LEANDRO MALVEIRA FERREIRA COSTA

**Investigação numérica de modelos de turbulência no escoamento
do vento em pontes suspensas**

São Paulo

2018

LEANDRO MALVEIRA FERREIRA COSTA

**Investigação numérica de modelos de turbulência no escoamento
do vento em pontes suspensas**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia de
Construção Civil e Urbana.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Akira
Kurokawa

São Paulo
2018

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Costa, Leandro Malveira Ferreira

Investigação numérica de modelos de turbulência no escoamento do vento em pontes suspensas / L. M. F. Costa -- versão corr -- São Paulo, 2018.
150 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1. Modelos de turbulência 2. Flutter 3. Dinâmica dos fluidos computacional
4. Simulação numérica 5. Pontes suspensas I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II. t.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Ezechiél e Maria e aos meus
filhos Julia e Arthur, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Não poderia deixar de iniciar esta mensagem de agradecimentos sem mencionar Àquele a quem devo a minha existência, minha família e minhas conquistas. Toda honra e toda a glória a Deus e Nosso Senhor Jesus Cristo por permitirem a conclusão de mais uma incrível jornada em minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fernando Akira Kurokawa, por todo o apoio, paciência e aconselhamentos fundamentais para a conclusão dessa dissertação.

Ao Prof. Dr. João Cyro André e ao Prof. Dr. Osvaldo Shigueru Nakao, pelo gentil acolhimento e pela grande oportunidade de participar do grupo de pesquisas em pontes suspensas do PEF.

À Amanda Murara, pelo inestimável apoio, pelo afeto incondicional nas horas mais difíceis, pelas inúmeras palavras de incentivo e encorajamento e pela compreensão nos momentos em que estive ausente. Obrigado por prover o suporte da nossa família ao longo desses anos, sem o qual seria impossível o término desse trabalho.

Aos colegas do Colégio Marista Arquidiocesano, especialmente ao Prof. Chico Sedrez e à Helena Abe, pela valiosa ajuda e pela compreensão nos períodos de ausência durante a minha trajetória na instituição.

Aos colegas da FATEC-SP, em particular à Prof.^a Me. Elizabeth Neves Cardoso e ao Prof. Esp. Eduardo Roberto Domingues da Silva.

À Prof. Dra. Francisca Malveira (*in memoriam*), a docente que me colocou em contato com o “universo” acadêmico e que fez despertar em mim o apreço pela pesquisa e pela ciência.

A todos que de alguma forma contribuíram com a elaboração deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

“... O impossível não é um fato, é uma
opinião...”

Muhammad Ali

RESUMO

Estudos sobre a instabilidade aeroelástica em estruturas de pontes suspensas têm adquirido relevante destaque no âmbito das pesquisas em engenharia do vento nos últimos anos, haja vista que as definições resultantes dessa análise apresentam informações essenciais ao projeto, cálculo e concepção desse tipo de estrutura. Considerando que os escoamentos ao redor de pontes suspensas apresentam características turbulentas, o conhecimento acerca desse fenômeno torna-se fundamental para a análise da interação vento-ponte, estabelecendo a turbulência como uma importante e complexa vertente dentro dessa pesquisa. Nesse contexto, o presente trabalho visa contribuir com o tema através da análise numérica da ação do vento na seção transversal do tabuleiro de pontes suspensas, verificando seu comportamento quando estiverem submetidas à ação dos esforços provenientes do vento na interação de um escoamento turbulento com o tabuleiro da ponte. No trabalho foi investigada a atuação dos esforços aerodinâmicos na estrutura da ponte, ensejando na obtenção dos coeficientes aerodinâmicos de arrasto, sustentação e momento. Também foi analisado o comportamento do tabuleiro para o surgimento das vibrações induzidas por vórtices, permitindo o cálculo da frequência de desprendimento de vórtices e determinação do número de Strouhal. No que tange aos esforços aeroelásticos para o estudo específico do drapejamento (*flutter*), foram avaliadas as amplitudes de deslocamentos torcionais para o cálculo e obtenção da velocidade crítica do vento que acarreta o fenômeno do *flutter*. Juntamente com as análises aerodinâmicas e aeroelásticas da seção transversal da ponte, diferentes modelos de turbulência foram aplicados nas simulações para se estabelecer uma análise comparativa entre os escoamentos. As simulações computacionais desenvolvidas e apresentadas neste trabalho foram realizadas com auxílio de um programa de CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Os modelos de ponte utilizados no trabalho foram o da ponte suspensa *Great Belt East*, localizada na Dinamarca e da ponte estaiada *Sunshine Skyway*, localizada nos Estados Unidos. Para validação da técnica computacional, os resultados das simulações foram comparados com dados numéricos e experimentais disponíveis na literatura.

Palavras-chave: Modelos de turbulência. *Flutter*. Dinâmica dos fluidos computacional. Simulação numérica. Pontes suspensas.

ABSTRACT

Researches about aeroelastic instability in long span suspension bridges have been consistently the focus in wind engineering field in recent years, therefore the definitions from that study present essential information to design and construction of this type of road structure. Considering that fluid flows around bridges show some turbulent features, the knowledge about turbulence become critical for this wind-bridge interaction analysis, establishing the turbulence modeling study as an important and complex part within that research. According to this context, the meaning of this research was to contribute with numerical analysis of wind effects on a suspension bridge deck, verifying its behavior when this model is subjected to the action of wind loads from a turbulent fluid flow. The bridge aerodynamic behaviour was investigated and aerodynamic coefficients of drag, lift and moment were calculated. Flow induced vibrations were also analyzed for the bridge deck model, allowing it to obtain the vortex shedding frequency and Strouhal number. With regard to aeroelasticity and focusing on flutter study, the amplitudes of torsional displacements were evaluated as well as the analysis of critical wind velocity that causes flutter instabilities. Along with aerodynamic and aeroelastic analysis of the bridge deck cross sectional, fluid flow features were studied and compared applying several turbulence models to simulations. The numerical approach developed and shown in this work was performed by CFD (Computational Fluid Dynamics) software. The bridge deck models used at this dissertation were the Great Belt East suspension bridge, located in Denmark and the Sunshine Skyway cable stayed bridge, located in USA. In order to validate the computational technique, simulation results from this research were compared with numerical and experimental test data available in papers and literature.

Key-words: Turbulence models. Flutter. Computational fluid dynamics. Numerical simulation. Suspension bridges.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ponte <i>Tacoma Narrows</i> : (a) movimento torcional; (b) movimento flexional e (c) instante do colapso da ponte	31
Figura 2 – Modelo aeroelástico das torres do World Trade Center no túnel de vento para ensaio experimental em 1964	33
Figura 3 – Modelo seccional do tabuleiro de uma ponte submetida a um fluxo de vento	34
Figura 4 – Fluxograma do algoritmo para solução de problemas de IFE (a) <i>one-way</i> e (b) <i>two-way</i>	43
Figura 5 – Ilustração dos domínios fluido e sólido e da interface de contato em uma IFE	44
Figura 6 – Fluxograma de solução de uma IFE nas abordagens (a) monolítica e (b) particionada	45
Figura 7 – Perfil de velocidade em um escoamento bidimensional sobre uma superfície sólida plana	47
Figura 8 – Escoamento sobre placa plana	47
Figura 9 – Estágios de formação da camada limite em um escoamento sobre placa plana	48
Figura 10 – Separação da camada limite	49
Figura 11 – Detalhe do ponto de separação da camada limite	49
Figura 12 – Escoamento sobre um aerofólio com demonstração da separação laminar e formação de “bolha” de circulação	50
Figura 13 – Forças aerodinâmicas atuando em um elemento infinitesimal na superfície de um aerofólio	51

Figura 14 – Comparativo entre diferentes tipos de sólidos imersos em fluidos para identificação da proporção entre atrito superficial e de pressão na formação da força de arrasto total.	52
Figura 15 – Distribuição do coeficiente de pressão c_p ao longo do comprimento de um perfil tipo aerofólio	54
Figura 16 – Aerofólio posicionado em sistema referencial com a indicação das forças aerodinâmicas	54
Figura 17 – Estrutura vertical das camadas sobre a superfície terrestre	60
Figura 18 – Diagrama dos três anéis	61
Figura 19 – Seção transversal do tabuleiro da ponte de <i>Tacoma</i> (a) antes do colapso (b) após a reconstrução da ponte.....	63
Figura 20 – Ilustração de um sólido sob ação de forças aeroelásticas (F) que provocam o <i>galloping</i>	64
Figura 21 – Ilustração de um sólido sob efeito de oscilações ocorridas após atingir a condição de <i>flutter</i>	67
Figura 22 – Ilustração dos componentes de uma ponte suspensa	69
Figura 23 – Esquema estrutural de uma ponte suspensa	69
Figura 24 – Ponte suspensa Menai Strait	71
Figura 25 – Detalhe da disposição dos cabos de sustentação da ponte suspensa do Brooklyn	71
Figura 26 – Ponte estaiada Albert Bridge.....	73
Figura 27 – Componentes básicos de uma ponte estaiada	74
Figura 28 – Esquema estrutural de uma ponte estaiada	75

Figura 29 – Tipos de arranjo dos estais de uma ponte estaiada: (a) harpa, (b) leque, (c) semi-harpa e (d) assimétrica	75
Figura 30 – Localização da ponte suspensa <i>Great Belt East</i>	76
Figura 31 – Vista da ponte suspensa <i>Great Belt East</i>	77
Figura 32 – Localização da ponte estaiada <i>Sunshine Skyway</i>	78
Figura 33 – Vista da ponte estaiada <i>Sunshine Skyway</i>	78
Figura 34 – Relação entre o grau de modelagem e o custo computacional dos modelos de turbulência	82
Figura 35 – Ilustração do espectro de energia cinética turbulenta com a indicação do limite de separação imposto pelo filtro do modelo de submalha de Smagorinsky.....	87
Figura 36 – Partes real $F(K)$ e imaginária $G(K)$ da função de Theodorsen	92
Figura 37 – Representação esquemática dos graus de liberdade e forças aeroelásticas em uma placa plana	93
Figura 38 – Domínio computacional e condições de contorno adotadas nas simulações do escoamento ao redor do perfil em seção circular	100
Figura 39 – Ilustração da divisão do domínio computacional para discretização da malha	100
Figura 40 – Malha estruturada formada pelos parâmetros do <i>Grid 4</i> ($Re = 40$) para o domínio computacional das simulações do escoamento ao redor do perfil em seção circular.....	102
Figura 41 – Detalhe do refinamento da malha nas proximidades do perfil em seção circular do <i>Grid 5</i> ($Re = 1000$)	102
Figura 42 – Domínio computacional e condições de contorno adotadas na simulação do escoamento no entorno do perfil em seção quadrada	103

Figura 43 – Malha estruturada gerada para o domínio computacional das simulações do escoamento no entorno do perfil em seção quadrada	104
Figura 44 – Modelo seccional reduzido do tabuleiro da ponte estaiada <i>Sunshine Skyway</i>	105
Figura 45 – Domínio computacional e condições de contorno adotadas nas simulações do escoamento no entorno do modelo seccional reduzido do tabuleiro da ponte estaiada <i>Sunshine Skyway</i>	106
Figura 46 – Geometria do modelo seccional reduzido do tabuleiro da ponte estaiada <i>Sunshine Skyway</i>	106
Figura 47 – Malha gerada para as simulações do escoamento no entorno do tabuleiro em modelo seccional reduzido da ponte estaiada <i>Sunshine Skyway</i>	107
Figura 48 – Elevação, detalhe da torre e seção transversal da ponte suspensa <i>Great Belt East</i>	108
Figura 49 – Domínio computacional e condições de contorno adotadas nas simulações do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte suspensa <i>Great Belt East</i>	109
Figura 50 – Ilustração da divisão do domínio computacional para discretização da malha	110
Figura 51 – Malha estruturada formada pelos parâmetros do <i>Grid 5</i> para as simulações do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte suspensa <i>Great Belt East</i>	111
Figura 52 – Malha não estruturada gerada para as simulações do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte suspensa <i>Great Belt East</i> , com detalhe do refinamento no contorno do tabuleiro.....	113
Figura 53 – Respostas do campo de pressões, campo de velocidades e linhas de corrente para as simulações computacionais do escoamento ao redor do perfil em seção circular, $Re = 40$, modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST	115

Figura 54 – Resposta da simulação numérica apresentada em Braun (2007) para o campo de pressões e linhas de corrente do escoamento ao redor do perfil em seção circular, $Re = 40$	116
Figura 55 – Comparativo da distribuição temporal do coeficiente de arrasto C_D e do coeficiente de pressão c_p ao redor do perfil em seção circular para o escoamento com $Re = 40$, modelos de turbulência SST e LES	116
Figura 56 – Respostas do campo de pressões, campo de velocidades e linhas de corrente para as simulações computacionais do escoamento ao redor do perfil em seção circular, $Re = 1000$, modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST	117
Figura 57 – Resposta da simulação numérica apresentada em Braun (2007) para o campo de pressões e linhas de corrente do escoamento ao redor do perfil em seção circular, $Re = 1000$	118
Figura 58 – Comparativo da distribuição temporal do coeficiente de arrasto C_D e do coeficiente de sustentação C_L ao redor do perfil em seção circular para o escoamento com $Re = 1000$, modelos de turbulência SST e LES	118
Figura 59 – Respostas do campo de pressões, campo de velocidades e linhas de corrente para as simulações computacionais do escoamento no entorno do perfil em seção quadrada, $Re = 22000$, modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST	120
Figura 60 – Resposta da simulação numérica apresentada em Braun (2007) para o campo de pressões e linhas de corrente do escoamento no entorno do perfil em seção quadrada, $Re = 22000$	121
Figura 61 – Comparativo da distribuição temporal dos coeficientes de arrasto C_D e do coeficiente de sustentação C_L no entorno do perfil em seção quadrada para o escoamento com $Re = 22000$, modelos de turbulência SST e $k - \varepsilon$	121
Figura 62 – Gráfico dos coeficientes aerodinâmicos de arrasto C_D (a), sustentação C_L (b) e momento C_M (c) para diferentes ângulos de ataque do vento (α) da simulação ANSYS CFX com modelo de turbulência SST e das referências adotadas	125

Figura 63 – Gráfico do número de Strouhal (St) para os diferentes ângulos de ataque de vento (α) da simulação ANSYS CFX com modelo de turbulência SST e das referências adotadas.....	125
Figura 64 – Comparativo entre campos de velocidades para o escoamento no entorno do tabuleiro da ponte <i>Sunshine Skyway</i> com ângulo de incidência $\alpha = 0^\circ$ das simulações (a) ANSYS CFX com modelo de turbulência SST e (b) Mannini (2006) numérico.....	126
Figura 65 – Comparativo das respostas das linhas de corrente entre as simulações ANSYS CFX com modelo de turbulência SST e Mannini (2006) numérico.....	126
Figura 66 – Respostas do campo de velocidades e do campo de pressões para as simulações computacionais do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte <i>Great Belt East</i> para os modelos de turbulência LES, SST e $k - \varepsilon$	130
Figura 67 - Respostas das linhas de corrente para as simulações computacionais do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte <i>Great Belt East</i> para os modelos de turbulência LES, SST e $k - \varepsilon$	131
Figura 68 – Gráficos da distribuição temporal dos deslocamentos torcionais para os modelos de turbulência LES, SST e $k - \varepsilon$ para a série de velocidades reduzidas do vento	132
Figura 69 – (a) Curva do coeficiente de <i>flutter</i> A_2^* obtida através do método FOM e (b) curva da taxa de incremento/decaimento γ_d obtida através do método DM para as simulações no tabuleiro da ponte <i>Great Belt East</i> para o modelo de turbulência LES	135
Figura 70 – (a) Curva do coeficiente de <i>flutter</i> A_2^* obtida através do método FOM e (b) curva da taxa de incremento/decaimento γ_d obtida através do método DM para as simulações no tabuleiro da ponte <i>Great Belt East</i> para o modelo de turbulência SST	135
Figura 71 – (a) Curva do coeficiente de <i>flutter</i> A_2^* obtida através do método FOM e (b) curva da taxa de incremento/decaimento γ_d obtida através do método DM para	

as simulações no tabuleiro da ponte <i>Great Belt East</i> para o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ padrão	136
--	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escala Beaufort de classificação das características do vento	41
Tabela 2 – Subdivisões de escoamentos cisalhantes e principais características	59
Tabela 3 – Efeitos do vento nas estruturas	62
Tabela 4 – Caracterização do escoamento com desprendimento de vórtices ao redor de cilindros em relação ao número de Reynolds.....	65
Tabela 5 – Constantes das equações do modelo de turbulência $k - \varepsilon$ padrão.....	85
Tabela 6 – Constantes das equações do modelo de turbulência $k - \omega$ SST	87
Tabela 7 – Refinamento de malha para as simulações do escoamento ao redor do perfil em seção circular, com $Re = 40$	101
Tabela 8 – Refinamento de malha para as simulações do escoamento ao redor do perfil em seção circular, com $Re = 1000$	101
Tabela 9 – Constantes físicas e geométricas utilizadas nas simulações do escoamento ao redor do perfil em seção circular	103
Tabela 10 – Constantes físicas e geométricas utilizadas nas simulações do escoamento no entorno do perfil em seção quadrada	104
Tabela 11 – Constantes físicas e geométricas utilizadas nas simulações do escoamento no entorno do tabuleiro em modelo seccional reduzido da ponte estaiada <i>Sunshine Skyway</i>	107
Tabela 12 – Formação das malhas para estudo de independência de malha	110
Tabela 13 – Refinamento de malha para as simulações do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte <i>Great Belt East</i>	111

Tabela 14 – Constantes físicas e geométricas utilizadas no pré-processamento das simulações do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte suspensa <i>Great Belt East</i>	112
Tabela 15 – Constantes físicas e propriedades utilizadas nas simulações do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte <i>Great Belt East</i>	113
Tabela 16 – Dados de projeto utilizados nas simulações do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte <i>Great Belt East</i>	114
Tabela 17 – Resultados dos coeficientes aerodinâmicos (C_D , C_L e C_M), do número de Strouhal (St) e do nº de Courant para o escoamento ao redor do perfil em seção circular, $Re = 40$ e $Re = 1000$, modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST	119
Tabela 18 – Resultados dos coeficientes aerodinâmicos (C_D , C_L e C_M), do número de Strouhal (St) e do nº de Courant para escoamentos no entorno do perfil em seção quadrada, $Re = 22000$, modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST	122
Tabela 19 – Desempenho computacional apresentado nas simulações com os modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST para os escoamentos sobre os perfis em seção circular e seção quadrada.....	122
Tabela 20 – Resultados dos coeficientes aerodinâmicos (C_D , C_L e C_M) e número de Strouhal (St) para o escoamento no entorno do tabuleiro da ponte <i>Sunshine Skyway</i> , modelos de turbulência SST, LES e $k - \varepsilon$, ângulo de ataque do vento $\alpha = -5^\circ$	123
Tabela 21 – Resultados dos coeficientes aerodinâmicos (C_D , C_L e C_M) e número de Strouhal (St) para o escoamento no entorno do tabuleiro da ponte <i>Sunshine Skyway</i> , modelos de turbulência SST, LES e $k - \varepsilon$, ângulo de ataque do vento $\alpha = 0^\circ$	124
Tabela 22 – Resultados dos coeficientes aerodinâmicos (C_D , C_L e C_M) e número de Strouhal (St) para o escoamento no entorno do tabuleiro da ponte <i>Sunshine Skyway</i> , modelos de turbulência SST, LES e $k - \varepsilon$, ângulo de ataque do vento $\alpha = +5^\circ$	124

Tabela 23 – Resultados dos coeficientes aerodinâmicos (C_D , C_L e C_M) para o escoamento no entorno do tabuleiro da ponte <i>Great Belt East</i> , modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST, ângulo de ataque do vento $\alpha = -5^\circ$	128
Tabela 24 – Resultados dos coeficientes aerodinâmicos (C_D , C_L e C_M) para o escoamento no entorno do tabuleiro da ponte <i>Great Belt East</i> , modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST, ângulo de ataque do vento $\alpha = 0^\circ$	128
Tabela 25 – Resultados dos coeficientes aerodinâmicos (C_D , C_L e C_M) para o escoamento no entorno do tabuleiro da ponte <i>Great Belt East</i> , modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST, ângulo de ataque do vento $\alpha = +5^\circ$	128
Tabela 26 – Número de Strouhal para o escoamento no entorno do tabuleiro da ponte <i>Great Belt East</i> , modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST, ângulo de ataque do vento $\alpha = 0^\circ$	129
Tabela 27 – Desempenho computacional apresentado nas simulações com os modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST para os escoamentos sobre o modelo seccional fixo do tabuleiro da ponte <i>Great Belt East</i>	132
Tabela 28 – Resultados da análise da instabilidade aeroelástica do <i>flutter</i> para o tabuleiro da ponte <i>Great Belt East</i> , modelo de turbulência LES	134
Tabela 29 – Resultados da análise da instabilidade aeroelástica do <i>flutter</i> para o tabuleiro da ponte <i>Great Belt East</i> , modelo de turbulência SST	134
Tabela 30 – Resultados da análise da instabilidade aeroelástica do <i>flutter</i> para o tabuleiro da ponte <i>Great Belt East</i> , modelo de turbulência $k - \varepsilon$	134
Tabela 31 – Velocidades críticas de <i>flutter</i> dos modelos de turbulência LES, SST e $k - \varepsilon$ para os métodos FOM e DM	136
Tabela 32 – Velocidade crítica de <i>flutter</i> para o tabuleiro da ponte <i>Great Belt East</i> obtidas através de simulações numéricas	137

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CLA	Camada Limite Atmosférica
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
DM	<i>Direct Method</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FOM	<i>Free Oscillations Method</i>
GDL	Graus de Liberdade
IFE	Interação Fluido-Estrutura
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
MVF	Método dos Volumes Finitos
NBR	Norma Brasileira Recomendada
SGS	<i>Subgrid Scales</i>
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
RANS	<i>Reynolds Average Navier-Stokes</i>
WTC	<i>World Trade Center</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Gregas Maiúsculas

Γ_s	Região ou superfície na fronteira entre fluido e sólido
Δ	Largura do filtro
Δt	Passo de tempo
$\overline{\Omega}_f$	Domínio do fluido
$\overline{\Omega}_s$	Domínio do sólido

Letras Gregas Minúsculas

α	Ângulo de incidência do vento
$\ddot{\alpha}, \dot{\alpha}, \alpha$	Componente de deslocamento angular, primeira e segunda derivada
β	Constante empírica do modelo de turbulência
β^*	Constante empírica do modelo de turbulência
γ_d	Taxa de incremento/decaimento
γ^k	Amplitude de um período de oscilação
δ	Altura da camada limite
δ^*	Parâmetro de deslocamento da altura da camada limite
δ_{ij}	Tensor Delta de Kronecker
δ^{exp}	Decremento logarítmico médio
ε	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta
$\epsilon_{\%}$	Erro relativo
$\zeta_{\alpha,h}$	Taxa de amortecimento
ζ^{exp}	Amortecimento experimental
μ	Viscosidade dinâmica
ρ	Massa específica de um fluido
ρ_e	Massa específica de um fluido na borda externa da camada limite
σ_k	Coefficiente de difusão turbulenta do modelo de turbulência

σ_ε	Coeficiente de difusão turbulenta do modelo de turbulência
τ_p	Tensão de cisalhamento junto à parede de um sólido
$\overline{\tau_W}$	Tensor das tensões viscosas
τ_{ij}	Tensor de tensões cisalhantes, em notação indicial
ν	Viscosidade cinemática
ν_t	Viscosidade cinemática turbulenta
ω	Taxa de dissipação específica de energia cinética turbulenta
$\omega_{\alpha,h}$	Frequência circular natural

Letras Romanas Maiúsculas

A_i^*	Coeficiente de <i>flutter</i>
B	Comprimento do tabuleiro da ponte ou da placa plana
B_f	Número de Beaufort
C_D	Coeficiente de arrasto
C_L	Coeficiente de sustentação
C_M	Coeficiente de momento
$CD_{\kappa\omega}$	Termo de difusão cruzada
$C(K)$	Função de Theodorsen
$C_{1\varepsilon}$	Coeficiente empírico do modelo de turbulência
$C_{2\varepsilon}$	Coeficiente empírico do modelo de turbulência
C_μ	Coeficiente empírico do modelo de turbulência
C_s	Constante de Smagorinsky
D	Dimensão característica do perfil
F_D	Força de arrasto
F_L	Força de sustentação
F_1	Função de mistura
F_2	Função de mistura para a viscosidade turbulenta
$F(K)$	Parte real da função de Theodorsen
$G(K)$	Parte imaginária da função de Theodorsen
G	Função filtro
H_i^*	Coeficiente de <i>flutter</i>

$H_n^{(2)}$	Função de Henkel
Hz	Hertz
J_n	Função de Bessel de primeira ordem
K	Frequência reduzida
$L_{ae,h}$	Esforço aeroelástico na direção vertical
M_T	Momento torsor
$M_{ae,\alpha}$	Esforço aeroelástico do movimento torcional
p^k	Termo de produção de energia cinética turbulenta
Re	Número de Reynolds
Re_x	Número de Reynolds local
Re_T	Número de Reynolds Turbulento
St	Número de Strouhal
$\bar{S}_{ij}$	Tensor de deformação das escalas resolvidas
U	Velocidade do escoamento
U_0	Velocidade do escoamento fora da camada limite
U_R	Velocidade reduzida do escoamento
U_∞	Velocidade do escoamento não perturbada
Y_n	Função de Bessel de segunda ordem

Letras Romanas Minúsculas

a_1	Constante empírica do modelo de turbulência
b	Distância do centro elástico do perfil aerodinâmico
c_p	Coeficiente de pressão
cte	Constante
f	Frequência natural de vibração
f_v	Frequência de desprendimento de vórtices
$f_i^{s,f}$	Força de campo no domínio do sólido e do fluido, em notação indicial
$\ddot{h}, \dot{h}, h$	Componente de deslocamento vertical, primeira e segunda derivada
I	Momento de inércia por unidade de comprimento
k	Energia cinética turbulenta

km/h	Quilômetros por hora
l	Comprimento de uma placa plana
ℓ_s	Comprimento característico das escalas residuais
m	Massa por unidade de comprimento
m/s	Metros por segundo
kg/m^2	Quilograma força por metro quadrado
$\vec{n}$	Vetor unitário normal à superfície
p	Pressão
p_0	Pressão fora da camada limite
q	Pressão dinâmica
t	Variável de tempo
u	Velocidade do vento
u_e	Velocidade do escoamento na borda externa da camada limite
$u_{i,j}$	Componente da velocidade, em notação indicial
$\bar{u}$	Componente filtrada da velocidade
u'	Componente residual da velocidade
$\overline{u'_i u'_j}$	Tensor de Reynolds
x	Parâmetro variável de medida para o estudo de convergência de malha
y^+	Distância normal da superfície até a primeira camada da malha

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	OBJETIVOS	35
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	37
2	TÓPICOS SOBRE ENGENHARIA DO VENTO	38
2.1	A NATUREZA DO VENTO	38
2.2	INTERAÇÃO VENTO-ESTRUTURA	42
2.3	CONCEITOS INTRODUTÓRIOS SOBRE AERODINÂMICA	45
2.3.1	Camada limite	46
2.3.2	Sólidos aerodinâmicos e não aerodinâmicos	50
2.3.3	Coeficiente de pressão e coeficientes aerodinâmicos	52
2.4	ESCOAMENTOS TURBULENTOS	57
2.5	AEROELASTICIDADE	61
2.5.1	Aeroelasticidade dinâmica	64
2.5.1.1	Galope (<i>Galloping</i>)	64
2.5.1.2	Desprendimento de vórtices (<i>vortex shedding</i>)	64
2.5.1.3	Drapejamento (<i>Flutter</i>)	66
3	PONTES SUSPENSAS.....	68
3.1	PONTES PÊNSEIS	68
3.2	PONTES ESTAIADAS.....	72
3.3	MODELOS DAS PONTES UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES	76
3.3.1	Ponte <i>Great Belt East</i>.....	76

3.3.2	Ponte <i>Sunshine Skyway</i>	77
4	EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS	80
4.1	EQUAÇÕES GOVERNANTES DA DINÂMICA DOS FLUIDOS	80
4.2	MODELAGEM DA TURBULÊNCIA	80
4.2.1	Modelo $k - \varepsilon$ padrão	84
4.2.2	Modelo $k - \omega$ SST	85
4.2.3	Modelo LES Smagorinsky	87
4.3	CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO	90
4.4	EQUAÇÕES DO MOVIMENTO	90
4.5	<i>FLUTTER DERIVATIVES</i>	92
4.6	ANÁLISE AEROELÁSTICA DO <i>FLUTTER</i>	94
4.6.1	FOM (<i>Free oscillations method</i>)	94
4.6.2	DM (<i>Direct method</i>)	96
5	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	97
5.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE O <i>SOFTWARE</i> CFD	97
5.2	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES	98
5.3	ESTUDO DE CASO	98
5.3.1	Escoamento ao redor do perfil em seção circular	99
5.3.2	Escoamento no entorno do perfil em seção quadrada	103
5.3.3	Escoamento no entorno do tabuleiro da ponte estaiada <i>Sunshine Skyway</i>	104
5.3.4	Escoamento no entorno do tabuleiro da ponte suspensa <i>Great Belt East</i>	107

5.3.4.1	Seção rígida e indeslocável.....	109
5.3.4.2	Seção móvel com 2 GDL.....	112
5.4	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	114
5.4.1	Resultados do escoamento ao redor do perfil em seção circular ..	114
5.4.2	Resultados do escoamento no entorno do perfil em seção quadrada	119
5.4.3	Resultados do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte estaiada <i>Sunshine Skyway</i>	123
5.4.4	Resultados do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte suspensa <i>Great Belt East</i>	127
5.4.4.1	Seção rígida e indeslocável.....	127
5.4.4.2	Seção móvel com 2 GDL.....	132
6	COMENTÁRIOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS	138
6.1	PERFIS DE GEOMETRIA SIMPLES.....	138
6.1.1	Perfil de seção circular	138
6.1.2	Perfil de seção quadrada	139
6.2	MODELOS SECCIONAIS DE TABULEIROS DE PONTE.....	140
6.2.1	Modelo seccional reduzido da ponte estaiada <i>Sunshine Skyway</i> ..	140
6.2.2	Modelo seccional da ponte suspensa <i>Great Belt East</i>	141
6.2.2.1	Seção rígida e indeslocável.....	141
6.2.2.2	Seção móvel com 2 GDL.....	141
	REFERÊNCIAS.....	144

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento do comportamento relativo à ação do vento em estruturas com características arquitetônicas esbeltas e flexíveis, como o caso de pontes suspensas, pênséis ou estaiadas, vem sendo objeto de estudo de pesquisadores há algumas décadas. O intuito é fornecer aos engenheiros projetistas parâmetros confiáveis para a concepção e dimensionamento desse tipo de sistema estrutural.

Embora não haja no repositório de normas brasileiras instruções específicas tratando de pontes suspensas ou estaiadas, tais estruturas ainda devem atender a requisitos mínimos de projeto. Esses requisitos estão relacionados à capacidade de resistência, segurança, durabilidade e desempenho em serviço, conforme exigências do item 4.1 da ABNT NBR 7187/2003.

Com relação às cargas provenientes do vento, apesar de existir uma abordagem consolidada já há muitos anos na norma brasileira ABNT NBR 6123/1988, a referida norma fornece dados para a determinação das forças provenientes do vento apenas em estruturas de geometria bastante simplificada.

De forma análoga à norma de pontes, a NBR 6123 não oferece instruções específicas para análises mais aprofundadas em estruturas com formas geométricas externas mais arrojadas, como o caso das pontes suspensas e estaiadas, a despeito do caráter absolutamente complexo apresentado em determinados fenômenos de interação entre o vento e a estrutura que ocorrem nesse tipo de construção.

De acordo com Simiu e Scanlan (1996), 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. Na interação com o vento, a estrutura é submetida a um complexo sistema de forças aerodinâmicas, que em geral pode ser determinado utilizando-se análises teóricas, técnicas numéricas e métodos experimentais.

É de grande relevância e interesse da engenharia estrutural o estudo das características de um determinado escoamento natural. O passo inicial desse estudo é a aquisição de dados como a velocidade média do vento e as flutuações em torno da velocidade, juntamente com o conhecimento das demais propriedades

físicas do vento. Essas informações são essenciais para a definição do perfil vertical de velocidades médias, o que culmina em parte do estudo das solicitações estáticas do vento em uma estrutura, fundamental para a concepção do partido estrutural desse tipo de projeto.

Conforme Blessmann (2013), ao lado das solicitações estáticas do vento em uma estrutura que dependem da velocidade média do fluxo, surgem as chamadas ações dinâmicas do vento. Essas ações são decorrentes da energia cinética presente nas flutuações em torno da velocidade média e da distribuição da energia contida na sequência de rajadas de vento em contato com uma estrutura.

Em estruturas esbeltas e flexíveis, principalmente aquelas com baixas frequências naturais de vibração ($f < 1,0$ Hz) os efeitos dinâmicos da ação do vento devem ser considerados, identificados e quantificados, (BLESSMANN, 2005), evitando-se assim consequências indesejáveis de 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. Isso torna a investigação da turbulência um dos mais desafiadores campos de pesquisa da dinâmica dos fluidos, tendo em vista a identificação de comportamento aleatório e irregular no escoamento turbulento (SILVEIRA NETO, 2002; POPE, 2000; FREIRE, 1993; 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 abordagens da engenharia, a dinâmica dos sólidos e a dinâmica dos fluidos. 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.

Problemas relacionados à IFE ocorrem em diversos segmentos da indústria como a aeronáutica, a mecânica e a engenharia civil. No âmbito da engenharia civil se notam inúmeras aplicações práticas desses conceitos em seguimentos como, conforto térmico e acústico, escoamento em canais, vertedouros e barragens, além da ação do vento em estruturas de edifícios e pontes.

Para o caso específico das pontes suspensas, estudos relacionados à aerodinâmica de estruturas têm se destacado tanto no meio científico e acadêmico quanto nas empresas e escritórios responsáveis pelos projetos estruturais.

Com isso, ao engenheiro projetista torna-se primordial o conhecimento das teorias e técnicas de solução para problemas relacionados à aerodinâmica e aeroelasticidade em pontes suspensas e estaiadas.

Os esforços aerodinâmicos devidos ao movimento do tabuleiro da ponte sob ação do vento produzem vibrações autoexcitadas em determinadas velocidades do vento. Esses esforços são chamados aeroelásticos, cujas vibrações podem ser amortecidas ou divergentes, induzindo ao movimento da estrutura um comportamento estável ou instável, respectivamente (RIGHI, 2003).

Para se distinguir entre os esforços aeroelásticos e ações dinâmicas de vento, o primeiro pode ser descrito como fenômeno no qual os esforços aerodinâmicos e os movimentos estruturais interagem de forma significativa. Outra definição sobre a distinção dos fenômenos é apresentada por Blispinghoff (1955) em que para um corpo em repouso todas as ações aeroelásticas devem desaparecer.

A aeroelasticidade, inicialmente 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 do século passado. No entanto, as publicações mais consistentes com a introdução formal das teorias acerca da aeroelasticidade foram atribuídas ao engenheiro aeronáutico H. Roxbee Cox e o engenheiro civil A. G. Pugsley, em 1932.

Atualmente os conceitos sobre aeroelasticidade são empregados em diversos ramos da engenharia, com destaque para as recentes aplicações em estruturas civis. De acordo com Hallak (2002) e Pfeil (1993) os fenômenos aeroelásticos mais comuns são:

- a) divergência torcional: acréscimo quase estático do movimento de rotação do tabuleiro de uma ponte à partir da ocorrência de uma determinada velocidade do vento chamada de crítica;
- b) instabilidade aeroelástica de drapejamento (*flutter*) ou galope (*galloping*): oscilações com amplitudes crescentes impostas pelas forças do vento excitadas pelo próprio movimento do tabuleiro da ponte, após uma condição crítica ser alcançada;
- c) vibrações induzidas por emissão de vórtices: ocorrência de vibração devido à ressonância com desprendimento de vórtices alternados na esteira do fluxo;
- d) vibrações induzidas por turbulência: vibração no tabuleiro causada pela turbulência característica de um fluxo de vento.

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.

Com a velocidade do vento em torno de 67 km/h (aprox. 18,61 m/s), o tabuleiro da ponte *Tacoma Narrows* apresentou excessivas oscilações com amplitudes divergentes no acoplamento dos movimentos de flexão e de torção, induzindo ao rompimento dos cabos de sustentação do tabuleiro e em seguida ao colapso total da estrutura, conforme ilustra as imagens da Figura 1.

Figura 1 – Ponte *Tacoma Narrows*: (a) movimento torcional; (b) movimento flexional e (c) instante do colapso da ponte

(a)

(b)

(c)

Fonte: <<http://www.lib.washington.edu/specialcollections/collections/exhibits/tnb>> Acesso em 8 de Janeiro de 2017.

Nos meses subsequentes ao colapso da ponte *Tacoma Narrows*, diversos estudos foram realizados no intuito de se obter entendimento sobre o incidente ocorrido. Dentre os estudos, se destacam o relatório elaborado por Amman, von Kármán e Woodruff (1941) sobre as causas do colapso da ponte e os ensaios experimentais realizados em túnel de vento que foram liderados pelo professor Farquharson para obtenção de dados utilizados na reconstrução da ponte.

É importante ressaltar que, embora a ponte tenha sofrido o colapso com velocidade do vento em torno dos 67 km/h (18,61 m/s), a estrutura construída deveria suportar a uma carga estática do vento correspondente a velocidade de 161 km/h (44,72 m/s), evidenciando que tal velocidade crítica não considerou o efeito das instabilidades aeroelásticas no tabuleiro da ponte (FUNG, 1993).

O acidente com a ponte *Tacoma Narrows* demonstrou a importância do conhecimento sobre a vulnerabilidade de tabuleiros de pontes suspensas e estaiadas à ação de vento. Entre as instabilidades admitidas para o colapso da ponte está o fenômeno aeroelástico do *flutter*, cujas instabilidades dinâmicas implicam em significativas oscilações divergentes que podem levar uma estrutura leve, flexível e com baixa rigidez estrutural ao colapso (MANNINI, 2006).

Com o intuito de evitar acidentes como o da ponte de *Tacoma*, as análises prévias incluindo simulações e ensaios experimentais em protótipos enquadram-se como procedimentos fundamentais no intento de efetivamente prevenir eventuais falhas no modelo estrutural antes da sua concepção definitiva.

Nesse contexto, 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. Um túnel de vento é uma instalação destinada a gerar uma corrente de ar de forma sistemática e controlada, cujo objetivo é a determinação experimental de parâmetros do escoamento, apresentando dados como velocidades, pressões, deslocamentos e vibrações (GORECKI, 1988).

Conforme Nuñez, Loredou-Souza e Rocha (2012), a determinação experimental visa auxiliar a compreensão do comportamento entre o sólido e um fluido em movimento, principalmente quando não há referências ou informações disponíveis para esta

interação. Em muitas situações em um passado recente, o túnel de vento apresentava-se como a única alternativa para tal demonstração.

O primeiro túnel de vento que se tem registro na história foi projetado e operado por Francis Hebert Wenham em 1871 para fins aeronáuticos. Desde então, inúmeras instalações similares foram projetadas na Europa e Estados Unidos, impulsionando as pesquisas no campo da dinâmica dos fluidos. Nesse campo, destacam-se: os experimentos realizados por Osborne Reynolds (1883) para identificação da transição do regime laminar para o regime turbulento; desenvolvimento da teoria da camada limite (LUDWIG e PRANDTL, 1904); contribuições sobre aerodinâmica (von KÁRMÁN; BURGERS, 1935) e o estudo da vorticidade e turbulência (von KÁRMÁN, 1937).

Para estruturas utilizadas em engenharia civil, os primeiros ensaios em túnel de vento foram realizados no século passado nos Estados Unidos, onde se destacam os testes efetuados na década de 60 no túnel de vento da Universidade do Estado do Colorado (Figura 2), em virtude da construção das torres WTC 1 e WTC 2 do complexo World Trade Center na cidade de Nova York, construídas entre os anos de 1966 e 1973.

Figura 2 – Modelo aeroelástico das torres do World Trade Center no túnel de vento para ensaio experimental em 1964

Fonte: <<http://www.alumni.westernu.ca>> Acesso em 20 de janeiro de 2017.

Porém, na investigação experimental, apesar das medições em modelos em escala reduzida ou em escala real apresentarem resultados confiáveis, sua realização é de alto custo e demanda muito tempo (ARMALY *et al.*, 1983; BUSH *et al.*, 2006; entre outros).

Ao lado das análises experimentais, a utilização de métodos computacionais para a predição quantitativa das características de um dado escoamento ou de uma interação fluido-estrutura vem crescendo exponencialmente nos últimos anos (MALISKA, 2014). Com o grande avanço da tecnologia computacional e das técnicas numéricas tornaram-se possíveis a modelagem e simulação de inúmeros problemas complexos em diversas áreas da engenharia, como é o caso de problemas envolvendo a interação fluido-estrutura.

A dinâmica dos fluidos computacional ou *Computational Fluid Dynamics* (CFD) é uma das áreas da fluidodinâmica em que se empregam métodos numéricos para obtenção da solução das equações que governam o escoamento de fluidos, como no caso das equações da continuidade, Navier-Stokes e da conservação de energia (FORTUNA, 2012).

Em termos históricos, o surgimento do CFD está associado à publicação de Richardson (1910), que propôs a solução numérica da equação de Laplace através de um método iterativo de Jacobi, apresentando um adequado tratamento das condições de contorno. Outro importante marco na trajetória de evolução do CFD ocorreu em meados dos anos 70 com desenvolvimento de pesquisas acerca de modelos de turbulência e aplicação da técnica para fluidos compressíveis.

Figura 3 – Modelo seccional do tabuleiro de uma ponte submetida a um fluxo de vento

Fonte: Simonsen e Stevens (2008).

Entre os resultados oferecidos pela solução numérica das equações governantes estão os campos de velocidade, pressão e linhas de corrente do escoamento em todo o domínio do espaço e do tempo, conforme ilustrado na Figura 3. CFD

complementa as abordagens analíticas e os testes em laboratório quando esses não apresentarem resultado consistente e satisfatório aos fenômenos físicos estudados (BATCHELOR, 1991; FOX E MCDONALD, 1995).

Com base nesse contexto, observa-se que é de grande relevância o desenvolvimento de um estudo numérico-computacional da ação e efeito do vento incidente em estruturas. Há um amplo campo de pesquisas tanto para desenvolvimento e implementação de novas ferramentas de dinâmica dos fluidos computacional quanto para validação e utilização de programas existentes.

No caso específico das estruturas de pontes suspensas e estaiadas também há grandes desafios na interpretação e entendimento do comportamento desses sólidos quando em interação com um fluido. Como exemplo, pode-se citar o estudo dos modelos de turbulência adequados ao fenômeno de interação entre o vento e a ponte e a definição da velocidade crítica do vento para iminência de instabilidades aeroelásticas, como o *flutter*, por exemplo.

A principal motivação deste trabalho se fundamenta na aplicação de tecnologias computacionais desenvolvidas para engenharia civil na área da dinâmica dos fluidos, visando oferecer sua parcela de contribuição no iminente campo de estudos da engenharia do vento (*Wind Engineering*) com ênfase na ação do vento em estruturas de pontes suspensas e na análise de modelos de turbulência.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo deste trabalho foi investigar o comportamento do vento sobre seções transversais de pontes via simulação em CFD com o intuito de calcular os coeficientes aerodinâmicos, número de Strouhal e a velocidade crítica de *flutter* inerentes da interação vento-estrutura. No entanto, algumas deficiências aparecem quando se pretende trabalhar com esses problemas. Em geral, os escoamentos são turbulentos com números de Reynolds elevados, o que faz necessário o uso de um modelo de turbulência. Dessa forma, é de suma importância 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. Nesse sentido, foram investigados os modelos $k - \varepsilon$

padrão, $k - \omega$ SST (*Shear Stress Transport*) e LES (*Large Eddy Simulation*) de Smagorinsky.

Na primeira etapa, com vistas à ancoragem do conhecimento sobre os parâmetros e configurações da ferramenta computacional, desenvolveu-se uma série de simulações de interação fluido-estrutura *one-way*, cuja estrutura foi um corpo rígido e indeslocável, o qual apresenta uma seção transversal formada por geometrias simples, como seção circular e seção quadrada. O propósito desta etapa foi determinar os coeficientes aerodinâmicos de arrasto, sustentação e momento, além de estudar casos de vibração induzida por vórtices, com a apresentação dos parâmetros para determinação do número de Strouhal, como a frequência de desprendimento de vórtices.

Na segunda etapa trabalho, deu-se início ao estudo com modelos de pontes estaiadas e suspensas. O primeiro modelo de ponte analisado foi o da ponte estaiada *Sunhine Skyway* localizada nos Estados Unidos. Para esse modelo de ponte foi feito uma análise aerodinâmica para a obtenção dos coeficientes aerodinâmicos e número de Strouhal, considerando o fluxo do vento com variação do ângulo de incidência do vento na ponte. Nesse estudo, o modelo seccional do tabuleiro da ponte também foi considerado fixo, sem deslocamentos. Além disso, nas simulações foram adotados os modelos de turbulência LES, $k - \omega$ SST e $k - \varepsilon$ padrão.

Continuando a análise dos modelos de pontes, a terceira etapa consistiu na investigação do fenômeno de instabilidade de drapejamento ou *flutter*, juntamente com a análise de aplicação dos modelos de turbulência LES, $k - \omega$ SST e $k - \varepsilon$ padrão. Para essa etapa, o modelo de ponte adotado foi o da seção transversal do tabuleiro da ponte suspensa *Great Belt East*, localizada na Dinamarca. Primeiramente, considerou-se a seção do tabuleiro da ponte como sendo fixa (simulação *one-way*) em que foram analisados os coeficientes aerodinâmicos (arrasto, sustentação e momento) e o número de Strouhal, adotando os três modelos de turbulência.

Na sequência, atribuiu-se ao modelo seccional da ponte dois graus de liberdade (2 GDL) para deslocamento translacional no eixo vertical e deslocamento torcional no

eixo normal ao plano da seção transversal. O objetivo aqui foi de analisar os históricos de deslocamentos verticais e torcionais para obtenção da velocidade crítica do vento que incide sobre a ponte para o fenômeno de *flutter*. Para as simulações desse caso, também foram adotados os três modelos de turbulência e com o intuito de avaliar e comparar os parâmetros aeroelásticos de resposta da ponte.

As respostas obtidas das simulações computacionais dos modelos geométricos da seção circular, seção quadrada e as seções das pontes *Sunhine Skyway* e *Great Belt East*, foram comparados com resultados numéricos e experimentais disponíveis na literatura.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação foi estruturada para uma concisa apresentação sobre o tema proposto e encontra-se dividida nos seguintes capítulos:

- capítulo 2: são abordados alguns importantes tópicos e definições acerca da engenharia do vento, interação vento-estrutura, aerodinâmica, escoamentos turbulentos e aeroelasticidade;
- capítulo 3: exposição sobre as definições e termos relevantes relacionados às pontes suspensas, juntamente com a indicação dos modelos das pontes utilizadas nas simulações computacionais;
- capítulo 4: trata das equações governantes da dinâmica dos fluidos, dos modelos de turbulência, da dinâmica das estruturas e da análise aeroelástica;
- capítulo 5: destaca-se o desenvolvimento das simulações, apresentando o *software* de CFD e as configurações dos ensaios computacionais realizados em todas as etapas da pesquisa juntamente com os seus respectivos resultados;
- capítulo 6: são feitas algumas considerações sobre os resultados dos ensaios computacionais e são apontadas as conclusões do trabalho.

2 TÓPICOS SOBRE ENGENHARIA DO VENTO

O campo de estudos da engenharia do vento tem como premissa lidar com o vento e seus efeitos nas atividades humanas e no meio ambiente em geral, como no caso da interação entre os fluxos de vento ocorridos dentro da camada limite atmosférica e o ambiente urbano construído (CERMAK, 1975). A determinação da ação do vento e consequente mitigação dos seus efeitos em edificações, estruturas de pontes e demais instalações na superfície terrestre é uma das principais contribuições que a engenharia do vento pode proporcionar.

A aplicação de diversas teorias consolidadas tanto na dinâmica dos fluidos quanto na dinâmica das estruturas possibilitou uma grande evolução da engenharia do vento. Da mesma forma que o CFD, que é uma das principais aplicações da engenharia do vento atualmente, o aperfeiçoamento dos métodos numéricos e o avanço da tecnologia computacional permitiu a incorporação do viés computacional à engenharia do vento, estabelecendo uma recente e promissora área de pesquisas denominada engenharia do vento computacional (BRAUN, 2007).

2.1 A NATUREZA DO VENTO

O vento natural é definido como o movimento do ar sobre a superfície terrestre que se origina através das variações na temperatura das massas de ar e consequentes oscilações da pressão atmosférica e pelo processo de radiação solar. (BLESSMANN, 2013).

Esse movimento de massas de ar, de acordo com Simiu e Scanlan (1996), pode ser descrito qualitativamente pela superposição de fluxos de ar interdependentes e caracterizados por escalas de comprimento que variam de poucos milímetros até milhares de quilômetros.

Com intuito de analisar tais fluxos, classificam-se os movimentos de massas de ar atmosférico através de escalas meteorológicas horizontais, cujos grupos se subdividem em micro escala, meso escala e macro escala, definidos a seguir:

- a) micro escala: é a menor escala na ordem de importância meteorológica, cujos movimentos tem dimensões entre 1 metro e 1

quilômetro e a duração varia de 1 segundo até 1 hora. Nessa escala estão classificados, por exemplo, os processos de formação de gotas de chuva, a dispersão de poluentes, entre outros;

- b) meso escala: o movimento do ar tem dimensões variando de 1 à 100 quilômetros e com duração de 1 hora até 1 dia. Nessa escala estão relacionados os fenômenos como tornados, tempestades, conjunto ou sistemas de nuvens, ilhas de calor ou brisas;
- c) macro escala: são os fenômenos que mais afetam o cotidiano, apresentando dimensões acima de 100 quilômetros e durações maiores do que 1 dia. Estão enquadrados nessa categoria as frentes frias, furacões e ciclones.

No estudo dos aspectos meteorológicos do vento, usualmente dividem-se as componentes do vento na direção horizontal (norte/sul e leste/oeste) e na direção vertical (movimentos ascendente e descendente).

Muito embora a componente vertical tenha destaque no campo de estudos da meteorologia, para a observação dos fenômenos climáticos de formação de chuvas e precipitações, a componente horizontal do vento apresenta informações importantes sobre o mecanismo termodinâmico do ar atmosférico. Diante disso, essa componente é de grande relevância para o estudo da engenharia do vento, cujas implicações são observadas em diversas áreas de estudo, como no caso dos projetos de estruturas submetidos a um determinado fluxo de ar (OKE, 1987).

Na análise da componente horizontal do vento cabe listar as forças atuantes sobre as massas de ar e que constituem a mecânica do movimento do ar atmosférico:

- força do gradiente de pressão;
- força de Coriolis;
- força centrífuga;
- força de atrito;
- força gravitacional.

No âmbito do projeto de estruturas submetidas à ação do vento, é de grande importância o conhecimento de algumas características do vento como, sua velocidade média e as flutuações com gradientes de velocidade. Essas flutuações se originam principalmente na agitação do fluxo de ar causado por interferências ou rugosidades, naturais ou artificiais, presentes na superfície da terra (BLESSMANN, 2013).

Em vista disso, a informação sobre a intensidade do vento adquire grande interesse principalmente no estimativo da força do vento correspondente à sua velocidade. Com intuito de estabelecer uma correlação entre as características do vento e a sua respectiva velocidade e efeitos na superfície terrestre, no início do século XIX foi criada a escala Beaufort. Essa escala classifica a intensidade dos ventos e os seus efeitos no mar e na terra.

A Tabela 1 apresenta os níveis de classificação, cuja equivalência com a velocidade do vento obedece a seguinte equação:

$$u = 0,836 B_f^{\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

em que u é a velocidade do vento em [m/s] a 10 metros da superfície e B_f é o número de Beaufort.

De acordo com Burton *et al.* (2011), tanto no aspecto geográfico quanto no aspecto temporal, uma das características mais marcantes do vento como um recurso natural é a sua variação.

Na macro escala a variação espacial descreve o fato de que há várias diferenças climáticas entre regiões ao redor do planeta, conseqüentemente há muito mais ventos em algumas localidades do que em outras.

Na micro escala e dentro de uma específica região climática, a variação é estabelecida pelas configurações geográficas e topográficas da localidade como, a proximidade com o oceano, a proporção entre oceano e a superfície territorial. Além dessas configurações, existe ainda a presença extensiva de vegetação e acidentes geográficos como, montanhas, depressões, planícies e vales, entre outras.

Também dentro da micro escala, a forte presença de vegetação de médio e grande porte como, árvores ou mesmo as construções podem alterar a trajetória e reduzir significativamente a velocidade do vento.

Tabela 1 – Escala Beaufort de classificação das características do vento

B_f	Designação	m/s	km/h	Efeitos na superfície
0	<i>Calmo</i>	<0,3	<1	Fumaça sobe na vertical
1	<i>Aragem</i>	0,3 a 1,5	1 a 5	Fumaça indica a direção do vento
2	<i>Brisa leve</i>	1,6 a 3,3	6 a 11	Folhas de árvores se movem; moinhos começam a trabalhar
3	<i>Brisa fraca</i>	3,4 a 5,4	12 a 19	Folhas de árvores se agitam e bandeiras tremulam ao vento
4	<i>Brisa moderada</i>	5,5 a 7,9	20 a 28	Poeira e pequenos papéis levantados; movem-se os galhos das árvores
5	<i>Brisa forte</i>	8,0 a 10,7	29 a 38	Movimentação de grandes galhos e árvores pequenas
6	<i>Vento fresco</i>	10,8 a 13,8	39 a 49	Movem-se os ramos das árvores; dificuldade em manter o guarda chuva aberto; ruído em fios de postes
7	<i>Vento forte</i>	13,9 a 17,1	50 a 61	Movem-se as árvores grandes; dificuldade em andar contra o vento
8	<i>Ventania</i>	17,2 a 20,7	62 a 74	Quebram-se galhos de árvores; dificuldade em andar contra o vento; barcos permanecem nos portos
9	<i>Ventania forte</i>	20,8 a 24,4	75 a 88	Danos em árvores e pequenas construções; impossível andar contra o vento
10	<i>Tempestade</i>	24,5 a 28,4	89 a 102	Árvores arrancadas; danos estruturais em construções
11	<i>Tempestade violenta</i>	28,5 a 32,6	103 a 117	Estragos generalizados em construções
12	<i>Furacão</i>	>32,7	>118	Estragos graves e generalizados em construções

Fonte: <https://www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo/refer/escala_beaufort.htm> Acesso em 20 de janeiro de 2017.

A representação da carga proveniente do vento em uma estrutura apresenta alta complexidade na sua modelagem matemática, posto que o fenômeno possui comportamento não determinístico. E, é para essa representação que podem ser

empregados métodos probabilísticos para determinação da carga do vento com maior confiabilidade e segurança.

2.2 INTERAÇÃO VENTO-ESTRUTURA

Se um determinado sólido se encontra posicionado no caminho do fluxo de vento e sua trajetória sofre significativas alterações, percebe-se que houve uma interação de forças entre a massa de ar e a superfície do sólido. A intensidade desta interação estará diretamente relacionada com algumas características físicas e geométricas tanto do escoamento quanto do sólido.

Informações acerca da forma geométrica e da rugosidade na superfície do corpo, bem com a velocidade do vento, o ângulo de incidência do fluxo de ar na estrutura e a viscosidade do fluido são parâmetros essenciais para se quantificar a efetiva ação do vento em uma estrutura.

A rigor, a interação entre vento e estrutura é classificada como uma interação fluido-estrutura (IFE) externa, juntamente com outras aplicações de interação como, a análise de escoamentos ao redor de construções, *risers* oceânicos, IFE em aeromodelos ou automóveis e estudos em turbinas eólicas de geração de energia, entre outros.

A IFE envolve o acoplamento entre dois diferentes domínios, o do fluido e o da estrutura, em uma determinada interface através da imposição de condições iniciais e condições de contorno específicas, em que ambos os meios sofrem um processo de discretização do seu domínio para análise matemática do seu comportamento. No estudo dessa interação, a solução do problema em dinâmica dos fluidos é transferida para o campo da dinâmica estrutural, as físicas são acopladas e, as respostas do sistema são apresentadas.

Esse fenômeno é caracterizado por uma sequência de iterações na solução numérica, as quais podem ser estáveis (convergentes) ou oscilatórias (divergentes), de acordo com o movimento ou deformação da estrutura que se encontra imersa no escoamento do fluido.

Se os deslocamentos ou deformações na estrutura são muito pequenos e suas variações no tempo são relativamente lentas, o comportamento do escoamento não será significativamente afetado. A solução do problema se ocupa somente com as tensões resultantes no sólido. Esse tipo de solução de interação fluido-estrutura é conhecido como *one-way*.

No entanto, se as deformações na estrutura são mais relevantes e os campos de pressão e velocidade do fluido sofrem alterações em decorrência dessas, então o problema deve ser tratado como uma análise bidirecional acoplada. Neste caso, o escoamento e o respectivo campo de pressão afetam as deformações estruturais e estas por sua vez afetam o movimento do fluido, na qual se tem uma interação *two-way*. O fluxograma apresentado na Figura 4 ilustra o processo de solução para um (a) acoplamento *one-way* e um (b) acoplamento *two-way*.

Figura 4 – Fluxograma do algoritmo para solução de problemas de IFE (a) *one-way* e (b) *two-way*

(a) acoplamento *one-way*

(b) acoplamento *two-way*

Durante a modelagem de uma IFE, para a determinação dos campos de velocidade e pressão é importante caracterizar adequadamente no método numérico as propriedades da interface de contato (Γ_s) e dos meios fluido ($\bar{\Omega}_f$) e sólido ($\bar{\Omega}_s$) (Figura 5). É possível determinar também deslocamentos e deformações entre os meios no sistema acoplado. Nas fronteiras ou contornos do domínio, condições específicas também são estabelecidas para solução do problema através das equações do método numérico aplicado.

Figura 5 – Ilustração dos domínios fluido e sólido e da interface de contato em uma IFE

Fonte: Hou, Wang e Layton (2012).

Os procedimentos numéricos para modelagem e solução de problemas de IFE são classificados em duas abordagens distintas, a monolítica e a particionada (HOU *et al*, 2012).

A abordagem monolítica trata a dinâmica dos fluidos e a dinâmica estrutural em um mesmo arranjo matemático para que seja formado um sistema simples de equações para todos os domínios simultaneamente. Adotando condições implícitas nas interfaces e com a utilização de um algoritmo unificado que, embora possa demandar maior esforço no desenvolvimento do código, permite que a abordagem alcance significativa precisão para problemas multidisciplinares.

Por sua vez, o método particionado procede com a IFE utilizando dois domínios computacionais que são resolvidos separadamente com as suas respectivas malhas e algoritmo numérico próprio, adotando condições explícitas nas interfaces entre o fluido e a estrutura. A vantagem no uso desta abordagem é reduzir o esforço no desenvolvimento do código, podendo direcionar o algoritmo para a solução de complexos modelos físicos de fluido-estrutura.

A Figura 6 ilustra de forma básica a sequência de solução do algoritmo para a abordagem monolítica e particionada.

Figura 6 – Fluxograma de solução de uma IFE nas abordagens (a) monolítica e (b) particionada

Fonte: Hou, Wang e Layton (2012).

2.3 CONCEITOS INTRODUTÓRIOS SOBRE AERODINÂMICA

A aerodinâmica é uma ciência aplicada proveniente da dinâmica dos fluidos e que trata do estudo do movimento de fluidos gasosos considerando suas propriedades físicas e relacionando-os com os sólidos imersos no escoamento e suas respectivas forças.

De forma geral, a aerodinâmica apresenta uma grande quantidade de aplicações industriais e de engenharia em diversos segmentos. Para o caso específico da engenharia civil, a aerodinâmica pode contribuir na determinação da força do vento atuante em construções como, altos edifícios, galpões, torres de linhas de transmissão e estruturas de pontes suspensas e estaiadas.

De acordo com Anderson (2001), para um estudo introdutório de aerodinâmica a conceituação básica envolvida no entendimento dos seus fenômenos físicos e definições matemáticas demandam o conhecimento prévio das chamadas variáveis fundamentais, ou seja, a pressão, a densidade do fluido, a temperatura e a velocidade do escoamento.

Além dessas, é imprescindível o conhecimento de alguns conceitos e definições relacionados à camada limite (*boundary layer*), aos coeficientes aerodinâmicos de arrasto (*drag*), de sustentação (*lift*) e de momento (*moment*), ao coeficiente de pressão e a outros parâmetros relacionados ao fluido e ao escoamento, como os números adimensionais de Reynolds (Re) e Strouhal (St).

2.3.1 Camada limite

O conceito de camada limite foi inicialmente introduzido por Prandtl (1904) e estabelece as condições de um fluido escoando sobre uma superfície estacionária, seja obstáculo ou parede.

A definição de camada limite trata da modificação no padrão de um escoamento a altos números de Reynolds, invíscido e irrotacional, imposta pela condição de não escorregamento (*no-slip*) na superfície de um obstáculo estacionário, rígido e impermeável (SCHLICHTING, 1979).

A camada limite apresenta espessura (δ) relativamente pequena em relação à direção normal da superfície do obstáculo adjacente e tende a cobrir toda sua extensão. A espessura da camada limite vai crescendo a partir de zero quando o fluido inicia o movimento sobre a superfície. Além disso, a velocidade do fluido aumenta a partir do repouso na parede até alcançar um valor máximo no fluxo livre, que ocorre acima de uma determinada altura (δ) da camada limite. Essa velocidade é definida por:

$$u = 0,99 u_e, \quad (2)$$

em que u_e é a velocidade na borda externa da camada limite e sabendo-se que a velocidade fora da camada limite é U_∞ , portanto $u_e = U_\infty$.

Dessa maneira, dentro da região da camada limite, a variação de u desde a parede do obstáculo ($y = 0$) até a altura da camada limite ($y = \delta$) é dada por $u = u(y)$. Essa variação é conhecida como perfil de velocidade, conforme ilustrado na Figura 7. É importante mencionar que, para $y = 0$ a tensão de cisalhamento é nula devido à condição de não escorregamento (*no-slip*).

Figura 7 – Perfil de velocidade em um escoamento bidimensional sobre uma superfície sólida plana

Fonte: Sleight (2001).

Considerando um escoamento de velocidade U_∞ no entorno de uma placa fina de comprimento finito “ l ” (Figura 8) e um fluxo que apresenta um número de Reynolds elevado, os efeitos da viscosidade restringem-se a uma região estreita próxima à parede da placa.

Figura 8 – Escoamento sobre placa plana

Fonte: Fitzpatrick (2015).

A espessura da camada limite vai apresentando um deslocamento no eixo vertical, aumentando seu valor ao passo que os valores do comprimento da placa crescem. Esse deslocamento é determinado através da equação:

$$\delta^* = \int_0^{y_1} \left(1 - \frac{\rho u}{\rho_e u_e} \right) dy, \quad (3)$$

sendo δ^* definido como o parâmetro de deslocamento da espessura da camada limite.

Ao tratarmos da camada limite laminar definida para escoamentos incompressíveis, considerando que a solução das equações seja obtida por similaridade, a espessura da camada limite fica caracterizada por:

$$\delta = \frac{5,0 x}{\sqrt{Re_x}}, \quad (4)$$

em que Re_x é o número de Reynolds local no escoamento.

Por sua vez, a espessura da camada limite turbulenta para um escoamento incompressível é dada por:

$$\delta = \frac{0,37 x}{Re_x^{1/5}}. \quad (5)$$

Comparando as Eqs. (4) e (5) pode-se concluir que os valores de δ crescem significativamente mais rápido na camada limite turbulenta, posto que para o regime turbulento δ é proporcional a $x^{4/5}$ enquanto no regime laminar δ é proporcional a $x^{1/2}$ (ANDERSON, 2001).

Ambas as camadas limites laminar e turbulenta apresentam estruturas bastante distintas, pois se na camada limite laminar prevalecem os termos viscosos, na camada limite turbulenta existe predominância das tensões turbulentas. A Figura 9 ilustra as camadas limites laminar e turbulenta para um escoamento sobre uma placa plana.

Figura 9 – Estágios de formação da camada limite em um escoamento sobre placa plana

Fonte: Sleight (2001).

O fenômeno conhecido como separação da camada limite surge em um determinado corpo sólido imerso em um escoamento quando esse fluxo apresenta alto número de Reynolds e escoamento irrotacional no contorno do sólido, como é o caso do cilindro apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Separação da camada limite

Fonte: Fitzpatrick (2015).

Na Figura 10 pode-se observar que, à montante do escoamento, a camada limite encobre a parte frontal do cilindro, e existe um ponto de estagnação do fluxo, onde a velocidade local é nula. Quando a camada limite sofre um substancial acréscimo na sua espessura a partir de uma determinada posição tem-se o ponto de separação. E nota-se que na parte posterior do cilindro, à jusante do escoamento, surge uma região de esteira cuja dimensão ultrapassa o diâmetro do cilindro (FITZPATRICK, 2005).

Figura 11 – Detalhe do ponto de separação da camada limite

Fonte: adaptada de Freire (1990).

No interior da camada limite, os gradientes de pressão são positivos e crescentes no mesmo sentido do escoamento, favorecendo a convergência das linhas de corrente e minimizando a ação das forças viscosas, conforme ilustra a Figura 11.

No entanto, quando o gradiente de pressão se torna adverso, a ação viscosa na camada é reforçada e as linhas de corrente passam a ter comportamento divergente. E, quando a tensão de cisalhamento assume valor nulo na superfície, inicia-se a separação.

Em alguns modelos de sólidos como os aerofólios pode ocorrer uma separação da camada limite laminar a baixos números de Reynolds. Isso acarreta um súbito aumento da espessura da camada viscosa levando a um reacoplamento do fluxo na região turbulenta. Comumente nessa região de transição surge a zona de circulação do fluido, que se assemelha a uma bolha, como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Escoamento sobre um aerofólio com demonstração da separação laminar e formação de “bolha” de circulação

Fonte: Houghton e Carpenter (2003).

2.3.2 Sólidos aerodinâmicos e não aerodinâmicos

Uma definição importante dentro da aerodinâmica trata da classificação da geometria externa dos corpos sólidos em contato com o fluido em movimento. Os conceitos de arrasto de forma ou pressão (*drag pressure*) e arrasto de atrito superficial (*skin friction drag*) são utilizados para definir os corpos rombudos (*bluff bodies*). Os corpos apresentam dois tipos de geometria: perfis com características não aerodinâmicas e perfis delgados ou aerodinâmicos (*streamlined bodies*).

O arrasto total exercido pelo fluido em movimento no sólido imerso é determinado pela soma das parcelas correspondentes ao arrasto de pressão com arrasto de atrito, conforme equação (ANDERSON, 2001):

$$F_D = \underbrace{\iint_S \overline{\tau}_w \cdot \vec{n} \cdot dS}_{\text{atrito}} + \underbrace{\iint_S p \cdot \vec{n} \cdot dS}_{\text{pressão}}, \quad (6)$$

em que F_D é a força de arrasto total, $\overline{\tau}_w$ é o tensor das tensões viscosas que age na superfície do sólido, p é a pressão na superfície do sólido, $\vec{n}$ é a projeção na direção do escoamento do vetor normal à superfície e dS é o elemento de área na superfície do sólido. A Figura 13 ilustra as forças aerodinâmicas atuando sobre o perfil de um aerofólio.

Figura 13 – Forças aerodinâmicas atuando em um elemento infinitesimal na superfície de um aerofólio

Fonte: Anderson (2001).

Baseando-se na Eq. (6), a geometria externa dos corpos imersos em escoamentos estabelece as seguintes definições:

- a) Corpo rombudo: sólido em que a maior parte da força de arrasto é composto pela parcela do arrasto de forma ou pressão;
- b) Corpo aerodinâmico: sólido em que a maior parte da força de arrasto é composta pela parcela do arrasto de atrito superficial.

Na Figura 14, as ilustrações de corpos rígidos imersos em fluidos em movimento estabelecem um comparativo entre sólidos com distintas geometrias externas e a

proporção do arrasto de pressão e arrasto de atrito superficial na formação da força de arrasto total.

Figura 14 – Comparativo entre diferentes tipos de sólidos imersos em fluidos para identificação da proporção entre atrito superficial e de pressão na formação da força de arrasto total.

Fonte: Adaptada de Anderson (2001).

2.3.3 Coeficiente de pressão e coeficientes aerodinâmicos

De acordo com as características e propriedades físicas do escoamento, são desenvolvidas pressões locais no sólido imerso em um fluido em movimento, que podem ser expressas pela equação de *Bernoulli* (HOLMES, 2007):

$$\frac{1}{2} \rho U^2 + p = cte, \quad (7)$$

em que ρ é a massa específica do fluido, U representa a velocidade do escoamento e p indica a pressão ao longo do corpo. A Eq. (7) é aplicável para escoamentos invíscidos e irrotacionais.

Para regiões fora da camada limite e também em locais fora dos pontos de separação do fluxo de sua superfície, define-se:

$$\frac{1}{2}\rho U^2 + p = \frac{1}{2}\rho U_0^2 + p_0, \quad (8)$$

na qual p_0 e U_0 são pressão e velocidade, respectivamente, em uma região fora da influência do corpo.

A partir da Eq. (8), obtém-se a expressão do coeficiente de pressão, que demonstra a relação entre as pressões efetivas provocadas pelo vento em um ponto na superfície do corpo e a chamada pressão dinâmica (LIMAS, 2003):

$$c_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2}\rho U_0^2}. \quad (9)$$

Nas regiões em que a equação de *Bernoulli* é válida, tem-se:

$$c_p = \frac{\frac{1}{2}\rho(U_0^2 - U^2)}{\frac{1}{2}\rho U_0^2} = 1 - \left(\frac{U}{U_0}\right)^2. \quad (10)$$

Quando $U = 0$, $c_p = 1$ (ponto de estagnação). E, se $U > U_0$, então $c_p < 0$.

Um perfil imerso em um escoamento com um determinado ângulo de incidência no sólido recebe pressões ao longo de todo o seu contorno (ANDERSON, 2001). Com a variação de características do fluido como velocidade, densidade e viscosidade ou com a variação de aspectos referentes ao perfil, como suas dimensões ou formas geométricas, a distribuição de pressão em sua superfície pode se alterar significativamente.

É possível estabelecer uma análise do perfil promovida através da variação do coeficiente de pressão c_p ao longo do contorno do perfil aerodinâmico submetido a um fluxo de fluido, como ilustra a Figura 15. As curvas traçadas representam a distribuição de pressão nas parcelas superior e inferior do perfil.

Figura 15 – Distribuição do coeficiente de pressão c_p ao longo do comprimento de um perfil tipo aerofólio

Fonte: Simiu e Scanlan (1996).

Quando uma determinada pressão atua em uma superfície, origina-se uma força resultante e se essa força for multiplicada pela distância entre a sua linha de atuação e um eixo de rotação, resultará em um momento em relação ao dado eixo. Dessa forma, através do coeficiente de pressão que atua no sólido é possível obter os correspondentes coeficientes de força, que decompostos resultam nos coeficientes de arrasto, sustentação e momento.

Figura 16 – Aerofólio posicionado em sistema referencial com a indicação das forças aerodinâmicas

Fonte: Holmes (2007).

De maneira geral, um coeficiente de força pode ser definido como uma quantidade adimensional empregada em análises matemáticas com abordagem analítica para descrição de um fenômeno qualquer. No caso específico da aerodinâmica, os adimensionais provenientes do estudo do comportamento do coeficiente de pressão no contorno do perfil imerso em um escoamento são:

- a) Coeficiente de arrasto C_D : coeficiente adimensional correspondente à componente da força resultante na direção do escoamento;
- b) Coeficiente de sustentação C_L : coeficiente adimensional relacionado à componente da força resultante na direção perpendicular ao escoamento;
- c) Coeficiente de momento C_M : coeficiente adimensional correspondente à rotação que decorre do binário surgido entre força resultante em ação no perfil e o eixo de referência estabelecido.

Esses coeficientes provêm das expressões definidas por um processo de integração de acordo com os termos apresentados para o perfil aerodinâmico:

$$C_D = \hat{X}_\alpha \cdot \oint c_p d\bar{l}, \quad (11)$$

$$C_L = \hat{Y}_\alpha \cdot \oint c_p d\bar{l}, \quad (12)$$

$$C_M = \hat{Z} \cdot \oint b \cdot (-c_p d\bar{l} \cdot \hat{n}), \quad (13)$$

em que $\hat{X}$, $\hat{Y}$ e $\hat{Z}$ são as coordenadas genéricas da posição do perfil, $d\bar{l}$ é o comprimento infinitesimal do contorno do perfil e b é a distância do centro elástico do perfil até a fibra em que se posiciona $d\bar{l}$.

O desenvolvimento das Eqs. (11), (12) e (13) para o contorno do perfil genérico ilustrado na Figura 16, permite a definição das seguintes expressões:

$$C_D = \frac{\bar{F}_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 D}, \quad (14)$$

$$C_L = \frac{\bar{F}_L}{\frac{1}{2}\rho U^2 D}, \quad (15)$$

$$C_M = \frac{\bar{M}_T}{\frac{1}{2}\rho U^2 D^2}, \quad (16)$$

nas quais, $\bar{F}_D$ e $\bar{F}_L$ são as forças médias de arrasto e sustentação respectivamente, $\bar{M}_T$ é o momento torcional médio, ρ é a densidade do fluido, U é a velocidade média do fluido e D é a dimensão característica da seção do perfil adotado no escoamento.

Os coeficientes aerodinâmicos definidos pelas Eqs. (14), (15) e (16) são parâmetros dependentes das características geométricas do perfil e do ângulo efetivo de incidência do escoamento no sólido. No entanto, esses termos são dependentes também de outro importante número adimensional hidrodinâmico, o número de Reynolds (Re), que expressa a relação entre as forças inerciais e as forças viscosas de um escoamento e dado por:

$$Re = \frac{DU}{\nu} = \frac{\rho DU}{\mu}, \quad (17)$$

em que D é a dimensão característica do perfil adotado no escoamento, U é a velocidade média do fluido, ν é a viscosidade cinemática e μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

Em corpos rombudos imersos em um escoamento com um determinado número de Reynolds, nota-se que na esteira à jusante do sólido surge uma formação caracterizada pelo desprendimento alternado de “redemoinhos” denominados vórtices (BLESSMANN, 2005).

Esse fenômeno, conhecido como vórtices de von Kármán, ocorre com uma frequência característica e dá origem a forças periódicas e oblíquas em relação à direção do vento. As componentes dessas forças tendem a produzir oscilações que ocorrem na frequência de desprendimento de cada par de vórtices (LIMAS, 2007).

A relação linear entre esta frequência de desprendimento dos vórtices (f_v) e a velocidade do escoamento define outro parâmetro adimensional do escoamento denominando número de Strouhal (St), expresso por:

$$St = \frac{f_v D}{U}. \quad (18)$$

O número de Strouhal é dependente das características geométricas da seção transversal e do número de Reynolds e tem valor aproximado de 0,2 para placas planas, como o tabuleiro de uma ponte (RIGHI, 2003).

2.4 ESCOAMENTOS TURBULENTOS

A maioria dos escoamentos presentes na natureza bem como em inúmeras aplicações de engenharia e processos industriais são considerados turbulentos e caracterizados pela flutuação do campo de velocidade, na qual podem ser definidos como uma condição de fluxo imprevisível, flutuante e aleatória (SILVEIRA NETO, 2002).

As flutuações em um escoamento turbulento exercem também importante papel no transporte de propriedades como, massa, quantidade de movimento e energia, sendo que a turbulência aumenta significativamente as taxas de transferência dessas propriedades.

De acordo com Hinze (1975), o movimento turbulento de um fluido pode ser definido como uma condição irregular do escoamento em que as diversas propriedades transportadas pelo fluxo apresentam variação aleatória no tempo e no espaço, de tal modo que possam ser estatisticamente diferenciadas dos seus respectivos valores médios.

Embora a definição apresentada destaque um importante aspecto acerca de escoamentos turbulentos, em face às peculiaridades do fenômeno, por si só a definição não expressa em profundidade um evento turbulento.

No entanto, conforme descrito por Davidson (2017), ainda que não exista uma definição única e terminante sobre o fenômeno da turbulência, esse pode ser representado através das seguintes características (TENNEKES e LUMLEY, 1972):

- a) Irregularidade: o fluxo turbulento é irregular, pois consiste no espectro de diferentes escalas, onde as maiores escalas são da ordem de grandeza em relação à geometria do escoamento (como a espessura da camada limite), e as menores escalas no final do espectro são originadas pelas forças viscosas e dissipadas em forma de energia dentro do fluxo;
- b) Difusividade: escoamentos turbulentos são altamente difusivos, pois o processo de mistura das propriedades aumenta consideravelmente quando há turbulência ao invés de um escoamento laminar;
- c) Altos números de Reynolds (Re): escoamentos turbulentos ocorrem a altos números de Reynolds, considerando que nesses tipos de escoamentos há predominância dos efeitos advectivos, que são efeitos amplificadores de instabilidades e geradores de perturbações, sobre os efeitos viscosos, que são difusivos. Escoamentos externos sobre placas apresentam transição à turbulência em $Re > Re_t = 5,0 \times 10^5$;
- d) Tridimensional: fluxos turbulentos são tridimensionais e rotacionais;
- e) Dissipação: escoamentos turbulentos são altamente dissipativos, o que significa que a energia cinética dos pequenos vórtices é transformada em energia interna (calor, por exemplo), portanto se não houver uma fonte de geração externa de energia para o movimento do fluido, a tendência do movimento é decair;
- f) Fenômeno contínuo: mesmo havendo pequenas escalas de turbulência, estas ainda são muito maiores que a escala molecular do fluido, portanto o meio é considerado como contínuo;

- g) Fenômeno imprevisível: é a característica relativa à incapacidade de reproduzir um dado experimento, pois em laboratório é praticamente impossível desenvolver duas configurações de ensaio idênticas ou mesmo em simulação numérica, onde é impossível reproduzir as mesmas condições iniciais e de contorno de um ensaio experimental.

O processo de transição de um escoamento laminar para a turbulência pode ser estabelecido através da amplificação de perturbações injetadas no fluxo por distintas fontes, as quais são originadas a depender das características do escoamento transicional. Um importante exemplo de fluxo transicional é o escoamento cisalhante livre, caracterizado pela ausência de paredes que o confinem ou interferência de obstáculos, embora sua origem possa ser caracterizada pela passagem do fluido por um corpo.

O grupo de escoamentos cisalhantes livres é subdividido em escoamentos de três tipos distintos, embora apresentem processo de transição similar e são eles: camada de mistura, jato e esteira. A Tabela 2 agrupa os tipos de escoamentos cisalhantes e indica suas características mais relevantes.

Tabela 2 – Subdivisões de escoamentos cisalhantes e principais características

Camada de mistura	<ul style="list-style-type: none"> – Camadas de mistura em desenvolvimento temporal e espacial – Existência de diferentes velocidades no interior do escoamento – Placa separadora, campo de velocidade inflexional – Instabilidades e turbilhões de Kelvin-Helmholtz – Estruturas coerentes – Fortes interações não lineares
Jato	<ul style="list-style-type: none"> – Cavidades circulares e retangulares. – Instabilidades primárias de Kelvin-Helmholtz – Formação de filamentos secundários – Oscilações de forma senoidal
Esteira	<ul style="list-style-type: none"> – Origina-se à jusante de um obstáculo qualquer – Escoamento médio recirculante – Formação da esteira de von Kármán (estruturas coerentes turbilhonares que surgem alternadas em modo sinuoso)

Fonte: Elaborada pelo autor.

O escoamento turbulento é caracterizado pela presença de vórtices (ou turbilhões) que apresentam diversas escalas e são sobrepostos uns aos outros, onde as maiores escalas são definidas pelas características geométricas do escoamento.

Portanto, associando-se a conceituação do escoamento turbulento externo do tipo esteira com um escoamento atmosférico¹ identifica-se, nesse caso, que os maiores vórtices são compatíveis com as dimensões características encontradas dentro da camada limite atmosférica (CLA). Isso significa que, quando o fluxo do vento atravessar uma ponte ou edificação, os grandes turbilhões serão adequados às dimensões desses obstáculos (ISNARD, 2004).

O suprimento de energia para geração ou manutenção do escoamento turbulento presente em um ambiente atmosférico provém basicamente do gradiente de velocidades médias e do gradiente de temperatura. Esses gradientes originam as forças de empuxo das massas de ar juntamente com as tensões de cisalhamento, que podem ser potencializadas pela configuração da rugosidade da superfície por onde atravessa o fluxo de vento (SIMIU e SCANLAN, 1996).

Na Figura 17 pode ser visualizada uma ilustração da estrutura vertical das camadas sobre a superfície terrestre, indicando o posicionamento da camada rugosa e da CLA, importantes na formação da turbulência nos escoamentos em ambientes atmosféricos.

Figura 17 – Estrutura vertical das camadas sobre a superfície terrestre

Fonte: Adaptada de Wittwer (2006).

¹ Um escoamento atmosférico apresenta o domínio real onde ocorrem as interações entre o vento e as construções em zona urbana.

2.5 AEROELASTICIDADE

O termo aeroelasticidade é comumente aplicado na engenharia aeronáutica para definir uma área de pesquisa com interesse na compreensão do fenômeno de interação mútua entre as forças aerodinâmicas e aeroelásticas incidentes em um determinado sólido. O objetivo principal é a previsão de instabilidades (SILVA, 2010).

Os fenômenos aeroelásticos estão relacionados com a análise do movimento de um corpo flexível através de um fluido. As instabilidades aeroelásticas em uma estrutura surgem quando o corpo imerso em um escoamento sofre movimentações e essas induzem ao surgimento de forças aerodinâmicas adicionais, que por sua vez provocam maiores movimentações do sólido, em uma cadeia sucessiva (TAVARES, 2009).

Simiu e Scanlan (1996) definem a aeroelasticidade como a ciência que estuda as consequências da interação de forças de inércia, elásticas e aerodinâmicas agindo simultaneamente na estrutura de um corpo. No que tange às forças atuantes em um sistema aeroelástico, as forças de inércia são decorrentes das acelerações impostas à massa do sólido. Já as forças elásticas provêm das reações elásticas (deslocamentos ou deformações) do sólido e as forças aerodinâmicas surgem do escoamento do fluido ao qual o sólido está sujeito.

A inter-relação entre esses esforços pode ser visualizada no chamado “diagrama dos três anéis”, ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Diagrama dos três anéis

Fonte: Adaptado de Collar (1946).

A aeroelasticidade pode ser considerada um fenômeno de instabilidade estática quando houver interações somente entre as forças aerodinâmicas e forças elásticas. Isso significa que, quando o sólido apresentar um insignificante movimento variando com o tempo, sem velocidade ou aceleração considerável como visto na deflexão das asas de um avião quando esse estiver submetido a um carregamento dinâmico.

Por sua vez, define-se como instabilidade dinâmica quando o fenômeno estático incorporar de forma mais abrangente as forças inerciais. Em outras palavras, é o inverso da instabilidade estática, portanto com movimentos significativos do sólido, além de aceleração e velocidade pertinentes (BISPLINGHOFF *et al.*, 1955).

As estruturas de pontes devem ser projetadas para suportar efeitos do vento estático e dinâmico. Porém, os fenômenos induzidos pelo vento possibilitam a ocorrência de distintos tipos de falhas em estruturas para diferentes faixas de velocidade e comportamento do vento.

Com isso, a partir do conhecimento das características dos problemas ocasionados pelo vento nas estruturas, podem-se associá-las aos efeitos do vento em cada classificação, estática ou dinâmica, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Efeitos do vento nas estruturas

Efeitos da força do vento	
Instabilidades Estáticas	Divergência torcional
	Flambagem lateral
Instabilidades Dinâmicas	Galope (<i>galloping</i>)
	Desprendimento de vórtices (<i>vortex shedding</i>)
	Drapejamento (<i>flutter</i>)

Fonte: Adaptada de Limas (2003).

Para exemplificar o fenômeno aeroelástico destaca-se novamente o caso do colapso da ponte *Tacoma Narrows*, que apresentava comportamento instável já durante sua construção. Apesar de ter sido projetada para suportar ventos de até 161 km/h e pressão estática de 146 kg/m² (CAMPOS, 2014), a velocidade verificada no instante do colapso estava muito abaixo do que o limite estabelecido, ou seja, em torno de 67 km/h.

Grandes movimentos oscilatórios, cujas amplitudes alcançaram 1,5 metros, submeteram o tabuleiro da ponte a modos de deformação que variaram entre flexões simétricas e torções assimétricas. No instante do acoplamento desses modos houve o rompimento dos cabos de sustentação e o consequente desabamento do tabuleiro da ponte.

A análise estática da ação do vento considerada na fase de projeto da ponte não foi suficiente para prever os fenômenos oscilatórios provenientes da ação dinâmica do vento. Dessa forma, fica evidente no registro da sequência de fatos que conduziram a ponte de *Tacoma* ao colapso que a análise aeroelástica era absolutamente necessária e imprescindível.

Após o colapso dessa ponte, uma nova estrutura foi construída. A partir da experiência adquirida com os eventos ocorridos e análises realizadas, uma nova seção transversal do tabuleiro foi executada, mas agora com reforço na rigidez da seção transversal, conforme a ilustração (b) da Figura 19.

Figura 19 – Seção transversal do tabuleiro da ponte de *Tacoma* (a) antes do colapso (b) após a reconstrução da ponte

Fonte: Limas (2003).

2.5.1 Aeroelasticidade dinâmica

2.5.1.1 Galope (*Gallop*)

O *galloping* é um tipo de fenômeno de oscilação divergente com deslocamentos verticais (Figura 20) e apresenta baixas frequências. Ocorre geralmente em velocidades críticas do vento com valores superiores às que provocam o *flutter*.

Figura 20 – Ilustração de um sólido sob ação de forças aeroelásticas (F) que provocam o *galloping*

Fonte: Blessmann (2005).

Esse fenômeno acontece quando o amortecimento aerodinâmico alcança o mesmo valor absoluto do amortecimento estrutural para o modo de deslocamento vertical, anulando o amortecimento global da estrutura para esse modo. Com isso, surgem oscilações de grandes amplitudes que eventualmente conduzem a estrutura ao colapso.

De acordo com Blessmann (2005), são características do *galloping*:

- a) intensidade violenta;
- b) súbito aparecimento em uma determinada velocidade (*onset velocity*);
- c) aumento da amplitude de vibração com a velocidade do vento, sem um limite superior.

2.5.1.2 Desprendimento de vórtices (*vortex shedding*)

Corpos rígidos imersos em fluidos em movimento tendem a provocar perturbações na trajetória do fluido dependendo das suas características, da velocidade do escoamento e também da geometria do sólido imerso.

Tais perturbações no escoamento de um fluido podem ser analisadas em função do número de Reynolds. Para escoamentos com baixos números de Re , os efeitos viscosos são dominantes no entorno do sólido, o que resulta em linhas de corrente que se moldam ao contorno da geometria do corpo imerso, conforme item (a) da Tabela 4.

Em contrapartida, em escoamentos à altos números de Reynolds (a partir do item (e) da Tabela 4), os efeitos viscosos agora ficam restritos a uma fina camada próxima do sólido e a vorticidade produzida. Nesse instante, os efeitos obedecem a mecanismos puramente invíscidos, resultando em instabilidades que geram o desprendimento de um par de vórtices à jusante do corpo, promovendo a separação do escoamento no contorno desse corpo (PAIDOUSSIS, PRICE e DE LANGRE, 2011).

Tabela 4 – Caracterização do escoamento com desprendimento de vórtices ao redor de cilindros em relação ao número de Reynolds

Item	Perfil	Variação do número de Reynolds	Características
(a)		$Re < 5$	– Nenhuma separação
(b)		$5 < Re < 40$	– Par de vórtices simétricos estáveis
(c)		$40 < Re < 200$	– Esteira de vórtices laminar
(d)		$200 < Re < 300$	– Transição à turbulência na esteira
(e)		$300 < Re < 3 \times 10^5$ Subcrítico	– Esteira turbulenta – Ponto A: separação da camada limite laminar
(f)		$3 \times 10^5 < Re < 3,5 \times 10^5$ Crítico (transição baixa)	– Ponto A: separação da camada limite laminar – Ponto B: transição laminar / turbulência

(g)		$3,5 \times 10^5 < Re < 1,5 \times 10^6$ Supercrítico	– Ponto B: separação da camada limite turbulenta, camada laminar / turbulenta
(h)		$1,5 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$ Transição alta	– Ponto C: camada limite turbulenta somente de um lado
(i)		$4 \times 10^6 < Re$ Transcrítico	– Ponto C: camada limite turbulenta em ambos os lados

Fonte: Adaptada de Asyikin (2012).

Pesquisado inicialmente por von Kármán no século XX, o fenômeno do desprendimento de vórtices produz aumento de pressão à montante do escoamento e no encontro do fluido com o corpo. Além disso, produz pressões de sucção devidas ao descolamento do fluido à jusante do escoamento, em uma região denominada de esteira.

Essas forças provocam a formação dos vórtices, apresentando rotações alternadas e induzindo o corpo a significativas vibrações, embora geralmente não sejam capazes de conduzir o sólido ao colapso.

A resposta da estrutura depende da frequência de desprendimento de vórtices, a qual aumenta com a velocidade média do vento. O corpo inicia as vibrações induzidas por emissão de vórtices quando a frequência de desprendimento de vórtices alcança a frequência natural da estrutura.

2.5.1.3 Drapejamento (*Flutter*)

No projeto de pontes suspensas ou estaiadas com longos vãos, a instabilidade aeroelástica do drapejamento ou *flutter* apresenta-se como um dos fenômenos de maior importância. Ele é caracterizado por oscilações divergentes no movimento do tabuleiro da ponte, por exemplo, aumentando sua amplitude com a velocidade do vento.

O *flutter* ocorre principalmente em estruturas com seções transversais esbeltas (Figura 21), onde a dimensão transversal é pequena comparada à dimensão longitudinal, causando movimentos oscilatórios com grande potencial destrutivo

(LIMAS, 2007). O *flutter* clássico ou multimodal é aquele que acopla dois modos de vibração, um no deslocamento vertical e outro no torcional, apresentando consequentemente um sistema com dois graus de liberdade (2 GDL).

Figura 21 – Ilustração de um sólido sob efeito de oscilações ocorridas após atingir a condição de *flutter*

Fonte: Blessmann (2005).

O fenômeno de *flutter* também pode ser entendido no contexto da transferência de energia do escoamento para a estrutura e vice-versa. O mecanismo dessa transferência depende da complexidade da estrutura e dos parâmetros do escoamento. O *flutter* acontece quando a energia do movimento induzido pelo vento iguala-se à energia dissipada pelo amortecimento da estrutura.

3 PONTES SUSPENSAS

Pontes são obras de arte especiais cuja principal finalidade é promover a transposição de obstáculos como cursos de rio ou vales, sem interrompê-los totalmente.

A distinção de algumas características inerentes à configuração de uma ponte é dada pelo seu comprimento, material da superestrutura, natureza do tráfego, elementos da superestrutura, seção transversal e posição do tabuleiro, entre outras. Essas características estabelecem as diversas classificações em que as estruturas de pontes se encontram inseridas.

As pontes adotadas nas simulações deste trabalho estão incluídas em uma dessas classificações em virtude da tipologia da superestrutura. Através do tipo de sustentação do tabuleiro, que é suportado por cabos ancorados em altos pilares ou torres de sustentação, elas se enquadram na classificação das pontes suspensas (pênseis ou estaiadas).

Um aspecto importante a se destacar consiste no fato de que em função da tipologia da superestrutura das pontes pênseis e estaiadas, essas estruturas tornam-se propensas aos problemas de instabilidade causados pela ação do vento. E por esse motivo, o conhecimento das particularidades desse tipo de construção é um fator fundamental para o desenvolvimento de projetos estruturais confiáveis e eficientes.

3.1 PONTES PÊNSEIS

As pontes pênseis, também chamadas de pontes suspensas, apresentam como principal característica construtiva, a sustentação do tabuleiro feita por pendurais interligados a cabos de aço ou barras. Esses cabos são dispostos em curva e conectados nas extremidades aos pilares, torres ou estruturas de sustentação.

Em virtude das características do sistema de sustentação do tabuleiro, essa tipologia de ponte permite o alcance de longos vãos suspensos, a partir de 600 metros de comprimento.

Os cabos de aço em forma de “arco” (ver Figura 22) permitem a transferência das cargas provenientes do tabuleiro até a estrutura de sustentação, comprimindo os pilares de maneira uniforme.

Figura 22 – Ilustração dos componentes de uma ponte suspensa

Fonte: El Debs e Takeya (2009).

Conforme a Figura 23, as pontes suspensas podem ser identificadas também através do seu esquema estrutural característico.

Figura 23 – Esquema estrutural de uma ponte suspensa

Fonte: Stucchi (2006).

As pontes suspensas também podem ser identificadas através de algumas particularidades da sua formação estrutural:

- Tabuleiro sustentado pelos pendurais;
- Extremidades da ponte possuem ancoragens ou contrapesos;
- Cabos principais esticados por uma ancoragem, atingindo o topo da estrutura de sustentação;

- d) A montagem do tabuleiro é iniciada somente após execução das torres de sustentação e passagem dos cabos.

Essas pontes estão entre as mais antigas estruturas desenvolvidas pelo homem, das quais se encontram registros de construção em diversas civilizações da antiguidade, cujos relatos apontam para utilização destas estruturas na China, Japão, Índia e Tibet na transposição de barreiras naturais.

Conforme Waddell (1916), estruturas similares foram encontradas também na antiga civilização Asteca, em comunidades nativas no Peru e em outras regiões da América do Sul, onde as pontes eram basicamente concebidas por troncos de árvores, cipós, tiras de couro e cordas.

Entretanto, a chamada era moderna das pontes suspensas foi introduzida em um período bem mais recente da história, juntamente com a adoção da disciplina de engenharia de pontes enquanto campo formal de estudos e pesquisa nos cursos de engenharia. O engenheiro irlandês James Finley foi o primeiro grande artífice desta nova era de projeto e construção de pontes suspensas.

Finley patenteou nos EUA um processo de suspensão do tabuleiro de pontes via correntes metálicas, dando início à concepção da ponte *Jacob's Creek*, construída no estado norte americano da Pensilvania e inaugurada em 1801 (TROITSKY, 1994). A ponte foi severamente danificada por uma tempestade de neve ocorrida em 1825, sendo posteriormente demolida e uma nova ponte foi construída no local.

Muito embora Finley tenha sido o precursor na implantação do sistema de estrutura de pontes suspensas, o primeiro projeto de grande porte que incorporou o novo sistema foi a ponte do estreito de Menai na Inglaterra (Figura 24), cuja construção foi finalizada em 1826.

Com o projeto conduzido pelo engenheiro escocês Thomas Telford, a ponte de Menai é composta por um tabuleiro com vão suspenso de 177 m de comprimento sustentado por cabos ancorados em duas torres de 47 m de altura e construída com blocos de pedra. Com um comprimento total de 521 m, o projeto da ponte impressiona pelas dimensões arrojadas para os padrões da época, em face aos recursos tecnológicos restritos na ocasião.

Figura 24 – Ponte suspensa Menai Strait

Fonte: <www.photographers-resource.co.uk> Acesso em 20 de Fevereiro de 2017.

Outra importante referência no projeto de pontes suspensas foi o engenheiro John Roebling, responsável por importantes projetos de infraestrutura urbana nos EUA, entre eles a ponte suspensa de Niágara e a ponte suspensa do Brooklyn, essa última considerada seu projeto de maior destaque. Sua estrutura possui comprimento total de 1825 m e o maior vão suspenso tem 486 m.

Figura 25 – Detalhe da disposição dos cabos de sustentação da ponte suspensa do Brooklyn

Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Brooklyn_Bridge> Acesso em 20 de fevereiro de 2017.

A ponte suspensa do Brooklyn foi aberta ao tráfego em maio de 1883 e ao lado das expressivas dimensões que ressaltam a importância dessa construção, o projeto de Roebling se destacou por introduzir valiosas contribuições para o desenvolvimento do sistema de pontes suspensas e que são ainda empregados em projetos na atualidade.

A sua primeira contribuição foi o aumento da rigidez do tabuleiro da ponte através do uso de vigas treliçadas. A segunda foi a implantação de um novo processo de manufatura dos cabos metálicos de sustentação do tabuleiro da ponte, com o aperfeiçoamento na técnica de encordoamento do cabo e na seleção dos materiais.

Conforme citado por Troitsky (1994), a ponte do Brooklyn também apresentou uma interessante inovação na disposição dos cabos de sustentação do tabuleiro (Figura 25), onde uma parte dos cabos irradia desde a torre até o tabuleiro da ponte, formando um sistema de sustentação mesclado entre o suspenso e o estaiado.

3.2 PONTES ESTAIADAS

As pontes estaiadas apresentam a sustentação do seu tabuleiro realizada por cabos retos, denominados estais, dispostos de maneira oblíqua em relação ao seu tabuleiro, interligando-o às torres ou pilares de sustentação, que se encontram posicionados em pontos intermediários dos vãos suspensos.

O princípio de sustentação de tabuleiro de pontes com estais já era conhecido há alguns séculos, nos quais foram simuladas situações em que tabuleiros de ponte mantinham sustentação através de correntes metálicas inclinadas e ancoradas nas torres (GIMSING e GEORGAKIS, 2012). Contudo, a escolha pela tecnologia das pontes suspensas ainda era absolutamente predominante nos projetos da época.

Foi somente a partir da evolução de algumas tecnologias e processos industriais como, a utilização dos cabos de aço com alta resistência, aperfeiçoamento nas técnicas de soldagem, desenvolvimento de tabuleiros ortotrópicos e avanços no campo da análise estrutural, que o emprego das pontes estaiadas sofreu um relativo aumento em meados do século XIX.

Um dos destaques desse período foi a construção da ponte Albert (Figura 26) sobre o rio Tâmbisa em Londres (O'CONNOR, 1971). Inaugurada em 1873, a ponte apresenta 200 m de comprimento total e 117 m de vão central e pode ser considerada uma das estruturas precursoras das atuais pontes estaiadas.

Porém, com o uso da incipiente tecnologia dos estais inclinados, a ponte apresentou diversos problemas de vibração e baixa rigidez no tabuleiro, recebendo alguns reforços estruturais nos anos seguintes, inclusive incorporando elementos característicos de pontes suspensas.

Figura 26 – Ponte estaiada Albert Bridge

Fonte: <<http://thames.me.uk>> Acesso em 1º de Março de 2017.

No entanto, foi no século XX, especificamente na década de 50 que o projeto de pontes estaiadas adquiriu grande desenvolvimento através de importantes projetos de estruturas estaiadas construídas na Alemanha Ocidental. Como destaque estão as pontes Stromsund, finalizada em 1955 e a ponte Norte de Dusseldorf, aberta ao tráfego em 1958, as quais caracterizaram a nova era das modernas pontes estaiadas construídas pelo mundo.

A tendência de utilização de pontes estaiadas no mundo vem crescendo consideravelmente nas últimas décadas, principalmente na substituição de pontes convencionais de concreto armado para vãos de comprimento intermediário (até 500 metros). Juntamente com a redução nos números de apoio para vencer os obstáculos, esse modelo de ponte é mais leve e esbelto, cujo aspecto arquitetônico é agradável à urbanização e custos construtivos são competitivos.

Segundo O'Connor (1971), mesmo quando se compara a utilização de pontes estaiadas com as pontes suspensas, nota-se que as estruturas estaiadas levam substancial vantagem em diversos quesitos como:

- a) Custo: o uso de cabos de alta resistência conduz a uma maior economia em material e peso, ensejando na redução de despesas construtivas;
- b) Rigidez no tabuleiro: os cabos inclinados ancorados nas torres induzem esforços de compressão no tabuleiro, que por consequência aumentam a rigidez;
- c) Aspectos construtivos: o arranjo dos cabos contribui para a execução da ponte, dispensando algumas estruturas auxiliares, aumentando a velocidade de execução e minimizando custos;
- d) Instabilidade aerodinâmica: pontes estaiadas tendem a serem menos suscetíveis a ocorrências críticas de instabilidade do que pontes suspensas, muito em virtude do arranjo e ancoragem dos cabos nas torres e na compressão do tabuleiro.

Tais vantagens estão intrinsicamente ligadas às características estruturais da ponte. Os componentes estruturais básicos que compõem a tipologia da ponte estaiada são ilustrados na Figura 27.

Figura 27 – Componentes básicos de uma ponte estaiada

Fonte: Mazarim (2011).

Baseado na disposição dos seus elementos, as pontes estaiadas apresentam as seguintes características estruturais e que estão ilustradas no modelo teórico da estrutura na Figura 28:

- Tabuleiro contínuo com altura reduzida;

- Cabos ancorados e tracionados diagonalmente;
- Estrutura relativamente leve e esbelta;
- Comprimento de vão típicos (110 a 600 metros);
- Tabuleiro posicionado em compressão, na direção da torre;
- Construção realizada em fases, a partir da execução de cada torre.

Figura 28 – Esquema estrutural de uma ponte estaiada

Fonte: Stucchi (2006).

Com relação à posição e direção dos estais no tabuleiro e na torre, as pontes estaiadas possuem os arranjos típicos da sua superestrutura (Figura 29), que são classificados como: harpa, leque, semi-harpa e assimétrica.

Figura 29 – Tipos de arranjo dos estais de uma ponte estaiada: (a) harpa, (b) leque, (c) semi-harpa e (d) assimétrica

Fonte: Mazarim (2011).

3.3 MODELOS DAS PONTES UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES

3.3.1 Ponte *Great Belt East*

A ponte suspensa *Great Belt East* é um dos modelos de pontes utilizado nas simulações deste trabalho. Ela está localizada no estreito do *Great Belt*, que interliga as ilhas dinamarquesas de *Funen* e *Zealand*, conforme ilustrado no mapa da Figura 30.

A ponte compõe um importante complexo rodoferroviário na Dinamarca, conhecido como *Storebaeltforbindelsen*. Esse complexo é composto por um túnel ferroviário de 8.024 m de comprimento e posicionado ao lado da ponte suspensa, juntamente com uma ponte em concreto armado com 6.611 m de comprimento a oeste e a ilha de *Sprogø*, conectando os trechos e comunicando a capital *Copenhagen* que fica na ilha de *Zealand* com a Europa central.

Figura 30 – Localização da ponte suspensa *Great Belt East*

Fonte: Weight (2009).

O complexo *Storebaeltforbindelsen* foi construído de 1988 a 1998 enquanto que a ponte *Great Belt East* (Figura 31) foi executada entre os anos de 1991 e 1995.

Algumas características geométricas expressam a importância dessa ponte, considerada um dos maiores projetos de infraestrutura rodoferroviária da Europa:

- comprimento total de toda a ponte leste: 6.790 metros;
- comprimento da ponte suspensa: 2.694 metros;
- comprimento do vão suspenso central: 1.642 metros;
- altura da torre de sustentação: 254 metros.

Figura 31 – Vista da ponte suspensa *Great Belt East*

Fonte: <<http://www.storebaelt.dk/english/bridge#galleryslide-1>> Acesso em 5 de Março de 2017.

3.3.2 Ponte *Sunshine Skyway*

A ponte estaiada *Sunshine Skyway* é o outro modelo de ponte empregado nas análises em CFD deste trabalho. Ela está localizada sobre a baía de *Tampa* no estado da *Florida*, Estados Unidos, interligando a cidade de *St. Petesburg* que fica situada ao sul do condado de *Pinellas* com a ilha de *Terra Ceia* no condado de *Manatee* (Figura 32).

Compondo uma importante conexão viária a oeste do estado da *Florida*, a atual ponte é denominada *Bob Grahman Sunshine Skyway*. Foi executada a partir de 1982 em substituição a uma antiga ponte metálica situada no mesmo local, que foi

demolida após colisão de um barco cargueiro com os pilares de sustentação e uma das partes do tabuleiro da ponte, durante uma tempestade ocorrida em 1980.

Figura 32 – Localização da ponte estaiada *Sunshine Skyway*

Fonte: Garcia (2006).

A nova ponte estaiada (Figura 33) foi construída, com arranjo de estais posicionados em formato de semi-harpa. Teve abertura ao tráfego em abril de 1987, tornando-se uma das mais importantes estruturas estaiadas da América do Norte. Seu processo construtivo apresentou alguns aspectos de destaque à época, sendo uma das maiores pontes pré-fabricadas do mundo, com utilização dos tirantes definitivos durante a construção.

Figura 33 – Vista da ponte estaiada *Sunshine Skyway*

Fonte: Marinho (2012).

Algumas características da geometria da ponte *Sunshine Skyway* são:

- comprimento total da ponte: 6.663 metros;

- comprimento do vão central estaiado: 366 metros;
- 42 estais divididos em 2 pilares de sustentação.

Com o vão central estaiado, a nova ponte permitiu significativa ampliação da distância entre os pilares centrais, melhorando as condições de segurança para navegação das embarcações que utilizam essa rota para acesso à baía de *Tampa* e ao golfo do México.

4 EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS

Neste capítulo são descritas as equações governantes da dinâmica dos fluidos utilizadas pelo método numérico para a solução do escoamento do vento em torno de obstáculos sólidos. São apresentadas também as equações básicas dos modelos de turbulência que são utilizados nas simulações deste trabalho. Além disso, apresentam-se as equações de movimento para um sistema mecanicamente desacoplado com 2 GDL e as equações dos esforços aeroelásticos autoexcitados com os coeficientes de *flutter*. Por fim, são apresentados os dois métodos de análise aeroelástica para obtenção da velocidade crítica do *flutter*.

4.1 EQUAÇÕES GOVERNANTES DA DINÂMICA DOS FLUIDOS

As equações governantes que modelam escoamentos incompressíveis, transientes e isotérmicos baseadas nas leis de conservação de sistemas físicos são as equações da continuidade (princípio da conservação de massa) e de Navier-Stokes (teorema de *momentum*) (KAYS e CRAWFORD, 1993), expressas respectivamente por:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (19)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + f_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (20)$$

em que u_i são as componentes de velocidade, t é o tempo, ρ é a massa específica, p é a pressão, ν é a viscosidade cinemática e f_i representa as forças externas.

4.2 MODELAGEM DA TURBULÊNCIA

Em geral, os escoamentos são turbulentos com elevados números de Reynolds. Esses escoamentos são altamente instáveis, tridimensionais e cujo processo é dependente do tempo. Nesse regime de escoamento a viscosidade passa a ter uma característica randômica e por essa razão são necessárias maneiras que possam prever esse comportamento para que os termos das equações que envolvem a

viscosidade sejam completos. Com isso se faz necessário o uso de uma modelagem de turbulência. De acordo com Wilcox (1993), na literatura destacam-se três modelagens de turbulência: DNS (Direct Numerical Simulation); LES (Large Eddy Simulation) e RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes).

Na abordagem DNS, todas as escalas da turbulência são computadas numericamente, a partir das equações de Navier-Stokes, sem levar em consideração o fato de que as pequenas e grandes escalas de turbulência possuem características físicas diferentes. Entretanto, é necessário alto refinamento de malha, da ordem de $(Re_T)^{9/4}$ e pequenos passos de tempo $\Delta t \sim (Re_T)^{-1/2}$ para capturar todo o espectro de escalas turbulentas. Com esses requisitos, identifica-se um elevado custo computacional para essa técnica.

Já na abordagem LES, o intuito é separar as pequenas estruturas das grandes escalas através de um processo de filtragem espacial nas equações de Navier-Stokes, nas quais as grandes escalas são resolvidas diretamente pelo método numérico e as pequenas escalas são modeladas pela técnica das sub malhas. A estratégia dessa modelagem é que os grandes turbilhões, afetados pelas condições de contorno e que carregam a maioria das tensões de Reynolds devem ser computados ao mesmo tempo em que as pequenas escalas de turbulência, pois são as mais fracas e contribuem menos com as tensões de Reynolds. Com isso, são mais fáceis de modelar e conseqüentemente com uma demanda intermediária de recurso computacional.

Nos modelos que empregam a metodologia RANS, em que a média de Reynolds é um caso particular de filtro e é utilizada para simplificar a modelagem sub malha. Assim, a parcela de modelagem de turbulência é alta e, com isso, enseja em uma menor demanda do recurso computacional disponibilizado para o cálculo das equações.

Um importante aspecto da modelagem de turbulência que deve ser avaliado no momento da seleção do modelo é o dispêndio de esforço computacional para se obter a solução do método numérico para o escoamento turbulento. Esse custo computacional é geralmente expresso em unidades de tempo que o recurso

computacional leva para resolver as equações do método numérico e apresentar a solução para o escoamento.

Evidentemente que o custo computacional está relacionado com nível tecnológico que o recurso computacional detém. Com isso, em equipamentos mais avançados e com grande capacidade de processamento, o tempo necessário para solução do sistema de equações tende a ser reduzido.

Embora todo modelo de turbulência apresente sua demanda em face ao custo computacional, existem significativas diferenças de consumo desses recursos em função das características do modelo. Percebe-se que quanto maior a demanda da modelagem de turbulência que um determinado modelo requer, menor será seu custo computacional no processamento.

A Figura 34 ilustra o posicionamento das modelagens citadas, ordenando e relacionando os grupos de modelos de turbulência com seus respectivos custos computacionais em relação ao grau de modelagem de turbulência requerido.

Figura 34 – Relação entre o grau de modelagem e o custo computacional dos modelos de turbulência

Fonte: Rezende, 2009.

Baseado na metodologia RANS, os principais modelos de turbulência empregados em simulações numéricas de escoamentos podem ser classificados através das características do seu equacionamento:

- a) Modelos de zero equação (ou modelos algébricos): são baseados na hipótese do comprimento de mistura de Prandtl (SILVEIRA NETO, 2002). É utilizado na maioria dos modelos de sub malha, como na simulação LES;
- b) Modelos de uma equação: uma equação de transporte é resolvida, geralmente para a energia cinética turbulenta k , juntamente com um comprimento de escala característico;
- c) Modelos de duas equações: utilizam duas equações de transporte de propriedades turbulentas, sendo uma a equação da energia cinética turbulenta k junto com a equação da taxa de dissipação da energia cinética turbulenta ε , ou a equação da frequência de passagem de grandes estruturas turbulentas ω . Dentro dessa classificação encontram-se os conhecidos modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$, além do modelo *Shear Stress Transport* ($k - \omega$ SST) que advém de uma combinação desses últimos;
- d) Modelos algébricos para o tensor de Reynolds: utilizam equações algébricas para estabelecer relação entre as tensões turbulentas e as componentes médias de velocidade;
- e) Modelos para o tensor de Reynolds: utilizam equações de transporte explícitas para o cálculo das seis componentes do tensor de Reynolds junto com equações de transporte complementar para ε e ω para obter o fechamento completo do sistema.

Das classificações acima, os itens a), b) e c) são dependentes da viscosidade turbulenta e os itens d) e e) não dependem da viscosidade turbulenta.

Neste trabalho, os modelos de turbulência investigados são os da família RANS como $k - \varepsilon$ padrão e $k - \omega$ SST e a simulação LES, com modelo de submalha de *Smagorinsky*.

Na sequência é apresentada uma breve descrição da formulação matemática para cada um desses modelos de turbulência.

4.2.1 Modelo $k - \varepsilon$ padrão

Desenvolvido inicialmente por Jones e Launder (1972), o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ padrão está entre os modelos de duas equações em que as escalas de velocidade e de comprimento são obtidas através da solução de duas equações de transporte (YAKHOT e ORSZAG, 1986; YAKHOT *et al.* 1992).

O termo k representa a energia cinética contida nos turbilhões de várias dimensões e o termo ε representa a ação dos pequenos turbilhões responsáveis pela dissipação da energia cinética turbulenta.

A equação de transporte para a energia cinética turbulenta (k) é dada por:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P^k - \varepsilon, \quad (21)$$

e a equação da dissipação da energia cinética turbulenta (ε) por:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P^k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (22)$$

na qual ν é a viscosidade molecular, ν_t é a viscosidade turbulenta, P^k é o termo de produção da energia cinética turbulenta, σ_k e σ_ε são os coeficientes de difusão turbulenta, $C_{1\varepsilon}$ e $C_{2\varepsilon}$ são constantes empíricas, determinadas de forma experimental através de resultados válidos para alguns tipos de escoamentos turbulentos.

A viscosidade turbulenta ν_t é calculada por:

$$\nu_t = C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon},$$

em que C_μ é uma constante empírica.

A Tabela 5 apresenta os valores das constantes experimentais $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ , σ_k e σ_ε .

Tabela 5 – Constantes das equações do modelo de turbulência $k - \varepsilon$ padrão

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

Fonte: Rodi (1993).

O modelo $k - \varepsilon$ assume a turbulência como isotrópica e, com isso, algumas simulações podem não apresentar resultados consistentes, principalmente em escoamentos que apresentem mudanças súbitas das variáveis médias do fluxo ou mesmo em escoamentos com fortes componentes rotacionais (RECKTENWALD, 2009; POPE, 2000).

4.2.2 Modelo $k - \omega$ SST

O $k - \omega$ SST (*Shear Stress Transport*) é um modelo de viscosidade turbulenta de duas equações e foi desenvolvido a partir de uma adaptação do modelo BSL (*Baseline $k - \omega$*). Esse modelo foi proposto por Menter (1994) para modelar a turbulência de escoamentos com gradientes adversos de pressão e separação da camada limite, fazendo uso da formulação de dois outros modelos, o $k - \varepsilon$ e o $k - \omega$ (LAUNDER e SPALDING, 1974; YAKHOT *et al.* 1992).

O modelo de turbulência $k - \omega$ SST é composto pela equação de transporte da energia cinética turbulenta (k), conforme a Eq. (23), e pela equação da taxa de dissipação específica de energia cinética turbulenta (ω), de acordo com a Eq.(24).

A equação da energia cinética turbulenta (k) é dada por:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P^k - \beta^* k \omega, \quad (23)$$

e a equação da taxa de dissipação da energia cinética turbulenta (ω) é definida por:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{P^k}{\nu_t} - \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, \quad (24)$$

em que, u_j são componentes de velocidade, ν é a viscosidade cinemática, ν_t é a viscosidade turbulenta, P^k é um termo de produção de energia cinética turbulenta e os termos α , β , β^* , σ_k e σ_ω são constantes empíricas dos modelos de turbulência, cujos valores são apresentados na Tabela 6. O termo F_1 é uma função de mistura, definida como:

$$F_1 = \tanh(\xi^2),$$

$$\xi = \min \left[\max \left\{ \frac{\sqrt{\kappa}}{\beta^* \omega d}; \frac{500\nu}{d^2 \omega} \right\}; \frac{4\sigma_{\omega, k-\varepsilon} k}{CD_\omega d^2} \right],$$

em que d é a distância da parede até o primeiro ponto da malha, β^* e $\sigma_{\omega, k-\varepsilon}$ são constantes e CD_ω é o termo de difusão cruzada, expresso por:

$$CD_\omega = \max \left\{ 2\sigma_{\omega, k-\varepsilon} \frac{1}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}; 10^{-10} \right\}.$$

A viscosidade turbulenta ν_t é definida por:

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; |\bar{s}| F_2)},$$

em que a_1 é uma constante empírica igual a 0,3, $|\bar{s}|$ é o módulo do tensor deformação do escoamento médio e F_2 é a função de mistura para a viscosidade turbulenta, definida por:

$$F_2 = \tanh(\eta^2),$$

$$\eta = \max \left\{ \frac{2k^{1/2}}{\beta^* \omega d}; \frac{500\nu}{d^2 \omega} \right\}.$$

As demais constantes são apresentadas na Tabela 6 e são oriundas dos modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$ com alguns ajustes (MENTER, KUNTZ & LANGTRY, 2003).

Tabela 6 – Constantes das equações do modelo de turbulência $k - \omega$ SST

β^*	$\alpha_{k-\omega}$	$\beta_{k-\omega}$	$\sigma_{k,k-\omega}$	$\sigma_{\omega,k-\omega}$	$\alpha_{k-\varepsilon}$	$\beta_{k-\varepsilon}$	$\sigma_{k,k-\varepsilon}$	$\sigma_{\omega,k-\varepsilon}$
0,09	5/9	3/40	0,85	0,5	0,44	0,0828	1	0,856

Fonte: Menter, Kuntz e Langtry (2003).

Na região externa ao escoamento (corrente livre) o $k - \omega$ SST emprega as características do modelo $k - \varepsilon$ 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).

4.2.3 Modelo LES Smagorinsky

O modelo LES foi desenvolvido por Joseph Smagorinsky (1963) e empregado inicialmente para aplicações meteorológicas (SMAGORINSKY, 1963; LILLY, 1967; DEARDORFF, 1974) como no estudo da turbulência na camada limite atmosférica em escoamentos transientes tridimensionais (CORRÊA, 2016).

A ideia básica da modelagem LES é resolver diretamente as grandes escalas (filtradas) através do método numérico e modelar as menores escalas de turbulência (residuais) através dos modelos de sub malha ou SGS (*subgrid scales*).

Figura 35 – Ilustração do espectro de energia cinética turbulenta com a indicação do limite de separação imposto pelo filtro do modelo de submalha de Smagorinsky

Fonte: Davidson (2017).

O limite de separação entre as escalas filtradas e residuais está posicionado na região das escalas inerciais (Figura 35). Essa separação de escalas é feita por uma operação de filtragem espacial das equações de Navier-Stokes (DAVIDSON, 2017).

De acordo com Pope (2000), o LES apresenta algumas etapas conceituais para o desenvolvimento da metodologia e aplicação nos métodos numéricos empregados nas simulações de escoamentos.

A primeira etapa é a filtragem espacial, na qual o campo de velocidade é decomposto na componente filtrada $\bar{u}(x, t)$ e na componente residual $u'(x, t)$, cuja expressão pode ser definida como:

$$u(x, t) = \bar{u}(x, t) + u'(x, t). \quad (25)$$

A operação de filtragem que estabelece o limite de separação entre a região das escalas filtradas e região das escalas residuais é obtida através da expressão (CORRÊA, 2016):

$$\bar{u}(x, t) = \int_V u(x', t) G(x, x') dx',$$

em que $u(x', t)$ é o campo filtrado, $G(x, x')$ é a função filtro, V é o volume de controle do elemento da malha e x' é posição do elemento de volume dx' .

A segunda etapa apresenta as equações da continuidade Eq. (19) e de Navier-Stokes Eq. (20) após a operação de filtragem e com a introdução do tensor de tensões residuais τ_{ij} , que assumem a seguinte forma:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (26)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \tau_{ij} \right). \quad (27)$$

A terceira etapa contempla a solução do problema de fechamento da turbulência, em que o tensor residual τ_{ij} é modelado em função da viscosidade turbulenta e definido por:

$$\tau_{ij} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} + \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij}, \quad (28)$$

sendo que ν_t é a viscosidade turbulenta, $\bar{S}_{ij}$ é o tensor das taxas de deformação no campo filtrado e δ_{ij} é o delta de Kronecker.

O termo $\bar{S}_{ij}$ é dado por:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right),$$

e o termo δ_{ij} é dado por:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j. \end{cases}$$

O modelo de Smagorinsky (1963) baseia-se na noção do comprimento de mistura, em que a viscosidade turbulenta, que é proporcional a um comprimento característico das escalas residuais ℓ_s e ao módulo do tensor das taxas de deformação das grandes escalas $|\bar{S}|$, é determinada por:

$$\nu_t = (C_s \cdot \Delta)^2 \cdot |\bar{S}|, \quad (29)$$

em que C_s é a constante de Smagorinsky, Δ é a largura do filtro (proporcional ao espaçamento da malha) e o termo $|\bar{S}|$ é expresso por:

$$|\bar{S}| = \left(2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij} \right)^{1/2},$$

O modelo de Smagorinsky caracteriza-se por ser altamente dissipativo quando a constante C_s apresentar um valor real. A constante de Smagorinsky é um coeficiente que pode ser estimado teoricamente para escoamentos que consideram a turbulência isotrópica, cujos valores podem variar de 0,18 a 0,23.

4.3 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

Neste trabalho, para as condições iniciais todas as variáveis são prescritas no início dos cálculos (condição de Dirichlet). Na entrada do domínio (“*inlet*”), as velocidades são prescritas e na saída do domínio (“*outlet*”), assume-se que o escoamento está completamente desenvolvido com pressão estática igual a zero Pa. Nas paredes superior e inferior do domínio, foi imposta a condição de não deslizamento e nas paredes frontal e posterior a condição de simetria foi imposta. Para as variáveis turbulentas dos modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$, próximo às paredes, foi aplicada a função parede “wall-funciton” (SONDAK; PLETCHER, 1995).

4.4 EQUAÇÕES DO MOVIMENTO

Para as equações apresentadas nesta seção, considerou-se o modelo físico como a seção transversal de uma placa plana fina (Figura 37) ou do tabuleiro de uma ponte submetida a um determinado escoamento.

Assim, as equações do movimento para um sistema desacoplado com dois graus de liberdade com vibrações no modo vertical h e rotacional α , podem ser escritas como (CLOUGH e PENZIEN, 1993; RAO, 2008):

$$m \left[\ddot{h}(t) + 2\zeta_h \omega_h \dot{h}(t) + \omega_h^2 h(t) \right] = L(t), \quad (30)$$

$$I \left[\ddot{\alpha}(t) + 2\zeta_\alpha \omega_\alpha \dot{\alpha}(t) + \omega_\alpha^2 \alpha(t) \right] = M(t), \quad (31)$$

em que m e I são massa e momento de inércia por unidade de comprimento, ζ_h e ζ_α as taxas de amortecimento no ar parado, ω_h e ω_α as frequências angulares naturais e $L(t)$ e $M(t)$ são as forças de sustentação e momento, respectivamente.

As equações do movimento na forma matricial são dadas por:

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{h} \\ \ddot{\alpha} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\zeta_h \omega_h m & 0 \\ 0 & 2\zeta_\alpha \omega_\alpha I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{h} \\ \dot{\alpha} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_h^2 m & 0 \\ 0 & \omega_\alpha^2 I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h \\ \alpha \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} L_h \\ M_\alpha \end{Bmatrix}. \quad (32)$$

Baseado na teoria de Theodorsen (1934), Scanlan e Tomko (1971) definiram os esforços aeroelásticos atuantes em uma placa plana através das expressões:

$$L_h = -\pi \rho b^2 \left(U \alpha + \ddot{h} - ab \ddot{\alpha} \right) - 2\pi \rho C(K) \left[U \alpha + \dot{h} + b \left(\frac{1}{2} - a \right) \dot{\alpha} \right], \quad (33)$$

$$\begin{aligned} M_\alpha = & -\pi \rho b^2 \left\{ \left(\frac{1}{2} - a \right) U b \dot{\alpha} + b^2 \left(\frac{1}{8} + a^2 \right) \ddot{\alpha} \right\} + \\ & 2\pi \rho U b^2 \left(\frac{1}{2} + a \right) C(K) \left[U \alpha + \dot{h} + b \left(\frac{1}{2} - a \right) \dot{\alpha} \right], \end{aligned} \quad (34)$$

nas quais K é a frequência reduzida ($K = b\omega/U$), ω é a frequência de oscilação circular ($\omega = 2\pi f$), B é o comprimento da placa plana ($b = B/2$), ρ é a densidade do ar, U é a velocidade do vento em escoamento laminar, ab é a distância do centro elástico da placa até o ponto de rotação. Além disso, $C(K)$ é a função circulatoria de Theodorsen, que pode ser definida por (MANNINI, 2006):

$$C(K) = F(K) + iG(K) = \frac{H_1^{(2)}(K)}{H_1^{(2)}(K) + iH_0^{(2)}(K)}, \quad (35)$$

na qual os termos $F(K)$ e $G(K)$ correspondem às partes real e imaginária da função de Theodorsen, respectivamente. A Figura 36 apresenta os gráficos das partes real e imaginária da função circulatoria de Theodorsen, plotados em função da frequência reduzida (K).

Figura 36 – Partes real $F(K)$ e imaginária $G(K)$ da função de Theodorsen

Fonte: Simiu e Scanlan (1996).

Também é possível expressar de forma analítica a função de Theodorsen através das funções de Henkel $H_n^{(2)}$, conforme a equação:

$$H_n^{(2)}(K) = J_n(k) - iY_n(k), \quad (36)$$

sendo $J_n(k)$ e $Y_n(k)$ as funções de Bessel de primeira e segunda ordem, respectivamente.

4.5 FLUTTER DERIVATIVES

Os *flutter derivatives* ou coeficientes de drapejamento são parâmetros adimensionais presentes nas equações linearizadas dos esforços aeroelásticos (Eqs. (45) e (46)). Representados pelos termos H_i^* e A_i^* ($i = 1, \dots, 4$), os coeficientes são determinados através de ensaios experimentais. No entanto, há possibilidade de estimá-los de forma analítica, utilizando-se os termos real $F(K)$ e imaginário $G(K)$ da função de Theodorsen, conforme as expressões:

$$K^2 H_1^* = -2\pi K F, \quad (37)$$

$$K^2 H_2^* = \frac{-\pi K}{2} \left[1 + \frac{4G}{K} + F \right], \quad (38)$$

$$K^2 H_3^* = -\pi \left[2F - \frac{GK}{2} \right], \quad (39)$$

$$K^2 H_4^* = \frac{\pi}{2} K^2 \left[1 + \frac{4G}{K} \right], \quad (40)$$

$$K^2 A_1^* = \frac{\pi}{2} KF, \quad (41)$$

$$K^2 A_2^* = \frac{-\pi}{2} \left[\frac{K}{4} - G - \frac{KF}{4} \right], \quad (42)$$

$$K^2 A_3^* = \frac{\pi}{2} \left[\frac{K^2}{32} + F - \frac{KG}{4} \right], \quad (43)$$

$$K^2 A_4^* = \frac{-\pi}{2} [KG]. \quad (44)$$

Considerando que, a geometria da seção transversal do tabuleiro de uma ponte se assemelha a uma placa plana (Figura 37), a teoria de Theodorsen pode ser aplicada para esse tipo de estrutura, quando essa se encontra submetida a um determinado escoamento.

Figura 37 – Representação esquemática dos graus de liberdade e forças aeroelásticas em uma placa plana

Fonte: Caracoglia et. al. (2009).

Os esforços aeroelásticos são determinados através de um sistema de equações inicialmente desenvolvidas por Robert Scanlan (SIMIU e SCANLAN, 1996) e que dependem dos coeficientes de drapejamento ou *flutter derivatives*.

As equações para um modelo com dois graus de liberdade são definidas por:

$$L_{ae}(t) = \frac{1}{2} q B \left[K H_1^*(K) \frac{\dot{h}}{U} + K H_2^*(K) \frac{B \dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^*(K) \alpha + K^2 H_4^*(K) \frac{h}{B} \right], \quad (45)$$

$$M_{ae}(t) = \frac{1}{2} q B^2 \left[K A_1^*(K) \frac{\dot{h}}{U} + K A_2^*(K) \frac{B \dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^*(K) \alpha + K^2 A_4^*(K) \frac{h}{B} \right], \quad (46)$$

em que U é a velocidade do vento e $q = \frac{1}{2} \rho U^2$ é a pressão dinâmica. $\dot{h}$ e $\dot{\alpha}$ são as derivadas de h e α . L_{ae} e M_{ae} são os esforços aeroelásticos autoexcitados de sustentação e momento, respectivamente, que também são funções do tempo t e os coeficientes de *flutter* H_i^* e A_i^* são funções do parâmetro adimensional K (frequência reduzida).

4.6 ANÁLISE AEROELÁSTICA DO FLUTTER

Para se determinar o valor da velocidade crítica de *flutter* para um modelo seccional do tabuleiro de uma ponte, são apresentadas duas técnicas que foram empregadas por Braun (2002), o método das oscilações livres (*Free Oscillations Method-FOM*) e o método direto (*Direct Method-DM*).

4.6.1 FOM (*Free oscillations method*)

A primeira técnica é conhecida como o método das oscilações livres (Mendes e Branco, 1999). Tal método sugere o estudo de um modelo que considera a atuação somente dos esforços aeroelásticos de sustentação (L_{ae}) e de momento (M_{ae}). Na análise dos coeficientes de drapejamento ou *flutter* das Eqs. (45) e (46), os coeficientes H_1^* e A_2^* estão relacionados ao amortecimento, os coeficientes H_4^* e A_3^* são relacionados à rigidez aerodinâmica e, os demais coeficientes encarregam-se do acoplamento dos graus de liberdade do sistema estrutural.

No entanto, a instabilidade aeroelástica de *flutter* ocorre a partir do instante em que o amortecimento global da estrutura submetida ao fluxo de vento torna-se negativo em algum dos graus de liberdade (*galloping* ou *torsional flutter*) ou em dois graus de liberdade acoplados (*flutter* clássico). Assim, pode-se restringir a análise do *flutter* aos coeficientes H_1^* e A_2^* (SIMIU e SCANLAN, 1996), cuja condição crítica de *flutter* é atingida, para o modo vertical e o modo torcional, respectivamente, por:

$$H_1^* \geq \frac{4m\zeta_h}{\rho B^2}, \quad (47)$$

$$A_2^* \geq \frac{4I\zeta_\alpha}{\rho B^4}. \quad (48)$$

Para o desenvolvimento das equações do movimento em um sistema mecanicamente desacoplado conforme as Eqs. (30) e (31) e as equações dos esforços aeroelásticos Eqs. (45) e (46), admite-se a solução através das expressões (49) e (50) para análise de deslocamentos para movimentos verticais e torcionais:

$$h = h_0 e^{\lambda t} \sin(\omega t), \quad (49)$$

$$\alpha = \alpha_0 e^{\lambda t} \sin(\omega t - \theta). \quad (50)$$

Dessa forma, substituindo-se os termos dependentes de h e α e suas respectivas derivadas pelas funções acima, obtêm-se as expressões desenvolvidas dos coeficientes de *flutter* em função da frequência reduzida (K):

$$H_1^*(K) = -\frac{4m}{\rho B^2} \left[\zeta_h \frac{\omega_h}{\omega_h^{\exp}} - \zeta_h^{\exp} \right], \quad (51)$$

$$A_2^*(K) = -\frac{4I}{\rho B^4} \left[\zeta_\alpha \frac{\omega_\alpha}{\omega_\alpha^{\exp}} - \zeta_\alpha^{\exp} \right]. \quad (52)$$

O termo $\delta^{\exp}$ é o decremento logarítmico médio das oscilações calculado por:

$$\delta^{\text{exp}} \approx 2\pi\zeta^{\text{exp}}. \quad (53)$$

De acordo com Mannini (2006), o coeficiente A_2^* caracteriza o comportamento físico do amortecimento aerodinâmico no movimento de torção e é conhecido como “peça chave” na instabilidade por *flutter*. Esse procedimento conduz à apresentação da resposta gráfica através da interpolação do coeficiente A_2^* com a velocidade reduzida U_R e apresenta a condição crítica de *flutter* quando em um determinado instante a série de termos do coeficiente A_2^* muda subitamente de sinal, cruzando a origem do eixo de abcissas referencial.

4.6.2 DM (*Direct method*)

A segunda técnica é conhecida como método direto e foi introduzido por Selvam *et al.* (2002). Embora seja baseado no método das oscilações livres, o método direto é mais simplificado, pois se propõe a calcular a velocidade crítica de *flutter* através da taxa de incremento ou decaimento da curva do deslocamento torcional do tabuleiro da ponte submetido ao fluxo de vento, para uma série de velocidades reduzidas do vento (U_R). A equação da taxa de incremento ou decaimento é definida por:

$$\gamma_d = \frac{\gamma^k - \gamma^{k+1}}{\gamma^k}, \quad (54)$$

em que γ_d é a taxa de incremento/decaimento, γ^k e γ^{k+1} correspondem aos valores de pico da amplitude de um mesmo período de oscilação da resposta em deslocamentos angulares.

Interpolando graficamente as taxas de incremento ou decaimento (γ_d) das oscilações do deslocamento torcional do tabuleiro da ponte com as velocidades reduzidas (U_R), obtém-se a velocidade crítica de *flutter* no instante em que a curva gerada muda de sinal, cruzando a origem do eixo das abcissas.

5 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O SOFTWARE CFD

O *software* de CFD utilizado nas simulações deste trabalho foi o ANSYS® CFX, onde as equações governantes são resolvidas numericamente no *solver* do programa, o qual emprega uma forma generalizada do método dos volumes finitos (MVF) baseado em elementos (EGER, 2010).

Conforme Versteeg e Malalasekera (1995), um *software* de CFD, como no caso do ANSYS® CFX adotado neste trabalho, deve conter obrigatoriamente três elementos essenciais:

- a) pré-processamento: consiste basicamente na etapa de inclusão de dados do escoamento no programa e envolve operações como, a definição geométrica do domínio computacional, a geração da malha, seleção do tipo de física que o problema envolve, a definição das propriedades do fluido e as condições iniciais e de contorno;
- b) *solver*: baseia-se no método numérico empregado pelo código do programa (no caso do CFX é o MVF), em que o algoritmo do *software* procede as atividades de integração das equações governantes do escoamento em todos os volumes de controle do domínio computacional, converte as equações integrais em um sistema de equações algébricas e realiza a solução desse sistema através de um método iterativo;
- c) pós-processamento: inclui a etapa de visualização dos dados de resposta do escoamento como a plotagem de vetores, contornos ou superfícies de variáveis como força, pressão ou velocidade e devido ao grande avanço nas ferramentas computacionais gráficas vêm apresentado diversas inovações no campo das animações gráficas e na exportação dos dados de resposta para outras plataformas CAE (*Computer Aided Engineering*).

A plataforma *Workbench* da ANSYS® é ambiente integrador das aplicações e elementos acima descritos e que compõem o *software*, como o gerador de modelos e geometrias ANSYS® *Design Modeler*, o gerador de malha ANSYS® *Meshing*, a ferramenta de configuração e pré-processamento CFX *pré*, o CFX *Solver Manager* e a ferramenta de pós-processamento CFD *post*.

As equações governantes, juntamente com as condições de contorno, são resolvidas numericamente no ambiente CFX *Solver Manager* que emprega uma forma generalizada do método dos volumes finitos baseados em elementos. O método de solução numérica empregado pelo CFX é o método parcialmente acoplado. Para envolver a pressão na equação da continuidade, o *software* utiliza o esquema de interpolação Rhie-Chow (RHIE e CHOW, 1983) para as velocidades desta equação. Os termos transientes das equações são aproximados pelo método de Euler Implícito de 2º ordem. Os termos difusivos são obtidos por diferenças centrais enquanto que para os termos advectivos utiliza-se o esquema *Upwind* de 2ª ordem (HIRSCH, 1988).

5.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

Para desenvolvimentos das simulações deste trabalho foram utilizados dois computadores. O equipamento nº 1 apresenta configuração com processador Intel Xeon E5-2620 v2, *clock* 2,10 GHz, memória RAM 64 GB e sistema operacional Windows 8.1 Pro de 64 bits, enquanto o equipamento nº 2 possui processador Intel Core i7-6700, *clock* 3,40 GHz, memória RAM 16 GB e sistema operacional Windows 10 Pro de 64 bits.

5.3 ESTUDO DE CASO

A fim de investigar os modelos de turbulência $k - \varepsilon$ padrão, $k - \omega$ SST e LES com modelo de submalha de *Smagorinsky* em problemas de fluido-estrutura com corpos imersos, foram realizadas as simulações de um escoamento do vento em torno de perfis em seção transversal.

Primeiramente foram considerados perfis com geometria simples, como a seção transversal circular e quadrada. Na sequência, foram considerados perfis de seção transversal do tabuleiro de pontes, como a estaiada *Sunshine Skyway* e a suspensa

Great Belt East. Inicialmente, o estudo desses modelos se deu em seção fixa, ou seja, as seções transversais foram modeladas como corpos rígidos e indeslocáveis.

Com intuito de se fazer a análise aeroelástica do fenômeno do *flutter*, foi atribuído ao modelo da seção transversal do tabuleiro da ponte *Great Belt East*, o movimento de translação no eixo vertical e o movimento de rotação ao redor do eixo normal à seção transversal do tabuleiro. Com o acoplamento desses deslocamentos verticais e torcionais foi possível investigar a instabilidade de *flutter* através da abordagem do Método das Oscilações Livres e do Método Direto.

5.3.1 Escoamento ao redor do perfil em seção circular

O primeiro problema a ser analisado é do escoamento de um fluido viscoso incidindo sobre um perfil em seção circular. Esse exemplo foi escolhido por se tratar de um caso clássico de fluido-estrutura com dados numéricos e experimentais disponíveis na literatura.

Para esse problema envolvendo seções circulares, objetiva-se mostrar através da simulação computacional a formação e desprendimento de vórtices na esteira do fluxo. Para números de Reynolds em torno de 40 (item (b) da Tabela 4), é observada a formação de dois vórtices simétricos e estacionários na região de recirculação logo após o cilindro. E, para números de Reynolds $Re = 1000$, ou seja, em uma faixa de $300 < Re < 3 \times 10^5$ (chamada faixa de turbulência subcrítica) é observada uma esteira completamente turbulenta, em que os vórtices são desprendidos alternadamente dos pontos de separação do escoamento sobre o entorno do cilindro (item (e) da Tabela 4). Dessa forma, foram analisados dois números de Reynolds: $Re = 40$ e $Re = 1000$.

O domínio computacional para as simulações do escoamento ao redor do perfil em seção circular, juntamente com as condições de contorno estão ilustradas na Figura 38. A seção circular do perfil possui diâmetro $D = 1,0$ m e o centro geométrico se encontra no ponto de coordenadas (5,5; 5,5). As condições iniciais da simulação estabelecem campos de velocidade e pressão iniciados totalmente em repouso.

Figura 38 – Domínio computacional e condições de contorno adotadas nas simulações do escoamento ao redor do perfil em seção circular

Fonte: Elaborada pelo autor.

O domínio computacional foi discretizado utilizando o gerador de malha *Meshing*. A definição da malha foi estabelecida através da realização de um estudo de independência de malha, analisando a convergência de um parâmetro significativo no escoamento. Nesse caso foi analisado o coeficiente de arrasto C_D e sua comparação foi realizada com o $C_{D,Num}$ obtido dos ensaios numéricos do trabalho de Braun (2007).

Para se verificar a convergência dos resultados em relação às malhas adotadas, tanto para as simulações com $Re = 40$ quanto para $Re = 1000$, diferentes refinamentos de malha foram testados, variando-se o número de elementos na região próxima à seção circular, conforme a Figura 39.

Figura 39 – Ilustração da divisão do domínio computacional para discretização da malha

Fonte: Elaborada pelo autor.

A definição das malhas para o estudo de convergência baseou-se na dimensão característica do sólido, e nesse caso foi o diâmetro D do cilindro. Foram simuladas algumas configurações de malhas e para cada uma delas foi calculado o coeficiente de arrasto C_D , o qual foi comparado com o valor de referência de $C_{D,Ref}$, através da equação para cálculo do erro relativo $\epsilon_{\%}$ (BRAUN, 2007):

$$\epsilon_{\%} = \frac{|C_{D,ref} - C_D|}{C_{D,ref}}. \quad (55)$$

O valor de referência $C_{D,ref}$ do trabalho de Braun (2007) é 1,76 para as simulações com $Re = 40$ e 1,62 para as simulações com $Re = 1000$. As Tabelas 7 e 8 apresentam as características das malhas desenvolvidas em relação à D para $Re = 40$ e $Re = 1000$, respectivamente.

Tabela 7 – Refinamento de malha para as simulações do escoamento ao redor do perfil em seção circular, com $Re = 40$

Malha	x	N° de nós	C_D	Erro $\epsilon_{\%}$
<i>Grid 1</i>	40 D	20551	1,817	0,02655
<i>Grid 2</i>	60 D	54117	1,812	0,02373
<i>Grid 3</i>	80 D	111444	1,794	0,01356
<i>Grid 4</i>	100 D	195017	1,791	0,01186

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 8 – Refinamento de malha para as simulações do escoamento ao redor do perfil em seção circular, com $Re = 1000$

Malha	x	N° de nós	C_D	Erro $\epsilon_{\%}$
<i>Grid 1</i>	40 D	20551	1,667	0,02901
<i>Grid 2</i>	60 D	54117	1,654	0,02099
<i>Grid 3</i>	80 D	111444	1,643	0,01420
<i>Grid 4</i>	100 D	195017	1,631	0,00679
<i>Grid 5</i>	120 D	260278	1,628	0,00494

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 40 – Malha estruturada formada pelos parâmetros do *Grid 4* ($Re = 40$) para o domínio computacional das simulações do escoamento ao redor do perfil em seção circular

Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, pode-se concluir do estudo de independência de malha que, o *Grid 4* apresentou a convergência para o parâmetro D . Com isso, essa malha foi utilizada nas simulações com $Re = 40$, conforme ilustrado na Figura 40.

Figura 41 – Detalhe do refinamento da malha nas proximidades do perfil em seção circular do *Grid 5* ($Re = 1000$)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o escoamento com $Re = 1000$, a malha selecionada foi a do *Grid 5*. Destaca-se na Figura 41 o refinamento da malha nas proximidades do perfil em seção circular para o *Grid 5*.

Cabe destacar que, embora o escoamento seja considerado bidimensional, foram empregados elementos volumétricos na geração da malha, devido às características do *CFX Solver Manager*, criando-se um elemento unitário na dimensão normal ao plano do domínio (eixo Z).

Os parâmetros do fluido e as constantes geométricas envolvidas no problema estão apresentados na Tabela 9. As simulações computacionais transcorreram em regime transiente com duração total de 30 segundos e um passo de tempo $\Delta t = 1,8 \times 10^{-4}$.

Tabela 9 – Constantes físicas e geométricas utilizadas nas simulações do escoamento ao redor do perfil em seção circular

Propriedades	Valor	
	$Re = 40$	$Re = 1000$
Densidade do fluido (ρ)	$1,0 \text{ Kg/m}^3$	$1,0 \text{ Kg/m}^3$
Viscosidade dinâmica (μ)	$0,25 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$	$0,01 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$
Velocidade do vento (U_0)	$10,0 \text{ m/s}$	$10,0 \text{ m/s}$
Dimensão característica – diâmetro do cilindro (D)	$1,0 \text{ m}$	$1,0 \text{ m}$

Fonte: Braun (2007).

5.3.2 Escoamento no entorno do perfil em seção quadrada

O segundo problema analisado é do escoamento turbulento sobre um perfil em seção quadrada e cujo número de Reynolds é de 22000. O objetivo desse modelo é verificar os efeitos causados pela ação de um fluxo através de um sólido com arestas angulosas e avaliar as implicações sobre o padrão do escoamento ao redor do mesmo.

A Figura 42 mostra o domínio computacional e as condições de contorno utilizadas para esse problema. A aresta do quadrado é de $1,0 \text{ m}$ e o seu centro geométrico se encontra na posição $(7,0; 7,0)$. Os campos de velocidade e pressão são iniciados totalmente em repouso.

Figura 42 – Domínio computacional e condições de contorno adotadas na simulação do escoamento no entorno do perfil em seção quadrada

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para esse problema, foi adotada uma malha estruturada com 94735 nós e 74724 elementos, conforme a Figura 43 e foi baseada na discretização do domínio computacional apresentado em Braun (2007).

O modelo também é um pseudo 2D, com dimensão unitária no eixo Z. O regime do escoamento também é transiente e o tempo total de 30 segundos e com um passo de tempo $\Delta t = 4,0 \times 10^{-4}$.

Figura 43 – Malha estruturada gerada para o domínio computacional das simulações do escoamento no entorno do perfil em seção quadrada

Fonte: Elaborada pelo autor.

As características geométricas e as constantes físicas utilizadas nas simulações são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Constantes físicas e geométricas utilizadas nas simulações do escoamento no entorno do perfil em seção quadrada

Propriedades	Valor	Unidade
Densidade do fluido (ρ)	1,0	Kg/m^3
Viscosidade dinâmica (μ)	$4,5 \times 10^{-4}$	$N \cdot s/m^2$
Velocidade do vento (U_0)	10,0	m/s
Dimensão característica – aresta do quadrado (D)	1,0	m

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3.3 Escoamento no entorno do tabuleiro da ponte estaiada *Sunshine Skyway*

Nesta seção, inicia-se a etapa das simulações computacionais em modelos que representam seções transversais de tabuleiro de pontes, em que o primeiro caso estudado foi a ponte estaiada *Sunshine Skyway*.

Na investigação do escoamento no entorno da ponte foi adotado um modelo seccional reduzido (Figura 44) do tabuleiro, desenvolvido para ensaios experimentais em túnel de vento e apresentados em Bartoli *et al.* (2009).

Figura 44 – Modelo seccional reduzido do tabuleiro da ponte estaiada *Sunshine Skyway*

Fonte: Bartoli (2009).

Uma análise comparativa de resultados foi realizada entre as simulações computacionais do presente trabalho empregando o ANSYS® CFX e os ensaios experimentais e numéricos apresentados em Mannini (2006) e o ensaio experimental de Davenport e King (1982).

A simulação computacional desse modelo reduzido foi realizada com o tabuleiro considerado fixo e indeslocável, em que a velocidade de entrada do vento no domínio (*inlet*) foi de $U_0 = 34$ m/s, com variação do ângulo de incidência do vento α com os valores de -5° , 0° e $+5^\circ$.

A geometria do domínio computacional está ilustrada na Figura 45 na qual obedeceu às distâncias estabelecidas no trabalho de Mannini (2006) para simulação numérica, bem como as condições de contorno fixadas para os ensaios.

Figura 45 – Domínio computacional e condições de contorno adotadas nas simulações do escoamento no entorno do modelo seccional reduzido do tabuleiro da ponte estaiada *Sunshine Skyway*

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 46 ilustra em detalhe a seção transversal do tabuleiro da ponte *Sunshine Skyway* com suas medidas de protótipo, modelada juntamente com o domínio computacional com auxílio da aplicação *Design Modeler* da plataforma de integração *Workbench* da ANSYS®.

Figura 46 – Geometria do modelo seccional reduzido do tabuleiro da ponte estaiada *Sunshine Skyway*

Fonte: Elaborada pelo autor.

A malha gerada para o domínio computacional foi construída com auxílio do gerador de malhas *Meshing*, sendo composta por elementos prismáticos de base quadrangular (tipo *Hex 8*) e elementos prismáticos de base triangular (tipo *Wed 6*).

Da mesma forma que nos casos anteriores, embora o escoamento seja considerado bidimensional, foram empregados elementos volumétricos na malha, devido às características do *CFX Solver Manager*, criando um elemento unitário no eixo Z do

domínio. Com isso, a discretização do domínio resultou em uma malha constituída por 60.388 nós, conforme ilustra a Figura 47.

Figura 47 – Malha gerada para as simulações do escoamento no entorno do tabuleiro em modelo seccional reduzido da ponte estaiada *Sunshine Skyway*

Fonte: Elaborada pelo autor.

No desenvolvimento das simulações computacionais, foi modelada a interação entre o fluido (ar atmosférico) e a estrutura do tabuleiro da ponte, representada como um sólido rígido, conforme dados da Tabela 11.

O número de Reynolds utilizado para as simulações foi de $Re = 3,0 \times 10^5$ e com um passo de tempo $\Delta t = 5,9 \times 10^{-5}$. O tempo total das simulações computacionais desenvolvidas foi de 20 segundos.

Tabela 11 – Constantes físicas e geométricas utilizadas nas simulações do escoamento no entorno do tabuleiro em modelo seccional reduzido da ponte estaiada *Sunshine Skyway*

Propriedades	Valor	Unidade
Massa específica do ar (ρ)	1,2041	kg/m^3
Viscosidade dinâmica (μ)	$3,059 \times 10^{-5}$	$N \cdot s/m^2$
Velocidade do vento (U_0)	34,0	m/s
Dimensão característica – largura do tabuleiro do modelo da ponte (B)	0,45	m

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3.4 Escoamento no entorno do tabuleiro da ponte suspensa *Great Belt East*

O modelo analisado nesta seção é o tabuleiro da ponte suspensa *Great Belt East*, em que o modelo seccional é representado com as dimensões reais conforme o projeto original.

A seção transversal do tabuleiro dessa ponte possui formato celular em viga caixão com uma estrutura metálica treliçada de rigidez, conforme mostra a Figura 48. Esse modelo é semelhante ao adotado nas simulações do artigo de Braun e Awruch (2002) e na dissertação de Braun (2002).

Figura 48 – Elevação, detalhe da torre e seção transversal da ponte suspensa *Great Belt East*

Fonte: Weight (2009).

Para esse problema foram estabelecidas as seguintes estratégias de análise para o estudo do escoamento e dos fenômenos provenientes dessa interação vento-estrutura:

a) Seção rígida e indeslocável

O modelo seccional do tabuleiro da ponte será analisado de forma estática, ou seja, o tabuleiro da ponte é considerado fixo, sem liberdade de deslocamentos. A ênfase ao estudo dos coeficientes aerodinâmicos (C_D , C_L e C_M) e do número de Strouhal (St).

b) Seção móvel com dois graus de liberdade (2 GDL)

O modelo seccional do tabuleiro da ponte será considerado móvel, com 2 GDL no deslocamento translacional vertical (h) e no deslocamento torcional (α) em torno do eixo normal à seção transversal da ponte. A ênfase ao estudo do fenômeno de instabilidade aeroelástica de drapejamento ou *flutter*.

5.3.4.1 Seção rígida e indeslocável

Nesta primeira abordagem, o desenvolvimento das simulações entre o fluxo do vento e o tabuleiro da ponte visa à determinação dos coeficientes aerodinâmicos de arrasto (C_D), de sustentação (C_L) e de momento (C_M), em função dos três ângulos de ataque do vento (α), -5° , 0° e $+5^\circ$, a uma velocidade de entrada do vento no domínio (*inlet*) de $U_0 = 40$ m/s.

Além disso, foi possível obter a frequência de desprendimento de vórtices f_v para o cálculo do número de Strouhal (St) para o ângulo de incidência do vento (α) igual a 0° , através do monitoramento da distribuição temporal velocidade vertical em um ponto posicionado na esteira do escoamento e distante em $0,2 B$ do tabuleiro da ponte, conforme Braun (2002). O espectro da frequência para definição da frequência de desprendimento de vórtices foi obtido através da aplicação da Transformada Rápida de Fourier ou FFT (*Fast Fourier Transform*).

O domínio computacional utilizado nas simulações do modelo seccional da ponte suspensa *Great Belt East*, juntamente com as respectivas condições de contorno está ilustrado na Figura 49.

Figura 49 – Domínio computacional e condições de contorno adotadas nas simulações do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte suspensa *Great Belt East*

Fonte: Elaborada pelo autor.

Novamente, o domínio computacional foi discretizado pelo gerador de malhas *Meshing* e um estudo de independência de malha precedeu as análises dos modelos de turbulência nos escoamentos com variação no ângulo de incidência do vento.

Tomando como base a malha estruturada adotada por Braun (2002), a análise da convergência para esta sequência de simulações variou a quantidade de elementos no entorno do tabuleiro da ponte, conforme ilustrado na Figura 50.

Figura 50 – Ilustração da divisão do domínio computacional para discretização da malha

Fonte: Elaborada pelo autor.

As divisões nas arestas do entorno da seção transversal, bem como nas demais arestas do domínio computacional são representadas através das letras a, b, c, d, e. As cinco malhas simuladas para o estudo de independência de malha com as divisões de cada aresta e o número de nós resultante em cada malha estão listadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Formação das malhas para estudo de independência de malha

Malha	a	b	c	d	e	Nº de nós
Grid 1	25	20	35	80	60	20567
Grid 2	32	25	44	90	75	36242
Grid 3	40	30	60	100	90	59443
Grid 4	50	35	75	110	105	89982
Grid 5	65	40	92	120	120	153985

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o estudo da independência da malha, o parâmetro utilizado para a análise comparativa entre as malhas e o valor de referência ($C_{D,ref}$) foi o coeficiente de arrasto (C_D). Para o cálculo de C_D foi empregado o termo B largura do tabuleiro da ponte como a dimensão característica do perfil. De acordo com Selvam *et al.* (2010), o valor de referência $C_{D,ref}$ para esse problema é de 0,05.

Logo, baseada na análise do erro relativo (Eq. (55)) entre valor de referência e o coeficiente de arrasto da respectiva malha, o estudo de independência de malha indica que o *Grid 5* atingiu a convergência, conforme é visto na Tabela 13.

Tabela 13 – Refinamento de malha para as simulações do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte *Great Belt East*

Malha	Nº de nós	C_D	Erro $\epsilon\%$
<i>Grid 1</i>	20567	0,0421	0,158
<i>Grid 2</i>	36242	0,0426	0,148
<i>Grid 3</i>	59443	0,0434	0,132
<i>Grid 4</i>	89982	0,0452	0,096
<i>Grid 5</i>	153985	0,0494	0,012

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 51 mostra a malha gerada no *Meshing*, de acordo com as divisões das arestas do *Grid 5*.

Figura 51 – Malha estruturada formada pelos parâmetros do *Grid 5* para as simulações do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte suspensa *Great Belt East*

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para as simulações computacionais desse problema, adotaram-se como principais características do fluido, bem como outros dados do escoamento, os parâmetros apresentadas na Tabela 14.

O número de Reynolds adotado para esse caso é $3,0 \times 10^5$ e o passo de tempo é $\Delta t = 1,15 \times 10^{-4}$ s. Ambos os valores são idênticos aos apresentados nos trabalhos de referência (BRAUN, 2002; BRAUN e AWRUCH, 2002). O escoamento se desenvolve em regime transiente e o tempo total da simulação é de 30 segundos.

Tabela 14 – Constantes físicas e geométricas utilizadas no pré-processamento das simulações do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte suspensa *Great Belt East*

Propriedades	Valor	Unidade
Massa específica (ρ)	1,20	Kg/m^3
Viscosidade cinemática (ν)	$5,78 \times 10^{-4}$	m^2/s
Velocidade do vento (U_0)	40,0	m/s
Dimensão característica – largura do tabuleiro do modelo da ponte (B)	31,0	m

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3.4.2 Seção móvel com 2 GDL

Para as simulações em seção móvel com 2 GDL, o objetivo foi a obtenção da velocidade crítica de iminência da instabilidade por *flutter*, através da investigação do comportamento do coeficiente de *flutter* A_2^* e análise da taxa de incremento/decaimento (γ_d) da distribuição temporal do deslocamento torcional do tabuleiro da ponte.

O coeficiente de *flutter* A_2^* é o que apresenta a condição crítica para análise do *flutter* (SIMIU E SCANLAN, 1996) e é obtido utilizando-se o método das oscilações livres (*Free Oscillations Method*). E, a taxa de incremento/decaimento foi obtida através do método direto (*Direct Method*).

Nesse caso, foram desenvolvidas três séries de simulações para associar a análise aeroelástica com os modelos de turbulência investigados. O ângulo de ataque do vento utilizada nas simulações desse caso foi $\alpha = 0^\circ$.

Além disso, empregou-se uma malha não estruturada, composta por 801379 elementos e 278894 nós. A malha contém elementos prismáticos de base quadrangular (tipo *Hex 8*) e elementos prismáticos de base triangular (tipo *Wed 6*) como ilustra a Figura 52.

Figura 52 – Malha não estruturada gerada para as simulações do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte suspensa *Great Belt East*, com detalhe do refinamento no contorno do tabuleiro

Fonte: Elaborada pelo autor.

As simulações foram realizadas com variação na velocidade reduzida (U_R), atribuindo os seguintes valores: $U_R = 2$, $U_R = 4$, $U_R = 6$, $U_R = 8$, $U_R = 10$, $U_R = 12$ que correspondem às velocidades $U_0 = 16,86$ m/s, $U_0 = 33,73$ m/s, $U_0 = 50,59$ m/s, $U_0 = 67,46$ m/s, $U_0 = 84,32$ m/s e $U_0 = 101,18$ m/s, respectivamente.

Para essas simulações computacionais as características do fluido bem como outros parâmetros do escoamento e do sólido são apresentadas nas Tabelas 14 e 15. Além disso, o número de Reynolds utilizado nas simulações foi de $Re = 1,0 \times 10^5$, com um tempo total de 15 segundos para cada caso.

Tabela 15 – Constantes físicas e propriedades utilizadas nas simulações do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte *Great Belt East*

Propriedades	Número de Reynolds $Re = 1 \times 10^5$					
	Velocidade Reduzida $U_R = \frac{U_0}{fB}$					
	$U_R = 2$	$U_R = 4$	$U_R = 6$	$U_R = 8$	$U_R = 10$	$U_R = 12$
Massa específica ρ (kg/m^3)	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Viscosidade dinâmica μ ($N \cdot s/m^2$)	$6,27 \times 10^{-3}$	$1,25 \times 10^{-2}$	$1,88 \times 10^{-2}$	$2,51 \times 10^{-2}$	$3,14 \times 10^{-2}$	$3,76 \times 10^{-2}$
Velocidade de Inlet U_0 (m/s)	16,86	33,73	50,59	67,46	84,32	101,18
Time Step (Δt)	$1,30 \times 10^{-4}$	$1,25 \times 10^{-4}$	$1,20 \times 10^{-4}$	$1,15 \times 10^{-4}$	$1,10 \times 10^{-4}$	$1,05 \times 10^{-4}$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 16 – Dados de projeto utilizados nas simulações do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte *Great Belt East*

Parâmetros	Valor	Unidade
Massa translacional (m)	23687	kg/m
Momento de inércia em relação ao centro de cisalhamento (I)	$2,501 \times 10^{-6}$	$kg.m^2/m$
Rigidez equivalente para o deslocamento vertical (K_h)	$3,00 \times 10^8$	kg/m^2
Rigidez equivalente para o deslocamento torcional (K_α)	$7,210 \times 10^5$	$kg.m/m$
Frequência natural vertical (f_h)	0,099	Hz
Frequência natural angular (f_α)	0,272	Hz
Amortecimento crítico (ζ)	0,002	

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

5.4.1 Resultados do escoamento ao redor do perfil em seção circular

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos das simulações do escoamento ao redor do perfil em seção circular, utilizando-se os modelos de turbulência $k - \varepsilon$ padrão, $k - \omega$ SST e LES *Smagorinsky*.

Os resultados obtidos nas simulações foram os coeficientes aerodinâmicos de arrasto (C_D), sustentação (C_L) e número de Strouhal (St), os quais foram comparados com os resultados do trabalho de Braun (2007). Além disso, são apresentados também o campo de pressões, campo de velocidades e linhas de corrente para caracterização da esteira do escoamento.

O número de Strouhal foi obtido através da Eq. (18) e em função da análise espectral da frequência de desprendimento de vórtices (f_v) aplicando-se a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform-FFT*) no histórico de velocidades verticais em um ponto monitorado a uma distância de $0,2 D$ à jusante do cilindro.

Figura 53 – Respostas do campo de pressões, campo de velocidades e linhas de corrente para as simulações computacionais do escoamento ao redor do perfil em seção circular, $Re = 40$, modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 53 estão expostos os resultados referentes aos campos de pressões, velocidades e linhas de corrente para os modelos de turbulência $k - \varepsilon$ padrão, $k - \omega$ SST e LES *Smagorinsky*, respectivamente, para o caso em que $Re = 40$.

Pode-se observar a partir dessa figura que, para $Re = 40$, o fenômeno relativo à formação dos dois vórtices estacionários na região de recirculação logo após a seção circular é reproduzido apenas pelos modelos LES e $k - \omega$ SST. É possível notar ainda que, de maneira qualitativa, esses resultados estão similares às respostas apresentadas no trabalho de Braun (2007) (Figura 54). Já o modelo $k - \varepsilon$ padrão não conseguiu reproduzir a formação característica de vórtices na esteira do escoamento.

Figura 54 – Resposta da simulação numérica apresentada em Braun (2007) para o campo de pressões e linhas de corrente do escoamento ao redor do perfil em seção circular, $Re = 40$

Fonte: Braun (2007).

Figura 55 – Comparativo da distribuição temporal do coeficiente de arrasto C_D e do coeficiente de pressão c_p ao redor do perfil em seção circular para o escoamento com $Re = 40$, modelos de turbulência SST e LES

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 55 apresenta um estudo comparativo entre os resultados da presente simulação e as de referência (BRAUN 2007) para a distribuição temporal do coeficiente de arrasto C_D e da distribuição sobre a superfície do cilindro de seção circular do coeficiente de pressão c_p . Os resultados do presente trabalho são correspondentes aos modelos de turbulência $k - \omega$ SST e LES, os quais apresentaram maior aderência na formação do par de vórtices estacionários à jusante do perfil.

Em seguida, na Figura 56 estão ilustrados os resultados para o caso do escoamento com $Re = 1000$.

Figura 56 – Respostas do campo de pressões, campo de velocidades e linhas de corrente para as simulações computacionais do escoamento ao redor do perfil em seção circular, $Re = 1000$, modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da Figura 56 observa-se que novamente os resultados numéricos para os modelos LES e $k - \omega$ SST apresentam maior consistência, na qual se identifica o desprendimento de vórtices alternados e a formação da esteira de von Kármán. O modelo $k - \omega$ SST apresenta melhor dissipação da esteira turbulenta enquanto que, o modelo LES apresenta maiores oscilações. A resposta do trabalho de Braun (2007) para o campo de pressões e linhas de corrente é apresentada na Figura 57.

Figura 57 – Resposta da simulação numérica apresentada em Braun (2007) para o campo de pressões e linhas de corrente do escoamento ao redor do perfil em seção circular, $Re = 1000$

Fonte: Braun (2007).

De forma análoga à simulação com $Re = 40$, apresenta-se na Figura 58 o comparativo entre a referência adotada (BRAUN 2007) e as análises do presente trabalho para o escoamento com $Re = 1000$.

Figura 58 – Comparativo da distribuição temporal do coeficiente de arrasto C_D e do coeficiente de sustentação C_L ao redor do perfil em seção circular para o escoamento com $Re = 1000$, modelos de turbulência SST e LES

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para fomentar a investigação dos fenômenos e enriquecer o comparativo das respostas apresentadas pelos modelos de turbulência, foram determinados o coeficiente de arrasto (C_D) para $Re = 40$, os coeficientes de arrasto e sustentação

(C_L) juntamente com o número de Strouhal (St) para $Re = 1000$, cujos dados estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultados dos coeficientes aerodinâmicos (C_D , C_L e C_M), do número de Strouhal (St) e do nº de Courant para o escoamento ao redor do perfil em seção circular, $Re = 40$ e $Re = 1000$, modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST

Modelo	Resultados							
	$Re = 40$				$Re = 1000$			
	C_D	C_L	St	nº Courant	C_D	C_L	St	nº Courant
LES	1,75	-	-	0,12	1,65	1,81	0,210	0,20
$k - \varepsilon$	1,33	-	-	0,13	1,49	1,74	0,181	0,23
SST	1,79	-	-	0,13	1,64	1,80	0,215	0,23
Referência Braun (2007)	1,77	-	-	-	1,62	1,82	0,217	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 17 mostra os resultados dos coeficientes aerodinâmicos, número de Strouhal e número de Courant, em termos de valores médios, juntamente com as respostas do trabalho de referência para comparação. De acordo com os resultados apresentados nessa tabela, é possível notar que, tanto para $Re = 40$ quanto para $Re = 1000$, os resultados são satisfatórios para os modelos LES e SST. Além disso, o número de Strouhal obtido com o modelo SST é o que mais se aproxima do valor de referência.

5.4.2 Resultados do escoamento no entorno do perfil em seção quadrada

Os resultados do escoamento no entorno do perfil de seção quadrada referente aos campos de pressões, velocidades e linhas de corrente para os modelos LES *Smagorinsky*, $k - \varepsilon$ padrão e $k - \omega$ SST, para o caso em que o escoamento tem $Re = 22000$, estão expostos na Figura 59.

Figura 59 – Respostas do campo de pressões, campo de velocidades e linhas de corrente para as simulações computacionais do escoamento no entorno do perfil em seção quadrada, $Re = 22000$, modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da Figura 59 é possível observar a formação da esteira de vórtices para os três modelos de turbulência. Entretanto, o desprendimento de vórtices ocorre de forma coerente apenas para os modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$ SST. Já para o modelo LES, o fenômeno se dá de forma desordenada e com grandes oscilações, ocorrendo também uma dissipação de vórtices considerada inadequada na esteira do escoamento.

Figura 60 – Resposta da simulação numérica apresentada em Braun (2007) para o campo de pressões e linhas de corrente do escoamento no entorno do perfil em seção quadrada, $Re = 22000$

Fonte: Braun (2007).

Na Figura 61 está ilustrado um estudo comparativo entre os resultados da presente simulação (ANSYS CFX) e as respostas de trabalho de referência (BRAUN, 2007) para a distribuição temporal do coeficiente de arrasto C_D e do coeficiente de sustentação C_L .

Figura 61 – Comparativo da distribuição temporal dos coeficientes de arrasto C_D e do coeficiente de sustentação C_L no entorno do perfil em seção quadrada para o escoamento com $Re = 22000$, modelos de turbulência SST e $k - \varepsilon$

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 18 mostra os resultados para as respostas dos coeficientes aerodinâmicos C_D e C_L de cada um dos modelos de turbulência além do número de Strouhal (St).

Também é apresentado o número de Courant das simulações. Os valores obtidos foram comparados com os resultados numéricos do trabalho de Braun (2007).

Tabela 18 – Resultados dos coeficientes aerodinâmicos (C_D , C_L e C_M), do número de Strouhal (St) e do nº de Courant para escoamentos no entorno do perfil em seção quadrada, $Re = 22000$, modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST

Modelo	Resultados			
	$Re = 22000$			
	C_D	C_L	St	n° Courant
LES	2,28	1,15	0,110	0,21
$k - \varepsilon$	2,16	1,08	0,150	0,41
SST	2,30	1,22	0,135	0,42
Referência Braun (2007)	2,31	1,24	0,143	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pela Tabela 18, nota-se que as respostas para o perfil em seção quadrada do coeficiente aerodinâmico C_D obtidos com os modelos LES e $k - \omega$ SST foram satisfatórias. No entanto, para o resultado do número de Strouhal, o modelo LES não foi satisfatório. Nesse parâmetro, destaca-se o valor alcançado com o modelo SST, que melhor se aproximou dos resultados de referência.

Tabela 19 – Desempenho computacional apresentado nas simulações com os modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST para os escoamentos sobre os perfis em seção circular e seção quadrada

Modelo	Tempo de processamento (em horas)		
	Seção circular		Seção quadrada
	$Re = 40$	$Re = 1000$	$Re = 22000$
LES	114,15	140,38	64,81
$k - \varepsilon$	91,78	119,450	54,08
SST	103,63	127,06	55,83
Malha: nº de nós	195017	260278	94735

Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim, cabe acrescentar os dados sobre o desempenho computacional percebido pelas simulações para geometrias simples (seções circular e quadrada), em função dos recursos computacionais disponíveis, descritos na seção 5.2 deste trabalho. Portanto, conforme as informações descritas na Tabela 19, o tempo de

processamento do modelo LES foi o maior para todas as simulações e, mesmo que esse modelo tenha obtido alguns resultados satisfatórios, fica evidente que o modelo $k - \omega$ SST é o mais adequado para esses dois casos por apresentar um consumo de processamento computacional aceitável.

5.4.3 Resultados do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte estaiada *Sunshine Skyway*

O modelo seccional reduzido do tabuleiro da ponte estaiada *Sunshine Skyway* foi analisado de forma estática, ou seja, sem liberdade de deslocamentos. Para esse caso, foram obtidas as respostas dos coeficientes aerodinâmicos de arrasto (C_D), sustentação (C_L) e momento (C_M) em função dos três ângulos de ataque do vento (α), -5° , 0° e $+5^\circ$, a uma velocidade do vento no *inlet* do domínio $U_0 = 34$ m/s.

Foi obtido também o número de Strouhal (St) para os três ângulos de ataque, através da determinação da frequência de desprendimento de vórtices f_v a partir da análise espectral da velocidade vertical extraída de um ponto à $0,2 B$ após a seção transversal do tabuleiro da ponte. As simulações foram realizadas utilizando-se os modelos de turbulência $k - \omega$ SST, LES Smagorinsky e $k - \varepsilon$ padrão. As respostas das simulações computacionais estão expressas nas Tabelas 20 a 22 e foram comparadas com os resultados numérico (CFD) e experimental (túnel de vento - CRIACIV) de Mannini (2006), e com os resultados experimentais (SSB) de Davenport e King (1982).

Tabela 20 – Resultados dos coeficientes aerodinâmicos (C_D , C_L e C_M) e número de Strouhal (St) para o escoamento no entorno do tabuleiro da ponte *Sunshine Skyway*, modelos de turbulência SST, LES e $k - \varepsilon$, ângulo de ataque do vento $\alpha = -5^\circ$

Simulações	C_D	C_L	C_M	St
ANSYS CFX - SST	0,120	-0,310	-0,010	0,220
ANSYS CFX - LES	0,105	-0,395	-0,030	0,260
ANSYS CFX - $k - \varepsilon$	0,070	-0,450	0,045	0,268
Manini (2006) (Túnel de vento - CRIACIV)	0,115	-0,500	-0,025	0,230
Davenport e King (1982) (SSB - exp.)	0,140	-0,100	0,080	0,140
Mannini (2006) (numérico)	0,155	-0,250	0,060	0,150

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 21 – Resultados dos coeficientes aerodinâmicos (C_D , C_L e C_M) e número de Strouhal (St) para o escoamento no entorno do tabuleiro da ponte *Sunshine Skyway*, modelos de turbulência SST, LES e $k - \varepsilon$, ângulo de ataque do vento $\alpha = 0^\circ$

Simulações	C_D	C_L	C_M	St
ANSYS CFX - SST	0,130	-0,300	0,250	0,246
ANSYS CFX - LES	0,102	-0,460	0,320	0,250
ANSYS CFX - $k - \varepsilon$	0,085	-0,500	0,380	0,260
Manini (2006) (Túnel de vento - CRIACIV)	0,110	-0,200	0,100	0,210
Davenport e King (1982) (SSB - exp.)	0,120	0,300	0,170	0,135
Mannini (2006) (numérico)	0,115	0,300	0,165	0,150

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 22 – Resultados dos coeficientes aerodinâmicos (C_D , C_L e C_M) e número de Strouhal (St) para o escoamento no entorno do tabuleiro da ponte *Sunshine Skyway*, modelos de turbulência SST, LES e $k - \varepsilon$, ângulo de ataque do vento $\alpha = +5^\circ$

Simulações	C_D	C_L	C_M	St
ANSYS CFX - SST	0,155	0,421	0,386	0,250
ANSYS CFX - LES	0,125	0,430	0,450	0,262
ANSYS CFX - $k - \varepsilon$	0,100	0,500	0,520	0,270
Manini (2006) (Túnel de vento - CRIACIV)	0,135	0,300	0,200	0,235
Davenport e King (1982) (SSB - exp.)	0,140	0,500	0,160	0,085
Mannini (2006) (numérico)	0,145	0,550	0,130	0,080

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se observar nos resultados apresentados nas Tabelas 20 a 22 que, entre as simulações realizadas no presente trabalho, as do modelo de turbulência $k - \omega$ SST foram as que mais se aproximaram das respostas obtidas nas simulações de referência. Consequentemente, os resultados dos modelos LES e $k - \varepsilon$ padrão ficaram distantes de todos os resultados de referência.

Para uma melhor interpretação e comparação dos dados obtidos nas simulações, os resultados dos coeficientes aerodinâmicos em função do ângulo de ataque foram organizados em gráficos que estão ilustrados na Figura 62.

Figura 62 – Gráfico dos coeficientes aerodinâmicos de arrasto C_D (a), sustentação C_L (b) e momento C_M (c) para diferentes ângulos de ataque do vento (α) da simulação ANSYS CFX com modelo de turbulência SST e das referências adotadas

Fonte: Elaborada pelo autor.

O resultado do número de Strouhal (St) em função do ângulo de ataque do vento encontra-se no gráfico ilustrado na Figura 63.

Figura 63 – Gráfico do número de Strouhal (St) para os diferentes ângulos de ataque de vento (α) da simulação ANSYS CFX com modelo de turbulência SST e das referências adotadas

Fonte: Elaborada pelo autor.

Verifica-se a partir desses gráficos que os resultados obtidos no presente trabalho (ANSYS CFX) com o modelo de turbulência $k - \omega$ SST estão mais próximos dos resultados do túnel de vento (CRIACIV) de Mannini (2006), enquanto que os

resultados numéricos (CFD) de Mannini (2006) estão mais próximos dos resultados experimentais (SSB) de Davenport e King (1982).

Na Figura 64 é apresentada a comparação entre os campos de velocidade da simulação ANSYS CFX – SST e os resultados do trabalho de Mannini (2006) – numérico.

Figura 64 – Comparativo entre campos de velocidades para o escoamento no entorno do tabuleiro da ponte *Sunshine Skyway* com ângulo de incidência $\alpha = 0^\circ$ das simulações (a) ANSYS CFX com modelo de turbulência SST e (b) Mannini (2006) numérico

Fonte: Elaborada pelo autor.

Destaca-se no comparativo da Figura 64 que a ilustração (a), correspondente à simulação do presente trabalho (ANSYS CFX – SST) não apresentou uma adequada formação de vórtices na esteira, como pode ser visualizada na ilustração (b).

Na Figura 65 são apresentadas as linhas de corrente obtidas para as simulações ANSYS CFX – SST com os ângulos de incidência do vento (α), -5° , 0° e $+5^\circ$, juntamente com os resultados numéricos obtidos por Mannini (2006).

Figura 65 – Comparativo das respostas das linhas de corrente entre as simulações ANSYS CFX com modelo de turbulência SST e Mannini (2006) numérico

Fonte: Elaborada pelo autor.

Embora as respostas dos coeficientes aerodinâmicos (C_D , C_L e C_M) e número de Strouhal (St) apontem para uma maior aderência entre resultados obtidos nas simulações ANSYS CFX com modelo de turbulência $k - \omega$ SST e o ensaio experimental em túnel de vento de Mannini (2006), a resposta do campo de velocidades da simulação ANSYS CFX – SST apresentou uma formação inconsistente da esteira de vórtices, em comparação ao ensaio numérico de Mannini (2006). Isso demonstra uma possível inadequação desse modelo de turbulência na representação do escoamento na esteira, que é fundamental para a definição da frequência de desprendimento de vórtices.

5.4.4 Resultados do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte suspensa *Great Belt East*

5.4.4.1 Seção rígida e indeslocável

As respostas dos coeficientes aerodinâmicos de arrasto (C_D), sustentação (C_L) e momento (C_M) foram obtidas pelas simulações com o ANSYS® CFX empregando-se os modelos de turbulência LES *Smagorinsky*, $k - \varepsilon$ padrão e $k - \omega$ SST para os ângulos de ataque $\alpha = -5^\circ$, 0° e $+5^\circ$. Os resultados obtidos estão apresentadas nas Tabelas 23 a 25.

Os resultados numéricos foram comparados com os resultados numéricos de Braun e Awruch (2002) que utilizou o modelo LES, e experimentais de Reinhold *et al.*

(1992) e Kuroda (1997). Destaca-se que para o cálculo dos coeficientes aerodinâmicos C_D , C_L , C_M e do número de Strouhal (St), a dimensão característica do perfil adotada foi a altura do tabuleiro da ponte ($H = 4,4$ m).

Tabela 23 – Resultados dos coeficientes aerodinâmicos (C_D , C_L e C_M) para o escoamento no entorno do tabuleiro da ponte *Great Belt East*, modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST, ângulo de ataque do vento $\alpha = -5^\circ$

Simulações	C_D	C_L	C_M
ANSYS CFX - LES	0,65	-0,43	-0,06
ANSYS CFX - $k - \varepsilon$	0,67	-0,42	-0,07
ANSYS CFX - SST	0,66	-0,44	-0,07
Braun e Awruch (2002) - num.	0,65	-0,43	-0,07
Reinhold <i>et al.</i> (1992) - exp.	0,58	-0,42	-0,09
Kuroda (1997) - exp.	0,86	-0,86	-0,07

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 24 – Resultados dos coeficientes aerodinâmicos (C_D , C_L e C_M) para o escoamento no entorno do tabuleiro da ponte *Great Belt East*, modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST, ângulo de ataque do vento $\alpha = 0^\circ$

Simulações	C_D	C_L	C_M
ANSYS CFX - LES	0,63	0,05	0,05
ANSYS CFX - $k - \varepsilon$	0,63	0,05	0,04
ANSYS CFX - SST	0,63	0,06	0,05
Braun e Awruch (2002) - num.	0,63	0,05	0,05
Reinhold <i>et al.</i> (1992) - exp.	0,58	0,05	0,05
Kuroda (1997) - exp.	0,49	-0,17	0,05

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 25 – Resultados dos coeficientes aerodinâmicos (C_D , C_L e C_M) para o escoamento no entorno do tabuleiro da ponte *Great Belt East*, modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST, ângulo de ataque do vento $\alpha = +5^\circ$

Simulações	C_D	C_L	C_M
ANSYS CFX - LES	0,68	0,32	0,11
ANSYS CFX - $k - \varepsilon$	0,67	0,31	0,11
ANSYS CFX - SST	0,67	0,32	0,11
Braun e Awruch (2002) - num.	0,68	0,32	0,12
Reinhold <i>et al.</i> (1992) - exp.	0,65	0,35	0,12
Kuroda (1997) - exp.	0,60	0,47	0,16

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 26 mostra os resultados do número de Strouhal obtidos pelas simulações com os modelos de turbulência LES *Smagorinsky*, $k - \varepsilon$ padrão e $k - \omega$ SST para os ângulos de ataque $\alpha = 0^\circ$. Para o número de Strouhal, além do trabalho de referência (Braun e Awruch, 2002), foram comparados ainda com os ensaios numéricos de Larsen e Walther (1997) e ensaios experimentais em túnel de vento.

Tabela 26 – Número de Strouhal para o escoamento no entorno do tabuleiro da ponte *Great Belt East*, modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST, ângulo de ataque do vento $\alpha = 0^\circ$

Simulações	<i>St</i>
ANSYS CFX - LES	0,179
ANSYS CFX - $k - \varepsilon$	0,189
ANSYS CFX - SST	0,176
Braun e Awruch (2002) - num.	0,180
Larsen e Walther (1997) - num.	0,168
Larsen e Walther (1997) - Túnel de vento	0,158

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se observar a partir das Tabelas 23 a 26 que os resultados dos coeficientes aerodinâmicos obtidos com os três modelos de turbulência e para os três diferentes ângulos de ataque estão muito próximos dos resultados de Braun e Awruch (2002).

É possível notar ainda que o número de Strouhal obtido pelo presente trabalho, também está em boa concordância, sendo que, o resultado obtido com o modelo LES *Smagorinsky* foi o que melhor se aproximou das respostas apresentadas nos trabalhos de Braun (2002) e Braun e Awruch (2002).

As ilustrações da Figura 66 mostram os campos de velocidade e pressão obtidos, respectivamente, com o modelo LES *Smagorinsky*, $k - \omega$ SST e $k - \varepsilon$ padrão, para o ângulo de incidência do vento $\alpha = 0^\circ$.

Figura 66 – Respostas do campo de velocidades e do campo de pressões para as simulações computacionais do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte *Great Belt East* para os modelos de turbulência LES, SST e $k - \varepsilon$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se nessas imagens que apenas nas simulações com os modelos de turbulência LES e $k - \omega$ SST houve a formação alternada de vórtices na esteira do escoamento, com destaque para o modelo $k - \omega$ SST cuja formação da esteira de von Kármán não apresentou oscilações como na resposta do modelo LES *Smagorinsky*.

A Figura 67 ilustra as linhas de corrente no contorno do tabuleiro da ponte obtidas pelo pós-processamento do *software* ANSYS® CFX utilizando os diferentes modelos de turbulência e com os ângulos de incidência do vento $\alpha = -5^\circ$, 0° e $+5^\circ$. Os resultados obtidos foram comparando com os resultados de referência (BRAUN e AWRUCH, 2002).

Figura 67 - Respostas das linhas de corrente para as simulações computacionais do escoamento no entorno do tabuleiro da ponte *Great Belt East* para os modelos de turbulência LES, SST e $k - \varepsilon$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Avaliou-se ainda, o desempenho computacional das simulações em função dos recursos computacionais disponíveis. Desse modo, as informações descritas na Tabela 27 destacam o tempo de processamento obtido pelas simulações computacionais e para cada modelo de turbulência adotado, ainda indicando a malha utilizada.

Tabela 27 – Desempenho computacional apresentado nas simulações com os modelos de turbulência LES, $k - \varepsilon$ e SST para os escoamentos sobre o modelo seccional fixo do tabuleiro da ponte *Great Belt East*

Modelo	Tempo de processamento (em horas)
	$Re = 3 \times 10^5$
LES	239,4
$k - \varepsilon$	195,2
SST	198,7
Malha nº de nós	153985

Fonte: Elaborada pelo autor.

Novamente, verifica-se que o tempo de processamento para as simulações apresentou os maiores valores no modelo LES. Esse fato confirma uma das principais características da técnica de simulação das grandes escalas, que é resolver diretamente as grandes escalas e modelar as pequenas escalas, causando um maior consumo de processamento computacional nesse modelo de turbulência.

Com isso, levando-se em consideração todos os parâmetros aerodinâmicos analisados juntamente com o tempo de processamento, o modelo $k - \omega$ SST demonstra ser o mais adequado para o desenvolvimento das simulações.

5.4.4.2 Seção móvel com 2 GDL

Com o desenvolvimento das simulações computacionais no modelo seccional móvel (2 GDL) do tabuleiro da ponte *Great Belt East*, foram obtidos os históricos de deslocamento torcional para cada um dos modelos de turbulência (LES, $k - \omega$ SST e $k - \varepsilon$ padrão), conforme apresentado nos gráficos da Figura 68.

Figura 68 – Gráficos da distribuição temporal dos deslocamentos torcionais para os modelos de turbulência LES, SST e $k - \varepsilon$ para a série de velocidades reduzidas do vento

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base nos deslocamentos ocorridos no tabuleiro do modelo seccional da ponte, as Tabelas 28 a 30 mostram os resultados obtidos para os termos do decremento

² Não houve gráfico de deslocamento para a velocidade $U_R = 12$, pois o fenômeno do *flutter* ocorreu antes da velocidade $U_R = 10$ para o modelo de turbulência LES.

logarítmico δ^{exp} (Eq. (53)), a taxa de incremento/decaimento γ_d (Eq. (54)) e o coeficiente de *flutter* A_2^* (Eq. (52)), utilizando os modelos LES, SST e $k - \varepsilon$, respectivamente.

Tabela 28 – Resultados da análise da instabilidade aeroelástica do *flutter* para o tabuleiro da ponte *Great Belt East*, modelo de turbulência LES

Parâmetros	Velocidade Reduzida $U_R = \frac{U}{fB}$				
	$U_R = 2$	$U_R = 4$	$U_R = 6$	$U_R = 8$	$U_R = 10$
Decremento logaritmico (δ^{exp})	0,0110	0,0217	0,0556	0,0185	-0,6098
Taxa de incremento/decaimento (γ_d)	0,03536	0,3529	0,8214	0,0364	-2,3860
<i>Flutter Derivative</i> (A_2^*)	$-1,56 \times 10^{-2}$	$-3,09 \times 10^{-2}$	$-7,89 \times 10^{-2}$	$-2,63 \times 10^{-2}$	$8,65 \times 10^{-1}$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 29 – Resultados da análise da instabilidade aeroelástica do *flutter* para o tabuleiro da ponte *Great Belt East*, modelo de turbulência SST

Parâmetros	Velocidade Reduzida $U_R = \frac{U}{fB}$					
	$U_R = 2$	$U_R = 4$	$U_R = 6$	$U_R = 8$	$U_R = 10$	$U_R = 12$
Decremento logaritmico (δ^{exp})	0,060813	0,099741	0,131933	0,173227	0,154202	-0,471359
Taxa de incremento/decaimento (γ_d)	0,137518	0,170125	0,199226	0,272844	0,288653	-1,985803
<i>Flutter Derivative</i> (A_2^*)	$-8,63 \times 10^{-2}$	$-1,42 \times 10^{-1}$	$-1,87 \times 10^{-1}$	$-2,46 \times 10^{-1}$	$-2,19 \times 10^{-1}$	$6,69 \times 10^{-1}$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 30 – Resultados da análise da instabilidade aeroelástica do *flutter* para o tabuleiro da ponte *Great Belt East*, modelo de turbulência $k - \varepsilon$

Parâmetros	Velocidade Reduzida $U_R = \frac{U}{fB}$					
	$U_R = 2$	$U_R = 4$	$U_R = 6$	$U_R = 8$	$U_R = 10$	$U_R = 12$
Decremento logaritmico (δ^{exp})	0,115968	0,118984	0,106631	0,121519	0,111119	-0,667119
Taxa de incremento/decaimento (γ_d)	0,297874	0,177511	0,091097	0,178031	0,203989	-2,797101
<i>Flutter Derivative</i> (A_2^*)	$-1,65 \times 10^{-1}$	$-1,69 \times 10^{-1}$	$-1,51 \times 10^{-1}$	$-1,72 \times 10^{-1}$	$-1,58 \times 10^{-1}$	$9,47 \times 10^{-1}$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para obter os resultados do coeficiente de *flutter* A_2^* e da taxa de incremento/decaimento γ_d através do método das oscilações livres (FOM) e do método direto (DM), respectivamente, é preciso plotá-los em curvas que relacionam os respectivos termos com a velocidade reduzida do escoamento $U_R = U/fB$.

Assim, as Figura 69 a 71 ilustram as curvas do coeficiente de *flutter* A_2^* e da taxa de incremento/decaimento γ_d , ambas em função da velocidade reduzida e utilizando, respectivamente, os modelos LES Smagorinsky, $k - \omega$ SST e $k - \varepsilon$ padrão.

Figura 69 – (a) Curva do coeficiente de *flutter* A_2^* obtida através do método FOM e (b) curva da taxa de incremento/decaimento γ_d obtida através do método DM para as simulações no tabuleiro da ponte *Great Belt East* para o modelo de turbulência LES

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 70 – (a) Curva do coeficiente de *flutter* A_2^* obtida através do método FOM e (b) curva da taxa de incremento/decaimento γ_d obtida através do método DM para as simulações no tabuleiro da ponte *Great Belt East* para o modelo de turbulência SST

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 71 – (a) Curva do coeficiente de *flutter* A_2^* obtida através do método FOM e (b) curva da taxa de incremento/decaimento γ_d obtida através do método DM para as simulações no tabuleiro da ponte *Great Belt East* para o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ padrão

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir desses gráficos, é obtida a velocidade crítica do *flutter* no instante em que ambas as curvas dos termos A_2^* e γ_d apontam a mudança de sinal, ou seja, a curva atravessa o eixo de origem e o comportamento dos movimentos oscilatórios observados na interação vento-ponte passa de amortecido para divergente.

Portanto, através dos gráficos apresentados nas Figuras 69 a 71, obteve-se a velocidade crítica de *flutter* U_{cr} para cada um dos modelos de turbulência, aplicando-se ambos os métodos de análise aeroelástica (FOM e DM). Os valores da velocidade de *flutter* estão organizados e listados na Tabela 31.

Tabela 31 – Velocidades críticas de *flutter* dos modelos de turbulência LES, SST e $k - \varepsilon$ para os métodos FOM e DM

Método	Velocidade crítica de <i>flutter</i> U_{cr}					
	LES		SST		$k - \varepsilon$	
	U_R	(m/s)	U_R	(m/s)	U_R	(m/s)
<i>Free Oscillations Method</i> (FOM)	8,20	69,14	10,64	89,68	10,42	87,89
<i>Direct Method</i> (DM)	8,10	68,30	10,40	87,69	10,23	86,24

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em decorrência da análise dos resultados da velocidade crítica de *flutter* U_{cr} da Tabela 31, o modelo de turbulência LES *Smagorinsky* mostrou maior proximidade em relação aos resultados de referência. Isso se deve ao fato de que para o método

das oscilações livres, em que a curva de A_2^* projetada no eixo horizontal atinge o valor zero, obtém-se uma velocidade reduzida de aproximadamente $U_R \cong 8,2$, o que corresponde à velocidade dimensional de 69,14 m/s ou 248,91 km/h.

Também para o método direto, o modelo LES apresentou a melhor aderência aos resultados de referência, pois através da curva da taxa de incremento/decaimento γ_d projetada no eixo das velocidades reduzidas ocorre o valor da velocidade reduzida de $U_R \cong 8,1$, o que corresponde à velocidade dimensional de 68,30 m/s ou 245,88 km/h.

A Tabela 32 ilustra alguns resultados da velocidade crítica de *flutter* para o modelo seccional da ponte *Great Belt East*, destacando e comparando os resultados obtidos no presente trabalho com os dados provenientes da literatura.

Tabela 32 – Velocidade crítica de *flutter* para o tabuleiro da ponte *Great Belt East* obtidas através de simulações numéricas

Simulações	U_{cr} (m/s)
Simulação ANSYS CFX - LES (FOM)	69,14
Simulação ANSYS CFX - LES (DM)	68,30
BRAUN (2002) (FOM)	73
BRAUN (2002) (DM)	69
Numérico SELVAM <i>et al.</i> (2002)	65-72
Numérico LARSEN e WALTHER (1997)	74
Túnel de vento LARSEN e WALTHER (1997)	73

Fonte: Elaborada pelo autor.

6 COMENTÁRIOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os comentários sobre as simulações realizadas no capítulo 5, bem como as considerações acerca dos resultados alcançados e baseados nos respectivos comparativos são apresentadas na sequência para cada modelo desenvolvido neste trabalho.

6.1 PERFIS DE GEOMETRIA SIMPLES

6.1.1 Perfil de seção circular

Os resultados das simulações do perfil de seção circular para o escoamento com número de Reynolds $Re = 40$ alcançaram boa aderência para os modelos de turbulência LES Smagorinsky e $k - \omega$ SST. No entanto, o modelo $k - \varepsilon$ padrão apresentou respostas com baixa acurácia tanto na representação do par de vórtices característicos na parte posterior do perfil quanto no parâmetro aerodinâmico adotado como referência, que nesse caso foi o coeficiente de arrasto (C_D).

Os resultados satisfatórios obtidos pelos modelos LES Smagorinsky e $k - \omega$ SST se baseiam no ganho de acurácia proveniente do estudo de independência de malha. Isso permitiu que a modelagem LES e principalmente o modelo $k - \omega$ SST representassem melhor os fenômenos na proximidade da parede do cilindro e na esteira do escoamento.

Além disso, percebeu-se uma pequena vantagem em acurácia para o modelo $k - \omega$ SST em relação ao LES Smagorinsky. Essa vantagem pode ser atribuída à condição $y^+ < 1$ adotada pelo modelo $k - \omega$ SST, que trata de forma adequada as funções de parede. Já a melhoria da acurácia do LES depende de um maior refinamento da malha, incorrendo em altos custos computacionais. E, as razões da falta de acurácia do modelo $k - \varepsilon$ padrão também podem ser atribuídas à inadequação do tratamento das funções de parede refletido no valor do y^+ requerido para esse modelo, bem como as próprias características do modelo, que apresenta dificuldade em lidar com gradientes adversos de pressão.

De forma análoga, caracterizaram-se as simulações para $Re = 1000$, visto que novamente, os modelos LES Smagorinsky e $k - \omega$ SST apresentaram de forma mais

apropriada as características do desprendimento de vórtices e configuração da esteira.

Cabe destacar que, o modelo LES Smagorinsky apresentou grandes oscilações na esteira de vórtices à jusante do escoamento. Esse fato é devido a uma possível imprecisão no passo de tempo adotado, junto com características altamente dissipativas do modelo, que podem provocar problemas na representação adequada do escoamento.

6.1.2 Perfil de seção quadrada

A análise do escoamento turbulento sobre o perfil de seção quadrada demonstrou que todos os modelos de turbulência adotados representaram de forma satisfatória as características inerentes ao fluxo no entorno deste sólido, bem como a formação da esteira do escoamento.

No entanto, a formação da esteira de vórtices demonstra maior estabilidade nos modelos $k - \omega$ SST e $k - \varepsilon$ padrão. Da mesma maneira, a recirculação na parte posterior do perfil quadrado ilustrado pelas linhas de corrente também foi melhor capturada através dos modelos $k - \omega$ SST e $k - \varepsilon$ padrão. Porém, o comparativo dos coeficientes aerodinâmicos apresentados na Tabela 18 indicou maior convergência aos valores de referência dos coeficientes de arrasto (C_D) e sustentação (C_L) ao modelo $k - \omega$ SST, enquanto o $k - \varepsilon$ padrão atingiu maior erro relativo entre os modelos analisados.

O modelo LES Smagorinsky também apresentou boa concordância com a referência para o coeficiente de arrasto (C_D). De forma semelhante à simulação do escoamento no entorno do perfil em seção circular, o sucesso da aplicação do modelo $k - \omega$ SST se estabeleceu em virtude da adequação da malha e da estabilidade do método numérico. Melhores resultados podem ser obtidos com os modelos LES e $k - \varepsilon$ padrão se a discretização do domínio computacional proporcionar maior adequação às características e propriedades dos referidos modelos de turbulência.

6.2 MODELOS SECCIONAIS DE TABULEIROS DE PONTE

6.2.1 Modelo seccional reduzido da ponte estaiada *Sunshine Skyway*

Em virtude dos resultados obtidos nos modelos de geometria simples (perfis em seção circular e quadrada), optou-se por proceder a primeira análise em um modelo seccional de ponte com geometria complexa, com intuito de testar o comportamento dos modelos de turbulência (LES Smagorinsky, $k - \omega$ SST e $k - \varepsilon$ padrão) nessa circunstância.

O resultado de maior acurácia dessa série de simulações foi com o modelo de turbulência $k - \omega$ SST, o qual mostrou maior aderência com os resultados dos ensaios experimentais de Mannini (2006) e de Davenport e King (1982).

Em relação ao ensaio numérico de Mannini (2006), constata-se a semelhança na região da recirculação do escoamento na parte posterior do perfil. No entanto, a formação da esteira de vórtices também demonstrou significativas diferenças entre a presente simulação com modelo de turbulência $k - \omega$ SST e o ensaio numérico de Mannini (2006).

Os motivos da menor aderência dos resultados das simulações com os modelos de turbulência empregados em relação ao ensaio numérico de Mannini (2006) podem ser atribuídos ao refinamento da malha, principalmente no contorno do perfil do tabuleiro da ponte. De maneira análoga, pode-se concluir que as simulações com os modelos de turbulência LES Smagorinsky e $k - \varepsilon$ padrão apresentaram ainda menor aderência em relação às referências, pois a configuração da malha prejudicou o processo de filtragem, para o caso do modelo LES, e também interferiu o processo de solução do escoamento com uso das funções de parede, para o modelo para o modelo $k - \varepsilon$ padrão.

Com os resultados obtidos para esse problema fica evidente que, para escoamentos ao redor de corpos com geometrias mais complexas, o uso de diferentes modelos de turbulência demanda a aplicação de distintas configurações de discretização do domínio computacional. Isso demonstra que, com a utilização uma malha similar para todos os modelos de turbulência não é possível capturar adequadamente os efeitos característicos do escoamento.

6.2.2 Modelo seccional da ponte suspensa *Great Belt East*

6.2.2.1 Seção rígida e indeslocável

Para as simulações computacionais da ponte *Great Belt East*, em que se considerou a seção transversal do tabuleiro como sendo um sistema rígido, ou seja, sem liberdade para deslocamentos, constatou-se aderência dos resultados obtidos nas simulações com as respostas dos trabalhos de referência.

Os coeficientes aerodinâmicos e número de Strouhal obtidos numericamente ficaram muito próximos dos valores numéricos de Braun (2002) e Braun e Awruch (2002), principalmente aqueles obtidos com o modelo LES Smagorinsky. Entretanto, constatou-se também que nas simulações utilizando os modelos de turbulência $k - \varepsilon$ padrão e $k - \omega$ SST não foi possível obter o fenômeno do desprendimento de vórtices, ao contrário do modelo LES, que reproduziu o fenômeno.

O refinamento da malha obtido através do estudo de independência possibilitou maior acurácia dos resultados no modelo LES Smagorinsky, o mesmo empregado no trabalho de referência. A malha estruturada para o LES permite que o método faça a modelagem das funções de parede utilizando a *near wall modelling* (LES NWM), beneficiando o desempenho dos recursos computacionais das simulações.

Entretanto, para o modelo $k - \varepsilon$ padrão e principalmente para o modelo $k - \omega$ SST, com a adoção da malha estruturada nesse conjunto de simulações, não foi possível o refinamento adequado das regiões próximas ao tabuleiro da seção transversal da ponte. Isso acabou prejudicando a captura dos efeitos da camada limite e subcamada viscosa, ensejando na perda da representação adequada dos efeitos do escoamento no entorno do tabuleiro e na esteira de vórtices.

6.2.2.2 Seção móvel com 2 GDL

A análise aeroelástica realizada no modelo dessa ponte suspensa objetivou a comparação do desempenho dos modelos de turbulência LES Smagorinsky, $k - \omega$ SST e $k - \varepsilon$ padrão em uma série de simulações transientes que visavam reproduzir a ocorrência do fenômeno *flutter* através da determinação da velocidade crítica desse evento de instabilidade.

Com base nos resultados obtidos para esse caso, verificou-se que o modelo LES apresentou maior aderência às respostas apresentadas nas referências.

Fica evidente a adequação do modelo LES Smagorinsky às características do escoamento, às condições iniciais e de contorno e à malha gerada, embora sejam percebidas algumas alterações em respostas dos deslocamentos torcionais, como no caso do histórico de deslocamentos de $U_R = 2$. O refinamento no contorno do tabuleiro da ponte permitiu que os deslocamentos torcionais fossem capturados com maior acurácia. No entanto conduziu a modelagem a um alto consumo do recurso computacional, levando o modelo a desempenhar características do *near wall resolution* (LES NWR). Esse fato contribuiu para que as simulações com modelagem LES tivessem um tempo total de simulação aceitável, tornando-as viáveis de serem executadas em computadores menos robustos.

Para os modelos $k - \omega$ SST e $k - \varepsilon$ padrão, foi possível observar uma significativa alteração no padrão de resposta da instabilidade de *flutter*, considerando que as velocidades críticas em ambos os métodos ultrapassaram o resultado de referência, ficando acima da velocidade reduzida $U_R = 10$.

Já o modelo $k - \varepsilon$ padrão demonstrou bastante inconsistência na solução da última faixa de velocidade reduzida ($U_R = 12$). Foi possível observar uma série de problemas de instabilidade numérica, sendo necessário um recurso alternativo para obter a solução. A alternativa foi iniciar a simulação com o modelo de turbulência SST e alterar para o $k - \varepsilon$ depois de transcorrido 1,5 segundos do tempo total de simulação. Inclusive, os parâmetros de comparação estabelecidos nos gráficos do coeficiente de *flutter* A_2^* e da taxa de incremento/decaimento γ_d indicam instabilidade na resposta do modelo $k - \varepsilon$, até mesmo no comparativo com o modelo SST.

A instabilidade nos modelos $k - \omega$ SST e $k - \varepsilon$ padrão para esta análise aeroelástica pode ser atribuída ao tratamento das funções de parede, especialmente no modelo $k - \varepsilon$. No geral, ambos os modelos da família RANS apresentaram inconsistência nas interações com maiores velocidades do vento, principalmente nas velocidades próximas do *flutter*.

Esperava-se que o modelo $k - \omega$ SST apresentasse melhores resultados em virtude do refinamento aplicado no contorno do tabuleiro. Entretanto, a movimentação

acoplada do tabuleiro da ponte nos deslocamentos verticais e torcionais tendem a movimentar os nós da malha no processo do *remeshing* (malha dinâmica). Isso possivelmente alterou o posicionamento dos nós na região da subcamada inercial, induzindo o $k - \omega$ SST a sofrer significativas perturbações, potencializadas pelo movimento oscilatório divergente do tabuleiro da ponte.

Mesmo para o modelo LES Smagorinsky, que apresentou maior acurácia nos resultados das simulações, poderiam ser implementadas algumas melhorias principalmente no refinamento da malha e nas condições de contorno em relação às que foram adotadas pelo trabalho de referência. É notório que, o modelo de submalha de Smagorinsky é altamente dissipativo, o que pode refletir em divergências significativas nos resultados da simulação, diminuindo a aderência com as respostas do trabalho de referência. A adoção do modelo LES com submalha dinâmica pode ser uma alternativa viável para melhoria dos resultados, principalmente porque esse modelo elimina os problemas associados ao valor constante do coeficiente de Smagorinsky C_S .

Por fim, pode-se concluir que, em virtude das propriedades inerentes a cada modelo de turbulência e relacionando-as com as características de geometria do perfil submetido a um determinado escoamento, é fundamental o conhecimento aprofundado da metodologia aplicada no modelo de turbulência e adequá-lo corretamente à discretização do domínio.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se que seja aplicada a modelagem LES com modelo de submalha dinâmica em escoamentos ao redor de pontes para estudo do *flutter*. Também há possibilidade de obtenção de resultados satisfatórios com a aplicação de uma nova abordagem conhecida como TLES (*Temporal Large Eddy Simulation*), que é uma adaptação da modelagem LES que utiliza as equações filtradas no domínio temporal.

REFERÊNCIAS

- AMMANN, O. H.; von KARMAN, T.; WOODRUFF, G. B. **The failure of the Tacoma Narrows bridge**. Washington D.C., USA, 1941. 285 p. Report to Federal Works Agency Washington, D.C., in March 28, 1941.
- ANDERSON Jr., J. D. **Fundamentals of aerodynamics**. 3rd ed. New York USA, McGraw-Hill. 2001.
- ARMALY, B. F.; DURST, F.; PEREIRA, J. C. F.; SCHONUNG, B. Experimental and theoretical investigation of backward facing step flow. **Journal of fluids mechanics**, 127: 473-496. 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988. 66 p.
- _____. **NBR 7187**: projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido: procedimento. Rio de Janeiro, 2003. 11 p.
- ASYIKIN, M. T. **CFD simulation of vortex induced vibration of a cylindrical structure**. Thesis, Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University, Trondheim, Norway. 2012.
- BARTOLI, G., CONTRI, S., MANNINI, C., & RIGHI, M. Toward an Improvement in the Identification of Bridge Deck Flutter Derivatives, **Journal of Engineering Mechanics Division**, vol. 135, nº 8, p. 771-785. 2009.
- BATCHELOR, G. K. **An introduction to fluid dynamics**. Cambridge University Press. 1967.
- BENRA, F. K. et al. A comparison of one-way and two-way coupling methods for numerical analysis of fluid structure interactions. **Journal of Applied Mathematics**. 2011. 16 p.
- BISPLINGHOFF, R. L.; ASHLEY, H.; HALFMAN, R. L. **Aeroelasticity**. Cambridge: Addison-Wesley, 1955.
- BLESSMANN, J. **Introdução ao Estudo das Ações Dinâmicas do Vento**. 2^a ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS. 2005.
- _____. **O vento na engenharia estrutural**. 2^a ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS. 2013. 240 p.
- BRAUN, A. L. **Um modelo para a simulação numérica da ação do vento sobre seções de ponte**. 2002. 157 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2002.

_____. **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.

BRAUN, A. L.; AWRUCH, A. M. Numerical simulation of the wind action on a long span bridge deck. I **South American Congress on Computational Mechanics – MECOM**. 2002.

BURTON T. et al. **Windy energy handbook**. 2nd ed. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 2011.

BUSH, J. W.; ARISTOFF, J. M.; OSOI, A. E. An experimental investigation of the stability of the circular hydraulic jump. **Journal of fluid mechanics**, 558: 33-52. 2006.

CAMPOS, A. M. S. R. **Bridge aerodynamic stability**: instability phenomena and simplified models. Master. Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal. 2014.

CARACOGLIA, L. et al. Comparative and sensitivity study of flutter derivatives of selected bridge deck sections, Part 2: Implications on the aerodynamic stability of long-span bridges. **Journal of Engineering Structures** 31: 2194–2202. 2009.

CERMAK, J. E. Applications of fluids mechanics to wind engineering – a freeman scholar lecture. **Journal of Fluids Engineering**, v. 97, n. 1, p. 9-38, 1975.

CLOUGH, R. W; PENZIEN, J. **Dynamics of structures**. 2nd ed. New York USA, McGraw-Hill. 1993.

CORREIA, L. **Simulação de grandes escalas de escoamentos turbulentos com filtragem temporal via método de volumes**. 2016. 99 p. Tese (Doutorado). Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2016.

COX, H. R.; A. G. PUGSLEY. The stability of the static equilibrium of the elastic and aerodynamic actions on a wing. London: HMSO. **Aeronautical Research Committee R&M N° 1509**. 1932.

DAVIDSON, L. **Fluid Mechanics, turbulent flow and turbulence modeling**. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2017. 363 p. Lecture Notes, TME225 Mechanics of Fluids, MTF270 Turbulence Modeling.

EGER, R. S. **Modelação de escoamentos turbulentos sob a ação de rotação alternada**. 2010. 106 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina. 2010.

EL DEBS, M. K., TAKEYA, T. **Introdução às pontes de concreto**. São Carlos: Escola de Engenharia, 2009. 106 p. Apostila para a disciplina SET - 412.

FITZPATRICK, R. **Theoretical fluid dynamics**. Texas, USA: University of Texas at Austin, 2015. 566 p. Lecture Notes, PHY 336L Fluid Mechanics.

FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações**. 2ª ed. São Paulo: EDUSP. 2012. 552 p.

FOX, R.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 5ª ed. Livros Técnicos e Científicos Editora. 1995.

FREIRE, A. P. S. **Teoria de camada limite**. Rio de Janeiro, Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1990. 130 p. Notas de aula para a disciplina EEK 500 Mecânica dos Fluidos II.

_____. **Introdução à turbulência**. Rio de Janeiro, Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1993. 54 p. Notas de aula para a disciplina COM 812 Turbulência.

FUNG, Y. C. **An introduction to the theory of aeroelasticity**. New York: Dover Publications, Inc. 1993. p. 60-271.

GIMSING, N. J.; GEORGAKIS, C. T. **Cable supported bridges: concept and design**. 3rd. ed. Chichester: Wiley, 2012. 599 p.

GOECKI, J. P. **Túneis aerodinâmicos: presente, passado e futuro**. In : [II ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS] **ENCIT**, 1988. Águas de Lindóia-SP, 53 p.

HALLAK, P. H. **Parâmetros aeroelásticos para pontes via fluidodinâmica computacional**. 2002. 158 p. Tese (Doutorado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2002.

HIRSCH, C. **Numerical computation of internal and external flows**. Vol. 2. John Wiley & Sons; Chichester. 1988. 691 p.

HINZE, J. O. **Turbulence**. 2nd. ed. New York: McGraw-Hill, 1975. 790 p.

HOLMES, J. D. **Wind loading of structures**. 2nd ed. New York: Taylor & Francis. 2007.

HOU, G.; WANG, J.; LAYTON, A. Numerical methods for fluid structure interaction: a review. **Communications in Computational Physics**, Cambridge, v. 12, n. 2, p. 337-377, August 2012.

HOUGHTON E. L.; CARPENTER P. W. **Aerodynamics for engineering students**. 5th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2003.

ISNARD, A. A. **Investigação computacional do escoamento e da dispersão de poluentes atmosféricos sobre topografias complexas**. Tese (Doutorado) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004. 230 p.

JONES, W. P.; LAUNDER, B. E. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 15, n. 2, p. 301-314, February 1972.

KAYS, W. M.; CRAWFORD, M. E. **Convective Heat and Mass Transfer**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1993. 601 p.

KURODA, S. Numerical simulation of flow around a box girder of a long span suspension bridge. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 1997. 239-252.

LARSEN, A.; WALTHER, J. H. Aeroelastic analysis of bridge girder sections based on discrete vortex simulation. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, V. 67 & 68, 1997. 253-265.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. The numerical computation of turbulent flows. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**: 269–289. 1974.

LIMAS, L. F. **Determinação das características aerodinâmicas de seções transversais de pontes em túnel de vento**. 2003. 175 p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2003.

_____. **Determinação de influência de seções transversais na resposta dinâmica de pontes através de ensaios em túnel de vento e identificação de sistemas**. 2007. 269 p. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2007.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos**. 2^a ed. Rio de Janeiro: Editora LTC. 2014.

MANNINI, C. **Flutter vulnerability assessment of flexible bridges**. 245 p. Thesis, Faculty of Engineering of the University of Florence, Italy – TU Braunschweig, Germany. 2006.

MARINHO, D. V. **Métodos Construtivos de Pontes**. Dissertação (Mestrado). Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal. 2012.

MAZARIM, D. M. **Histórico das pontes estaiadas e sua aplicação no Brasil**. 2011. 125 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MENTER, F. R., **Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications**, AIAA Journal, 32 (8), 1598-1605, 1994.

MENTER, F. R.; KUNTZ, M.; LANGTRY, R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. **Turbulence, Heat and Mass Transfer 4: proceedings of the Fourth International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer**, p. 1-8, Antalya, 12-17 October 2003.

NÚÑEZ, Gustavo Javier Zani; LOREDO-SOUZA, Acir Mércio; ROCHA, Marcelo Maia. Uso do túnel de vento como ferramenta de projeto no design aerodinâmico. **Design e Tecnologia**, [S.l.], v. 2, n. 04, p. 10-23, dez. 2012. ISSN 2178-1974.

Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/det/index.php/det/article/view/69>>. Acesso em: 26 maio 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.23972/det2012iss04pp10-23>.

O'CONNOR, C. **Design of bridge superstructures**. New York: John Wiley & Sons, 1971. 552 p.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2nd ed. Taylor & Francis. 1987.

PAIDOUSSIS, M. P.; PRICE, S. J.; DE LANGRE, E. **Fluid structure interactions: cross flow induced instabilities**. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 402 p.

PFEIL, M. S. **Comportamento aeroelástico de pontes estaiadas**. 1993. 251 p. Tese (Doutorado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1993.

PRANDTL, Ludwig. **Motions of fluids with very little viscosity**. Third International Congress of Mathematicians, Heidelberg, Germany Empire. 17p. 1904. Disponível em <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930090813.pdf>>. Acesso em 20 abr. 2017.

POPE, S. B. **Turbulent Flows**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 806 p.

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas**. Tradução de Arlete Simille. 4^a ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 2008. 424 p.

RECKTENWALD, G. **The $k - \varepsilon$ Turbulence Model**. Oregon, USA: Portland State University, 2009. 20 p. Lecture Notes, ME 448/548 Applied Computational Fluid Dynamics.

REINHOLD, T. A.; BRINCH, M.; DAMSGAARD, A. Wind tunnel tests for the Great Belt link. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AERODYNAMICS OF LARGE BRIDGE. **Proceedings**. 1992. 255-267.

REYNOLDS, Osborne. **An experimental investigation of the circumstances which determine whether a motion of water in parallel channels shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels**. Philos. Trans. Roy. Soc. 174: 935–82. 1883.

REZENDE, A. L. T. **Análise numérica da bolha de separação do escoamento turbulento sobre placa plana fina inclinada**. 2009. 263 p. Tese (Doutorado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009.

RICHARDSON, L. F. **The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations with an application to the stresses in a masonry dam**. Trans. Roy. Soc. Lond. Ser. A 210, 307–357. 1910.

RIGHI, M., **Aeroelastic stability of long span suspended bridges: flutter mechanism on rectangular cylinders in smooth and turbulent flow**. 2003. 193 p. Thesis, Faculty of Engineering of the University of Florence, Italy. 2003.

RODI, W. **Turbulence models and their application in hydraulics: a state-of-art review**. 3rd. ed. Rotterdam: Balkema, 1993. 104 p.

SCANLAN, R. H.; TOMKO, J. J. Airfoil and Bridge Deck Flutter Derivatives. **Journal of Engineering Mechanics Division**, vol. 97, n° 6, p. 1717-1737. 1971.

SCHLICHTING, H. **Boundary-Layer Theory**. Translated by Joseph Kestin. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 1979. 817 p. Original title: Grenzschicht-Theorie.

SELVAM, R. P.; BOSCH, H.; JOSHI, R. Comparison of 2D and 3D CFD modeling of bridge aerodynamics. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL WIND ENGINEERING, 5. 2010, North Carolina, **Proceedings**. North Carolina, USA: CWE, 2010.

SELVAM, R. P.; GOVINDASWAMY, S.; BOSCH, H. Aeroelastic analisys of bridges usim FEM and moving grids. **Wind and Structures**, V. 5, 2002. 257-266.

SILVA, T. M. L. **Aeroelasticidade transônica de aerofólio com arqueamento variável**. 2010. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos. 2010.

SILVEIRA NETO, A. **Turbulência nos fluidos aplicada**. Apostila da Disciplina Mecânica dos Fluidos do Programa de Pós Graduação da Universidade Federal de Uberlândia, v. 1, 2002.

SIMI, E.; SCANLAN R. H. **Winds effects on structures: fundamentals and application to design**. 3. ed. John Willey & Sons. 1996.

SIMONSEN, K.; STEVENS, R. **Investigation on long span suspension bridges during erections: the Great Belt East Bridge**. Master. Department of Civil Engineering, Aalborg University. 2008.

SLEIGH, A. **An introduction to fluid mechanics**. Leeds, England: University of Leeds, 2001. 126 p. Lecture Notes, CIVE 1400 Fluid Mechanics.

SMAGORINSKY, J. **General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment**. Monthly weather review, v. 91, n. 3, pp. 99-164. 1963.

SONDAK, D.L.; PLETCHER, R.H. Application of wall functions to generalized nonorthogonal curvilinear coordinate systems. **AIAA Journal**, V. 33, n.1, 1995.

SOUSA Jr., L. C. de. **Uma aplicação dos métodos dos elementos finitos à interação fluido estrutura**. 2006. 197 p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília. 2006.

STUCCHI, F. R. **Pontes e grandes estruturas**. São Paulo: Escola Politécnica. 2006. 99 p. Notas de aula para a disciplina Pontes e Grandes Estruturas, PEF-2404.

TAVARES, E. F. **Modelo experimental para ensaios de flutter de uma seção típica aeroelástica**. 2009. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos. 2009.

TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. **A first course in turbulence**. Cambridge: MIT Press, 1972.

THEODORSEN, T. **General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter**. NACA Technical Report 496, Aeronautics, Twentieth Annual Report of the National Advisory Committee for Aeronautics, NACA. 1934.

TROITSKY, M. S. **Planning and design of bridges**. New York: John Wiley & Sons, 1994.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Essex: Longman Scientific & Technical, 1995. 257 p.

VON KARMAN, T.; BURGERS, J. M. **General theory of aerodynamics: perfect fluids**. v. 2, J. Springer, 1935. 367 p.

VON KARMAN, T. Turbulence. **Journal of the Royal Aeronautical Society**, v. 41, p. 108-41, 1937.

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.

WADDELL, J. A. L. **Bridge Engineering**. New York: Wiley, v. I, 1916. 1-35 p.

WEIGHT, A. J. **Critical analysis of the Great Belt East Bridge**. Denmark. Proceedings of Bridge Engineering Conference. University of Bath, UK. 2009.

WILCOX, D. C. **Turbulence modeling for CFD**. DCW Industries, Inc. California. 1993.

WITTWER, A. R. **Simulação do vento atmosférico e dos processos de dispersão de poluentes em túnel de vento**. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. 209 p.