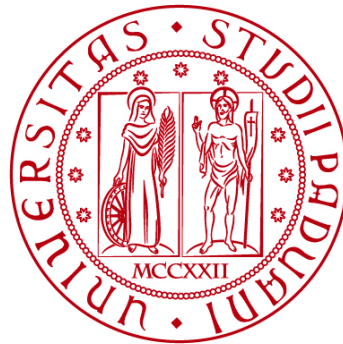


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E
AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

**L'IMPIEGO DEL ROTORE DI FLETTNER PER
LA PROPULSIONE NAVALE**

Flettner rotor for ship propulsion

Relatore: Chiar.mo PROF. ANDREA DEFINA

Laureando: LUCA PODDA
N° matricola: 2004702

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

Sommario

1.	INTRODUZIONE	1
2.	L' EFFETTO MAGNUS	3
2.1.	Teoria dei moti a potenziale	3
2.1.1.	Metodo delle singolarità idrodinamiche	7
2.1.1.1.	Moto uniforme traslatorio	7
2.1.1.2.	Punto sorgente	8
2.1.1.3.	Vortice irrotazionale antiorario	9
2.2.	Spiegazione attraverso la differenza di velocità sui lati opposti del corpo	16
2.3.	Esempi di situazioni in cui compare l'effetto Magnus	19
3.	IL ROTORE DI FLETTNER NELLA PROPULSIONE NAVALE	29
3.1.	La storia e i primi prototipi	29
3.2.	La situazione attuale	31
4.	CONCLUSIONI	43
	BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	45

Indice delle figure

- Figura 1. 1: Rappresentazione dell'effetto Magnus [22]*
Figura 1. 2: Esperimento di Faraday [16]
Figura 2. 1: Rappresentazione delle componenti della velocità
Figura 2. 2: Componenti della rotazione
Figura 2. 3: Moto uniforme traslatorio
Figura 2. 4: Punto sorgente
Figura 2. 5: Vortice irrotazionale antiorario
Figura 2. 6: Relazione fra angolo e spostamento infinitesimo
Figura 2. 7: Coppia punto sorgente – punto assorbente
Figura 2. 8: Moto uniforme che investe la coppia sorgente – assorbente
Figura 2. 9: Rappresentazione di un dipolo
Figura 2. 10: Rappresentazione del dipolo investito da un moto uniforme
Figura 2. 11: Combinazione della corrente euleriana con il vortice irrotazionale antiorario
Figura 2. 12: Distribuzione delle velocità
Figura 2. 13: Effetto Magnus applicato al pallone
Figura 2. 14: Andamento della zona di scia [8]
Figura 2. 15: Configurazione geometrica del proiettile [11]
Figura 2. 16: Curve di densità in funzione dell'angolo di incidenza [11]
Figura 2. 17: Coefficiente di pressione sul proiettile [11]
Figura 2. 18: Coefficiente di pressione sulle alette [11]
Figura 2. 19: Modello di aereo a rotore di Ernst Zeuzem [9]
Figura 2. 20: Aereo a rotore progettato da Gerhard Wilke [9]
Figura 2. 21: Aereo a rotore disegnato da Karl Gligorin [9]
Figura 2. 22: Modello di rotori a superficie ruvida di Ernst Zeuzem [9]
Figura 2. 23: Aereo a rotore Plymouth A-A-2004 [15]
Figura 2. 24: Aereo a rotore Union Aircraft X772N [9]
Figura 2. 25: Aereo a rotore NASA YOY-10° [9]
Figura 3. 1: Nave a rotore Backau [23]
Figura 3. 2: Nave a rotore Barbara [23]
Figura 3. 3: Emissioni di anidride carbonica [21]
Figura 3. 4: Nave a rotore E-Ship 1 [14]
Figura 3. 5: Opzioni di installazione dei rotori Anemoi [12]
Figura 3. 6: Nave a rotore con soluzione pieghevole [12]
Figura 3. 7: Nave a rotore con guida trasversale [12]
Figura 3. 8: Nave a rotore con ferrovia longitudinale [12]
Figura 3. 9: Schema dei componenti per il sistema a rotori [12]
Figura 3. 10: Nave a rotore Sohar Max [12]
Figura 3. 11: Nave a rotore Newcastlemax [12]

- Figura 3. 12: Dettaglio della guida trasversale [12]*
- Figura 3. 13: Nave a rotore Kamsarmax TR Lady [12]*
- Figura 3. 14: Nave a rotore Kamsarmax M/V Afros [12]*
- Figura 3. 15: Schema sull'angolo del vento rispetto alla nave [18]*
- Figura 3. 16: Nave a rotore Sea Zhoushan [18]*
- Figura 3. 17: Nave a rotore Camellia Dream [18]*
- Figura 3. 18: Nave a rotore M/V Koryu [18]*
- Figura 3. 19: Nave a rotore Yodohime [18]*
- Figura 3. 20: Nave a rotore Dietrich Oldendorff [18]*
- Figura 3. 21: Nave Airbus dotata di rotori di Flettner [13]*
- Figura 4. 1: Rappresentazione del nuovo rotore [4]*

1. INTRODUZIONE

Il seguente elaborato si pone l'obiettivo di inquadrare l'Effetto Magnus e la sua applicazione ingegneristica tramite il Rotore di Flettner per la propulsione navale.

Si inizia a prestare attenzione agli effetti di questo fenomeno verso la fine del 1600 ma la prima definizione venne fornita dal fisico tedesco Heinrich Gustav Magnus¹ nel 1852.

Magnus, attraverso un lavoro sperimentale, notò come un cilindro in moto rotatorio immerso in un flusso d'aria generava una forza di sollevamento (*Figura 1. 1*) e un conseguente spostamento da una traiettoria rettilinea. L'esperimento è stato condotto posizionando un cilindro in rotazione su un braccio libero di muoversi e successivamente venne investito da una corrente d'aria uscente da un ventilatore. Conoscendo la direzione del flusso d'aria, Magnus notò come il cilindro defletteva dal lato in cui la rotazione del corpo era concorde con la direzione del flusso.

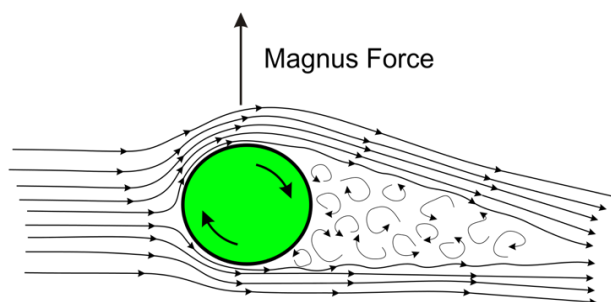


Figura 1. 1: Rappresentazione dell'effetto Magnus [22]

È possibile fare una analogia tra la forza descritta da Magnus e la forza elettromotrice². Infatti posizionando un elemento di metallo collegato ad un filo conduttore tra i poli di un magnete e facendo passare corrente elettrica attraverso il conduttore, si può notare una deflessione dell'elemento di metallo (*Figura 1. 2*).

Quindi il campo magnetico è comparabile al flusso d'aria dato che entrambi hanno una direzione o una polarità mentre l'elemento di metallo è il cilindro utilizzato da Magnus. Entrambe le forze inoltre hanno una direzione perpendicolare al flusso d'aria per la forza di sollevamento, o al campo tra i poli magnetici per la forza elettromotrice. Negli anni successivi alla sua scoperta migliorarono le tecniche investigative e quindi si riuscì a determinare quali parametri entravano in gioco.

¹ Heinrich Gustav Magnus: Berlino, 2 Maggio 1802 – Berlino, 4 Aprile 1870

² Legge di induzione elettrica, Michael Faraday, 1821

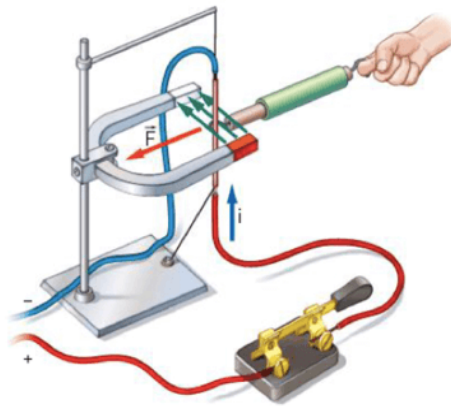


Figura 1. 2: Esperimento di Faraday [16]

In questo elaborato in particolare l'effetto Magnus viene spiegato attraverso due diverse teorie. La prima si basa sui moti a potenziale e quindi determina il fenomeno attraverso la sovrapposizione di potenziali semplici fino ad ottenere situazioni più complesse. La seconda teoria invece descrive l'effetto Magnus come la differenza di velocità sui lati opposti del corpo andando a sfruttare il Teorema di Bernoulli. Successivamente combinando le equazioni della prima teoria con quelle della seconda si è ricavata la Forza Magnus, forza per cui questo fenomeno è così importante. Prima di concentrarmi sul contributo che l'Effetto Magnus fornisce alla propulsione navale mostro alcuni ambiti, ingegneristici e no, in cui questo aspetto compare fornendo una piccola spiegazione per ciascuno. Tutto questo viene discusso nel secondo capitolo che si conclude con una serie di esempi in cui si è cercato di sfruttare l'effetti Magnus nell'aviazione.

Il terzo capitolo si concentra invece sulla propulsione navale attraverso i rotori di Flettner guardando i primi due prototipi e successivamente la situazione attuale. In merito a questa porto le navi che oggi sfruttano l'effetto Magnus mostrando le soluzioni innovative rispetto al passato e le motivazioni che hanno portato i produttori, o i proprietari, di navi a scegliere questa tecnologia. Inoltre, vengono mostrati alcuni esempi di navi non ancora presenti nel mercato ma che nei prossimi anni verranno realizzate.

L'elaborato termina con il quarto capitolo conclusivo in cui vengono riassunti gli aspetti positivi e negativi dei rotori di Flettner e viene mostrato una soluzione ancora solo teorica ma particolarmente innovativa che può incentivare l'utilizzo di questa tecnologia per i successivi anni.

2. L'EFFETTO MAGNUS

L'effetto Magnus è il fenomeno fisico per cui un corpo in moto rotatorio, una sfera per esempio, immerso in una corrente cambia la sua traiettoria nel momento in cui variano le pressioni sui lati del corpo a seguito di variazioni di velocità del flusso. Questo effetto è quello che si osserva anche nel calcio o nel tennis e che banalmente definiamo “il tiro a giro” o “il tiro ad effetto” ma anche in ambito missilistico e navale.

Sono presenti diverse teorie che spiegano il fenomeno e in questo elaborato ne vengono proposte due, il primo paragrafo di questo capitolo si concentra sulla teoria dei moti a potenziale mentre il secondo descrive l'effetto Magnus come differenza di velocità tra i lati opposti del corpo.

2.1. Teoria dei moti a potenziale

Questa teoria consente di scrivere le velocità di un campo fluido attraverso una funzione scalare dipendente dalle coordinate spaziali (x, y, z) e dal tempo t ed è applicabile a fluidi perfetti quindi fluidi in cui non sono presenti sforzi viscosi e dissipazioni di energia. In particolare, l'effetto Magnus viene descritto sovrapponendo moti a potenziali semplici, sotto l'ipotesi di moto piano, ottenendo quindi la soluzione di un problema più complesso. Prima di descrivere questa metodologia è necessario introdurre una serie di nozioni e grandezze che poi saranno presenti nella descrizione dell'effetto Magnus.

Un campo fluido può essere descritto, da un punto di vista cinematico, attraverso due metodi. Il *metodo Lagrangiano* in cui vengono determinate in maniera analitica le *traiettorie* delle singole particelle, e il *metodo Euleriano* in cui si stabiliscono le velocità, con le sue variazioni, in un punto in maniera indipendente da quali particelle si trovano in quel punto. Assumendo che il campo fluido è un continuo, sono presenti ∞^3 particelle quindi secondo il *metodo Lagrangiano* sarebbero da calcolare ∞^3 traiettorie rendendo il problema complesso. Per evitare quindi questa complessità si procede con il *metodo Euleriano* che osserva punti successivi del campo fluido andando a determinare la distribuzione vettoriale delle velocità. Questo vettore ha componenti cartesiane pari a:

$$\begin{aligned}v_x &= v_x(x, y, z, t) \\v_y &= v_y(x, y, z, t) \\v_z &= v_z(x, y, z, t)\end{aligned}\tag{2.1}$$

Nel momento in cui nelle (2.1) non compare il tempo, il moto viene definito *permanente*, in caso contrario si definisce *moto vario*. È possibile analizzare la distribuzione delle velocità anche graficamente tracciando una famiglia di linee, tangenti alla velocità in ogni punto, dette *linee di flusso* o *linee di corrente*.

Queste linee sono descritte da:

$$\begin{aligned} dx &= v_x dt \\ dy &= v_y dt \\ dz &= v_z dt \end{aligned} \quad (2.2)$$

fissato un tempo t_0 ed eliminando quindi la dipendenza dalla variabile tempo. Oltre a traiettorie e linee di flusso è presente una terza famiglia di linee dette *linee di fumo* o *filetti* e rappresentano il luogo dei punti, fissato un istante di tempo, che vengono raggiunti dalle particelle dopo che tutte hanno attraversato un punto fisso del campo. Nel momento in cui il moto è di tipo permanente le tre famiglie di linee coincidono.

Avendo definito il vettore velocità, la rappresentazione Euleriana permette di determinare l'accelerazione del fluido in un determinato punto attraverso la *derivata totale* o *euleriana*:

$$\overrightarrow{a}(s, t) = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (2.3)$$

Essendo dipendente sia dallo spazio s che dal tempo t , l'accelerazione euleriana è somma di due contributi, uno rappresenta la variazione di velocità a seguito del passaggio dal punto fissato lungo una determinata traiettoria (*accelerazione convettiva* o *spaziale*) e l'altro rappresenta la variazione di velocità nel punto rispetto al tempo (*accelerazione locale* o *temporale*).

Assumendo una terna cartesiana di riferimento fissa avente versori $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ la velocità viene scritta come:

$$\vec{a} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} \frac{dz}{dt} \quad (2.4)$$

Dove il primo termine rappresenta l'accelerazione locale mentre gli altri quella spaziale e la velocità risulta essere:

$$\vec{v} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k} \quad (2.5)$$

Dato che la terna è fissa, la derivata dei versori rispetto a tempo e spazio è nulla e le componenti cartesiane dell'accelerazione risultano essere:

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{dv_x}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \frac{dz}{dt} \\ a_y &= \frac{dv_y}{dt} = \frac{\partial v_y}{\partial t} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \frac{dz}{dt} \\ a_z &= \frac{dv_z}{dt} = \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \frac{dz}{dt} \end{aligned} \quad (2.6)$$

È possibile, inoltre, eseguire le seguenti sostituzioni: $\frac{dx}{dt} = v_x$; $\frac{dy}{dt} = v_y$; $\frac{dz}{dt} = v_z$.

Le componenti dell'accelerazione rappresentano i movimenti del mezzo fluido e si possono studiare considerando un parallelepipedo avente gli spigoli pari a δx , δy , δz fissato un tempo t (Figura 2. 1).

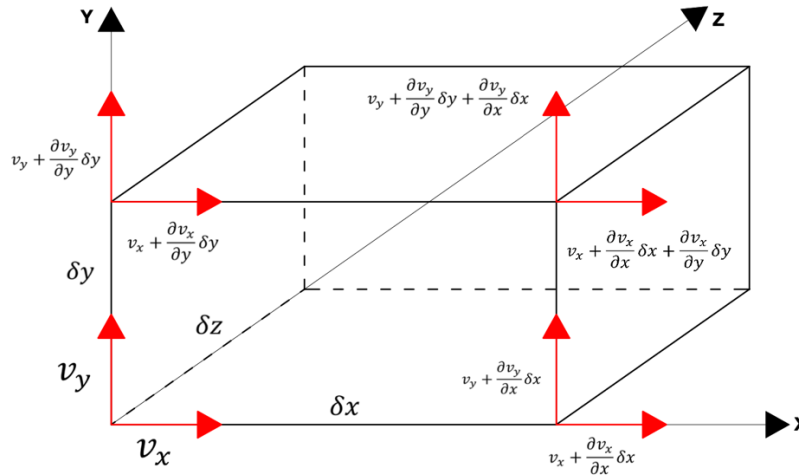


Figura 2. 1: Rappresentazione delle componenti della velocità

I movimenti possibili sono la traslazione, la deformazione lineare, la deformazione angolare e la rotazione. Proprio grazie alla rotazione (Figura 2. 2) si giunge alla definizione del rotore della velocità, quindi dell'ipotesi di irrotazionalità, e infine di moti a potenziale.

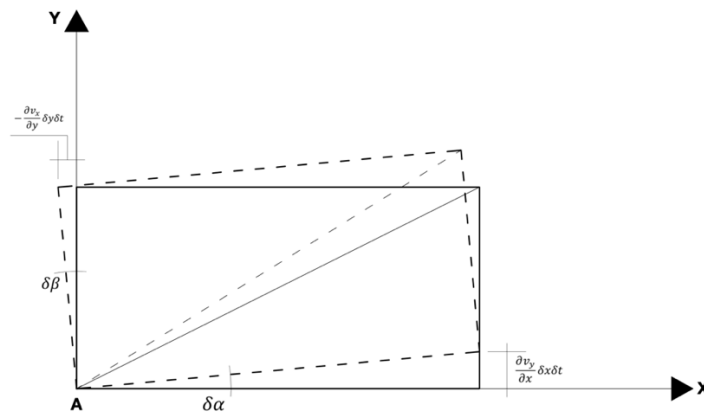


Figura 2. 2: Componenti della rotazione

La rotazione viene espressa attraverso l'angolo con cui la bisettrice nel punto A ha ruotato e risulta essere:

$$\frac{\delta\alpha + \delta\beta}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \delta t \quad (2.7)$$

Dove il termine $\frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)$ rappresenta la velocità di rotazione attorno all'asse z.

Considerando la rotazione rispetto ai tre assi, la velocità di rotazione ha componenti:

$$\begin{aligned} 2\omega_x &= \frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ 2\omega_y &= \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \\ 2\omega_z &= \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Il vettore $2\vec{\omega}$ prende il nome di *rotore della velocità* e viene indicato come:

$$2\vec{\omega} = \text{rot}\vec{v} \quad (2.9)$$

A questo punto è possibile definire un *moto irrotazionale* come un moto in cui il $\text{rot}\vec{v} = 0$, questo significa che il primo membro delle (2.9) si annulla.

La condizione di irrotazionalità implica l'esistenza di una funzione scalare $\phi(x, y, z, t)$, detta *potenziale delle velocità*, tale per cui le componenti cartesiane della velocità possono essere scritte come:

$$v_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad v_y = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad v_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2.10)$$

Dove vettorialmente risulta essere:

$$\vec{v} = \text{grad}\phi \quad (2.11)$$

È quindi possibile rappresentare graficamente il campo di moto attraverso il potenziale collegando tutti i punti aventi lo stesso valore di ϕ . In questo modo si ottengono una famiglia di superfici dette *superfici equipotenziali* tali per cui $\phi = \text{cost}$.

Se la funzione è costante significa che il differenziale è nullo, quindi:

$$d\phi = \frac{\partial \phi}{\partial x} dx + \frac{\partial \phi}{\partial y} dy + \frac{\partial \phi}{\partial z} dz = 0 \quad (2.12)$$

che per le (2.10) risulta:

$$d\phi = v_x dx + v_y dy + v_z dz = \vec{v} \cdot d\vec{n} = 0 \quad (2.13)$$

Quest'ultima relazione impone l'ortogonalità fra la velocità, e quindi le linee di corrente, e le superfici equipotenziali.

Avendo quindi definito la funzione potenziale e la sua rappresentazione grafica è possibile descrivere l'effetto Magnus come sovrapposizione di potenziali semplici, applicando quindi il *metodo delle singolarità idrodinamiche*.

2.1.1. Metodo delle singolarità idrodinamiche

Come già accennato l'effetto Magnus viene descritto come sovrapposizione di potenziali semplici [2], nello specifico viene definito con un potenziale di moto uniforme traslatorio, un dipolo e un vortice irrotazionale.

Le due ipotesi su cui si basa il metodo sono moto piano (x-y) e moto irrotazionale e prima di vedere il risultato di questa sovrapposizione è necessario introdurre separatamente i tre potenziali.

2.1.1.1. Moto uniforme traslatorio

Nel caso di moto uniforme le linee di corrente sono tra di loro parallele avente valore di velocità con modulo pari a v , come rappresentato in *Figura 2. 3*. Definito α l'inclinazione delle linee di flusso rispetto l'orizzontale, la velocità ha componenti:

$$\begin{cases} v_x = v \cos \alpha \\ v_y = v \sin \alpha \end{cases} \quad (2.14)$$

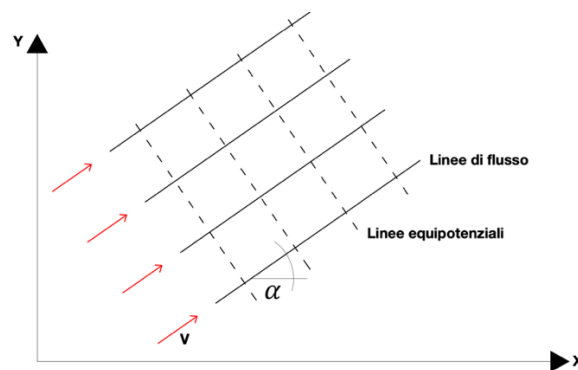


Figura 2. 3: Moto uniforme traslatorio

Andando a combinare le (2. 10) con le (2. 14) si ottiene:

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial x} = v \cos \alpha \\ \frac{\partial \phi}{\partial y} = v \sin \alpha \end{cases} \quad (2.15)$$

Considerando la prima delle (2. 15), portando il ∂x a destra e integrando entrambi i membri si ottiene:

$$\phi = vx \cos \alpha + \phi_c(y) \quad (2.16)$$

Dove il termine $\phi_c(y)$ rappresenta una funzione scalare dipendente dalla variabile y . Sostituendo quest'ultima espressione trovata nella seconda delle (2. 15) e integrando nuovamente entrambi i membri si ottiene:

$$\phi = v(x \cos \alpha + y \sin \alpha) \quad (2. 17)$$

2.1.1.2. Punto sorgente

Il punto sorgente è un moto piano avente una portata Q costante uscente dall'asse perpendicolare al piano x - y . La velocità ha una direzione radiale e il modulo è funzione della distanza r , distanza che collega il generico punto P con l'origine del sistema di riferimento (Figura 2. 4).

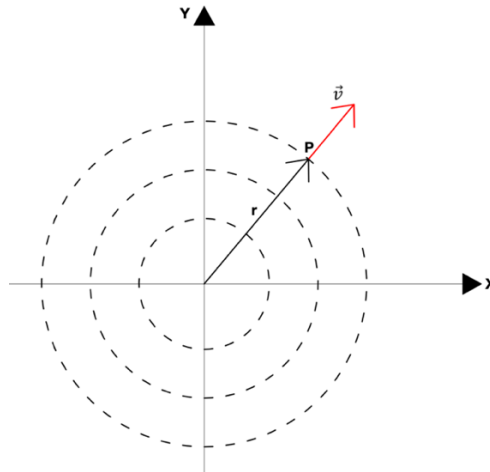


Figura 2. 4: Punto sorgente

Il modulo della velocità risulta essere:

$$|\vec{v}| = \frac{|Q|}{2\pi r} \quad (2. 18)$$

Dove il raggio si può scrivere come: $r = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Proiettando la velocità sugli assi e usando le (2. 10) si ottengono le componenti:

$$\begin{cases} v_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} = v \cos \alpha = \frac{Q}{2\pi r} \frac{x}{r} = \frac{Q}{2\pi} \frac{x}{x^2 + y^2} \\ v_y = \frac{\partial \phi}{\partial y} = v \sin \alpha = \frac{Q}{2\pi r} \frac{y}{r} = \frac{Q}{2\pi} \frac{y}{x^2 + y^2} \end{cases} \quad (2. 19)$$

Andando a integrare queste relazioni si ottiene la funzione potenziale:

$$\phi = \frac{Q}{2\pi} \log \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2. 20)$$

La costante Q viene chiamata *intensità della sorgente* e in questo caso assume un valore positivo in quanto la portata è uscente dall'origine. Nel momento in cui questa è diretta verso il centro assume segno negativo e non si parla più di sorgente ma di *punto assorbente*. Inoltre, l'origine rappresenta un punto di singolarità in quanto lo si può vedere come il luogo dei punti in cui il raggio tende a zero e quindi per la (2. 18) si ha una velocità che tende a infinito.

2.1.1.3. Vortice irrotazionale antiorario

Per poter descrivere il potenziale di un vortice antiorario è necessario introdurre il concetto di *circolazione* o *circuitazione* Γ , ovvero l'integrale circolare del prodotto scalare tra la velocità \vec{v} e lo spostamento $d\vec{s}$.

$$\Gamma = \oint \vec{v} \cdot d\vec{s} \quad (2.21)$$

La circolazione rappresenta quindi il flusso del vettore velocità e si annulla quando il campo fluido è semplicemente connesso³.

Considerando la *Figura 2. 5*, e prendendo come riferimento la circonferenza di raggio r e centro l'origine del sistema di riferimento, questo dominio non soddisfa più la definizione di semplicemente connesso, in quanto il centro è un punto di singolarità; quindi, la circuitazione è diversa da zero.

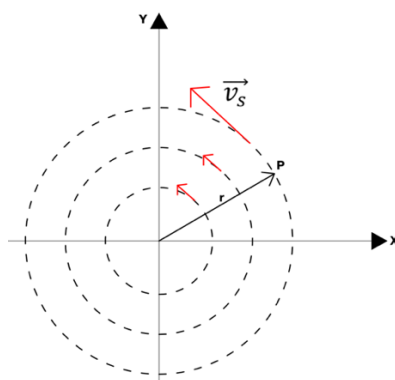


Figura 2. 5: Vortice irrotazionale antiorario

Dato che deve valere l'ipotesi di moto piano è possibile esprimere il modulo della velocità \vec{v}_s come:

$$v_s = \frac{k}{r} \quad (2.22)$$

dove k rappresenta la velocità angolare attorno all'asse z , nello specifico è il termine a destra dell'uguale della terza equazione delle (2. 8).

³ Semplicemente connesso: il dominio è formato da un unico elemento e non sono presenti buchi al suo interno

Applicando la definizione di potenziale alla velocità v_s è possibile scriverla come:

$$v_s = \frac{\partial \phi}{\partial s} \quad (2.23)$$

Con s la *direzione circolare* a cui è riferita la velocità. Combinando la (2.22) con la (2.23) si ottiene:

$$\frac{\partial \phi}{\partial s} = \frac{k}{r} \quad (2.24)$$

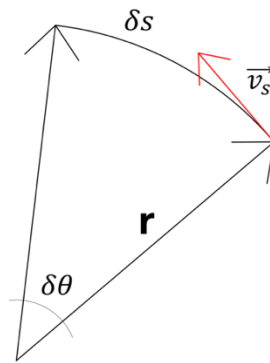


Figura 2. 6: Relazione fra angolo e spostamento infinitesimo

Dalla Figura 2. 6 è possibile ricavare la condizione geometrica per cui

$$\delta s = r \delta \theta \quad (2.25)$$

Sostituendo l'ultima relazione nella (2.24) e integrando si ottiene:

$$\phi = k\theta + c \quad (2.26)$$

Inserendo quindi la (2.22) nella (2.21) e integrando si ottiene, dato che la velocità è costante:

$$\Gamma = 2\pi r v_s = 2\pi r \frac{k}{r} \implies k = \frac{\Gamma}{2\pi} \quad (2.27)$$

Sostituendo quest'ultima relazione nella (2.26) e usando la relazione $\theta = \tan^{-1} \frac{y}{x}$ il potenziale risulta essere:

$$\phi = \frac{\Gamma}{2\pi} \tan^{-1} \frac{y}{x} + c \quad (2.28)$$

Scomponendo il vettore velocità sugli assi x e y, e applicando la definizione di potenziale si ricava:

$$\begin{cases} v_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} = -\frac{\Gamma}{2\pi} \frac{y}{x^2+y^2} \\ v_y = \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\Gamma}{2\pi} \frac{x}{x^2+y^2} \end{cases} \quad (2.29)$$

Infine, si ricava il modulo della velocità che risulta:

$$|\vec{v}| = \sqrt{\left(-\frac{\Gamma}{2\pi} \frac{y}{x^2+y^2}\right)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2\pi} \frac{x}{x^2+y^2}\right)^2} = \frac{|\Gamma|}{2\pi r} \quad (2.30)$$

Come per il caso precedente, l'origine del sistema di riferimento rappresenta una singolarità in quanto la velocità tende all'infinito nel momento in cui il raggio tende a zero, come si vede dalla (2.30).

Avendo definito questi tre potenziali semplici è possibile andare a sovrapporli per descrivere l'effetto Magnus. Questa sovrapposizione viene eseguita a stadi successivi, combinando prima potenziali semplici e successivamente i risultati di tali combinazioni con altri potenziali.

La prima combinazione riguarda la coppia *punto sorgente-punto assorbente* posti a una distanza d caratterizzati dalla stessa portata Q , ovviamente con segno opposto. Assumendo un sistema di riferimento x-y tale per cui i punti appartengono all'asse x e l'asse y è perpendicolare nel punto medio della distanza tra i punti.

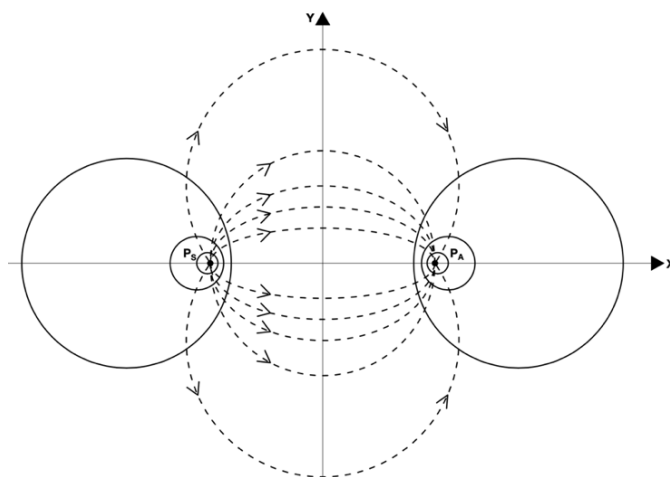


Figura 2. 7: Coppia punto sorgente – punto assorbente

La funzione potenziale viene scritta combinando la (2. 20), con la rispettiva di segno opposto, introducendo un termine che tiene conto della distanza tra i punti e l'origine del sistema di riferimento:

$$\phi = \frac{Q}{2\pi} \left[\log \sqrt{\left(x + \frac{d}{2}\right)^2 + y^2} - \log \sqrt{\left(x - \frac{d}{2}\right)^2 + y^2} \right] \quad (2.31)$$

Applicando le proprietà dei logaritmi:

$$\phi = \frac{Q}{4\pi} \log \left[\frac{\left(x + \frac{d}{2}\right)^2 + y^2}{\left(x - \frac{d}{2}\right)^2 + y^2} \right] \quad (2.32)$$

Considerando la *Figura 2. 7*, le curve tratteggiate rappresentano le linee di corrente mentre le curve a tratto pieno rappresentano le linee equipotenziali.

Andando a sovrapporre la coppia di punti appena descritta con un moto uniforme traslatorio parallelo all'asse x si ottiene la situazione di *Figura 2. 8*.

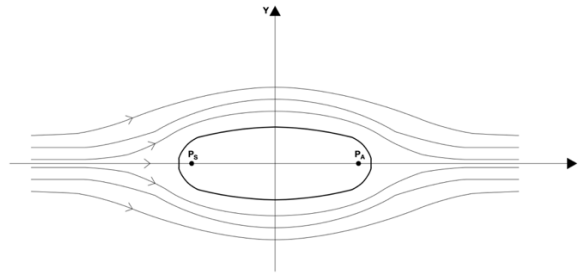


Figura 2. 8: Moto uniforme che investe la coppia sorgente-assorbente

Per definire il potenziale di questa situazione è necessario comporre la (2. 17) con la (2. 32) tenendo presente che nell'ultima il coseno dell'angolo è unitario e il seno è nullo in quanto l'angolo è pari a zero.

$$\phi = \frac{Q}{4\pi} \log \left[\frac{\left(x + \frac{d}{2}\right)^2 + y^2}{\left(x - \frac{d}{2}\right)^2 + y^2} \right] + vx \quad (2.33)$$

La curva di forma ellittica rappresenta una linea di corrente chiusa che tende ad una circonferenza nel momento in cui la distanza d tende a zero. Questa linea di corrente contiene al suo interno la porzione di campo di moto non influenzato dal moto uniforme. Rappresenta quindi una superficie materializzabile definita *corpo chiuso* o *ovale di Rankine*. Il punto di intersezione tra la linea di corrente chiusa e l'asse x è un punto di ristagno, punto in cui la velocità localmente è nulla e quindi per il Teorema di Bernoulli si ha la pressione statica massima.

Facendo tendere a zero la distanza $d/2$ (Figura 2. 9) si ottiene un *dipolo* o *coppietta* a cui corrisponde una intensità D . Questa intensità è legata alla portata e alla quantità $d/2$:

$$Q = \frac{D}{d/2} = \frac{2D}{d} \quad (2.34)$$

Sostituendo questa relazione nella (2.32) e facendo tendere a zero la distanza punto - origine del sistema di riferimento, si ottiene la funzione potenziale del dipolo:

$$\phi = \lim_{d \rightarrow 0} \frac{2D}{4\pi d} \log \left[\frac{\left(x + \frac{d}{2}\right)^2 + y^2}{\left(x - \frac{d}{2}\right)^2 + y^2} \right] \quad (2.35)$$

Applicando de l'Hopital, essendo una forma indefinita $0/0$, si ottiene il potenziale:

$$\phi = \frac{2D}{\pi} \frac{x}{x^2 + y^2} \quad (2.36)$$

Andando a sovrapporre un dipolo con un moto uniforme parallelo all'asse x si genera una corrente detta *corrente euleriana*. Il potenziale di questa corrente viene definito come combinazione della (2.17) con la (2.36), ottenendo:

$$\phi = \frac{2D}{\pi} \frac{x}{x^2 + y^2} + vx \quad (2.37)$$

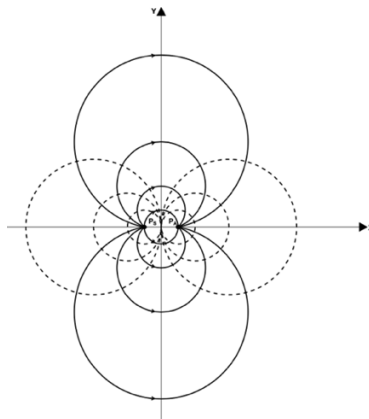


Figura 2. 9: Rappresentazione di un dipolo

Applicando la definizione di potenziale si possono determinare le componenti di velocità lungo x e lungo y, ricavando:

$$\begin{cases} v_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{2D}{\pi} \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2} + v \\ v_y = \frac{\partial \phi}{\partial y} = -\frac{4D}{\pi} \frac{xy}{(x^2 + y^2)^2} \end{cases} \quad (2.38)$$

Come si può vedere dalla *Figura 2. 10*, l'ovale di Rankine è diventato una circonferenza e i punti di intersezione di questa circonferenza con l'asse x sono due punti di ristagno.

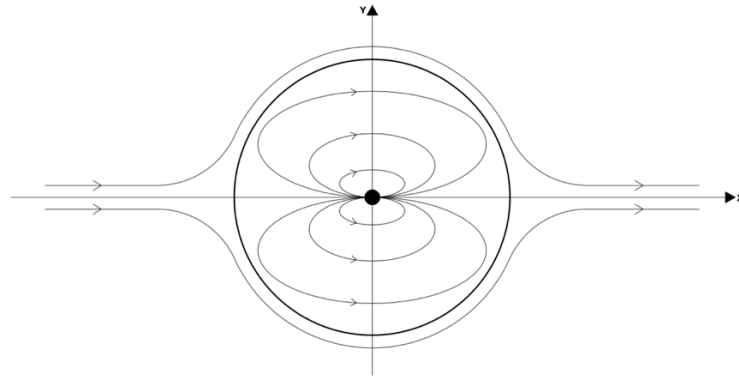


Figura 2. 10: Rappresentazione del dipolo investito da un moto uniforme

Per determinare la coordinata x_0 dei punti di ristagno è necessario porre a zero la prima delle (2. 38) ottenendo:

$$v = \frac{2D}{\pi x_0^2} \quad (2. 39)$$

Quindi le coordinate dei punti di ristagno risultano essere:

$$x_0 = \pm \sqrt{\frac{2D}{\pi v}} \quad (2. 40)$$

Questa combinazione di potenziali rappresenta il campo di moto nel momento in cui un cilindro è immerso in una corrente uniforme. Questo esempio si può vedere in applicazioni comuni come un pilone di un ponte in un fiume.

Nel momento in cui il cilindro è in rotazione, cambia la distribuzione delle linee di corrente esterne al solido di Rankine e viene a manifestarsi l'effetto Magnus. Per descrivere questo fenomeno è necessario eseguire un'ultima sovrapposizione, tra la corrente euleriana e un vortice irrotazionale antiorario avente il centro coincidente con quello del dipolo.

Per determinare le componenti di velocità è necessario combinare le (2. 29) con le (2. 38), ottenendo:

$$\begin{cases} v_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{2D}{\pi} \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2} + v - \frac{\Gamma}{2\pi} \frac{y}{x^2 + y^2} \\ v_y = \frac{\partial \phi}{\partial y} = -\frac{4D}{\pi} \frac{xy}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\Gamma}{2\pi} \frac{x}{x^2 + y^2} \end{cases} \quad (2. 41)$$

Dove la funzione potenziale è data dalla combinazione della (2. 28) con la (2. 37):

$$\phi = \frac{2D}{\pi} \frac{x}{x^2+y^2} + vx + \frac{\Gamma}{2\pi} \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (2. 42)$$

L'effetto prodotto da questa combinazione è mostrato in *Figura 2. 11* dove le linee di corrente superiori sono meno fitte in quanto il moto uniforme e la rotazione sono discordi. Questa discordanza provoca un valore di velocità ridotto rispetto al solo caso di moto uniforme, in accordo con la prima delle (2. 41). Al contrario, le linee di corrente inferiori sono più fitte dato che moto uniforme e rotazione sono concordi, provocando un aumento della velocità del flusso.

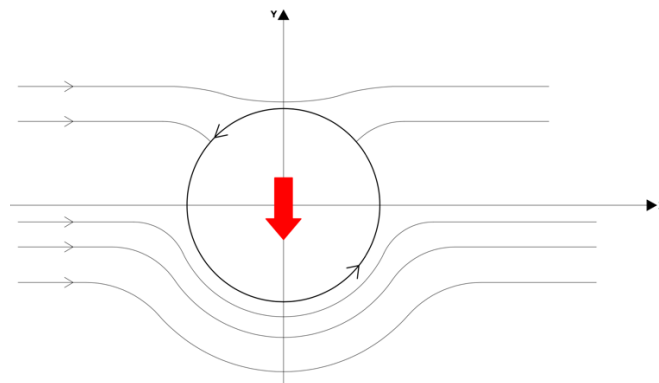


Figura 2. 11: Combinazione della corrente euleriana con il vortice irrotazionale antiorario

In accordo con il teorema di Bernoulli, nella parte superiore dove diminuisce la velocità si ha un incremento di pressione. Al contrario invece nella parte inferiore, in cui ad un incremento di velocità si ha una diminuzione di pressione. Questa asimmetria nella distribuzione di pressione dà vita ad una forza detta *portanza*, diretta dalla zona di alta pressione alla zona di bassa pressione, che genera uno scostamento del corpo dalla traiettoria rettilinea.

Anche in questa situazione sono presenti due punti di ristagno che però non appartengono all'asse x. Per determinare le coordinate di questi è necessario porre nulle le (2. 41), ottenendo le coordinate:

$$\left[\pm \frac{r}{2D} \sqrt{\pi v 2D - \left(\frac{\Gamma}{4}\right)^2}; \frac{\Gamma r^2}{4Qd} \right] \quad (2. 43)$$

Come si può vedere da quest'ultima relazione, i punti di ristagno dipendono dal valore assunto dalla circuitazione. A seconda dei valori assunti, i punti di ristagno possono trovarsi nella metà superiore della circonferenza, nella metà inferiore o coincidere nell'estremità inferiore.

2.2. Spiegazione attraverso la differenza di velocità sui lati opposti del corpo

Un secondo approccio per spiegare l'effetto Magnus si basa sulla differenza di velocità del flusso sui lati apposti del corpo [7] e sul Teorema di Bernoulli⁴. Il teorema mette in relazione la pressione, il carico cinetico e l'energia potenziale, e può essere scritto come:

$$p + \rho \frac{v^2}{2} + \rho gh = cost \quad (2.44)$$

dove il termine ρgh si può trascurare in quanto vale l'ipotesi di moto piano. Questo teorema ha validità fin tanto che la viscosità possa essere trascurata⁵ e questo si ha nel momento in cui il numero di Reynolds⁶ assume valori elevati. Questo teorema afferma che ad un incremento di pressione corrisponde un decremento di velocità ed è su questo principio su cui si basa la spiegazione dell'effetto Magnus.

Posizionando quindi un corpo, un cilindro o una sfera, in rotazione in una corrente, sul lato in cui la rotazione è concorde con la direzione della corrente la velocità del flusso è maggiore rispetto alla medesima situazione in cui però l'oggetto è fermo. Contemporaneamente, dalla parte in cui rotazione e corrente sono discordi si ha una velocità del flusso minore rispetto al caso in cui il corpo non ruota. Quindi per il teorema di Bernoulli, dove la velocità aumenta diminuisce la pressione e dove la velocità diminuisce si ha un aumento di pressione. Questa asimmetria nella distribuzione delle pressioni genera una forza di sollevamento diretta dalla zona di alta pressione alla zona di bassa pressione. Avendo trascurato la viscosità, e quindi la resistenza del flusso, si assume che non ci sia trascinamento del fluido dovuto al movimento dell'oggetto e quindi il fluido è solo accelerato o decelerato da un gradiente di pressione nella direzione delle linee di flusso.

Se però si suppone che la variazione di velocità sia da attribuire alla viscosità, allora non è necessario introdurre una differenza di pressione sui lati del corpo come una seconda causa della differenza di velocità. Se è vero che la viscosità porta a questa variazione allora non è più possibile applicare il teorema di Bernoulli per determinare la differenza di pressione e quindi vengono a mancare i presupposti per generare una forza di sollevamento. Inoltre, questa spiegazione non considera l'effetto Magnus negativo, effetto caratterizzato dal fatto che solo uno degli strati limite a contatto con i due lati del corpo transita a regime turbolento. In entrambe le situazioni sopra descritte è comunque presente una asimmetria delle pressioni; quindi, se si considera il fenomeno per valori di Reynolds dell'ordine di 10^3 - 10^4 , è possibile trascurare la seconda spiegazione e quindi si può mantenere valida la relazione tra differenza di pressione e di velocità. Con quest'ultima assunzione, si spiega l'effetto Magnus in maniera semplificata in quanto la rotazione spiega la differenza di velocità, questa porta ad una differenza di pressione che a sua volta genera una forza.

⁴ Daniel Bernoulli: Groninga, 8 Febbraio 1700 – Basilea, 17 Marzo 1782

⁵ Viscosità: attrito interno di un liquido, esprime la capacità con cui uno strato di liquido scorre rispetto ad uno strato adiacente

⁶ Osborne Reynolds: Belfast, 23 Agosto 1842 – Watchet, 21 Febbraio 1912. $Re = \frac{\rho v L}{\mu}$

Questo approccio semplificativo consente di determinare il gradiente di pressione tra la parte superiore e inferiore del cilindro. Definito r il raggio del cilindro e k la velocità angolare attorno all'asse z in senso antiorario, la velocità tangenziale risulta:

$$v_t = kr \quad (2.45)$$

Per determinare le pressioni si applica il teorema di Bernoulli ma prima è necessario determinare la distribuzione di velocità (*Figura 2. 12*) attorno al cilindro, supponendo che questo non sia in rotazione. Per fare questo è necessario imporre nella prima delle (2. 38) $x=0$ ottenendo:

$$v_{x=0} = \frac{2D}{\pi y^2} + v \quad (2.46)$$

Imponendo inoltre che $y=r$ si ricava la velocità sulla circonferenza:

$$v_{x=0,y=r} = \frac{2D}{\pi r^2} + v = 2v \quad (2.47)$$

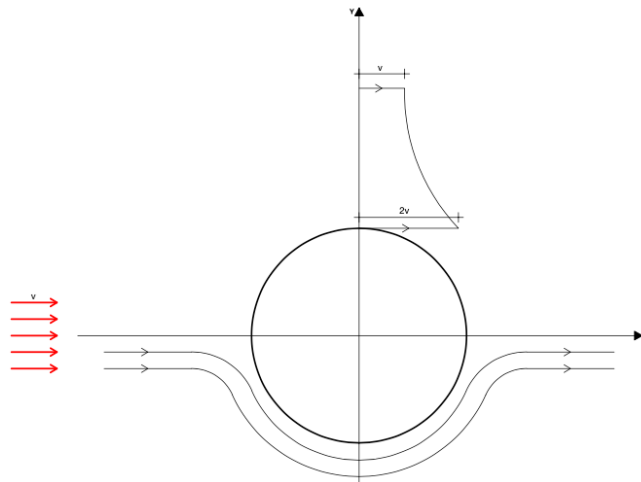


Figura 2. 12: Distribuzione della velocità

La pressione nella parte superiore risulta essere:

$$p_s = cost - \frac{\rho}{2}(2v - kr)^2 \quad (2.48)$$

Mentre nella parte inferiore risulta:

$$p_i = cost - \frac{\rho}{2}(2v + kr)^2 \quad (2.49)$$

Assumendo che la velocità tangenziale sia trascurabile rispetto alla velocità della corrente $2v$, la differenza di pressione tra la parte superiore e inferiore risulta:

$$p_s - p_i = 4\rho vkr \quad (2.50)$$

Di conseguenza il gradiente di pressione risulta:

$$\frac{p_s - p_i}{4r} = 2\rho vk \quad (2.51)$$

Quest'ultima equazione fornisce la *forza di pressione irrotazionale* o la *forza Magnus* [3].

In realtà assumere elevati numeri di Reynolds porta ad un problema in quanto si ha il distacco dello strato limite. In questo prevalgono gli sforzi viscosi rispetto a quelli inerziali e nel momento in cui avviene il distacco si crea a valle del corpo una scia vorticoso. In questa zona Bernoulli perde la sua validità e di conseguenza non sono più note le distribuzioni di pressione e di velocità. Questo distacco coinvolge circa metà della superficie del corpo e si può osservare in *Figura 2.14*, nel paragrafo successivo.

2.3. Esempi di situazioni in cui compare l'effetto Magnus

Dopo aver definito nei paragrafi precedenti l'effetto Magnus da un punto di vista teorico, in questo vengono mostrate alcune sue applicazioni pratiche in quanto questo fenomeno si può notare sia nello sport che in ambito ingegneristico. Per quanto riguarda l'ambito sportivo la manifestazione più evidente di questo fenomeno si ha nel "tiro a giro" dove si può notare come la palla, in rotazione, non compie una traiettoria rettilinea ma subisce una curvatura. L'esempio più famoso è probabilmente la punizione di Roberto Carlos del 1997, dove posizionandosi dietro al giocatore, si nota come la palla curvi prima di entrare in porta. Il giocatore è riuscito ad "applicare" l'effetto Magnus in quanto ha colpito la palla con la parte esterna del piede, dandole una rotazione antioraria, e imprimendo potenza per farla spostare in avanti. Sommando quindi la rotazione e la traslazione della palla immersa nel flusso d'aria si è generata la forza Magnus, schematizzata in *Figura 2. 13*, che ha permesso alla palla di aggirare la barriera ed arrivare alla porta.

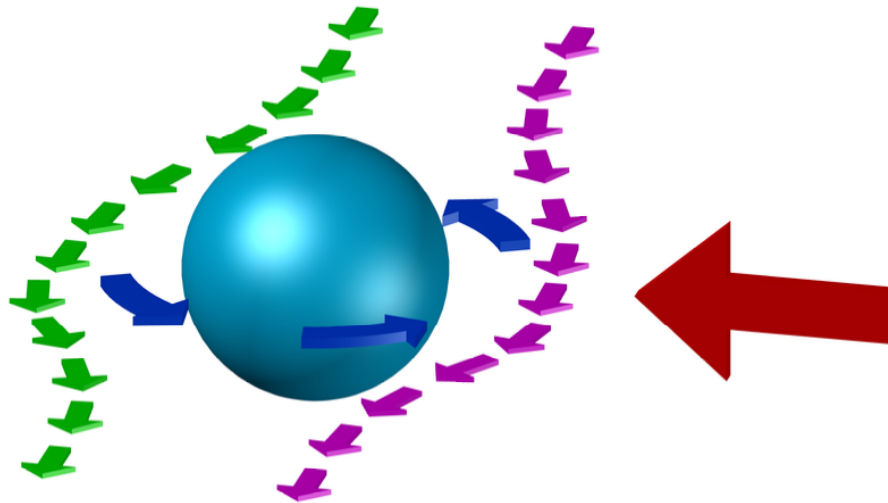


Figura 2. 13: Effetto Magnus applicato al pallone

Per capire però cosa accade nelle immediate vicinanze della palla viene preso come riferimento lo studio di Masaya Muto, Hiroaki Watanabe, Makoto Tsubokura e Nobuyuki Oshima [8] che studiarono appunto la rotazione di una sfera per elevati numeri di Reynolds, tre per la precisione. Lo studio fa riferimento all'effetto Magnus negativo che è lo stesso che si instaurò nella punizione di Roberto Carlos in quanto la non omogeneità della superficie del pallone dovuta alla presenza di cuciture, per esempio, ha fatto sì che il distacco dello strato limite non fosse uniforme. Per valutare gli effetti intorno al corpo è stato creato un modello in cui la sfera era posizionata al centro di un condotto rettangolare e all'ingresso e all'uscita di questo dominio spaziale è stata imposta la condizione di flusso uniforme non disturbato. È stata eseguita questa assunzione in modo da tener conto che solo in prossimità della sfera il flusso venisse accelerato o decelerato dalla rotazione. Lo studio mostra dove avviene il distacco dello strato limite e come è strutturata la scia vorticoso per valori

differenti di spin⁷ e per valori differenti di Reynolds. Assunto D il diametro della sfera, ω la velocità angolare e U_o la velocità di entrata del flusso nel dominio, lo spin è definito come:

$$\Gamma = \frac{D\omega}{U_o} \quad (2.52)$$

Per vedere cosa è successo attorno alla palla durante il calcio di punizione, tra i vari risultati ottenuti dai ricercatori mostro solo quello relativo alla simulazione con $\Gamma = 0,2$ e $Re = 2,0 \times 10^5$. Il valore di spin pari a 0,2 è stato scelto nell'intervallo (0; 0,5), intervallo per cui si ha l'effetto Magnus negativo. La simulazione mostra come la zona di scia a valle della sfera si sposta verso l'alto e il punto di distacco si sposta verso valle nella zona inferiore e verso monte in quella superiore. L'andamento della scia verso l'alto ha fatto capire al gruppo di ricerca che la forza di sollevamento era diretta verso il basso. Assumendo numeri di Reynolds molto maggiori o molto minori di quello sopra scritto e valori di spin maggiori di 0,5 non si osserva più l'effetto Magnus negativo.

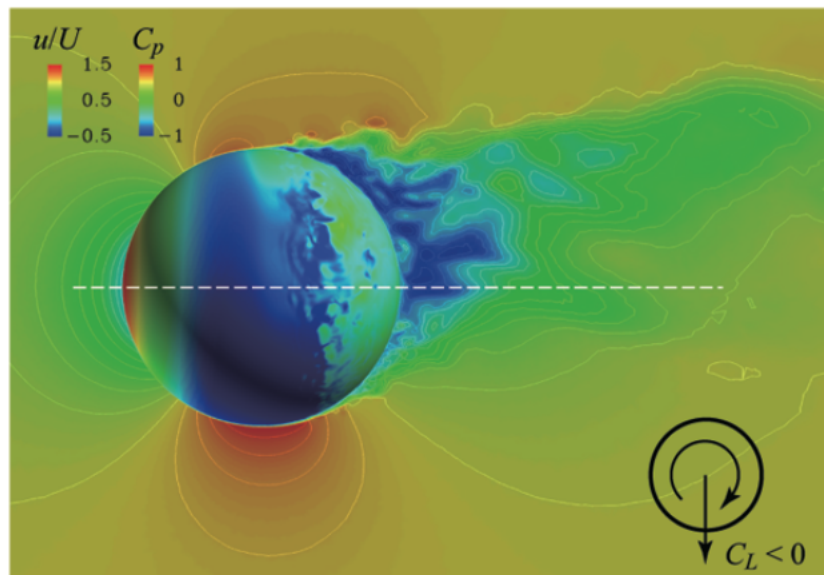


Figura 2. 14: Andamento della zona di scia [8]

Da questa figura si può osservare anche quanto detto nel paragrafo precedente, ovvero che il distacco dello strato limite coinvolge circa metà della superficie della sfera e nella zona a valle tra i due punti di distacco non sono più note le distribuzioni di velocità e di pressione.

In ambito ingegneristico sono presenti due settori in cui l'effetto Magnus compare, uno tutt'ora usato mentre l'altro abbandonato nel corso degli anni. Il primo settore riguarda l'ambito missilistico in quanto l'effetto Magnus ha un ruolo importante sulla stabilità del proiettile. In volo i proiettili ruotano attorno al loro asse longitudinale per ottenere stabilità e semplificare il sistema di controllo, però questa rotazione genera un flusso asimmetrico

⁷ Momento angolare intrinseco, rappresenta la rotazione intorno al proprio asse

attorno al corpo e questo porta alla nascita di una forza laterale perpendicolare al piano di moto e un momento di imbardata⁸ che modificano la traiettoria. In realtà la forza Magnus è una percentuale piccola rispetto alla forza normale, risultante della forza laterale e longitudinale, ma può creare un moto conico che va a influenzare la stabilità del corpo. Gli studi sull'effetto Magnus in relazione al proiettile sono molteplici e i risultati indicano che l'effetto Magnus può nascere o per una distorsione dello strato limite o per una separazione di questo dovuto ad una asimmetria del flusso. Nello specifico, quando l'angolo di incidenza⁹ è basso la causa è dovuta alla distorsione dello strato limite, nel momento in cui l'angolo di incidenza cresce si genera un flusso asimmetrico che porta alla separazione dello strato limite. Gli studi non si sono focalizzati solo sulla causa dell'effetto Magnus ma anche sulla geometria del proiettile, infatti, questi possono essere dotati, o meno, di alette posteriori. In questo elaborato viene riportato lo studio di un gruppo di professori cinesi, Jintao Yin, Xiaosheng Wu e Juanmian Lei [11], che si è concentrato sul campo di flusso supersonico¹⁰ di un proiettile alettato con un angolo di incidenza che va tra i 4° e i $30,3^\circ$, soggetto all'effetto Magnus. Il proiettile, *Figura 2. 15*, usato nelle simulazioni ha un diametro $d=45,72\text{ mm}$ e le pinne hanno una inclinazione rispetto al corpo pari a $24,2^\circ$.

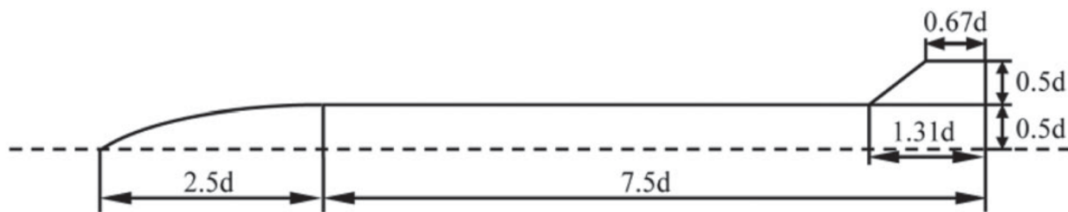


Figura 2. 15: Configurazione geometrica del proiettile [11]

I parametri che definiscono il flusso turbolento e supersonico sono il numero di Reynolds e il numero di Mach¹¹ mentre i valori che definiscono le proprietà del flusso, alla frontiera del dominio e in prossimità del corpo, sono la pressione, la temperatura, la densità, la velocità lineare e angolare.

Lo studio del gruppo cinese ha mostrato come il campo di flusso viene modificato, come cambia la posizione del distacco dello strato limite e come variano le pressioni sul corpo, tutto in funzione dell'angolo di incidenza.

Assunti come angoli di incidenza i valori $\alpha = 4,0^\circ$, $\alpha = 12,6^\circ$ e $\alpha = 30,3^\circ$, il rapporto di densità ρ/ρ_∞ ¹² e una sezione generica del proiettile visto frontalmente il gruppo di ricerca ha osservato come per un angolo pari a $\alpha = 4,0^\circ$ non si ha la separazione tra flusso e corpo. Per valori maggiori di $4,0^\circ$ inizia il distacco e come l'angolo di incidenza arriva a $\alpha = 12,6^\circ$ si ha la creazione di vortici secondari. Infine, come α raggiunge i $30,3^\circ$ si ha un aumento

⁸ Oscillazione del corpo attorno all'asse verticale

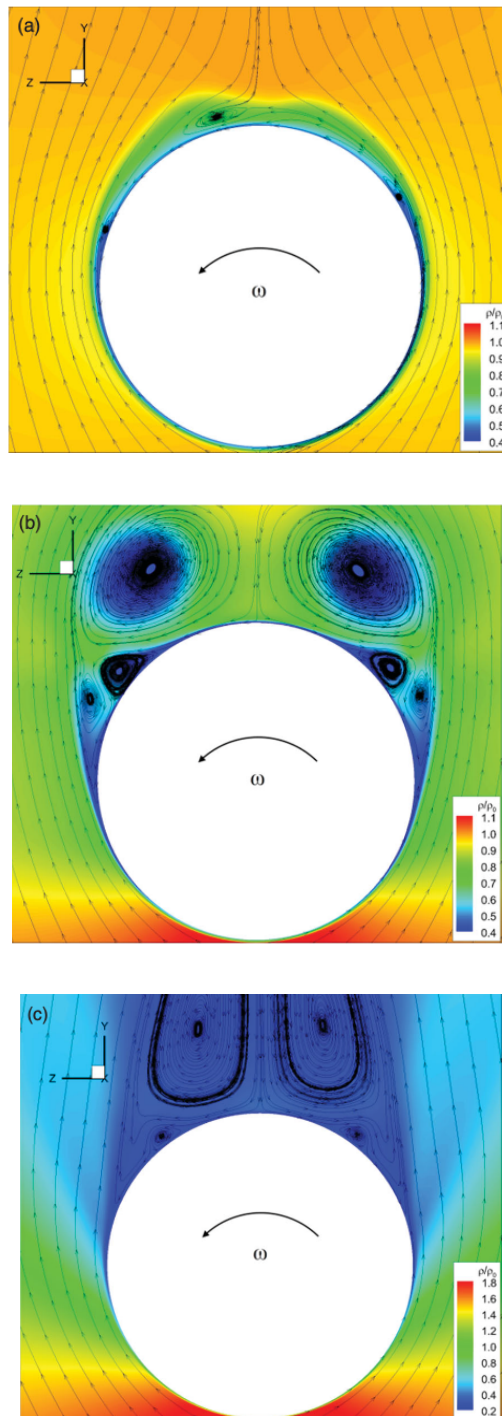
⁹ Angolo con cui il profilo alare divide il campo fluido

¹⁰ La velocità del campo di flusso è maggiore della velocità con cui il suono viaggia nel campo stesso

¹¹ Rapporto adimensionale dato dal rapporto tra la velocità di un oggetto in moto in un fluido e la velocità del suono nel fluido stesso

¹² ρ_∞ : densità in condizioni di flusso libero

della velocità del flusso trasversale e i punti di separazione si spostano verso l'alto, come mostrato in *Figura 2. 16*.



*Figura 2. 16: Curve di densità in funzione dell'angolo di incidenza: (a) $\alpha=4,0^\circ$; (b) $\alpha=12,6^\circ$; (c) $\alpha=30,3^\circ$
[11]*

Prendendo come riferimento la parte finale del proiettile dove sono presenti le alette, si può vedere come variano le distribuzioni di pressione al variare dell'angolo di incidenza.

Definito il coefficiente di pressione $c_p = p_o/p_\infty$ ¹³, la sua distribuzione è rappresentata in *Figura 2. 17*.

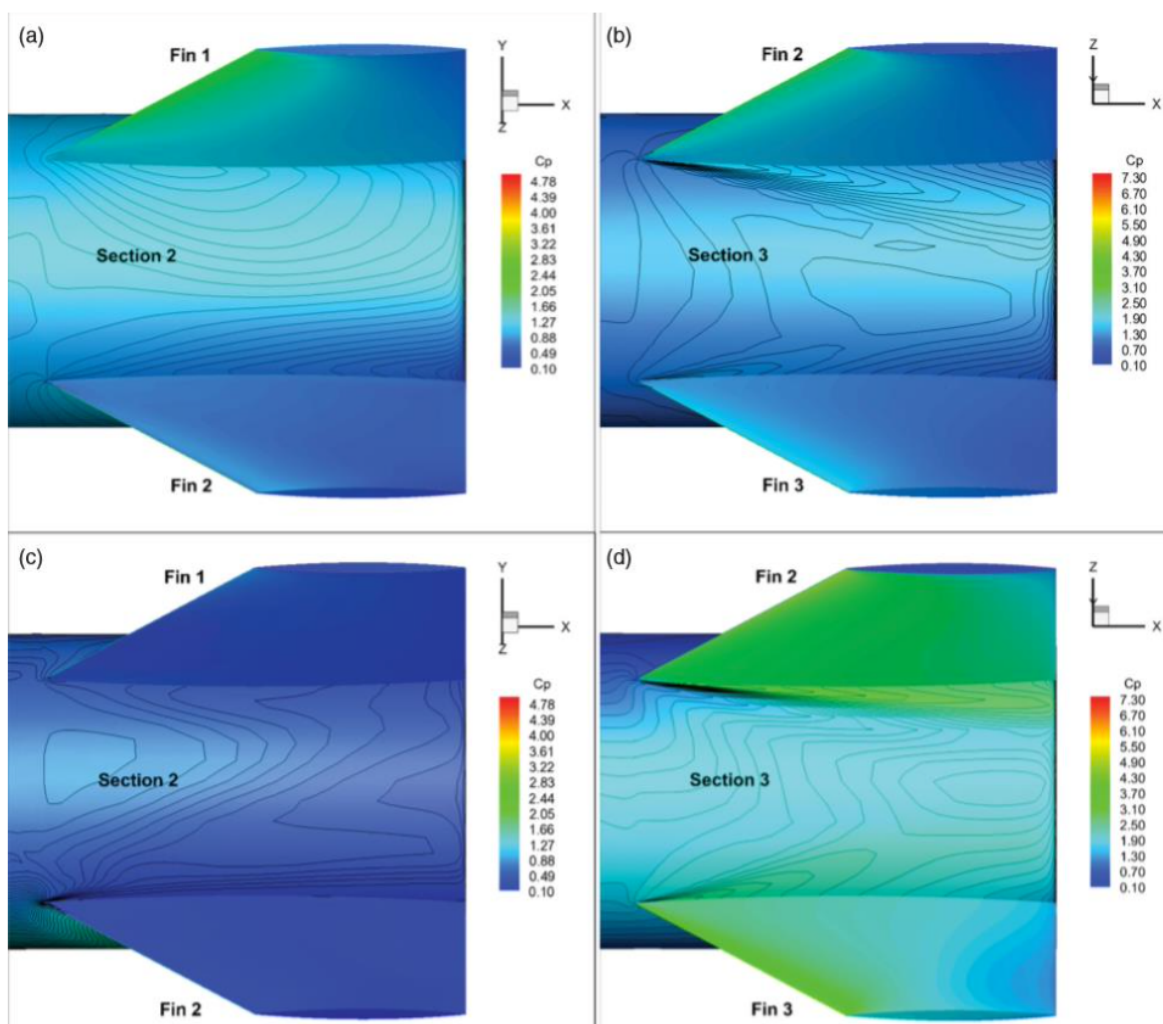


Figura 2. 17: Coefficiente di pressione sul proiettile: (a) $\alpha = 4,0^\circ$ Sezione 2, (b) $\alpha = 4,0^\circ$ Sezione 3, (c) $\alpha = 20,2^\circ$ Sezione 2, (d) $\alpha = 20,2^\circ$ Sezione 3 [11]

Osservando la figura precedente è possibile eseguire un confronto fra caso (a) e (c) e fra (b) e (d). Confrontando il caso (a) con il (c) si può vedere come il coefficiente di pressione è maggiore per minori angoli di incidenza. Al contrario, nella sezione 3 (caso (b) e (d)), il coefficiente cresce con l'aumentare dell'angolo di incidenza. Inoltre, osservando i valori di pressione sulle pinne si può affermare che la *sezione 2* non risulta influenzata dall'urto fra flusso e alette. Al contrario invece, la *sezione 3* è influenzata dall'urto fra i due.

Rimanendo nella parte finale del proiettile è possibile mostrare, come in *Figura 2. 18*, lo spostamento dei punti di distacco dello strato limite all'aumentare dell'angolo di incidenza. Nello specifico si può affermare come per un angolo pari a 4° si ha una distribuzione del coefficiente di pressione abbastanza uniforme attorno al proiettile in cui si ha una distorsione

¹³ p_o : pressione in prossimità del corpo, p_∞ : pressione in condizioni di flusso libero

dello strato limite. Come l'angolo di incidenza assume valore $12,6^\circ$ si genera una asimmetria nella distribuzione del coefficiente di pressione, valori bassi nella parte superiore e valori alti in quella inferiori. È possibile notare anche il distacco dello strato limite tra la *aletta 1* e la *aletta 2*, con conseguente formazioni di vortici. Infine, come l'angolo di incidenza arriva al valore $30,3^\circ$ si genera una zona tra la *aletta 2* e la *aletta 3* in cui il coefficiente di pressione assume valori alti mentre i vortici si allontanano dal corpo nella zona di bassa pressione.

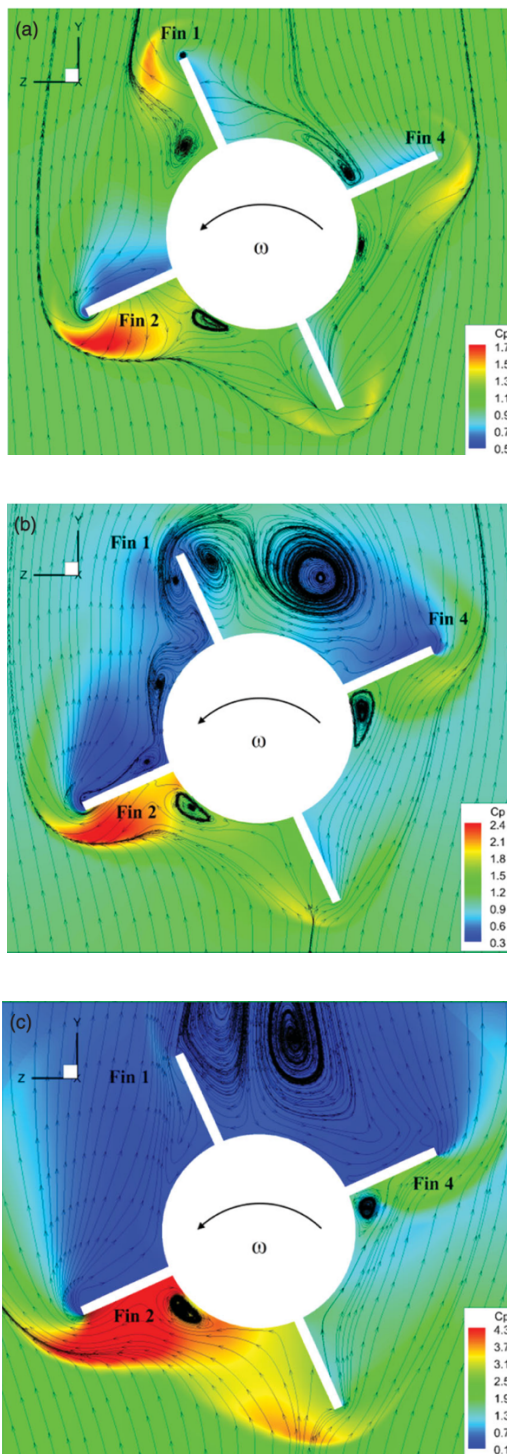


Figura 2. 18: Coefficiente di pressione sulle alette: (a) $\alpha=4,0^\circ$; (b) $\alpha=12,6^\circ$; (c) $\alpha=30,3^\circ$ [11]

Il secondo settore ingegneristico in cui si è cercato di sfruttare l'effetto Magnus è quello aeronautico grazie all'invenzione dei rotori di Flettner. Questi rotori, applicati inizialmente come vele innovative nelle imbarcazioni, entrarono nell'interesse dei produttori di aerei che sostituirono le ali tradizionali con questi cilindri rotanti. Si credeva che questa soluzione avrebbe generato una portanza elevata ma allo stesso tempo avrebbe garantito una velocità minore in fase di atterraggio rispetto agli aerei tradizionali. Con il fatto che la portanza sarebbe stata maggiore, si pensò subito di applicare questa tecnologia a tutti quelli aerei dotati di un peso proprio elevato o che portassero carichi importanti, sempre in termini di peso. Inoltre, utilizzare questo tipo di ali, che avrebbero girato grazie a motori secondari, era un punto a favore per la sicurezza del velivolo in quanto un guasto al motore principale non avrebbe interrotto la rotazione dei rotori e quindi la forza di sollevamento sarebbe stata in grado di non far precipitare l'aereo. Per concludere questo paragrafo, e il capitolo, viene mostrato come dagli anni '20 del Novecento sono stati realizzati diversi modelli e prototipi di aerei a rotore.

Un primo progetto venne realizzato da Ernst Zeuzem, mostrato in *Figura 2. 19*, in cui sviluppò il veicolo con 4 rotori gestiti da 4 motori separati e tra questi era presente un'ala di forma tradizionale con due funzioni. Una era quella di ospitare i passeggeri mentre la seconda era quella di generare una portanza aggiuntiva. I due rotori inferiori inoltre erano utilizzati nella fase di decollo e atterraggio. Nella prima fase dovevano garantire la velocità per poter creare portanza mentre in fase di atterraggio assumevano la funzione di freno.

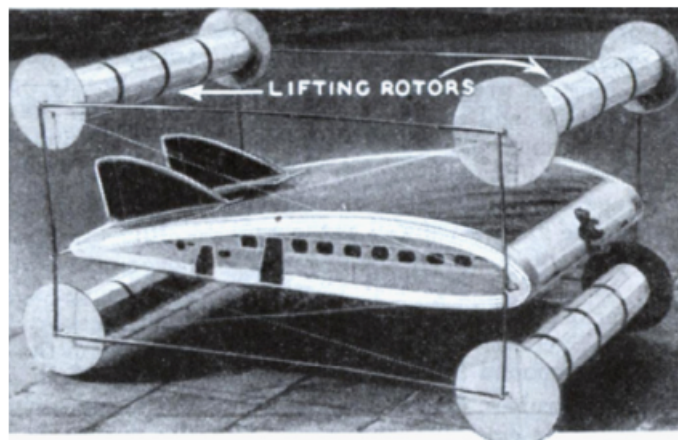


Figura 2. 19: Modello di aereo a rotore di Ernst Zeuzem [9]

Una seconda proposta venne realizzata da Gerhard Wilke che modificò un biplano sostituendo alle ali inferiori due rotori (*Figura 2. 20*). Questi avevano il compito di incrementare la portanza quando le velocità assumeva bassi valori, quindi, svolgevano una funzione cruciale in fase di decollo. Il biplano era completato da un'elica sul muso gestita dal motore principale e due ali in coda che avevano l'obiettivo di stabilizzare il velivolo. Una delle criticità di questa soluzione risiede nel fatto che le ali superiori e i rotori inferiori sono collegati aumentando la resistenza dell'aereo nel mezzo fluido, oltre a incrementare il peso.

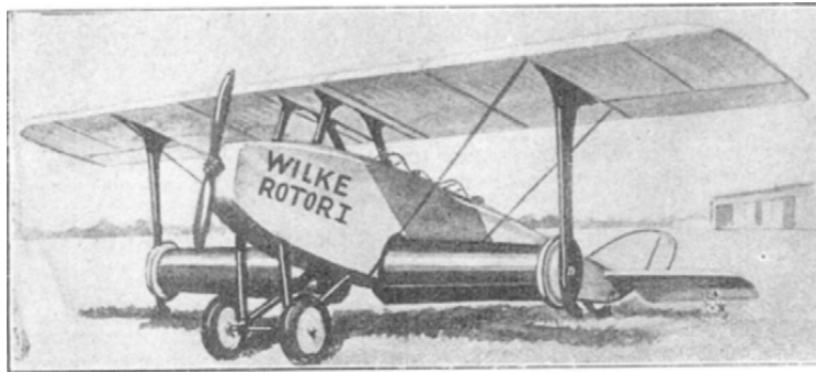


Figura 2. 20: Aereo a rotore progettato da Gerhard Wilke [9]

Nel 1925 Karl Gligorin disegnò un prototipo di velivolo in cui l'ala era formata da un rotore dotato di piastre all'estremità del cilindro. Il resto dell'aereo, mostrato in *Figura 2. 21*, aveva una configurazione tradizionale con un'elica sul muso e ali stabilizzatori sulla coda. Con lo studio dell'effetto Magnus e con l'osservazione di tale fenomeno in altre situazioni, come le traiettorie delle palline da golf, si pensò che si potesse ottenere un incremento ulteriore di portanza dai rotori realizzando cilindri con superfici ruvide. Un modello venne realizzato da Zeuzem (*Figura 2. 22*) in cui i rotori erano dotati di scanalature.

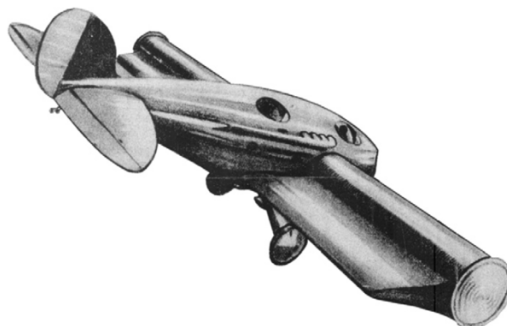


Figura 2. 21: Aereo a rotore disegnato da Karl Gligorin [9]

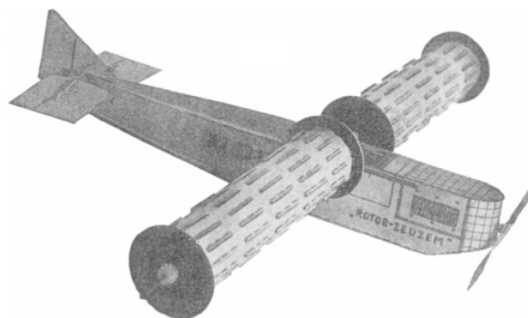


Figura 2. 22: Modello di rotori a superficie ruvida di Ernst Zeuzem [9]

Di questi quattro esempi riportati solo la soluzione di Gerhard Wilke è stata realizzata ma non sono presenti dati sul reale comportamento del velivolo in condizioni di esercizio. Il motivo per cui gli altri modelli sono rimasti tali è che sono stati progettati all'interno dei confini tedeschi ma la Germania nel primo dopo guerra non aveva il permesso di costruire

aerei, come sancito dal trattato di Versailles. Una situazione diversa si ha invece negli Stati Uniti in cui vennero realizzati alcuni prototipi. Un primo esempio venne realizzato nel 1930 a Long Island (New York) denominato Plymouth A-A-2004. Questo aereo, raffigurato in *Figura 2. 23*, aveva un motore tradizionale che alimentava un'elica sul muso a tre pale e un motore secondario che controllava la rotazione di tre rotori, grazie ai quali veniva generata portanza. Il velivolo era completato da due galleggianti, una coda per la stabilizzazione e il tutto era collegato con una struttura reticolare.

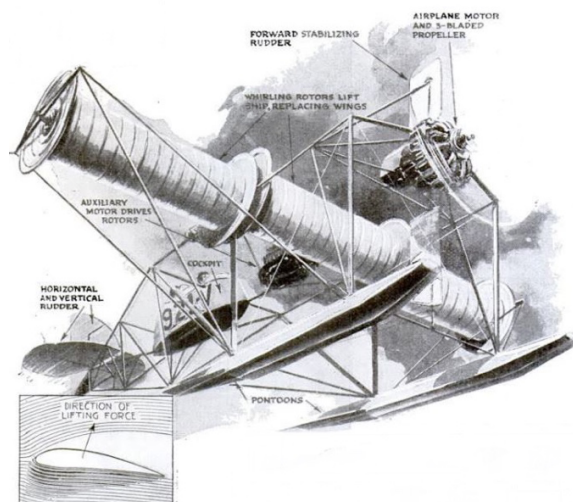


Figura 2. 23: Aereo a rotore Plymouth A-A-2004 [15]

Un anno dopo Isaac C. Popper e John B. Guest progettarono, sempre a Long Island, un secondo aereo a rotore denominato Union Aircraft X772N, mostrato in *Figura 2. 24*. Questo era dotato di due rotori di forma conica per lato, il rotore più grande aveva il compito di generare la forza di sollevamento mentre il rotore più piccolo aveva la funzione di stabilizzatore. I rotori maggiori erano posizionati davanti a quelli minori, in prossimità del muso, ed erano azionati da due motori da 21 kW. Questi sostituivano le ali tradizionali ed erano posizionati all'interno di un telaio metallico. Secondo i progettisti questa soluzione generava una portanza doppia rispetto ad un'ala tradizionale e dava la possibilità di atterrare con una velocità due volte inferiore ad un aereo tradizionale. Queste sono considerazioni che però non sono state verificate in quanto non sono presenti documenti che attestano che l'aereo abbia mai volato.



Figura 2. 24: Aereo a rotore Union Aircraft X772N [9]

L'ultimo esempio che viene riportato riguarda un aereo sviluppato dalla NASA. Infatti, dal 1972 anche l'agenzia spaziale statunitense ha iniziato a testare l'effetto Magnus in ambito aeronautico. Nello specifico è stato utilizzato il YOYV-10° (*Figura 2. 25*), un aereo dotato di un'ala tradizionale per generare portanza e un rotore ausiliario con la funzione di migliorare le prestazioni aerodinamiche. Il YOYV-10A è il terzo modello realizzato della serie YOYV e, al contrario degli altri prototipi, sono disponibili una grande quantità di dati. I due motori principali avevano una potenza di 745,7 kW ciascuno e ognuno alimentava un'elica a quattro pale con un diametro di circa 3 m.



Figura 2. 25: Aereo a rotore NASA YOYV-10° [9]

Questi due motori erano collegati in modo che se dovesse esserci un guasto ad uno dei due, il motore funzionante avrebbe alimentato entrambe le eliche. Il rotore ausiliario invece era attivato attraverso dispositivi idraulici e in fase di volo aveva una velocità di circa 7500 giri al minuto. Le ali tradizionali conferivano all'aereo una apertura alare di 10,36 m. Durante la sua attività il YOYV-10A ha eseguito 34 voli mostrando come un atterraggio sicuro poteva essere eseguito mantenendo una velocità tra i 102 km/h e i 120 km/h nel momento in cui l'angolo di discesa era tra i 6° e gli 8°, conferendo ai flap¹⁴ una inclinazione variabile tra i 60° e i 75°. Per quanto riguarda le prestazioni in volo, veniva raggiunta una velocità di punta di 87 km/h ma intorno ai 55 km/h l'aereo era soggetto a forti instabilità e quindi difficile da manovrare. Per quanto riguarda la fase di decollo invece, considerando angoli di salita compresi tra i 4° e gli 8°, il YOYV raggiungeva una velocità di circa 140-150 km/h.

Grazie a tutti questi dati è stato dimostrato come i rotori di Flettner hanno un'ottima efficienza in termini di sollevamento ma rendono difficile gestire il velivolo dovuto alle forze impresse dalla rotazione stessa. È per questo motivo che in ambito aeronautico è stata abbandonata questa tecnologia che invece è ritornata al centro dell'ambito navale, come verrà mostrato nel capitolo 3.

¹⁴ Organi mobili nella parte terminale dell'ala che consente di aumentare o ridurre la superficie dell'ala stessa e di conseguenza di modificare la velocità del velivolo

3. IL ROTORE DI FLETTNER NELLA PROPULSIONE NAVALE

Dopo aver affrontato l'effetto Magnus da un punto di vista teorico e mostrato esempi dove questo compare, questo capitolo si concentra sull'utilizzo dei rotori nella propulsione navale. Verrà quindi riportata la storia dei rotori di Flettner [20] mostrando il funzionamento di questi, osservando i primi prototipi e le soluzioni oggi in commercio.

3.1. La storia e i primi prototipi

Nel 1922 l'ingegnere tedesco Anton Flettner, con la collaborazione di Albert Betz¹⁵, Jakob Ackeret¹⁶ e Ludwig Von Prandtl¹⁷ brevettò la prima nave a rotore, l'idea era quella di sostituire le vele tradizionali con dei cilindri rotanti che sfruttassero l'effetto Magnus. Come il rotore veniva messo in rotazione, grazie ad un motore secondario, si generava una forza propulsiva che secondo Flettner era dieci volte superiore a quella generata da una vela tradizionale avente una superficie comparabile con quella del cilindro. La prima nave realizzata, mostrata in *Figura 3. 1*, risale al 1924 presso il cantiere navale Friedrich Krupp, in Germania, e chiamata Backau, una nave lunga 52 metri che inizialmente utilizzava vele tradizionali.

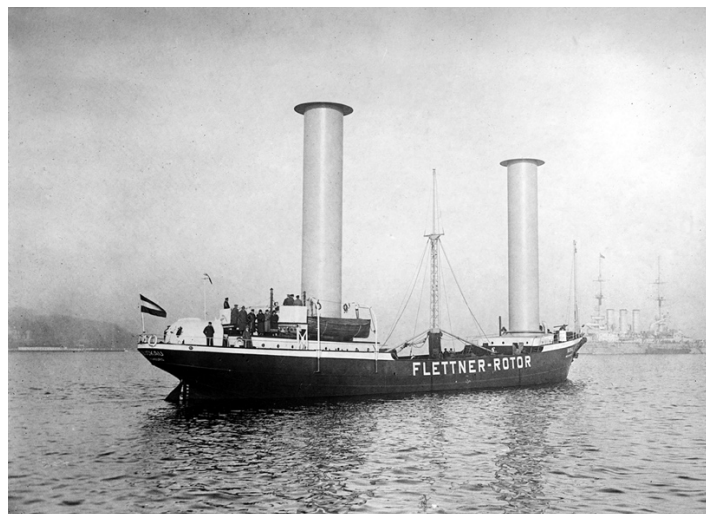


Figura 3. 1: Nave a rotore Backau [23]

Questa nave era dotata di due rotori di 15 metri di altezza e 3 metri di diametro alimentati da un motore elettrico secondario. Fece il primo viaggio nel febbraio del 1925 partendo da Danzica e arrivando in Scozia passando attraverso il Mare del Nord. Secondo i dati dell'epoca la Backau ha affrontato condizioni climatiche difficili non riportando danni e i

¹⁵ Albert Betz: Schweinfurt, 25 Dicembre 1885 – Gottinga, 16 Aprile 1968

¹⁶ Jacob Ackeret: Zurigo, 17 Marzo 1898 – Gossau, 27 Marzo 1981

¹⁷ Ludwig Von Prandtl: Frisinga, 4 Febbraio 1875 – Gottinga, 15 Agosto 1953

rotori hanno avuto una funzione di stabilizzazione del rollio¹⁸ dell'imbarcazione. Grazie a questo successo la Backau venne messa in servizio per il trasporto di merci nel Nord Atlantico e nel Mar Baltico. Nel corso dell'anno le venne cambiato il nome ribattezzandola Baden-Baden e il 31 marzo 1926 partì per New York, arrivando il 9 maggio. Questo viaggio fu particolarmente importante per dimostrare come i rotori di Flettner garantivano una riduzione di carburante infatti vennero usati 12 tonnellate di olio combustibile in confronto delle 45 tonnellate che sarebbero stati consumati senza i rotori. A seguito di questo successo i cantieri navali Weser, di Brema, nel 1926 iniziarono la costruzione di una seconda nave a rotore di dimensioni maggiori denominata Barbara (Figura 3. 2).



Figura 3. 2: Nave a rotore Barbara [23]

Questa nave era dotata di tre rotori più alti e larghi rispetto a quelli installati nella Backau ma avevano un peso simile che fornivano una potenza ausiliaria pari a 450 kW nel momento in cui il vento soffiava con una velocità compresa tra gli 11 m/s e i 14 m/s.

L'efficienza della nave era data dalla simmetria del cilindro che garantiva uno sfruttamento più semplice del vento rispetto ad una vela tradizionale in quanto l'area di contatto del cilindro con il vento era sempre la stessa. Un altro punto a favore dei rotori era dato dalla facile manovrabilità e dal fatto che occupavano poco spazio, dando quindi la possibilità di aumentare il carico trasportato.

Nel 1929 i produttori iniziarono ad essere diffidenti rispetto ai rotori di Flettner per due motivi, uno legato alla grande crisi economica che colpì inizialmente l'America diffondendosi successivamente nel resto del mondo e uno legato ai prezzi bassi del carburante. Infatti, era presente una grande quantità di gasolio marino¹⁹ che veniva venduto a basso prezzo, in questo modo installare un motore diesel era più conveniente dei rotori

¹⁸ Oscillazione lungo l'asse longitudinale dell'imbarcazione, detto appunto asse di rollio

¹⁹ Tipo di gasolio distillato chiamato anche diesel marino. Ha un costo minore rispetto al carburante più raffinato ma particolarmente inquinante

Flettner, in cui l'investimento era recuperato in periodi più lunghi, e questo fece perdere interesse per le navi a rotore. Le due navi sopra citate sono le uniche imbarcazioni che ebbero rilevanza per promuovere questa tecnologia ma dopo il 1929 vennero dotate di motori tradizionali ma usate per pochi anni, infatti, la Backau venne distrutta nel 1931 da una tempesta nei caraibi mentre la Barbara venne smantellata.

3.2. La situazione attuale

A partire dagli anni '80 l'interesse per la tecnologia dei rotorii tornò ad interessare i costruttori di navi in quanto il prezzo del carburante dopo la Seconda Guerra Mondiale ha iniziato a crescere e le normative per ridurre le emissioni di sostanze nocive sono diventate sempre più restrittive dato dal fatto che dal XIX secolo c'è stata una crescita esponenziale di emissioni di anidride carbonica [21], come dimostra il grafico in *Figura 3. 3*.

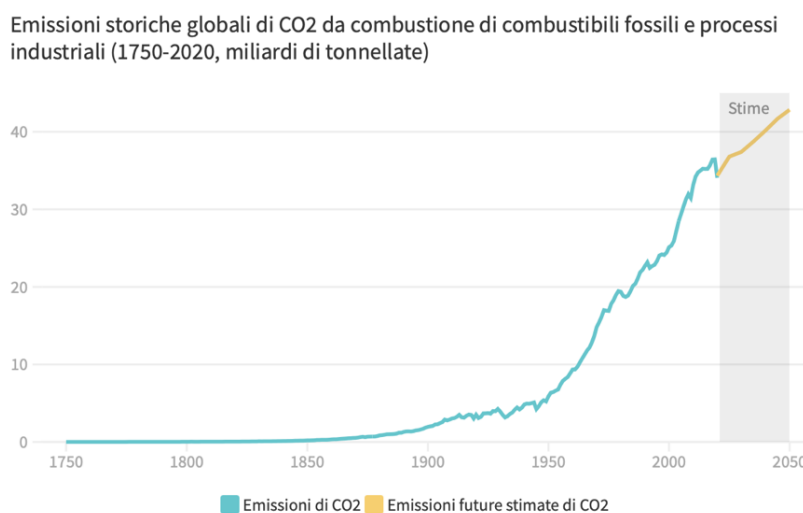


Figura 3. 3: Emissioni di anidride carbonica [21]

Infatti, secondo l'OMS l'inquinamento dell'aria e dell'acqua sono le due principali cause del peggioramento delle condizioni climatiche, che a sua volta causano l'aumento di malattie. Il trasporto marittimo rappresenta il mezzo più conveniente in termini di tempo tenendo conto le grandi quantità di merci trasportate a tratta ma è anche una delle principali fonti di inquinamento. Infatti, nel 2012 il trasporto navale rappresentava il 3,1% delle emissioni annuali di anidride carbonica, di conseguenza si è cercato di trovare una soluzione pulita che diminuisse l'utilizzo del carburante tradizionale mantenendo però l'efficienza del trasporto stesso. Sono state ricercate varie soluzioni per ridurre l'emissione di sostanze inquinanti durante il viaggio come installare pannelli solari e turbine eoliche per ottenere energia dal sole e dal vento ma è risultata una soluzione poco efficiente in quanto l'assenza della fonte di energia rende inutilizzabile lo strumento. Una seconda soluzione proposta era quella di far lavorare i motori nel loro punto ottimale in modo da avere il massimo rendimento ma date le numerose condizioni di esercizio a cui la nave è sottoposta diventava difficile rispettare tale punto. La soluzione migliore è quella fornita dai rotorii di Flettner dove la

rotazione viene indotta da un motore elettrico, che a sua volta può essere alimentato da dispositivi solari, e la nave da un motore diesel tradizionale che necessita però di una quantità minore di carburante. Questa tecnologia viene installata sul ponte della nave, quindi è adatta per tutte quelle navi che dispongono uno spazio sufficiente come navi cisterna, navi da crociera e navi roll-on/ roll-off²⁰. In tempi moderni la prima nave a rotore è stata fornita nel 2008 dall'azienda ENERCON presentando al mercato la E-Ship 1 [14] (Figura 3. 4), una nave cargo roll-on/ roll-off dotata di quattro rotori. La nave entra in funzione nel 2010 e presenta una lunghezza di 130 metri, una larghezza di 22,5 metri e una portata di 10.500 tonnellate. Secondo i dati di ENERCON quando il vento è diretto a 90° rispetto alla direzione di percorrenza della nave, i rotori forniscono il 40% della potenza richiesta alla nave. In condizioni di esercizio questo valore è sicuramente minore dovuto alla variazione del vento, però garantisce un risparmio importante sulla quantità di carburante.



Figura 3. 4: Nave a rotore E-Ship 1 [14]

I rotori hanno una altezza di 27 metri, un diametro di 4 metri e sono dotati di una piastra terminale con lo scopo di ottimizzare la spinta. All'interno del rotore sono presenti sensori che misurano la velocità e la direzione del vento, inviano le informazioni ad un software che in automatico regola la velocità di rotazione garantendo un esercizio automatico. Personale specializzato invece deve fare controlli periodici di manutenzione valutando il funzionamento dei sensori, del software e della struttura metallica che sostiene il rotore.

Un secondo produttore di rotori è l'Anemol [12], azienda all'avanguardia che oltre a fornire e installare il rotore ha brevettato un sistema di carelli, mostrato in Figura 3. 5, per consentire il movimento dei rotori sul ponte per massimizzare l'efficienza e facilitare le operazioni di carico e scarico delle merci nei porti. A seconda delle dimensioni della nave il rotore può essere pieghevole, su guida trasversale o su carello longitudinale. Avere un rotore pieghevole consente di abbassarlo sul ponte nel momento in cui la nave attracca al porto consentendo alle gru di compiere manovre senza pensare all'ingombro verticale dei rotori. Questo tipo di

²⁰ Nave a carico orizzontale progettata per il trasporto con modalità d'imbarco e sbarco di veicoli gommati.

soluzione è ottimale anche in caso di emergenza in mare, se il mare dovesse essere troppo burrascoso e la verticalità del rotore diventa un problema di stabilità questo viene abbassato.



Figura 3. 5: Opzioni di installazione dei rotori Anemol [12]

Le altre due soluzioni sono sempre in funzione della facilità delle operazioni al porto, infatti, con la guida trasversale si possono spostare i rotori sul lato opposto alla banchina portuale mentre con la ferrovia longitudinale si possono raggruppare i rotori su un angolo. Di seguito sono mostrati tre render (Figura 3. 6, Figura 3. 7, Figura 3. 8) che mostrano tre navi in prossimità di una banchina con le tre soluzioni sopra citate.



Figura 3. 6: Nave a rotore con soluzione pieghevole [12]



Figura 3. 7: Nave a rotore con guida trasversale [12]



Figura 3. 8: Nave a rotore con ferrovia longitudinale [12]

Per poter dotare una nave di rotori non è necessario apportare modifiche strutturali all'imbarcazione ma è necessario dotare il ponte di dispositivi di attacco per la vela meccanica e installare il software che gestisce il funzionamento; quindi, sono necessari dispositivi secondari e predisporre un cablaggio elettrico adeguato. Anemoi fornisce uno schema basilare, riportato in *Figura 3. 9*, dei componenti che devono essere presenti per un funzionamento ottimale.

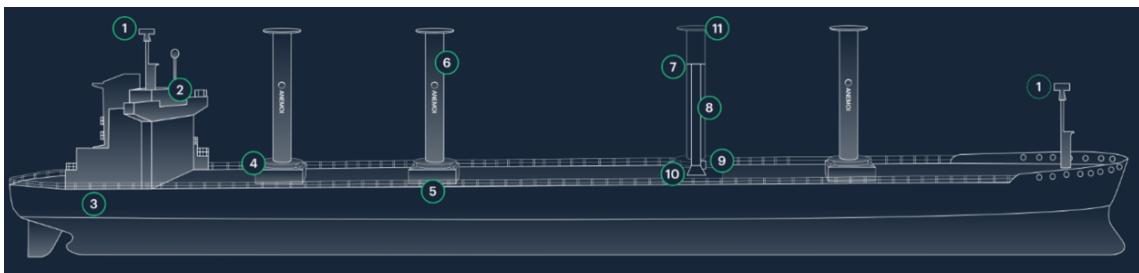


Figura 3. 9: Schema dei componenti per il sistema a rotori [12]

Seguendo i numeri dell'immagine precedente, il numero (1) rappresenta il *sensore del vento*, ovvero il dispositivo che rileva la velocità e la direzione del vento, il (2) è il *sistema elettrico e di controllo* quindi la postazione da dove il capitano comanda la nave e gestisce il pannello di funzionamento del rotore. (1) fornisce le informazioni a (2) e il computer di controllo gestisce automaticamente i rotori, questo passaggio di informazioni avviene grazie all'*hardware elettrico*, ovvero il punto (3). Il punto (4) rappresenta la *modalità di ancoraggio* del rotore mentre il (5) sono le *fondazioni*, ovvero il collegamento tra ancoraggio e la struttura della nave. Il punto (6) è dato dalle *vele a rotore* in cui è possibile determinare il *cuscinetto superiore* (7), ovvero l'involucro esterno che viene messo in rotazione, la *struttura in acciaio* (8) e il *cuscinetto inferiore* (10), il piatto fisso su cui poggia la struttura. Il cablaggio elettrico dopo essersi diramato in (1), (2) e (3) termina nel punto (10), il *centralino elettrico del singolo rotore*. Il rotore è completato dal *piatto superiore* (11), piatto che aumenta la potenza fornita dal rotore.

Questa azienda ha installato questa tecnologia su varie navi, specialmente portarinfuse. Una nave portarinfuse, chiamata anche bulker, è una nave di grandi dimensioni che trasporta merci non imballate come grano, carbone o minerale nelle stive di carico. Un esempio è la

Sohar Max, una portarinfuse lunga 360 metri e larga 65 metri avente una capacità di carico pari a 400.000 tonnellate di peso morto²¹, riportata in *Figura 3. 10*.



Figura 3. 10: Nave a rotore Sohhar Max [12]

Questa nave è dotata di cinque rotori alti 35 metri con un diametro di 5 metri. Essendoci spazio fra le boccaporte delle stive, i rotori sono dotati di soluzione pieghevole in quanto un loro abbassamento non influisce in maniera significativa sulla libertà di movimento nel ponte. Questa imbarcazione è impegnata nelle tratte Oman - Brasile e Cina - Brasile, zone particolarmente ventose e quindi adatte alla propulsione eolica.

Una seconda nave dotata di rotori Anemoi è la Newcastlemax Bulk Carrier, di proprietà dell'azienda Berge Bulk.



Figura 3. 11: Nave a rotore Newcastlemax [12]

Questa imbarcazione, mostrata in *Figura 3. 11*, ha una lunghezza di 300 metri e una larghezza di 50 metri con una capacità di carico pari a 210.000 tonnellate di peso morto. È dotata di quattro rotori alti 35 metri con un diametro di 5 metri e come la portarinfuse

²¹ Tonnellata di peso morto (DWT: Dead Weight Tonnage): peso che può trasportare la nave, somma di pesi di carico, carburante, acqua di zavorra, provviste, passeggeri ed equipaggio.

precedente i rotori sono dotati di un sistema pieghevole. Secondo le stime di Anemoi, l'installazione dei quattro rotori porta ad un risparmio di carburante che varia tra le 1200 e le 1500 tonnellate all'anno.

La nave Kamsarmax Bulk Carrier TR Lady (*Figura 3. 13*) invece è stata dotata della soluzione su guida trasversale, dettaglio in *Figura 3. 12*. Questa imbarcazione è dotata di tre rotori alti 24 metri con un diametro di 5 metri che secondo le stime forniranno un guadagno del 10% in termini di quantità di carburante risparmiato. La nave è entrata in funzione nel giugno 2023 quindi le analisi sulle prestazioni effettive sono ancora in corso.

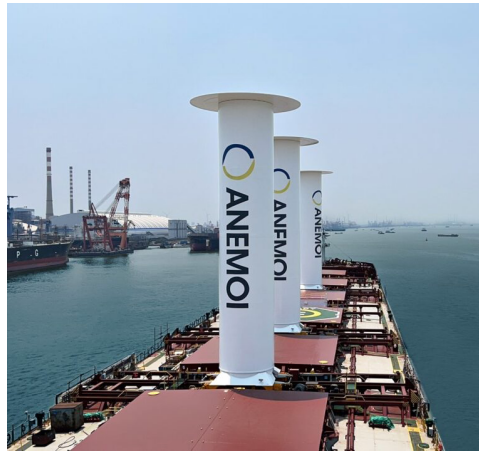


Figura 3. 12: Dettaglio della guida trasversale [12]

La Kamsarmax Bulk Carrier TR Lady rispetto alle due navi precedenti ha dimensioni nettamente minori in termini di carico infatti ha una capacità di 82.000 tonnellate di peso morto.



Figura 3. 13: Nave a rotore Kamsarmax TR Lady [12]

Un ultimo esempio riguardante le navi fornite da Anemoi è la Kamsarmax Bulk Carrier M/V Afros, una nave da 82.000 tonnellate di peso morto e raffigurata in *Figura 3. 14*. Questa nave è dotata di quattro rotori alti 16 metri con un diametro di 2 metri fissati su ferrovia longitudinale. È stata scelta questa soluzione in quanto la nave non ha una larghezza elevata e la ferrovia longitudinale era la soluzione che andava a ingombrare solo un lato del ponte.



Figura 3. 14: Nave a rotore Kamsarmax M/V Afros [12]

La nave ha iniziato la sua attività nel 2018 e dal 2019 al 2020 sono state eseguite le analisi prestazionali e i rotori hanno portato ad una riduzione di 73 tonnellate di carburante e una riduzione di emissione di anidride carbonica pari a 235 tonnellate.

Una terza azienda che si sta occupando della ricerca sui materiali per i rotori e che sta dotando numerose navi di questa tecnologia è la Norsepower [18], un'azienda finlandese che intorno al 2012 ha deciso di concentrarsi sulla navigazione pulita. Per promuovere questa tecnologia Norsepower ha pubblicato i risultati delle sue ricerche, tecniche e di mercato. Uno dei risultati più importanti è dato da una riduzione media di carburante pari al 25% con conseguente risparmio economico e riduzione di sostanze dannose, inoltre è stato stimato un aumento di velocità massima della nave da 12 a 20 nodi²². L'aspetto che rende queste vele così efficienti è dato dall'ampio spettro di angoli con cui la nave può attaccare il vento.



Figura 3. 15: Schema sull'angolo del vento rispetto alla nave [18]

²² Misura della velocità equivalente ad un miglio nautico l'ora, ovvero 1,852 km/h

Come si può notare dalla *Figura 3. 15* solo se il vento soffia in direzione opposta al movimento dell'imbarcazione i rotori perdono efficienza perché generano una forza che teoricamente farebbe muovere in retromarcia la nave. Questo non avviene perché la spinta generata dai rotori è minore di quella data dai motori diesel ma si ha un rallentamento dell'imbarcazione.

Dato che non è necessario fare modifiche strutturali alla nave, le vele a rotore si possono installare, ed eventualmente smontare, su navi esistenti e i lavori di montaggio sono completati fra i sette e i quattordici giorni. Nel momento in cui ci sono particolari necessità per cui la nave non può rimanere attraccata al porto la parte elettrica può essere completata in mare in una giornata circa.

Come Anemoi anche Norsepower ha equipaggiato varie navi con i rotori come la Sea Zhoushan, una nave portarinfuse lunga 340 metri con una capacità di carico di 325.000 tonnellate di peso morto, raffigurata in *Figura 3. 16*. È stata dotata di 5 rotori alti 24 metri con un diametro di 4 metri aventi la capacità di inclinarsi tra i portelli delle stive.



Figura 3. 16: Nave a rotore Sea Zhoushan [18]

Un secondo esempio mostrato in *Figura 3. 17* è la Camellia Dream, una portarinfuse impegnata nel trasporto di minerale di ferro avente una capacità di carico di 200.000 tonnellate di peso morto.



Figura 3. 17: Nave a rotore Camellia Dream [18]

L'installazione dei due rotori alti 35 metri con un diametro di 5 metri è prevista per la prima metà del 2024. Secondo le stime si avrà una riduzione di quantità di carburante e quindi di emissioni di anidride carbonica tra il 6% e il 10%.

Rimanendo sui progetti del 2024 di Norsepower, nel secondo trimestre la M/V Koryu, una portarinfuse utilizzata nella tratta Cile - Giappone per portare rame e nella tratta Giappone - Cile per l'acido solforico, verrà dotata di un solo rotore alto 35 metri con un diametro di 5 metri a base inclinabile, come si può osservare in *Figura 3. 18*.



Figura 3. 18: Nave a rotore M/V Koryu [18]

Nel terzo trimestre del 2024 invece la portarinfuse giapponese Yodohime (*Figura 3. 19*) verrà dotata di un rotore alto 24 metri e con un diametro di 4 metri. L'aspetto interessante di questo progetto è dato dalla posizione del rotore, infatti, in tutti gli esempi precedenti il rotore era posizionato su un lato del ponte o al centro, nella Yodohime invece sarà a prua. In questo caso il rotore sarà fisso, non potrà quindi inclinarsi o scorrere su nessuna rotaia.



Figura 3. 19: Nave a rotore Yodohime [18]

Entro la fine del 2024 invece la Dietrich Oldendorff, portarinfuse mostrata in *Figura 3. 20*, trasporterà minerali al porto di Vancouver e verrà dotata di tre rotori alti 24 metri con un diametro di 3 metri. Anche in questo caso le vele hanno fondazioni inclinabili [18].



Figura 3. 20: Nave a rotore Dietrich Oldendorff [18]

Norsepower però non si occupa solo di assemblare rotori su portarinfuse, infatti, recentemente ha iniziato una collaborazione con Airbus. L'azienda francese produttrice di aeromobili noleggia delle navi per il trasporto di materiali e componenti di velivoli tra gli Stati Uniti e la Francia e per rispettare le norme date dall'IMO²³ dal 2026 l'intera flotta sarà sostituita con navi di dimensioni maggiori e dotate di sei rotori [13] [19]. Queste nuove imbarcazioni, mostrate con un render in *Figura 3. 21*, avranno un motore principale a doppia alimentazione, gasolio marino ed e-metanolo, oltre ai motori secondari che mettono in rotazioni i rotori. Con queste caratteristiche Airbus ridurrà le emissioni di anidride carbonica da 68.000 tonnellate a 33.000 tonnellate all'anno e questa riduzione non deriva solo dai rotori di Flettner ma anche all'e-metanolo in quanto viene generato da fonti sostenibili.



Figura 3. 21: Nave Airbus dotata di rotori di Flettner [13]

²³ IMO: International Maritime Organization

Con queste nuove navi sarà aumentato anche il carico trasportato infatti sul ponte ci sarà spazio per 72 container lunghi 12 metri mentre nella stiva verranno disposte ali, fusoliere e le varie parti delle code che poi in Francia verranno usate per assemblare gli aerei. Con questa collaborazione non solo si ha un miglioramento delle condizioni ambientali ma Airbus riuscirà a incrementare la produzione di velivoli, arrivando a costruirne circa 75 al mese.

Norsepower oltre a installare i rotori fornirà un software innovativo, non presente in nessun'altra nave, che darà la possibilità di gestire le vele in maniera autonoma. Questa innovazione rappresenta un enorme vantaggio in termini di efficienza perché consente di regolare singolarmente le velocità di rotazione dei rotori in modo da adattarle alle variazioni del vento sul corpo della nave e contemporaneamente verrà tenuto conto dell'effetto aerodinamico che viene prodotto dalla vicinanza dei rotori stessi. Airbus non adotterà più le tradizionali rotte transatlantiche ma con il software Norsepower la rotta seguirà le zone con maggiore vento in modo da sfruttare al meglio i rotori di Flettner.

Negli esempi riportati precedentemente ogni nave è dotata di rotori con diversa altezza e diverso diametro e questo implica pesi differenti e velocità di rotazione massime consentite. Considerando per esempio il rotore con le dimensioni minime in commercio, ovvero 18 metri di altezza e 4 metri di diametro, questo ha un peso di 27 tonnellate, senza considerare il peso dell'ancoraggio, e una velocità di rotazione compresa fra 0 e 225 giri al minuto. Questa velocità rimane costante anche per i rotori con altezze pari a 24 e 28 metri e 4 metri di diametro. Il peso invece diventa rispettivamente di 30 e 37 tonnellate. La velocità di rotazione risulta essere 180 giri al minuto per i rotori che hanno invece un'altezza di 30 e 35 metri e un diametro di 5 metri con un peso rispettivamente di 42 e 63 tonnellate. Con l'aumento delle dimensioni viene richiesta un'altezza di fondazione maggiore, passando da 2,5 metri per il primo rotore a 3 metri per il secondo, oltre ad una potenza elettrica maggiore per l'avvio della vela. Per quanto riguarda invece le condizioni ambientali, i rotori essendo sviluppati, di base, con materiali compositi resistono a temperature che vanno dai -20° a $+50^{\circ}$ e come mostrato anche in *Figura 3. 15*, il rotore fornisce una potenza ausiliaria alla propulsione che varia fra 40 e 100 kN nel momento in cui il vento ha un angolo rispetto alla direzione di percorrenza della nave compreso tra 30° e 150° .

4. CONCLUSIONI

Questo capitolo conclusivo vuole ripercorrere gli aspetti fondamentali dei rotori di Flettner nella propulsione navale mostrando anche alcune criticità di questa tecnologia. Partendo dai lati positivi sicuramente è la soluzione migliore in termini di costi e tempistiche di installazione in quanto in poche settimane una nave è equipaggiata di vele meccaniche, sistema elettrico e software di controllo. Da un punto di vista economico l'investimento iniziale viene ammortizzato in pochi anni ma da subito si ha un risparmio sulle quantità di carburante. In termini più tecnici i rotori garantiscono, a seconda della direzione del vento, buona parte della potenza necessaria alla nave e come detto nel capitolo precedente consentono di attaccare più angoli del vento rispetto alle vele tradizionali. Un altro aspetto fondamentale che i rotori portano è che in caso di guasto del motore principale loro continuano a girare perché alimentati da un motore secondario e di conseguenza garantiscono il proseguimento della traiettoria della nave, con velocità nettamente inferiore però. La loro altezza, se correttamente dimensionata, non va a intaccare la stabilità della nave anzi, se una nave è dotata di due file di rotori, ognuna disposta su un lato del ponte, dando ai rotori di ciascuna fila una determinata velocità di rotazione si può sfruttare l'effetto Magnus per stabilizzare il rollio. Questo è un aspetto particolarmente importante per la sicurezza in caso di condizioni climatiche avverse.

Un aspetto problematico dei rotori è dato dalla variazione della direzione della spinta dovuta sia al cambiamento delle condizioni del vento sia alla vibrazione del rotore stesso. Questa vibrazione produce una perdita di potenza ed è per questo motivo che la tecnologia dei rotori oggi non può essere usata come propulsione principale. Tuttavia, con il grande sviluppo che alcune aziende hanno portato in questo campo numerosi gruppi di ricerca, delle aziende stesse o di università, si stanno concentrando nel trovare materiali innovativi o aspetti geometrici che portino ad un livello successivo questa tecnologia in modo da renderla più funzionale e accessibile. In merito a questo mostro lo studio [4] di un particolare rotore, non ancora realizzato, che può essere installato nella parte terminale della nave. Il rotore si basa su una sovrastruttura, luogo in cui saranno presenti le cabine di comando e i luoghi del personale, contenuta all'interno del cilindro, come mostrato in *Figura 4. 1*. La sovrastruttura è composta da sei piani, al primo piano si ha il motore secondario che mette in rotazione il cilindro e tutte le componenti che determinano il suo funzionamento. Il cilindro che verrà messo in rotazione ha come bordo inferiore l'estremità superiore del primo piano e come bordo superiore l'estremità inferiore del sesto piano. Questo rialzato fa sì che il personale possa transitare sul ponte della nave senza pensare all'ingombro del rotore. La superficie esterna invece è composta da materiale trasparente per dare luce alla sovrastruttura interna. Per quanto riguarda le dimensioni, il diametro ha la larghezza della nave mentre l'altezza è in funzione dell'altezza di ogni piano. Avendo un diametro fortemente maggiore rispetto ai rotori visti nel capitolo precedente ha anche una resistenza allo sbandamento maggiore.

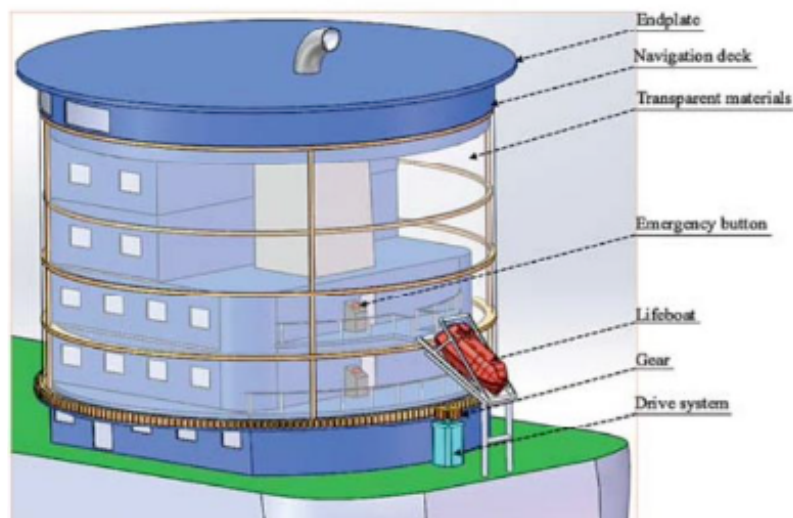


Figura 4. 1: Rappresentazione del nuovo rotore [4]

In ogni piano della struttura poi sono presenti dispositivi di emergenza che bloccano la rotazione del cilindro e, se necessario, grazie ad appositi martelli le pareti vengono frantumate in modo che il personale possa usufruire delle scialuppe di emergenza. Al sesto piano, fisso, della sovrastruttura si ha la cabina di pilotaggio dotata di una piastra superiore con un diametro maggiore del rotore per aumentare la portanza. I vantaggi principali di questo nuovo rotore di Flettner sono due, uno riguarda l'aumento di portanza grazie alla maggiore superficie messa in rotazione che incontra il vento. Il secondo è dato dal fatto che la sovrastruttura non entra in contatto con il vento e quindi si riduce la resistenza aerodinamica che questa produceva grazie al fatto che il cilindro riduce l'attrito. Un ulteriore aspetto a favore di questa soluzione è dato dal fatto che la maggior parte delle navi mercantili hanno una sovrastruttura e quindi se dispongono di una larghezza adeguata è possibile costruire intorno il rotore andando ad ottenere vantaggi economici e ambientali. In termini di costi sicuramente la costruzione sarà più onerosa rispetto all'installazione di rotori Anemol e Norsepower ma grazie alla maggiore spinta fornita sarà maggiore sia la quantità di carburante risparmiato sia l'emissione di sostanze nocive.

Per concludere si può quindi affermare che il rotore di Flettner più che mai deve essere sfruttato e studiato per migliorare sia le conoscenze sull'effetto Magnus sia per cercare di ridurre al minimo l'utilizzo di combustibili tradizionali e quindi di ridurre le emissioni di sostanze inquinanti. Inoltre, le normative in ambito ambientale stanno diventando sempre più restrittive e quindi le grandi aziende se non vogliono perdere i guadagni che ricavano dall'aumento della richiesta dei beni globali devono necessariamente trovare soluzioni di trasporto pulite. Nel prossimo futuro grazie ad Anemol e Norsepower ci saranno miglioramenti importanti ma nel lungo periodo è fondamentale che anche i governi attuino finanziamenti per incentivare i vari produttori di navi a costruire con i rotori e garantire ai proprietari di flotte aiuti economici per l'installazione.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] Borg J., 1986, *Magnus effect: An overview of its past and future practical applications*, vol. 1, Nasa STI/Recon Technical Report N.
- [2] Ghetti A., 2006, *Idraulica*, Libreria Internazionale Cortina, Padova.
- [3] Kenyon K. E., 2016, On the Magnus Effect, *Natural Science*, vol. 8, pp. 49-52.
- [4] Li Boyang, Zhang Rui, Li Yajing, Zhang Baoshou, Guo Chao, 2021, Study of a new type of Flettner rotor in merchant ships, *Polish Maritime Research*, vol. 28, pp. 28-41.
- [5] Manasseh Karnan C., Thanikachalam V., Rajech M., Anbazhahan K., 2018, A Review of Flettner Rotor Sails, *International Journal of Interdisciplinary Research and Innovations*, vol. 6, pp. 561-565.
- [6] Martino R., *Dispense di Idraulica*, pp. 101-111, Università degli Studi di Napoli.
- [7] Maruyama Yuichi, 2011, Study on the Physical Mechanism of the Magnus Effect, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, vol. 54, No. 185/186, pp. 173-181.
- [8] Muto Masaya, Watanabe Hiroaki, Tsubokura Makoto, Oshima Nobuyuki, 2011, Negative Magnus Effect on a Rotating Sphere at around the Critical Reynolds Number, *13th European Turbulence Conference*.
- [9] Seifert Jost, 2012, A review of the Magnus effect in aeronautics, *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 55, pp. 17-45.
- [10] Taneda Sadatoshi, 1957, Negative Magnus effect, *Reports of Research Institute for Applied Mechanics*, pp. 123-128.
- [11] Yin Jintao, Wu Xiaosheng, Lei Juanmian, 2017, Body-fin interference on the Magnus effect of spinning projectile in supersonic flows, *Engineering applications of computational fluid mechanics*, vol. 11, pp. 496-512.
- [12] Anemoi Marine Technologies, ultimo accesso: 15 Maggio 2024, <https://anemoimarine.com/kamsarmax-rotor-sails-tr-lady>
- [13] Digital Day, *Airbus avrà nuove navi da carico a basse emissioni grazie a vento e metanolo verde*, Donato Sergio, 31 Ottobre 2023, <https://www.dday.it/redazione/47409/airbus-avra-nuove-navi-da-carico-a-basse-emissioni-grazie-a-vento-e-metanolo-verde>

- [14] ENERCON: Energy for the world, Enercon E-Ship 1: A wind -hybrid commercial cargo ship, Settembre 2013, https://www.stg-online.org/onTEAM/shipefficiency/programm/06-STG_Ship_Efficiency_2013_100913_Paper.pdf
- [15] Hush-Kit, The weirdest aeroplane you've never heard of, the utterly batshit Plymouth A-A-2004, Settembre 2020, <https://hushkit.net/2020/09/10/the-weirdest-aeroplane-youve-never-heard-of-the-utterly-batshit-plymouth-a-a-2004/>
- [16] Il Nuovo Polo, Fenomeni magnetici fondamentali, ultimo accesso: 15 Maggio 2024, <https://ilnuovopolo.altervista.org/fenomeni-magnetici-fondamentali/>
- [17] Marine Insight, *Flettner Rotor For Ships – Uses, History And Problems*, Menon Ajay, 6 Gennaio 2021, <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/flettner-rotor-for-ships-uses-history-and-problems/>
- [18] Norsepower, ultimo accesso: 15 Maggio 2024, <https://www.norsepower.com/bulk-carrier/>
- [19] Ship Technology, *Norsepower to provide rotor sails for LDA and Airbus's new fleet*, Bovenizer Noah, 13 Febbraio 2024, <https://www.ship-technology.com/news/norsepower-rotor-sails-lda-airbus-fleet/?cf-view>
- [20] Strathclyde University, Future Shipping: Flettner Rotors as Sustainable Propulsion, 2019, https://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/18-19/Flettner/strathflettner.wixsite.com/flettnerrotor/history-of-flettner-rotors.html
- [21] The Global Carbon Project, Emissioni di anidride carbonica, ultimo accesso: 15 maggio 2021, <https://www.globalcarbonproject.org>
- [22] Wikipedia, Magnus effect, Marzo 2024, https://en.wikipedia.org/wiki/Magnus_effect
- [23] Wikipedia, Nave a rotore, Maggio 2022, https://it.wikipedia.org/wiki/Nave_a_rotore

RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento al Professor Defina Andrea per la disponibilità e l'aiuto per la realizzazione di questa tesi.

Ringrazio la mia famiglia per il supporto in questi anni.

Ringrazio gli amici di sempre Marty, Gianmaria Jean e Noe, oltre a quelli nuovi Matteo Billi.

Ringrazio gli amici dell'università in particolare Brando e Matteo.