)
 - inerzia
- Per quanto riguarda il fluido
 - densità ($\rho = m / V$)
 - viscosità (η)

$$Re \text{ (balena)} = (\rho \mathbf{V L})/\eta = 10^3 \text{ (kg/m}^3\text{)} 10 \text{ (km/h)} 30\text{m} / (10^{-3} \text{ Pa s}) \approx 10^8$$

$$Re \text{ (paramecio)} = (\rho \mathbf{V L})/\eta = 10^3 \text{ (kg/m}^3\text{)} 10^{-5} \text{ (m/s)} 10^{-4}\text{m} / (10^{-3} \text{ Pa s}) \approx 10^{-3}$$



Tuttavia dalle considerazioni fatte per il paramecio e la balena si deduce che per studiare il comportamento di un'ala reale in volo, non ci si può semplicemente basare su un modello con dimensioni ridotte.

Per studiare l'effettivo comportamento di un corpo in movimento in un fluido si deve tenere in considerazione un altro dato, un parametro adimensionale, che ne caratterizza il tipo di moto, chiamato **numero di Reynolds**.

Affinché gli studi siano corretti, il modello e l'ala devono avere lo stesso numero di Reynolds.