



Engenharia Naval  
e Oceânica

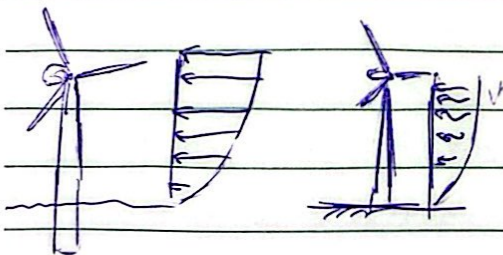
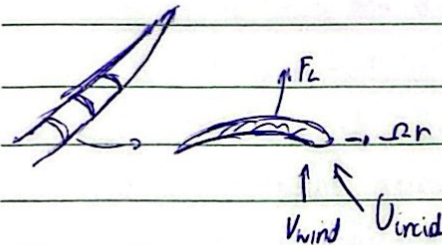


#1- Para embasar a análise sobre vantagens e desvantagens da integração de turbinas eólicas flutuantes em águas profundas por parte do setor offshore da indústria O&G é interessante antes resgatar alguns conceitos sobre o funcionamento das turbinas.

As turbinas são dispositivos para conversão da energia de um escoamento incidente, no caso de vento, em trabalho mecânico e ser efetivamente absorvida/convertida em eletricidade por um gerador. Conseqüentemente, suas pás são projetadas em analogia ao desenvolvimento de propulsores, ou seja, são compostas pela união de perfis aerodinâmicos ou "asas 2D" para que o escoamento gere torque no rotor decorrente essencialmente ao efeito de sustentação.

Em outras palavras, o geometriz é composto por seções caracterizadas por perfis aerodinâmicos que geram primordialmente sustentação que, ao ser decomposta na direção tangencial, age como um torque que induz rotação no sistema em torno de seu eixo, que por sua vez é ligado a um gerador.

Assim, a eficiência da turbina é diretamente dependente da qualidade do escoamento incidente.



Isto motivou o desenvolvimento natural da indústria eólica da terra para o oceano, pois como ilustrado ao lado, o perfil de velocidade do vento é altamente influenciado pelo solo/superfície do mar. No primeiro, devido à alta

"rugosidade" (adequada à escala), as irregularidades topográficas e a maior tendência à fricção por se tratar de uma superfície sólida resultam em efeitos de cisalhamento mais intensos que afetam a camada limite gerada. Conseqüentemente, não apenas a velocidade média pode ser alterada, como principalmente os níveis de turbulência do escoamento, afetando a capacidade de



sustentação dos elementos de po' e, conseqüentemente, seu desempenho. Assim, a tendência natural de desenvolvimento da indústria eólica foi de migrar para o mar.

Os primeiros conceitos, fixos no lito, já demonstraram que custos associados à geração de energia por fontes eólicas em mar aumentam substancialmente devido às maiores complexidades da fundação, elevando o Custo Nivelado de Energia (LCOE - Levelized Cost of Energy), esta tida como principal métrica para avaliação do potencial econômico dos dispositivos, balanceando os custos de capital, operação e descomissionamento ao total estimado de geração de energia, expressando assim o custo do kWh!

$$LCOE = \frac{CAPEX + OPEX + DECEX}{TEP} \quad TEP = \int_0^{vida\ útil} P(t) \cdot dt$$

↳ depende das condições operacionais

Aínda, TEP representa o total de energia produzida ao longo da vida útil da turbina em função de sua série temporal de Potência gerada ( $P(t)$ ).

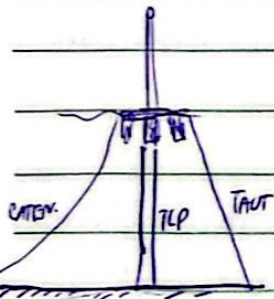
Para fundações fixas, como as bases monopilares, os custos de capital aumentam substancialmente com a profundidade, inviabilizando tais soluções, efeito este observado no passado pela indústria O&G conforme seus plataformas de produção se afastaram de costa em busca de campos mais produtivos. A indústria eólica, análogamente, visa se afastar de costa em prol de "melhores ventos" para aumento de desempenho das turbinas. Tipicamente, adota-se lâminas d'água de 50m para viabilidade econômica das turbinas fixas, e a solução é a adaptação para conceitos flutuantes.

Problemas de estabilidade hidrostática, comportamento em ondas e passeio excessivo do flutuador devido às ações de corrente e efeitos de segundo ordem de ondas representam novos desafios a serem considerados no projeto das turbinas eólicas. Essas questões são também comuns ao projeto de estruturas oceânicas de produção e perfuração, sendo objeto de estudos há décadas. A experiência acumulada pela indústria O&G já poderia ser, por si, ranteipsa o suficiente para aproximar os dois setores, mas a sinergia vai além,

Ainda que não tão intensamente quanto que para estruturas fixas, a viabilidade econômica

das turbinas eólicas flutuantes também é afetada pela profundidade, especialmente devido ao sistema de ancoragem. O custo com material e de operação de instalação aumenta diretamente com o comprimento das linhas, que por sua vez aumenta com a profundidade.

Os desafios devido ao sistema de ancoragem não são apenas financeiros, mas também técnicos. Para turbinas eólicas flutuantes, possivelmente o melhor sistema de ancoragem é por meio de tendões, tipo TLP (tension-leg platforms), por apresentar maior rigidez e, portanto, mais restringir os movimentos do flutuador e, obviamente, dos pás de turbina. Estes movimentos são indesejáveis por afetar o ângulo de ataque da escoamento nos elementos de pás, ou seja, alterar a capacidade de sustentação dos elementos e assim o desempenho da turbina. Problemas dinâmicos, como acelerações excessivas de turbina, também são indesejáveis por podermos levar a condições de desligamento das turbinas para preservar seus componentes. Ainda que mais interessante tecnicamente, arranjos em TLP também podem ser custosos em águas profundas, inviabilizando o conceito.



Arranjos em catenária simples, por outro lado, são tidos como mais 'melhores' por terem menos rigidez. Contudo, para águas profundas é necessário que as linhas sejam compostas por diferentes materiais, como corrente e linhas sintéticas, para redução de seu peso e consequentemente de pré-tensão vertical no topo e não afetar a flutuabilidade do flutuador.

Para uma turbina com flutuador tripode comum, tendência dos projetos mais recentes, dificilmente a ancoragem será composta por corrente em catenária, pois o peso das linhas será suficiente para afundar a turbina devido à pré-tensão vertical exceder o empuxo! Pelo mesmo motivo, arranjos em sistema full ou semi-full podem não ser opções viáveis, a depender do caso.

Fica claro que os custos com sistemas de ancoragem tendem a ser elevados em regiões de águas profundas, mesmo com arranjos mais simples em catenária, o que impacta diretamente o LOE e torna-se uma barreira para entrada e expansão do setor.

Custos com transmissão são outro fator altamente impactante a ser considerado.



Devido à topologia usual das plataformas continentais, regiões de águas profundas são usualmente afastadas das regiões costeiras, podendo atingir centenas de km. Tal qual o efeito de profundidade, maiores distâncias implicam em maiores custos com o sistema de transmissão tanto de capital devido ao custo por comprimento e à instalação, quanto manutenção, inspeção e reparo. Também há de se destacar o custo de descomissionamento!

Estes custos elevados implicam na demanda por subsídios para que a indústria eólica offshore possa se estabelecer e amadurecer tecnologicamente, o que pode ser suprido pela indústria O&G.

Aspectos logísticos de manufatura, comissionamento e manutenção também são aspectos positivos ou benefícios para a indústria eólica nesta interação, o que pode agilizar e viabilizar conceitos em águas profundas que talvez não seriam possíveis sem toda a cadeia logística existente para atender a indústria O&G. Um bom exemplo é o uso de estacas torpeda como âncoras nos sistemas de ancoragem, já totalmente consolidado e dominante nas unidades de produção no Brasil, uma alternativa mais barata e de instalação mais rápida e simples que as âncoras de sucção mais comuns na Europa.

Aé aqui discorreu-se sobre os benefícios de indústria eólica na interação, mas há elementos que justificam uma possível sinergia entre os setores. As políticas ambientais mais recentes, voltadas à redução dos níveis de concentração dos gases de efeito estufa como medida para controle de temperatura incidem fortemente sobre a indústria O&G. Desde o aumento da eficiência dos processos termodinâmicos a bordo ações práticas como redução de queima no flare, reinjeção de gases e captura de CO<sub>2</sub> são medidas adotadas pelas operadoras para reduzir suas emissões com ambição de atingir a neutralidade (NET ZERO) a partir de medidas descarbonizantes. Outra medida muito investigada é a eletrificação das unidades e a redução de geração de eletricidade pela queima de combustíveis fósseis. Nota-se a dissonância das duas medidas, visto que a primeira resulta em aumento de demanda energética, fazendo necessário incorporar alternativas de geração de energia além das turbinas já utilizadas. Neste contexto, a possível possibilidade do uso de turbinas eólicas para suprir parte da energia demandada representa um grande potencial para redução das emissões das unidades, grande objetivo das operadoras atualmente.



41- Cant. Uma vantagem desta sinergia é a redução das distâncias ~~de custo~~, de transmissão, não mais até a costa e sim para campos de produção.

Esta sinergia já é explorada pela Equinor, que opera e fazenda HYMIND TAMPEU, no Mar do Norte, cuja produção é parcialmente transmitida para a costa e parcialmente para o campo de operadores.

No Brasil ainda não há marco legal para a exploração de recursos eólicos em regiões oceânicas, a ser regulamentado pelo Projeto de Lei em ~~través~~ tramitação no Senado. Portanto, não há uma indústria eólica offshore estabelecida. Ainda assim, baseado nos pedidos de licitação ambiental publicados pelo IBAMA, dezenas de solicitações já foram submetidas para análise em regiões de baixa lâmina d'água (<50m) e algumas para águas profundas. Os pedidos visam primordialmente 3 áreas na costa brasileira:

- Nordeste, entre RN e MA, pelos ventos intensos ( $\sim 9 \text{ m/s}$ )
- Sul, ao longo do RS, também pelos altas velocidades de vento ( $\sim 10 \text{ m/s}$ )
- Sudeste, no norte do RJ e sul do ES, ( $\sim 8 \text{ m/s}$ )

O último caso, ainda que apresente boas velocidades médias de vento, é menos interessante que os demais em termos de potencial teórico ( $P/A = \frac{1}{2} \rho V^3$ ), quase 30% inferior. Este caso se justifica exatamente pela possível interação com toda logística já estabelecida pela indústria O&G, que atrai tais projetos para explorar possível sinergia.

Outro fato que corrobora esta visão é o alto número de pedidos por parte de operadores, como a própria PETROBRAS, bem como prestadoras de serviço e outras empresas fortemente ligadas à área O&G.



Além dos desafios já citados para instalação e operação de turbinas eólicas flutuantes, a transmissão às unidades pode ser citada. Ainda que as distâncias não sejam tão grandes quanto para a costa, as profundidades ainda são importantes no arranjo dos cabos. Além disso, é necessário adaptação das unidades para receber essa energia, afinal não há "torres elétricas" a bordo para recepção de energia. Os movimentos tanto da turbina quanto da unidade também devem ser considerados, podendo danificar os cabos de transmissão por fadiga, especialmente nas conexões, como já reportado pela Hywind.

Do ponto de vista logístico, a demanda por embarcações especializadas tende a subir hoje, como são em grande parte convertidas de navios de apoio offshore, pode existir baixa oferta de embarcações especializadas tanto para instalação quanto para manutenção. Como citado no OTC 2014: "se todos os navios de apoio fossem convertidos instantaneamente para embarcações especializadas de instalação, ainda assim não seria possível atender todas as demandas de fazendas eólicas offshore flutuantes." Ainda que possivelmente um exagero, é inegável o problema logístico a ser enfrentado. Métodos alternativos de instalação podem ser desenvolvidos, em sinergia com a indústria O&G, para sanar este problema.

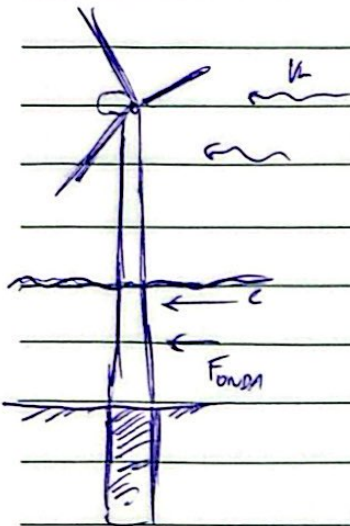
Finalmente, o último grande desafio a ser citado é o de planejamento espacial associado à ocupação do espaço já denso dos campos de produção. Turbinas eólicas devem ser espaçadas em 5 a 8 vezes o diâmetro de seu rotor, resultando em distâncias de kms entre elas. Além disso, e talvez até mais importante, o arranjo submarino pode ser tão complexo que o sistema de ancoragem vire fator inviabilizante. Tais fatores, combinados com eventuais restrições ambientais, podem ser altamente relevantes em uma eventual sinergia das indústrias eólicas offshore e O&G.



Engenharia Naval  
e Oceânica



#2- Turbinas eólicas offshore fixas possuem o mesmo princípio de funcionamento descrito anteriormente, com a única diferença de ter sua base fixa. Por consequência, todo carregamento aplicado sobre a turbina será eventualmente transmitido ao solo, se não for absorvido como deformação do material, pelo operador ou outra fonte dissipativa.



Como no monopile ilustrado ao lado, sua base deve ser ancorada ao leito a uma profundidade grande o suficiente para que os momentos fletores e cortantes sejam suportados/transmitidos ao solo.

Além de resultar no torque para girar o rotor, o vento impõe força axial sobre a turbina, comumente denominada empuxo no jargão naval ( $T'$ ). Este empuxo induz deformação flexional na torre da turbina, esta encaixada no solo. Mais ainda, o vento age em toda superfície emersa como uma carga distribuída, embora seja afetado pelo movimento dos pás.

O movimento dos pás induz variações no campo de pressões próximo a torre, gerando um ruído acústico que pode ser transmitido à estrutura e, caso esta frequência se aproxime de algum modo natural estrutural, resultar em vibrações intensas e ressonantes.

Na parte submersa, carregamentos oscilatórios devido à passagem das ondas pode ser influente no problema. No caso de um monopile como o apresentado acima, como as dimensões - ou particularmente o diâmetro do pilar - são inferiores aos comprimentos de onda típicos ( $\lambda > 1$ ), estes efeitos podem ser de natureza inercial e de arrasto, conforme a equação



de Morison -  $F = F_D + F_I = \frac{1}{2} \rho U^2 C_D D L + \frac{1}{2} \rho D^2 L C_M \dot{U}$

$|U| \cdot U \rightarrow$  velocidade "quadrática", acompanhando sentido do escoamento

Neste caso, devido à natureza oscilatória do escoamento, há de se ressaltar a dependência dos coeficientes de arrasto ( $C_D$ ) e inercial ( $C_M$ ) ao regime de oscilação, expresso pelo adimensional  $KC = \frac{U}{T \cdot D} = \frac{2\pi \cdot A}{D}$ , onde  $A$  é a amplitude do escoamento oscilatório (proporcional à amplitude da onda),  $T$  é o período da onda e  $U$  é a velocidade que, neste caso, é oscilatória:  $U = \omega A = \frac{2\pi}{T} \cdot A$ .

O trabalho clássico de Sarpkaya é comumente usado para ~~estimar~~ estimar os valores de  $C_D$  e  $C_M$  em função de  $KC$  e de Reynolds oscilatório ( $Re = \frac{U D}{\nu} = \frac{\omega A D}{\nu}$ ) para corpos cilíndricos, como o monopile discutido.

¶ Estruturalmente, essas forças são distribuídas verticalmente no pilar e tendem a ser mais intensas próximo à superfície livre e decair exponencial ou hiperbolicamente com a profundidade, conforme os movimentos orbitais previstos pela Teoria do Potencial. Assim são consideradas como carregamentos oscilatórios distribuídos pelo pilar.

A corrente háze sobre a parte submersa, seja ela a corrente de superfície ou de maré, de mesma forma. expressa em termos de força de arrasto, alinhada à direção da corrente, de maneira análoga ao previsto por Morison:  $F_D = \frac{1}{2} \rho \tilde{C}_D D L$ , mas destaca-se que este coeficiente de arrasto é essencialmente distinto, aqui associado a uma corrente uniforme e não mais oscilatória, por isso  $\tilde{C}_D \neq C_D$ .

Novamente, estes efeitos são distribuídos ao longo da parte submersa do pilar como um carregamento que pode variar conforme o perfil de velocidades ( $\tilde{V}(z)$ ), tanto em intensidade quanto em direção.

A interação com o solo pode ser particularmente complexa, pois todos esses carregamentos são distribuídos para a fundação em termos de força ~~horizontal~~ e momento, que devem ser



suportadas paralela. A depender da modelagem do solo em função de sua composição, este possuirá uma resistência a tais carregamentos, além da compressão exercida pelo pilar devido ao peso de toda a turbina transmitido ao solo. Conforme sua rigidez, poderá ocorrer deslocamento, cedendo na base da torre, que por sua vez pode levar a inclinações, perda de rigidez flexional e, em casos extremos, tombamento da turbina.

A corrente de fundo pode aumentar o problema, tanto em complexidade quanto em gravidade. Ao asselhar sobre o fundo pode resultar na suspensão de partículas do leito, particularmente mais intensa na esteira turbulenta da base do pilar devido ao desprendimento de vórtices, resultando em áreas cavadas ao redor do pilar que tendem a reduzir sua capacidade de resistência à flexão. Este fenômeno é conhecido como Scour.

vórtices



solo cavado

pilar originalmente  
cravado agora exposto

Ainda é possível que haja desprendimento de vórtices na parte submersa, resultando nas chamadas Vibrações Induzidas por Vórtices (VIV), que como sugerido, induzem vibrações

na estrutura que podem ser particularmente intensas no caso de lock-in, ou seja, se a frequência de liberação de vórtices coincidir com a frequência natural do pilar.

Finalmente, problemas aero-elásticos representam as deformações elásticas por componentes de turbina, como suas pás e torre, que dependem das forças aerodinâmicas descritas acima e da rigidez flexional do material (EI). Estas deformações podem ser intensas, em casos extremos levando ao colapso do componente ou deformações intensas que podem resultar em outros problemas.



Por exemplo, em casos de flexões extremas pode das pás da turbina pode haver perda de desempenho ou até impacto com a torre. Cargas inerciais também podem ser consideradas para incorporar os carregamentos dinâmicos associados às partes móveis.

Em suma, trata-se de um problema complexo com alto grau de acoplamento entre diferentes partes, com diversas fontes de carregamento continuamente agindo ...



sobre partes estruturais da turbina e transmissões e o solo. Aliados às características eletrois das condições ambientais, é um problema de grande complexidade com muitos riscos associados.

O conceito do Gêmeo Digital (Digital Twin), visa consistir em desenvolver um modelo computacional fidedigno da estrutura analisada a fim de prever comportamentos, incluindo eventuais condições críticas, para definição de condições de parada ou planejamento de manutenção preditiva. Para tal, é fundamental que o gêmeo digital seja devidamente calibrado para confiabilidade das estimativas.

Aliados às informações ambientais, seja de previsão seja dados progressos, o gêmeo digital torna-se ferramenta valiosa de engenharia. Dados de campo podem (e devem) ser utilizados para verificar a acurácia da modelo computacional e implementar eventuais correções necessárias.

Dados de previsão permitem prever o desempenho, definir perfil operacional e planejar operações de inspeção e/ou manutenção.

Por exemplo, com um modelo devidamente calibrado é possível acompanhar o avanço do fenômeno de seque, indicando necessidade de inspeção de acordo com previsões numéricas ou mesmo medidas preditivas para conter avanço ou correções caso identificado.

É possível realizar simulações de médio-longo prazo, prevendo dano acumulado por fadiga em componentes específicos.

Outro exemplo, após ~~de~~ ocorrência de tempestade é possível 'ressimular' no gêmeo digital para verificar possível dano a algum componente, como deformação plástica de uma das pás, o que poderá ser inspecionado e eventualmente reparado pela troca da pá.

Dados de previsão podem ser usados no gêmeo digital, prevendo, por exemplo, deformações intensas nas pás e etc imposto com a torre fazendo o uma condição de parada da turbina.



#3 - As equações fundamentais de mecânica dos fluidos para problemas nos quais não há troca de calor (ou ao menos são desprezados), como os problemas típicos de hidrodinâmica são a conservação de massa e momento:

A equação de conservação de massa ou continuidade expressa que:

$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$  → Ou seja, seja um campo vetorial que represente a velocidade das partículas ( $\vec{v} = \vec{v}(x, y, z, t)$ ) e um campo escalar que represente sua massa específica ( $\rho = \rho(x, y, z, t)$ ), há um balanço espacial e temporal da conservação de matéria em um volume infinitesimal.

Para um escoamento incompressível, o que costuma ser válido para  $Ma = V/c < 0.3$ , onde  $c$  é a velocidade do som no meio, tem-se que  $\rho = \text{constante}$ :

$\rho = \text{cte} \Rightarrow \nabla \cdot \vec{v} = 0$  → Divergente de  $\vec{v} = 0$  → Balanço espacial para que não haja mudança de concentração de matéria no volume fluido.

O balanço de momento parte do entendimento que, ao adotar visão Lagrangiana, as derivações devem no tempo devem incorporar advecção induzida pelo escoamento. Para um fluido incompressível e entendendo que as forças sobre as partículas fluidas são de corpo/campo (gravidade) e de contato (tensão normal e cisalhante), assumindo comportamento isotrópico de pressão e escoamento Newtoniano, tem-se: →



$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{g} + \nu \nabla^2 \vec{v} \quad * \quad \tau_{ij} = \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \leftarrow \text{Fluido Newtoniano}$$

A equação de Navier-Stokes, descreve a cinza, representa balanço de momento e mostra um escoamento viscoso/real apresenta difusão de momento.

Em Teoria do Potencial, além da incompressibilidade do fluido, adota-se que os efeitos de cisalhamento são desprezíveis, de tal maneira que o campo se mantém conservativo. Sobre a partícula, o efeito do cisalhamento é o de induzir movimentos angulares sobre o próprio eixo, ou rotacionalidade, o que matematicamente é expresso pelo operador rotacional:

$$\nabla \times \vec{v} = \vec{\omega}$$

Matematicamente, um campo conservativo ou irrotacional pode ser expresso por uma função escalar:  $\exists \phi / \vec{v} = \nabla \phi \rightarrow$  Função potencial de velocidade

$$\Rightarrow \vec{v} = (u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}) = \frac{\partial \phi}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \hat{k}$$

Ao substituímos na equação de continuidade de um fluido incompressível:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \Rightarrow \nabla^2 \phi = 0 = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \leftarrow \text{Equação de Laplace}$$

Além disso, como  $\nabla \cdot \vec{\omega} = 0$ , a equação de Navier-Stokes pode ser reduzida:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla(-g\hat{j}) \rightarrow \text{Como } \mathbf{g} \text{ é conservativo também pode ser expresso por sua função potencial.}$$

Sabendo que  $(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \vec{v} \times (\nabla \times \vec{v}) + \frac{1}{2} \nabla \cdot \nabla \vec{v}$ , que  $\nabla \times \vec{v} = \vec{\omega}$  e substituindo  $\vec{v} = \nabla \phi$

$$\Rightarrow \nabla \left[ \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho |\nabla \phi|^2 + p + \rho g z \right] = 0 \Rightarrow \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho |\nabla \phi|^2 + p + \rho g z = \text{const}$$

Nesta versão da equação de Bernoulli, válida para escoamentos irrotacionais e invíscidos, há variações temporais expressos por  $\partial/\partial t$

Alternativamente, o cisalhamento poderia ter sido desprezado aplicando o balanço ao longo de uma única linha de corrente em regime permanente, levando à outra forma da equação de Bernoulli:  $p + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho g z = \text{const} \rightarrow$  NA LINHA DE CORRENTE.

Escoamentos potenciais são muito úteis na representação de muitos fenômenos, como descrição de ondas progressivas, por exemplo, resolvendo a equação de Laplace com as condições de contorno apropriadas. Forças de pressão podem ser estimadas nestes casos, por meio da integração do campo de pressões ao redor do corpo:

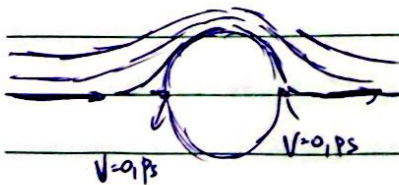
$$\vec{F}_p = - \iint_S p \, d\vec{s}$$

Tal prática é comum em outras análises de comportamento em ondas com boa aderência dos resultados contanto que a rotuidade tangencial próxima ao corpo não seja intensa, principalmente em geometrias arredondadas, pois haveria ~~mesmo~~ nesses casos forte cisalhamento ( $\tau = \rho \frac{\partial u}{\partial n}$ ) que foi desprezado como hipótese FUNDAMENTAL para o desenvolvimento da teoria.

No caso de um círculo sujeito a uma corrente uniforme  $\vec{U} = U\hat{i}$ , por exemplo, o Teorema de Potencial sugere que o escoamento apresenta uma pressão de estagnação

no ponto frontal: E na face traseira!

$$(p_s - p_a) = \frac{1}{2} \rho U^2$$

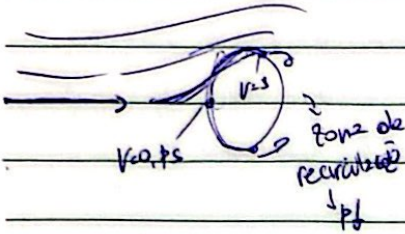


De acordo com esse simétrico do campo de velocidades, é fácil prever que o campo de pressões também seria simétrico e, assim, a força de arrasto seria nula!

Não apenas em corpos simétricos, a aplicação do Teorema de Green mostra que todo corpo fechado imerso em escoamento potencial tem força de arrasto nula!

Esta conclusão não condiz com a realidade, e consiste no chamado Paradoxo de D'Alembert.

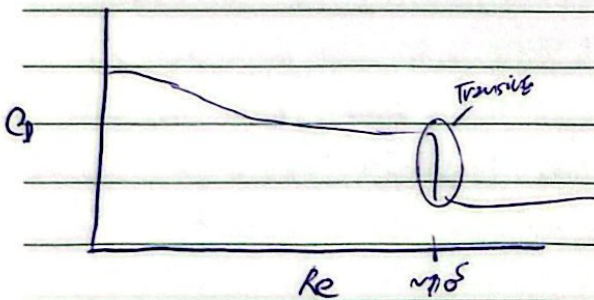
Em escoamentos reais, observa-se que devido ao cisalhamento ao longo da superfície do corpo haverá desprendimento de vórtices, como ilustrado ao lado. Este efeito resulta em uma esteira / zona de recirculação de baixa pressão.



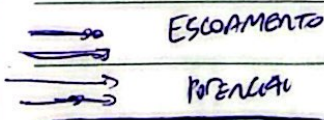
Alguns elementos previstos pela teoria do Potencial ainda são observados, ~~mas~~ como o ponto de estagnação e a aproximação das linhas de corrente na zona de gradiente reverso, mas agora, devido à diferença de pressão, observa-se uma força de arrasto chamada de pressão viscosa.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 D^2$$

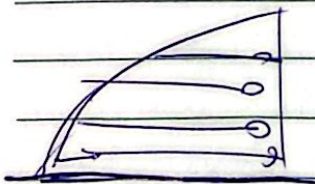
Observa-se que enquanto o escoamento incidente é laminar, a esteira já é turbulenta, e o ponto de separação se move <sup>montante</sup> à jusante com o aumento de Reynolds ( $Re = \frac{UD}{\nu}$ ), até que se observe transição de escoamento incidente, já para regime turbulento, e assim o ponto de separação volta à jusante abruptamente reduzindo o  $C_D$ .



Em placas planas, a teoria do Potencial prevê que o escoamento permanece inalterado se incidir paralelo à face (perpendicular à normal), resultando em ~~nenhuma~~ nenhuma força sobre a placa.



Escoamentos reais, contudo, devido ao cisalhamento na forma de difusão ( $\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$ ) e à condição de não escorregamento na parede ( $u|_0 = 0$ ) apresentam sua camada limite.





A forma do camada limite depende de regime do escoamento, sendo quadrática quando laminar e logarítmico quando turbulento

Em um corpo arbitrário, a força de arrasto será:  $F_D = F_{Dv} + F_{De}$

A força de arrasto viscoso é  $F_{Dv} = \iint_{S'} \tau_{\text{max}} dS = \iint_S \mu \frac{u}{\delta} dS$

Tipicamente, tem-se:  $F_D = F_{Dv} + F_{De}(Re)$ , apenas a segunda sendo afetada por Reynolds e a primeira apenas à forma.

$\Rightarrow F_D = (1+k) F_{De}(Re)$ , onde  $k$  = fator de forma.