

# DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE ANÁLISE CFD PARA A INVESTIGAÇÃO DO FENÔMENO DE DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES EM AEROGERADORES SEM PÁS.

Murilo Silva Rodrigues, murilo.rodrigues@itec.ufpa.br  
Alexandre Luiz Amarante Mesquita, alexmesq@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa, Guamá, Belém - PA, 66075-110

**Resumo.** O atual cenário mundial indica que, no futuro, as energias renováveis devem substituir por completo os combustíveis fósseis e essa tendência tem acelerado o desenvolvimento de novos sistemas de geração de energia limpa, como os aerogeradores sem pás excitados pelo fenômeno de vibração induzida por vórtices. No desenvolvimento desses novos dispositivos, é de primordial importância ter uma metodologia de cálculo numérico para investigar o fenômeno aeroelástico que excita o sistema de modo a orientar o projeto e auxiliar no teste de diferentes configurações e estudo das condições de operação. O presente estudo é o primeiro passo para investigar a dinâmica do movimento do aerogerador, em que uma metodologia para cálculo do escoamento em torno de cilindros circulares é desenvolvida para reproduzir o fenômeno de desprendimento de vórtices através do software Ansys Fluent. Uma vez que os modelos numéricos são aproximações de problemas reais, o objetivo principal deste trabalho é avaliar se os modelos numéricos escolhidos para resolver este problema são adequados e se a metodologia testada é capaz de reproduzir o fenômeno e poder ser estendida no futuro a problemas de interação fluido estrutura em vibrações induzidas por vórtices. Os resultados indicam que o modelo numérico desenvolvido pode ser aplicado de forma prática no estudo de aerogeradores sem pás.

**Palavras chave:** Energia Renovável. Aerogerador sem Pás. Vibração Induzida por Vórtices. Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD).

**Abstract.** The current world scenario indicates that, in the future, renewable energies should completely replace fossil fuels and this trend has accelerated the development of new clean energy generation systems, such as bladeless wind turbines excited by the phenomenon of vortex induced vibrations. In the development of these new devices, it is of paramount importance to have a numerical calculation methodology to investigate the aeroelastic phenomenon that excites the system in order to guide the project and help in testing different configurations and studying the operating conditions. The present study is the first step to investigate the dynamics of the bladeless wind turbine movement, in which a methodology for calculating the flow around circular cylinders is developed to reproduce the vortex shedding phenomenon through the Ansys Fluent software. Since the numerical models are approximations of real problems, the main objective of this work is to evaluate if the numerical models chosen to solve this problem are adequate and if the tested methodology is capable of reproducing the phenomenon and can be extended in the future to problems of fluid structure interaction in vortex-induced vibrations. The results indicate that the developed numerical model can be practically applied in the study of bladeless wind turbines.

**Keywords:** Renewable Energy., Bladeless Wind Turbine, Vortex induced Vibration, Computational Fluid Dynamics (CFD)

## 1. INTRODUÇÃO

Uma alternativa promissora, capaz de erradicar os problemas existentes nas turbinas eólicas convencionais, são os aerogeradores sem pás excitados pela vibração induzida por vórtices (VIV) que têm baixos requisitos de velocidade do vento ao mesmo tempo que possuem uma estrutura simples, o que reduz os custos de manutenção. Portanto, tais sistemas são mais adequados para projetos de menor escala e podem ser distribuídos discretamente pelas cidades em áreas residenciais ou comerciais, organizando uma rede alternativa de geração de energia. O fenômeno de VIV é um problema comum na engenharia e surge devido às interações entre fluido e estrutura, podendo ser destrutivo para casos como pontes ou estruturas *off-shore*, mas oferecem uma oportunidade para técnicas inovadoras de geração de energia através do controle do fenômeno seguindo a simples ideia de fortalece-lo ao invés de suprimi-lo.

Um dos conceitos mais comuns dessa tecnologia para captação de energia através da VIV é o desenvolvido pela empresa espanhola *Vortex Bladeless*, composto por um cilindro, denominado mastro, fixado verticalmente a uma haste flexível. À medida que o vento atinge o mastro, ele começa a oscilar devido a formação e desprendimento de vórtices e, em seguida, as vibrações são convertidas em energia elétrica através de um mecanismo de conversão na parte inferior

do dispositivo. Devido seu design inovador, não possui partes móveis em contato reduzindo custos de manutenção e operação, além de ser projetado para alcançar máximo desempenho em velocidade médias de ventos observadas e adaptar-se rapidamente às mudanças de direção. Este projeto representa um novo paradigma em energia eólica e visa eliminar ou reduzir muitos dos problemas existentes em geradores convencionais.

Esses vórtices são lançados para a esteira periodicamente com uma frequência que está relacionada à velocidade do fluxo não perturbado e ao tamanho da seção transversal do corpo através do número de Strouhal ( $St = fD/U$ ). Quando a frequência de desprendimento de vórtices está próxima da frequência natural da estrutura, a estrutura oscilará em ressonância. Ao mesmo tempo, o fenômeno de “*lock-in*” ocorre implicando que, dentro de um certo intervalo de velocidade, a frequência de desprendimento de vórtices não mudará mais com o aumento da velocidade e o dispositivo continuará a vibrar em ressonância, prolongando a capacidade de uma acentuada eficiência de captura de energia.

Este estudo é o primeiro passo para investigar a dinâmica do movimento do aerogerador durante o *lock-in*, em que uma metodologia para cálculo do escoamento em torno de cilindros circulares é desenvolvida com o objetivo de reproduzir o fenômeno de desprendimento de vórtices através do software *ANSYS Fluent*. Identificadas as forças aerodinâmicas que excitam o sistema, distintas abordagens poderão ser seguidas no futuro. Uma delas é baseada no acoplamento das físicas hidrodinâmica e estrutural através do esquema de solução *2-way FSI*, uma metodologia avançada de análise da interação fluido estrutura. Outra abordagem é a aplicação do carregamento estrutural causado pelo desprendimento de vórtices em modelos matemáticos de osciladores que se aproveitam do comportamento harmônico das VIV para reproduzir as características de sua fenomenologia. Portanto, é de suma importância validar o procedimento de cálculo fluidodinâmico para tais aplicações antes de realizar estudos numéricos em configurações reais. A validação é obtida comparando os resultados numéricos de nossas simulações com outros estudos e discutindo as características do fenômeno simulado.

A seguir são resumidos os resultados das simulações numéricas de escoamento em torno de um cilindro fixo. As simulações são realizadas para números de Reynolds de 3.900 e  $10^4$ , que estão no regime subcrítico. Diferentes malhas são usadas para avaliar a convergência e encontrar a malha apropriada. Os seguintes aspectos são investigados: seleção dos esquemas numéricos e modelos de turbulência apropriados para futuras pesquisas de vibração induzida por vórtices; comparação do número de Strouhal e coeficientes de arrasto, sustentação e pressão com medições experimentais e outros resultados numéricos.

## 2. Método Numérico

Para se obter resultados semelhantes aos experimentais, precisos e numericamente estáveis, deve-se atentar para a correta determinação de uma série de parâmetros que influenciam na simulação. A seguir será apresentado o procedimento típico de uma modelagem fluidodinâmica computacional incluindo a escolha da metodologia utilizada para construção dos modelos, a construção e o estudo das malhas utilizadas, os métodos de solução e os resultados obtidos. O método numérico é baseado na resolução de equações RANS e emprega vários modelos de turbulência para avaliar sua adequação. O fluido é considerado incompressível e as equações RANS podem ser escritas da seguinte forma:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) \quad (2)$$

sendo  $p$ ,  $\vec{v}$ ,  $\tau$  e  $\rho$  a pressão, o vetor velocidade, o tensor de tensões e a densidade, respectivamente.

### 2.1 Domínio computacional e malha

#### 2.1.1 Sistema de coordenadas

No presente estudo foi usado um sistema de coordenadas com origem no ponto central do cilindro e coordenadas  $x$  crescendo a jusante do cilindro,  $y$  normal ao escoamento e  $z$  ao longo do eixo do cilindro.

#### 2.1.2 Domínio bidimensional

O domínio computacional, que define o ambiente abstrato onde a solução é calculada, se estende de  $-10D < x < 20D$  e  $-10D < y < 10D$ . Isso garante uma razão de bloqueio de 5% para minimizar o efeito das condições de contorno no fluxo como sugerido por Zdravkovich (1990). Além disso, o domínio foi construído de forma a auxiliar na geração e otimização da malha a ser posteriormente criada. Seguindo a metodologia de criação de blocos, o domínio foi subdividido em várias regiões menores e as arestas destes blocos foram manipuladas de forma a permitir um controle sobre o número, tamanho e forma dos elementos do bloco, conforme apresentado a seguir

### 2.1.3 Malha

Com a metodologia citada uma região circular, denominada “*O-Grid*”, foi criada para garantir um maior refinamento ao redor do cilindro e capturar os efeitos da camada limite. Essa região se estende na faixa de  $3D$  e permite controlar o tamanho do primeiro elemento da malha, mais próximo à parede do cilindro, a taxa de crescimento deles e o número de células ao redor do cilindro. Outra região de interesse criada é a região da esteira de vórtices que possui uma área de  $10D \times 10D$  e elementos triangulares limitados a ter um tamanho de  $D/20$ . Todo o restante do domínio é formado por elementos quadriláteros de  $D/10$ . Um detalhamento das características das seções da malha é exibido na Fig. 1.

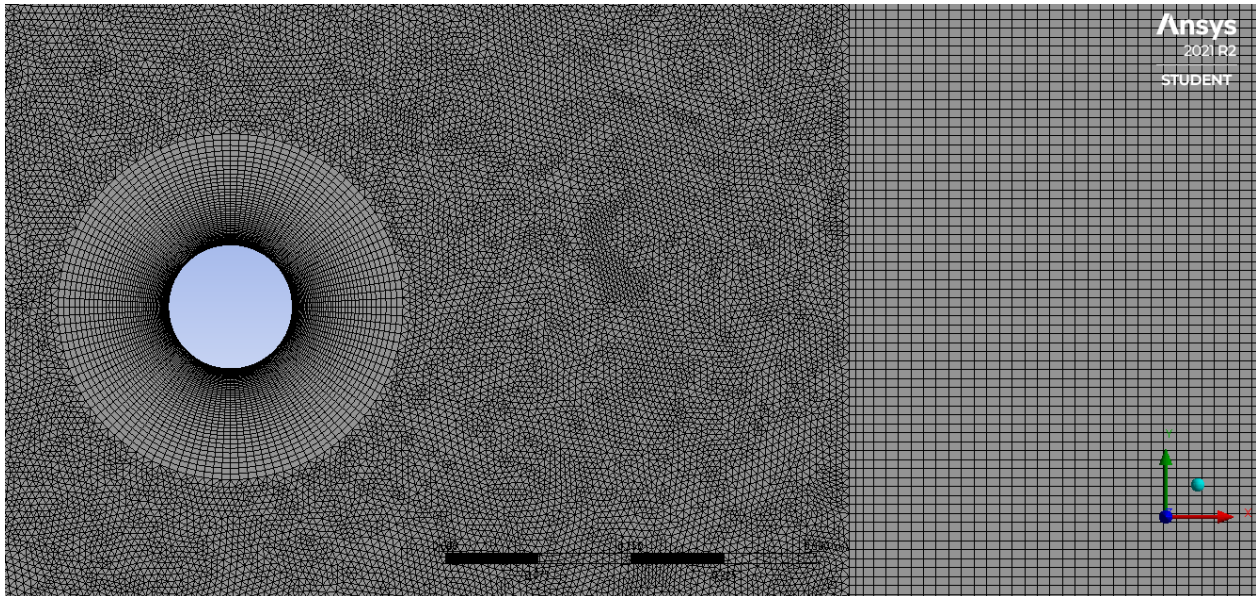


Figura 1: Detalhes das seções da malha

### 2.1.4 Passo de tempo

Visando a garantia de que o passo de tempo seja pequeno o suficiente para descrever a evolução do fenômeno estudado, este foi determinado a partir da análise das características do desprendimento de vórtices. Sabe-se que a frequência de emissão de vórtices em um cilindro imerso é definida pelo número de Strouhal e que este é aproximadamente igual a 0,2 para uma grande faixa de Reynolds, segundo Norberg (2003). Logo, é possível calcular, para uma dada velocidade e diâmetro, o período de emissão de vórtices.

Em seus estudos, Girardi (2012) destaca que para uma boa captura e detalhamento do desprendimento de vórtices no domínio do tempo, são utilizados usualmente 400 passos de tempo para cada ciclo de emissão, logo, adotou-se  $\Delta t = 0,03199$  para  $Re = 3.900$  e  $\Delta t = 0,01247$  para  $Re = 10^4$ . Seguindo Stringer *et al.* (2014), todas as simulações foram resolvidas para 150 unidades de tempo adimensional ( $t^* = tU/D = 150$ ) ou cerca de 30 ciclos de desprendimento de vórtices.

### 2.1.5 Condições de contorno

O domínio é delimitado por 5 condições de contorno que compreendem o contorno de entrada, de saída, superior, inferior e a parede do cilindro. Na entrada, um fluxo uniforme na direção  $x$  é especificado e sua magnitude é dada pelo número de Reynolds objetivo. Na saída, pressão de saída nula. Nos limites superior e inferior são atribuídas condições de simetria. Por fim, na parede do cilindro, a condição de não deslizamento é especificada.

### 2.1.6 Valores de referência

Os coeficientes de pressão e força podem ser calculados como:

$$C_p = \frac{p}{\frac{1}{2}\rho U^2}; C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho U^2 LD}; C_L = \frac{F_y}{\frac{1}{2}\rho U^2 LD} \quad (3)$$

sendo  $p$ ,  $F_x$  e  $F_y$  a pressão e as componentes da força agindo na superfície do cilindro, respectivamente.

Como investigado por Norberg (2003), a razão de aspecto ( $L/D$ ) afeta fortemente a previsão das flutuações da força de sustentação. Em números de Reynolds elevados, uma diminuição na proporção para abaixo de  $L/D = 10$  causa um

aumento no valor quadrático médio. Nguyen and Nguyen (2016) verifica este comportamento numericamente e determina que a envergadura do cilindro deve estar na faixa de  $9D$  a  $12D$  para capturar tais efeitos. Como tal, a relação  $L/D = 10$  foi utilizada em todas as simulações apresentadas.

## 2.2 Método de cálculo

### 2.2.1 Discretização espacial

O objetivo da discretização é substituir as equações diferenciais por um sistema de equações algébricas, que forneça o valor das quantidades de interesse em pontos discretos dentro do domínio. Existem três técnicas principais de método de discretização, o método de diferenças finitas (FDM), o método dos elementos finitos (FEM) e o método dos volumes finitos (FVM), o software *ANSYS Fluent* usa o último desses.

No FVM, o domínio é subdividido em um número finito de volumes de controle e no centroide de cada um deles está o nó no qual cada variável é calculada. Para expressar o valor das variáveis nas faces do volume existem diversos métodos de interpolação dos valores dos nós, podendo ser lineares, quadráticos e possuírem ou não relação com a direção do escoamento. Diante da complexidade dos escoamentos ao redor de corpos rombudos, principalmente na região da esteira, faz-se necessário utilizar o esquema Upwind de segunda ordem.

### 2.2.2 Discretização temporal

O fenômeno estudado é essencialmente transiente e para calcular a evolução das grandezas de interesse ao longo do tempo faz-se necessário o uso de algoritmos que resolvem o escoamento para pequenos intervalos de tempo que se sucedem até finalizar o tempo de simulação definido. Nos problemas com turbulência e grandes gradientes de propriedades no domínio do tempo emerge a necessidade de esquemas mais robustos, por isso, neste trabalho, o Método Implícito de Segunda Ordem é selecionado.

A formulação implícita é resolvida iterativamente para cada passo de tempo em que a solução é discretizada, o que torna o avanço de tempo muito lento. Este problema é resolvido adotando o esquema numérico não iterativo (NITA – *Non-Iterative Time Advancement*) que, de acordo com o Manual Teórico do *ANSYS Fluent*, é um método que realiza apenas uma iteração completa a cada passo de tempo com iterações internas para solucionar separadamente as equações de movimento, turbulência e transporte acelerando significativamente o tempo para solução de simulações transientes.

### 2.2.3 Acoplamento pressão velocidade

Existem duas abordagens para o acoplamento pressão velocidade, os métodos acoplados e os segregados. Em problemas isotérmicos e incompressíveis, como o proposto nesse estudo já que apenas os campos de pressão e velocidade são desejados como resposta, não são necessários métodos robustos como os métodos acoplados e, por isso, o método segregado é adotado. Ademais, quando a técnica de avanço de tempo é não iterativa o esquema *Fractional step* usualmente é o escolhido por desacoplar as equações de momento da equação de continuidade usando a técnica matemática de divisão de operador que permite controlar a ordem do erro associado.

### 2.2.4 Parâmetros de turbulência

Um dos principais problemas nas análises numéricas a partir de modelos de turbulência é a correta determinação dos parâmetros de turbulência. Para escoamentos ao redor de cilindros, e em particular para escoamentos externos, é muito importante escolher os parâmetros iniciais apropriados a fim de estabelecer as condições de entrada de velocidade. Se esses valores forem escolhidos de maneira incorreta podem gerar resultados irrealistas e divergentes.

Com modelos RANS, é muito difícil estimar diretamente os parâmetros de turbulência,  $k$ ,  $\varepsilon$  e  $\omega$ , que não aparecem na literatura disponível. Portanto, esses parâmetros são calculados a partir da atribuição de valores para a intensidade turbulenta ( $I$ ), escala de comprimento de turbulência ( $l$ ) e para a razão de viscosidade turbulenta ( $\beta$ ). Esses três parâmetros são definidos, respectivamente, como, a razão entre o r.m.s das flutuações de velocidade e a velocidade média do escoamento, a quantidade física que representa o comprimento das grandes escalas de turbulência e a razão entre a viscosidade turbulenta e laminar.

Boas estimativas para  $I$  e  $l$  podem ser obtidas a partir de dados experimentais seguindo as Eq. (5).  $\beta$  é obtido a partir de recomendações encontradas em Nguyen (2015).

$$I = 0,16Re^{-1/8}; l = \frac{0,07D}{c_\mu^{3/4}} \quad (4)$$

Estimados esses parâmetros iniciais, a energia cinética turbulenta ( $k$ ), a taxa de dissipação turbulenta ( $\varepsilon$ ) e a taxa de dissipação específica ( $\omega$ ) dos modelos  $k - \varepsilon$  e  $k - \omega$  são obtidas por

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2; \varepsilon = c_\mu \frac{k^2}{\beta v}; \omega = \frac{k}{\beta v} \quad (5)$$

Onde  $c_\mu$  é um parâmetro adimensional cujo valor geralmente é dado como 0,09 e  $v$  é a viscosidade cinemática.

### 3. Resultados e discussões

#### 3.1 Análise de convergência da malha

Para garantir que os resultados não são afetados pela resolução da malha e reduzir ou eliminar quaisquer imprecisões e erros nos resultados que podem ter sido causados por sua qualidade, uma análise de convergência é realizada. Modelos com diferentes resoluções de aproximadamente  $1,4 \cdot 10^5$  a  $1,75 \cdot 10^5$  elementos são examinados para dois números de Reynolds, 3.900 e  $10^4$ , usando o modelo de turbulência *Realizable k - ε* com valores padrão. A escolha destes números de Reynolds em particular se deve a disponibilidade de dados experimentais para validação e, pelo mesmo motivo, o fluido é a água. A quantidade de elementos varia apenas na região “*O-Grid*” para aliviar o número de elementos nas outras regiões.

Sabe-se que a modelagem na proximidade de paredes impacta significativamente a fidelidade das soluções numéricas, uma vez que as paredes são a principal fonte de vorticidade e turbulência. Assim, para gerar uma malha que seja capaz de capturar os efeitos da camada limite de forma razoável essa região é discretizada com elementos quadriláteros cujo tamanho é calculado com base no crescimento constante do primeiro elemento, mais próximo à parede. Um fator de crescimento de 1,05 foi aplicado por ser uma tendência na literatura.

A convergência é verificada por mudanças no coeficiente de arrasto e no  $y^+$ , parâmetro que representa uma distância adimensional do primeiro nó de uma parede com condição de não deslizamento. Observa-se na Fig. 2 que a malha com  $1,55 \cdot 10^5$  elementos, para ambos os números de Reynolds analisados, é capaz de atingir um valor aceitável de  $C_D$  e refinamento adicional têm impacto insignificante nos resultados. Portanto, esta malha é utilizada para todas as simulações no estudo atual. Foram alcançados valores de  $y^+ \approx 1$  e  $y^+ \approx 2$  para  $RE = 3900$  e  $RE = 10^4$ , respectivamente.

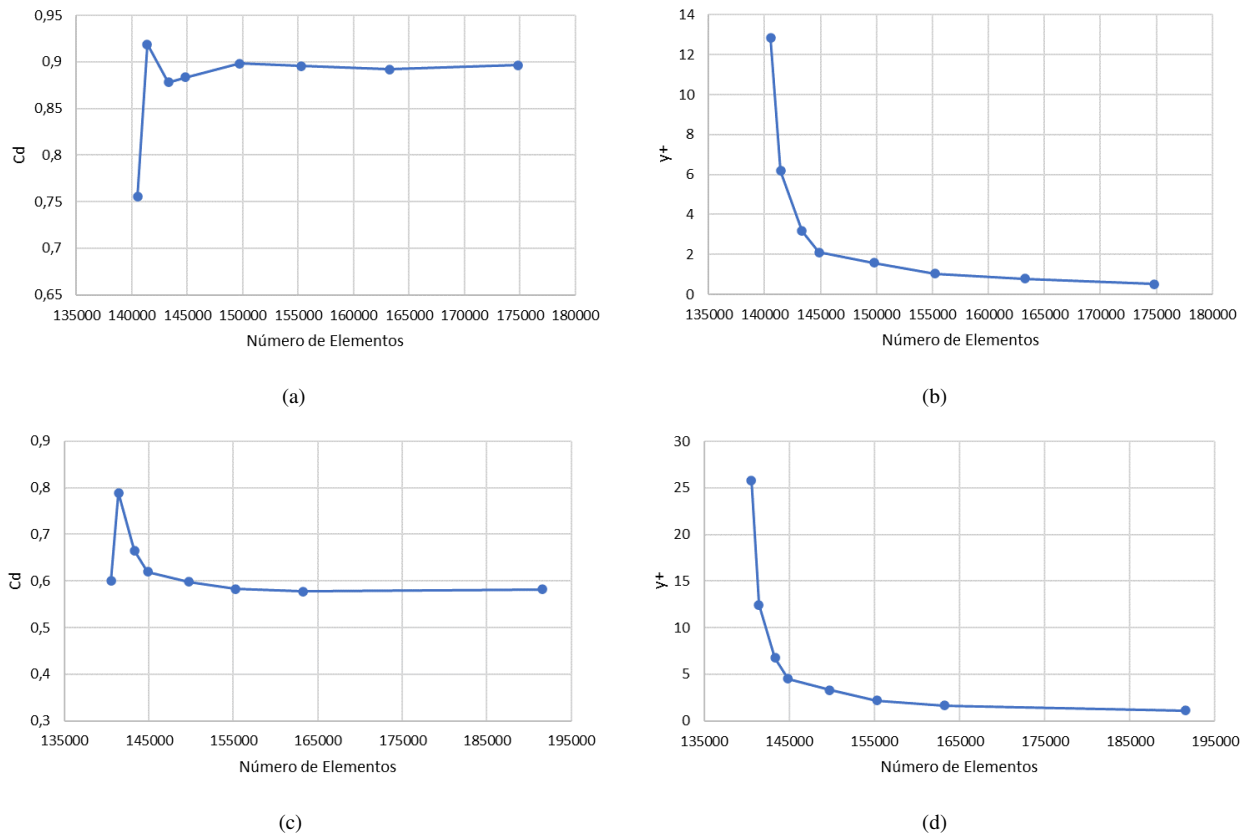


Figura 2: Análise de convergência. a) e b) para  $RE = 3.900$  e c) e d) para  $RE = 10.000$

Destaca-se que a abordagem de modelagem na proximidade de paredes é o padrão adotado pelo *ANSYS Fluent* nos modelos de turbulência baseados em equações  $\omega$  (*Standard k - ω* e *SST k - ω*). Para os baseados em equações  $\varepsilon$

(*Standard  $k - \varepsilon$*  e *Realizable  $k - \varepsilon$* ), por padrão, funções de parede são usadas, a camada limite não é resolvida e o refinamento dessa região deve ser evitado ( $y^+ > 30$ ). Deste modo, para permitir um refinamento consistente da malha sem deterioração dos resultados durante a convergência a opção *Enhanced Wall Treatment* é utilizada.

### 3.2 Arrasto e Sustentação

Um grupo de diferentes modelos de turbulência são usados para simular o fluxo em torno de um cilindro circular fixo com número de Reynolds de 3.900 e 10.000. Os coeficientes de arrasto e sustentação calculados e resumidos na Tabela 1 são comparados com os dados numéricos e experimentais de estudos anteriores com intuito de identificar qual dos modelos é capaz de reproduzir esses dados.

Verificou-se que os modelos de turbulência *Standard  $k - \varepsilon$*  e *Realizable  $k - \varepsilon$*  são os melhores do grupo testado para prever o arrasto em  $RE = 3900$ , ambos com cerca de 15% de desvio da média dos dados experimentais. Por outro lado os modelos *Standard  $k - \omega$*  e *SST  $k - \omega$*  deram resultados superestimados. Tendências semelhantes foram encontradas para  $RE = 10^4$ . Além disso, uma das desvantagens dos modelos  $k - \varepsilon$  é a excessiva produção de  $k$  em regiões de alta taxa de deformação resultando em imprecisões no desempenho do modelo. Para avaliar a formação de níveis de energia cinética turbulenta não físicos, analisou-se também o modelo *Realizable  $k - \varepsilon$*  com a opção *Production Limiter* ativada. Uma melhor concordância com dados experimentais foi encontrada com o limitador ativado para  $RE = 3.900$ , mas não houveram mudanças significativas para  $RE = 10^4$ . Os resultados também deixam claras as limitações dos modelos RANS na previsão do coeficiente de sustentação, em ambos os números de Reynolds analisados, ademais, tal discrepância pode ser explicada por efeitos da tridimensionalidade dos experimentos e pela razão de aspecto conforme discutido na seção 2.1.6 Destaca-se que nos modelos  $k - \varepsilon$  a existência de um atraso no início da separação e do desprendimento de vórtices reduz o rms da sustentação. O uso do limitador e/ou um maior refinamento da malha se mostrou capaz reduzir tal atraso.

Tabela 1: Resumo do  $C_D$  (Médio) e  $C_L$  (rms) do estudo atual em comparação com estudos anteriores.

	$RE = 3900$		$RE = 10^4$	
	$C_D$	$C_L$	$C_D$	$C_L$
<i>Standard <math>k - \varepsilon</math></i>	0,879	0,171	0,564	0,061
<i>Realizable <math>k - \varepsilon</math></i>	0,894	0,21	0,583	0,096
<i>Realizable <math>k - \varepsilon</math> com <i>Production Limiter</i></i>	1,087	0,446	0,635	0,115
<i>Standard <math>k - \omega</math></i>	1,495	1,078	1,612	1,181
<i>SST <math>k - \omega</math></i>	1,447	0,987	1,491	1,067
DNS <sup>1</sup> Dong <i>et al.</i> (2006)			1,143	0,448
DES <sup>2</sup> Nguyen and Nguyen (2016)			1,156	0,298
Exp. Breuer (1998) <sup>3</sup>	1,08			
Exp. Chen (1971) <sup>3</sup>		0,38		0,47
Exp. H. Schlichting (1979) <sup>3</sup>	0,995		1,1	
Exp. Gopalkrishnan (1993) <sup>4</sup>			1,186	0,384

<sup>1</sup> DNS - Direct Numerical Simulation

<sup>2</sup> DES - Detached Eddy Simulation

<sup>3</sup> Retirado de Nguyen and Temarel (2014)

<sup>4</sup> Retirado de Dong *et al.* (2006)

### 3.3 Número de Strouhal

O número de Strouhal é um importante indicador da precisão da simulação transiente e é obtido a partir da análise espectral das flutuações do coeficiente de sustentação. Como pode ser visto na Fig. 3 a força de sustentação, para todos os modelos de turbulência analisados, oscila em torno frequência observada por Norberg (2003) indicando boa captura das características transientes do fenômeno estudado. Tendências semelhantes foram encontradas para ambos os números de Reynolds analisados.

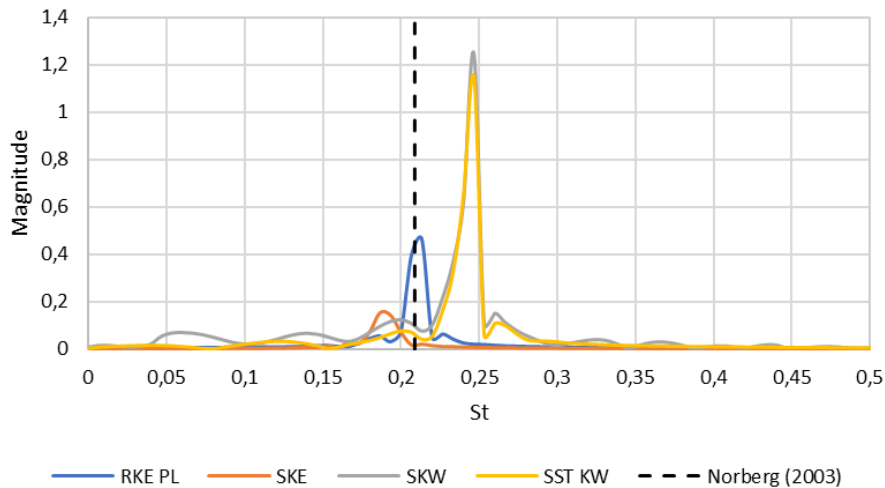


Figura 3: Número de Strouhal para  $RE = 3.900$

### 3.3.1 Coeficiente de pressão

Na Fig. 4 são exibidas as distribuições do coeficiente de pressão ao longo da direção circunferencial da superfície superior do cilindro para os números de Reynolds analisados. A faixa geral do coeficiente de pressão é de 1 em regiões de estagnação, 0 em valores iguais a pressão de fluxo livre e valores  $< 1$  para regiões de baixa pressão. A separação do fluxo ocorre quando a tensão de cisalhamento não pode superar o gradiente de pressão adverso, isso geralmente acontece em  $80^\circ < \theta < 120^\circ$  para escoamentos no regime subcrítico. Após o ponto de separação, a pressão permanece razoavelmente constante na esteira. A precisão na previsão da distribuição de  $C_p$  indicará se o modelo de turbulência tem um bom desempenho na previsão da separação do fluxo.

Podem ser vistos os resultados dos modelos *Realizable*  $k - \varepsilon$  e *SST*  $k - \omega$  compartilharem a mesma tendência de mudança inicial, o que é consistente com os valores experimentais. Apesar disso, maiores discrepâncias entre os resultados numéricos e experimentais ocorrem em regiões de baixa pressão e podem explicar o porquê dos coeficientes de sustentação e arrasto serem significativamente maiores para os modelos de equação  $\omega$ . Em números de Reynolds mais altos fica claro o desempenho ruim dos modelos  $k - \varepsilon$  em escoamentos com elevados gradientes de pressão e separação, demonstrando que o derramamento de vórtices não pode ser capturado de forma realista com esses modelos.

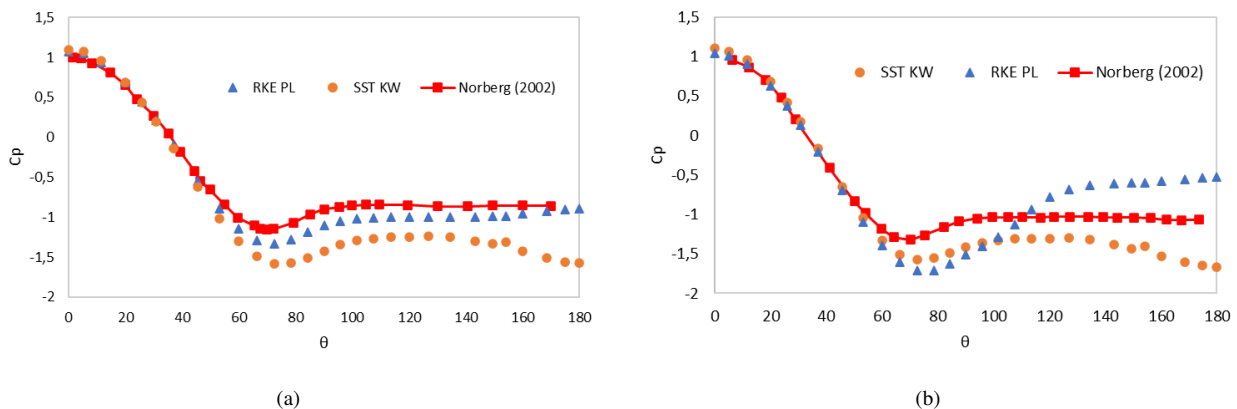


Figura 4: a) Distribuição do coeficiente de pressão ao redor da superfície do cilindro para a)  $RE = 3.900$  e b)  $RE = 10^4$

## 4. Conclusão

Estudos sobre o escoamento em torno de cilindros circulares fixos foram realizados para os números de Reynolds subcríticos de 3.900 e  $10^4$ . Diferentes modelos de turbulência foram testados e seus prós e contras foram identificados e analisados sobre o ponto de vista das principais características do fenômeno estudado. As comparações entre as previsões atuais e os resultados experimentais mostram que os modelos RANS 2D analisados podem prever razoavelmente bem parâmetros como os coeficientes de arrasto, sustentação e pressão e o número de Strouhal, mas todos apresentam alguns pontos fracos.

O modelo  $SST k - \omega$  apresentou o maior potencial, dentre os analisados, para aplicação em futuros estudos de vibração induzida por vórtices por ser mais preciso e confiável para uma classe mais ampla de fluxos. É projetado para evitar a sensibilidade às condições de entrada encontrada no modelo *Standard k -  $\omega$* , combinando elementos de ambos os modelos  $k - \omega$  e  $k - \epsilon$ , além de ser mais adequado para problemas que envolvem grandes gradientes de pressão e separação. De modo geral, a combinação dos esquemas numéricos selecionados é capaz de garantir acuracidade, redução significativa do tempo para solução e adequação às principais características do fenômeno.

## 5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Programa Nacional de Cooperação Acadêmica na Amazônia (PRO-CAD/Amazônia) da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES/Brasil) e da Pró-Reitoria de Pesquisa da Universidade Federal do Pará (PROPESP/UFPA).

## 6. REFERÊNCIAS

- Dong, S., Karniadakis, G., Ekmekci, A. and Rockwell, D., 2006. "A combined direct numerical simulation-particle image velocimetry study of the turbulent near wake". *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 569, pp. 185–207.
- Girardi, V., 2012. "Vortex-induced vibration simulation in a free oscillating cylinder". *Boletim Tecnico da PETROBRAS*, Vol. 55.
- Nguyen, L., 2015. *Vortex- and wake- induced vibrations in an array of cylinders*. Ph.D. thesis.
- Nguyen, L. and Temarel, P., 2014. "Numerical simulation of an oscillating cylinder in cross-flow at a reynolds number of 10,000: Forced and free oscillations". *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, Vol. 2.
- Nguyen, V.T. and Nguyen, H.H., 2016. "Detached eddy simulations of flow induced vibrations of circular cylinders at high reynolds numbers". *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 63, pp. 103–119.
- Norberg, C., 2003. "Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements". *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 17, No. 1, pp. 57–96.
- Stringer, R., Zang, J. and Hillis, A., 2014. "Unsteady rans computations of flow around a circular cylinder for a wide range of reynolds numbers". *Ocean Engineering*, Vol. 87, pp. 1–9.
- Zdravkovich, M., 1990. "Conceptual overview of laminar and turbulent flows past smooth and rough circular cylinders". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 33, No. 1, pp. 53–62.

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.