

Hidrodinâmica I

Propulsores tipo hélice: introdução; principais tipos de propulsores e geometria do propulsor; teoria do disco atuador



Introdução

- **Objetivos do estudo:** Compreender aspectos fundamentais da hidrodinâmica dos propulsores tipo hélice, sobretudo os principais parâmetros envolvidos na geração da força de **empuxo** e do **torque** hidrodinâmico e nas medidas de **eficiência** do propulsor.
- **Requisitos:** Conceitos básicos de teoria fólhos e teoria de asas
- **Referências sugeridas:**
 - Principles of Naval Arch. (2nd Rev), Vol II – Resistance, Propulsion and Vibration;
 - Carlton, J., Marine Propellers and Propulsion
 - Fundamentals of Aerodynamics—Fifth edition, JD Anderson

Introdução

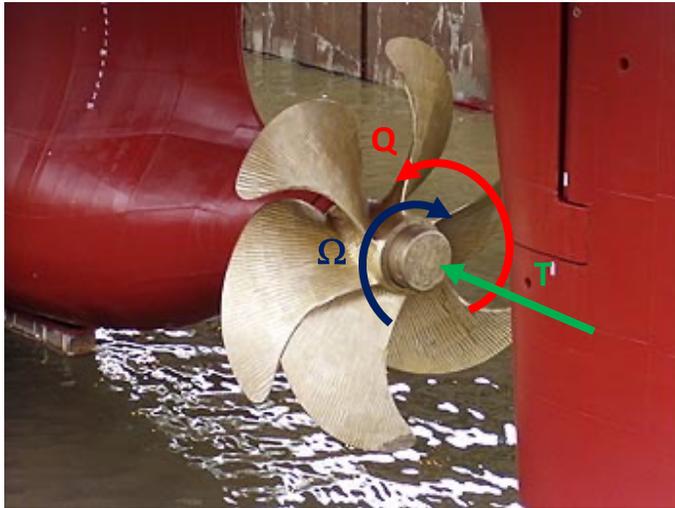
Modelos fundamentais em teoria de rotores

- **Tópicos do curso:**

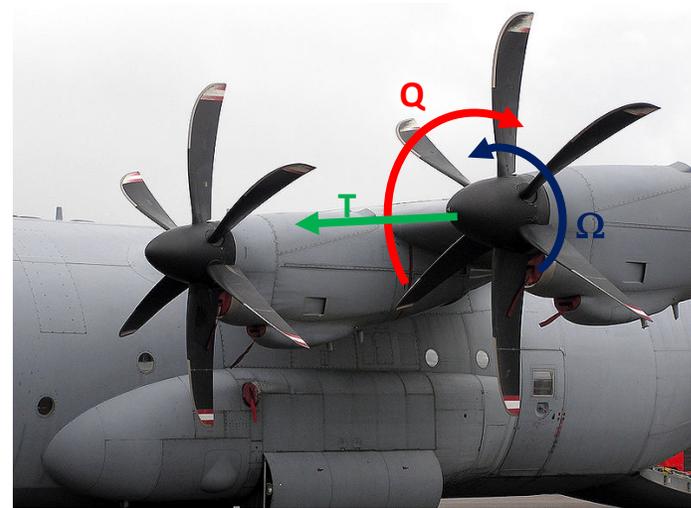
- Modelo de Disco Atuador (ou de quantidade de movimento)
- Modelo de Elemento de Pá (*Blade Element*)
- Introdução à Teoria de Quantidade de Movimento do Elemento de Pá (*Blade Element Momentum Theory, BEMT*)
- Discussão sobre modelos mais avançados (linha de sustentação, superfície de sustentação, métodos de painéis, CFD/fluido real)
- Introdução sobre medidas experimentais em propulsores (séries sistemáticas de hélices)
- Discussão sobre cavitação

Introdução

ROTORES: PROPULSÃO



www.ship-technology.com



wikipedia.org

- ➡ fornecem energia ao escoamento (aumentam qtde. de mov.)
- ➡ desejável: T (*thrust, empuxo*)
- ➡ consequência: Q (*torque*)

Introdução

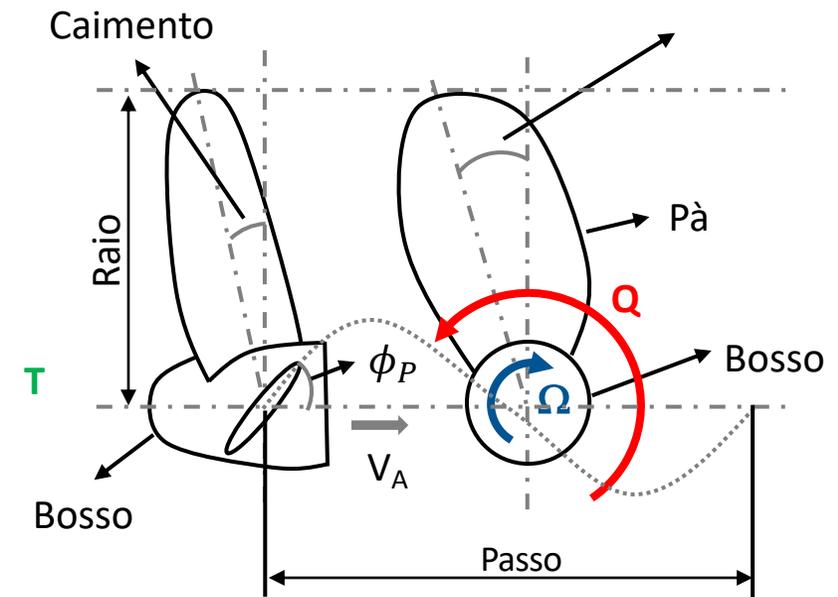
ROTORES: TURBINAS



- ➔ extraem energia do escoamento (reduzem qtde. de mov.)
- ➔ desejável: Q (torque)
- ➔ consequência: T (empuxo)

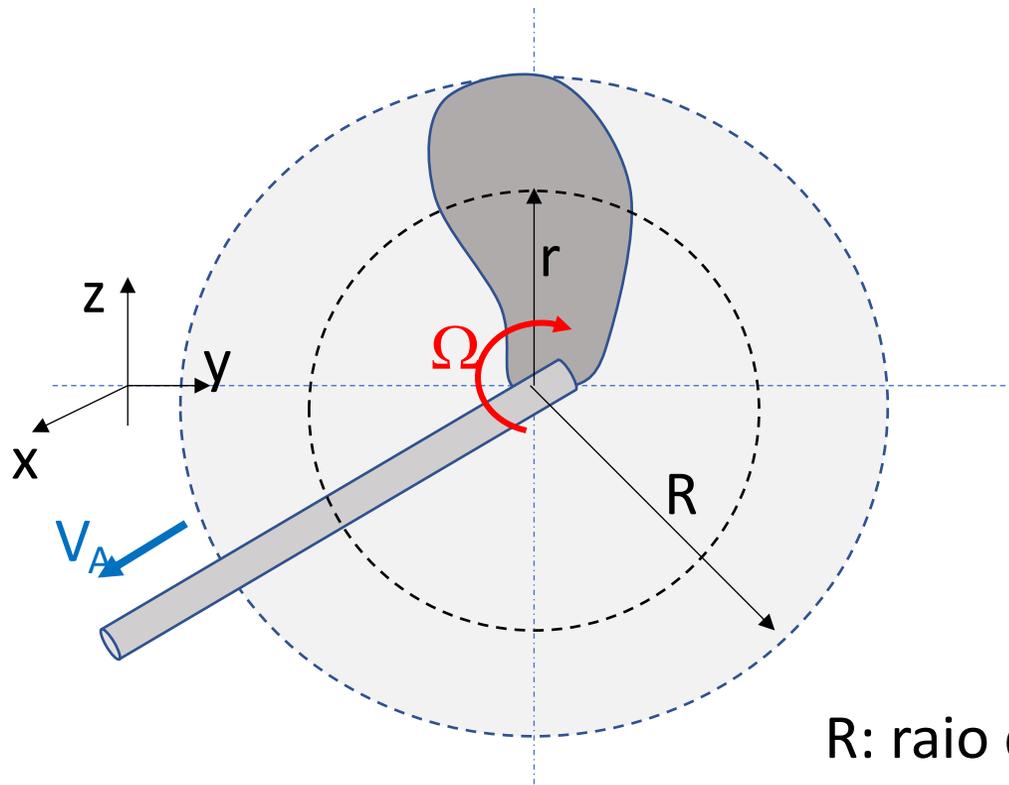
Geometria do Propulsor

- A geometria dos hélices navais normalmente é bastante complexa
- Em geral, parâmetros como:
 - *rake* (caimento);
 - *skew* (assimetria);
 - *pitch* (passo);são variáveis ao longo do raio das pás
- Destes, um dos mais importantes do ponto de vista hidrodinâmico é o **passo**



Geometria do propulsor

Propulsor em águas abertas (ausência do casco)



V_A : velocidade de avanço (navio)

Ω : velocidade de rotação (rad/s)

$$\Omega = 2\pi n$$

rps

s : solidez

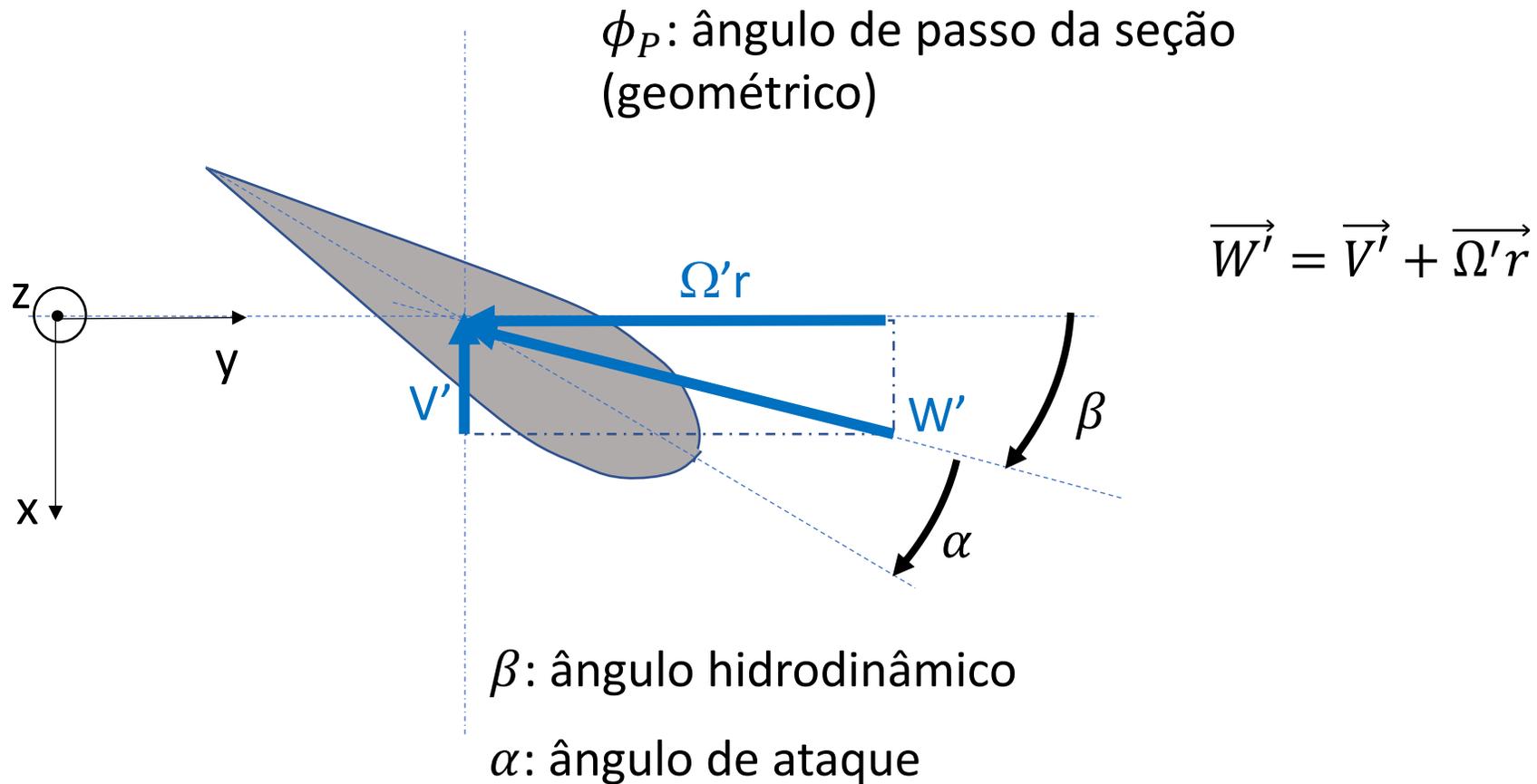
$$s = A_{PAS} / A_{DISCO}$$

R : raio do “disco propulsor”

$$A_{DISCO} = \pi R^2$$

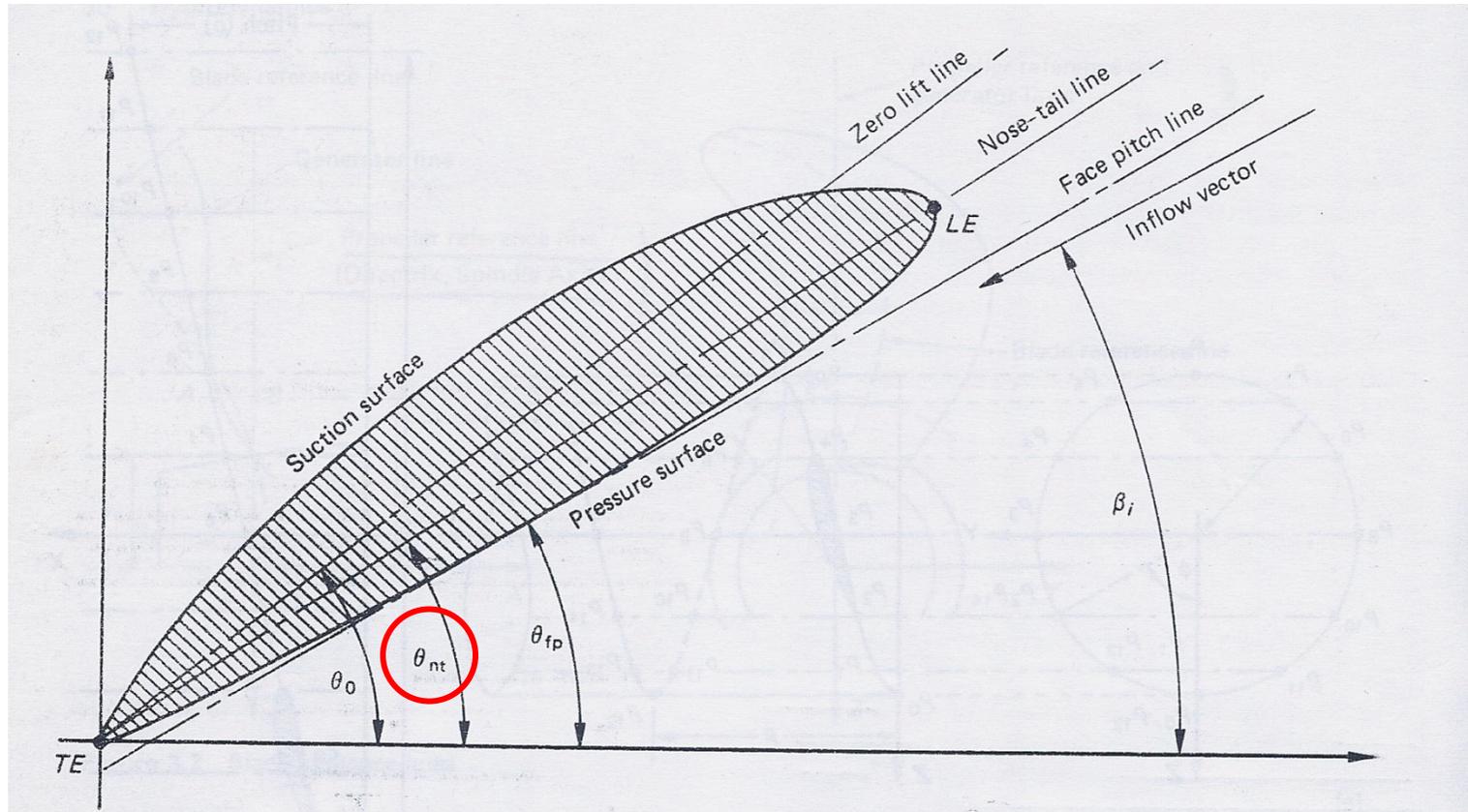
Geometria do propulsor

Seção (elemento) da pá distante r do eixo:



Geometria do propulsor

Definições alternativas de ângulo de passo em um fólio assimétrico

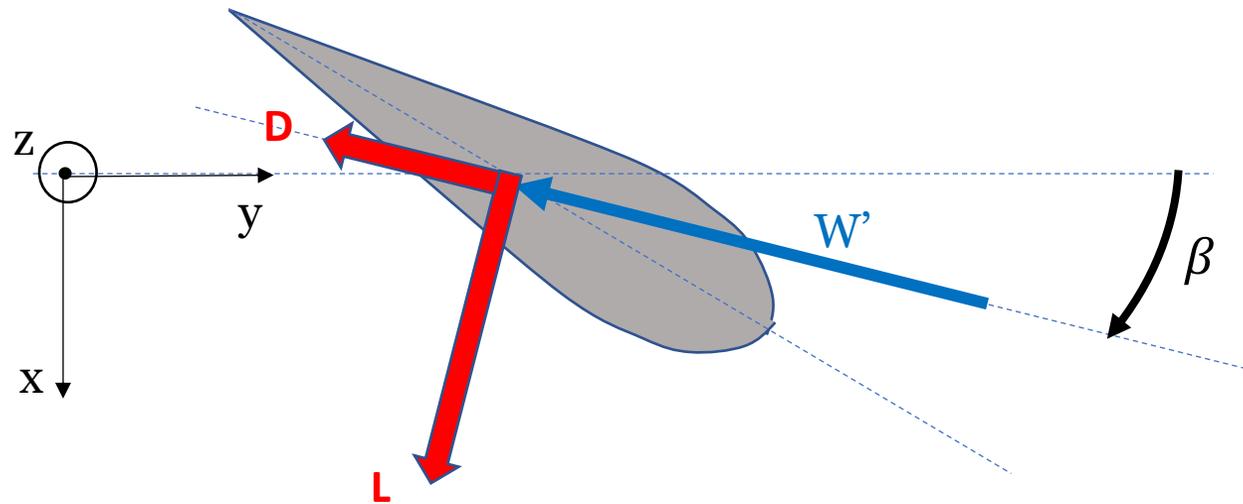


Carlton, J.S.

Geometria do Propulsor

Desejamos:

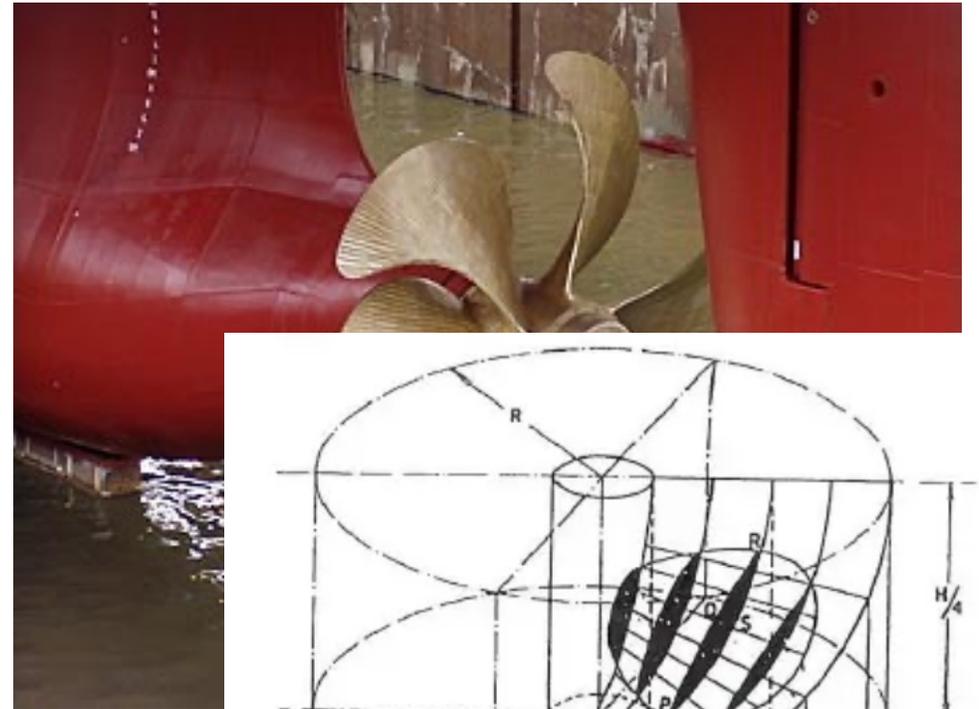
1. Saber como calcular V' e Ω' em função de V_A , Ω e da geometria do propulsor.
2. Uma vez conhecidas V' e Ω' e as características do fólio ($C_L; C_D$), estimar as forças hidrodinâmicas atuantes sobre a seção.



Tipos de Propulsores

Propulsor de Passo Fixo

- Propulsor tipo hélice original e mais difundido a partir do final do sec. XIX;
- Número de pás variável (navios mercantes: geralmente 4 a 6)
- Construídos em monobloco
- Geometrias atuais das pás são bastante complexas



Tipos de Propulsores

Propulsor de Passo Controlável (CPP)

- Permite a variação do passo das pás para as diferentes rotações do eixo;
- Maior eficiência nos diferentes regimes de operação;
- Correspondem a aprox. 40% do mercado de propulsores
- Principais desvantagens:
 - alto custo inicial
 - maior diâmetro do bosso



www.kamome-propeller.co.jp

Tipos de Propulsores

Propulsor em Duto (Ducted Propeller)

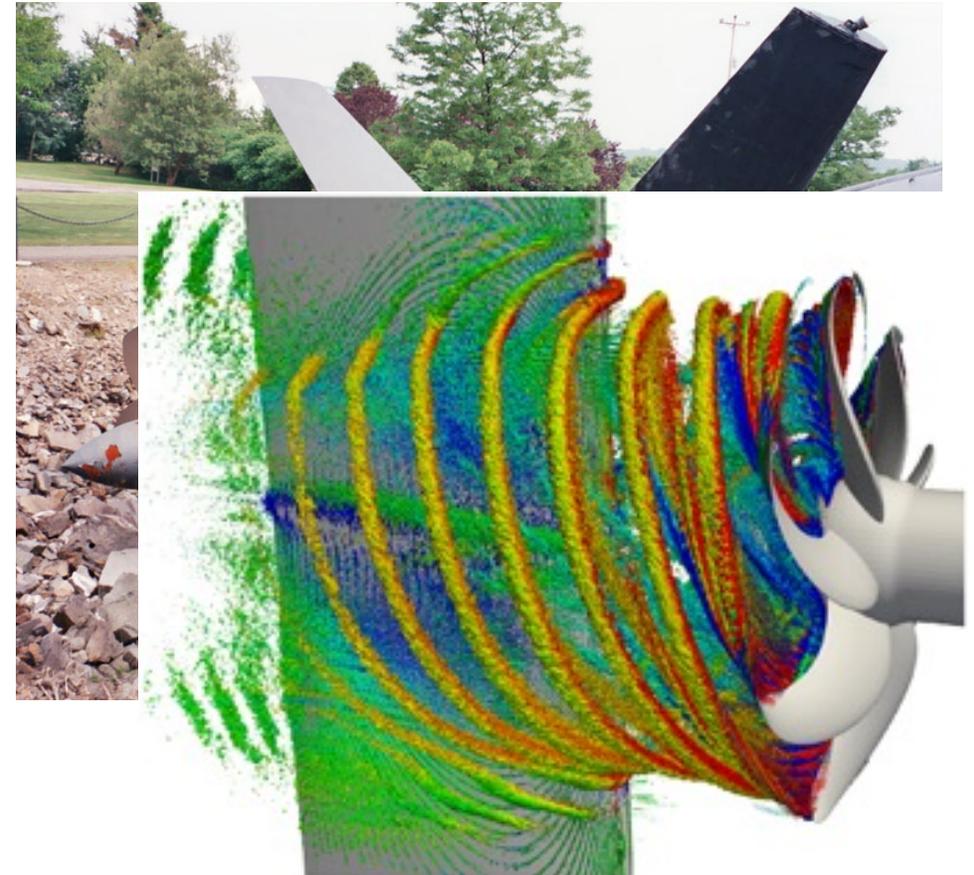
- O duto acelera o fluxo em seu interior;
- Maior eficiência em situações de alto carregamento com baixas velocidades;
- Aplicações em rebocadores e navios dotados de sistema de posicionamento dinâmico;
- Os dutos e propulsores podem ser azimutais



Tipos de Propulsores

Propulsores Contrarotativos (CRP)

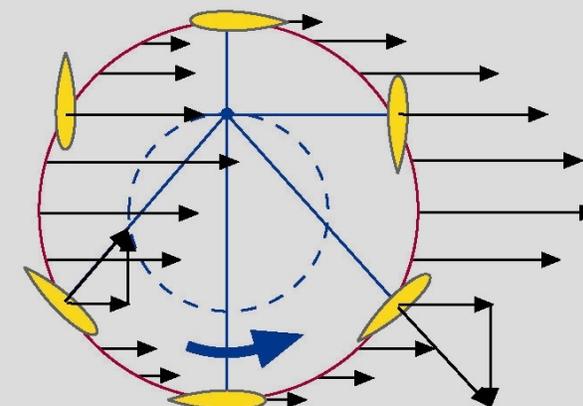
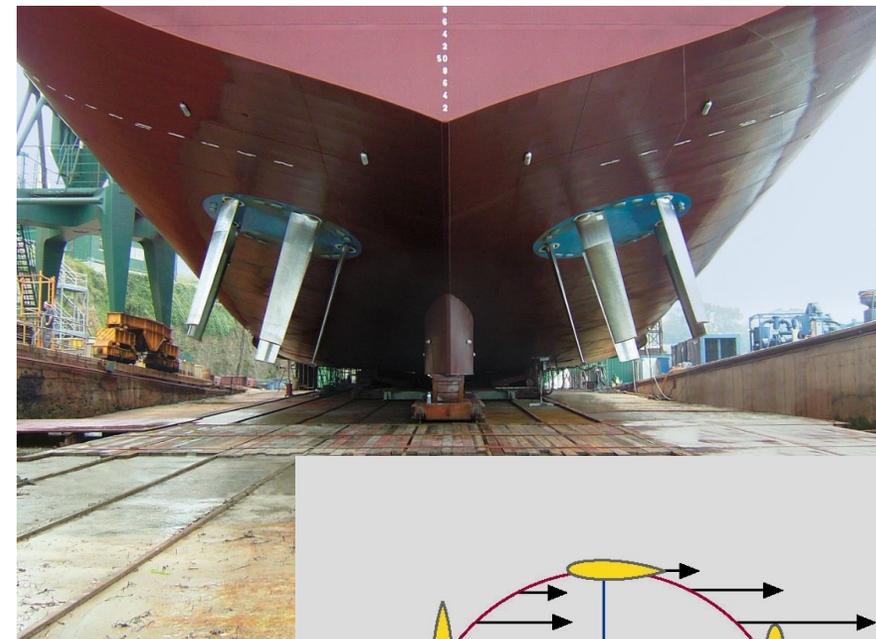
- Sistema composto por dois propulsores em linha, com rotações opostas
- Aproveita parte da energia rotacional da esteira
- Permite maior balanceamento do torque, importante, p.ex., para torpedos
- Incomuns em navios mercantes (custo, problemas mecânicos, ...)



Tipos de Propulsores

Propulsores Contrarotativos (CRP)

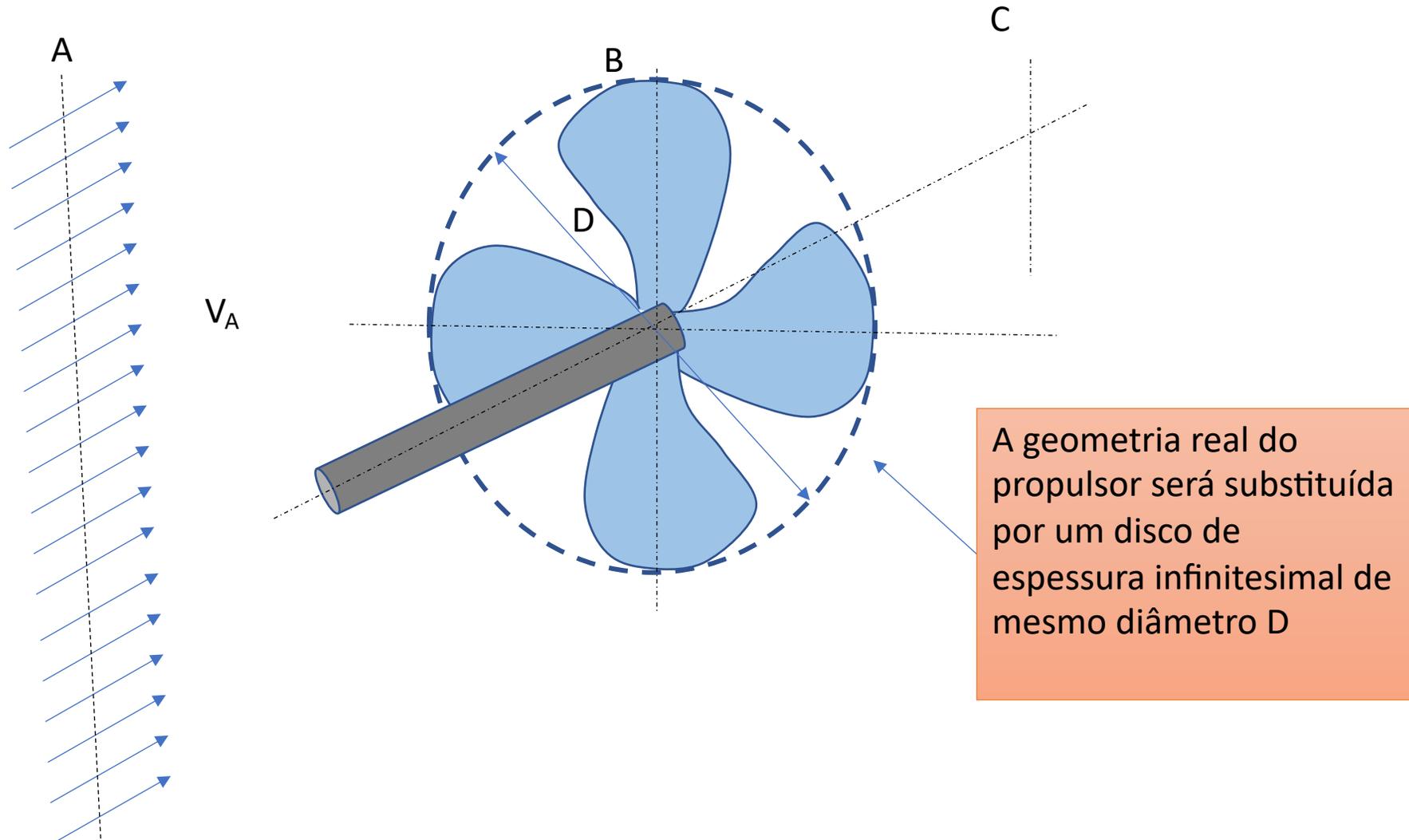
- Não se trata de propulsor tipo hélice
- Aplicações em embarcações de baixa velocidade
 - Rebocadores, ferries, plataformas de perfuração, ...
- Combina propulsão e manobra, mediante controle ativo para direcionamento das forças horizontais



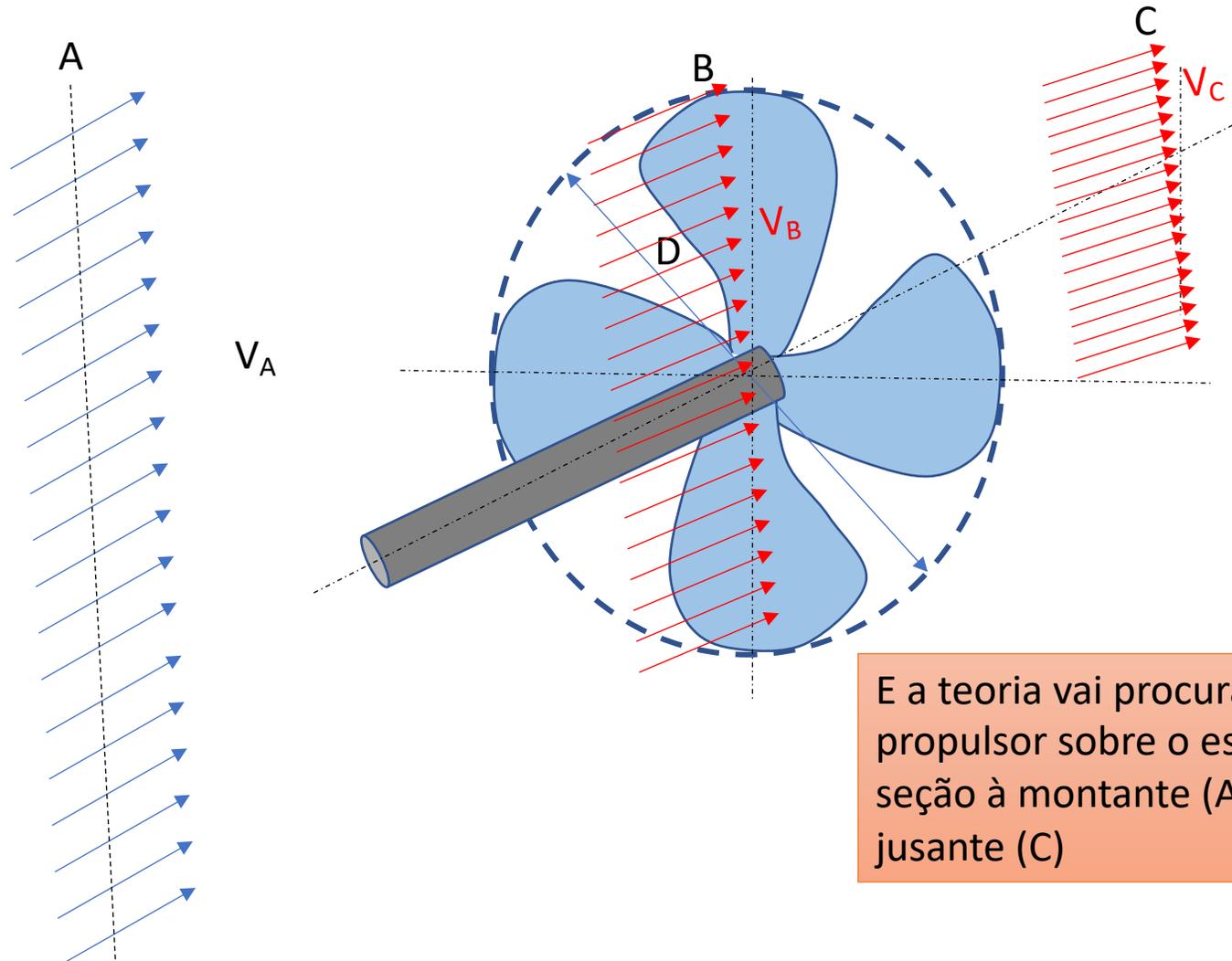
Teoria do Disco Atuador

- **Histórico:** O início da teoria de disco atuador se dá com os trabalhos de Rankine ainda no final do séc. XIX. Algumas décadas depois, com a progresso da teoria de asas e com o melhor entendimento do escoamento nos rotores, essa teoria vai sofrendo aprimoramentos, com as contribuições de Joukowsky, Glauert e outros.
- **Objetivo:** Modelagem simples dos princípios de funcionamento do propulsor através da análise de **quantidade de movimento** do escoamento, encarando o propulsor como um *disco de espessura infinitesimal que exerce uma ação sobre o escoamento incidente*.
- **Escoamento:** fluido ideal, escoamento potencial (irrotacional) e permanente

Teoria do Disco Atuador

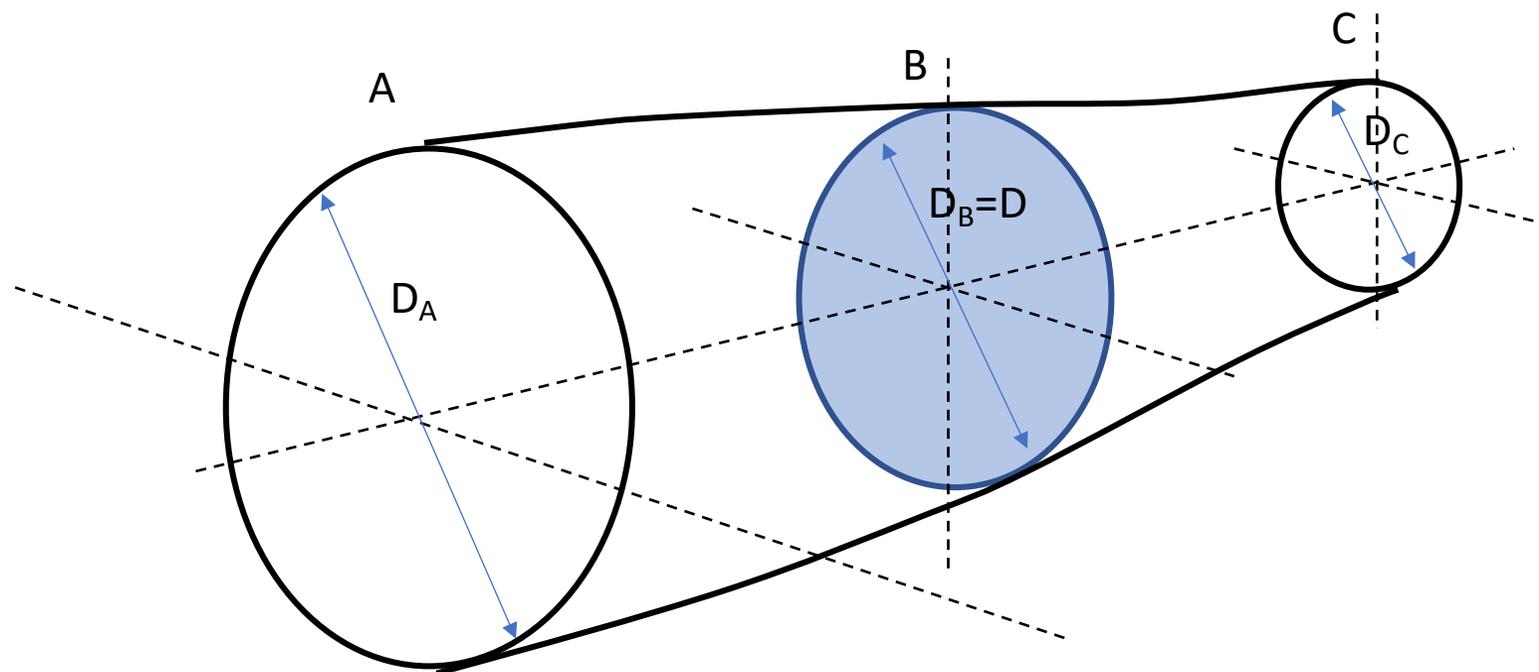


Teoria do Disco Atuador



E a teoria vai procurar explicar a ação do propulsor sobre o escoamento entre a seção à montante (A) e a seção à jusante (C)

Teoria do Disco Atuador

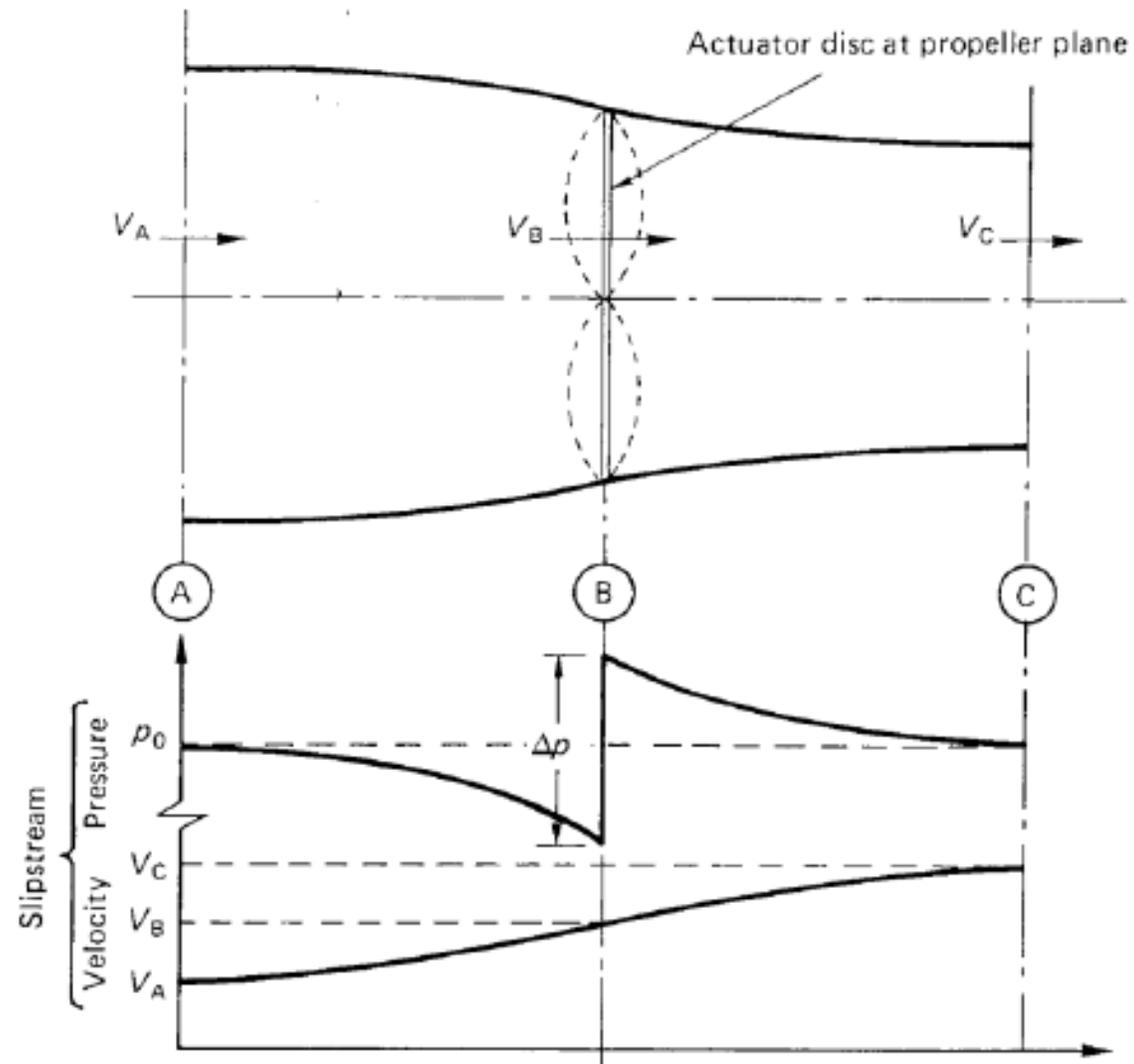


Para isso, vai considerar a conservação de massa do escoamento que atravessa a seção do disco (B), supondo que tal escoamento esteja contido no tubo de corrente ilustrado acima

Teoria do Disco Atuador: Qtde de Movimento Axial

- A primeira versão da teoria de disco atuador (Rankine, 1865) considera apenas o fluxo axial através do disco e sua quantidade de movimento;
- A teoria descreve a ação do propulsor sobre o escoamento ao longo do tubo de corrente;
- Sendo conhecido o sentido da força de empuxo (T , *thrust*), o modelo considera que há um aumento da quantidade de movimento axial do escoamento no tubo de corrente entre as seções de montante (A) e jusante (C).

Teoria do Disco Atuador: Qtde de Movimento Axial



Teoria do Disco Atuador: Qtde de Movimento Axial

Inicialmente, devemos considerar que a massa do escoamento no tubo de corrente deve se conservar. Sendo o escoamento potencial, e portanto incompressível e homogêneo. O que implica

$$V_C > V_B > V_A \quad \longrightarrow \quad D_C < D_B < D_A$$

O **empuxo (T)** sobre o propulsor pode ser obtido a partir da taxa de variação da quantidade de movimento do fluxo axial entre as seções à montante (A) e à jusante (C):

$$T = \rho A_B V_B (V_C - V_A)$$

Teoria do Disco Atuador: Qtde de Movimento Axial

Fator de indução axial (a , $a > 0$):

$$V_B = V_A(1 + a)$$

Nota: Sendo o modelo aplicado ao propulsor em águas abertas, V_A corresponderá à velocidade de avanço do navio, enquanto V_B representará a velocidade axial no plano do propulsor (disco), que desejamos calcular

Então:

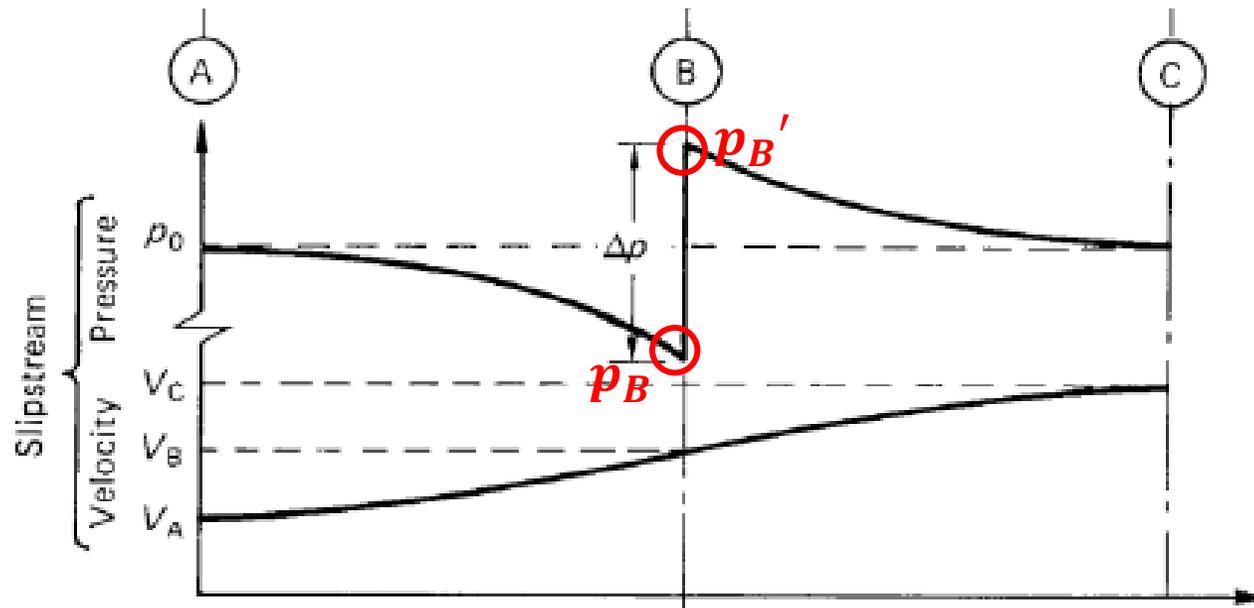
$$T = \rho A_B V_B (V_C - V_A) = \rho A_B V_A (1 + a) (V_C - V_A)$$

Mas ainda há duas formas de estabelecermos uma relação entre V_A e V_C :

- i) Relacionando o empuxo à diferença de pressão no disco;
- ii) A partir da avaliação da potência entregue ao fluido

Teoria do Disco Atuador: Qtde de Movimento Axial

i) Consideremos as duas faces do disco, e chamemos a face de montante de seção B e a face de jusante de seção B'. Como vimos, entre B e B' a teoria considera que ocorra um salto instantâneo da pressão com $p_{B'} > p_B$



Teoria do Disco Atuador: Qtde de Movimento Axial

Então podemos aplicar a equação de Bernoulli entre A e B e entre B' e C, notando que a velocidade axial é contínua através do disco e igual a V_B :

Entre a seção de montante e a face B teremos:

$$\frac{1}{2}\rho V_A^2 + p_\infty = \frac{1}{2}\rho V_B^2 + p_B$$

Enquanto, a jusante teremos:

$$\frac{1}{2}\rho V_B^2 + p'_B = \frac{1}{2}\rho V_C^2 + p_\infty$$

E, portanto:

$$\frac{1}{2}\rho V_A^2 + (p'_B - p_B) = \frac{1}{2}\rho V_C^2 \quad \rightarrow \quad (p'_B - p_B) = \frac{1}{2}\rho(V_C^2 - V_A^2)$$

Teoria do Disco Atuador: Qtde de Movimento Axial

Por fim, notamos que:

$$T = \rho A_B V_A (1 + a) (V_C - V_A) = (p'_B - p_B) A_B$$

E, a partir da relação anterior podemos concluir que:

$$V_A (1 + a) (V_C - V_A) = \frac{1}{2} (V_C^2 - V_A^2)$$

e, por fim:

$$V_B = V_A (1 + a) = \frac{1}{2} (V_A + V_C)$$

$$V_C = V_A (1 + 2a)$$

Teoria do Disco Atuador: Qtde de Movimento Axial

ii) Observemos que a potência entregue ao fluido pelo propulsor deve equivaler à taxa de variação da energia cinética no tubo de corrente:

$$Pot = TV_B = \frac{1}{2} \dot{m}(V_C^2 - V_A^2)$$

E, então:

$$\dot{m}(V_C - V_A)V_B = \frac{1}{2} \dot{m}(V_C^2 - V_A^2)$$

e a partir da relação acima, podemos chegar à mesma conclusão:

$$V_B = V_A(1 + a) = \frac{1}{2}(V_A + V_C)$$

$$\boxed{V_C = V_A(1 + 2a)}$$

Teoria do Disco Atuador: Qtde de Movimento Axial

Agora, podemos usar as relações anteriores para reescrever o empuxo na forma:

$$T = \rho A_B V_B (V_C - V_A) = \rho A_B V_A (1 + a)(2aV_A)$$

$$T = 2\rho A_B V_A^2 a(1 + a)$$

que nos mostra que, uma vez determinado o fator de indução axial, saberíamos calcular o empuxo do propulsor e a potência entregue pelo propulsor ao fluido.

Além disso, se empregarmos a adimensionalização usual para a força de empuxo a partir das grandezas conhecidas (V_A e A_B), teremos:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A_B V_A^2} = 4a(1 + a)$$

Teoria do Disco Atuador: Qtde de Movimento Axial

A partir das relações já apresentadas, outras podem ser obtidas, por exemplo envolvendo a contração do tubo de corrente entre A e C:

Por exemplo, lembrando que:

$$V_A D_A^2 = V_B D_B^2 = V_C D_C^2$$

É fácil mostrar que:

$$\left(\frac{D_A}{D_B}\right)^2 = 1 + a$$

$$\frac{D_A}{D_B} = \sqrt{1 + a} = \left[1/2(1 + \sqrt{1 + C_T})\right]^{1/2}$$