

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
ENGENHARIA NAVAL

ISABELA FERNANDES CASTANHO

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL EM
CILINDROS DE SEÇÃO CIRCULAR SUJEITOS À VIBRAÇÃO INDUZIDA POR
VÓRTICES

Joinville
2024

ISABELA FERNANDES CASTANHO

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL EM
CILINDROS DE SEÇÃO CIRCULAR SUJEITOS À VIBRAÇÃO INDUZIDA POR
VÓRTICES

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de Bacharel em Enge-
nharia Naval, no Centro Tecnológico de
Joinville, da Universidade Federal de Santa
Catarina.

Orientador: Prof. Dr. André Luís Condino
Fujarra

Joinville
2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Castanho, Isabela Fernandes
ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO DA RUGOSIDADE
SUPERFICIAL EM CILINDROS DE SEÇÃO CIRCULAR SUJEITOS À
VIBRAÇÃO INDUZIDA POR VÓRTICES / Isabela Fernandes Castanho
; orientador, André Luís Condino Fugarra, 2024.
48 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,
Graduação em Engenharia Naval, Joinville, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Naval. 2. número de Reynolds. 3. canal de
água circulante (CAC). 4. rugosidade superficial. 5.
vibração induzida por vórtices (VIV). I. Fugarra, André Luís
Condino. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Naval. III. Título.

ISABELA FERNANDES CASTANHO

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL EM
CILINDROS DE SEÇÃO CIRCULAR SUJEITOS À VIBRAÇÃO INDUZIDA POR
VÓRTICES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 10 de dezembro de 2024.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Luís Condino Fugarra
Orientador/Presidente

Prof. Dr. Rodolfo Trentin Gonçalves
Membro
UTOKYO

Enga. Aline Leal de Lima Gontarski
Membra
USP

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Primeiramente, agradeço à minha família: minha mãe, meu pai e minha irmã, pelo amor, apoio e incentivo incondicional ao longo de toda a minha jornada acadêmica. Estendo meu agradecimento à minha prima e à minha tia, por todo o carinho e suporte que me proporcionaram durante este período.

Dedico um agradecimento especial ao meu saudoso cachorrinho Floquinho, cujas memórias de carinho e companheirismo sempre permanecerão, e à minha cachorrinha Aurora, cuja presença trouxe conforto e alegria nos momentos de maior desafio.

Aos meus amigos, em especial à Jéssica e ao Elizandro, que tornaram os anos de graduação mais leves e agradáveis, minha eterna gratidão. Vocês foram fundamentais para que essa caminhada fosse mais significativa.

Agradeço também ao meu orientador, por seu suporte contínuo, orientações preciosas e pela confiança em meu potencial. Registro, ainda, minha gratidão ao CNPq, pelo apoio financeiro concedido por meio do Programa Institucional de Iniciação Científica e Tecnológica (PIICT-PIBIC-CNPq), que viabilizou o desenvolvimento do projeto de pesquisa, cuja base e resultados contribuíram significativamente para a elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Por fim, expresso meu agradecimento à Karen, que contribuiu de forma significativa auxiliando na realização dos ensaios experimentais. Muito obrigado a todos que, de maneira direta ou indireta, colaboraram para o sucesso deste estudo.

RESUMO

A vibração induzida por vórtices (VIV) é um fenômeno relevante em sistemas navais e offshore, especialmente em estruturas cilíndricas como risers e umbilicais, amplamente utilizadas em plataformas de petróleo e energia eólica. A rugosidade superficial dessas estruturas afeta significativamente a dinâmica do VIV, influenciando a formação de vórtices e as respostas estruturais. Este estudo investigou experimentalmente o impacto de diferentes níveis de rugosidade em cilindros rígidos de seção circular, com razões de massa e parâmetros geométricos específicos ($L/D=13$ e $S/D=4$), montados em dois suportes elásticos com dois graus de liberdade. As condições de rugosidade foram obtidas por meio da aplicação de diferentes gramaturas de areia, além de uma superfície lisa como referência. Os ensaios foram realizados no canal de água circulante do Laboratório de Interação Fluido-Estrutura da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville (LIFE-UFSC). Foram avaliadas amplitudes e frequências de oscilação em diferentes números de Reynolds e velocidades reduzidas. Os resultados indicaram que o aumento da rugosidade reduz as amplitudes de vibração transversal e longitudinal, promovendo maior dissipação de energia e alterando levemente as frequências características do sistema.

Palavra-chave: rugosidade superficial; vibração induzida por vórtices (VIV); canal de água circulante (CAC); número de Reynolds.

ABSTRACT

Vortex-Induced Vibration (VIV) is a significant phenomenon in naval and offshore systems, particularly in cylindrical structures such as risers and umbilicals, which are extensively used in oil platforms and wind energy systems. The surface roughness of these structures greatly impacts the VIV dynamics, influencing vortex formation and structural responses. This study experimentally investigated the effect of different roughness levels on rigid circular cylinders with specific mass ratios and geometric parameters ($L/D=13$ and $S/D=4$), mounted on two different elastic supports, both with two degrees of freedom. The roughness conditions were achieved by applying different sand grain sizes, along with a smooth surface as a reference. The tests were conducted in the circulating water channel of the Fluid-Structure Interaction Laboratory at the Federal University of Santa Catarina, Joinville Campus (LIFE-UFSC). Oscillation amplitudes and frequencies were evaluated at various Reynolds numbers and reduced velocities. The results indicated that increased roughness reduces transverse and longitudinal vibration amplitudes, promoting greater energy dissipation and slightly altering the system's characteristic frequencies.

Keywords: superficial roughness; vortex-induced vibration (VIV); circulating water channel (CWC), Reynolds number .

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emissão de vórtices.	14
Figura 2 – Resposta transversal de cilindros em função do número de Reynolds.	16
Figura 3 – Relação entre o número de Strouhal e o número de Reynolds para um cilindro circular.	19
Figura 4 – Principais tipos de plataformas de energia eólica offshore.	20
Figura 5 – Tipos de cabos de ancoragem da fundação flutuante	21
Figura 6 – Cabos de transmissão	21
Figura 7 – Cilindros únicos rígidos.	24
Figura 8 – Plataforma 3 colunas cilíndricas.	25
Figura 9 – Aplicação de areia na superfície do modelo	26
Figura 10 – Representação esquemática do aproamento.	27
Figura 11 – Canal de água circulante menor.	27
Figura 12 – Canal de água circulante maior.	28
Figura 13 – Suporte elástico do canal menor.	28
Figura 14 – Suporte elástico do canal maior.	29
Figura 15 – Instrumentações utilizadas nos ensaios: câmera Prime 17W, instrumento de calibração para definição dos eixos de referência e varinha de calibração.	30
Figura 16 – Arranjo experimental nos dois canais de água circulante.	30
Figura 17 – Equipamentos utilizados para aquisição de dados.	31
Figura 18 – Amplitude transversal em relação a Re e V_r	36
Figura 19 – Amplitude longitudinal em relação a Re e V_r	36
Figura 20 – FFT para cilindro areia 3 $V_r=5,7$	37
Figura 21 – Frequências características longitudinais em relação a Re e V_r	38
Figura 22 – Frequências características transversais em relação a Re e V_r	38
Figura 23 – Amplitudes transversais em relação a V_r no CAC menor	40
Figura 24 – Amplitudes transversais em relação a V_r	40
Figura 25 – Amplitudes transversais em relação a Re	41
Figura 26 – Amplitudes longitudinais em relação a Re	41
Figura 27 – Amplitudes longitudinais em relação a V_r	42
Figura 28 – Frequências características longitudinais em relação a Re e V_r	42
Figura 29 – Frequências características transversais em relação a Re e V_r	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Efeito da rugosidade na VIV - Estudos e Resultados	18
Tabela 2 – Valores da rugosidade superficial	26
Tabela 3 – Velocidades do escoamento e números de Reynolds nos ensaios com cilindros únicos.	32
Tabela 4 – Casos estudados para os cilindros únicos.	33
Tabela 5 – Matriz de ensaios a ser conduzida.	33
Tabela 6 – Velocidades do escoamento utilizadas	34
Tabela 7 – Frequências naturais e amortecimento	35
Tabela 8 – Frequências naturais e amortecimento dos casos estudados	39

LISTA DE SÍMBOLOS

A_x	Amplitude de oscilação na direção do escoamento (m)
A_y	Amplitude de oscilação na direção transversal ao escoamento (m)
$AD_{x10\%}$	Média entre as 10% maiores amplitudes longitudinais adimensionais pelo diâmetro
$AD_{y10\%}$	Média entre as 10% maiores amplitudes transversais adimensionais pelo diâmetro
C_x	Fator de amortecimento na direção longitudinal
C_y	Fator de amortecimento na direção horizontal
D	Diâmetro do cilindro (m)
f_n/f_x	Razão entre a frequência natural e a frequência na direção do escoamento
f_n/f_y	Razão entre a frequência natural e a frequência na direção transversal ao escoamento
f_{nx}	Frequência natural na direção do escoamento (Hz)
f_{ny}	Frequência natural na direção transversal ao escoamento (Hz)
f_x^*	Frequência característica longitudinal adimensional
f_y^*	Frequência característica transversal adimensional
g	Aceleração da gravidade (m/s ²)
l	Comprimento efetivo de avaliação
l_e	Comprimento médio de avaliação
l_i	Percurso inicial do rugosímetro
l_n	Trechos de comprimento
l_t	Percurso final do rugosímetro
L	Comprimento do cilindro (m)
m_{df}	Massa do fluido deslocada
m_{ep}	Massa total do cilindro
m^*	Razão de massa (adimensional)
Ra	Rugosidade superficial (m)
Re	Número de Reynolds (adimensional)
S	Espaçamento entre cilindros (m)
St	Número de Strouhal (adimensional)
U	Velocidade do fluido (m/s)
V_r	Velocidade reduzida (adimensional)
x	Direção longitudinal
y	Direção transversal
μ	Viscosidade dinâmica do fluido (Pa·s)
ρ	Densidade do fluido (kg/m ³)

LISTA DE ABREVIATURAS

<i>CAC</i>	Canal de Água Circulante
<i>VIV</i>	Vibração Induzida por Vórtices

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	EMISSÃO DE VÓRTICES	14
2.2	VIBRAÇÃO INDUZIDA POR VÓRTICES	14
2.3	NÚMERO DE REYNOLDS	15
2.4	FREQUÊNCIA NATURAL DO CILINDRO	17
2.5	RUGOSIDADE SUPERFICIAL	17
2.6	NÚMERO DE STROUHAL	18
2.7	RELAÇÃO DO FENÔMENO DE VIV COM CENÁRIO OCEÂNICO	19
2.7.1	Principais tipos de fundação de plataformas de energia eólica offshore	19
2.7.2	Sistema de Ancoragem	21
2.7.3	VIV em Plataformas de Energia Eólica Offshore	22
3	METODOLOGIA	24
3.1	MODELO EXPERIMENTAL	24
3.1.1	Rugosidade Superficial	25
3.1.2	Elaboração dos modelos - adição da rugosidade superficial	26
3.1.3	Aproamento utilizado para a plataforma	27
3.2	CANAL DE ÁGUA CIRCULANTE	27
3.2.1	Suporte Elástico do Canal Menor	28
3.2.2	Suporte Elástico do Canal Maior	28
3.3	VELOCIDADE REDUZIDA	29
3.4	INSTRUMENTAÇÃO	29
3.5	ENSAIO DE DECAIMENTO	31
3.6	ENSAIO DE VIV	31
3.6.1	Ensaio de VIV cilindro único	32
3.6.2	Ensaio VIV arranjo com 3 colunas circulares	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	CILINDRO ÚNICO RÍGIDO	35
4.1.1	Frequência Natural e Amortecimento	35
4.1.2	Ensaio de Vibração Induzida por Vórtices	35
4.2	MODELO DA PLATAFORMA COM 3 COLUNAS	39
4.2.1	Resultados e Discussão do Ensaio de Decaimento	39

4.2.2	Resultados e Discussão do Ensaio de VIV	39
5	CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS	44
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

A vibração induzida por vórtices (VIV) consiste em um fenômeno físico que ocorre quando um fluido, como água ou ar, flui ao redor de um corpo sólido, como um cilindro. O desprendimento alternado de vórtices de cada lado do corpo gera forças oscilantes, que podem induzir vibrações significativas na estrutura. Este fenômeno é de extrema importância em diversas áreas da engenharia, especialmente na engenharia naval e offshore, onde estruturas como risers, umbilicais, colunas de plataformas, estão sujeitas a correntes marítimas e podem sofrer vibrações induzidas por vórtices.

O VIV pode causar danos por fadiga, reduzir a vida útil das estruturas e comprometer a segurança operacional. Em sistemas oceânicos, risers e umbilicais, que são estruturas flexíveis utilizadas para conectar plataformas de produção a poços de petróleo no fundo do mar, são particularmente suscetíveis aos efeitos do VIV. As vibrações podem levar ao desgaste prematuro, falhas e até mesmo ao colapso dessas estruturas, resultando em perdas econômicas significativas e impactos ambientais. O mesmo se aplica aos sistemas de amarração das plataformas, onde a fadiga prematura de cabos e correntes pode comprometer a integridade estrutural da plataforma. Esses efeitos também impactam as colunas de plataformas eólicas offshore, em decorrência das correntes marítimas e podem sofrer vibrações induzidas por vórtices, especialmente em águas mais profundas. Neste caso, as vibrações podem ser prejudiciais no que tange à fadiga prematura do sistema de amarração.

A rugosidade superficial das estruturas submersas desempenha um papel importante no VIV, influenciando a formação e o desprendimento de vórtices. Diversos autores, incluindo Blevins (2009), têm investigado a influência da rugosidade no VIV. Blevins, em seu trabalho, explora como diferentes tipos de rugosidade afetam as características do VIV, como a amplitude de vibração, a frequência de desprendimento de vórtices e as forças hidrodinâmicas.

Kurian *et al.* (2018) também destacam a relevância do estudo da rugosidade superficial, examinando o impacto do crescimento de organismos marinhos nas forças hidrodinâmicas e amplitudes de resposta. Ghazali *et al.* (2019) contribuem para a compreensão da influência da rugosidade em cilindros, demonstrando como mudanças na rugosidade podem afetar as respostas de amplitude e frequência do VIV. Henry *et al.* (2016) abordam a importância da análise da rugosidade em estruturas que utilizam cilindros circulares, focando nos efeitos do crescimento marinho em condições de baixo número de Reynolds.

Neste trabalho, o objetivo principal consiste em investigar a influência da rugosidade superficial em cilindros de seção circular na emissão de vibração induzida por vórtices. Para isso, foram realizados ensaios experimentais em dois canais de

água circulante, um de menor e outro de maior porte. Utilizaram-se dois tipos de modelos: um modelo de coluna cilíndrica de PVC com quatro diferentes rugosidades superficiais, sendo uma lisa e três com diferentes gramaturas de areia; e um modelo de plataforma com arranjo triangular de três colunas, com a superfície lisa e também com areia aplicada, reproduzindo diferentes tipos de rugosidade. Os ensaios foram conduzidos em velocidades que variaram de 0,006 m/s a 0,357 m/s, com números de Reynolds na faixa de 142 a 9245, abrangendo regimes de escoamento laminar e turbulento. Os resultados obtidos contribuirão para uma melhor compreensão da influência da rugosidade superficial no fenômeno de VIV, com foco em colunas de plataformas offshore.

1.1 OBJETIVOS

Com o intuito de determinar a influência da rugosidade superficial na vibração induzida por vórtices, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo geral

Investigar experimentalmente o efeito da rugosidade superficial na emissão de vibrações induzidas por vórtices em cilindros circulares com diferentes níveis de rugosidade, considerando quatro cilindros rígidos únicos e um arranjo triangular de três cilindros.

1.1.2 Objetivos Específicos

A fim de cumprir os objetivos gerais existe a necessidade de seguir os seguintes objetivos específicos:

- Compreender os fenômenos relacionados aos movimentos induzidos por vórtices;
- Definir as dimensões do cilindro de seção circular para que o ensaio ocorra no intervalo de Reynolds desejado;
- Analisar em quais velocidades reduzidas os ensaios ocorrerão;
- Examinar a relação entre o aumento da rugosidade superficial e a ocorrência de VIV no cilindro;
- Validar os resultados obtidos com base na literatura existente.

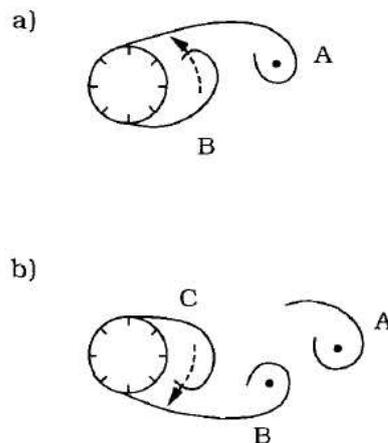
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 EMISSÃO DE VÓRTICES

O fenômeno de emissão de vórtices ocorre quando um fluido flui em torno de um corpo de formato não hidrodinâmico, como um cilindro, em números de Reynolds (Re) superiores a 40. Nesses casos, o gradiente de pressão adverso causado pela geometria divergente do ambiente de fluxo na parte traseira do cilindro leva à separação da camada limite ao longo da superfície do cilindro. Isso resulta na formação de uma camada de cisalhamento, na qual a vorticidade da camada limite é transferida, gerando um vórtice com a mesma direção de rotação que a vorticidade incidente.

À medida que o fluido escoar em torno do cilindro, o vórtice resultante (Vórtice A) cresce a ponto de atrair o vórtice oposto (Vórtice B) através da esteira, conforme pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Emissão de vórtices.



Fonte: Sumer e Fredsoe (2006).

O processo continua alternadamente entre os lados do cilindro, caracterizando a emissão cíclica de vórtices e evidenciando a sensibilidade do fenômeno à interação entre as camadas de cisalhamento, conforme descrito por Sumer e Fredsoe (2006).

2.2 VIBRAÇÃO INDUZIDA POR VÓRTICES

A Vibração Induzida por Vórtices (VIV) consiste em um fenômeno de interação fluido-estrutura que ocorre quando cilindros são expostos a correntes de fluido, resultando em oscilações não lineares. Essa interação é governada pela relação entre as frequências naturais do cilindro e as frequências características do desprendimento de vórtices na esteira do cilindro, como descrito por Williamson e Govardhan (2004).

Durante o fenômeno, o cilindro pode entrar na chamada região de lock-in, onde as frequências de desprendimento de vórtices e as frequências naturais do cilindro sincronizam. Essa sincronização ocorre em uma faixa específica de velocidades do fluido, geralmente entre valores de velocidade reduzida de 4 a 10, e leva a amplificações significativas das oscilações, potencialmente causando danos à estrutura (BLEVINS, 1990). Dentro da faixa de lock-in, a amplitude das oscilações pode atingir valores significativos, mas não necessariamente máximos, uma vez que fatores como o amortecimento estrutural e a relação de massa (m^*) podem limitar o crescimento da amplitude. Fatores como a razão de aspecto do cilindro (L/D) e a razão de massa (m^*) influenciam significativamente o comportamento da VIV, afetando a amplitude das oscilações, a faixa de lock-in e os modos de vibração.

A razão de aspecto, definida como a razão entre o comprimento (L) e o diâmetro (D) do cilindro, afeta os modos de vibração e as faixas de lock-in. De acordo com Khalak e Williamson (1999), cilindros com maiores razões de aspecto tendem a apresentar modos de vibração de ordem superior e faixas de lock-in mais largas.

Outro fator crucial no VIV é a razão de massa (m^*), que representa a razão entre a massa do cilindro e a massa do fluido deslocado. O valor de m^* influencia a amplitude e a frequência das oscilações induzidas pelos vórtices. Segundo Sarpkaya (2004), sistemas com baixo m^* tendem a apresentar maiores amplitudes de oscilação.

O coeficiente de amortecimento (ζ) também exerce grande interferência no VIV, pois afeta diretamente a amplitude das oscilações. De acordo com Naudascher e Rockwell (2005), o amortecimento atua dissipando energia do sistema vibratório, reduzindo a intensidade das oscilações e limitando a amplitude máxima. Essa capacidade de amortecer as vibrações é crucial para a estabilidade de estruturas sujeitas ao VIV, especialmente em situações onde a amplitude excessiva pode levar à fadiga ou falha do material.

2.3 NÚMERO DE REYNOLDS

O número de Reynolds (Re), uma grandeza adimensional crucial na análise do comportamento do fluxo de fluido, relaciona as forças inerciais e viscosas em um fluido, sendo expresso pela equação (1).

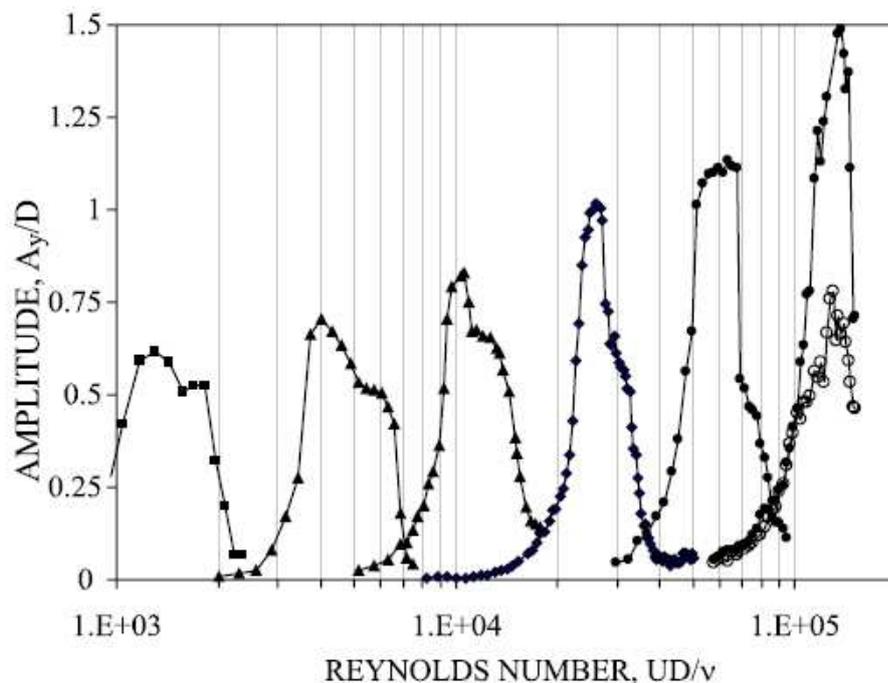
$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu} \quad (1)$$

onde ρ é a densidade do fluido, U é a velocidade do escoamento, D é o diâmetro característico, e μ é a viscosidade dinâmica. O número de Reynolds crítico marca a transição entre escoamento laminar e turbulento, sendo geralmente aceito como 2300 para tubos circulares. Valores abaixo desse limiar indicam escoamento laminar, enquanto valores superiores indicam escoamento turbulento.

Na análise de vibração induzida por vórtices (VIV), o número de Reynolds desempenha papel determinante, influenciando a formação, a frequência e a intensidade dos vórtices gerados. Faixas de Re específicas resultam em diferentes padrões de desprendimento de vórtices, que podem amplificar ou atenuar as oscilações estruturais. Estudos mostram que, em cilindros imersos, o regime subcrítico ocorre aproximadamente para $Re < 3 \times 10^5$, enquanto o regime supercrítico ocorre para $Re > 3 \times 10^6$, com uma faixa de transição intermediária.

A relação entre Re e a resposta estrutural ao VIV é frequentemente apresentada em conjunto com o número adimensional de velocidade reduzida (Vr), permitindo uma análise mais detalhada do comportamento do sistema. A Figura 2 apresenta a variação da amplitude transversal de um cilindro em função do número de Reynolds, destacando regiões críticas onde ocorre maior amplificação de vibrações. Cada marcador no gráfico representa um diâmetro de cilindro diferente, com valores variando de 0,305 cm a 12,7 cm. Os símbolos sólidos indicam cilindros com superfície lisa, enquanto os símbolos vazados correspondem a cilindros com superfície rugosa. Esse gráfico serve como referência para interpretar os resultados experimentais, que serão plotados em função de Vr e Re .

Figura 2 – Resposta transversal de cilindros em função do número de Reynolds.



Fonte: Blevins (2009).

2.4 FREQUÊNCIA NATURAL DO CILINDRO

A frequência natural de um cilindro refere-se à taxa na qual o cilindro vibra quando sujeito a uma perturbação inicial. Essa característica é determinada por uma interação de fatores, incluindo as propriedades mecânicas do material, as dimensões geométricas do cilindro, as condições de contorno e, no caso de um cilindro submerso em água, os efeitos adicionais do fluido ao seu redor. Para um cilindro em suporte elástico, submerso em um meio fluido, a frequência natural é ajustada para considerar a massa efetiva (m^*), conforme indicado na Equação 2:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m^*}} \quad (2)$$

Onde:

- k é a rigidez do sistema;
- $m^* = m + m_a$ é a massa efetiva, composta pela massa do cilindro (m) e a massa adicional da água deslocada (m_a) devido ao movimento do cilindro no fluido.

Constitui-se crucial compreender a relação entre a frequência natural do cilindro e o fenômeno de vibração induzida por vórtices (VIV) para prevenir possíveis problemas decorrentes dessas vibrações. Em geral, a frequência natural do cilindro deve ser cuidadosamente considerada e, se possível, evitada ou projetada de maneira a não coincidir com a frequência do vórtice induzido pelo fluxo.

2.5 RUGOSIDADE SUPERFICIAL

A influência da rugosidade superficial em fenômenos de vibração induzida por vórtices (VIV) tem sido amplamente documentada na literatura. Estudos destacam que a rugosidade pode amplificar a resposta vibratória do cilindro ao desprendimento de vórtices, especialmente em baixos números de Reynolds, geralmente inferiores a 1000, além de aumentar a frequência de desprendimento, o coeficiente de arrasto e promover a transição de regimes laminar para turbulento (BLEVINS, 1990; ZDRAVKOVICH, 1982; ACHENBACH; HEINECKE, 1981).

Alterações na magnitude e na fase das forças geradas pelo desprendimento de vórtices impactam diretamente a dinâmica do cilindro, e a rugosidade pode tanto amplificar quanto suprimir as vibrações, dependendo do regime de escoamento, além de interferir no mecanismo de sincronização entre a vibração do cilindro e o desprendimento de vórtices (BLEVINS; BURTON, 1976; ZDRAVKOVICH, 1982). Além disso, o tipo de rugosidade (como lixas ou ranhuras) influencia os padrões de desprendimento e intensifica a resistência ao escoamento, especialmente em condições de transição para turbulência (ACHENBACH; HEINECKE, 1981).

Os principais aspectos desses estudos, como objetivos, regimes de escoamento avaliados e resultados obtidos, estão sintetizados na Tabela 1, que fornece uma visão geral comparativa. Essa tabela destaca como a rugosidade superficial impacta diferentes aspectos do VIV, como amplitude de vibração, frequência de desprendimento de vórtices e coeficiente de arrasto, além de abordar aplicações práticas em engenharia oceânica, como no caso das bioincrustações em ambientes marinhos (HENRY *et al.*, 2016).

Tabela 1 – Efeito da rugosidade na VIV - Estudos e Resultados

Referência	Foco do estudo	Resultados
Blevins e Burton (1976)	Forças induzidas pelo desprendimento de vórtices em cilindros	Rugosidade afeta a magnitude e a fase das forças induzidas pelo desprendimento de vórtices, modificando a resposta dinâmica do cilindro.
Achenbach e Heinecke (1981)	Desprendimento de vórtices em cilindros lisos e rugosos	Rugosidade aumenta a frequência de desprendimento de vórtices; afeta o coeficiente de arrasto; o efeito da rugosidade depende do tipo de rugosidade.
Zdravkovich (1982)	Efeito da rugosidade na VIV de cilindros circulares	Rugosidade pode suprimir a VIV em certas faixas de número de Reynolds; afeta o mecanismo de sincronização entre o desprendimento de vórtices e a vibração do cilindro.
Blevins (1990)	Impacto da rugosidade na VIV	Rugosidade pode aumentar a amplitude de vibração; altera a frequência de desprendimento de vórtices; aumenta o arrasto; influencia a transição do regime de escoamento.
Henry et al. (2016)	Efeito de diferentes tipos de crescimento marinho na estrutura da esteira de cilindros em escoamentos de baixo Re	Rugosidade gerada pelo crescimento marinho afeta a formação e o desprendimento de vórtices, modificando a estrutura da esteira e as forças hidrodinâmicas sobre o cilindro.

Fonte: Autora (2024).

2.6 NÚMERO DE STROUHAL

O número de Strouhal (St) consiste em uma grandeza adimensional crucial na compreensão dos medidores de vazão de vórtice, sendo calculado conforme demonstrado na equação 3.

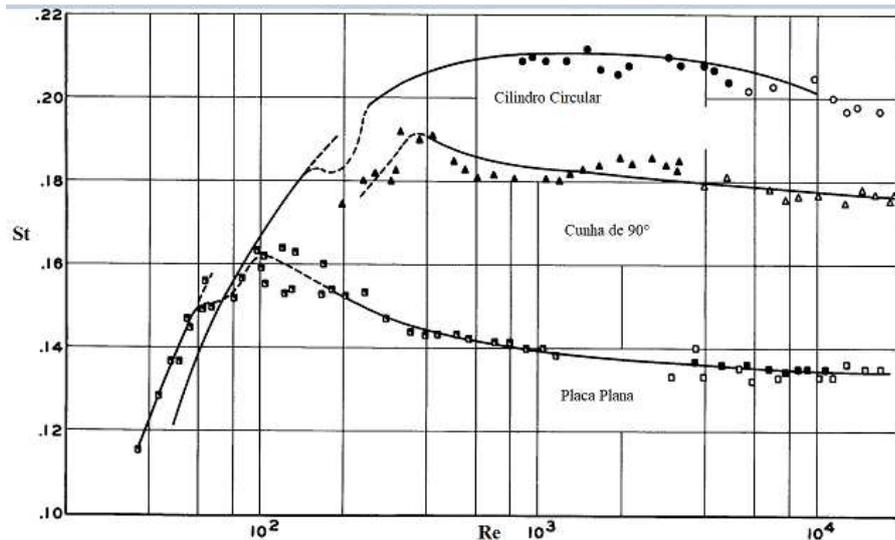
$$St = \frac{f \cdot D}{U} \quad (3)$$

Onde f representa a frequência dos vórtices gerados em torno de um cilindro no fluxo, D é o diâmetro característico, e U denota a velocidade média do fluido. Essa relação adimensional é essencial para a precisão dos medidores de vazão de vórtice, permitindo uma compreensão mais aprofundada da dinâmica do escoamento (ÇENGEL; CIMBALA, 2012).

A Figura 3 apresenta o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds (Re) para diferentes geometrias, como cilindro circular, cunha de 90° e placa plana. Nota-se que, para um cilindro circular, o número de Strouhal permanece aproximadamente constante em uma ampla faixa de números de Reynolds,

mas varia em baixas faixas de Re , refletindo mudanças no padrão de desprendimento de vórtices. Esse gráfico clássico, originalmente apresentado por Roshko (1954), destaca a importância de St na caracterização das vibrações induzidas por vórtices, especialmente em regimes de escoamento laminar e turbulento.

Figura 3 – Relação entre o número de Strouhal e o número de Reynolds para um cilindro circular.



Fonte: Roshko (1954).

2.7 RELAÇÃO DO FENÔMENO DE VIV COM CENÁRIO OCEÂNICO

A aplicação dos conceitos de vibração induzida por vórtices não se restringe ao comportamento isolado de cilindros. Em projetos oceânicos, como plataformas de energia eólica e sistemas de ancoragem, a interação entre o fluido e as estruturas submersas é determinante para o desempenho e a integridade desses sistemas. Esta seção apresenta exemplos de aplicação dos conceitos abordados, destacando a importância de compreender as interações fluido-estrutura em diferentes configurações estruturais.

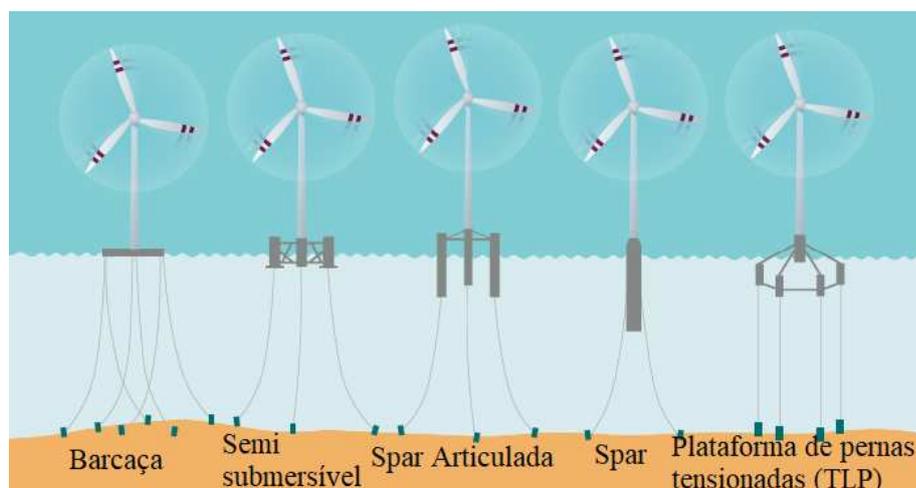
2.7.1 Principais tipos de fundação de plataformas de energia eólica offshore

As plataformas flutuantes para turbinas eólicas offshore são uma solução tecnológica para aproveitamento do potencial eólico em águas profundas, onde as fundações fixas não são viáveis. Existem quatro categorias principais de plataformas flutuantes como vistas na Figura 4, cada uma com características e aplicações específicas (IRENA, 2024).

- **Plataforma de Barcaça:** Plataforma ampla e rasa, estabilizada através da área de plano de água.

- *Vantagens*: Pode ser fabricada em docas secas ou em terra, utiliza menos material que outras categorias e oferece mais espaço de manutenção.
- *Desvantagens*: Possui maiores movimentos de heave e ocupa uma área extensa no leito marinho.
- **Semi-submersível**: Consiste em cilindros verticais conectados por braços submersos.
 - *Vantagens*: Pode ser ancorada em águas de diferentes profundidades e oferece boa estabilidade.
 - *Desvantagens*: Requer análise detalhada de custos devido à complexidade de fabricação.
- **Spar**: Estrutura com centro de gravidade abaixo do centro de flutuabilidade, estabilizada por lastro.
 - *Vantagens*: Tecnologia comprovada com movimentos reduzidos de *heave*.
 - *Desvantagens*: Necessita de águas profundas (>100 m) e infraestrutura especializada para transporte e instalação.
- **Plataforma de Pernas Tensionadas (TLP)**: Conectada ao fundo do mar por cabos tensionados.
 - *Vantagens*: Estrutura leve e estável, adequada para profundidades variáveis.
 - *Desvantagens*: Altos custos de instalação e riscos elevados em caso de falha de um cabo.

Figura 4 – Principais tipos de plataformas de energia eólica offshore.



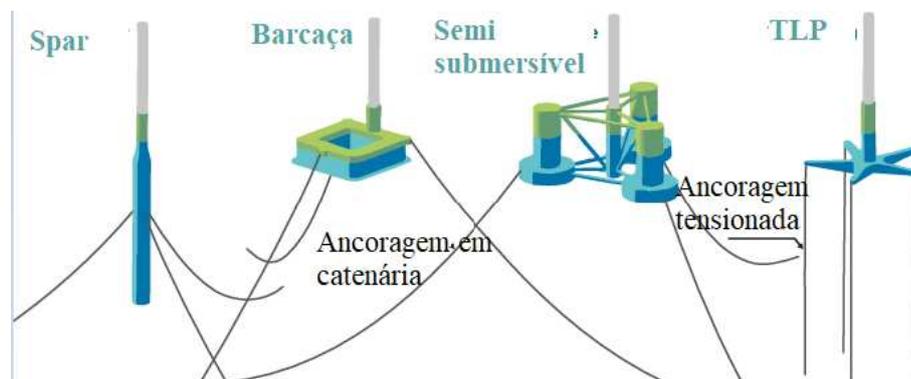
Fonte: Adaptado de IRENA (2024).

2.7.2 Sistema de Ancoragem

Os sistemas de ancoragem, como visto na Figura 5, são essenciais para manter a estabilidade e a posição das plataformas flutuantes (IRENA, 2024). As linhas de ancoragem podem ser categorizadas em:

- **Catenária Simples:** Cadeias de aço que se estendem horizontalmente no leito marinho.
- **Multi-catenária:** Híbrido de cadeias e cordas sintéticas.
- **Semi-taut Flutuante:** Inclui módulos de flutuação para evitar contato com o leito marinho.
- **Taut:** Cabos sob alta tensão, utilizados em TLPs.

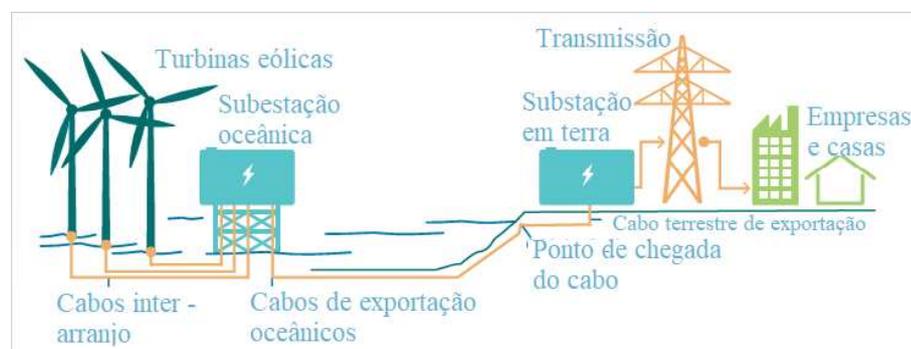
Figura 5 – Tipos de cabos de ancoragem da fundação flutuante



Fonte: Adaptado de Edwards *et al.* (2023).

Os cabos que conectam as turbinas às subestações offshore, como ilustrado na Figura 6. Eles são projetados para resistir a movimentos causados por ondas, ventos e correntes.

Figura 6 – Cabos de transmissão



Fonte: Adaptado de DOE *et al.* (2023).

2.7.3 VIV em Plataformas de Energia Eólica Offshore

A vibração induzida por vórtices representa um fenômeno a ser considerado no projeto e operação de plataformas de energia eólica offshore. A interação entre correntes marinhas, ondas e a estrutura, especialmente em águas profundas, pode gerar oscilações que afetam não só a estabilidade da plataforma, mas também sua eficiência energética. Esse fenômeno tem atraído a atenção de diversos estudos, que buscam entender suas implicações e desenvolver soluções para mitigar seus efeitos.

Um estudo importante realizado por Larsen e Hanson (2007) focou em plataformas semi-submersíveis e evidenciou que o VIV pode comprometer a estabilidade dessas estruturas em águas profundas. Os autores concluem que, para garantir a segurança e a eficiência das plataformas, é essencial considerar o VIV durante o processo de projeto, especialmente em regiões com correntes marinhas intensas.

A interação entre a flexibilidade das torres e a fundação também tem sido amplamente estudada. Wu *et al.* (2015) analisaram a resposta dinâmica de torres eólicas offshore e concluíram que a flexibilidade da torre, quando não devidamente controlada, pode amplificar os efeitos do VIV. Para mitigar esses impactos, os pesquisadores sugerem o uso de amortecedores e o ajuste da rigidez da torre, como estratégias eficazes de controle.

Além disso, as linhas de ancoragem, que são fundamentais para garantir a posição estável da plataforma, também estão suscetíveis ao VIV. Em um estudo de Huang e Larsen (2014), foi demonstrado que o VIV influencia a tensão e a fadiga nas linhas de ancoragem, o que pode resultar em falhas estruturais a longo prazo. Assim, é necessário um design que leve em conta esses fatores, com o uso de materiais mais resistentes e uma escolha cuidadosa dos pontos de ancoragem.

Pesquisas mais recentes, como a de Cheng *et al.* (2021), têm utilizado métodos numéricos avançados para analisar a interação complexa fluido-estrutura em plataformas eólicas offshore. Esses estudos são cruciais para entender como o VIV interage com as ondas e as correntes marinhas, oferecendo uma visão mais precisa da resposta global das plataformas, o que facilita o desenvolvimento de soluções específicas para diferentes condições operacionais.

Li *et al.* (2017) realizaram ensaios experimentais em um tanque de ondas para investigar o VIV em um modelo reduzido de plataforma flutuante tipo spar. Os resultados obtidos fornecem dados valiosos sobre o comportamento do VIV em condições controladas, permitindo a validação de modelos numéricos e contribuindo para o aprimoramento do design das plataformas. Esses experimentos são importantes para o desenvolvimento de estratégias de mitigação que possam ser aplicadas em larga escala.

Outro estudo relevante foi conduzido por Jahangiri e Sun (2019), que utilizou modelos numéricos para investigar os efeitos do VIV em plataformas flutuantes do tipo

spar. A pesquisa ressaltou a importância de se considerar o VIV no projeto dessas plataformas, especialmente em áreas com correntes marinhas fortes. O estudo também destacou a necessidade de se analisar a interação entre o VIV e as tensões nas linhas de ancoragem, que podem comprometer a segurança das plataformas a longo prazo.

A área de VIV em plataformas eólicas offshore continua a evoluir, com novas pesquisas focadas em melhorar a eficiência e a segurança das plataformas em águas profundas. A compreensão mais profunda desse fenômeno e o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação são essenciais para o sucesso da energia eólica offshore, garantindo plataformas mais duráveis e com maior capacidade de geração de energia renovável.

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho fundamenta-se na compreensão empírica de como a presença de rugosidades na superfície dos cilindros afeta o padrão e a intensidade das vibrações induzidas por vórtices.

3.1 MODELO EXPERIMENTAL

Os modelos utilizados nos experimentos, ilustrados na Figura 7, consistem em tubos de policloreto de vinila (PVC) com 260 mm de comprimento e 20 mm de diâmetro, resultando em uma razão de aspecto $L/D=13$, o que permite a análise predominante dos efeitos bidimensionais do escoamento, conforme discutido por ??). Foram fabricados quatro corpos de prova: um liso, utilizado como referência, e três com diferentes gramaturas de areia aplicadas para criar diferentes níveis de rugosidade.

Figura 7 – Cilindros únicos rígidos.



Fonte: Autora (2024).

Além dos cilindros, foi testado um modelo em escala reduzida de uma plataforma composta por três colunas cilíndricas, com razão de espaçamento $S/D=4$, importante para determinar a interação dos escoamentos ao redor das colunas. Este modelo visa investigar a influência da rugosidade em um arranjo triangular das colunas, com o fluxo incidindo a 90 graus. A avaliação foi feita com superfícies lisas e rugosas, sendo a areia 4 aplicada nas colunas rugosas. A estrutura da plataforma é apresentada na 8.

Figura 8 – Plataforma 3 colunas cilíndricas.



Fonte: Autora (2024).

3.1.1 Rugosidade Superficial

Para determinar a rugosidade superficial de cada modelo, incluindo os modificados com diferentes gramaturas de areia e o corpo de prova com a superfície original de PVC, foi estimada a rugosidade média (R_a) conforme a Norma ABNT NBR ISO 4288 (2008). As areias utilizadas para modificar as superfícies dos corpos de prova foram classificadas de acordo com a granulometria, identificadas pelos números: No 100 (0,15 mm), No 50 (0,30 mm), No 30 (0,60 mm) e No 16 (1,20 mm), conferindo uma textura distinta a cada amostra.

As medições foram realizadas com um rugosímetro de bancada Taylor Hobson, modelo Form TalySurf Series 2, no Laboratório de Metrologia da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR). Esse equipamento permite o escaneamento da superfície por meio de um apalpador que percorre os picos e vales da amostra, registrando dados para cálculo de R_a .

Seguiu-se um protocolo específico para as medições: o apalpador percorreu sete comprimentos de amostragem, descartando os primeiros e últimos segmentos para evitar interferências. Em cada trecho, registraram-se cinco valores de R_a ao longo do comprimento efetivo, resultando em uma média para cada trecho. Foram realizados 10 trechos de medição por amostra, com intervalos de 1 mm entre eles.

Após as medições, aplicou-se um tratamento estatístico aos dados, calculando a média aritmética e o desvio padrão dos valores de R_a , assumindo uma distribuição gaussiana. Os resultados de rugosidade média para cada tipo de acabamento estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores da rugosidade superficial

Condição Superficial	Média de Ra [μm]	Desvio padrão [μm]
Superfície padrão	3,43	0,78
Areia 1 - 0,15 mm	43,13	3,18
Areia 2 - 0,30 mm	71,84	7,02
Areia 3 - 0,60 mm	122,01	33,77
Areia 4 - 1,20 mm	211,48	97,36

Fonte: Autora (2024).

3.1.2 Elaboração dos modelos - adição da rugosidade superficial

A superfície dos modelos experimentais, incluindo tanto os cilindros únicos rígidos quanto a plataforma com três cilindros, foi preparada com diferentes tipos de areia. Para os cilindros únicos rígidos, foram utilizadas as Areias 2, 3 e 4, aplicadas da seguinte forma: primeiro, um verniz líquido foi uniformemente espalhado sobre a superfície de cada cilindro, seguido pela aplicação da areia correspondente com o auxílio de um pincel, garantindo uma cobertura homogênea. Após a aplicação da areia, um verniz em spray foi utilizado para fixar as partículas e garantir a aderência durante os ensaios.

Para o modelo da plataforma com três cilindros, ilustrado na Figura 9, foi aplicada exclusivamente a Areia 4. Essa escolha visou analisar o impacto de uma rugosidade mais pronunciada na interação entre os cilindros, proporcionando uma condição específica para o estudo das dinâmicas do sistema.

Esse método foi adotado para assegurar a durabilidade do revestimento e a replicabilidade dos ensaios, preservando as características de rugosidade necessárias para o estudo.

Figura 9 – Aplicação de areia na superfície do modelo

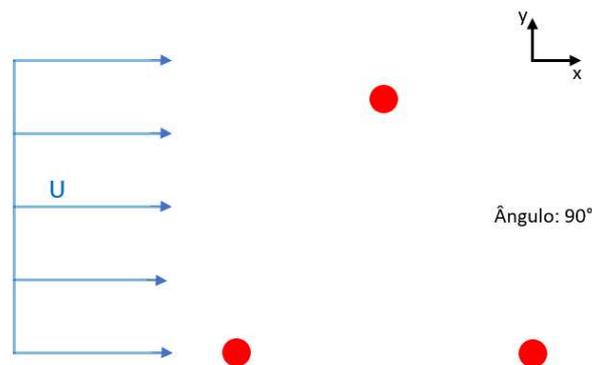


Fonte: Autora (2024).

3.1.3 Aproxamento utilizado para a plataforma

O aproxamento adotado nos ensaios, com o modelo da plataforma apresentado na Figura 10, foi definido com um ângulo de 90° entre a direção do escoamento e o eixo longitudinal da estrutura, baseado na observação de Bruner (2022), que identificou maior amplitude transversal nas colunas lisas sob essa configuração. A razão $S/L = 4$ foi escolhida para otimizar a interação do escoamento com as colunas, permitindo a análise do desprendimento de vórtices e das vibrações induzidas.

Figura 10 – Representação esquemática do aproxamento.



Fonte: Autora(2024).

3.2 CANAL DE ÁGUA CIRCULANTE

Os ensaios foram realizados em dois canais de água circulante presentes no Laboratório de Interação Fluido-Estrutura da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) do Campus de Joinville.

O canal de água circulante menor, como mostrado na Figura 11, opera em velocidades menores de 0,006 m/s a 0,036 m/s, o que implica em números de Reynolds menores.

Figura 11 – Canal de água circulante menor.



Fonte: FSIRG (2024).

Por sua vez, o Canal de Água Circulante maior, ilustrado na Figura 12, opera em velocidades variando de 0,041 m/s a 0,357 m/s. Embora 0,357 m/s seja a maior

velocidade operada, valores superiores a essa faixa podem resultar na formação de ondas na superfície, o que comprometeria a análise dos dados.

Figura 12 – Canal de água circulante maior.



Fonte: FSIRG (2024).

3.2.1 Suporte Elástico do Canal Menor

O suporte elástico empregada no canal de água circular de baixo número de Reynolds apresenta dois graus de liberdade: oscilação na direção do escoamento e oscilação na direção transversal (crossflow). A haste, confeccionada em alumínio, possui comprimento ajustável de 2600 mm e diâmetro de 2 mm. Sua fixação ocorre no topo por meio de um mandril, enquanto o extremo oposto permanece livre, permitindo a instalação dos corpos de prova destinados à análise. A estrutura completa encontra-se ilustrada na Figura 13.

Figura 13 – Suporte elástico do canal menor.



Fonte: Autora (2024).

3.2.2 Suporte Elástico do Canal Maior

No canal de água circulante maior, também foi empregada um suporte elástico com dois graus de liberdade, correspondentes às direções de escoamento (inflow) e transversal (crossflow). A principal diferença em relação ao suporte elástico do canal

menor está nas dimensões da haste, que possui 16 mm de diâmetro e 1500 mm de altura. Essa haste é engastada na extremidade superior e livre na extremidade inferior, onde é fixada a plataforma analisada. A estrutura da base elástica, conectada à estrutura do canal, está ilustrada na Figura 14.

Figura 14 – Suporte elástico do canal maior.



Fonte: Autora (2024).

3.3 VELOCIDADE REDUZIDA

A Velocidade Reduzida (V_r) é um parâmetro adimensional essencial na análise da vibração induzida por vórtices. Ela é definida pela fórmula:

$$V_r = \frac{U}{f_n \cdot D}$$

onde U é a velocidade do fluido, f_n é a frequência natural de vibração do cilindro, e D é o diâmetro do cilindro. Este parâmetro é fundamental para a caracterização do comportamento do cilindro em diferentes regimes de escoamento, além de permitir a comparação entre resultados de experimentos com diferentes cilindros e configurações.

No contexto deste estudo, a Velocidade Reduzida foi utilizada para:

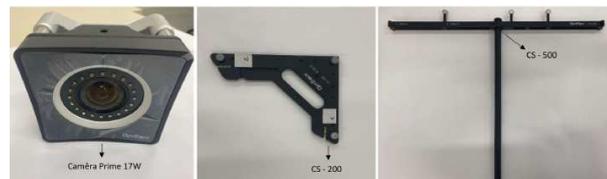
- Normalizar as velocidades do escoamento, facilitando a comparação dos resultados obtidos em diferentes cilindros e condições experimentais.
- Avaliar a influência da rugosidade superficial sobre a amplitude e a frequência de vibração do cilindro em diferentes velocidades reduzidas.

3.4 INSTRUMENTAÇÃO

Para a obtenção dos dados necessários para os ensaios, foi utilizado um sistema óptico de aquisição de dados, composto por três câmeras OptiTrack Prime 17W, um esquadro de calibração e uma varinha de calibração, conforme mostrado na Figura

15. As câmeras OptiTrack Prime 17W são responsáveis por registrar os movimentos do modelo com alta precisão. O processo de calibração, realizado com o esquadro de calibração e a varinha de calibração, define os eixos de referência do sistema e determina a região de monitoramento, ou seja, o volume de controle onde os movimentos serão analisados.

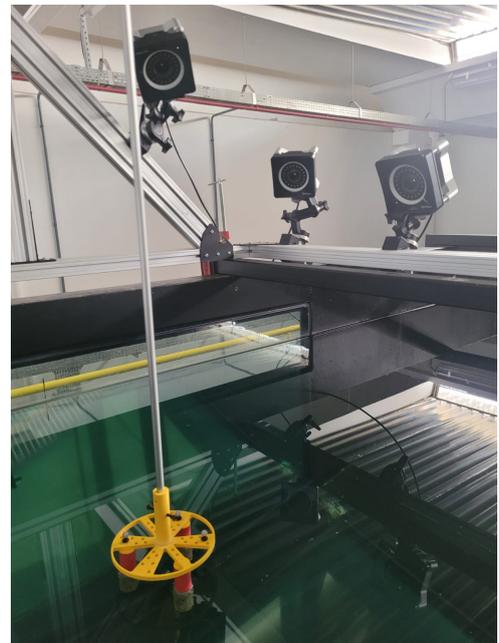
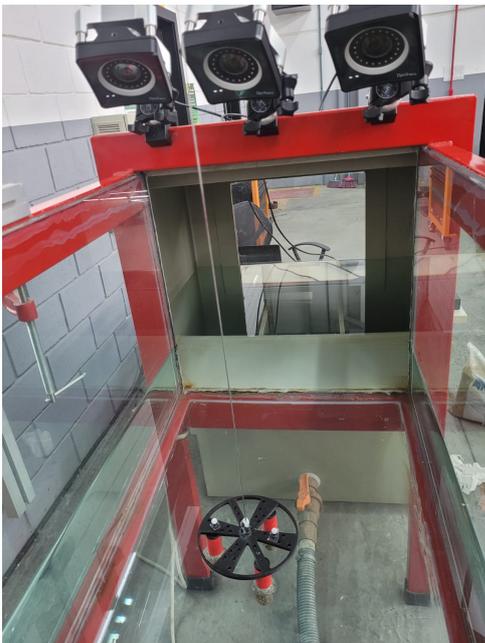
Figura 15 – Instrumentações utilizadas nos ensaios: câmera Prime 17W, instrumento de calibração para definição dos eixos de referência e varinha de calibração.



Fonte: FSIRG (2024).

Após a calibração, marcadores foram fixados em pontos estratégicos na superfície do modelo. Esses marcadores formam um arranjo rígido, permitindo ao sistema rastrear com precisão as posições no espaço e reconstruir os movimentos do modelo. O arranjo experimental foi montado tanto no canal de água circulante menor quanto no maior, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Arranjo experimental nos dois canais de água circulante.

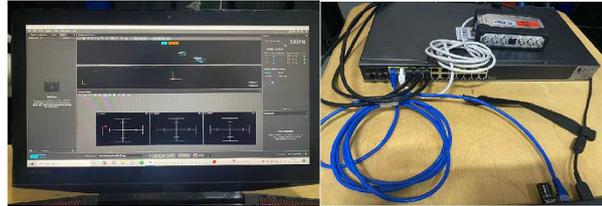


Fonte: Autora (2024).

Na Figura 17, observa-se a tela do computador com o software Motive, utilizado para a aquisição e processamento dos dados coletados durante os ensaios. O

sistema de aquisição de dados integra as informações das câmeras e garante o registro preciso dos movimentos. Ele desempenha um papel crucial na organização e no armazenamento dos dados, facilitando a análise e interpretação dos resultados.

Figura 17 – Equipamentos utilizados para aquisição de dados.



Fonte: Autora (2024).

O sistema óptico de aquisição de dados, devidamente calibrado e configurado, assegura que todos os movimentos do modelo sejam registrados de forma confiável, permitindo análises detalhadas e fundamentadas para a validação dos resultados experimentais.

3.5 ENSAIO DE DECAIMENTO

A fim de caracterizar a frequência natural de oscilação e o amortecimento, foram realizados ensaios de decaimento para cada um dos cinco casos em estudo. Os ensaios de decaimento foram realizados na direção do escoamento, ou seja, em X e também no cross-flow, direção transversal ao escoamento, eixo Y, na água com o uso do rastreamento óptico devido ao uso das câmeras do OptiTrack a uma taxa de aquisição de dados de 100 Hz e com duração de 2 minutos para cada configuração em análise.

O ensaio de decaimento consiste em um ensaio dinâmico no qual uma perturbação externa, gerada pelo contato de uma régua, é aplicada na altura metacêntrica (GM) do corpo ou o mais próximo possível dessa posição para evitar problemas de acoplamento. A localização do centro de gravidade foi previamente marcada na estrutura, com base nos cálculos adequados.

Após os ensaios, os arquivos .CSV gerados foram processados com uma rotina no Octave, a qual incluiu a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Essa técnica converte o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, permitindo a obtenção dos valores das frequências naturais e do amortecimento.

3.6 ENSAIO DE VIV

Esta seção detalha os procedimentos experimentais dos ensaios de vibração induzida por vórtices (VIV) conduzidos em dois casos: cilindros únicos e um arranjo

com 3 colunas circulares.

3.6.1 Ensaio de VIV cilindro único

Os ensaios com cilindros únicos foram realizados no canal de água circulante menor, com o objetivo de analisar a resposta de um cilindro isolado, representando uma coluna da plataforma, com diferentes velocidades de escoamento. O ensaio de VIV avaliou a resposta do modelo, incluindo as amplitudes longitudinal e transversal, bem como, as frequências características de oscilação nas direções x e y. Durante os ensaios, utilizou-se um sistema de rastreamento para monitorar o movimento do cilindro. Os dados foram adquiridos a uma frequência de 100 Hz, com taxa de exposição da câmera de 10 Hz, e cada ensaio teve duração de 5 minutos. Para garantir maior confiabilidade, cada velocidade foi testada três vezes, totalizando 57 ensaios, como detalhado na Tabela 3, que apresenta as velocidades de escoamento e os respectivos números de Reynolds investigados.

Tabela 3 – Velocidades do escoamento e números de Reynolds nos ensaios com cilindros únicos.

Velocidade (m/s)	Número de Reynolds
0,006	142
0,007	152
0,008	177
0,009	207
0,011	284
0,013	315
0,014	347
0,016	387
0,017	405
0,018	435
0,019	448
0,02	473
0,021	567
0,025	610
0,028	630
0,03	650
0,036	680

Fonte: Autora (2024).

Os ensaios foram realizados com um cilindro de massa 0,100 kg e razão de massa igual a 1. Para analisar a influência da rugosidade superficial na resposta ao VIV, foram testadas quatro condições: a superfície lisa do cilindro e a superfície com aplicação de areia 2, areia 3 e areia 4. A Tabela 4 apresenta as características de cada caso, especificando o tipo de rugosidade superficial utilizada.

Tabela 4 – Casos estudados para os cilindros únicos.

Caso	L/D	Razão de massa (m^*)	Massa (kg)
Superfície Lisa	13	1	0,10
Superfície com Areia 2	13	1	0,10
Superfície com Areia 3	13	1	0,10
Superfície com Areia 4	13	1	0,10

Fonte: Autora (2024).

3.6.2 Ensaios VIV arranjo com 3 colunas circulares

Os ensaios com o arranjo de 3 colunas circulares foram realizados tanto no CAC menor quanto no CAC maior, com o objetivo de analisar a influência da interação entre os cilindros na resposta do sistema. Assim como nos ensaios com cilindro único, o ensaio de VIV com o arranjo de 3 colunas consiste na análise da resposta do modelo, incluindo a amplitude longitudinal e transversal, e das frequências características de oscilação nas direções x e y para cada velocidade do escoamento.

Para cada velocidade do escoamento no CAC menor, o ensaio foi repetido 3 vezes, garantindo maior confiabilidade nos resultados. No CAC maior, por outro lado, não foi necessário repetir os ensaios devido à robustez do sistema, que proporcionou resultados consistentes já na primeira execução. A Tabela 5 apresenta a matriz de ensaios a ser conduzida, detalhando os casos a serem analisados, o canal utilizado, o ângulo de aproamento, a relação S/D e os valores de velocidade reduzida.

Tabela 5 – Matriz de ensaios a ser conduzida.

Caso	Canal	Aproamento ($^\circ$)	S/D	V_R
Plataforma lisa com 3 colunas	Menor	90	4	3,11 - 7,91
Plataforma areia 4 com 3 colunas	Menor	90	4	1,36 - 8,17
Plataforma lisa com 3 colunas	Maior	90	4	0,85 - 9,63
Plataforma areia 4 com 3 colunas	Maior	90	4	0,79 - 8,89

Fonte: Autora (2024).

Foram realizados 20 ensaios no Canal Menor e 47 ensaios no Canal Maior, abrangendo diferentes velocidades de escoamento para avaliar o comportamento do sistema. As velocidades do escoamento utilizadas no estudo, assim como os respectivos números de Reynolds, são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Velocidades do escoamento utilizadas

Canal Menor		Canal Maior	
Velocidade (m/s)	Nº de Reynolds	Velocidade (m/s)	Nº de Reynolds
0,006	120	0,04	823,46
0,007	140	0,05	940,42
0,008	160	0,05	1057,38
0,009	180	0,06	1174,34
0,011	220	0,06	1291,32
0,013	260	0,07	1408,28
0,014	280	0,08	1525,24
0,016	320	0,08	1642,22
0,017	340	0,09	1759,18
0,018	360	0,09	1876,14
0,019	380	0,10	1993,1
0,020	400	0,11	2110
0,021	420	0,11	2227
0,025	500	0,12	2344
0,028	560	0,12	2461
0,030	600	0,13	2578
0,036	720	0,13	2695
		0,14	2811,8
		0,15	2928,8
		0,15	3045,8
		0,16	3162,8
		0,16	3279,8
		0,17	3396,8
		0,18	3630,6
		0,19	3864,6
		0,20	4098,4
		0,22	4332,4
		0,23	4566,4
		0,24	4800,2
		0,25	5034,2
		0,26	5268,2
		0,28	5502
		0,29	5736
		0,30	5970
		0,31	6203,8
		0,32	6437,8
		0,33	6671,8
		0,35	6905,6
		0,36	7139,6
		0,37	7373,6
		0,38	7607,4
		0,39	7841,4
		0,40	8075,4
		0,42	8309,2
		0,43	8543,2
		0,44	8777,2
		0,45	9011
		0,46	9245

Fonte: Autora (2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados no canal de água circulante, abrangendo tanto o cilindro rígido único com diferentes rugosidades superficiais quanto o modelo da plataforma, testados nos canais menor e maior. A análise dará ênfase ao efeito do aumento da rugosidade superficial sobre a amplitude do movimento e a frequência dos corpos de prova.

4.1 CILINDRO ÚNICO RÍGIDO

4.1.1 Frequência Natural e Amortecimento

Os ensaios de decaimento com o cilindro único rígido permitiram determinar as frequências naturais de oscilação e o amortecimento, apresentados na Tabela 7. Observa-se que a frequência natural de oscilação diminui com o aumento da rugosidade superficial. Por exemplo, f_{nx} para o cilindro liso é 0,100 Hz, enquanto que para o cilindro com areia 4, com a maior rugosidade, é de 0,095 Hz. Essa diminuição pode ser atribuída ao aumento da massa do sistema devido à aplicação da areia.

O amortecimento, por sua vez, aumenta com o aumento da rugosidade superficial. O cilindro liso apresenta um fator de amortecimento de 3,0%, enquanto o cilindro com areia 4 apresenta um valor de 5,1%. Esse incremento pode contribuir para a redução da amplitude de vibração observada nos ensaios de VIV, como veremos na próxima seção.

Em resumo, o aumento da rugosidade superficial leva a uma redução na frequência natural de oscilação e a uma elevação no amortecimento do cilindro. Esses dois fatores podem influenciar significativamente a resposta do cilindro às vibrações induzidas por vórtices.

Tabela 7 – Frequências naturais e amortecimento

Caso	f_{nx}	f_{ny}	Amortecimento [%]
Coluna Lisa	0,100	0,110	3,0
Coluna com Areia 2	0,098	0,098	3,2
Coluna com Areia 3	0,096	0,096	4,2
Coluna com Areia 4	0,095	0,095	5,1

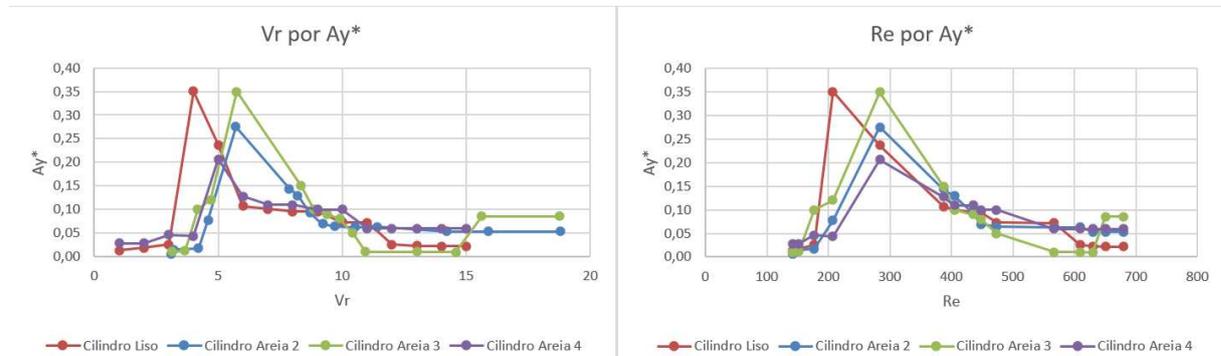
Fonte: Autora (2024).

4.1.2 Ensaio de Vibração Induzida por Vórtices

Nesta seção, analisamos a resposta do cilindro único rígido às vibrações induzidas por vórtices (VIV) em diferentes condições de rugosidade superficial. Os ensaios foram realizados variando a velocidade do escoamento e registrando as amplitudes e

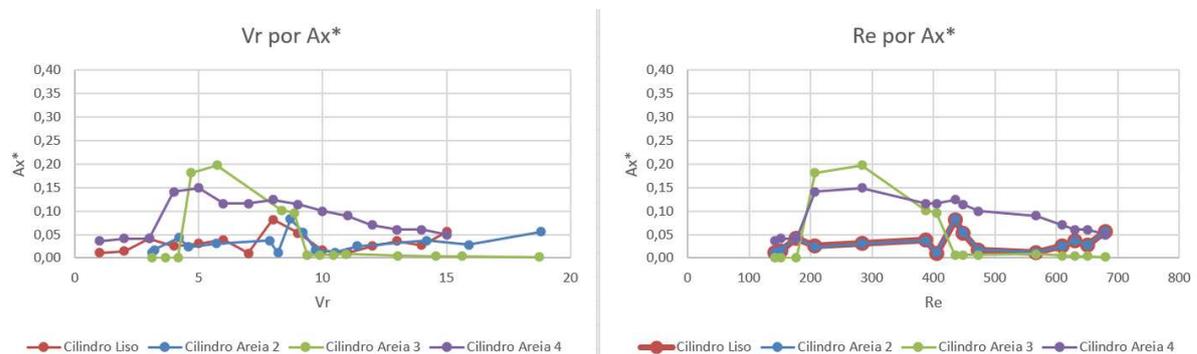
frequências de oscilação do cilindro. As Figuras 18 e 19 apresentam as amplitudes transversais e longitudinais do cilindro, respectivamente, em função do número de Reynolds (Re) e da velocidade reduzida (V_r).

Figura 18 – Amplitude transversal em relação a Re e V_r



Fonte: Autora (2024).

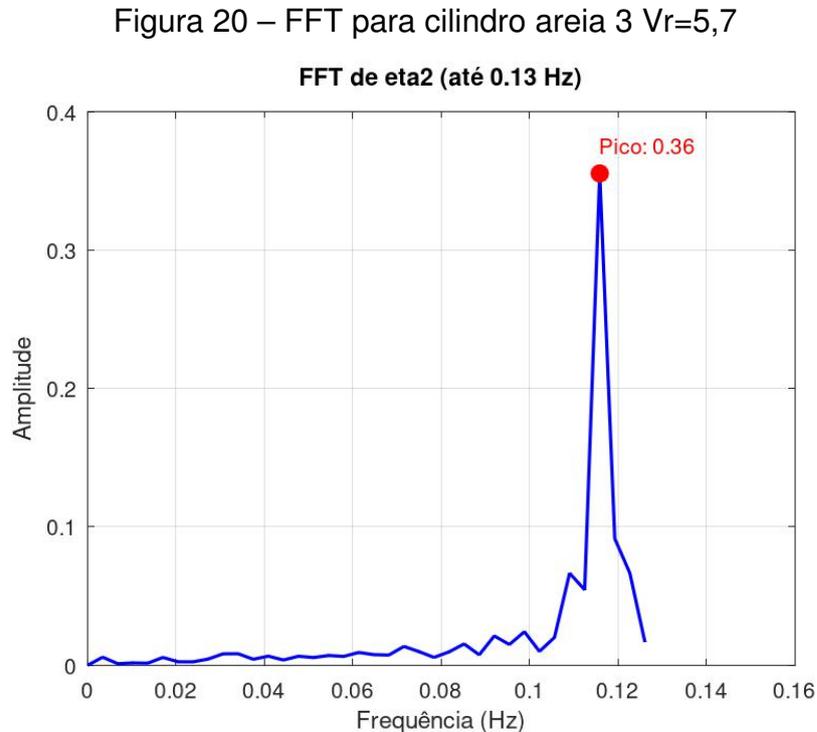
Figura 19 – Amplitude longitudinal em relação a Re e V_r



Fonte: Autora (2024).

Na Figura 18, observa-se que a amplitude de oscilação transversal aumenta com a velocidade do escoamento, especialmente dentro da faixa de lock-in, que tipicamente ocorre entre valores de velocidade reduzida de 4 a 10. Após essa faixa, o aumento da velocidade pode levar à redução das amplitudes. O aumento da rugosidade superficial, por sua vez, contribui para a diminuição da amplitude de oscilação, sugerindo que a rugosidade exerce um efeito de amortecimento nas vibrações. A Figura 19 ilustra a amplitude longitudinal do cilindro. De maneira similar à amplitude transversal, a amplitude longitudinal também cresce com o aumento da velocidade do escoamento dentro da faixa de lock-in, porém com menor intensidade. Fora dessa faixa, o comportamento é semelhante ao observado para a amplitude transversal. O aumento da rugosidade superficial também provoca uma redução na amplitude longitudinal.

Na Figura 20, é apresentada a transformada de Fourier da velocidade para o cilindro com areia 3, onde se observa que a amplitude transversal é máxima em $V_r=5,7$. Nesse ponto, o valor máximo da amplitude é de 0,36, conforme ilustrado na Figura 18.



Fonte: Autora (2024).

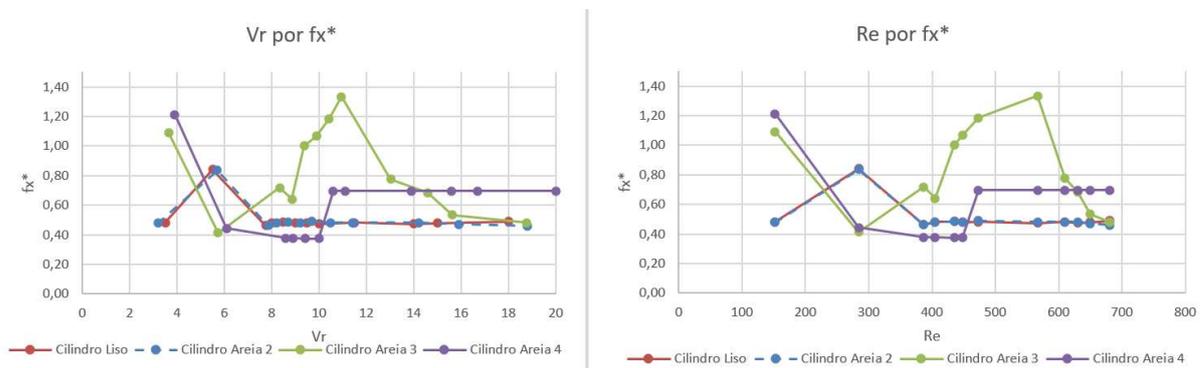
As frequências características longitudinais e transversais são apresentadas nas Figuras 21 e 22, respectivamente, em função do número de Reynolds e da velocidade reduzida.

Na Figura 21, observa-se que a frequência de oscilação longitudinal (F_x^*) se mantém praticamente constante para os cilindros liso e com menor rugosidade. Contudo, o cilindro com rugosidade intermediária (Areia 3) apresenta um aumento inesperado na frequência longitudinal em uma faixa específica de velocidade reduzida (V_r) antes de retornar à tendência geral.

Na Figura 22, as frequências características transversais (F_y^*) diminuem com o aumento da velocidade reduzida para a maioria dos cilindros. Entretanto, o cilindro com rugosidade intermediária (Areia 3) exibe um aumento significativo e atípico na frequência transversal em $V_r \approx 10$, destoando dos demais cilindros que seguem uma tendência de estabilização.

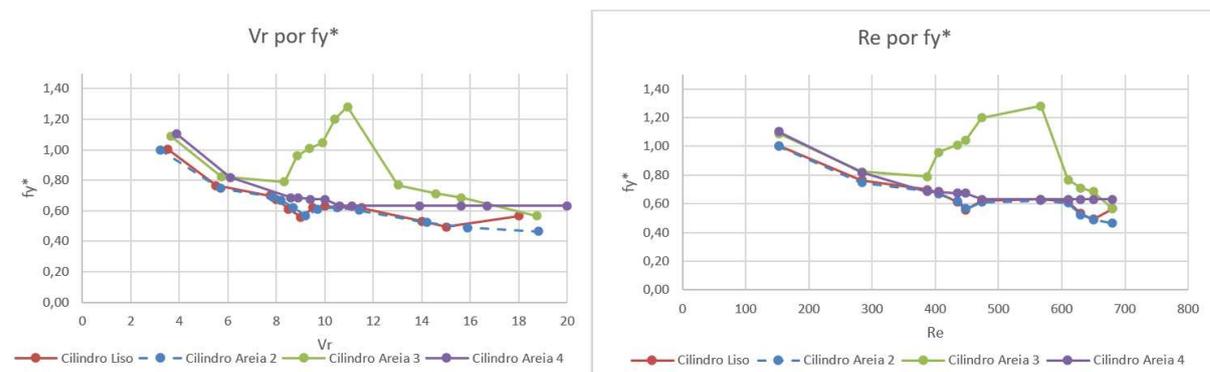
Esses comportamentos indicam que a rugosidade intermediária pode alterar o padrão de resposta dinâmica do cilindro, influenciando tanto as frequências longitudinais quanto as transversais.

Figura 21 – Frequências características longitudinais em relação a Re e Vr



Fonte: Autora (2024).

Figura 22 – Frequências características transversais em relação a Re e Vr



Fonte: Autora (2024).

Esses resultados indicam que a rugosidade superficial influencia a resposta do cilindro ao VIV. A redução na amplitude de oscilação com o aumento da rugosidade pode ser explicada pelo aumento da turbulência do escoamento, promovendo a transição do escoamento laminar para turbulento e aumentando a dissipação de energia, o que reduz a intensidade das vibrações. É importante observar que as amplitudes de oscilação transversal são maiores que as amplitudes longitudinais, o que é consistente com a natureza do fenômeno de VIV, que é predominantemente transversal ao escoamento. As frequências de oscilação longitudinal e transversal são próximas da frequência natural do cilindro, o que indica a ocorrência do fenômeno de lock-in, onde a frequência de desprendimento de vórtices se sincroniza com a frequência natural do cilindro, levando a um aumento significativo na amplitude de vibração.

Na próxima seção, analisaremos o comportamento de um modelo de plataforma com 3 colunas em diferentes condições de rugosidade superficial.

4.2 MODELO DA PLATAFORMA COM 3 COLUNAS

4.2.1 Resultados e Discussão do Ensaio de Decaimento

O ensaio de decaimento foi realizado tanto no canal de água circulante menor quanto no maior, para o modelo da plataforma com 3 colunas. Essa análise, cujos resultados podem ser vistos na Tabela 8, teve como objetivo determinar a frequência natural de oscilação e o amortecimento, tanto para o modelo liso quanto para o modelo com rugosidade. A diferença entre os valores obtidos para os diferentes canais está relacionada às bases elásticas distintas utilizadas em cada canal.

Tabela 8 – Frequências naturais e amortecimento dos casos estudados

Caso	Canal	f_{nx}	f_{ny}	Amortecimento [%]
Plataforma Lisa	Menor	0,23	0,23	3,2
Plataforma com Areia 4	Menor	0,22	0,186	3,0
Plataforma Lisa	Maior	2,40	2,40	5,0
Plataforma com Areia 4	Maior	2,60	2,60	5,5

Fonte: Autora (2024).

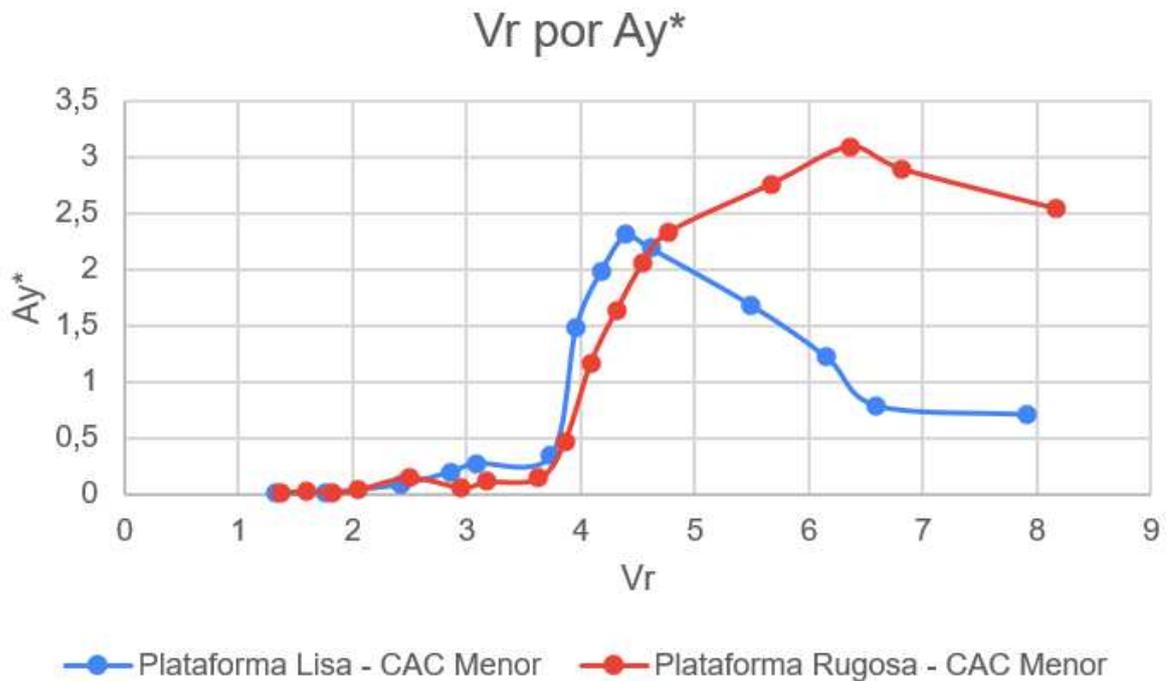
No canal menor, com a plataforma lisa, as frequências naturais nas direções x e y foram iguais, como esperado devido à simetria do modelo. No entanto, para a plataforma rugosa no canal menor, esses valores não foram iguais, indicando uma possível inconsistência nos resultados e corroborando as observações da amplitude transversal nesse canal, que também se mostraram discrepantes.

Além disso, observamos que o amortecimento diminuiu com o aumento da rugosidade para o ensaio no canal menor, outro fato discrepante com a literatura e com os resultados obtidos para o cilindro único, onde o aumento da rugosidade geralmente aumenta o amortecimento.

No canal maior, com a plataforma lisa e rugosa, os valores da frequência natural nas direções x e y foram iguais, como esperado. Além disso, o amortecimento aumentou com o aumento da rugosidade, em concordância com a literatura e com os resultados do cilindro único.

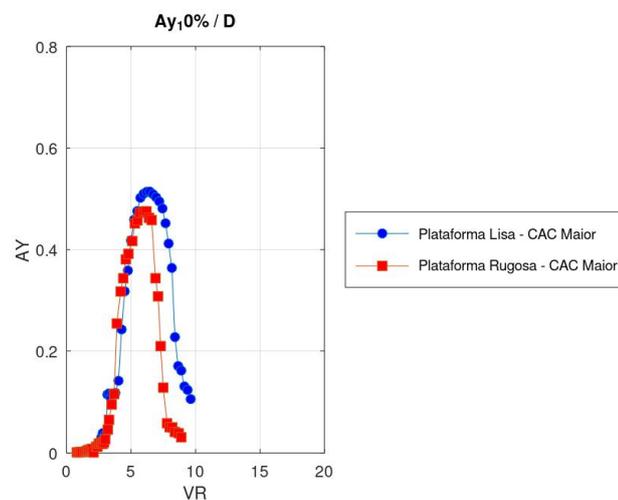
4.2.2 Resultados e Discussão do Ensaio de VIV

Os ensaios de VIV com o modelo da plataforma com 3 colunas foram inicialmente realizados no canal de água circulante menor. A Figura 23 apresenta a amplitude transversal em função da velocidade reduzida para o ensaio no canal menor. Observamos um comportamento inesperado, o aumento da rugosidade aumentou a amplitude transversal, um resultado discrepante com a literatura e com os resultados obtidos para o cilindro único rígido, onde a rugosidade superficial geralmente reduz a amplitude do VIV.

Figura 23 – Amplitudes transversais em relação a V_r no CAC menor

Fonte: Autora (2024).

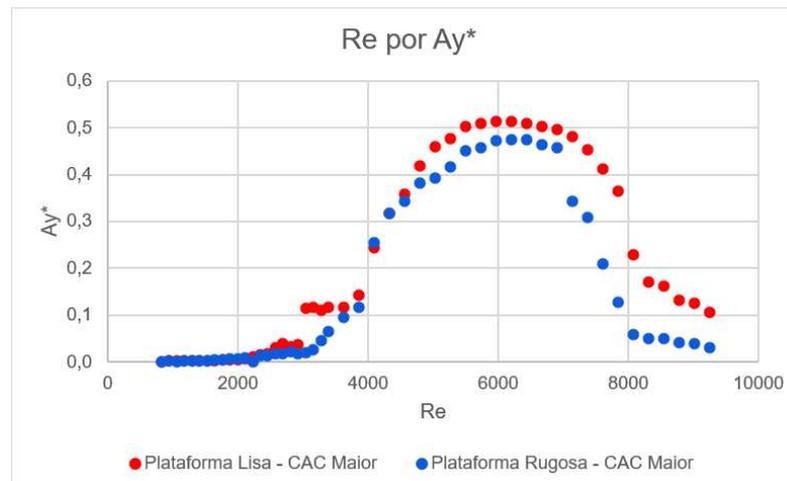
Devido a essa discrepância, o ensaio foi refeito no canal de água circulante maior. O resultado da amplitude transversal em relação a V_r no canal de água circulante maior pode ser visto na Figura 24. Nela, podemos ver que o fenômeno ocorre como esperado: o aumento da rugosidade implica na diminuição da amplitude transversal, em concordância com a literatura e com os resultados obtidos para o cilindro único rígido.

Figura 24 – Amplitudes transversais em relação a V_r 

Fonte: Autora (2024).

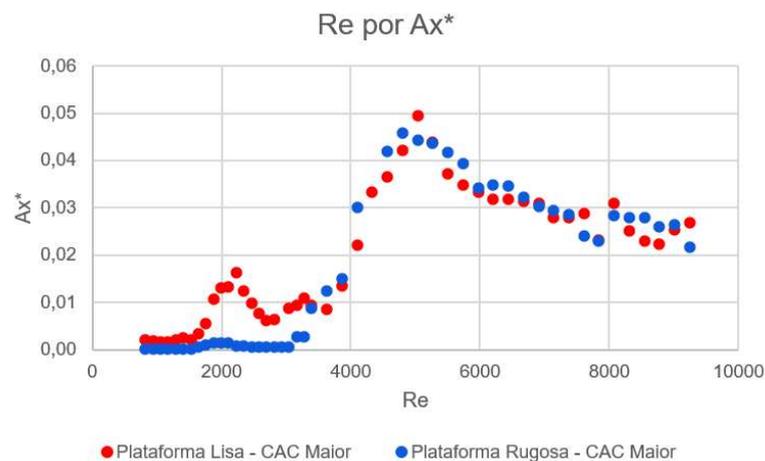
Essa diferença entre os resultados do canal menor e do canal maior sugere que as condições experimentais do canal menor podem ter influenciado os resultados. É possível que fatores como as dimensões reduzidas do canal e a menor precisão no controle da velocidade do escoamento tenham afetado o desenvolvimento do escoamento ao redor da plataforma e a formação dos vórtices, levando a um comportamento distinto do esperado.

Figura 25 – Amplitudes transversais em relação a Re



Fonte: Autora (2024).

Figura 26 – Amplitudes longitudinais em relação a Re

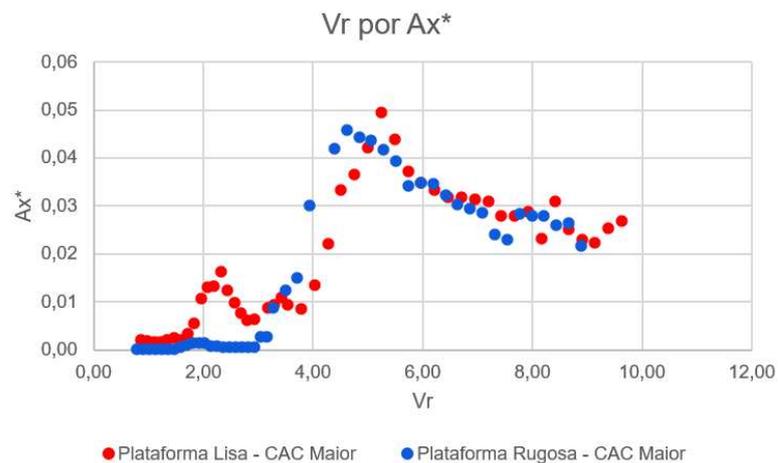


Fonte: Autora (2024).

As Figuras 25 e 26 apresentam as amplitudes transversais e longitudinais, respectivamente, em função do número de Reynolds para os ensaios realizados nos canais menor e maior. As Figuras 27, 28 e 29 mostram as amplitudes longitudinais e as frequências características longitudinais e transversais, respectivamente, em função da velocidade reduzida e do número de Reynolds para os ensaios no canal

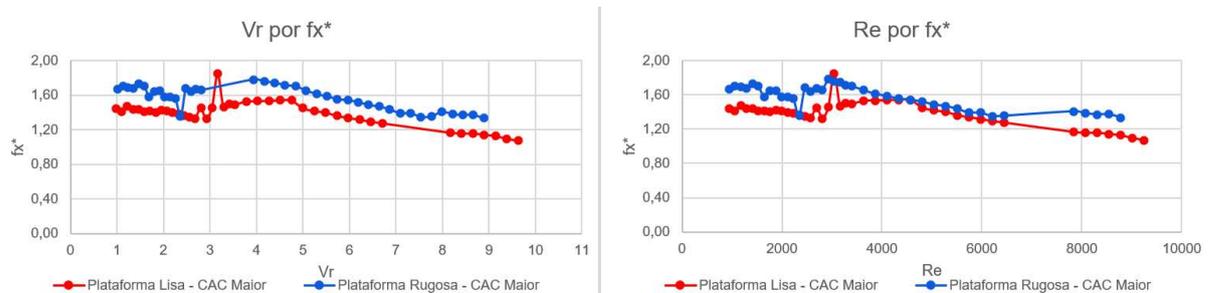
maior. Observamos que, para os ensaios no canal maior, a amplitude de oscilação e a frequência de oscilação aumentam com o aumento da velocidade do escoamento e do número de Reynolds, mas diminuem com o aumento da rugosidade superficial, corroborando a influência da rugosidade na redução da amplitude do VIV.

Figura 27 – Amplitudes longitudinais em relação a V_r



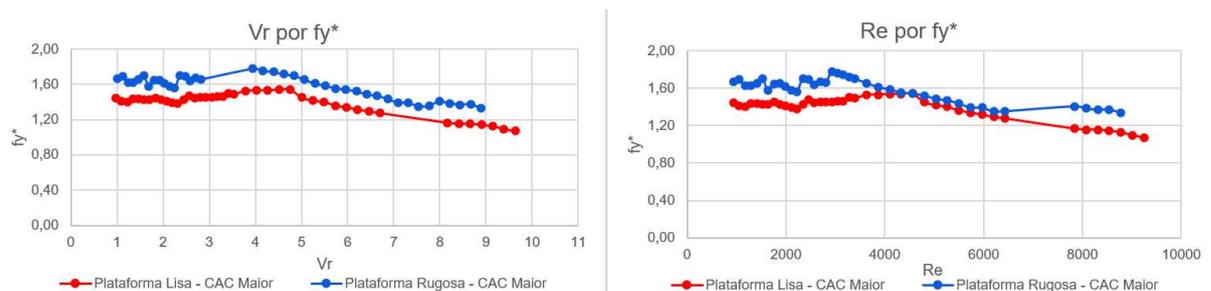
Fonte: Autora (2024).

Figura 28 – Frequências características longitudinais em relação a Re e V_r



Fonte: Autora (2024).

Figura 29 – Frequências características transversais em relação a Re e V_r



Fonte: Autora (2024).

Com a repetição dos ensaios no canal de água circulante maior, foi possível obter resultados mais confiáveis e condizentes com a literatura, evidenciando a importância de realizar os experimentos em condições adequadas para garantir a validade dos resultados.

5 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

Esta pesquisa teve como objetivo principal analisar o efeito da rugosidade superficial na vibração induzida por vórtices (VIV) em cilindros de seção circular. Para atingir esse objetivo, foram realizados experimentos com cilindros únicos e um modelo de plataforma com 3 colunas, ambos submetidos a diferentes condições de rugosidade. Os experimentos foram conduzidos em dois canais de água circulante distintos, cada um com suas características específicas.

Os resultados obtidos com o cilindro único demonstraram que o aumento da rugosidade superficial leva a uma redução na amplitude de oscilação e a um aumento no amortecimento. Essa descoberta é consistente com a literatura na área e reforça a importância de se considerar a rugosidade superficial no projeto de estruturas offshore, como plataformas de petróleo e gás e plataformas de energia eólica, onde o VIV pode ter um impacto significativo na integridade estrutural e na vida útil dos componentes.

No entanto, ao analisar o modelo de plataforma, o estudo revelou uma diferença interessante entre os resultados obtidos nos dois canais de água circulante. No canal menor, o aumento da rugosidade resultou em um aumento inesperado na amplitude transversal, em contraste com o comportamento observado no canal maior e com os resultados do cilindro único. Essa diferença sugere que as condições experimentais específicas do canal menor podem ter influenciado os resultados, levantando a possibilidade de que fatores como o aproamento da plataforma e a linha d'água não tenham sido reproduzidos com a mesma precisão de quando a superfície da plataforma estava lisa no canal menor.

Essa observação destaca a importância de se realizar experimentos em diferentes condições para garantir a robustez dos resultados e a generalização das conclusões. Em estudos futuros, seria interessante investigar mais a fundo essa diferença, repetindo os ensaios no canal de água circulante menor e verificando cuidadosamente o posicionamento da plataforma e a precisão da linha d'água.

O estudo também confirmou a predominância das amplitudes de oscilação transversal sobre as longitudinais, sendo consistente com a natureza do fenômeno de VIV, que é predominantemente transversal ao escoamento. Além disso, a ocorrência do fenômeno de lock-in, quando a frequência de despreendimento de vórtices se sincroniza com a frequência natural do cilindro, foi observada em ambos os modelos, tanto no cilindro único quanto na plataforma.

Outro resultado importante foi a observação de que o aumento da rugosidade levou a uma redução na frequência natural de oscilação e a um aumento no amortecimento do cilindro único. Essa descoberta pode ter implicações significativas no projeto

de estruturas offshore, uma vez que a frequência natural de oscilação e o amortecimento são parâmetros importantes a serem considerados para evitar ressonância e vibrações excessivas.

Em resumo, este estudo contribuiu para uma melhor compreensão da influência da rugosidade superficial na VIV em cilindros de seção circular, especialmente em colunas de plataformas offshore. Os resultados obtidos fornecem informações valiosas para o desenvolvimento de projetos mais eficientes e seguros, e as sugestões para estudos futuros abrem caminho para novas investigações e aprofundamento do conhecimento na área. Adicionalmente, os resultados deste estudo fornecem dados experimentais robustos que podem ser utilizados para validar simulações numéricas de CFD em um escopo mais amplo, contribuindo para o avanço da modelagem computacional de VIV em estruturas offshore.

REFERÊNCIAS

- ACHENBACH, E.; HEINECKE, E. On vortex shedding from smooth and rough cylinders in the range of reynolds numbers 6×10^3 to 5×10^6 . **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge University Press, v. 109, p. 239–251, 1981.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4288**: Especificações geométricas do produto (gps) — rugosidade: Método do perfil — regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro, 2008. v. 1, 16 p.
- BLEVINS, R. D. **Flow-induced vibration**. [S.l.]: Van Nostrand Reinhold New York, 1990.
- BLEVINS, R. D. Experimental investigation of vortex-induced vibration in one and two dimensions with variable mass, damping, and reynolds number. **Journal of Fluids Engineering**, American Society of Mechanical Engineers, v. 131, n. 11, p. 111203, 2009.
- BLEVINS, R. D.; BURTON, T. E. Fluid forces induced by vortex shedding. **Journal of Fluids Engineering**, American Society of Mechanical Engineers, v. 98, n. 1, p. 19–24, 1976.
- BRUNER, M. E. **Investigação experimental da vibração induzida pelo escoamento em arranjos de colunas circulares submetidos a regime de baixo Reynolds**. 2022. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas.
- CHENG, Z.; HUANG, S.; LARSEN, C. M. Fully coupled time-domain analysis of a semi-submersible floating wind turbine under combined wind and wave loads. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 179, p. 1428–1442, 2021.
- DOE *et al.* **An action plan for offshore wind transmission development in the U.S. Atlantic Region**. 2023. Disponível em: https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-09/Atlantic-Offshore-Wind-Transmission-Plan-Report_September-2023.pdf.
- EDWARDS, E. *et al.* Evolution of floating offshore wind platforms: a review of at-sea devices. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 183, 2023.
- GHAZALI, M. K. M. *et al.* Surface roughness effect on vortex-induced vibration phenomenon in cross-flow direction of a bluff body. **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**, v. 64, n. 2, p. 253 – 263, 2019.
- HENRY, P.-Y.; NEDREBO, E. L.; MYRHAUG, D. Visualisation of the effect of different types of marine growth on cylinders' wake structure in low re steady flows. **Ocean Engineering**, v. 115, p. 182 – 188, 2016.
- HUANG, S.; LARSEN, C. M. Assessment of mooring line fatigue damage due to vortex-induced vibrations. **Ocean Engineering**, Elsevier, v. 88, p. 549–561, 2014.

- IRENA. **Floating offshore wind outlook**. [S.l.]: International Renewable Energy Agency, 2024. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/IRENA_G7_Floating_offshore_wind_outlook_2024.pdf. Acesso em: 28 nov. 2024.
- JAHANGIRI, V.; SUN, L. Numerical and experimental investigation of vortex-induced vibration of a spar-type floating offshore wind turbine. **Ocean Engineering**, Elsevier, v. 172, p. 774–788, 2019.
- KHALAK, A.; WILLIAMSON, C. Motions, forces and mode transitions in vortex-induced vibrations at low mass-damping. **Journal of Fluids and Structures**, Elsevier, v. 13, n. 7-8, p. 813–851, 1999.
- KURIAN, V. J.; AL-YACOUBY, A. M.; KHIR, A. R. M. Vortex-induced vibration tests of a marine growth wrapped cylinder at subcritical reynolds number. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 103, p. MATEC Web of Conferences, 2018.
- LARSEN, C. M.; HANSON, T. D. A method for calculating the stability limit of spar floating wind turbines. **Journal of Physics: Conference Series**, IOP Publishing, v. 75, n. 1, p. 012073, 2007.
- LI, X.; LIU, Y.; FU, S.; WANG, L. Experimental investigation of vortex-induced motions of a spar-type floating offshore wind turbine. **Ocean Engineering**, Elsevier, v. 142, p. 365–377, 2017.
- NAUDASCHER, E.; ROCKWELL, D. **Flow-Induced Vibrations: An Engineering Guide**. Mineola, NY: Dover Publications, 2005.
- ROSHKO, A. **On the Drag and Shedding Frequency of Two-Dimensional Bluff Bodies**. [S.l.], 1954.
- SARPKAYA, T. A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations. **Journal of Fluids and Structures**, Elsevier, v. 19, n. 4, p. 389–447, 2004.
- SUMER, B. M.; FREDSOE, J. **Hydrodynamics around cylindrical structures**. 2. ed. Singapore: WSP, 2006.
- WILLIAMSON, C.; GOVARDHAN, R. Vortex-induced vibrations. **Annual Review of Fluid Mechanics**, Annual Reviews, v. 36, p. 413–455, 2004.
- WU, J.; GE, F.; HONG, Y.; LIU, Y. Dynamic response and fatigue analysis of offshore wind turbine tower under vortex-induced vibration. **Marine Structures**, Elsevier, v. 42, p. 68–87, 2015.
- ZDRAVKOVICH, M. M. The effect of surface roughness on the vortex-induced vibration of a circular cylinder. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Elsevier, v. 9, n. 1-2, p. 1–19, 1982.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.