

Estudo Comparativo Entre os Modelos de Turbulência $\kappa - \epsilon$ Padrão e $\kappa - \omega$ SST na Simulação Numérica da Ação do Vento Sobre Uma Seção de Ponte Suspensa Utilizando a Ferramenta OpenFOAM

Comparative Study Between Standard $\kappa - \epsilon$ and $\kappa - \omega$ SST Turbulence Models in Numerical Simulation of Wind Action on a Suspended Bridge Section Using the OpenFOAM software

PEDRO MAIA DA SILVA¹, FERNANDO AKIRA KUROKAWA³

¹Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Resumo

Estudo comparativo das diferenças de dois modelos de turbulência na ação do vento em pontes suspensas, principalmente naquilo que tange o desprendimento de vórtices alternados após o tabuleiro, o que impacta diretamente não só a estrutura da ponte em si, mas também das construções nas áreas em volta. Também buscou-se aprender mais e possibilitar a distribuição do conhecimento sobre o software OpenFOAM, o qual já é muito utilizado com fins industriais, para outros alunos e profissionais da área futuramente.

Palavras-chave: iniciação científica, modelos, turbulência, OpenFOAM.

SUMÁRIO

I	Introdução	5
II	Objetivos	8
III	Metodologia	8
I	Equações Governantes	8
II	Modelo K- Standard de turbulência	9
III	Modelo K- SST de Turbulência	10
IV	Interação fluido-estrutura	11
IV	Estudo de Caso	13
I	Escoamento em volta do perfil quadrado	13
I.1	Resultados perfil quadrado	14
II	Escoamento em volta do perfil circular	16
II.1	Resultados perfil circular	17
III	Simulações 3D	19
III.1	Resultados Simulações 3D	20
IV	Escoamento em Volta do Tabuleiro	22
IV.1	Resultados Simulações Tabuleiro da Ponte	23
V	Análise dos Resultados e Conclusão	25
VI	Bibliografia	27
A	Apendice I: Tutorial/Boas Práticas OpenFOAM	28

LISTA DE FIGURAS

1	Ponte Tacoma Narrows Durante Seu Colapso	7
2	Logo OpenFOAM	8
3	$k-\omega$ X $k-\epsilon$	10
4	Desprendimento de Vórtices	12
5	Malha Seção Quadrada	13
6	Número de Strouhal e Coeficiente de Sustentação ($K - \epsilon$)	14
7	Coeficiente de Arrasto ($K - \omega$)	15
8	Número de Strouhal e Coeficiente de Sustentação ($K - \omega$)	15
9	Coeficiente de Arrasto ($K - \omega$)	15
10	Fenômeno de desprendimento de vórtices $K - \epsilon$	16
11	Malha Seção Circular	16
12	Número de Strouhal e Coeficiente de Sustentação ($K - \epsilon$)	17
13	Coeficiente de Arrasto ($K - \omega$)	18
14	Número de Strouhal e Coeficiente de Sustentação ($K - \omega$)	18
15	Coeficiente de Arrasto ($K - \omega$)	18
16	Fenômeno de desprendimento de vórtices $K - \epsilon$	19
17	Malha Seção Circular 3D	20
18	Número de Strouhal e Coeficiente de Sustentação (LES Smagorinsky)	20
19	Coeficiente de Arrasto (LES Smagorinsky)	21
20	Número de Strouhal e Coeficiente de Sustentação ($K - \epsilon$)	21
21	Coeficiente de Arrasto ($K - \epsilon$)	21
22	Campo de Velocidades $K-\epsilon$ e LES	22
23	Ponte Grande Belt	22
24	Malha Tabuleiro Ponte	23
25	Número de Strouhal e Coeficiente de Sustentação ($K - \epsilon$)	24
26	Coeficiente de Arrasto ($K - \epsilon$)	24
27	Número de Strouhal e Coeficiente de Sustentação ($K - \omega$)	24
28	Coeficiente de Arrasto ($K - \omega$)	25
29	Campo de Velocidades ($K - \epsilon$)	25
30	Tutorial OpenFOAM	28

LISTA DE TABELAS

1	Valores das constantes modelo K_{ϵ}	9
2	Valores das constantes modelo K_{ϵ}	11
3	Dados Utilizados Seção Quadrada	14
4	Resultados Seção Quadrada	14
5	Dados Utilizados Seção Circular	17
6	Resultados Seção Circular	17
7	Resultados Seção Circular	20
8	Dados Utilizados Seção Circular	23
9	Resultados Ponte Great Belt	23

I. INTRODUÇÃO

De acordo com (??), o vento é o movimento do ar em relação à superfície terrestre, causado pela variação do aquecimento solar na atmosfera quando flui no entorno de um determinado corpo ou estrutura. Este corpo é submetido a um complexo sistema de forças aerodinâmicas que em geral podem ser determinadas utilizando-se análises teóricas, técnicas numéricas ou métodos experimentais.

O estudo das características de um escoamento do vento entorno de um corpo é de grande relevância e interesse da engenharia estrutural. O passo inicial dessa análise é a aquisição da velocidade média do vento e as flutuações em torno da velocidade, juntamente com o conhecimento das demais propriedades físicas do vento. Esses parâmetros culminam em parte do estudo das solicitações estáticas do vento em uma estrutura, o que se é fundamental para a concepção do partido estrutural desse tipo de projeto.

Ao lado das solicitações estáticas do vento incidentes em uma estrutura, que dependem da velocidade média do vento, surgem as chamadas ações dinâmicas do vento (Blessmann; 2013). Essas ações são decorrentes da energia cinética presente nas flutuações do vento em torno da velocidade média e da distribuição da energia contida na sequência de rajadas de vento em contato com uma estrutura. Em estruturas com baixas frequências naturais de vibração ($f < 1,0$ Hz) como no caso dos modelos com geometria esbelta e flexível, os efeitos dinâmicos da ação do vento devem ser considerados, identificados e quantificados (Blessmann, 2005), evitando-se assim as consequências indesejáveis de eventuais cargas imprevistas provocadas pelo vento em um sistema estrutural. Simultaneamente à análise dos efeitos dinâmicos do vento em uma estrutura, o estudo da turbulência em um escoamento é extremamente importante para a compreensão dos mecanismos físicos e o equacionamento matemático que controlam esse tipo de fenômeno. O regime turbulento é predominante na maior parte dos escoamentos presentes nas aplicações de engenharia e na natureza, tornando a investigação de escoamentos turbulentos um dos mais desafiadores campos de pesquisa da dinâmica dos fluidos (Fortuna, 2012, Pope, 2000; Wilcox, 1993). A interação entre meios contínuos distintos, como no caso de um fluxo de ar e um sólido, torna-se significativamente importante à medida que o comportamento do corpo é alterado pela presença, movimentação e escoamento do fluido (Sousa Jr., 2006). A análise de uma interação fluido-estrutura (IFE) abrange conceitos de duas importantes disciplinas da engenharia, a dinâmica dos sólidos e a dinâmica dos fluidos, ao passo que a interação é determinada pelos carregamentos que o escoamento do fluido estabelece na estrutura e também através das alterações surgidas no escoamento acarretadas pela configuração deformada da estrutura. Para o estudo adequado da IFE percebe-se a importância da identificação correta das características físicas do sólido e do fluido, no que tange às informações sobre a rigidez e amortecimento para o caso da estrutura e os parâmetros físicos e propriedades que descrevem o fluido em movimento. Muitos dos problemas relacionados à interação fluido-estrutura ocorrem em diversos segmentos da engenharia como a aeronáutica, a mecânica e até mesmo na engenharia civil. Neste último se notam inúmeras aplicações práticas como escoamento em canais, vertedouros e barragens, além da ação do vento em estruturas como edifícios e pontes. No caso de corpos alongados posicionados horizontalmente no escoamento,

como vãos de pontes, as forças devidas ao vento são basicamente a força de arrasto, momento e de sustentação. Existem também, as forças provenientes da interação fluido-estrutura que podem gerar oscilações na estrutura. Essas oscilações alteram a rigidez e o amortecimento das estruturas, as quais podem levar ao surgimento do fenômeno de instabilidade, tendo como consequência a ruptura do tabuleiro dessa estrutura. Problemas de instabilidade são muito frequentes em estruturas flexíveis, como é o caso das pontes estaiadas e suspensas (Limas, 2007). Quando há um fenômeno resultante apenas da ação do escoamento sobre a estrutura, ou seja, quando uma esteira de vórtices é desprendida de um corpo fixo incidente sobre ela, tem-se uma instabilidade denominada aerodinâmica (Righi, 2003). Mas, se um corpo imerso em um escoamento sofre deslocamentos em função das forças de interação na qual dão origem a deflexões sucessivas de características oscilatórias ou divergentes, identifica-se como uma instabilidade aeroelástica (Simiu e Scanlan, 1996). Ao engenheiro projetista de pontes, passa a ser crucial o conhecimento de teorias e solução de problemas relacionados à aerodinâmica e aeroelasticidade em construções. A aeroelasticidade, que inicialmente foi desenvolvida para aplicações na engenharia aeronáutica é definida como campo de estudos dos problemas na interação fluido-estrutura, cujo objetivo principal é prever instabilidades. A preocupação da aeroelasticidade é discutir a interação mútua entre o carregamento dinâmico e as deflexões dinâmico-estruturais. De acordo com Fung (1993), as primeiras pesquisas publicadas sobre falhas em estruturas aeronáuticas relacionadas com a aeroelasticidade remetem ao início século passado. O estudo da aeroelasticidade na engenharia civil, especialmente em estruturas de pontes suspensas e estaiadas, recebeu grande estímulo após o famoso acidente ocorrido na ponte suspensa Tacoma Narrows, localizada no estado de Washington, na costa noroeste dos Estados Unidos. Em novembro de 1940 a ponte Tacoma Narrows que fora construída entre os anos de 1938 e 1940 sofreu com severas instabilidades aeroelásticas ocorridas no seu tabuleiro. Assim, verifica-se a necessidade de estudos aprofundados acerca das condições e comportamentos de estruturas de pontes suspensas sob a ação do vento. A realização de ensaios experimentais em túnel de vento consolidou-se nas últimas décadas como uma das mais importantes ferramentas para determinação de ações e efeitos do vento em construções. Porém, na investigação experimental envolvendo túneis de vento, apesar das análises em modelos em escala reduzida ou em escala real apresentarem resultados confiáveis, sua realização é de alto custo e demanda muito tempo (Batchelor, 1967; Armaly, 1983; Fox e McDonald, 1995; Fortuna, 2012). Ao lado das análises experimentais, a utilização de técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos para a predição quantitativa das características de um escoamento vem crescendo exponencialmente nos últimos anos (Maliska, 2014). Com o advento da tecnologia computacional tornaram-se possíveis a simulação em CFD (Computational Fluid Dynamics) de inúmeros problemas complexos em diversas áreas da engenharia, como por exemplo interação fluido-estrutura (Fortuna, 2012). No entanto, algumas deficiências aparecem quando se pretende trabalhar com esses problemas utilizando a abordagem de CFD. Em geral, os escoamentos são turbulentos com números de Reynolds elevados, o que se faz necessário o uso de um modelo de turbulência. Dessa forma, é muito importante que se utilize um modelo de turbulência adequado, principalmente quando se pretende analisar a resposta dinâmica do tabuleiro onde é fundamental averiguar o efeito do desprendimento de vórtices.

Uma ponte é uma construção que permite interligar ao mesmo nível pontos não acessíveis separados por rios, vales e outros obstáculos naturais ou artificiais e desempenham um papel importante no desenvolvimento da sociedade há centenas de anos. Uma vez que milhares de vidas dependem do funcionamento correto de uma ponte, é de suma importância que o cálculo da estrutura de uma ponte leve em consideração até os mínimos detalhes que impactam os esforços aos quais essa pode ser submetida durante seus anos de operação. As ações do vento em um tabuleiro de ponte foram, por muito tempo, subestimadas, o que levou a acidentes como a famosa queda da Ponte de Tacoma Narrows em 7 de Novembro de 1940, poucos meses após sua inauguração, devido a ventos de velocidades altíssimas, aproximadamente 65 km/h, que não foram considerados na elaboração do projeto.



Figura 1: *Ponte Tacoma Narrows Durante Seu Colapso*

As pontes suspensas, por possuírem um grande vão livre, devem considerar em seus projetos as forças geradas pelo vento, as quais podem ser calculadas através dos coeficientes de arrasto, de sustentação e o momento aerodinâmico do tabuleiro. Também é importante considerar as interações fluido-estrutura, muitas vezes responsáveis por uma possível instabilidade através dos fenômenos de: drapejamento (ou flutter) e a excitação por desprendimento de vórtices (ou vortex shedding), o que torna necessário a determinação do número de Strouhal. Mais a frente no projeto, a medida que o foco se virar ao tabuleiro de ponte e não apenas na comparação dos dois modelos, será abordado o cálculo de todos esses coeficientes e como eles impactam o tabuleiro de uma ponte suspensa.

Assim, é evidente que o estudo das características do contato entre o vento e a estrutura é importante para que o engenheiro possa desenvolver um projeto estrutural que se adeque as cargas, deformações e deslocamentos causados pela ação do fluxo de ar no qual o tabuleiro da ponte será submetido através de hipóteses e dados baseados no melhor entendimento da interação fluido estrutura.

Além disso, o software escolhido para a elaboração deste trabalho foi o OpenFOAM por ser um software "free source", ou seja, tem seu código fonte liberado pela empresa desenvolvedora para que seus usuários possam fazer alterações de modo a adequar o produto às suas necessidades. Por conta dessa maior flexibilidade, ele é amplamente utilizado na indústria, contudo, ainda é pouco abordado pela universidade. Logo, este

trabalho também visa facilitar o aprendizado deste complexo aplicativo por parte de alunos interessados. Com isso em mente, foi elaborado um tutorial de primeiros passos e boas práticas que permite ao estudante ter um primeiro contato com o software que seja de fato produtivo. Este ainda está em desenvolvimento e continuará a ser atualizado conforme novas descobertas do software forem surgindo.



Figura 2: Logo OpenFOAM

II. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é comparar dois modelos de turbulência baseados no modelo RANS de solução de simulações numéricas (Reynolds Average Navier Stokes), o modelo o K- ϵ Standard e o K- ω SST, utilizando o software OpenFoam, o qual será abordado como ferramenta de aprendizagem de CFD, assim, parte do objetivo deste trabalho é de facilitar o aprendizado deste aplicativo.

III. METODOLOGIA

I. Equações Governantes

As principais equações que modelam os escoamentos incompressíveis, transientes e isotérmicos, que correspondem às condições que serão elaborados os escoamentos durante todo esse projeto, são:

$$\frac{\partial \mu_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mu_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} \right) + f_i \quad (2)$$

Sendo estas, respectivamente, a equação de conservação de massa e a equação de conservação de momento, muito famosas no contexto do estudo da mecânica dos fluidos. Nelas, u_i é a componente da velocidade, t é o tempo, ρ é a massa específica, p é a pressão, μ é a viscosidade dinâmica e f_i representa possíveis forças externas atuantes no volume de fluido analisado.

II. Modelo K- Standard de turbulência

A necessidade da análise de escoamentos turbulentos surgiu pois a maioria dos escoamentos que surgiram durante o desenvolvimento da engenharia possuem características turbulentas: flutuação dos campos de velocidade, a qual pode ser definida com uma condição de fluxo caótica, flutuante e aleatória. Esse caos e aleatoriedade cria a necessidade de modelos de turbulência que, muitas vezes, simplificam o problema e o tornam possível de resolver na quantidade finita de pontos criados, os quais nos referimos como nós na malha. Então, os modelos de turbulência tem como objetivo simplificar as equações que regem o escoamento de modo a solucioná-las através da discretização de problemas que, muitas vezes, são impossíveis de se resolver em toda sua complexidade.

O modelo K- ϵ é amplamente utilizado na dinâmica dos fluidos computacional (CFD) por ser um modelo simples que concede uma visão geral do escoamento através de duas equações de transporte (equações diferenciais parciais). O modelo possui este nome pois utiliza as duas variáveis: K é a energia cinética turbulenta e ϵ é a taxa de dissipação. Assim, as duas equações que regem esse modelo são, respectivamente, a equação de transporte para a energia cinética turbulenta e a equação de dissipação da energia cinética turbulenta:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (ku) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P - \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon u) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

Onde P representa a produção média da energia cinética turbulenta, σ_k e σ_ϵ representam os coeficientes de difusão turbulenta, $C_{1\epsilon}$ e $C_{2\epsilon}$ são constantes determinadas empiricamente, muito comum no estudo da mecânica dos fluidos. Também é utilizada a viscosidade turbulenta, ν_t , a qual é calculada através da seguinte equação:

$$\nu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

Onde C_μ é, mais uma vez, uma constante empírica. O próprio software OpenFoam possui valores pré-definidos para estas constantes, os quais estão contidos na tabela a seguir e podem ser consultados no guia de usuário do software:

Tabela 1: Valores das constantes modelo K_ϵ

Constante	Valor
$C_{1\epsilon}$	1,44
$C_{2\epsilon}$	1,92
C_μ	0,09
σ_k	1,0
σ_ϵ	1,3

III. Modelo K- SST de Turbulência

O modelo K- ω SST (Shear Stress Transport) é uma combinação de dois de seus antecessores, sendo um deles o próprio modelo K- ϵ que será usado na comparação e o modelo K- ω de modo a tentar equilibrar as qualidades e defeitos destes em diferentes pontos da simulação. Primeiro foi formulado o modelo K- ϵ , contudo, foi constatado que sua função de amortecimento próximo a paredes não era confiável para uma série de escoamentos. Então, criou-se o modelo K- ω , o qual também apresentava falhas uma vez que seu resultado é muito sensível ao valor de ω definido no tempo inicial. Ambos os modelos apresentavam falhas no momento de separação do fluido de um corpo, isso porque a tensão de cisalhamento nas paredes (wall shear stress) é muito alta nestes. Através de experimentos, constatou-se que o modelo k- ω apresenta melhor resultado que o modelo k- ϵ em regiões próximas à parede. Entretanto o modelo k- ω requer uma condição de contorno não nula para ω para correntes livres não turbulentas, problema que não encontramos no modelo k- ϵ . Dessa forma, criou-se o modelo k- ω SST, o qual é uma combinação dos modelos já citados com o objetivo de modelar a turbulência de escoamentos com gradientes adversos de pressão e separação da camada limite.

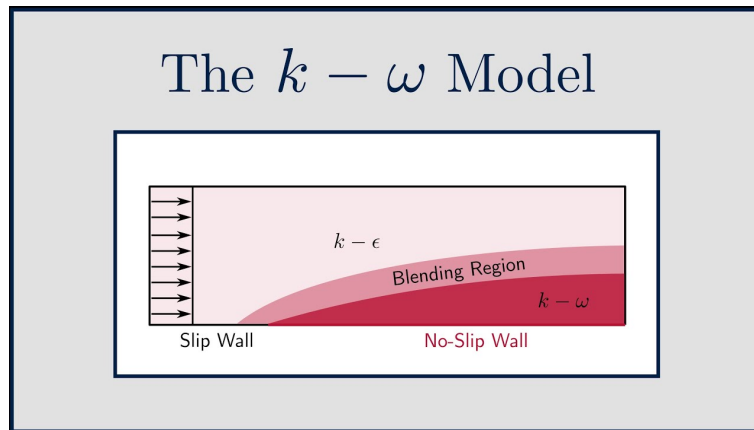


Figura 3: k- ω X k- ϵ

Assim, a equação de transporte da energia cinética turbulenta e a equação da dissipação da energia cinética turbulenta são, respectivamente:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta \omega + \frac{\partial}{\partial t}[(\nu + \sigma_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j}] \quad (6)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_i \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S - \beta \omega + \frac{\partial}{\partial t}[(\nu + \sigma_{\omega 1} \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j}] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (7)$$

Onde:

$$P_k = \min(\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, 10 \beta^* k \omega) \quad (8)$$

São utilizadas as funções de mistura, F_1 e F_2 , as quais podem atingir qualquer valor entre 0 e 1 e são as responsáveis por determinar qual modelo será usado em cada parte da malha, o que caracteriza o modelo K- SST. Estas funções são dadas por:

$$F_1 = \tanh(\min[\max(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega}), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2}]^4)) \quad (9)$$

$$F_2 = \tanh([\max(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega})]^2) \quad (10)$$

E y é a dimensão característica da superfície de não deslizamento.

As equações de mistura são formuladas de modo a permitir uma alteração entre as propriedades dos modelos mais convenientes em cada região da malha construída. Dessa forma, na região externa ao escoamento (corrente livre) o $k-\omega$ SST emprega as características do modelo $k-\epsilon$ e a equação da função de mistura F_1 assume o valor $F_1 = 0$, enquanto na região próxima à parede (subcamada viscosa) utiliza as propriedades do modelo $k-\omega$, com a equação da função de mistura apresentando $F_1 = 1$ (REZENDE, 2009).

Algumas outras variáveis importantes para o funcionamento do modelo são calculadas através das equações a seguir:

$$CD_{k\omega} = \max(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10}) \quad (11)$$

$$\mu_t = \rho \frac{k\alpha_1}{\max(\alpha_1 \omega (S_{ij} S_{ji})^{1/2} F_2)} \quad (12)$$

Onde $(S_{ij} S_{ji})^{1/2}$ representa uma medida invariante do tensor da taxa de deformação.

Por fim, os valores das diversas constantes usadas durante a elaboração do modelo de turbulência que são utilizadas pelo software OpenFOAM assumem os seguintes valores:

Tabela 2: Valores das constantes modelo K_ϵ

Constante	Valor
α_1	5/9
α_2	0,44
β_1	3/40
β_2	0,0828
β^*	9/100
α_{k1}	0,85
α_{k2}	1
$\alpha_{\omega 1}$	0,5
$\alpha_{\omega 2}$	0,856

IV. Interação fluido-estrutura

A interação fluido-estrutura é o fenômeno que motiva trabalhos como este e surge devido a ação do fluido em torno do sólido, a qual produz carregamentos estáticos e dinâmicos que tendem a deformar elasticamente a estrutura, gerando vibrações. Caso essas vibrações apresentem deslocamentos com ordens de grandeza significativas, elas

podem interferir no próprio fluxo do fluido que ocorre ao redor da estrutura, alterando assim o comportamento aerodinâmico dentro dessa interação.

Assim, de modo a tentar prever as intensidades dessas interações entre os dois meios contínuos, utiliza-se os coeficientes aerodinâmicos de arrasto (C_d) e de sustentação (C_l). Estes são parâmetros adimensionais que caracterizam o escoamento dependendo das características geométricas da seção transversal do objeto a ser estudado, assim como o ângulo de incidência do fluido neste e do Número de Reynolds que define o escoamento. O cálculo destes coeficientes é dado pelas seguintes equações:

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (13)$$

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (14)$$

Nas quais F_d e F_l são, respectivamente, as forças médias de arrasto e de sustentação e A é a área de referência da superfície.

A partir do momento que estamos estudando a interação fluido-estrutura baseado em objetos sem forma aerodinâmica, como é o caso de um tabuleiro de ponte, é necessário tratar do desprendimento alternado de vórtices a jusante do objeto de estudo, fenômeno conhecido como Vórtices de Von Kármán, o qual pode ocorrer dependendo da geometria do objeto de estudo e do Número de Reynolds que caracteriza o escoamento. O estudo deste fenômeno é importante uma vez que este é responsável por forças periódicas e oblíquas à direção do fluido, podendo afetar não só o objeto de estudo, mas uma estrutura que possa estar atrás deste, como prédios que se localizam próximos ao tabuleiro da ponte. Para quantificar esse desprendimento de vórtices, utiliza-se o Número de Strouhal (St), o qual pode ser calculado através da equação:

$$St = \frac{F_v A}{U} \quad (15)$$

Na qual F_v é a frequência de desprendimento dos vórtices, os quais podem ser observados à direita do cilindro na simulação, a qual será discutida mais a frente, exposta na imagem a seguir:

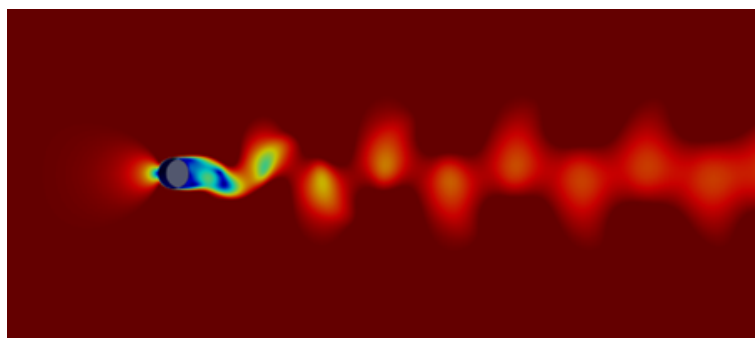


Figura 4: Desprendimento de Vórtices

IV. ESTUDO DE CASO

De modo a possibilitar um estudo do software e um primeiro contato mais intuitivo do grupo responsável pelo projeto com as novidades do OpenFOAM, primeiramente se estudou a diferença de cada um dos modelos de turbulência em geometrias mais simples, replicando simulações clássicas e muito instrutivas da área de CFD, no caso optamos pelo escoamento em torno de um perfil quadrado e em seguida um perfil circular.

Para a elaboração das malhas, escolha dos dados a serem utilizados e comparação de resultados, utilizaremos a dissertação de mestrado de Leandro Malveira Ferreira Costa apresentada a Escola Politécnica da USP no ano de 2018.

I. Escoamento em volta do perfil quadrado

Para o estudo do escoamento em torno de um perfil quadrado foi elaborada a seguinte malha através do software Gmsh, recomendado pela equipe responsável pelo desenvolvimento do OpenFOAM devido a boa compatibilidade entre os dois aplicativos e pela facilidade em representar geometrias simples.

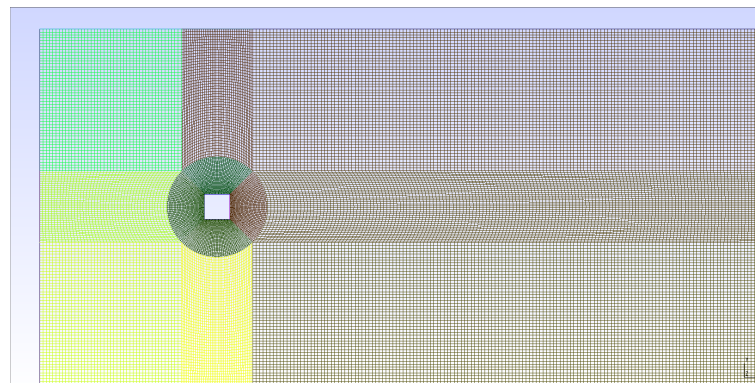


Figura 5: *Malha Seção Quadrada*

A malha apresenta aproximadamente 70 mil elementos e um refinamento maior na região próxima ao perfil quadrado de modo a garantir um cálculo mais preciso dos coeficientes de arrasto e de sustentação da geometria, além de possuir um "corredor" à direita da figura de modo a possibilitar uma melhor visualização dos vórtices despreendidos e, conseqüentemente, um cálculo mais preciso do Número de Strouhal.

Os coeficientes de sustentação e de arrasto foram extraídos utilizando o aplicativo GNUPLLOT, o qual atua junto ao OpenFOAM no quesito de extração de resultados através de uma pequena alteração nos arquivos da simulação, permitindo que o software registre os dados coletados numericamente (ForceCoeffs). Já para a extração do Número de Strouhal foi utilizado um pequeno script no MATLAB elaborado pelo grupo (o qual está contido na minha página do GITHUB junto aos arquivos das simulações).

Os dados utilizados para as simulações foram:

Tabela 3: Dados Utilizados Seção Quadrada

Grandeza	Valor	Unidade
Reynolds	22000	Adimensional
Densidade do Fluido (ρ)	1	Kg/m^3
Viscosidade Dinâmica (μ)	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$
Velocidade do Vento (U_0)	10	m/s
Dimensão Característica (D)	1,0	m

Neste caso, a dimensão característica corresponde à aresta do quadrado.

Todas as simulações apresentadas neste trabalho tem a duração de 30 segundos, no caso do perfil quadrado, foi utilizado um passo de tempo $\Delta t = 4,0 \cdot 10^{-4}$

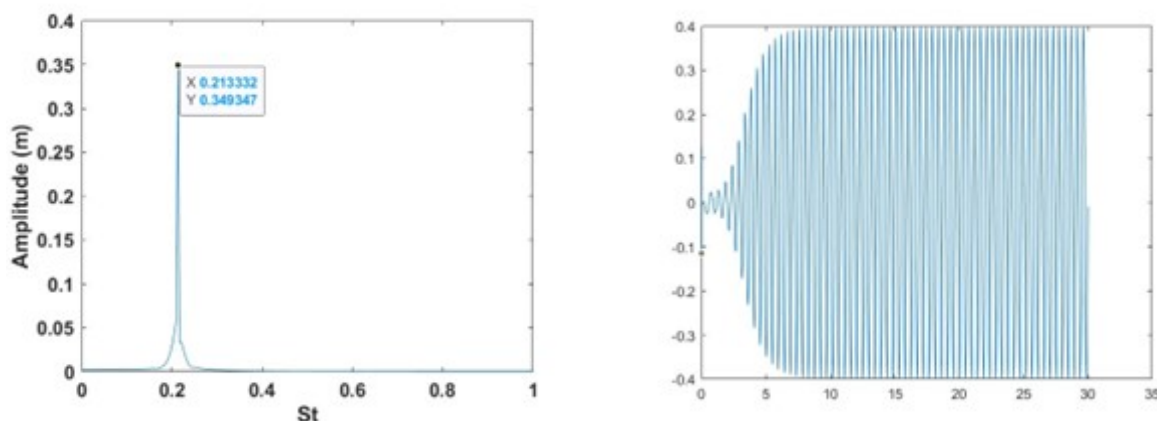
I.1 Resultados perfil quadrado

Os resultados das duas simulações feitas podem ser encontradas na tabela abaixo, assim como os resultados de referência extraídos de artigos já citados anteriormente:

Tabela 4: Resultados Seção Quadrada

	Cd	Cl	St
$K - \epsilon$ Standard	1,45	1,41	0,146
$K - \omega$ SST	1,73	1,14	0,167
Referência Braum (2007)	2,31	1,24	0,143

Também foram traçados gráficos para ilustrar tais resultados, sendo os três primeiros representando a simulação usando o modelo $K - \epsilon$ e então do modelo $K - \omega$:

**Figura 6:** Número de Strouhal e Coeficiente de Sustentação ($K - \epsilon$)

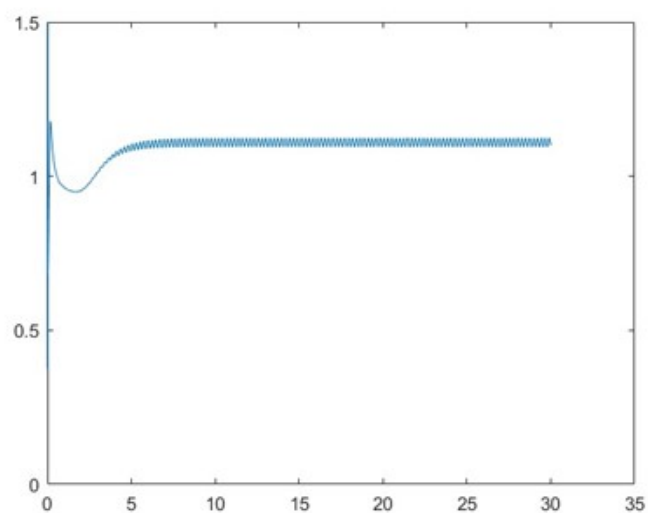


Figura 7: Coeficiente de Arrasto ($K - \omega$)

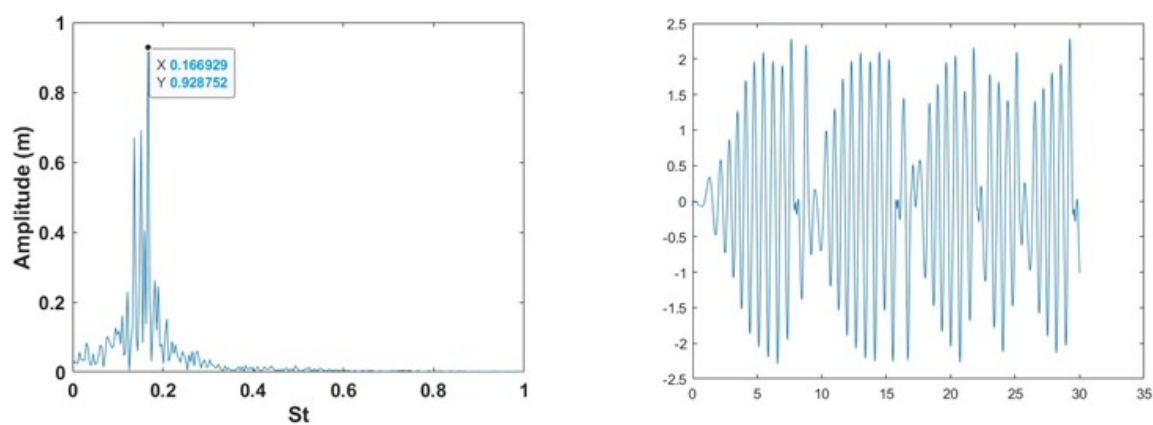


Figura 8: Número de Strouhal e Coeficiente de Sustentação ($K - \omega$)

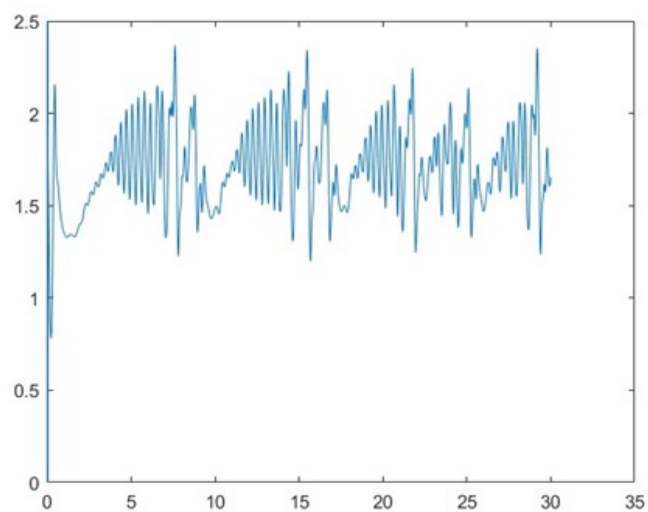


Figura 9: Coeficiente de Arrasto ($K - \omega$)

Além de uma imagem que ilustra o desprendimento de vórtices alternados no caso da simulação em torno de um perfil quadrático:

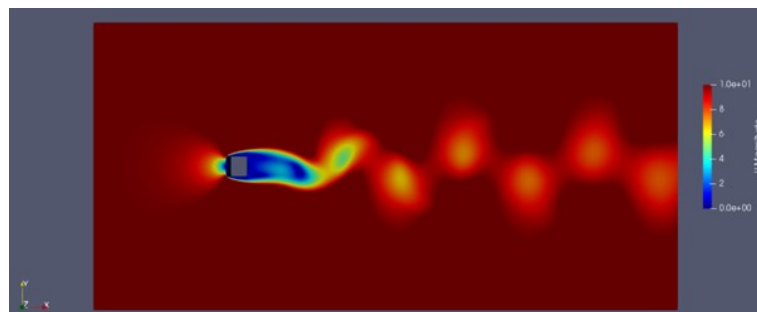


Figura 10: Fenômeno de desprendimento de vórtices $K - \epsilon$

II. Escoamento em volta do perfil circular

Já para o estudo do escoamento em torno de um perfil circular foi elaborada a seguinte malha através, também, do software Gmsh:

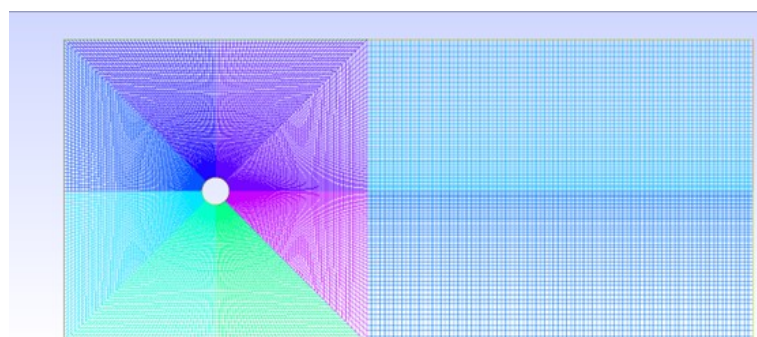


Figura 11: Malha Seção Circular

A malha apresenta aproximadamente 64 mil elementos e um refinamento que vai aumentando conforme nos aproximamos do cilindro, visando também um cálculo mais preciso dos coeficientes gerados pela interação fluido-estrutura. Esta malha, diferente daquela elaborada para a seção quadrada, não possui um "corredor" mais refinado após a estrutura, mas possui um refinamento que aumenta em direção a uma linha central que parte do círculo, como pode-se observar. O refinamento foi feito dessa forma para observar se esta é uma forma válida de montar uma malha para observar os vórtices alternados após a estrutura, podendo apresentar diferenças quando abordamos ambos os modelos.

Os resultados foram extraídos utilizando as mesmas técnicas explicadas anteriormente, e os dados utilizados para essas simulações foram:

Tabela 5: *Dados Utilizados Seção Circular*

Grandeza	Valor	Unidade
Reynolds	1000	Adimensional
Densidade do Fluido (ρ)	1	Kg/m^3
Viscosidade Dinâmica (μ)	0,01	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$
Velocidade do Vento (U_0)	10	m/s
Dimensão Característica (D)	1,0	m

Neste caso, a dimensão característica corresponde ao diâmetro do círculo e o passo de tempo utilizado foi de $\Delta t = 1,8 \cdot 10^{-4}$

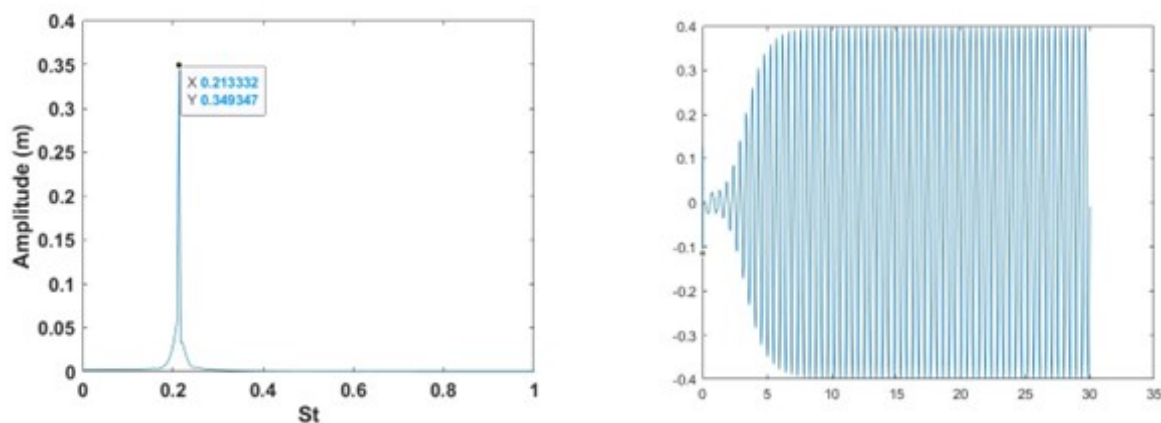
II.1 Resultados perfil circular

Os resultados das duas simulações feitas podem ser encontradas na tabela abaixo, assim como os resultados de referência extraídos de artigos já citados anteriormente:

Tabela 6: *Resultados Seção Circular*

	Cd	Cl	St
$K - \epsilon$ Standard	1,10	0,261	0,213
$K - \omega$ SST	1,32	0,658	0,239
Referência Braum (2007)	1,62	1,82	0,217

Também foram traçados gráficos para ilustrar tais resultados, sendo os três primeiros representando a simulação usando o modelo $K - \epsilon$ e então do modelo $K - \omega$:

**Figura 12:** *Número de Strouhal e Coeficiente de Sustentação ($K - \epsilon$)*

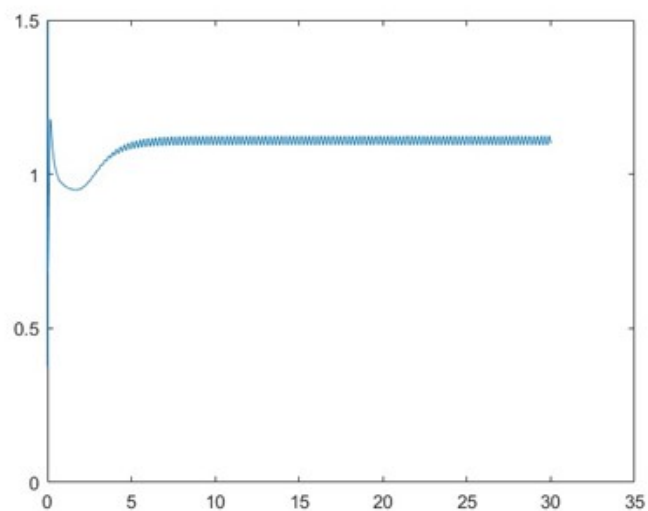


Figura 13: Coeficiente de Arrasto ($K - \omega$)

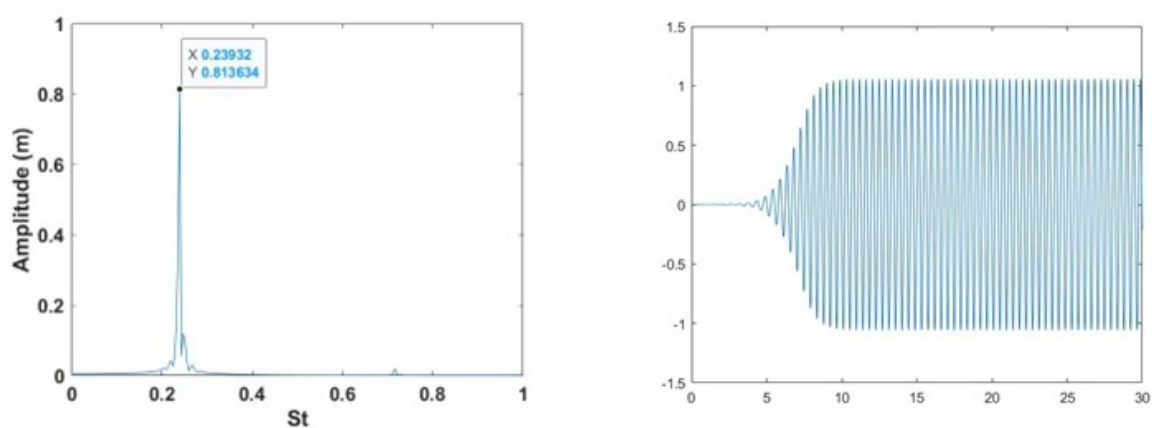


Figura 14: Número de Strouhal e Coeficiente de Sustentação ($K - \omega$)

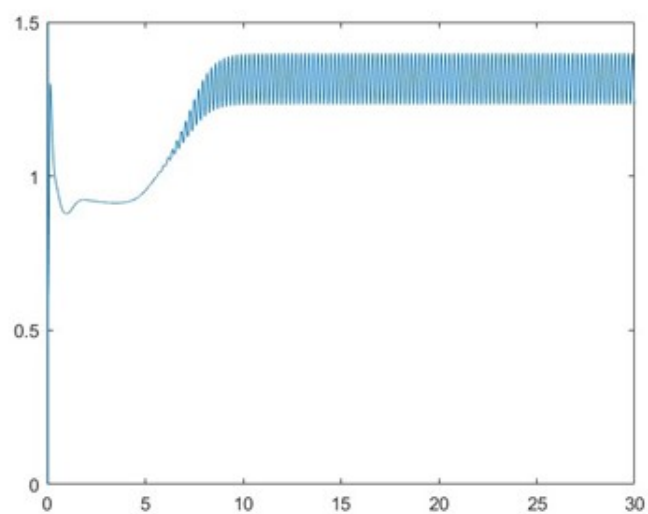


Figura 15: Coeficiente de Arrasto ($K - \omega$)

Além de uma imagem que ilustra o desprendimento de vórtices alternados no caso da simulação em torno de um perfil Circular:

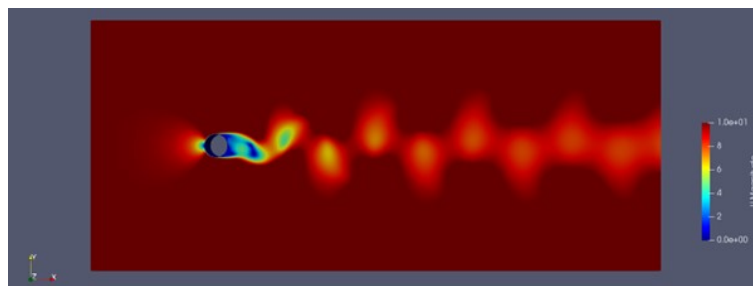


Figura 16: *Fenômeno de desprendimento de vórtices $K - \epsilon$*

III. Simulações 3D

Todas as simulações apresentadas até agora foram feitas em duas dimensões, então, para possibilitar um melhor entendimento dos modelos e de como o próprio software OpenFOAM trabalha com simulações em 3 dimensões, foram feitas pequenas alterações na malha da seção circular resultando em uma malha que possui refinamento nas três dimensões, possuindo uma espessura representativa de 10m e aproximadamente 1 milhão de elementos. Devido ao grande número de elementos na malha, foram feitas apenas duas simulações, uma com o modelo $K - \epsilon$ e outra com o modelo LES-Smagorinsky (Large eddy simulation), utilizamos esse outro modelo para ter mais um dado de comparação em relação as simulações já feitas, além do fato de este modelo exigir muito menos poder computacional que o modelo $K - \omega$ SST.

Enquanto as simulações apresentadas anteriormente rodaram por um período entre 8 e 12 horas, sendo o modelo $K - \omega$ aquele que apresenta maior tempo de processamento, as simulações 3D que serão apresentadas a seguir exigiram 8 ($K - \epsilon$) e 12 (LES) dias para serem processadas por um computador cujo processamento era todo voltado para estas simulações CFD. Isso porque, além de agora o software estar resolvendo as equações listadas anteriormente para todas as três dimensões, as malhas apresentam mais de 10 vezes a quantidade de elementos que as malhas em 2D, isso, obviamente, por conta do refinamento no eixo z.

Os dados utilizados para executar essas simulações foram os mesmos daqueles apresentados na seção anterior, e a malha mais detalhada pode ser vista na imagem a seguir:

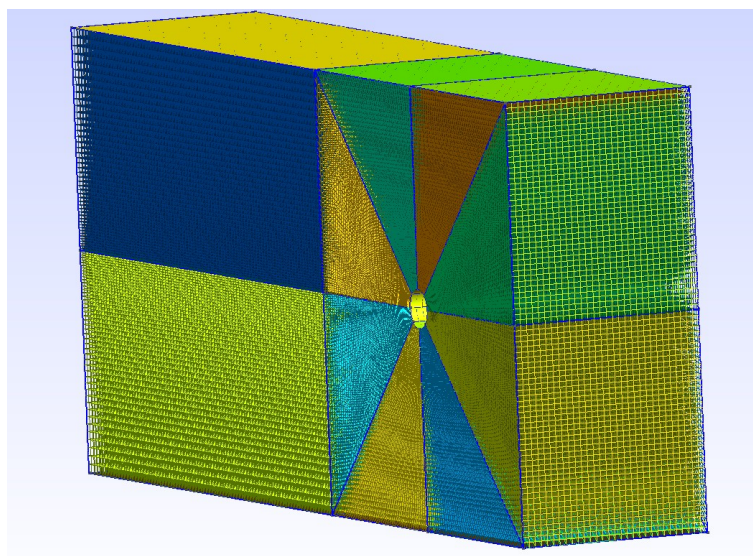


Figura 17: *Malha Seção Circular 3D*

III.1 Resultados Simulações 3D

Os resultados das duas simulações feitas podem ser encontradas na tabela abaixo, assim como os resultados de referência extraídos de artigos já citados anteriormente:

Tabela 7: *Resultados Seção Circular*

	Cd	Cl	St
$K - \epsilon$ Standard	1,10	0,261	0,278
LES Smagorinsky	1,18	0,347	0,223
Referência Braum (2007)	1,62	1,82	0,217

Também foram traçados gráficos para ilustrar tais resultados, sendo os três primeiros representando a simulação usando o modelo LES e então do modelo $K - \epsilon$:

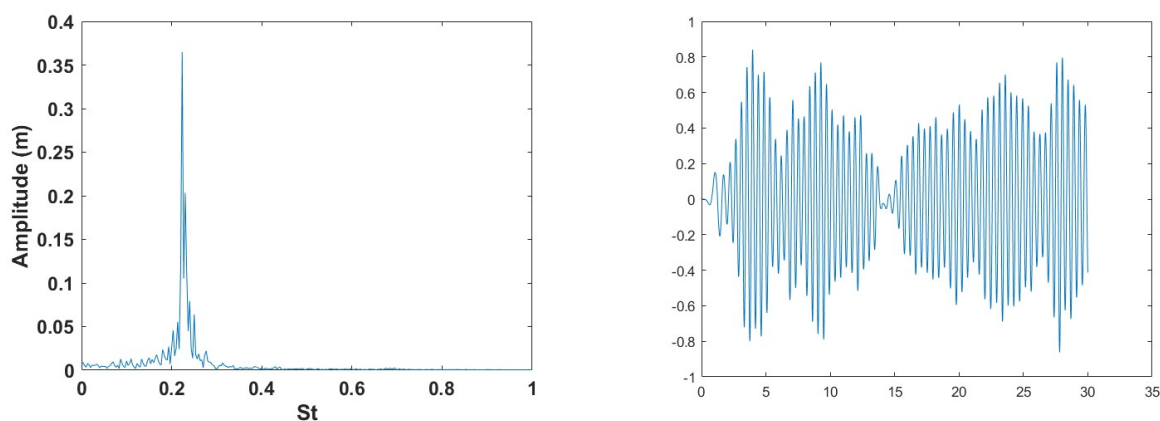


Figura 18: *Número de Strouhal e Coeficiente de Sustentação (LES Smagorinsky)*

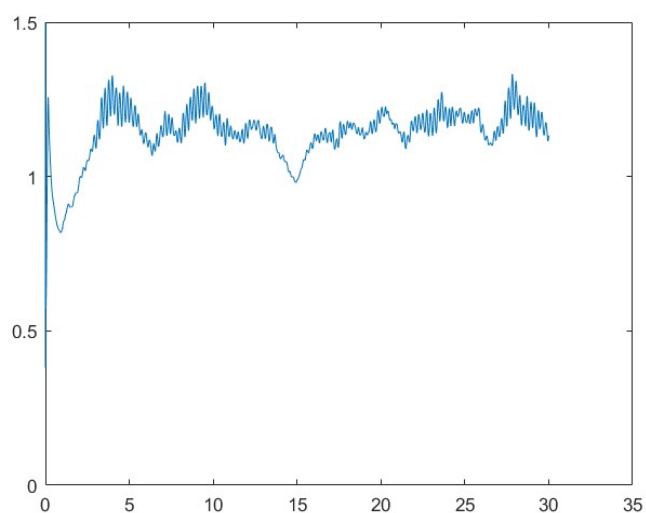


Figura 19: Coeficiente de Arrasto (LES Smagorinsky)

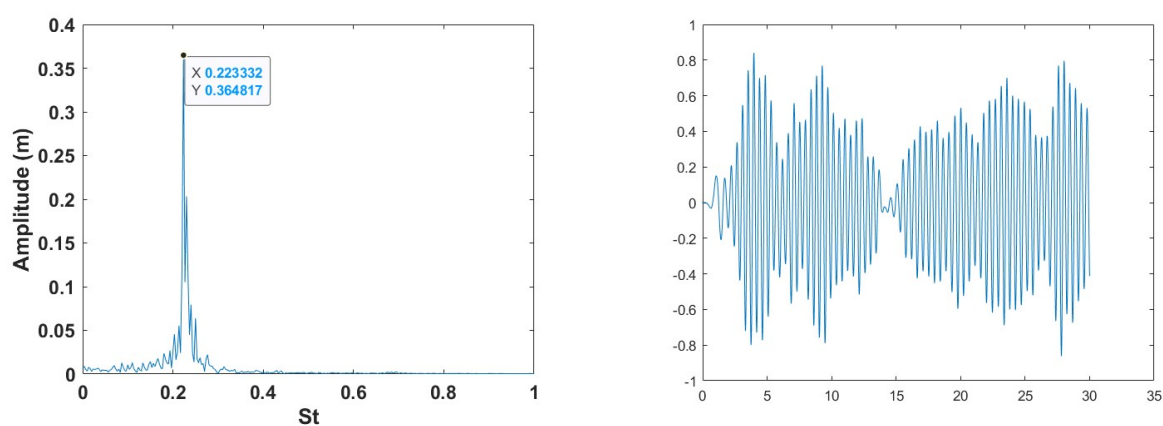


Figura 20: Número de Strouhal e Coeficiente de Sustentação ($K - \epsilon$)

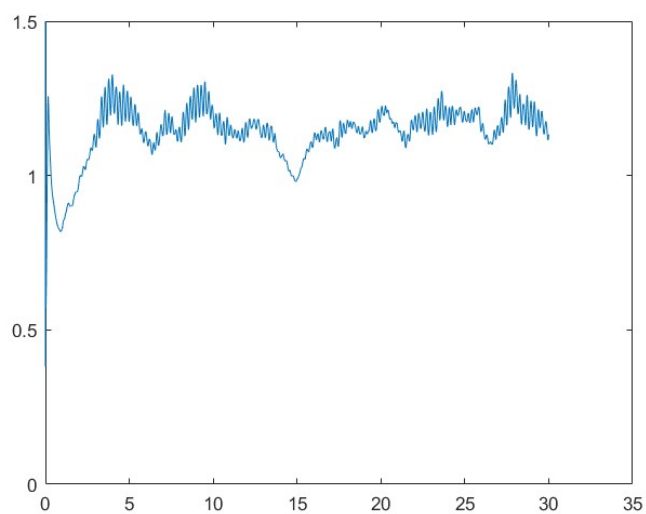


Figura 21: Coeficiente de Arrasto ($K - \epsilon$)

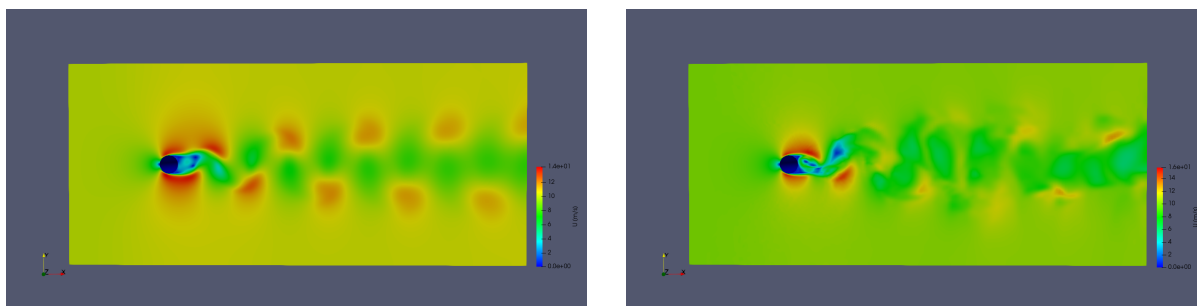


Figura 22: *Campo de Velocidades K- ϵ e LES*

IV. Escoamento em Volta do Tabuleiro

Agora que observamos como os modelos respondem às simulações "clássicas" do CFD, vamos elaborar as simulações para o estudo dos modelos em pontes suspensas. Para isso, o tabuleiro a ser representado será da ponte Grande Belt, uma ponte suspensa parte da rede rododiferroviária dinamarquesa que conecta as ilhas Zelândia e Fiónia atravessando o Grande Belt, possuindo um vão livre de aproximadamente 1600 metros e uma geometria simples de ser representada, o que motivou a escolha desta.



Figura 23: *Ponte Grande Belt*

Assim, mais uma vez utilizando o aplicativo gmsh, por mais uma vez ser uma geometria simples, e com auxílio do AutoCAD para extrair as coordenadas de forma mais precisa, resultando na seguinte malha com aproximadamente 130 mil nós e um refinamento que aumenta conforme nos aproximamos da ponte e uma esteira de vórtice com um refinamento mais simples:

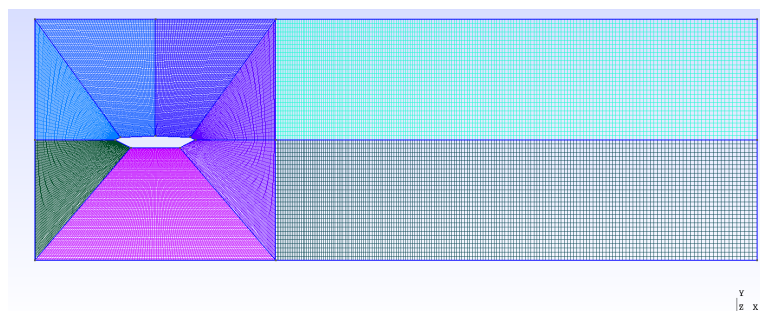


Figura 24: Malha Tabuleiro Ponte

Os dados utilizados nesta simulação foram retirados também da dissertação de mestrado de Leando Malveira, sendo expostos na seguinte tabela:

Tabela 8: Dados Utilizados Seção Circular

Grandeza	Valor	Unidade
Reynolds	$3,0 \cdot 10^5$	Adimensional
Densidade do Fluido (ρ)	1,2	Kg/m^3
Viscosidade Cinemática (μ)	$5,78 \cdot 10^{-4}$	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$
Velocidade do Vento (U_0)	40	m/s
Dimensao Característica (D)	31	m

Neste caso, a dimensão caracerística representa o comprimento do tabuleiro utilizado e o passo de tempo utilizado foi de $\Delta t = 1,15 \cdot 10^{-4}$.

IV.1 Resultados Simulações Tabuleiro da Ponte

Os resultados das duas simulações feitas podem ser encontradas na tabela abaixo, assim como os resultados de referência extraídos de artigos já citados anteriormente:

Tabela 9: Resultados Ponte Great Belt

	Cd	Cl	St
$K - \epsilon$ Standard	0,255	0,278	0,15
$K - \omega$	0,342	0,072	0,10
Referência Malveira, L. (2018)	0,63	0,05	0,180

Também foram traçados gráficos para ilustrar tais resultados, sendo os três primeiros representando a simulação usando o modelo $K - \epsilon$ e então do modelo $K - \omega$:

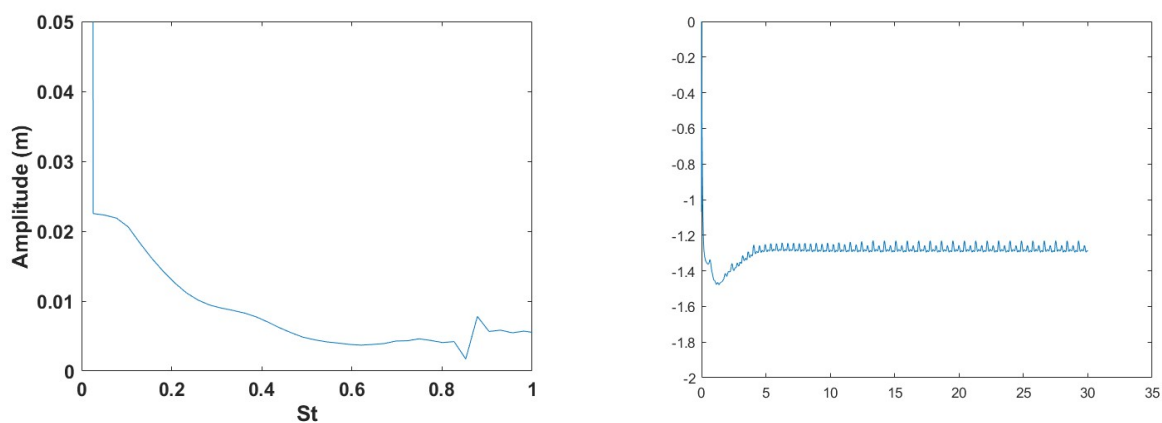


Figura 25: Número de Strouhal e Coeficiente de Sustentação ($K - \epsilon$)

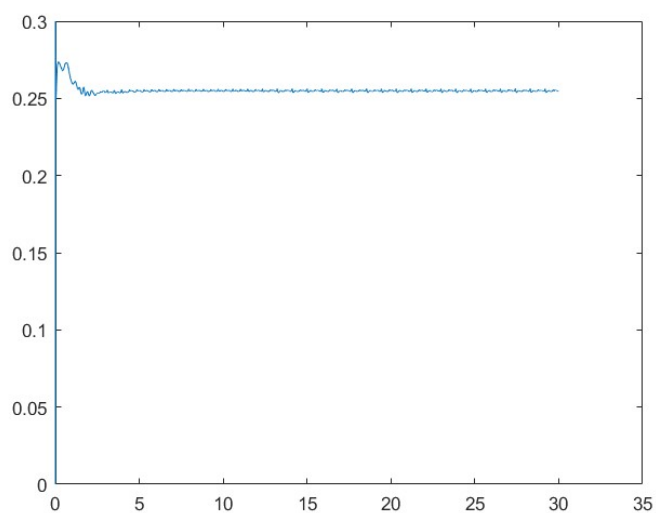


Figura 26: Coeficiente de Arrasto ($K - \epsilon$)

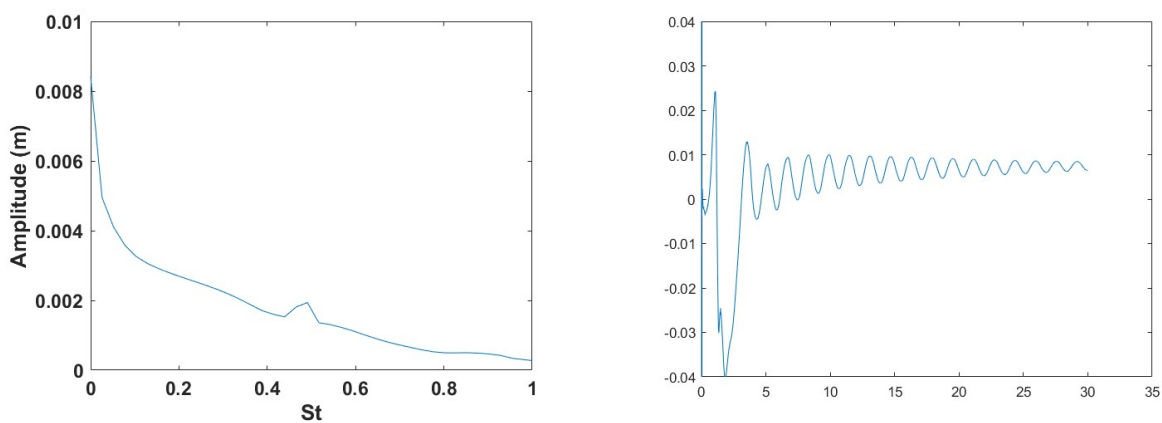


Figura 27: Número de Strouhal e Coeficiente de Sustentação ($K - \omega$)

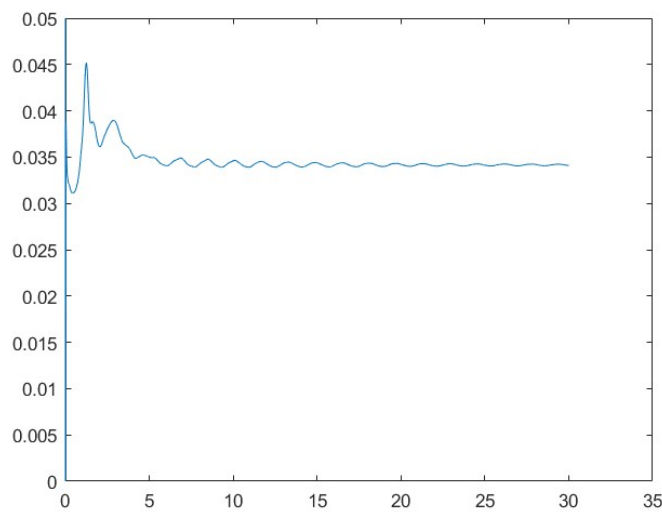


Figura 28: Coeficiente de Arrasto ($K - \omega$)

Além disso, aqui uma imagem ilustrativa do campo de velocidades da simulação em torno do tabuleiro da ponte, apresentando um desprendimento de vórtices muito menor devido a sua geometria:

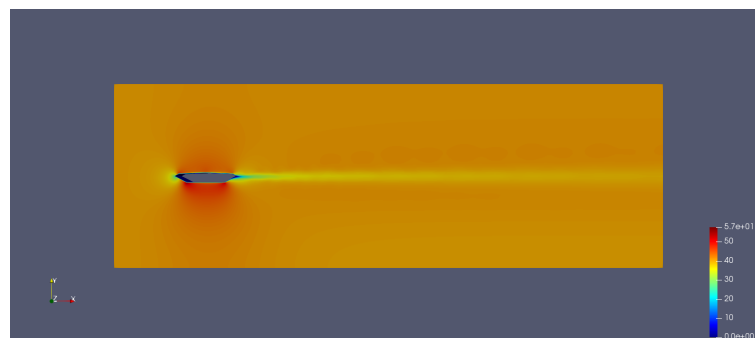


Figura 29: Campo de Velocidades ($K - \epsilon$)

V. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÃO

Dessa forma, podemos concluir que ambos os modelos possuem seus prós e contras, os quais serão listados a seguir de modo a possibilitar uma comparação mais didática dos modelos:

$K - \epsilon$ Standard:

PROS: Por ser amplamente utilizado é mais fácil de buscar referências e encontrar simulações para serem usadas de base ; Fácil de implementar e Computacionalmente barato (Vide a diferença entre o tempo demandado para a execução das simulações comparado aos outros modelos) ; Adequado para iterações iniciais, triagem inicial de projetos ; Apresentou melhores resultados para a análise do desprendimento de vórtices (Número de Strouhal) ; Exige menos refinamento da malha pra apresentar resultados minimamente consistentes.

CONTRAS: Desempenho ruim para fluxos complexos envolvendo gradiente de

pressão severo e forte curvatura da linha de corrente, então não é muito recomendado para geometrias mais complexas ; Apresenta uma menor acurácia em relação a interação fluido-estrutura.

$K - \omega$ SST:

PROS: Combina o modelo $K - \omega$ original para uso próximo a paredes e o modelo $K - \epsilon$ padrão longe de paredes usando uma função de mistura, possibilitando análises mais precisas através da compensação dos pontos fortes e fracos de ambos os modelos ; Previsões mais precisas sob gradientes de pressão adversos ; Não apresenta problemas em lidar com geometrias mais complexas ; Recomendado para simulações de camada limite de alta precisão.

CONTRAS: Requer uma malha com maior refinamento próxima à paredes, o que pode levar a uma maior dificuldade de manter o Número de Courant dentro dos limites aceitáveis ; Maior exigência computacional.

O Número de Courant quantifica a convergência da solução numérica das equações diferenciais parciais resolvidas durante a execução da simulação. Para que nossos resultados sejam lógicos, buscamos manter este número entre 0 e 1, o que pode ser complicado quando tratamos de malhas muito complexas, vide a equação que determina tal número:

$$Co = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \quad (16)$$

Onde "u" é a velocidade local, Δt é o passo de tempo e Δx é o tamanho local dos volumes finitos da malha. Dessa forma, quanto mais refinada a malha, menores são esses tamanhos locais e maior o Número de Courant. Portanto, ao trabalhar com o modelo $K - \omega$ SST precisa-se ter cuidado a relação entre o time-step e o refino da malha.

Portanto, percebe-se que o modelo $K - \epsilon$ se enquadra melhor nas necessidades de análise do desprendimento alternado de vórtices após o tabuleiro de uma ponte, possibilitando uma melhor análise de como esses vórtices podem afetar estruturas próximas. Contudo, o modelo $K - \omega$ SST apresenta uma precisão maior na análise dos resultados da interação fluido-estrutura, logo, é mais adequado para estudar como o vento que colide no tabuleiro de uma ponte suspensa afeta a estrutura deste. Ambos os modelos possuem suas peculiaridades, as quais precisam ser respeitadas e levadas em consideração na elaboração do projeto de estudo.

VI. BIBLIOGRAFIA

REFERÊNCIAS

- WIKIPEDIA. K-epsilon turbulence model. In: K-epsilon turbulence model. [S. l.], 11 jan. 2022. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/K-epsilon_turbulence_model. Acesso em: 1 fev. 2022.
- OPENFOAM. OpenFoam: k-epsilon. [S. l.], 22 jun. 2016. Disponível em: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-turbulence-ras-k-epsilon.html>. Acesso em: 1 fev. 2022.
- Yakhot, V.; Orszag, S.A. Renormalization group analysis of turbulence. *Journal of Scientific Computing*, vol. 1, p. 3-5, 1986.
- Yakhot, V.; Orszag, S.A.; Tangam, S.; Gatski, T.B.; Speziale, C.G. Development of turbulence models for shear flows by double expansion technique. *The Physics of Fluids*, vol. 4, p. 1510-1520, 1992.
- WOLFDYNAMICS. Flow past a cylinder From laminar to turbulent flow. [S. l.], 20 jul. 2016. Disponível em: http://www.wolfdynamics.com/images/begtuts/T4_2D_cylinder.pdf. Acesso em: 16 fev. 2022.
- CFD ONLINE. SST k-omega model. [S. l.], 28 fev. 2011. Disponível em: https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model. Acesso em: 10 mar. 2022.
- FLUID MECHANICS 101. [CFD] The k - omega SST Turbulence Model. [S. l.], 14 mar. 2019. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=myv-ityFnS4>. Acesso em: 12 jan. 2022.
- Braun, Alexandre Luis; Simulação numérica na engenharia do vento incluindo efeitos de interação fluido estrutura. 2007. 300 p. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2007.
- RAHMAN , Mahbubar; KARIM, Mashud; ALIM, Abdul. NUMERICAL INVESTIGATION OF UNSTEADY FLOW PAST A CIRCULAR CYLINDER USING 2-D FINITE VOLUME METHOD. *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering*, [S. l.], p. 14-16, 15 jun. 2007.
- LESSA DE OLIVEIRA, Iago. PIMPLE algorithm. [S. l.], 24 ago. 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figure-C5-PIMPLE-algorithm-nOuterCorr-is-the-number-of-outer-corrector-steps-ie_fig22_322367191. Acesso em: 8 mar. 2022.
- PONTE do Grande Belt. Wikipedia, 2 jan. 2020. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte_do_Grande_Belt. Acesso em: 25 set. 2022.

A. APENDICE I: TUTORIAL/BOAS PRÁTICAS OPENFOAM

Como já foi citado anteriormente, o grupo de alunos sob a tutoria do professor Fernando Akira Kurokawa desenvolveu um pequeno tutorial que tem como objetivo facilitar o aprendizado do software utilizado por nós para a realização de nossos trabalhos de pesquisa, o OpenFOAM. Este software já é muito utilizado na indústria, mas pouco comentado nas universidades. Por isso, visando facilitar o primeiro contato de futuros estudantes interessados no aplicativo, escrevemos um relatório que mostra como criar sua primeira malha (malha da seção circular usada neste trabalho) e rodar sua primeira simulação.

Tutorial e Manual de Boas Práticas

OpenFOAM®

Professor: Fernando Akira Kurokawa
Tema: Dinâmica dos Fluidos Computacional

São Paulo,
2022

Figura 30: *Tutorial OpenFOAM*

Este ainda deve ser atualizado conforme adquirimos mais conhecimento do software, mas sua versão atual pode ser encontrado em meu GitHub, junto aos arquivos das simulações que foram utilizadas no desenvolvimento deste trabalho, no seguinte link: <https://github.com/maia2020/CFD-OpenFOAM>