

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

KAREN GOMES SOARES

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL
SOBRE O FENÔMENO DE VIV EM CILINDROS RÍGIDOS ELASTICAMENTE
SUPPORTADOS

Joinville
2024

KAREN GOMES SOARES

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL
SOBRE O FENÔMENO DE VIV EM CILINDROS RÍGIDOS ELASTICAMENTE
SUPORTADOS

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Naval do Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. André
Luís Condino Fjarra

Joinville
2024

KAREN GOMES SOARES

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL
SOBRE O FENÔMENO DE VIV EM CILINDROS RÍGIDOS ELASTICAMENTE
SUPORTADOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 24 de Junho de 2024.

Banca Examinadora:

Orientador: Prof. Dr. André Luís Condino Fugarra
Orientador
Presidente

Prof. Dr. Alexandre Mikowski
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Dra. Talita Sauter Possamai
Membra
Universidade Federal de Santa Catarina

Aos grandes amores da minha vida, José Antônio Machado, Deuzeni Machado,
Marcelo Soares e Dalva Soares, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Expressar gratidão a todos que contribuíram durante uma das fases mais difíceis e emocionantes da vida não é uma tarefa fácil. Por isso, mencionarei com carinho cada pessoa que, sem dúvida, tornou essa trajetória única e possível.

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus pela realização deste sonho. Manter minha fé Nele ao longo desses cinco anos foi primordial. Dedico um reconhecimento especial à minha família, que sempre me apoiou e, sem eles, com toda a certeza, eu não estaria onde estou. Obrigada, pai, Marcelo Soares, mãe, Dalva Soares, e aos meus queridos irmãos, Karine e Kelvin.

Ao longo destes anos, encontrei pessoas maravilhosas que merecem destaque neste momento de finalização de uma etapa de vida. Gostaria de começar agradecendo ao meu grande orientador, André Luís Condino Fugarra, por ter me recebido tão bem desde o meu primeiro semestre na faculdade e por ter confiado no meu trabalho ao longo desses anos. Sua orientação, apoio e incentivo foram essenciais para a minha formação.

Ressalto ainda meus agradecimentos à Petrobras pelo incentivo a pesquisa e extensão dada a mim, dando a oportunidade de obtenção de conhecimento na área estuda ao longo de um ano de pesquisa no laboratório de Interação Fluido Estrutura (LIFE).

Bem como, também agradeço o CNPq a oportunidade de participação como bolsista no projeto 437114/2018-0. Este projeto proporcionou ao grupo de pesquisa além do conhecimento técnico, o Canal de Água Circulante menor que foi utilizado como aparato ao longo deste projeto.

Gostaria de agradecer ao apoio do Laboratório de Metrologia da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR) por permitir a utilização da instrumentação para medição do nível de rugosidade superficial dos corpos de provas, além do método de interpolação desenvolvido pelo professor Alexandre Mikowski.

Ao meu eterno trio, Lucas Michalak, Victor Queiroz e Felipe Rank, quero que saibam que vocês se tornaram minha família de Joinville. Cada noite de filme, idas e vindas à praia, risadas, conselhos e, acima de tudo, nossa parceria como amigos fizeram com que esses anos tivessem a "sensação de coração quentinho" e lar, obrigada meninos. Aos amigos que fiz durante a faculdade, gostaria de destacar aqueles que tiveram um impacto significativo. Quero que saibam que cada um de vocês foi essencial para eu me tornar quem sou. Vocês tornaram a UFSC um lugar melhor. Há dias em que apenas o sorriso de um amigo ou um café na cantina muda tudo e principalmente, obrigada por toda a ajuda ao longo dos experimentos, discussões, matérias ao longo da universidade e pelas conversas na cantina. Por isso, gostaria de agradecer à Adriana Wallbach, Ana

Carolina Paulino, Airton João, Lívia Rampinelli, Monique Ellen, Gabriel Tomasi, Patrick Klippel, Luiz Appel, Aline Leal e Cauã Portilho.

RESUMO

Vibração Induzida por Vórtices (VIV) é um fenômeno de interação fluido-estrutura caracterizado pela observação de movimentos em relação à correnteza. Esse fenômeno pode resultar em falha por fadiga, uma vez que promove a diminuição da vida útil de risers, umbilicais e amarrações de plataformas, sendo então, um fator crucial a ser considerado na fase inicial de projetos. Por esses sistemas oceânicos permanecerem longos períodos de tempo submersos, eles apresentam formação de incrustação na superfície, a qual provoca o aumento da rugosidade superficial, alterando o modo de despreendimento de vórtices na camada limite e as respostas de amplitude do sistema. Neste trabalho, investigou-se experimentalmente a influência da rugosidade superficial no fenômeno de Vibração Induzida por Vórtices em cilindros únicos, utilizando três bases elásticas de 1 e 2 graus de liberdade. Para o estudo, foram realizados testes com cilindros de razões de aspecto (L/D) de 13 e 39, razões de massa de 1,0, 2,5 e 4,0, para dois níveis de rugosidade. Os ensaios ocorreram para diferentes velocidades nos Canais de Água Circulante do Laboratório de Interação Fluido-Estrutura (LIFE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A investigação realizada ao longo deste trabalho permitiu concluir que os cilindros rígidos rugosos apresentam amplitudes adimensionais menores do que os cilindros rígidos lisos. Alinhado a isso, observou-se que a base com 2GDL, no canal maior, apresenta amplitudes transversais maiores, com os ramos bem definidos onde o sistema com 2GDL para o CAC maior com $m^* = 1,0$ apresentou maiores amplitudes transversais.

Palavras-chave: Vibração Induzida por Vórtices. Cilindro Único. Rugosidade Superficial. 1GDL. 2GDL

ABSTRACT

Vortex-Induced Vibration (VIV) is a fluid-structure interaction phenomenon characterized by the observation of movements relative to the current. This phenomenon can result in fatigue failure as it decreases the lifespan of risers, umbilicals, and mooring lines of platforms, making it a crucial factor to consider in the early design phases. Since these oceanic systems remain submerged for long periods, they exhibit biofouling on the surface, which increases surface roughness, altering the vortex shedding mode in the boundary layer and the amplitude responses of the system. In this study, the influence of surface roughness on Vortex-Induced Vibration in single cylinders was experimentally investigated using three elastic bases with 1 and 2 degrees of freedom. Tests were conducted on cylinders with aspect ratios (L/D) of 13 and 39, mass ratios of 1.0, 2.5, and 4.0, for two levels of roughness. The tests were performed at different velocities in the Circulating Water Channels of the Fluid-Structure Interaction Laboratory (LIFE) at the Federal University of Santa Catarina (UFSC). The investigation conducted throughout this study concluded that rough rigid cylinders exhibit lower dimensionless amplitudes than smooth rigid cylinders. Additionally, it was observed that the base with 2DOF in the larger channel presented greater transverse amplitudes, with well-defined branches where the system with 2DOF for the larger CAC with $m^* = 1.0$ showed greater transverse amplitudes.

Keywords: Vortex-Induced Vibration. Single Cylinder. Surface Roughness. 1DOF. 2DOF.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Caracterização construtiva de um cabo oceânico umbilical	19
Figura 2 – Amarração do tipo convencional x Amarração do tipo Taut-Leg	20
Figura 3 – Plataforma do tipo Spar Buoy	21
Figura 4 – Plataforma do tipo Truss Spar.	22
Figura 5 – Plataforma do tipo Cell Spar	23
Figura 6 – Relação do número de Reynolds com as esteiras emitidas	24
Figura 7 – Caracterização das diferenças entre ramos de respostas para a curva de VIV	27
Figura 8 – Canal de Água Circulante Menor	29
Figura 9 – Canal de Água Circulante Maior	30
Figura 10 – Base Elástica 1GDL para Canal Maior	31
Figura 11 – Base Elástica 2GDL para Canal Maior	31
Figura 12 – Base Elástica 2GDL para Canal Menor	32
Figura 13 – Corpos de Prova Utilizados nos Experimentos	33
Figura 14 – Comprimentos de Amostragem para Rugosímetro	33
Figura 15 – Câmera Prime 17W	37
Figura 16 – Alvos posicionados para ensaio no cilindro no CAC Menor	37
Figura 17 – Amplitudes Adimensionais Transversais para base elástica com 1GDL $m^* = 2,5$ no canal maior	41
Figura 18 – Amplitudes Transversais para base elástica com 1GDL $m^* = 4,0$ no canal maior	42
Figura 19 – Amplitudes Transversais para base elástica com 2GDL $m^* = 1,0$ no canal maior	43
Figura 20 – Amplitudes Transversais para base elástica com 2GDL $m^* = 2,5$ no canal maior	43
Figura 21 – Amplitudes Transversais para base elástica com 2GDL $m^* = 4,0$ no canal maior	44
Figura 22 – Amplitudes Transversais para base elástica com 2GDL $m^* = 1,0$ no canal menor	45
Figura 23 – Amplitudes longitudinais para base elástica com 2GDL e $m^* = 2,5$ no canal maior	45
Figura 24 – Amplitudes longitudinais para base elástica com 2GDL e $m^* = 4,0$ no canal maior	46
Figura 25 – Amplitudes longitudinais para base elástica com 2GDL e $m^* = 1,0$ no canal maior	46

Figura 26 – Amplitudes longitudinais para base elástica com 2GDL e $m^* = 1,0$ no canal menor	47
Figura 27 – Frequências características transversais para base elástica com 1GDL e $m^* = 2,5$ no canal maior	47
Figura 28 – Frequências características transversais para base elástica com 1GDL e $m^* = 4,0$ no canal maior	48
Figura 29 – Frequências características transversais para base elástica com 2GDL e $m^* = 2,5$ no canal maior	48
Figura 30 – Frequências características transversais para base elástica com 2GDL e $m^* = 4,0$ no canal maior	49
Figura 31 – Frequências características transversais para base elástica com 2GDL e $m^* = 1,0$ no canal maior	49
Figura 32 – Frequências características transversais para base elástica com 2GDL e $m^* = 1,0$ no canal menor	50
Figura 33 – Frequências características longitudinais para base elástica com 2GDL e $m^* = 2,5$ no canal maior	50
Figura 34 – Frequências características longitudinais para base elástica com 2GDL e $m^* = 4,0$ no canal maior	51
Figura 35 – Frequências características longitudinais para base elástica com 2GDL e $m^* = 1,0$ no canal maior	51
Figura 36 – Frequências características longitudinais para base elástica com 2GDL e $m^* = 1,0$ no canal menor	52
Figura 37 – Comparação dos valores de amplitudes transversais para diferentes bases elásticas - Liso	53
Figura 38 – Comparação dos valores de amplitudes longitudinais para diferentes bases elásticas - Liso	54
Figura 39 – Comparação dos valores de amplitudes transversais para diferentes bases elásticas - Rugoso	54
Figura 40 – Comparação dos valores de amplitudes longitudinais para diferentes bases elásticas - Rugoso	55
Figura 41 – Comparação dos valores de frequências transversais para diferentes bases elásticas - Liso	56
Figura 42 – Comparação dos valores de frequências transversais para diferentes bases elásticas - Liso	56
Figura 43 – Comparação dos valores de frequências longitudinais para diferentes bases elásticas - Liso	57
Figura 44 – Comparação dos valores de frequências longitudinais para diferentes bases elásticas - Liso	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre Risers Flexíveis e Rígidos	19
Tabela 2 – Dimensionamento encontrados para cada cilindro	34
Tabela 3 – Configurações dos Casos de Análise	35
Tabela 4 – Valores das massas estruturais para os casos investigados	36
Tabela 5 – Velocidades do fluido utilizadas durante os ensaios para baixo e alto número de Reynolds	39
Tabela 6 – Valores obtidos para frequências naturais e fatores de amortecimento	40

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Densidade
V	Velocidade do fluido
D	Diâmetro do cilindro
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
V_r	Velocidade reduzida
Re	Número de Reynolds
Ra	Rugosidade superficial
U_x	Velocidade do fluido na direção do escoamento
f_{n_y}	Frequência natural de oscilação na direção transversal
f_{n_x}	Frequência natural de oscilação na direção longitudinal
m_{cp}	Massa total do cilindro
m_f	Massa do fluido deslocada
l	Comprimento da haste
g	Aceleração da gravidade
f_y	Frequência de oscilação na direção transversal
f_x	Frequência de oscilação na direção longitudinal
ζ_x	Fator de amortecimento na direção horizontal
ζ_y	Fator de amortecimento na direção longitudinal
l_v	Percurso inicial do rugosímetro
l_n	Percurso final do rugosímetro
l_t	Trechos de comprimento
l_c	Comprimento efetivo de avaliação
l_m	Comprimento médio de avaliação

m^*	Razão de massa
$A_y^{10\%}/D$	10% maiores amplitudes transversais adimensionais pelo diâmetro
$A_x^{10\%}/D$	10% maiores amplitudes longitudinais adimensionais pelo diâmetro
f_y/f_{ny}	Frequência característica transversal adimensional
f_x/f_{nx}	Frequência característica Longitudinal adimensional
X	Direção longitudinal
Y	Direção transversal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	SISTEMAS DE CILINDRO ÚNICO NO ÂMBITO OCEÂNICO	18
2.1.1	Risers e Umbilicais	18
2.1.2	Amarrações de plataformas	20
2.1.3	Plataforma Spar	20
2.1.3.1	Spar Buoy	21
2.1.3.2	Truss Spar	21
2.1.3.3	Cell Spar	22
2.2	ESCOAMENTO AO REDOR DE CILINDROS ÚNICOS	23
2.3	NÚMERO DE REYNOLDS E SUA INFLUÊNCIA	25
2.4	VIBRAÇÃO INDUZIDA POR VÓRTICES	25
2.5	INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE PARA O FENÔMENO DE VIV	27
3	METODOLOGIA	29
3.1	CANAIS DE ÁGUA CIRCULANTE	29
3.2	APARATOS EXPERIMENTAIS	30
3.2.1	Base Elástica com 1 GDL para Canal Maior	30
3.2.2	Base Elástica com 2 GDL para Canal de Maior	31
3.2.3	Base Elástica com 2 GDL para Canal Menor	32
3.3	Cilindros Rígidos	32
3.4	CONFIGURAÇÕES DOS ENSAIOS E ABORDAGEM ANALÍTICA	34
3.5	INSTRUMENTAÇÃO	36
3.6	INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL	38
3.6.1	Ensaio de decaimento	38
3.6.2	Ensaio de vibrações induzidas por vórtices	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	Frequências naturais e fatores de amortecimento pelo ensaio de decaimento	40
4.2	Ensaio de Vibração Induzida por Vórtices	41
4.2.1	Amplitudes Adimensionais	41
4.2.2	Razões entre as Frequências Características	47

4.2.3	Comparação Entre os Resultados de Amplitudes para Diferentes Bases Elásticas	52
4.2.4	Comparação Entre os Resultados de Frequências Características para Diferentes Bases Elásticas	55
5	CONCLUSÕES	58
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

Para Sumer e Fredsoen (2006), a revolução energética a partir de fontes petrolíferas surgiu com a descoberta de John Davison Rockefeller, onde o petróleo demonstrou um potencial econômico relevante, se tornando a principal fonte energética mundial e uma das principais commodities do comércio internacional. Nesse contexto, sabe-se que os avanços tecnológicos no setor petrolífero resultaram em investigações acerca da otimização de estruturas oceânicas, juntamente com estudos sobre os fenômenos de interação fluido-estrutura, como o fenômeno de Vibração Induzida por Vórtices (VIV).

Segundo Blevins (2001b), o fenômeno VIV está presente em diversos sistemas oceânicos, tal como risers, umbilicais, amarrações de plataformas, dutos submarinos em vão livres e colunas de plataformas para tanto, o fenômeno tem origem quando há a separação da camada limite na superfície de um corpo rombudo. Além disso, para escoamentos ao redor de cilindros únicos com o número de Reynolds superior à 40, ocorre a emissão de vórtices que resulta em uma distribuição assimétrica da pressão na superfície do corpo que, por sua vez, influencia a estabilidade dinâmica desses sistemas.

Para Medeiros e Meneghini (2006), essa emissão de vórtices resulta na modificação da dinâmica do sistema, uma vez que provoca flutuações entre os campos de pressões, ocasionando alterações nas forças de sustentação e arrasto. Além disso, reforçam que caso o cilindro esteja livre para oscilar, esta flutuação entre os campos de pressão se expressam através do por fenômenos de interação fluido-estrutura, como o VIV. Medeiros e Meneghini (2006) cita que sistemas oceânicos, como risers e umbilicais, ao serem submetidos ao VIV podem apresentar estresse dinâmico e oscilações de grande amplitude, onde a oscilação da estrutura possui a mesma frequência que a formação de vórtices, tendo como consequência, então, a minimização da vida útil devido à fadiga e a possibilidade de impacto entre risers adjacentes, já que movimentos longitudinais e transversais de VIV amplificam o efeito do arrasto, aumentando o esforço solitado pelas amarrações de plataformas, risers e umbilicais

Segundo Okajima e Nagamori (1999), esse fenômeno, também têm-se a problemática de incrustação nos sistemas oceânicos a qual resulta no aumento da rugosidade superficial da estrutura e na alteração da resposta dinâmica de VIV do sistema. a partir de testes em um túnel de vento, verificaram que a oscilação de um cilindro rugoso foi amortecida em um pequeno intervalo similar ao número crítico de Reynolds, porém apresentando aumento do número de Reynolds e uma grande amplitude onde, posteriormente, instaurou-se o fenômeno de lock-in. A partir desses

estudos concluíram que os efeitos da rugosidade em sistemas oceânicos atuam favoravelmente para reduzir as consequências das VIV.

Mercier et al. (1999) relatam os primeiros estudos experimentais em escala direcionados para o fenômeno de VIV, pois havia a necessidade de se realizar ensaios mesmo que em escala reduzida para números de Reynolds diferentes que pudessem constituir a etapa inicial do projeto, pois as investigações numéricas ainda não tinham sido validadas por extrapolação.

Deste modo, realizou-se uma pesquisa experimental utilizando os Canais de Água Circulante (CAC) no Laboratório de Interação Fluido-Estrutura (LIFE) do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O objetivo da pesquisa foi caracterizar a curva do fenômeno de Vibração Induzida por Vórtices (VIV) para um cilindro circular com diferentes parâmetros de rugosidade superficial, comparando os resultados para três suportes elásticos e três razões de massa, a fim de caracterizar e comparar as amplitudes significativas e as frequências características do sistema.

Para tal, foram preparados quatro corpos de prova cilíndricos com diferentes níveis de rugosidade, adicionando areia na superfície, com relações ($L/D = 39$) e ($L/D = 13$). Em seguida, ensaios experimentais foram realizados nos dois Canais de Água Circulante (CAC), com o auxílio de um sistema óptico, para diferentes velocidades, visando caracterizar o fenômeno de VIV. Os resultados foram comparados com os ensaios realizados com cilindros lisos para três diferentes bases elásticas, variando o valor da razão de massa.

1.1 OBJETIVOS

Ao propor ensaios experimentais para o estudo do VIV em cilindros únicos com diferentes níveis de rugosidade em três bases elásticas, propõe-se os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Determinar o impacto da rugosidade superficial para o fenômeno de vibração induzida por vórtices para cilindros circulares únicos, com o auxílio de sensores de rastreamento óptico, variando a base elástica de suporte e a razão de massa.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir e medir os níveis de rugosidade a serem ensaiados;
- Determinar a influência da rugosidade para a mitigação da ocorrência do VIV em relação ao caso cilindro único liso tomado como referência;

- Determinar a relação dos níveis de rugosidade para diferentes velocidades reduzidas com a curva adimensional de amplitudes do fenômeno de VIV para três bases elásticas e compará-las.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados conceitos fundamentais para compreensão do fenômeno de vibração induzida por vórtices para cilindros circulares únicos. Primeiramente serão apresentados os sistemas oceânicos que se assemelham a cilindros únicos que podem ser ensaiados experimentalmente em escala reduzida. Em seguida são apresentados conceitos acerca do escoamento ao redor de cilindros, como ocorre a emissão de vórtices, a ocorrência do VIV e a influência da rugosidade superficial neste fenômeno.

2.1 SISTEMAS DE CILINDRO ÚNICO NO ÂMBITO OCEÂNICO

Para Blevins (2001b), sistemas oceânicos presentes na engenharia naval que se assemelham a cilindros únicos, tal como risers, umbilicais, amarrações de plataformas, plataforma spar, tubulações e colunas de pontes, quando submetidos à incidência de um escoamento, apresentam interações fluido-estruturais uma vez que são caracterizados como corpos rombudos que provocam a separação do escoamento na superfície.

2.1.1 Risers e Umbilicais

De acordo com Vieira (2017), risers, umbilicais e linhas de amarrações são estruturas que se assemelham em classe para as respostas dinâmicas de cilindros circulares flexíveis ensaiados experimentalmente. O riser é o trecho suspenso do duto utilizado para conduzir fluidos da superfície até o leito marinho, um exemplo são os risers de injeção que conectam uma árvore de natal molhada às plataformas.

Para Leão e Sardinha (2014), os risers podem ser classificados em rígidos ou flexíveis, onde os rígidos dividem-se em Top Tensioned Riser (TTR), quando disposto verticalmente, e Steel Catenary Riser (SCR). Quando disposto em catenária poderão ser classificados como do tipo pipe-in-pipe, uma vez que garantem maior resistência mecânica caracterizada pelos seus tubos interno e externo pois o material do anular não oferece nenhuma função estrutural.

Silva (2011) relata que os risers rígidos são tubos de aço utilizados para diminuir o peso, possuem rigidez e resistência a cargas axiais, radiais e de flexão elevadas. Para isso, é necessário um projeto cauteloso, pois as cargas hidrodinâmicas podem provocar falha por fadiga. O riser em catenária é mais utilizado no Brasil, tanto para riser rígido quanto para o flexível, sendo possível definir a configuração a se utilizar dependendo do ângulo, sendo entre 5° e 7° para o flexível e 20° para o rígido.

Segundo Silva (2011), os risers flexíveis são dutos compostos pela superposição de camadas plásticas e metálicas sendo caracterizado pela baixa rigidez à flexão e resistência mecânica. Além disso, Silva (2011) ressalta que o mercado de dutos flexíveis no Brasil é crescente pois o uso dos sistemas de produção flutuantes que atendem as demandas em águas ultra profundas. A Tabela 1 mostra a comparação dos risers flexíveis e rígidos.

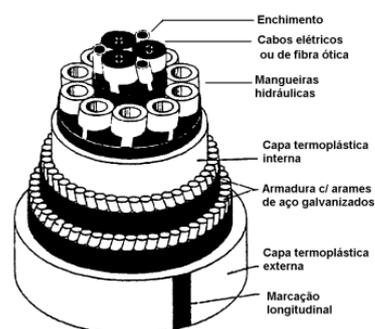
Tabela 1 – Comparação entre Risers Flexíveis e Rígidos

Flexíveis	Rígidos
<p>Maior flexibilidade de traçado devido ao menor raio de curvatura</p> <p>Menor sensibilidade aos acidentes no fundo do mar</p> <p>Possui baixa rigidez à flexão</p>	<p>Menor flexibilidade de traçado devido ao maior raio de curvatura</p> <p>Maior sensibilidade aos acidentes no fundo do mar</p> <p>Baixo custo e capacidade de resistir a altas pressões</p>

Fonte: Adaptado de Leão e Sardinha (2014, p. 11).

De acordo com Souza, Vaz e Estefen (1999), o sistema de cabo umbilical, são considerados cabos multicamadas flexíveis que contém mangueiras poliméricas, cabos elétricos ou fibras óticas que têm como objetivo transmitir energia hidráulica através de fluidos hidráulicos sob pressão ou conduzir energia elétrica na forma de potência ou de sinal. Ainda ressaltam que a energia hidráulica promove o acionamento de válvulas como em árvores de natal. Já na forma de sinal, a energia elétrica tem como função transmitir informações de temperatura e de pressão do poço para a superfície. A Figura 1 mostra a caracterização interna de um umbilical.

Figura 1 – Caracterização construtiva de um cabo oceânico umbilical



Fonte: Souza, Vaz e Estefen (1999, p. 2).

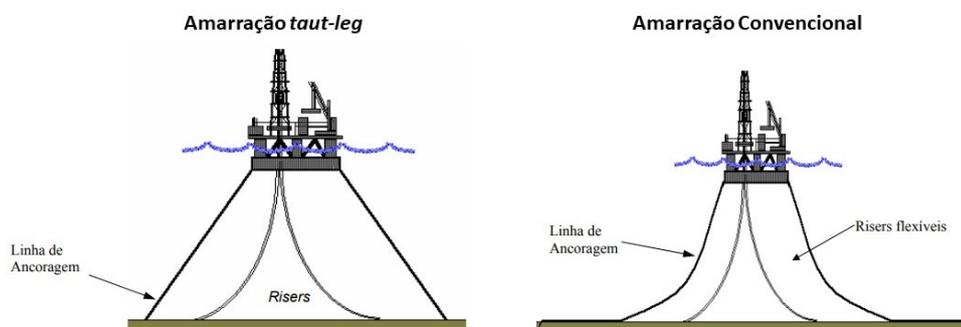
De acordo com Cordovés (2008), os cabos umbilicais são divididos em duas zonas, a primeira é a parte suspensa desde a plataforma de petróleo até o fundo do mar, onde se atuam cargas de natureza dinâmica oriundas de ventos, correnteza marítima e ondas. Já a segunda zona compreende o trecho assentado no leito marinho que por sua vez têm cargas estáticas atuantes. Os carregamentos dinâmicos provocam uma série de esforços axiais, de torção e flexão, implicando em diversos modos de

falha estruturais, como a falha por fadiga.

2.1.2 Amarrações de plataformas

Lacerda (2005) descreve o sistema de amarrações de plataforma como um conjunto de linhas compostas por diferentes materiais, como amarras, cabos de aço e cabos de poliéster, responsáveis por transferir os esforços que agem na plataforma para o solo, podendo ser classificado como convencional ou Taut-Leg. A Figura 2 demonstra a diferença entre as classificações.

Figura 2 – Amarração do tipo convencional x Amarração do tipo Taut-Leg



Fonte: Adaptado de Lacerda (2005, p. 11,12).

Para Lacerda (2005), as amarrações convencionais são aquelas que apresentam a ancoragem em forma de catenária, sendo utilizadas para plataformas de perfuração e produção com profundidades limitadas em 500 m. Já as amarrações do tipo Taut-Leg são amarrações que transferem para o solo tanto forças horizontais quanto verticais.

Segundo Bico (2013), as forças presentes em linhas de amarrações são similares aos esforços em sistemas onshore, sendo classificadas em forças estáticas e dinâmicas. Dentre as forças estáticas incluem-se as forças derivadas do peso próprio da plataforma e forças hidrostáticas de empuxo, já as forças dinâmicas que agem nesse sistema são oriundas do vento, ondas e correntezas marítimas.

Esses esforços externos impactam no cálculo do número de linhas de amarrações que o projeto deve conter, por exemplo, normalmente para plataformas de perfuração são necessárias 8 linhas de ancoragem para suporte do sistema, sendo o projeto realizado para 20 anos de vida útil (BICO, 2013).

2.1.3 Plataforma Spar

As plataformas do tipo Spar são sistemas utilizados para exploração em águas profundas, pois possuem maior estabilidade com movimentos verticais de menor intensidade do que outras plataformas como as Tension Leg Platform (TLP) (AMORIM,

2010). Devido ao alto calado da plataforma, a resultante de vento, corrente e onda não consegue deslocar significativamente o centro de rotação, resultando em baixos efeitos de onda e movimentos verticais, ou seja, os movimentos de afundamento (heave) e arfagem (pitch) são pequenos o suficiente para permitir a instalação de risers rígidos com árvores de natal secas (AMORIM, 2010).

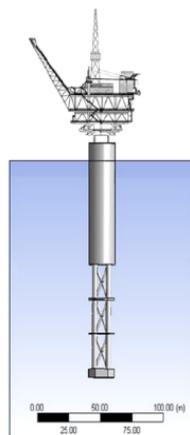
De acordo com Amorim (2010), há três tipos de plataformas Spars, baseadas na evolução do conceito da original, sendo elas, Spar Buoy, Truss Spar e Cell Spar.

2.1.3.1 Spar Buoy

Segundo Souza (2019), plataformas do tipo Spar-Buoy surgiram por meio da evolução das boias oceanográficas utilizadas para recolhimento de dados marítimos. O autor ainda cita que esse sistema tem seu uso recomendado para águas profundas e ultra-profundas, consistindo em um cilindro vertical de aço de grande diâmetro, ancorado, o qual opera com calado de profundidade constante e sua estrutura sofre apenas pequenos movimentos verticais.

Atualmente, para o autor Souza (2019), as unidades flutuantes do tipo Spar-Buoy vêm sendo bastante utilizadas para perfuração e produção de poços de petróleo e, mais recentemente, para turbinas eólicas offshore, além disso, destaca-se que este foi o primeiro conceito de plataforma spar a ser desenvolvido. A Figura 3 mostra um sistema com plataforma do tipo Spar Buoy.

Figura 3 – Plataforma do tipo Spar Buoy



Fonte: Adaptado de Sinsabvarodom e Widjaja (2014, p. 92).

2.1.3.2 Truss Spar

Para Amorim (2010), o sistema de plataforma Spar Truss consiste na substituição do cilindro na região abaixo dos tanques por uma estrutura treliçada

que resulta na formação de placas horizontais que minimizam os efeitos de onda e diminuem os movimentos verticais da plataforma. A longarina treliçada é vantajosa porque pesa menos que o projeto original, também tornando o projeto mais econômico por utilizar menos material na construção (AMORIM, 2010). A Figura 5 mostra o sistema de plataforma Truss Spar.

Figura 4 – Plataforma do tipo Truss Spar.



Fonte: Adaptado de Kurian, Liew e Ng (2013, p. 2).

2.1.3.3 Cell Spar

Para (FINN; MAHER, 2003), a plataforma Cell Spar possui características da Truss Spar e se diferencia dela ao compor-se por vários tubos menores em volta de um único cilindro. Além disso, o sistema de plataforma Cell Spar pode ser fabricado com maior rapidez e menor custo de projeto do que os sistemas Truss Spar e Spar Buoy.

Figura 5 – Plataforma do tipo Cell Spar



Fonte: Finn e Maher (2003, p. 1).

Nota-se que, para Vieira (2017), esses sistemas mencionados anteriormente se assemelham geometricamente às dinâmicas de cilindros circulares rígidos. Essa semelhança permite a execução de ensaios em escala para discutir a resposta dinâmica de sistemas reais, pois a curva característica de VIV se mantém constante ao preservar a mesma faixa de velocidade reduzida e ao adimensionalizar as amplitudes pelo diâmetro da estrutura. Além disso, é crucial manter as razões de aspecto e de massa próximas dos valores dos sistemas reais.

2.2 ESCOAMENTO AO REDOR DE CILINDROS ÚNICOS

O escoamento ao redor de corpos cilíndricos encontra larga aplicação em sistemas vinculados à engenharia sob exposição ao vento, correntezas marítimas ou ondas, como chaminés, colunas de pontes, torres de transmissão, dutos e cabos de transmissão (MUNDIM, 2019). Para isso, desenvolveram-se campos de investigação para auxiliar na solução de problemáticas vinculadas à distribuição de pressão, força de arrasto, força de sustentação, visualização de escoamento, estudo da camada limite, dissipação térmica, vibração e ruído.

Segundo Conceição (2016), o escoamento de um fluido em torno de um corpo estacionário origina uma região de fluxo perturbado nos limites do corpo, onde a região afetada é influenciada pela geometria, orientação e tamanho do corpo além da velocidade e viscosidade do fluido, originando, então, o número de Reynolds (Re) que é um parâmetro adimensional que dita a maneira como o escoamento se comporta nas proximidades do corpo imerso, como mostra a Equação (1), onde ρ é a densidade do fluido em kg/m^3 , V em m/s é a velocidade do fluido, μ em m^2/s é a viscosidade dinâmica do fluido e D o diâmetro do corpo cilíndrico em m .

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

De acordo com Blevins (2001b), em regimes de desprendimento de vórtices em escoamentos que apresentam o número de $Re \leq 5$ as linhas de corrente do escoamento acompanham o contorno geométrico do cilindro, já no intervalo entre $5 \leq Re \leq 45$ o escoamento se separa da superfície posterior do cilindro, formando um par simétrico de vórtices no início da esteira. O comprimento dos vórtices cresce linearmente, atingindo um valor equivalente a 3 diâmetros para Reynolds 45. Para isso, o autor ainda confirma que com o aumento do número de Re a esteira se torna instável e os vórtices simétricos se separam, logo uma esteira laminar de vórtices periódicos de sentidos opostos é formada pelo escoamento.

Alinhado a isto, Blevins (2001b) ainda cita que entre o intervalo $150 \leq Re \leq 300$, os vórtices gerados se tornam turbulentos, no entanto, a camada limite adjacente à parede do cilindro continua laminar e, para o intervalo de $300 \leq Re \leq 1.3 \cdot 10^5$, a camada limite laminar se separa a aproximadamente 80° do bordo de ataque do cilindro. No regime de transição ocorre a formação de bolhas e o aparecimento de efeitos tridimensionais no escoamento, os quais acabam perturbando a esteira de vórtices e ampliando os componentes de frequência de oscilação, como mostra a Figura 6.

Figura 6 – Relação do número de Reynolds com as esteiras emitidas

Número de Reynolds	Regime de Escoamento	Formato do escoamento	Característica do escoamento
$Re \rightarrow 0$	Escoamento Lento (creeping flow)		Permanente, sem esteira
$3 - 4 < Re < 30 - 40$	Par de vórtices na esteira		Permanente, com separação simétrica
$30 < Re < 80$ $40 < Re < 90$	Formação de vórtices de von Kármán		Laminar, esteira instável
$80 < Re < 150$ $90 < Re < 300$	Pura esteira de vórtices de von Kármán		Vórtices de von Kármán
$150 < Re < 10^5$ $300 < Re < 1.3 \cdot 10^5$	Regime subcrítico		Laminar, com esteira de vórtices instável
$10^5 < Re < 3.5 \cdot 10^6$ $1.3 \cdot 10^5 < Re < 3.5 \cdot 10^6$	Regime Crítico		Separação Laminar Esteira turbulenta
$3.5 \cdot 10^6 < Re$	Regime Supercrítico (transcrítico)		Separação turbulenta

Fonte: Borges (2019, p. 16).

Para Conceição (2016), a instabilidade mais conhecida se dá pelo desenvolvimento de vórtices da esteira de von Kármán, onde ocorre um padrão regular de vórtices que movem-se alternadamente em sentido horário e anti-horário, que resultam em duas fileiras de vórtices alternados. Para Hannes (2015), o fenômeno de VIV decorre da formação de uma esteira de vórtices do tipo von Kármán, pois quando a frequência da emissão desses vórtices se sincroniza com a frequência natural da estrutura, o sistema começa a oscilar, dando origem ao fenômeno de vibração estrutural denominado VIV, conhecido também como faixa de sincronização.

2.3 NÚMERO DE REYNOLDS E SUA INFLUÊNCIA

Pra Blevins (2001a) número de Reynolds é uma grandeza adimensional que caracteriza o comportamento do fluxo de um fluido. Ele expressa a relação entre as forças inerciais, ou seja amplificam as perturbações e geram instabilidades e as forças viscosas, que atenuam ou inibem a formação de instabilidades. Este parâmetro é amplamente utilizado para determinar se o escoamento é laminar ou turbulento.

O autor Ludwig Prandtl, introduz o conceito de O camada limite, afim de possibilitar a solução de problemas relacionados aos escoamentos viscosos. Embora tais escoamentos sejam descritos pelas equações de Navier-Stokes, a resolução destes problemas era complexa. Prandtl demonstrou que muitos escoamentos viscosos podem ser analisados dividindo o escoamento em duas regiões: uma próxima às fronteiras sólidas e outra que cobre o restante do escoamento. Ele mostrou que a viscosidade é significativa apenas na camada limite, enquanto na região fora da camada limite, a viscosidade pode ser desprezada e o fluido tratado como não viscoso marcou o início da era moderna da mecânica dos fluidos ao possibilitar a solução de problemas relacionados aos escoamentos viscosos. Embora tais escoamentos sejam descritos pelas equações de Navier-Stokes, a resolução destes problemas era complexa. Prandtl demonstrou que muitos escoamentos viscosos podem ser analisados dividindo o escoamento em duas regiões: uma próxima às fronteiras sólidas e outra que cobre o restante do escoamento. Ele mostrou que a viscosidade é significativa apenas na camada limite, enquanto na região fora da camada limite, a viscosidade pode ser desprezada e o fluido tratado como não viscoso.

2.4 VIBRAÇÃO INDUZIDA POR VÓRTICES

Para Violette, Langre e Szydlowski (2014), o fenômeno de VIV ocorre quando um corpo longo, é submetido a um escoamento, criando uma esteira instável na forma de vórtices alternados, uma vez que os vórtices se desprendem da estrutura e o desprendimento alternado fornece variação na força de sustentação do cilindro.

De acordo com Gerrard (1966), um vórtice irá crescer decorrente da circulação da camada cisalhante, uma vez que o vórtice aumenta de tal forma que pode atrair a camada cisalhante oposta, que apresenta vorticidade com sinal oposto. Assim, a interação do vórtice em formação com a camada cisalhante oposta encerrará a alimentação de circulação do vórtice em crescimento promovendo o seu desprendimento em direção à esteira.

As vibrações caracterizadas pelo desprendimento de vórtices podem ocorrer em diversos sistemas, como em risers de perfuração, spar buoys, linhas de amarração, dutos submarinos, em cabos de transmissão de eletricidade e em cabos telefônicos Gerrard (1966). O principal problema relacionado a este fenômeno é a falha por fadiga, esta está vinculada às tensões impostas e diretamente relacionada com as forças exercidas sobre o corpo, dessa forma, torna-se crucial prever as forças atuantes devido aos efeitos de VIV.

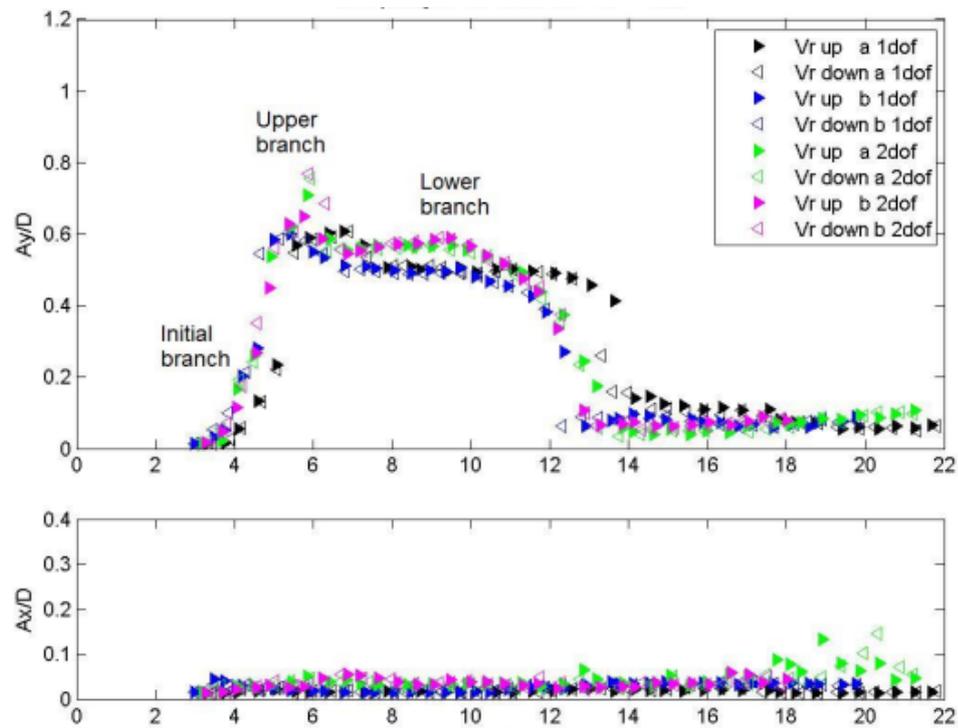
Segundo Bearman (1984), quando ocorre a vibração livre, há pequenos aumentos na velocidade do escoamento que ocasionam variações na amplitude de oscilação do cilindro circular e surgem no sistema saltos inesperados na emissão de vórtices que estão vinculados a variações bruscas nos parâmetros de controle da vibração e que dificultam as investigações experimentais.

De acordo Martins (2017), há a ocorrência de sincronização entre a frequência de desprendimento de vórtices e a frequência natural da estrutura, o que ocasiona a ressonância do sistema e no fenômeno conhecido como lock-in, este se caracteriza pela modificação tanto da frequência natural de vibração devido à variação da massa adicional, quanto da frequência de desprendimento de vórtices, que é influenciada pela vibração da estrutura.

Para Martins (2017), quando uma estrutura cilíndrica longa sob tensão que possui diversas frequências e modos naturais nas direções longitudinal e transversal ao escoamento, a força de arrasto devido ao desprendimento de vórtices tem um período igual à metade do período da força de sustentação, uma vez que o desprendimento de vórtices ocorre sempre à jusante do cilindro.

Os autores Khalak e Williamson (1997), investigaram acerca das quatro regiões distintas da resposta típica da ocorrência do fenômeno do VIV, sendo então denominadas região de excitação inicial ou *initial branch*; o *upper branch* em que a amplitude de resposta é maior; o *lower branch*, ramo que apresenta amplitude de resposta moderada e a região de *desynchronization*, conforme mostra a Figura 7.

Figura 7 – Caracterização das diferenças entre ramos de respostas para a curva de VIV



Fonte: Freire e Meneghini (2009, p. 32)

2.5 INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE PARA O FENÔMENO DE VIV

Segundo Nakamura e Tomonari (1982), a superfície do cilindro é um dos parâmetros importantes que influenciam fortemente o fluxo ao redor do cilindro. Como em todas as estruturas marinhas com seções cilíndricas, organismos marinhos crescerão na superfície da estrutura ao longo do tempo, aumentando a rugosidade da superfície da estrutura.

Estudos recentes têm investigado o efeito da rugosidade no fenômeno de VIV, como Okajima et al. (1999), que utilizando testes de oscilação livre em um túnel de vento, descobriram que a oscilação de um cilindro rugoso foi amortecida dentro de uma pequena faixa de velocidade cobrindo o número de Reynolds crítico. No entanto, para números de Reynolds superiores ao valor crítico, o cilindro rugoso vibrava com amplitude significativa, associada ao lock-in da frequência do esteio ou sincronização com a frequência natural dos cilindros.

Para Hover, Tvedt e Triantafyllou (2001), uma rápida redução na amplitude de deslocamento em grandes valores de velocidade reduzida na faixa de sincronização, fora da região sincronizada, também foi observada. Essa redução foi acompanhada por

uma diminuição significativa nas forças de sustentação, presumivelmente devido a fios de disparo decorrelacionando as forças ao longo do cilindro.

Os autores Bernitsas e Raghavan (2008) mostraram que a redução de VIV pode ser alcançada organizando tiras de rugosidade em uma configuração em cascata. Tiras curtas de rugosidade foram encontradas como mais eficientes na quebra da correlação do fluxo na direção do vão, reduzindo ou suprimindo o VIV.

Além disso, Achenbach e Heineck (1981) concluíram que a rugosidade influencia na redução da intensidade do VIV a partir da constatação de que, com o aumento da rugosidade, tem-se a redução do intervalo de lock-in, da amplitude máxima e a diminuição do coeficiente de arrasto médio. Vinculado a isto, houve também o atraso do início da faixa de lock-in enquanto o número Strout apresentou um aumento.

Os autoresm, Okajima e Nagamori (1999) relatam a execução de testes de oscilação livre transversal em um túnel de vento para estudo da instabilidade aeroelástica de um cilindro com superfície rugosa, onde os autores constataram que a oscilação de um cilindro com rugosidade superficial foi amortecida em um pequeno intervalo próximo do número crítico de Reynolds, no entanto, quando há o aumento do número de Reynolds o cilindro oscilou com uma grande amplitude, resultando no fenômeno de lock-in.

Para Blevins e Coughran (2009), o incremento de rugosidade na superfície do corpo resulta na diminuição de amplitude transversais, onde o autor completa que a instabilidade em amplitudes menores parece estar associada à falta de coerência na direção do vão e ao desprendimento instável na frequência de desprendimento do cilindro estacionário e na frequência natural do cilindro.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas as características do aparato experimental e as instrumentações que serão utilizadas durante a realização dos estudos propostos. Posteriormente, serão apresentados quais parâmetros analíticos serão dimensionados, seguido da apresentação da metodologia da investigação experimental.

3.1 CANAIS DE ÁGUA CIRCULANTE

Os ensaios foram realizados em dois Canais de Água Circulantes (CAC) presentes no Laboratório de Interação Fluido-Estrutura da UFSC, no Centro Tecnológico de Joinville, do grupo de pesquisa Fluid Structure Interaction Research Group (FSIRG). As principais diferenças entre os canais são as suas dimensões e as faixas de velocidades do escoamento. O canal de baixo Reynolds opera em uma faixa de 0,006 m/s a 0,036 m/s, enquanto o de alto Reynolds oferece uma faixa mais ampla, entre 0,041 m/s e 0,357 m/s. As Figuras 8 e 9 mostram os dois canais utilizados, que serão referidos nesse estudo como CAC "Menor" e CAC "Maior", respectivamente.

Figura 8 – Canal de Água Circulante Menor



Fonte: FSIRG (2024).

Figura 9 – Canal de Água Circulante Maior



Fonte: FSIRG (2024).

Para o CAC menor, a seção de teste do canal teve o calado fixado em 260 mm para a realização dos testes do presente estudo, com largura de 750 mm. Já para o CAC maior, os ensaios foram realizados com a lâmina d'água a 1200 mm de altura do fundo, com largura de 2000 mm.

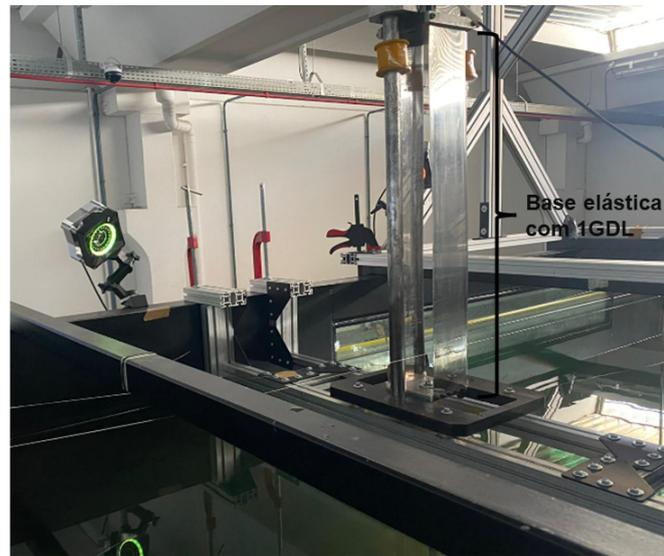
3.2 APARATOS EXPERIMENTAIS

Na sequência são descritos os aspectos construtivos das bases elásticas de 1 e 2 Graus de Liberdade (GDL) para fixação dos corpos de prova e realização dos experimentos.

3.2.1 Base Elástica com 1 GDL para Canal Maior

De modo a limitar os graus de liberdade e permitir apenas a translação na direção transversal ao escoamento, a base elástica para 1 grau de liberdade (1GDL) possui uma altura total de 1500 mm e é composta por duas lâminas metálicas de 1500 mm de largura cada. O cilindro é fixado na extremidade livre entre as duas lâminas, permitindo movimento apenas na direção perpendicular à superfície das lâminas. Para determinar a frequência natural que permitisse estudar a faixa de lock-in, variou-se a altura do sistema e realizou-se a análise da frequência natural a partir do método de decaimento que será descrito na seção 3.6.1. A base elástica para 1GDL no canal maior pode ser vista na Figura 10.

Figura 10 – Base Elástica 1GDL para Canal Maior



Fonte: Autora (2024).

3.2.2 Base Elástica com 2 GDL para Canal de Maior

A base elástica que permite a oscilação nos graus de liberdade perpendicular e paralelo ao escoamento é composta por uma estrutura de alumínio, montada sobre a estrutura do canal. Esta base inclui uma haste de alumínio com 1500 mm de altura e 160 mm de diâmetro. O cilindro é fixado na extremidade livre da haste. A base elástica de 2GDL para o canal maior pode ser vista na Figura 11.

Figura 11 – Base Elástica 2GDL para Canal Maior



Fonte: Autora (2024).

3.2.3 Base Elástica com 2 GDL para Canal Menor

O suporte elástico utilizado no canal de baixo número de Reynolds para dois graus de liberdade é similar ao utilizado no canal maior. Sua estrutura, também feita de alumínio, possui uma altura de 2600 mm. Uma haste de 2 mm de diâmetro é fixada por um mandril no topo da estrutura. A altura total da haste é regulável, e o cilindro é fixado na extremidade da haste, da mesma forma que na base elástica do canal maior. A Figura 12 mostra a base elástica com dois graus de liberdade para o canal menor.

Figura 12 – Base Elástica 2GDL para Canal Menor



Fonte: Autora (2024).

3.3 CILINDROS RÍGIDOS

Um total de quatro cilindros rígidos foram utilizados para a execução dos ensaios. Canos comerciais de 20 mm, fabricados em Poliacrilato de Vinila (PVC), foram utilizados para a construção de dois pares de cilindros. Um par de cilindros possui 260 mm de comprimento total, resultando em uma razão $L/D = 13$, enquanto o outro par possui 780 mm de comprimento total, com uma razão $L/D = 39$. Para verificar o efeito da rugosidade superficial no fenômeno do VIV, um cilindro de cada comprimento foi revestido com areia classificada $N16 - 1$, 20 mm. A Figura 13 apresenta os corpos de prova confeccionados.

Figura 13 – Corpos de Prova Utilizados nos Experimentos



Fonte: Autora (2024).

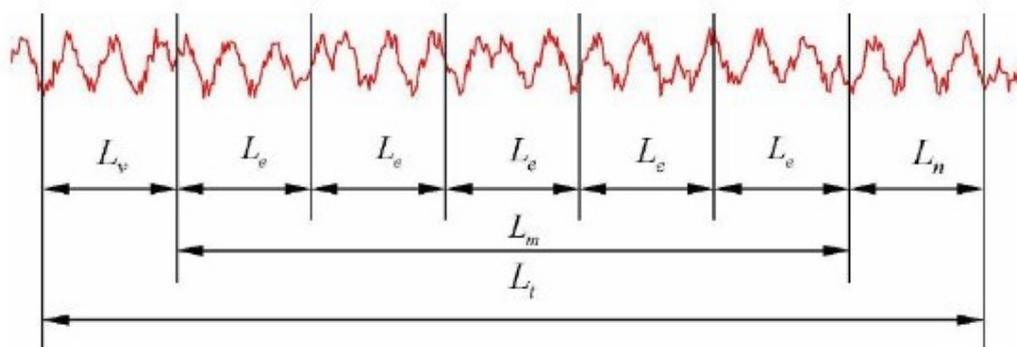
Por meio de uma colaboração com o Laboratório de Metrologia da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), foi possível estimar o nível de rugosidade dos corpos de prova revestidos com areia classificada N°16 utilizando um rugosímetro de bancada da marca Taylor Hobson, modelo Form TalySurf Series 2. Foram fabricados quatro corpos de prova auxiliares de polímero ácido poliláctico (PLA), cada um revestido com uma das seguintes areias classificadas: N°100-0,15 mm, N°50-0,30 mm, N°30-0,60 mm e N°16-1,20 mm, foi extrapolada por meio das Equações (2) e (3). Onde Ra representa a rugosidade superficial do cilindro.

$$Ra(0,60mm) = \frac{Ra(0,30mm)}{Ra(0,15mm)} \times Ra(0,30mm) \quad (2)$$

$$Ra(1,20mm) = \frac{Ra(0,60mm)}{Ra(0,30mm)} \times Ra(0,60mm) \quad (3)$$

A medição é realizada por meio de um apalpador que varre os picos e vales da superfície rugosa. A distância percorrida pelo apalpador deve ser igual à soma de 7 comprimentos de amostragem, como apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Comprimentos de Amostragem para Rugosímetro



Fonte: Novaski (1994).

No processo de medição de rugosidade, o percurso inicial (L_v) não é utilizado para a avaliação, pois ele serve para amortecer as oscilações mecânicas e elásticas iniciais do sistema de medição, além de centralizar o perfil de rugosidades até que o apalpador entre em regime permanente. Da mesma forma, o percurso final (L_n) também não é considerado na avaliação, pois inclui o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas finais do sistema de medição, juntamente com a desaceleração do próprio sistema.

Cada amostra foi submetida a 10 medições em trechos de comprimento L_t , espaçados por 1 mm, sendo realizadas 5 medições de Ra para cada intervalo do comprimento L_e . Os valores de L_m (comprimento médio de avaliação) e L_e (comprimento efetivo de avaliação) foram estabelecidos em 12,5 mm e 2,5 mm, respectivamente, conforme especificado na Norma ABNT NBR ISO 4288. Como o valor de Ra é uma média da rugosidade para 5 valores de Ra , o tratamento estatístico foi realizado com o cálculo de média aritmética simples e desvio padrão, assumindo que a variável aleatória contínua rugosidade é gaussiana, conforme a Equação (4). Onde Z é a área medida.

$$Ra = \frac{1}{l} \times \int_0^{Le} |Z(x)| dx \quad (4)$$

Dessa forma, a Tabela 2 apresenta as rugosidades e desvios padrão de cada cilindro auxiliar, sendo o valor da última linha o considerado para os corpos de prova rugosos utilizados nos ensaios.

Tabela 2 – Dimensionamento encontrados para cada cilindro

Condição Superficial	Média de Ra [μm]	Desvio Padrão de Ra [μm]
Colagem de areia - 0,15 mm	43,13	3,18
Colagem de areia - 0,30 mm	71,84	7,02
Colagem de areia - 0,60 mm	122,01	33,77
Colagem de areia - 1,20 mm	211,48	97,36

Vale ressaltar que a rugosidade estudada neste trabalho será da condição de colagem de areia - 1,20 mm, com valor de $Ra = 211,48 \mu\text{m}$, uma vez que será possível investigar o efeito da rugosidade de forma mais pronunciada se comparada ao cilindro com superfície lisa.

3.4 CONFIGURAÇÕES DOS ENSAIOS E ABORDAGEM ANALÍTICA

Foram consideradas combinações entre os cilindros, bases elásticas e razão de massas (m^*) como apresentado na Tabela 3 para a realização dos ensaios de decaimento e de vibração induzida por vórtices. Note que os cilindros rígidos avaliados

na base elástica do canal menor foram os de $L/D = 13$ devido à limitação do calado deste canal.

Tabela 3 – Configurações dos Casos de Análise

Caso	Cilindro	Suporte Elástico	Canal	Razão de Massa	L/D
1	Liso	1GDL	Maior	2,5	39
2	Liso	1GDL	Maior	4,0	39
3	Liso	2GDL	Maior	2,5	39
4	Liso	2GDL	Maior	4,0	39
5	Liso	2GDL	Maior	1,0	13
6	Liso	2GDL	Menor	1,0	13
7	Ra (211,48 μm)	1GDL	Maior	2,5	39
8	Ra (211,48 μm)	1GDL	Maior	4,0	39
9	Ra (211,48 μm)	2GDL	Maior	2,5	39
10	Ra (211,48 μm)	2GDL	Maior	4,0	39
11	Ra (211,48 μm)	2GDL	Maior	1,0	13
12	Ra (211,48 μm)	2GDL	Menor	1,0	13

A razão de massas é a razão entre a massa estrutural do cilindro e a massa de fluido deslocado, tal parâmetro foi controlado mantendo um comprimento submerso fixo, ou seja, uma massa de fluido deslocado fixa entre os ensaios de um mesmo cilindro e alterando a massa estrutural com esferas de aço inoxidável.

Todos os parâmetros principais dos experimentos, como comprimento das hastes e valores de massa estrutural, foram obtidos por meio da abordagem analítica para ocorrência de VIV. Para isso, foi considerada a Equação (5), onde V_r é a velocidade reduzida, U_x é a velocidade do escoamento em m/s , D é o diâmetro do cilindro em m e fn_y é a frequência natural de oscilação do cilindro na direção perpendicular ao escoamento. Além disso foi considerada a premissa de que o VIV ocorre para uma faixa de V_r entre 4 e 12.

$$V_r = \frac{U_x}{fn_y D} \quad (5)$$

Selecionando o diâmetro dos corpos e os intervalos de velocidade do escoamento para a realização dos ensaios com base na faixa de velocidades que cada canal consegue operar, a única variável se tornou a frequência natural fn_y . Assim, os valores de frequência natural analítica dos corpos para ocorrência de VIV em cada canal foram calculados e serão apresentados juntamente das frequências naturais obtida nos ensaios de decaimento. Partindo do fato que os aparatos experimentais são caracterizados por corpos esbeltos, flexíveis e com uma massa concentrada na extremidade, seus comportamentos dinâmicos podem ser considerados pendulares e a frequência natural de oscilação para cada caso pode ser estimada pela Equação (6),

$$f_n = \sqrt{\frac{m_c g}{l(m_f + m_c)}} \quad (6)$$

onde f_n é a frequência natural de oscilação em rad/s, m_c é a massa do cilindro l , é o comprimento da haste, g é a aceleração da gravidade e m_f é a massa deslocada. Pela Equação (6), é possível obter combinações de comprimento de haste, massa estrutural e massa de fluido deslocado para a ocorrência de VIV na faixa de lock-in. Considerando os aspectos construtivos dos aparatos, foi possível manter fixos os valores de comprimento submerso, e, portanto, a massa de fluido deslocado para cada tipo de cilindro, bem como manter fixos os valores de comprimento de haste para cada base elástica. Dessa forma, a única variável a ser ajustada para cada caso foi a massa estrutural. A Tabela 4 apresenta os comprimentos submerso e as massas estruturais utilizadas para o ensaio de cada um dos 12 casos.

Tabela 4 – Valores das massas estruturais para os casos investigados

Caso	Cilindro	Suporte elástico	Canal	Razão de massa	Massa estrutural (kg)
1	Liso	1GDL	Maior	2,5	0,55
2	Liso	1GDL	Maior	4,0	0,86
3	Liso	2GDL	Maior	2,5	0,30
4	Liso	2GDL	Maior	4,0	0,61
5	Liso	2GDL	Maior	1,0	0,10
6	Liso	2GDL	Menor	1,0	0,10
7	Ra (211,48 μm)	1GDL	Maior	2,5	0,55
8	Ra (211,48 μm)	1GDL	Maior	4,0	0,86
9	Ra (211,48 μm)	2GDL	Maior	2,5	0,30
10	Ra (211,48 μm)	2GDL	Maior	4,0	0,61
11	Ra (211,48 μm)	2GDL	Maior	1,0	0,10
12	Ra (211,48 μm)	2GDL	Menor	1,0	0,10

3.5 INSTRUMENTAÇÃO

Durante a execução dos testes experimentais os dados foram coletados por meio de rastreamento óptico com instrumentações da linha OptiTrack, com o auxílio de três câmeras do modelo Prime 17W na Figura 15, em conjunto com o software Motive. Durante os testes foram utilizadas três câmeras, onde duas eram responsáveis por capturar os movimentos e uma tinha a função de gravar o ensaio em vídeo.

Figura 15 – Câmera Prime 17W



Fonte: NaturalPoint, Inc. (2024).

Durante os testes, três alvos refletivos não coplanares foram posicionados de forma a constituir um cilindro rígido, permitindo que o sistema de rastreamento interpretasse o conjunto como tal. Essa configuração possibilitou o acompanhamento ao longo do tempo dos seis graus de liberdade do cilindro, com foco nas translações longitudinais e transversais. O foco das análises são as translações longitudinais e transversais, porém são registrados todos os graus de liberdade para verificação posterior caso houvesse alguma anormalidade nos sinais coletados. A Figura 16 mostra um dos corpos de prova com os alvos refletivos devidamente posicionados para a realização de um ensaio.

Figura 16 – Alvos posicionados para ensaio no cilindro no CAC Menor



Fonte: Autora (2024).

3.6 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

Esta seção irá detalhar as metodologias utilizadas nas investigações experimentais realizadas ao longo do desenvolvimento do trabalho, além de detalhar aos métodos de análises.

3.6.1 Ensaio de decaimento

De modo a caracterizar as frequências naturais de oscilação, foram realizados ensaios de decaimento para cada uma das configurações que definem os 12 casos apresentados na Seção 3.4. O ensaio de decaimento também permite mensurar o amortecimento estrutural do sistema. Os ensaios foram realizados nos graus de liberdade inflow (direção X) quanto cross-flow (direção Y) na água a uma taxa de aquisição de 100 Hz para o rastreamento óptico e tempo de registro de 2 minutos por ensaio.

O teste de decaimento consiste na aplicação de um deslocamento inicial na Altura Metacêntrica (GM) ou ponto mais próximo, o GM, pois minimiza o efeito de acoplamento em deslocamento. Para tal, foram efetuados os devidos cálculos de posicionamento do centro e massa dos corpos de modo a manter o GM na mesma altura para todos os corpos de prova. Assim, nos ensaios, efetuou-se a excitação inicial do movimento o mais próximo do GM dos corpos que encontrava-se submerso, apresentando dificuldade para excitação apropriada no ponto do modelo que é, então, liberado para executar uma oscilação livre até seu amortecimento total. É imprescindível a ausência de forçantes hidrodinâmicas e aerodinâmicas externas agindo sobre o modelo, de tal forma que sua resposta tenha origem apenas na sua condição dinâmica natural.

Os valores de frequência natural encontrados a partir do ensaio de decaimento e os amortecimentos foram analisados pela Transformada Rápida de Fourier ou *Fast Fourier Transform* (FFT), os valores encontrados de frequência natural e amortecimentos serão apresentados e discutidos na seção 4.1.

3.6.2 Ensaio de vibrações induzidas por vórtices

Posterior aos testes de decaimento, foram realizados os testes de vibração induzida por vórtices para as 12 configurações anteriormente apresentadas variando-se a velocidade de modo a cobrir toda a faixa de velocidades reduzidas onde foi prevista a ocorrência do VIV. A Tabela 5 apresenta todos os valores de velocidades considerados nos ensaios, bem como o respectivo número de Reynolds.

O monitoramento do ensaio de VIV permite encontrar a trajetória do cilindro, amplitude característica em X e em Y , e frequências transversal e longitudinal de oscilação do sistema. Os testes tiveram todos duração de 2 minutos de gravação,

sendo realizadas três repetições por velocidade para cada caso realizado no canal menor, enquanto no canal maior foi realizada apenas uma repetição por velocidade devido à superior quantidade de velocidades e casos a serem avaliados, compondo, assim, uma matriz de ensaios com 102 ensaios no canal menor e 270 ensaios no canal maior.

Com os registros temporais de cada grau de liberdade, foram realizadas análises via FFT nos sinais para obtenção das amplitudes características e frequência de oscilação do sistema. Para a obtenção dos valores foram consideradas as 10% maiores amplitudes em cada sinal. Os valores de amplitude foram adimensionalizados pelo diâmetro dos corpos e plotados em função da velocidade reduzida e número de Reynolds para caso, caracterizando as conhecidas como curvas de VIV, e comparadas entre si.

Tabela 5 – Velocidades do fluido utilizadas durante os ensaios para baixo e alto número de Reynolds

Canal Menor		Canal Maior	
Velocidade (m/s)	N° de Reynolds	Velocidade (m/s)	N° de Reynolds
0,006	141,8	0,041	921,5
0,007	151,9	0,053	11833,
0,008	177,2	0,065	1445,1
0,009	207,4	0,076	1706,9
0,011	250,2	0,088	1968,7
0,013	283,5	0,100	2230,5
0,014	315,0	0,111	2492,3
0,016	347,2	0,123	2754,1
0,017	386,6	0,135	3015,9
0,018	405,0	0,146	3277,7
0,019	436,2	0,158	3539,5
0,020	447,6	0,170	3801,3
0,021	472,5	0,182	4063,1
0,025	567,0	0,205	4586,7
0,028	630,0	0,217	4848,5
0,030	680,4	0,228	5110,3
0,036	810,0	0,240	5372,1
		0,252	5633,9
		0,263	5895,7
		0,275	6157,5
		0,287	6419,3
		0,298	6681,1
		0,310	6942,8
		0,322	7204,7
		0,334	7466,4
		0,345	7728,2
		0,357	7990,0

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresentará os resultados obtidos para diferentes níveis de rugosidade em três bases elásticas, considerando três valores de razão de massa discutidos na seção anterior. A comparação dos resultados focará nas amplitudes e nas frequências características inline e cross-low, com o objetivo de caracterizar o efeito das mudanças de graus de liberdades e de suportes elásticos na resposta de amplitude do sistema.

4.1 FREQUÊNCIAS NATURAIS E FATORES DE AMORTECIMENTO PELO ENSAIO DE DECAIMENTO

A frequência natural dos corpos de prova foi determinada a partir de ensaios de decaimento, utilizando o método da Transformada Rápida de Fourier. Este método também permitiu a caracterização do fator de amortecimento. A Tabela 6 apresentará os valores encontrados para cada cilindro de prova.

Tabela 6 – Valores obtidos para frequências naturais e fatores de amortecimento

Caso	Cilindro	Suporte elástico	Canal	Razão de massa	L/D	$f_{nx}[Hz]$	$\zeta_x[\%]$	$f_{ny}[Hz]$	$\zeta_y[\%]$
1	Liso	1GDL	Maior	2,5	39	-	-	0,79	3,5
2	Liso	1GDL	Maior	4,0	39	-	-	0,75	3,2
3	Liso	2GDL	Maior	2,5	39	0,54	3,0	0,54	3,1
4	Liso	2GDL	Maior	4,0	39	0,48	3,1	0,48	3,1
5	Liso	2GDL	Maior	1,0	13	1,24	3,6	4,24	3,6
6	Liso	2GDL	Menor	1,0	13	0,10	3,8	0,11	3,9
7	Ra (211,48 μm)	1GDL	Maior	2,5	39	-	-	0,76	3,2
8	Ra (211,48 μm)	1GDL	Maior	4,0	39	-	-	0,71	4,1
9	Ra (211,48 μm)	2GDL	Maior	2,5	39	0,52	3,2	0,52	3,1
10	Ra (211,48 μm)	2GDL	Maior	4,0	39	0,46	3,0	0,46	3,4
11	Ra (211,48 μm)	2GDL	Maior	1,0	13	1,09	4,5	1,09	4,6
12	Ra (211,48 μm)	2GDL	Menor	1,0	13	0,09	5,1	0,09	5,1

Nota-se que a diferença na frequência para os aparatos com 2GDL está principalmente ligada a dois fatores, sendo o primeiro a mudança do suporte elástico devido a alteração do comprimento e do diâmetro da haste, e o segundo a variação do comprimento submerso, diretamente relacionado com os diferentes valores de massa de fluido deslocada. Já para o 1GDL os valores são diferentes, se comparado com 2GDL, pois há restrição de movimento e aumento do amortecimento devido à configuração das lâminas do suporte elástico.

Dos valores obtidos, o cilindro liso com 2 GDL e $m^* = 1,0$ no canal maior é o que registra a maior frequência, sendo igual nas duas direções x e y . Isso ocorre porque este é o cilindro de menor massa e possui uma haste com comprimento menor e maior diâmetro. Os maiores amortecimentos aparecem para o cilindro rugoso com 2

GDL e $m^* = 1,0$ no canal maior.

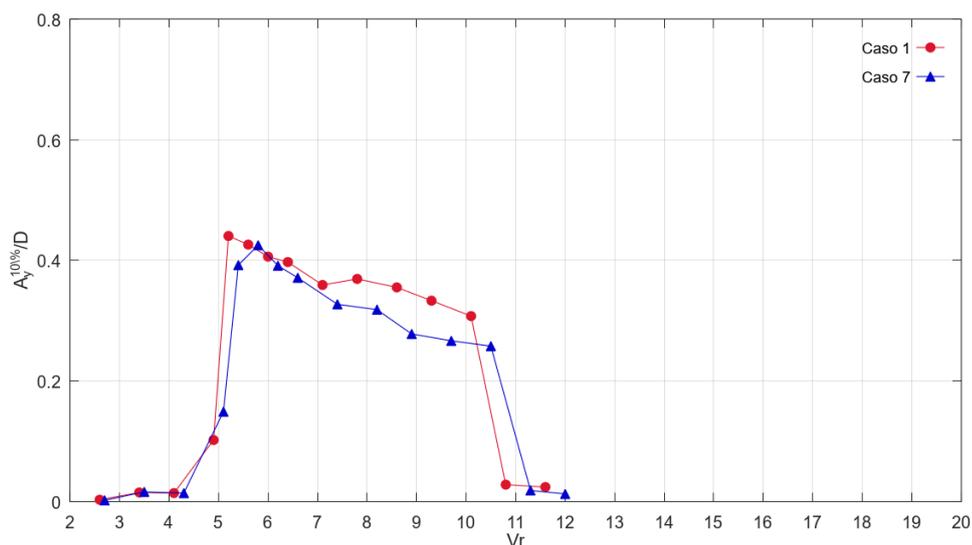
4.2 ENSAIOS DE VIBRAÇÃO INDUZIDA POR VÓRTICES

4.2.1 Amplitudes Adimensionais

Os ensaios de VIV realizados para 1GDL no canal maior, referente ao caso 1, sendo este o cilindro de provas liso, e o caso 7, cilindro rugoso, com $m^* = 2,5$ apresentaram a curva de VIV para amplitudes transversais adimensionais similar a literatura, com o upper branch e lower branch definidos. A amplitude de pico foi de 0,42 Hz, para o $Vr \approx 5,0$ para o cilindro liso. A amplitude do cilindro rugoso, apresentou um valor inferior, sendo ele 0,42 Hz, para o $Vr \approx 5,5$. A caracterização do deslocamento para a direita da curva do caso 7 está vinculado ao fator deste deter menor frequência, resultando em valores maiores de velocidade reduzida. Para valores de velocidade reduzida maiores que 11 a amplitude ficou próxima de zero, conforme mostra a Figura 17.

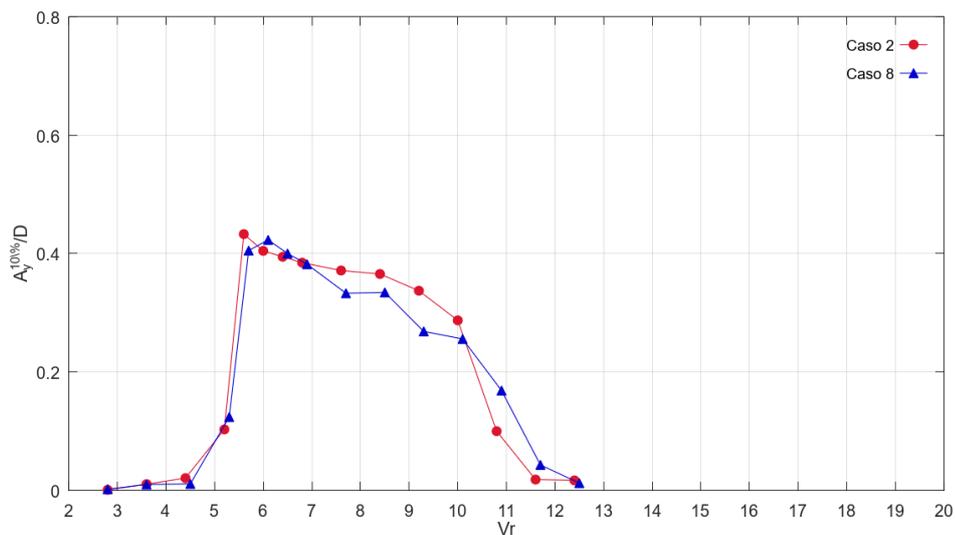
Já para os testes realizados com $m^* = 4,0$ para 1GDL, a característica da curva se assemelha ao ensaio para $m^* = 2,5$, como observado na Figura 18, o efeito do aumento da razão de massa desloca a curva para direita, influenciado pela redução de frequência natural do sistema para massas maiores.

Figura 17 – Amplitudes Adimensionais Transversais para base elástica com 1GDL $m^* = 2,5$ no canal maior



Fonte: Autora (2024).

Figura 18 – Amplitudes Transversais para base elástica com 1GDL $m^* = 4,0$ no canal maior

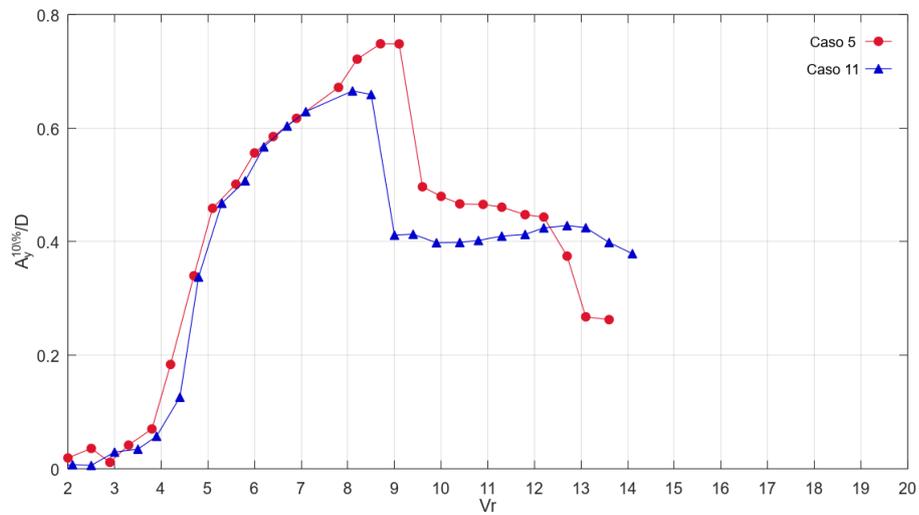


Fonte: Autora (2024).

A Figura 19 mostram curvas de VIV que mais se assemelham a curvas de VIV encontradas na literatura, com um *initial branch* e *upper branch* bem caracterizados, e a existência de um *lower branch* com amplitudes não tanto menores que as amplitudes de pico, porém com dois ramos de queda de amplitude. A influência do valor de m^* se mostrou como um leve deslocamento de em torno de 0,5 unidades da velocidade reduzida em que ocorre o pico das amplitudes, com o pico de amplitude para a cilindro liso, para um $Vr \approx 10$ e para o rugoso, com $Vr \approx 8,5$. Para o caso 11 não houve a segunda queda do lower branch.

Além disto, para este caso, o cilindro rugoso apresentou o pico em um Vr anterior ao cilindro liso. Acredita-se que possivelmente essa diferença tenha sido originada pela influência do fundo, uma vez quanto mais próxima a ponta esteja do fundo, menor devem ser os efeitos devidos da emissão 3D partindo da extremidade livre dos cilindros. Alinhado a isto, as maiores amplitudes são resultado da presença de um grau de liberdade a mais, o longitudinal. Isso, mais a distância do fundo permite uma emissão tridimensional na extremidade livre, pode estar provocando as maiores amplitudes de VIV.

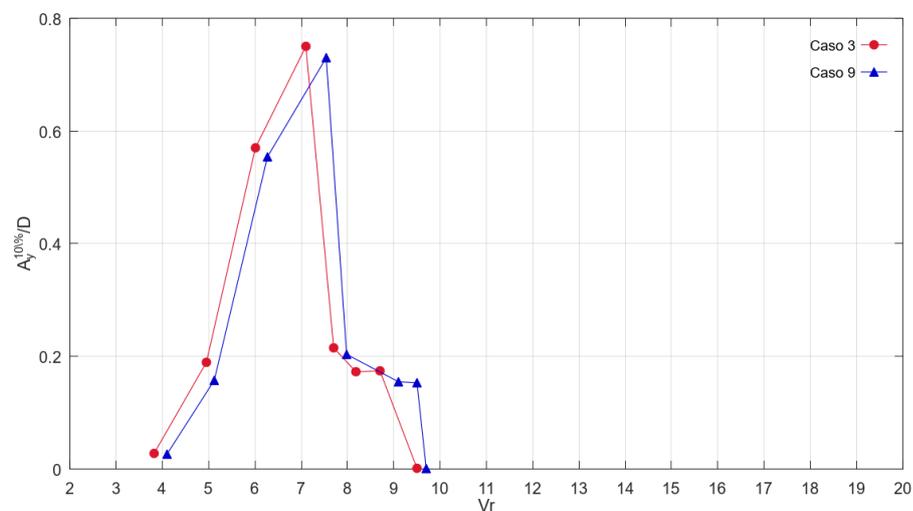
Figura 19 – Amplitudes Transversais para base elástica com 2GDL $m^* = 1,0$ no canal maior



Fonte: Autora (2024).

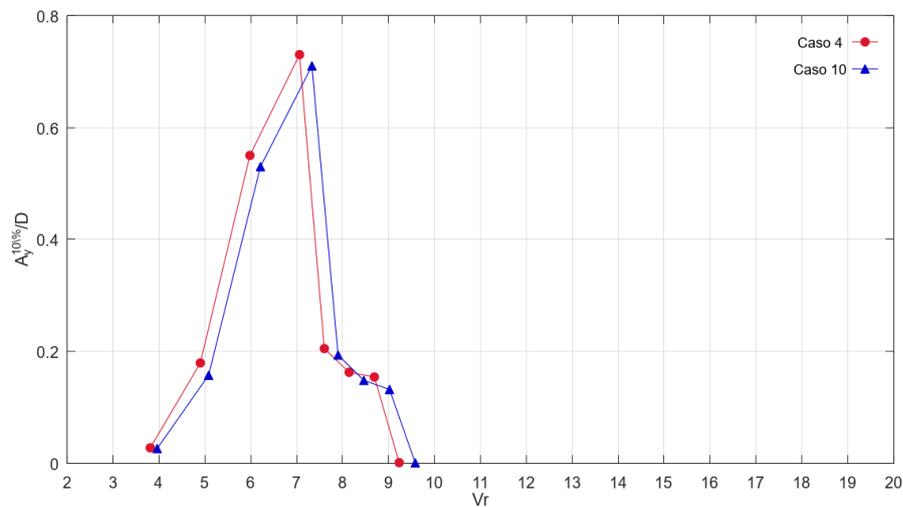
Observando as Figuras 20 e 21, para os casos em que o $L/D = 39$, tanto para o $m^* = 2,5$ tanto para o $m^* = 4,0$, as amplitudes de pico ocorreram para um V_r menor. Além disto, durante os ensaios observou-se que para V_r maiores que 10 o fenômeno de VIV manteve regular. Este fator ocorreu, tanto para o caso 3, quanto para o 9. Novamente as amplitudes para o cilindro liso apresentou valores maiores que para o rugoso. Este fator está também vinculado à distribuição de pressão ao longo do comprimento, uma vez que a implementação da rugosidade na superfície modifica a emissão de vórtices ao redor do corpo.

Figura 20 – Amplitudes Transversais para base elástica com 2GDL $m^* = 2,5$ no canal maior



Fonte: Autora (2024).

Figura 21 – Amplitudes Transversais para base elástica com $2GDL\ m^* = 4,0$ no canal maior

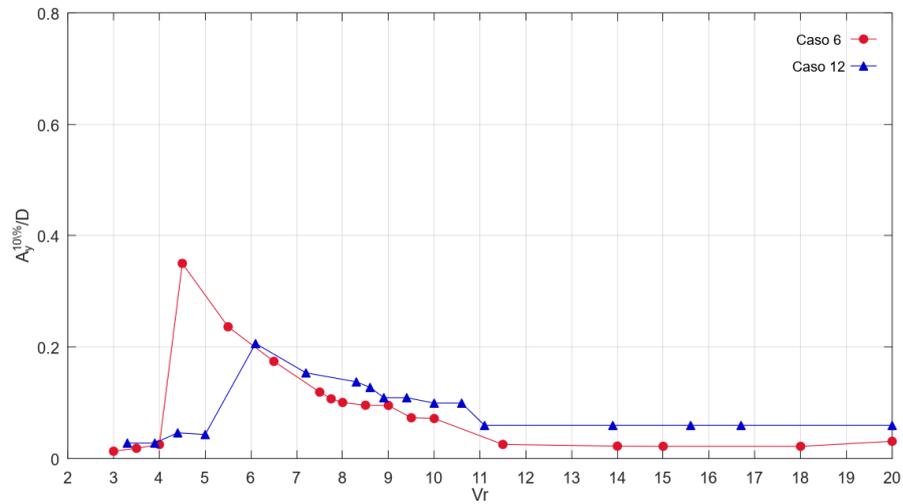


Fonte: Autora (2024).

A partir da Figura 22, que mostra as amplitudes transversais no canal menor para os casos ensaiados, podemos observar um impacto significativo da rugosidade no comportamento da curva de VIV. Nota-se que o pico das amplitudes foi deslocado para a direita, ocorrendo em $V_r = 6$ para o cilindro rugoso em comparação a $V_r = 4,5$ para o cilindro liso. Além disso, a amplitude máxima para o cilindro rugoso foi consideravelmente menor, apresentando uma redução de $\approx 50\%$ em relação ao cilindro liso.

Por outro lado, o *lower branch* não é bem caracterizado, além disto é possível observar que para este branch, que as amplitudes são maiores para o caso 12, cilindro rugoso. Nota-se que para os ensaios realizados no suporte elástico de $2GDL$ no canal maior, percebeu-se uma influência muito menor da rugosidade do que para o canal menor e isso pode ser devido à influência do fundo na emissão de vórtices de fundo na extremidade livre do cilindro.

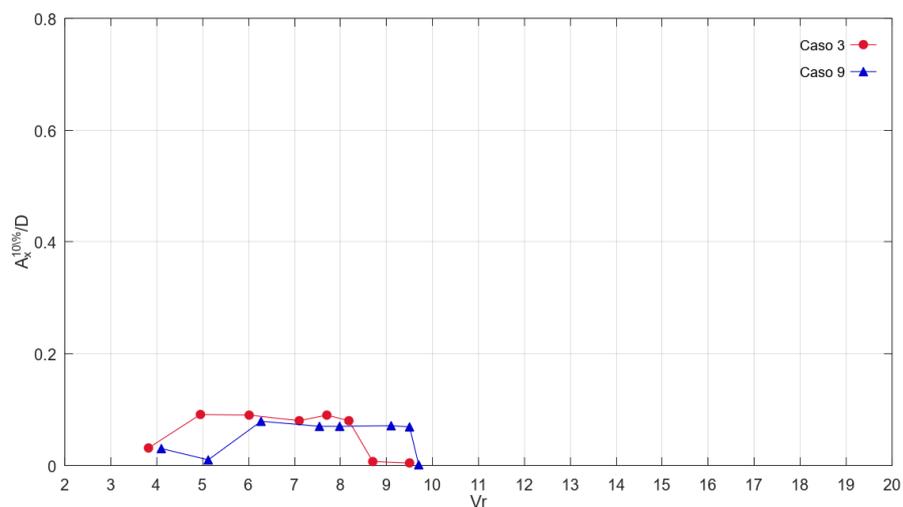
Figura 22 – Amplitudes Transversais para base elástica com 2GDL $m^* = 1,0$ no canal menor



Fonte: Autora (2024).

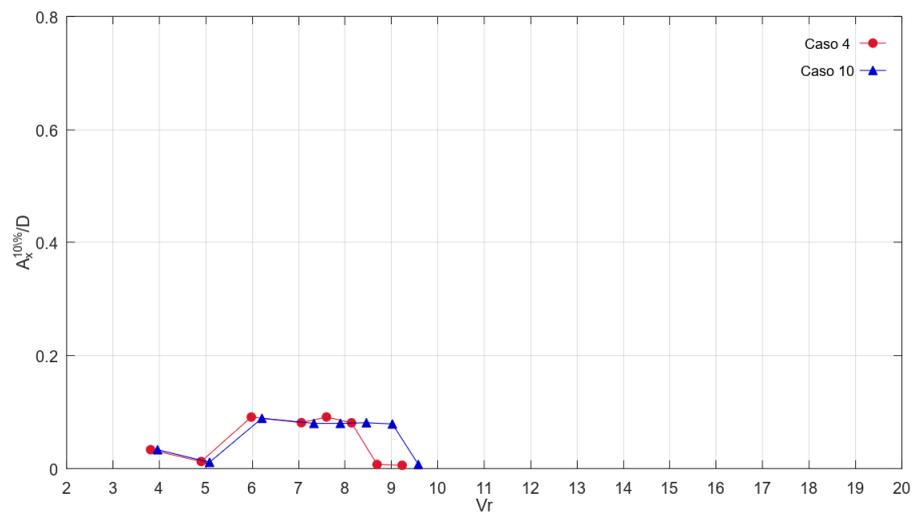
Assim como o esperado, os valores de amplitudes longitudinais apresentaram valores menores que os de amplitudes transversais. Onde o comportamento se manteve similar entre os casos com $m^* = 2,5$ e $4,0$, conforme mostram as Figuras 23 e 24. No entanto, para os casos com $m^* = 1$, os ensaios com o cilindro rugoso registraram amplitude longitudinal maior, conforme mostram as Figuras 25 e 26, porém nesta ordem de grandeza tão baixa, é difícil dizer qual é o efeito da rugosidade.

Figura 23 – Amplitudes longitudinais para base elástica com 2GDL e $m^* = 2,5$ no canal maior



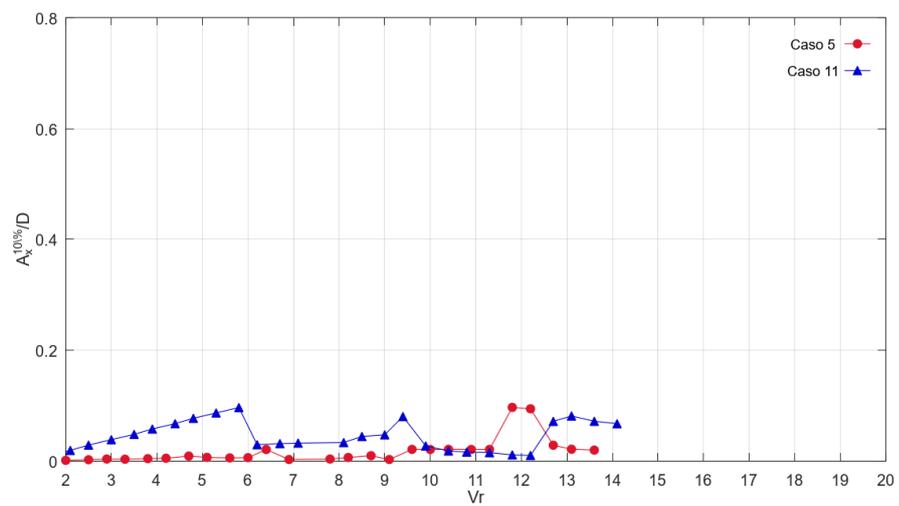
Fonte: Autora (2024).

Figura 24 – Amplitudes longitudinais para base elástica com 2GDL e $m^* = 4,0$ no canal maior



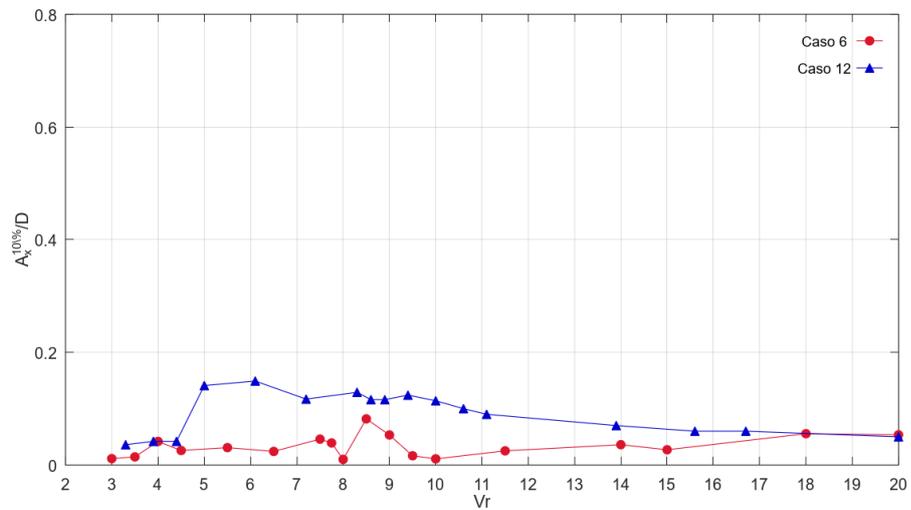
Fonte: Autora (2024).

Figura 25 – Amplitudes longitudinais para base elástica com 2GDL e $m^* = 1,0$ no canal maior



Fonte: Autora (2024).

Figura 26 – Amplitudes longitudinais para base elástica com 2GDL e $m^* = 1,0$ no canal menor

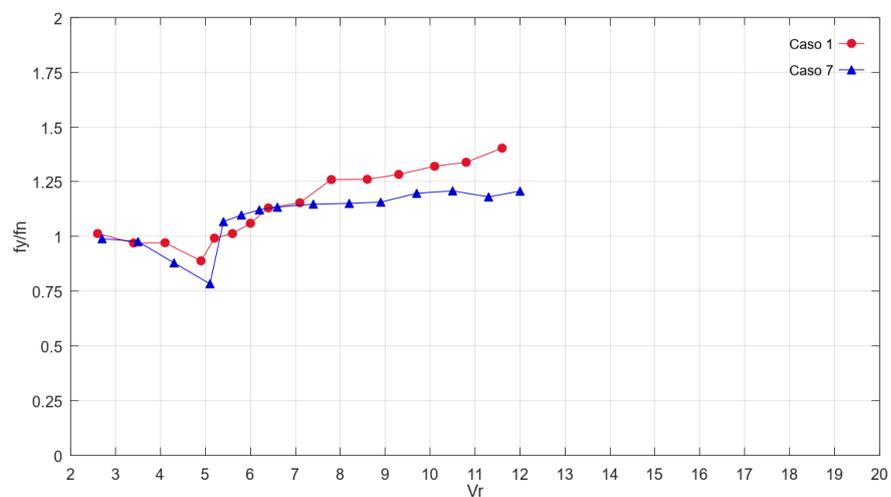


Fonte: Autora (2024).

4.2.2 Razões entre as Frequências Características

Os valores de frequências características transversais, foram adimensionalizados tomando como referência a frequência natural na direção transversal ao escoamento, ou seja, $f_n = f_{ny}$. Para tal, os valores para 1GDL, $m^* = 2,5$ apresentaram uma queda para o $Vr \approx 5$ tanto para os corpos rugosos quanto para os lisos, onde é possível observar que para entre o $Vr \approx 5,0$ e $Vr \approx 7$ as frequências do cilindro foram maiores, logo após inverteu novamente a dinâmica do sistema, onde o liso apresentou valores maiores, conforme apresentado na Figura 27.

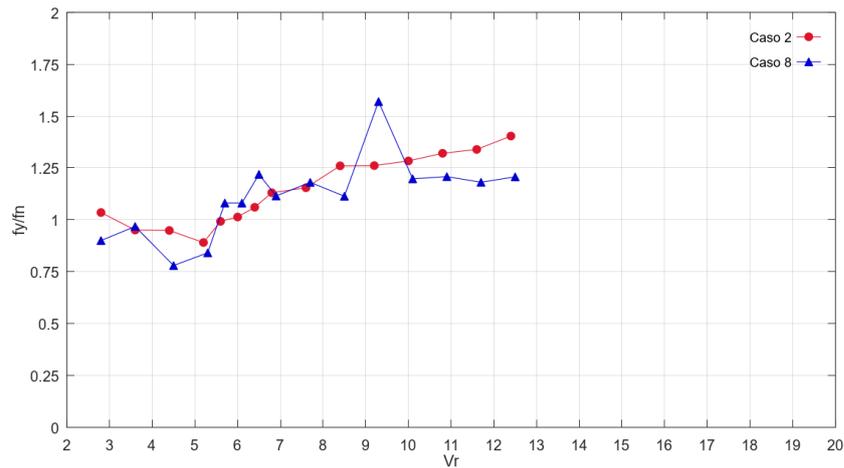
Figura 27 – Frequências características transversais para base elástica com 1GDL e $m^* = 2,5$ no canal maior



Fonte: Autora (2024).

Para os ensaios para a base com 1GDL, mas para $m^* = 4,0$, as frequências transversais, para o cilindro rugoso, cresceram até o $V_r \approx 10$ e posteriormente apresentaram queda, já para o liso, a frequência não diminuiu sua intensidade, conforme mostra a Figura 28.

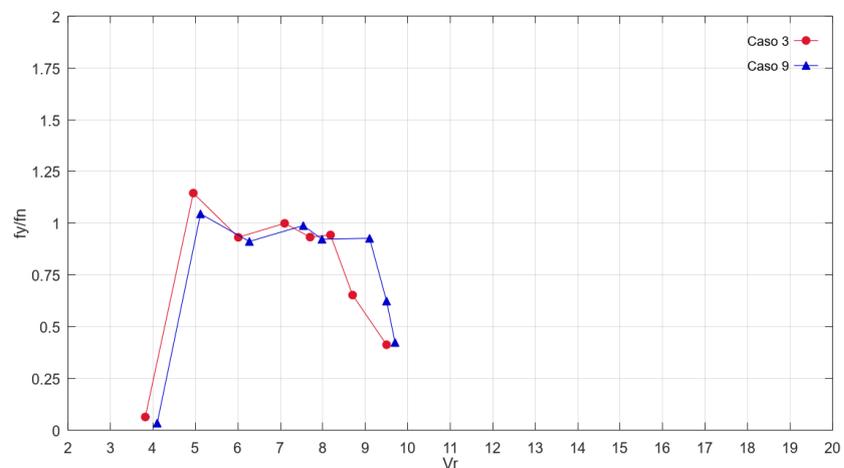
Figura 28 – Frequências características transversais para base elástica com 1GDL e $m^* = 4,0$ no canal maior



Fonte: Autora (2024).

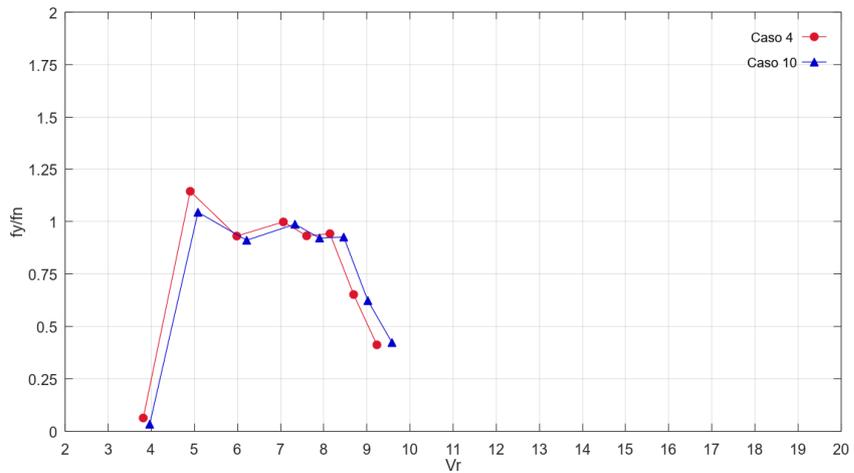
Os valores de frequência transversal para 2GDL no canal maior, apresentam uma curva mais característica ao fenômeno de VIV, apresentando um pico, e posteriormente a queda após os valores de pico. Os valores de pico foram maiores para o cilindro liso para todos os m^* , conforme mostram as Figuras 29, 30 e 31.

Figura 29 – Frequências características transversais para base elástica com 2GDL e $m^* = 2,5$ no canal maior



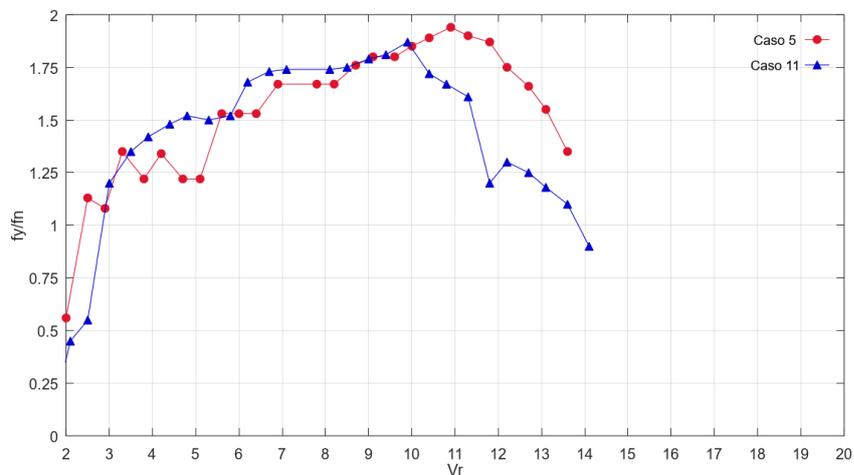
Fonte: Autora (2024).

Figura 30 – Frequências características transversais para base elástica com 2GDL e $m^* = 4,0$ no canal maior



Fonte: Autora (2024).

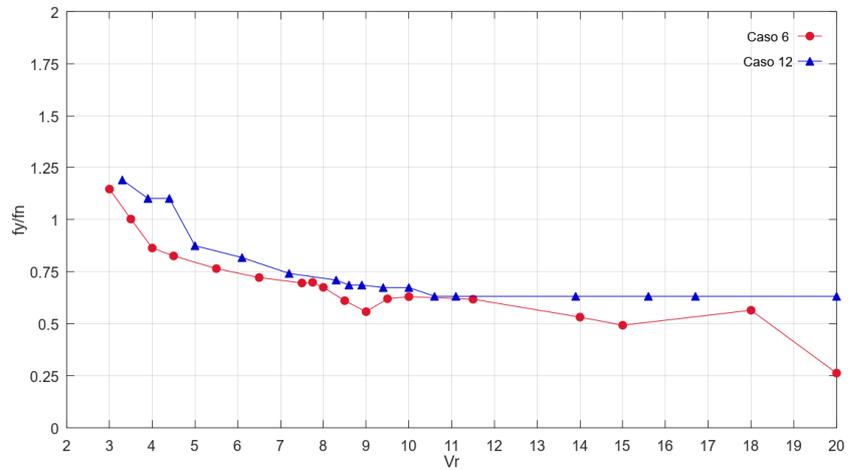
Figura 31 – Frequências características transversais para base elástica com 2GDL e $m^* = 1,0$ no canal maior



Fonte: Autora (2024).

Já para as frequências transversais, para o 2GDL no canal menor, a resposta do sistema se assemelhou aos obtidos para 1GDL, acredita-se que este fator esteja alinhado com o tamanho do comprimento da haste, que por ser longa, assemelha o comportamento dinâmico pendular. A Figura 32, demonstra as frequências transversais para este caso.

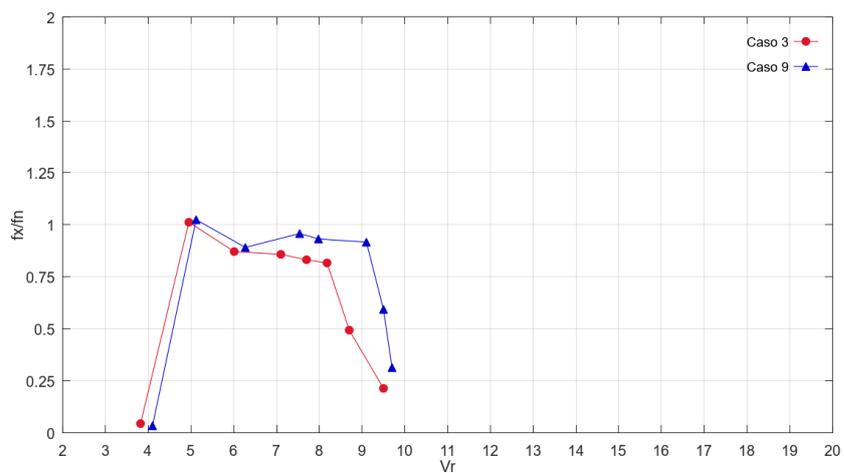
Figura 32 – Frequências características transversais para base elástica com 2GDL e $m^* = 1,0$ no canal menor



Fonte: Autora (2024).

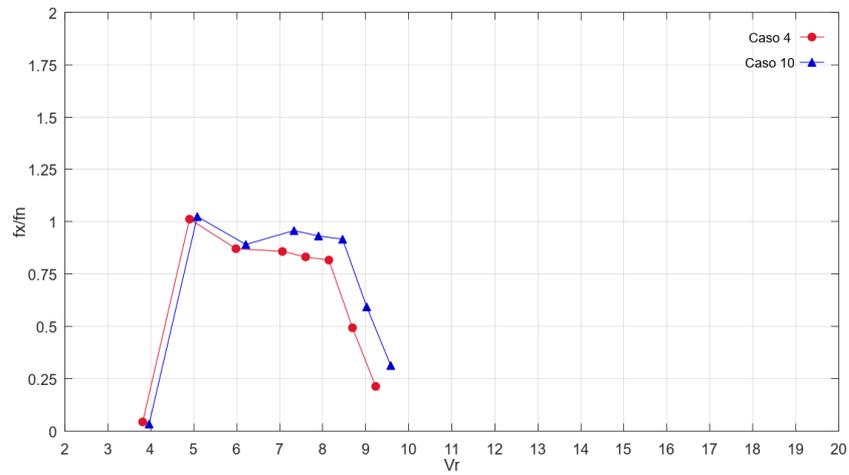
As frequências longitudinais dos casos mostraram comportamento semelhante as amplitudes transversais, porém com ordem de grandeza menor. Para os ensaios realizados no canal maior, novamente, a curva apresentou valores de crescimento, até o pico no *upper branch*, e posteriormente apresenta um *lower branch* bem definido conforme mostram as Figuras 33, 34, 35. Porém, para o 2GDL no CAC menor, os dois corpos não obtiveram semelhança na curva característica, onde é possível observar este fator na Figura 36.

Figura 33 – Frequências características longitudinais para base elástica com 2GDL e $m^* = 2,5$ no canal maior



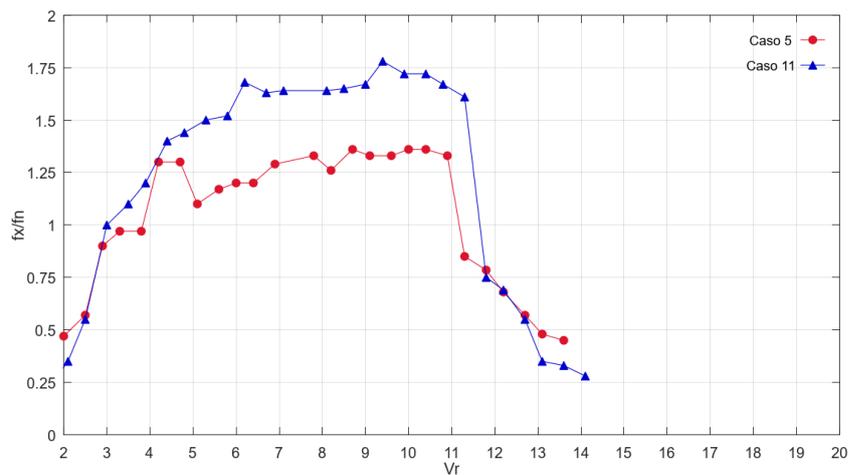
Fonte: Autora (2024).

Figura 34 – Frequências características longitudinais para base elástica com 2GDL e $m^* = 4,0$ no canal maior



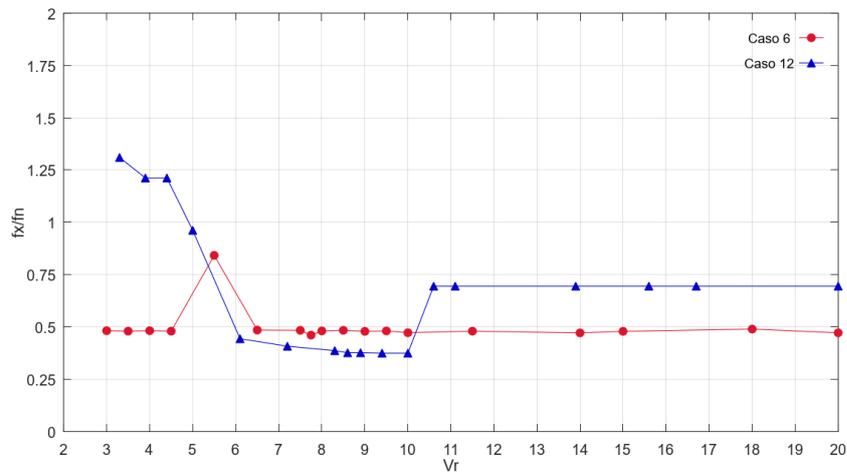
Fonte: Autora (2024).

Figura 35 – Frequências características longitudinais para base elástica com 2GDL e $m^* = 1,0$ no canal maior



Fonte: Autora (2024).

Figura 36 – Frequências características longitudinais para base elástica com 2GDL e $m^* = 1,0$ no canal menor



Fonte: Autora (2024).

4.2.3 Comparação Entre os Resultados de Amplitudes para Diferentes Bases Elásticas

A comparação das respostas de amplitude transversal entre bases elásticas foi analisada em seis casos diferentes, com variações nos graus de liberdade e nas razões de massa. Observa-se que, para os cilindros lisos, o caso 3, com o maior comprimento submerso, 2 graus de liberdade (2GDL) e uma razão de massa $m^* = 2,5$, apresentou o maior valor de pico. No caso 4, com 2GDL e $m^* = 4,0$, os valores de amplitude foram um pouco inferiores e a curva deslocou-se para a direita. Esse efeito está alinhado ao aumento da razão de massa, que diminui a frequência e, conseqüentemente, aumenta a velocidade reduzida. Além disso, nesses dois casos, após $Vr = 11$, o fenômeno de VIV cessou, diminuindo drasticamente as amplitudes transversais, que se aproximaram de zero.

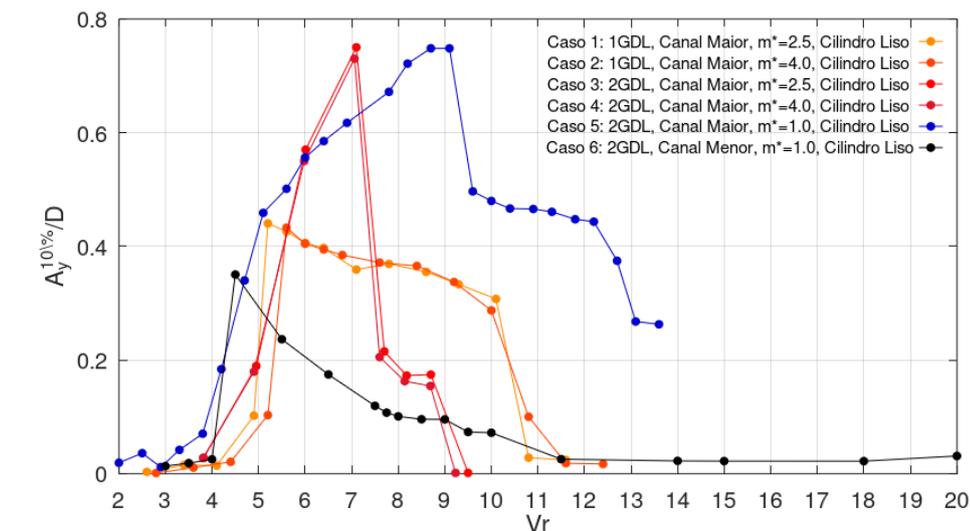
Exceto pelas velocidades reduzidas, o caso 5 apresenta a curva característica de VIV mais próxima da curva apresentada na literatura, com os ramos superior (*upper branch*) e inferior (*lower branch*) bem definidos e caracterizados. Os valores de amplitude no caso 5 são próximos aos encontrados nos casos 3 e 4, mas menores e mais deslocados para a direita devido ao seu $L/D = 13$, o que faz com que a faixa de sincronização ocorra em velocidades reduzidas maiores.

Além disso, como esperado, as frequências para a base elástica com 1 grau de liberdade (1GDL) foram menores em comparação com os valores obtidos para 2 graus de liberdade (2GDL). Em ambos os ensaios nesta base, as curvas deslocaram-se para a esquerda em relação aos casos citados anteriormente. A curva característica de VIV, *upper branch* e *lower branch* semelhantes aos trechos descritos na literatura, ou seja,

amplitudes decrescem com o aumento da velocidade reduzidas, mantendo-se bem definidos.

O caso 6 apresenta menores valores de amplitude transversal em comparação com as outras bases. Acredita-se que isso esteja relacionado ao grande comprimento da haste, que faz com que o sistema se assemelhe a uma dinâmica pendular, além de apresentar uma frequência muito baixa. Outro fator distintivo deste caso é que a distância da extremidade livre do canal de circulação (CAC) pode ser desconsiderada, pois estava a apenas 2 mm. Em contraste, no CAC maior, havia uma maior distância entre o cilindro e o fundo do canal, que resulta em uma formação de vórtices maior, que podem influenciar a dinâmica do sistema e, conseqüentemente, a resposta das amplitudes, aumentando a interação fluido-estrutura. A Figura 37 a seguir relaciona as discussões acima acerca das bases elásticas e amplitudes significativas

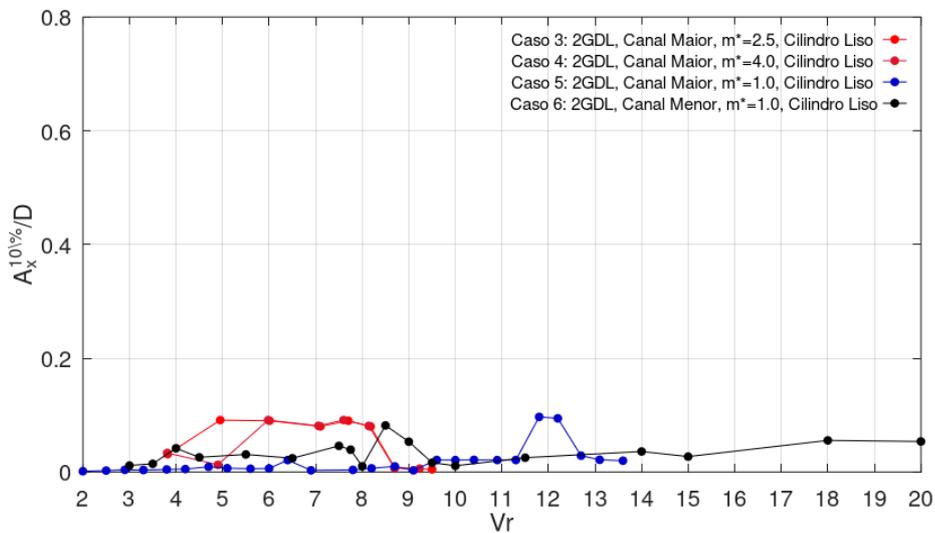
Figura 37 – Comparação dos valores de amplitudes transversais para diferentes bases elásticas - Liso



Fonte: Autora (2024).

As amplitudes longitudinais foram menores em comparação com as transversais, conforme esperado. Além disso, os valores foram mais uniformes entre as diferentes bases elásticas. Para 1 grau de liberdade (1GDL), não há amplitudes na direção longitudinal ao escoamento. O caso com o maior valor de amplitude longitudinal foi o caso 5, cujo pico também se deslocou para a direita, similarmente às amplitudes transversais, conforme mostra Figura 38.

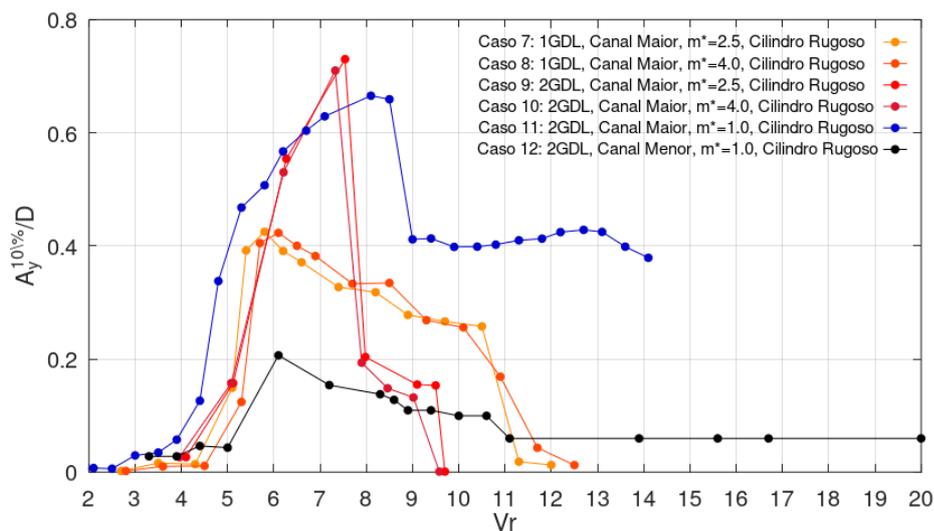
Figura 38 – Comparação dos valores de amplitudes longitudinais para diferentes bases elásticas - Liso



Fonte: Autora (2024).

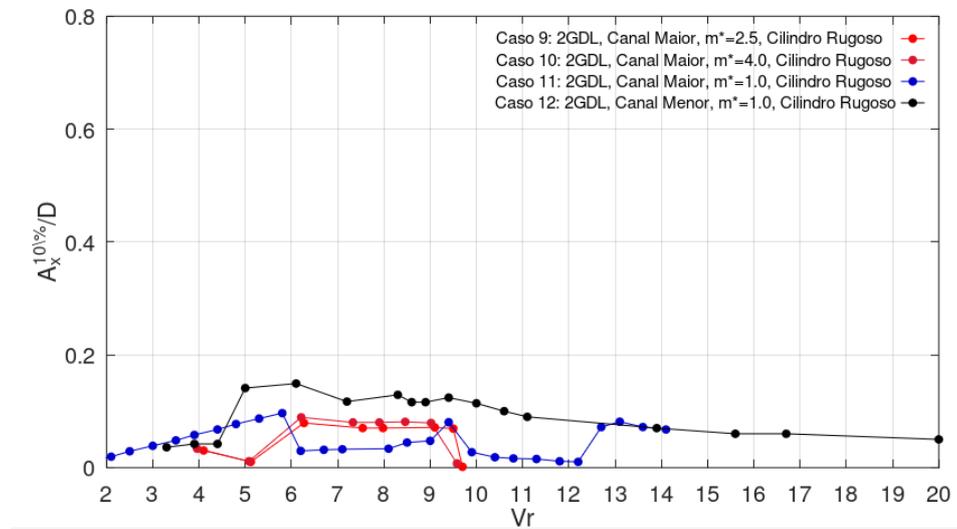
De forma semelhante, as amplitudes transversais do sistema para os cilindros rugosos apresentaram o mesmo formato que os cilindros lisos ao comparar as diferentes bases. A principal diferença está nos valores de pico, já que a rugosidade faz com que a curva apresente valores menores em comparação aos corpos lisos, embora mantenha o mesmo formato característico, assim como mostram as Figuras 39 e 40.

Figura 39 – Comparação dos valores de amplitudes transversais para diferentes bases elásticas - Rugoso



Fonte: Autora (2024).

Figura 40 – Comparação dos valores de amplitudes longitudinais para diferentes bases elásticas - Rugoso

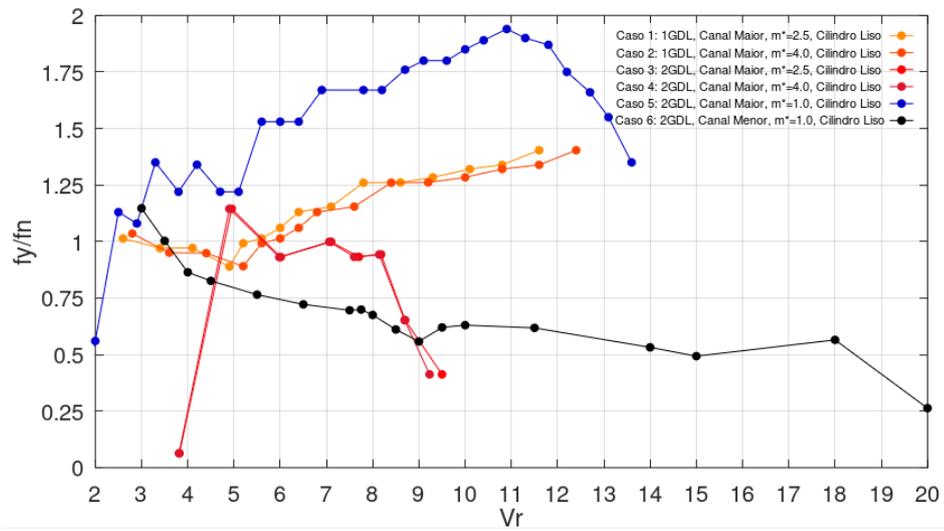


Fonte: Autora (2024).

4.2.4 Comparação Entre os Resultados de Frequências Características para Diferentes Bases Elásticas

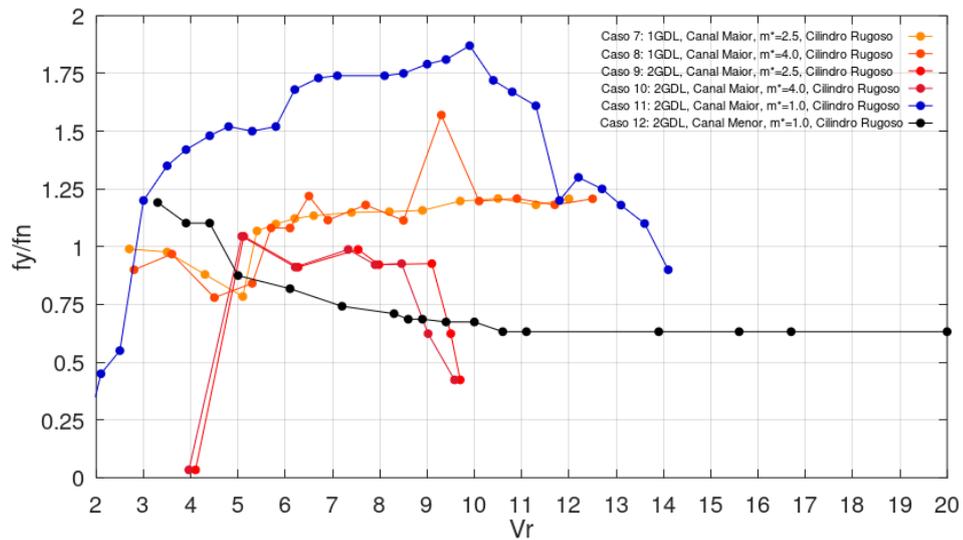
Ao comparar os valores das frequências características, observou-se que para os dois níveis de rugosidade houve semelhança de resultado, onde há um aumento das frequências tanto nas direções transversais quanto nas horizontais, para os dois até atingir uma certa faixa de velocidade reduzida, após os valores diminuem para sistemas com 2GDL. No entanto, para a base com 1GDL, o comportamento da frequência característica não apresentou uma ramificação inferior. Para a base com 2GDL com menor CAC, a frequência também exibiu essa característica. Acredita-se, porém, que o ponto de pico já tenha ocorrido para valores de V_R menores demonstrado apenas as quedas de valores para as frequências, conforme mostram as Figuras 41, 44, 43 e 42.

Figura 41 – Comparação dos valores de frequências transversais para diferentes bases elásticas - Liso



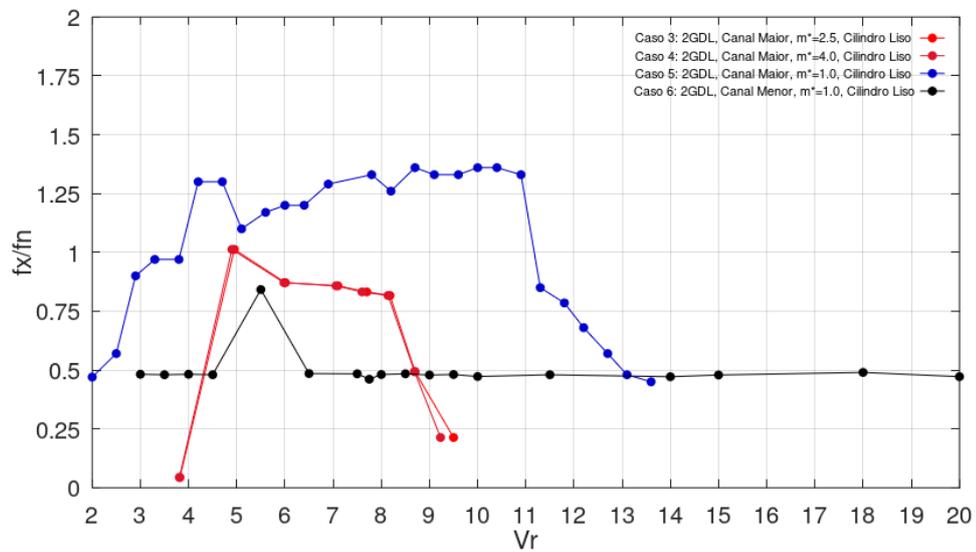
Fonte: Autora (2024).

Figura 42 – Comparação dos valores de frequências transversais para diferentes bases elásticas - Liso



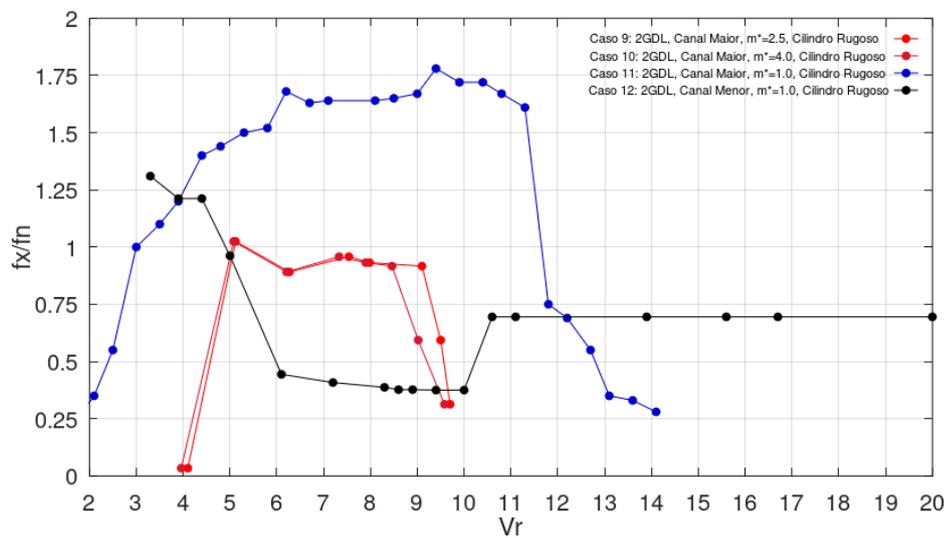
Fonte: Autora (2024).

Figura 43 – Comparação dos valores de frequências longitudinais para diferentes bases elásticas - Liso



Fonte: Autora (2024).

Figura 44 – Comparação dos valores de frequências longitudinais para diferentes bases elásticas - Liso



Fonte: Autora (2024).

5 CONCLUSÕES

Os ensaios realizados neste trabalho comparam diferentes bases elásticas para sistemas com 1 grau de liberdade (1GDL) e dois com 2 graus de liberdade (2GDL), com razões de massa de 1,0, 2,5 e 4,0, e razões de aspecto de 13 e 39, com o objetivo de investigar a influência dos suportes elásticos e da rugosidade nas amplitudes significativas e nas frequências características dos sistemas para dois níveis de rugosidade.

Os resultados mostram que a implementação de rugosidade superficial nos cilindro, para as três bases elásticas, resultou na diminuição das amplitudes transversais e longitudinais ao escoamento. Acredita-se que isto ocorra pois a rugosidade superficial interfere no padrão de formação e desprendimento dos vórtices ao redor do cilindro, emitindo forças oscilatórias menos regulares e menos potentes, levando redução nas forças de arrasto e de sustentação oscilantes, que são responsáveis pelas vibrações. Em contrapartida, um corpo liso tende a ter um desprendimento de vórtices mais regular e simétrico, resultando em vibrações com maiores amplitudes.

Além disto, nota-se que as amplitudes maiores para a base elástica com 2GDL se comparada a sistemas de 1GDL no fenômeno de VIV pode ser atribuída que para sistemas 2GDL, o cilindro pode se mover em duas direções (transversal e longitudinal), resultando no acoplamento de vibrações. Este acoplamento de modos pode resultar em um aumento da amplitude de vibração em uma ou ambas as direções.

Alinhado a isto, para sistemas com 2GDL, a interação fluido-estrutura entre os vórtices desprendidos e o movimento do corpo é mais complexa. O movimento em duas direções pode alterar a maneira como os vórtices são gerados e desprendidos, possivelmente levando a uma maior força resultante e, portanto, maiores amplitudes de vibração. O sistema de 1GDL, restringe o cilindro para vibrar em uma direção, o que limita a magnitude das forças oscilatórias que podem ser geradas.

Observa-se, então, que , $L/D = 13$, para a base com 2GDL, os valores de amplitudes transversais e horizontais foram maiores, alcançando para o $V_r \approx 10$, e para o casos 2 e 3, com razão de massa. Além disto, este caso obteve a curva característica do VIV encontrada da literatura e citados na seção 2.4, com *upper branch* e *lower branch* bem definidos. Comparando a mesma base de 2GDL para ambos os valores de L/D , percebe-se que, para os cilindros com maior razão de aspecto, o fenômeno e a faixa de sincronização ocorrem em faixas de velocidades reduzidas menores, ou seja, a amplitude de pico ocorre em velocidades menores do escoamento.

Tanto para cilindro liso e quanto para o cilindro rugoso, o fenômeno de VIV, foi mais pronunciado, para os casos 3 e 5, ambos são compostos por ensaios realizados

com 2GDL, o que diferencia-os são as razões de massa e de aspecto, porém os valores de amplitude de pico para estes casos foram $\approx 0,8D$, porém com a curva deslocada para direita para o caso 5, $m^* = 1,0$. Além disto, para os $m^* = 2,5$ e $m^* = 4,0$, a curva obteve uma quantidade de pontos menores. Sabe-se que a razão de aspecto influencia na formação e emissão vórtice, pois modifica a força de arrasto do sistema afetando a estabilidade das vibrações induzidas.

No que diz respeito as frequências características, observa-se que a rugosidade superficial influencia a dinâmica do sistema, uma vez que a rugosidade pode induzir a antecipação da transição da camada limite de laminar para turbulenta. Uma camada limite turbulenta tende a adiar a separação do fluxo, alterando o comportamento da formação dos vórtices de várias maneiras, incluindo a alteração dos pontos de separação do fluxo.

Para a base com 2GDL no CAC menor, a curva apresentou menores valores de amplitude, obtendo a amplitude de pico de $\approx 0,4D$ para o $Vr \approx 4,5$. Sabe-se que ao se comparar os dois suportes elásticos com 2GDL, implica na variação da razão de massa entre os pares, ou seja, ao comparar o mesmo nível de rugosidade para cada base e variando apenas o m^* , resultou no deslocamento da curva para a direita conforme há o aumento da razão de massa. Esse fator está alinhado, que o aumento da razão de massa, resulta em uma frequência natural menor, resultando em uma maior velocidade reduzida.

Adicionalmente, acredita-se que, os resultados dos ensaios no canal menor terem fornecido um comportamento de curva diferente esteja vinculado ao maior comprimento da haste para o CAC menor que implica que o sistema tenda à um comportamento pendular, combinado ao fato de que a distância do fundo até a extremidade do cilindro é inferior do que para os ensaios realizados no CAC maior, podendo a emissão de vórtices de fundo ter interferido nos resultados para os casos 6 e 12.

Para 1GDL, como o cilindro está restrito a vibrar predominantemente na direção transversal ao fluxo, que pode limitar a amplitude total das vibrações, diminuindo a amplitude de pico. A partir dos casos 1 e 2, é possível observar que a magnitude das amplitudes de pico, em comparação às para 2GDL, diminuíram $\approx 40\%$, com a amplitude máxima de 0,4, além disto o pico ocorreu para um $Vr \approx 5,0$.

Vale completar que o fato do número de Reynolds entre o CAC menor e o CAC maior serem complementares, mostra que há o aumento de resposta conforme aumenta o número de Reynolds para a mesma base, aumento o valor de amplitude transversal e longitudinal se comparando as bases.

Portanto, para estudos futuros, propõe-se a realização de ensaios no canal maior com plataformas para a redução do fundo efetivo, a verificar a influência da profundidade em um mesmo canal, de forma a explorar com mais profundidade os

aspectos de diferença identificadas neste trabalho. Além disso, seria interessante realizar futuros estudos de comparação numérica de modo a obter uma forma de avaliar os fenômenos com custo operacional reduzido.

REFERÊNCIAS

ACHENBACH, E.; HEINECK, E. On vortex shedding from smooth and rough cylinders in the range of reynolds numbers $6 \cdot 10^3 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6$. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 11, p. 239–251, 1981.

AMORIM, T. O. **Plataformas offshore uma breve análise desde a construção ao descomissionamento**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Engenharia Naval) — Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2010.

BEARMAN, P. W. Vortex shedding from oscillating bluff bodies. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 16, p. 195–222, 1984.

BERNITSAS, M.; RAGHAVAN, K. Reduction and suppression of viv of circular cylinders through roughness distribution at $8 \times 10^3 < re < 1.5 \times 10^5$. In: **Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. Lisbon: [s.n.], 2008.

BICO, V. M. P. **Amarração de plataformas offshore flutuantes com cabos de poliéster**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013.

BLEVINS, R.; COUGHRAN, C. ,experimental investigation of vortex-induced vibration in one and two dimensions with variable mass, damping, andreynolds number,. ,**Journal of Fluid Enginnering**, v. 48, p. 131–141, 2009.

BLEVINS, R. D. **The effect of surface roughness on the flow past circular cylinders at high Reynolds numbers**. 2nd edition. ed. Malabar, Florida: Krieger Publishing, 2001.

BLEVINS, R. D. **Flow-induced vibration**. 2. ed. Flórida: Krieger Publishing Company, 2001.

BORGES, T. A. **Simulação numérica de escoamento ao redor de um cilindro com dois graus de liberdade: um estudo do fenômeno da vibração induzida por vórtices**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia Mecânica FEMEC, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

CONCEIÇÃO, P. D. S. **Numerical simulation of two-degree-of-freedom vortex induced vibration in a circular cylinder with OpenFOAM**. 2016. Masters Thesis in Mechanical Engineering — Faculty of Sciences and Technology, NOVA University of Lisbon, Lisboa, 2016.

CORDOVÉS, D. L. C. S. **Análise de confiabilidade estrutural de cabos umbilicais**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

FINN, L. D.; MAHER, H. The cell spar and vortex induced vibrations. *In: Proceedings of the 2003 offshore technology conference held in houston*. Houston, Texas, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/239817866_The_Cell_Spar_and_Vortex_Induced_Vibrations. Acesso em: 11 jun. 2023.

FREIRE, C.; MENEHINI, J. Um estudo experimental sobre vibrações induzidas por vórtices com dois graus de liberdade. **Caderno de Graduação das Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 1, 2009.

GERRARD, J. H. The mechanics of the formation region of vortex behind bluff bodies. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 25, p. 401–413, 1966.

HANNES, N. H. **Aperfeiçoamento de um modelo analítico para predição da fadiga devido ao fenômeno de vibração induzida por vórtices em linhas oceânica**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Naval) — Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

HOVER, F.; TVEDT, H.; TRIANTAFYLLOU, M. , journal of fluid mechanics 4. **Journal of Fluids and Structures**, v. 48, p. 175–195, 2001.

KHALAK, A.; WILLIAMSON, C. Fluid forces and dynamics of a hydroelastic structure with very low mass and damping. **Journal of Fluids and Structure**, v. 11, p. 973–982, 1997.

KURIAN, V. J.; LIEW, M.; NG, C. Dynamic responses of truss spar due to wave actions. **Research journal of applied sciences, engineering and technology**, v. 1, p. 882–818, 2013.

LACERDA, T. A. G. **Análise de sistema de ancoragem de plataformas flutuantes**. 2005. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) — Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

LEÃO, A. P.; SARDINHA, C. C. Análise dos sistemas de risers utilizados na produção de óleo em sistemas submarinos. **Caderno de Graduação das Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 2, p. 23–36, 2014.

MARTINS, D. S. **Regimes de formação de vórtices em um cilindro circular que oscila Forçadamente com até Dois Graus de Liberdade**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajuba, 2017.

MEDEIROS, D. F.; MENEHINI, J. **Estudo experimental da atenuação do fenômeno de VIV**. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MERCIER, R. S. et al. A hub class spar production platform for the deepwater northern north sea. *In: Proceedings of the 11th DEEP OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE AND EXIBITION*. Stravanger, Norway, 1999. Disponível em: <https://www.vivsolutions.com/publications/>. Acesso em: 17 maio. 2023.

MUNDIM, J. P. P. **Estudo experimental do escoamento ao redor de cilindros de base quadrada com diferentes razões de aspecto montados sobre uma superfície.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2019.

NAKAMURA, Y.; TOMONARI, Y. The effect of surface roughness on the flow past circular cylinders at high reynolds numbers. **J Fluid Mech**, v. 123, p. 363–378, 1982.

Novaski, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica.** 1. ed. São Paulo: Edgard Clucher, 1994.

OKAJIMA, A. et al. Some experiments on flow-induced vibration of a circular cylinder with surface roughness. **Journal of Fluids and Structures**, v. 13, p. 853–864, 1999.

OKAJIMA, A. T.; NAGAMORI, F. Some experiments on flow-induced vibration of a circular cylinder with surface roughness. **Journal of Fluids and Structures**, v. 13, p. 853–864, 1999.

SILVA, V. R. M. **Análise global de riser rígido vertical tracionado no topo para águas ultra-profundas.** 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) — Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SINSABVARODOM, C.; WIDJAJA, J. H. The innovative hybrid cell-truss spar buoy platform for moderate water depth. **Journal of Fluids and Structures**, v. 113, p. 90–100, 2014.

SOUZA, L. A. L.; VAZ, M. A.; ESTEFEN, F. S. Rigidez à flexão de cabos umbilicais submarino. *In: Proceedings of the 15th CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA - COBEM.* São Paulo, Brazil, 1999. Disponível em: <https://abcm.org.br/anais/cobem/1999/pdf/AACAIE.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2023.

SOUZA, R. N. **Modelagem e análise de uma turbina eólica offshore do tipo Spar Buoy.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SUMER, B. M.; FREDSOEN, J. **Hydrodynamics around cylindrical structures.** 26. ed. Nova Iorque: World Scientific, 2006.

VIEIRA, P. D. **Estudo experimental das vibrações induzidas por vórtices em cilindros flexíveis inclinados em relação à correnteza.** 2017. Tese (Doutorado em Ciências) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

VIOLETTE, R. D.; LANGRE, E.; SZYDLOWSKI, J. Computation of vortex-induced vibrations of long structures using a wake oscillator model: Comparison with dns and experiments. **Computers & Structures**, v. 85, p. 1134–1141, 2014.