MARIA EDUARDA FELIPPE CHAME

**Investigação experimental do fenômeno de vibrações
induzidas por vórtices em cilindros flexíveis próximos
à uma placa plana**

São Paulo
2019

MARIA EDUARDA FELIPPE CHAME

**Investigação experimental do fenômeno de vibrações
induzidas por vórtices em cilindros flexíveis próximos
à uma placa plana**

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

São Paulo
2019

MARIA EDUARDA FELIPPE CHAME

**Investigação experimental do fenômeno de vibrações
induzidas por vórtices em cilindros flexíveis próximos
à uma placa plana**

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

Área de Concentração:

Engenharia Naval e Oceânica

Orientador:

Prof. Dr. André Luís Condino Fugarra

São Paulo
2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

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

São Paulo, 16 de abril de 2019

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

Catálogo-na-publicação

Chame, Maria Eduarda

Investigação experimental do fenômeno de vibrações induzidas por vórtices em cilindros flexíveis próximos à uma placa plana / M. E. Chame -- versão corr. -- São Paulo, 2019.

104 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1.Vórtices dos fluidos 2.Experimentação e experimentos 3.Vibrações induzidas por vórtices 4.Dutos flexíveis I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II.t.

Dedicatória

Aos meus irmãos, Maria Antônia e Olavo, por serem fonte inesgotável de afeto e conforto. Aos meus pais, Evandro e Cláudia, por sempre instigarem minha criatividade e por me ensinarem a nunca desistir de um sonho. Ao meu amado noivo, Pedro, pois sem você nenhuma conquista seria completa.

AGRADECIMENTOS

Sou extremamente grata a Deus, não só por permitir que eu vivesse todos os meus planos, mas por tudo aquilo que tenho, muito além do que um dia sonhei.

Ao meu pai, por sempre me acolher e receber com tanto amor que não sou capaz de expressar aqui. Aproveito para demonstrar todo meu orgulho por sua profissão, produtor rural, essencial à vida da maioria dos pesquisadores. Tenho certeza que sem o café essa pesquisa seria apenas um rascunho em uma folha qualquer. Minha mãe que sempre me mostra que não há problema que possa abafar nossa alegria, sua resiliência às barreiras da vida é louvável. Minha vó por trazer sempre um sorriso no rosto, independente de qualquer adversidade que venha a passar. Não tenho palavras para descrever à gratidão de ter dois irmãos tão especiais, que sempre estão aptos a me encher de amor e afago. Vocês são meu refúgio!

Às minhas perduráveis e verdadeiras amizades, que iniciaram na infância (ABCD) e que a distância parece não afetar a afinidade e carinho que temos umas pelas outras. Aos presentes que os anos de Universidade me deram, meus sinceros amigos, Evelyne, Fabiano, Flávia, Pedro Bundy e Rodrigo Michels. À todos os amigos que fiz durante o mestrado, em especial aos do MARIN, vocês fizeram meus dias na Holanda ainda mais coloridos. Não posso me esquecer da minha amiga portuguesa, Inês Pereira, por todo vasto vocabulário ensinado e a ajuda na revisão deste texto, sua ajuda foi GIRA.

Àquele que não posso vislumbrar minha vida sem, meu noivo e melhor amigo, Pedro. Dividimos a vida e, com toda a certeza, a conclusão desta etapa é uma vitória conjunta. Obrigada por simplesmente estar ao meu lado quando preciso. Agradeço também sua grande família, por me receberem de forma tão acolhedora. Sem esquecer das longas e alegres noites de conversas

A trajetória da pesquisa nunca foi almejada por mim, pouco sabia o que era ser uma cientista. Por isso sou extremamente grata com todos aqueles que me mostraram esse caminho, em especial meu estimado colega e grande amigo, Dr. Rodolfo Trentin Gonçalves, por guiar minha vida acadêmica e abrir tantas portas. Agradeço por seu entusiasmo sem tamanho, sua facilidade em dividir o que sabe e infinita paciência comigo. Ao meu orientador, Professor André Fuarra, por toda compreensão, confiança, apoio e orientação durante o programa de mestrado. A entrega para a ciência é tanta, que nossa vida acaba por se delinear pelos caminhos que nossa pesquisa nos leva, o que inclui os singulares países que tive a oportunidade de morar e conhecer, os colegas, dos quais muitos se tornaram grandes amigos, que conheci ao longo dos anos, os Professores que depositam suas vidas em ensinar e repassar suas experiências e os servidores que garantem o bom funcionamento da academia. Sou grata por todas as oportunidades que o programa de mestrado do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica me proporcionou.

À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, por fornecer subsídio financeiro que possibilitasse minha total dedicação ao presente trabalho. Ao pessoal do TPN e IPT, em especial ao Professor Kazuo Nishimoto por me acolher em seu laboratório e ceder a infraestrutura necessária para concretização desta dissertação. Por fim, gostaria de agradecer todos àqueles que bravamente lutam pela ciência brasileira.

“Don’t let anyone rob you of your imagination, your creativity, or your curiosity. It’s your place in the world; it’s your life. Go on and do all you can with it, and make it the life you want to live”

-- Mae Jemison

RESUMO

O fenômeno de vibrações induzidas pelo escoamento em *pipelines* e dutos próximos ao leito oceânico é de grande importância para a Engenharia Naval e Oceânica. O caso prático do vão livre de duto pode ser considerado um assunto ainda pouco discutido. A presente dissertação encontra motivação na compreensão do fenômeno fluidodinâmico através da abordagem experimental.

O sistema físico estudado inclui um longo cilindro, de baixa razão de massa (m^*) e de natureza flexível ($L/D = 131, 45$), disposto próximo à uma placa plana. O comportamento assimétrico do escoamento ao redor de um corpo que se encontra próximo à uma placa plana não é governado apenas pelo número de Reynolds, sendo a distância adimensional, e/D , entre o cilindro e a placa de grande impacto no fenômeno. O objetivo principal desta dissertação é caracterizar o comportamento dinâmico de cilindros flexíveis horizontais na presença de uma placa plana sob os efeitos do fenômeno da vibração induzida por vórtices, bem como a interferência na distância entre as duas estruturas na resposta dinâmica do cilindro. A revisão bibliográfica foi pautada na compreensão do problema e no fornecimento de subsídios teóricos para realização do experimento e posterior análise dos dados.

O efeito da proximidade da placa foi analisado para quatro diferentes arranjos, $e/D = 0, 0.5, 1.0$ e 2.0 e variadas condições de escoamento foram testadas, todas contidas no regime sub-crítico ($10^3 < R_e < 10^4$). Adicionalmente, a condição do cilindro isolado, ou seja sem a presença da placa, foi investigada. Obteve-se o deslocamento do cilindro, no tempo e espaço, possibilitando grande diversidade na demonstração dos resultados, destaca-se a análise no domínio da frequência e do tempo e a recuperação da trajetória em todos os instantes ao longo do comprimento do cilindro.

Os resultados apresentados evidenciam uma magnitude de oscilação maior para as condições em que o cilindro está distante ou isolado da placa. Para todas as condições a natureza flexível do modelo pode ser identificada e discutida pela análise no domínio da frequência e da trajetória descrita pelo cilindro. Na maior parte dos casos, a amplitude transversal cresceu de maneira pronunciada a partir de $V_R > 3.50$ e alcançou amplitudes nominais da ordem de $0.8D$. A resposta na direção horizontal apresentou uma dependência linear com a velocidade do escoamento, atingindo valores próximos a $0.65D$. Tal magnitude releva a importância do movimento na direção *in-line*, diferente dos clássicos casos de VIV, onde a amplitude em X é de pouca significância.

Palavras-Chave – Vibração Induzida por Vórtices, cilindro próximo à uma placa plana, cilindro flexível, dois graus de liberdade, vão livre de duto.

ABSTRACT

The present work aims at improving the understanding of flow induced vibrations on pipelines near the seabed triggered by the current. The present work aims at improving the understanding of flow induced vibrations on pipelines near the seabed triggered by the current, it is of great importance for Naval and Oceanic Engineering.

The physical system includes a long cylinder, with low mass ratio (m^*) and flexible ($L/D = 131, 45$), near a flat plate. When a cylindrical body is laying close to a flat plate, the asymmetric flow behavior around it is no longer solely dominated by the Reynolds number, but the adimensional distance e/D , between the cylinder and the flat plate, play an important role in the phenomenon. The main objective of the research conducted is to characterize the behavior of flexible horizontal cylinders under the effect of vortex induced vibrations, highlighting the influence of the distance between the two structures in the cylinder dynamic response. The experimental data was collected in a towing tank with a model scaled for $e/D = 0, 0.5, 1.0, 2.0$ and $\gg 2.0$ and Reynolds number ranging from 10^3 to 10^4 . The cylinder's response is presented in terms of its amplitude and frequency.

The results shown a high magnitude of oscillation for the conditions in which the cylinder is distant or isolated from the plate. For all conditions the flexible behavior was identified and discussed through the analysis in the frequency domain and the trajectory described by the cylinder. In most cases, the transverse amplitude grew steeply from $V_R > 3.50$ and reached nominal amplitudes of the order of $0.8D$. The response in horizontal direction showed a linear dependence with the flow velocity, reaching values close to $0.65D$. Such magnitude highlights the importance of movement in the *in-line* direction, different from the classical cases of VIV.

Keywords – Vortex Induced Vibration, cylinder near a plate, flexible cylinder, two degrees of freedom, free spanning pipelines.

LISTA DE FIGURAS

1.1	Exemplo do complexo sistema de estruturas submersas construído no leito oceânico para exploração e produção de óleo e gás.	4
1.2	Possíveis geometrias de um vão livre de duto. Vista frontal e perpendicular ao escoamento.	5
1.3	Desenho esquemático do sistema físico abordado nesta pesquisa.	6
2.1	Relação entre os adimensionais de Strouhal e Reynolds.	11
2.2	Típico escoamento ao redor de um corpo rombudo.	13
2.3	Fotografias do escoamento com a variação do $\frac{e}{D}$	14
2.4	Fotografias obtidas por Taneda (1965) para mostrar a esteira de vórtices atrás de um cilindro próximo de uma placa.	16
2.5	Localização dos pontos de separação do escoamento variando com o parâmetro $\frac{e}{D}$ para diferentes Reynolds e $\frac{\delta}{D}$. Fonte: Sintetizado pelo autor a partir de Hiwada et al. (1986) e Nishino, Roberts e Zhang (2007).	17
2.6	Coeficiente de arrasto variando com o parâmetro $\frac{e}{D}$. Fonte: Sintetizado pelo autor a partir de Geöktun (1975), Wilson e Caldwell (1971), Hiwada et al. (1986) e Lei, Cheng e Kavanagh (1999).	18
2.7	Coeficiente de sustentação variando com o parâmetro $\frac{e}{D}$. Fonte: Sintetizado pelo autor a partir de Geöktun (1975), Wilson e Caldwell (1971), Hiwada et al. (1986) e Lei, Cheng e Kavanagh (1999).	19
2.8	Número de Strouhal variando com o parâmetro $\frac{e}{D}$. Fonte: Sintetizado pelo autor a partir de Geöktun (1975).	21
2.9	Amplitude máxima de vibração para experimentos realizados pela literatura.	24
3.1	Esquema do arranjo experimental e dimensões relevantes do problema. . .	29
3.2	Tanque de reboque utilizado para realização dos ensaios.	30
3.3	Arranjo experimental para a condição em que o cilindro está encostado na placa.	30

3.4	Foto da fixação dos modelos no carro dinamométrico.	32
3.5	Sinal de decaimento na posição central do cilindro.	34
3.6	Extração dos parâmetros modais para a tentativa escolhida.	35
3.7	Força de tração atuando axialmente no modelo.	36
3.8	Velocidade e aceleração do carro de reboque.	37
3.9	Fita reflexiva instalada no modelo para monitoramento do deslocamento do corpo em 13 posições.	38
3.10	Condição estática do sistema ensaiado.	38
3.11	Plano paralelo ao escoamento.	39
3.12	Esquema das características do sistema físico utilizadas para cálculo da camada limite.	39
4.1	Exemplo da aplicação do método TST aplicado ao sinal da condição do cilindro isolado e $V_R = 6.11$	44
4.2	Registros temporais em todos os instantes do movimento na direção trans- versal para o $V_R \approx 7$	48
4.3	Resultado da amplitude nominal na direção perpendicular ao escoamento para as cinco condições.	49
4.4	Resultado da amplitude nominal na direção horizontal para as cinco condições.	51
4.5	Resultado da frequência na direção perpendicular ao escoamento.	52
4.6	Curva de resposta do cilindro isolado ao fenômeno de VIV.	55
4.7	Trajetória do movimento para a condição do cilindro isolado e $V_R = 5.08$. .	57
4.8	Variação da energia da amplitude em Z para a condição do cilindro isolado e $3.5 < V_R < 5.0$	58
4.9	Variação da energia da amplitude em X para a condição do cilindro isolado e $3.5 < V_R < 5.0$	59
4.10	Curva de resposta do cilindro isolado ao fenômeno de VIV.	59
4.11	Trajetória do movimento para a condição $e/D = 0.0$	60
4.12	PSD das condições $e/D = 0.0$ e $e/D = 2.0$	61

4.13	Região de transição do regime de escoamento da condição $e/D = 0.5$	63
4.14	Análise espectral da região de transição do regime de escoamento da condição $e/D = 0.5$	64
4.15	Densidade da trajetória do alvo central na região de transição do regime de escoamento da condição $e/D = 0.5$	64
4.16	Trajetória do movimento para a condição $e/D = 1.0$	65
4.17	Densidade espectral da potência para a condição $e/D = 1.0$	66
A.1	Curva de resposta ao fenômeno de VIV - Condição $e/D = 0.0$	75
A.2	Curva de resposta ao fenômeno de VIV - Condição $e/D = 0.5$	76
A.3	Curva de resposta ao fenômeno de VIV - Condição $e/D = 1.0$	77
A.4	Curva de resposta ao fenômeno de VIV - Condição $e/D = 2.0$	78

LISTA DE TABELAS

1	Regimes de resposta adaptado do trabalho experimental de Khalak e Williamson (1997a).	22
2	Limitações quanto à dimensão do tanque.	31
3	Resumo dos principais parâmetros do modelo.	33
4	Extração dos parâmetros modais para a tentativa escolhida.	34
5	Espessura da camada limite da placa plana do arranjo experimental.	40
6	Resumo das dos principais parâmetros experimentais para as cinco condições ensaiadas.	41
7	Padrões de oscilação com maior aparição entre as condições ensaiadas.	54

SUMÁRIO

Parte I: DESCRIÇÃO DA FENOMENOLOGIA DO PROBLEMA.	1
1 Introdução	3
1.1 Contextualização do problema	3
1.2 Estrutura do trabalho	8
2 Revisão Bibliográfica	9
2.1 escoamento ao redor de corpos rombudos	9
2.2 Fenomenologia da Vibração Induzida por Vórtices	11
2.3 Efeito da placa plana no escoamento ao redor de um cilindro	12
2.3.1 Camada limite da placa plana	14
2.3.2 Separação do escoamento ao redor de um cilindro próximo à uma placa plana	15
2.3.3 Coeficiente de arrasto e sustentação	16
2.3.4 Frequência de Strouhal	20
2.3.5 Vibrações induzidas pela emissão de vórtices em cilindros com baixa razão de massa e próximo à uma placa plana	20
Parte II: INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL E DISCUSSÃO DOS RE- SULTADOS.	25
3 Metodologia Experimental	27
3.1 Parâmetros experimentais	27
3.2 Infraestrutura experimental	29
3.2.1 Aparato experimental	30
3.2.2 Condição de contorno	31

3.3	Caracterização do modelo	32
3.4	Frequência natural e coeficiente de amortecimento	33
3.5	Aquisição dos dados	35
3.5.1	Tração do modelo	35
3.5.2	Aquisição da velocidade	35
3.5.3	Monitoramento do deslocamento	36
3.6	Camada limite do experimento	37
4	Resultados experimentais	41
4.1	Análise dos dados	41
4.1.1	Análise da incerteza do sinal	42
4.1.2	Propriedades estatísticas para extração da amplitude	43
4.2	Resultados	47
4.3	Condição do cilindro isolado	54
4.4	Condição do cilindro em contato com a placa, $e/D = 0.0$	57
4.5	Condição do cilindro próximo à placa, $e/D = 0.5$, $e/D = 1.0$ e $e/D = 2.0$	61
5	Conclusão	67
	Referências	71
	Anexo A – Amplitudes de Vibração na direção vertical	75

PARTE I

DESCRIÇÃO DA FENOMENOLOGIA DO
PROBLEMA.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do problema

O desenvolvimento do país está atrelado ao conhecimento tecnológico em setores chaves para economia. No Brasil, o setor energético é uma das principais fontes de riqueza e a pesquisa científica nesta indústria torna-se relevante para o contínuo crescimento econômico. A demanda comercial do petróleo eclodiu no início do século XIX, sendo inicialmente empregado como fonte de energia, após o advento dos motores a gasolina e a diesel foi consolidado como um dos principais indicadores para o crescimento tecnológico de um país (NETO; COSTA, 2007). Desde então, muitos problemas de Engenharia foram vencidos com o propósito de avançar com a tecnologia de exploração e produção desse hidrocarboneto. Entretanto, ainda há barreiras no domínio tecnológico de estruturas submersas e das plataformas, entre elas destacam-se os dutos submarinos.

O primeiro duto terrestre foi construído em 1859 nos Estados Unidos para realizar o transporte de óleo bruto, suplantando caminhões tanques e trens (GUO et al., 2005). Apesar de 1897 marcar o início da exploração de petróleo na região *offshore*, apenas quarenta anos depois o primeiro duto submarino entrou em operação no Golfo do México. Em 1978 os dutos submersos já ultrapassavam 300 metros de profundidade e nos últimos anos estruturas com quase três quilômetros de lâmina d'água (KAISER, 2016) foram instaladas.

Os dutos submarinos, ou também conhecidos como *pipelines*¹, são considerados o meio de transporte de fluidos com maior confiabilidade, mas o projeto dessas estruturas oceânicas esbarra com diversos obstáculos de engenharia, por isso a pesquisa acerca desse tema deve estar em contínuo avanço para sobrepor tanto as limitações técnicas quanto as impostas pelo ambiente em que os dutos se encontram. Um grande exemplo de avanço da

¹No tocante à operação de plataformas de petróleo, os tubos são responsáveis por escoar o óleo e gás desde o poço até a plataforma. Essa estrutura pode ser classificada entre duas regiões, o trecho suspenso conhecido como *riser* e o trecho disposto paralelamente ao leito oceânico, conhecido como *pipeline*. Ressalta-se que dutos submersos são empregados para transportar diversos outros fluidos, sendo crescente o uso para transporte de água e gás natural.

Figura 1.1: Exemplo do complexo sistema de estruturas submersas construído no leito oceânico para exploração e produção de óleo e gás. Fonte: Lee (2009).

fronteira, tanto de conhecimento quanto técnica, são os dutos submarinos que surgiram para solucionar um problema de logística da segunda guerra mundial. Tal projeto ficou conhecido como PLUTO, acrônimo do termo em inglês *pipeline underwater transportation of oil*, e tinha como objetivo o transporte de combustível, de maneira secreta, pelo bloco dos aliados (WHITTLE, 2013). Para concretizar a estratégia construíram dois oleodutos no canal da mancha, o que significou um salto sem precedente na tecnologia de dutos submarinos, ao que se refere a distância alcançada de transporte. Cerca de 1 milhão de galões de combustível foram entregues por dia, alcançando o objetivo do projeto PLUTO.

Com o desenrolar dos anos, expandiu-se o uso dos dutos para transportar outros tipos de produtos, uma das grandes empresas do ramo energético, na conferência MOD² que ocorreu em 2012 na Noruega, indicou a crescente utilização de dutos e cabos no fundo do oceano para transporte de fluidos, destacando o emprego desses para condução de gás natural. Também salientaram que as visionárias plantas submarinas impõem grandes desafios para a Engenharia Oceânica, o que instiga pesquisa sobre o tema. Outro crescente setor que vêm instigando diversos pesquisadores é o transporte de água através de dutos oceânicos, Palmer e King (2004) indicam que esse pode ser considerado um problema tão grande quanto o da energia. Um exemplo do complexo sistema construído no leito marinho é mostrado na Figura 1.1. Dentre tantos desafios é notória a grande relevância dos dutos submersos em setores chaves para o mundo, e a continuidade do progresso tecnológico está atrelada ao domínio do conhecimento e pesquisa.

A motivação deste trabalho encontra relevância em um problema incidente ao meio

² Informação retirada do endereço eletrônico: http://offshore.no/sak/34765_naa_skal_olje-norge_til_himmels, acessado em janeiro de 2017.

(a) Vão livre do duto.

(b) Condição em que o duto está assentado no fundo oceânico. Vista perpendicular da região 1 demarcada acima.

(c) Trecho do duto suspenso. Vista perpendicular da região 2 demarcada acima.

Figura 1.2: Possíveis geometrias de um vão livre de duto. Vista frontal e perpendicular ao escoamento.

onde os dutos estão em operação, no que diz respeito ao terreno no qual estão instalados e a correnteza. O leito oceânico caracteriza-se pela irregular topografia e uma vasta quantidade de geometrias que o solo pode assumir, como mostra a Figura 1.2. O primeiro esquema, Figura 1.2b, representa o que pode ser considerado o cenário ideal de operação, onde o duto está assentado sobre o fundo oceânico e um carregamento estático age na estrutura. Já na segunda imagem, por fatores externos e de difícil previsibilidade, i.e. erosão, o fundo oceânico apresenta declives, o que modifica a sustentação da estrutura e ocasiona o vão livre do duto, ilustrado na Figura 1.2a. Neste novo cenário, em determinadas condições, cargas dinâmicas induzidas pela correnteza podem atuar no trecho suspenso e propiciar fenômenos fluidodinâmicos. Pode-se definir o problema prático como cabos assentados sobre o leito oceânico que por razões ambientais, perdem o contato com o solo em uma região nomeada como vão livre, tal espaçamento é conhecido como *gap*³ e um esquema desse cenário é mostrado na Figura 1.2c. Os desníveis do leito marítimo e a corrente oceânica despontam como protagonistas dos problemas atinentes a operação dos *pipelines* e é esse problema que o foco desta pesquisa concentra-se.

Grande parte das justificativas para esta pesquisa são procedentes das aplicações práticas já discutidas, mas o principal objetivo está concentrado no estudo fundamental do problema teórico da influência de uma placa plana na esteira à jusante de um corpo rombudo. Esse será abordado de maneira experimental através do uso de modelo em escala reduzida. Koushan (2009), ressalta que o estudo de dutos em vão livres contribui para

³Expressão em inglês para representar uma lacuna e, que no presente trabalho representa a distância entre o duto e o fundo do mar.

Figura 1.3: Desenho esquemático do sistema físico abordado nesta pesquisa.

uma melhor seleção de qual rota tais estruturas irão traçar no leito oceânico. De acordo com Moraes (2013), algumas características das atividades de petróleo *offshore* mostram, pelos desafios tecnológicos que geram, que não é possível o avanço nas explorações e na produção em águas profundas sem a permanente conquista de novos conhecimentos e inovações. Este fato colabora para justificar a importância de avançar nos estudos, ainda escassos, do fenômeno fluidodinâmico que ocorre ao longo de dutos submersos sujeitos a incidência de correnteza.

A Figura 1.3 ilustra como o problema prático será abordado neste trabalho, sendo que o sistema físico foi modelado como um cilindro próximo a uma placa plana para diferentes condições de velocidade. A dimensão e representa a distância entre os dois corpos, a dimensão característica é dada pelo diâmetro, D , do cilindro e a velocidade do escoamento nomeada por U . Como é possível inferir a partir do arranjo mostrado, o cilindro pode oscilar na direção paralela e perpendicular ao escoamento. A ocorrência de vibrações, na maioria das estruturas, deve ser evitada, ou ao menos minimizada, pois essas vibrações podem causar uma série de problemas, entre os quais destacam-se: o mal funcionamento da estrutura, o desgaste ou a falha prematura de componentes devido ao carregamento cíclico e até mesmo a ruptura da estrutura.

Quando há escoamento de um fluido em torno de um corpo, ou este movimenta-se imerso naquele, ocorre o fenômeno de Vibrações Induzidas pelo Escoamento, VIE. Os vórtices são decorrentes da perturbação do escoamento e submetem o corpo a forças hidrodinâmicas. Segundo Assi (2005), fenômenos fluidodinâmicos são a fonte das excitações que causam vibrações em corpos cilíndricos submetidos à ação da correnteza. Neste texto será adotada a nomenclatura derivada do termo em inglês *Vortex Induced Vibrations* - VIV para referir-se ao fenômeno de Vibrações Induzidas por Vórtices. O qual é objeto de estudo em diversas áreas da engenharia que trabalham com estruturas esbeltas e rom-

budas, destacam-se a Engenharia Civil (pontes, chaminés industriais, torres), Elétrica (cabos de transmissão), Aeronáutica (asas de aviões), Automotiva (retrovisores) e Naval (*risers* e *pipelines*).

Barltrop e Adams (1991) apontam o fenômeno de sincronização entre a frequência natural da estrutura e a frequência de desprendimento de vórtices como a principal consequência desse fenômeno fluidodinâmico. Tal situação ocorre em uma considerável região de velocidades e amplifica a amplitude de resposta. Esse também é conhecido como *lock in* e será amplamente discutido neste estudo, inclusive o comportamento de sincronização para estruturas flexíveis. Apesar de já existir diversas pesquisas sobre a VIE, destacam-se as obras de Blevins (1990) e Bearman (1984), algumas áreas ainda são pouco exploradas mesmo com a crescente demanda da indústria. Gonçalves (2013) expõe que investigações com dois graus de liberdade acerca do fenômeno são bem recentes e ainda pouco exploradas. As pesquisas acerca de estruturas cilíndricas flexíveis dispostas horizontalmente no leito marinho sob ação da correnteza são ainda mais escassas. O que acrescenta à esta pesquisa certa originalidade.

Por não existir solução exata para o problema de VIV, os métodos teóricos e experimentais devem ser empregados. Segundo Cunha (2005), a utilização de soluções numéricas ainda não é suficiente para descrever um problema complexo de VIV e sugere que a abordagem teórica seja feita utilizando modelos fenomenológico, que são criados baseados no conhecimento adquirido através de experimentos com diversas condições. É neste contexto que o presente estudo está inserido. Propõe-se uma investigação experimental sobre o fenômeno de Vibração Induzida pelo escoamento agindo em estrutura esbelta flexível com seção circular, disposta horizontalmente e com dois graus de liberdade. Após compreensão deste caso fundamental, a investigação da interferência na natureza do problema com a variação da distância entre o duto e o leito oceânico.

O comportamento assimétrico do escoamento ao redor de um corpo que se encontra próximo à uma placa plana não é governado apenas pelo número de Reynolds, Re , sendo a distância adimensional, $\frac{e}{D}$, entre o cilindro e a placa de grande impacto ao fenômeno. O objetivo principal desta dissertação é caracterizar o comportamento dinâmico de cilindros flexíveis horizontais na presença de uma placa plana sob os efeitos do fenômeno da vibração induzida por vórtices, bem como a interferência na distância entre as duas estruturas na resposta dinâmica do cilindro. Propõe-se um estudo experimental realizado em tanque de reboque com modelo em escala para $\frac{e}{D} = 0, 0.5, 1.0, 2.0$ e $>> 2.0$ e Re variando entre 10^3 e 10^4 . Apresentando a resposta dinâmica em amplitude e frequência.

1.2 Estrutura do trabalho

O primeiro capítulo deste texto cumpre a função de explicar sobre a relevância do tema para o desenvolvimento do conhecimento tecnológico, a motivação da pesquisa e os objetivos do trabalho. O Capítulo 2 abrange a revisão bibliográfica com o objetivo de compreender os fenômenos fluido-elásticos decorrentes da interação do fluido com a estrutura, tal conteúdo contempla a discussão central desta pesquisa. Esse foi organizado em seções para melhor compreensão. Inicialmente o caso fundamental do escoamento em torno de um corpo rombudo estacionário e o comportamento da esteira foram abordados. Partindo para a fenomenologia da VIV em cilindros rígidos com um e dois graus de liberdade, prosseguindo para estruturas mais complexas, ao que se refere a análise dinâmica, os cilindros flexíveis. A metodologia experimental é explicitada no terceiro capítulo. Descrevendo os métodos empregados para obtenção dos dados experimentais requeridos, a caracterização do modelo em escala, a infraestrutura utilizada e o sistema de rastreamento de imagem. Na segunda parte do trabalho os métodos de análise são apresentados e os resultados experimentais discutidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo expõe conceitos essenciais para o entendimento acerca do fenômeno de Vibração Induzida por Vórtices agindo em estruturas flexíveis com seção circular e capaz de transladar na direção paralela e transversal ao escoamento. O objetivo deste capítulo é expor uma sequência de estudos na área de dinâmica dos fluidos que permitiram o entendimento sobre os fenômenos fluidodinâmicos em torno de corpos rombudos.

2.1 Escoamento ao redor de corpos rombudos

Esta seção visa mostrar a cronologia do estudo acerca dos fenômenos fluidodinâmicos ao redor de corpos rombudos, os quais podem ser definidos como estruturas onde ocorre a separação do escoamento quando expostos à ação de corrente. A divisão do escoamento incide grande parte da superfície do corpo e ocasiona a formação de duas camadas cisalhantes a jusante. Estas podem ser caracterizadas como um sistema instável e de sentido oposto, sendo a interação entre elas responsável pela geração de vórtices de maneira alternada.

Acredita-se que Leonardo Da Vinci foi o precursor do estudo de escoamentos com vórtices ao esboçar em 1510, de forma qualitativa, a esteira de corpos rombudos (PIO-MELLI, 1997). Em 1878, Strouhal identificou a relação entre a frequência de vibração, a velocidade do fluido e o diâmetro da estrutura, através da análise da vibração de um fio sujeito a uma corrente de ar (ROSHKO, 1954). A razão de frequência na qual o vórtice é emitido pode ser representado pelo número de Strouhal, sendo este o principal parâmetro para descrever escoamentos com vórtices. O número adimensional de Strouhal, S_t , relaciona a frequência característica em que os vórtices, f_s , são emitidos devido ao fenômeno fluidodinâmico e as características do escoamento, assim como mostra a Equação 2.1.

$$S_t = \frac{f_s D}{U} \quad (2.1)$$

Outra contribuição significativa do físico experimental foi sobre a amplificação da vibração quando ocorria a sincronização das frequências, natural e do som. Lord Rayleigh em 1879 inferiu que o movimento era na direção transversal, contrariando suposições anteriores de que a vibração era na direção do escoamento. Paralelo à esses pesquisadores, Reynolds avançou no estudo do efeito da viscosidade e Rayleigh concluiu que o número de Strouhal varia com o número de Reynolds, definido como mostra a Equação 2.2. Prandtl apresentou a teoria da camada limite em 1904 a fim de compreender o escoamento de fluidos viscosos em torno de um corpo. A grande relevância de seu estudo para a mecânica dos fluidos foi a inserção dos efeitos viscosos na análise do escoamento. Posteriormente, Blasius, orientado de Prandtl, evoluiu no estudo da turbulência da camada limite (HAGER, 2003). Em 1911, Von Kármán analisou o padrão da esteira de vórtices formada a jusante de corpos rombudos e sua análise resultou na agora conhecida, esteira de Von Kármán. Relf e Simmons (1924) indicaram que há uma frequência de emissão de vórtices predominante na faixa de transição do regime do escoamento e que o aumento desta é acompanhada da redução do arrasto.

$$R_e = \frac{UD}{\nu} \quad (2.2)$$

Pesquisas relevantes acerca do comportamento da esteira e da formação dos vórtices foram realizadas por Kovasznay (1949) e Roshko (1954), ambas da área aeronáutica, investigaram o escoamento ao redor do cilindro para uma ampla região de Reynolds e variando o diâmetro a partir de ensaios em túnel de vento. A Figura 2.1 foi compilada de Roshko (1954) e agrupa os resultados experimentais de ambos autores sobre a relação entre os adimensionais de S_t e R_e , destaca-se que cada curva corresponde a um diferente diâmetro. Pode-se inferir a partir do gráfico que a frequência de desprendimento dos vórtices é praticamente fixa para R_e superior a 500. Para uma mesma condição de escoamento, há pouca dispersão entre os dados coletados para variados diâmetros.

Bloor (1964) buscou compreender o ponto de separação do escoamento e notou a relação entre as camadas cisalhantes, ponto de separação e a geometria da esteira. Wei e Smith (1986) empregaram técnicas de bolhas de hidrogênio para visualização do escoamento com o objetivo de estudar os vórtices secundários, já citados pela pesquisadora Bloor. Gerrard (1966) aprofundou os estudos sobre a instabilidade do escoamento e, concluiu, como os vórtices crescem alternadamente em cada lado do corpo. A periodicidade na qual ocorre a formação dos vórtices é responsável pela alteração no campo de pressão do cilindro. Este fenômeno resulta em variações periódicas nas componentes de

Figura 2.1: Relação entre os adimensionais de Strouhal e Reynolds (ROSHKO, 1954).

força agindo sobre o cilindro. Comumente, a força de sustentação oscila na frequência de desprendimento do vórtice, enquanto a força de arrasto oscila ao dobro da frequência de Strouhal. Se a estrutura não for fixa, isso é, possua liberdade para deslocar, essas forças irão induzir vibrações no cilindro.

2.2 Fenomenologia da Vibração Induzida por Vórtices

A Vibração Induzida por Vórtices, VIV^1 , é um fenômeno fluidodinâmico de natureza ressonante que acomete estruturas esbeltas e pode ser caracterizado como autoexcitado e autorregulado. A sincronia entre a frequência de emissão de vórtices com uma das frequências naturais do corpo é conhecida como *lock in* e ocorre para uma ampla faixa de velocidade. Por ser um fenômeno ressonante, ocorre uma elevação da amplitude de resposta dinâmica na região de sincronia das frequências da estrutura e do escoamento. Essas oscilações apresentam magnitudes próximas da dimensão característica² e perduram até o momento que o padrão de escoamento é interrompido, caracterizando a autorregulação da resposta. Para estruturas flexíveis não há dominância de uma frequência

¹Sigla oriunda do termo em inglês *Vortex Induced Vibration*.

²Assume-se que para o cilindro a dimensão característica seja o diâmetro

natural específica, o que implica em mais de uma região de sincronização, logo, diferente do que ocorre para as estrutura rígidas, a dessincronização de um modo irá perdurar até a captação de uma próxima frequência dominante. É característica de uma estrutura flexível, a coexistência de mais de uma forma de vibrar em um mesmo instante, e é comumente chamada de excitação multi-modal.

Williamson e Roshko (1988) publicaram um trabalho experimental focando na visualização do escoamento para compreender a região de sincronização, *lock in*, que ocorre devido os vórtices interagirem de tal forma que seu desprendimento capta a frequência natural da estrutura e passa a ter período igual ao natural. Essa região apresenta uma amplificação da resposta, mas de forma curiosa o fenômeno de VIV é auto-limitado e, por tal razão, oscila em torno da dimensão característica do escoamento.

A excitação periódica proveniente da esteira de vórtices é predominantemente na direção transversal ao escoamento, sendo essa a preocupação principal de diversas pesquisas. Mas, com o progresso da compreensão do fenômeno foi possível notar que o movimento longitudinal influencia no transversal. Deve-se esperar que a presença de vibrações no sentido do escoamento, *in-line*, influencie o processo de formação de vórtices e, portanto, altere a resposta na direção *cross-flow*. Moe e Wu (1990) foram um dos primeiros a apresentar resultados experimentais para dois graus de liberdade acerca do tema. Eles encontraram um deslocamento na velocidade reduzida para a maior amplitude e um ligeiro aumento da amplitude, quando comparado com o caso livre para oscilar apenas na direção transversal.

A vibração induzida por vórtices é um tema tão extenso e complexo que alguns autores consideram que o fenômeno pode nunca ser totalmente compreendido (GARCIA, 2008). Um dos assuntos ainda pouco explorados atinentes à fenomenologia da VIV, é aquele que trata de cilindros flexíveis dispostos horizontalmente e próximos a uma placa plana. A próxima seção visa explanar sobre alguns conceitos fundamentais para o entendimento desse fenômeno e qual o estado da arte do assunto.

2.3 Efeito da placa plana no escoamento ao redor de um cilindro

Este capítulo é dedicado à investigação teórica do escoamento ao redor de um cilindro, que encontra-se próximo à uma placa plana. Ao analisar a dinâmica entre um cilindro e uma placa plana é importante ressaltar que há dois padrões de escoamento

distintos, o primeiro refere-se à perturbação imposta por corpos rombudos e o segundo sobre o desenvolvimento da camada limite ao longo de uma superfície. Ambos fenômenos fluidodinâmicos foram amplamente discutidos em clássicas bibliografias de mecânica dos fluidos, mas a interferência entre esses dois padrões ainda não é clara. Mais que a interferência, busca-se entender o efeito da variação do espaçamento entre o cilindro e a placa no escoamento e nas forças atuando no corpo.

Figura 2.2: Típico escoamento ao redor de um corpo rombudo.

A Figura 2.2 sucinta algumas importantes características do escoamento ao redor de um corpo rombudo. As curvas em verde representam a camada limite do corpo e quando essas perdem aderência com a superfície sólida, sucede a separação do escoamento, em posições identificadas como ponto de separação.

A região do círculo vermelho está a jusante dos pontos de separação do escoamento, como exposto em Zdravkovich (1997), essa poderá ser laminar ou turbulenta conforme a variação do adimensional Re . Nota-se que ocorre uma desaceleração do fluido nessa região, a qual é delimitada pelas camadas cisalhantes. A porção do escoamento que se encontra totalmente separada é a região onde a esteira do corpo irá desenvolver-se.

Bearman e Zdravkovich (1978) realizaram ensaio em túnel de vento para investigar a influência da distância entre uma placa plana e um cilindro. A análise espectral através do método de anemômetro a fio quente³ demonstrou que a formação de vórtices é suprimida para razões de gap e diâmetro, $\frac{e}{D}$, menores que 0.3. Outra relevante contribuição foi o experimento em túnel de fumaça que permitiu a visualização do escoamento e verificação do seu comportamento para diferentes razões de $\frac{e}{D}$. Esse foi realizado para $Re = 10^4$ e o

³ O anemômetro de fio quente, *Hot-wire*, realiza a medição por efeito térmico. É constituído por um filamento aquecido exposto ao escoamento de um fluido.

Figura 2.3: Fotografias do escoamento com a variação do $\frac{e}{D}$ em ensaio realizado por Bearman e Zdravkovich (1978).

cilindro com razão de aspecto igual a um. Apesar da visualização do escoamento permitir apenas a análise qualitativa do problema essa convergiu com os resultados experimentais, o que permite avançar na compreensão da interação fluido-estrutura do sistema estudado. A Figura 2.3 mostra seis fotografias do escoamento em torno do cilindro e em cada uma delas a distância deste e a placa plana foi modificada. Tal ferramenta experimental possibilita avaliar a interferência da razão $\frac{e}{D}$ no comportamento da esteira. Nas Figuras 2.3a e 2.3b o escoamento a jusante do cilindro é similar, nota-se que há um início de escoamento entre o cilindro e a placa para o segundo caso. Observa-se que o escoamento a montante apresenta divergências no ponto de separação. Para $\frac{e}{D} = 4$, Figura 2.3c, o escoamento abaixo do cilindro começa interagir com a esteira, distingui-se o início da formação de vórtices. Nas Figuras 2.3d, 2.3e e 2.3f é possível verificar que com o aumento da distância entre o cilindro e a placa, a interferência deste naquele torna-se irrelevante.

Com base nos resultados acima, pode-se afirmar, qualitativamente, que o escoamento é perturbado pela presença da placa apresentando nítida assimetria. As próximas seções discutem, de forma quantitativa, como as parâmetros que delineiam o fenômeno são afetados com a proximidade do cilindro com a placa plana.

2.3.1 Camada limite da placa plana

A descrição física da camada limite foi publicada no início do século XX por Ludwig Prandtl e, pode ser definida, como a região do escoamento adjacente a uma fronteira sólida onde os efeitos viscosos são apreciáveis e o escoamento é rotacional. A região é

delimitada pela espessura da camada limite, δ , a qual é função da distância entre a borda de ataque da placa até uma posição qualquer do corpo. O parâmetro η é dependente do regime do escoamento, laminar ou turbulento, e é determinado de tal maneira a garantir que a razão $\frac{u}{U} > 0.99$ seja alcançada. O valor de δ corresponde a distância onde o efeito viscoso pode vir a ser negligenciado novamente e sua formulação é exposta na Equação 2.3.

$$\delta(x) = \frac{\eta x}{\sqrt{R_{e,x}}} \quad (2.3)$$

Lei, Cheng e Kavanagh (1999) investigaram experimentalmente a influência da camada limite da placa no escoamento ao redor de um cilindro estacionário. Para avaliar tal fenômeno, o autor variou o parâmetro adimensional que relaciona a espessura da camada limite da placa, δ , e a dimensão característica do cilindro, D . Seis parâmetros foram verificados $0.1 < \frac{\delta}{D} < 2.9$, sendo que três deles são correspondentes a camada limite natural da placa, as quais é possível variar a espessura modificando a distância entre o cilindro e a borda de ataque da placa. Já os três maiores parâmetros foram obtidos com a inserção de um objeto a montante do cilindro. Para os parâmetros com variação entre $0.1 < \frac{\delta}{D} < 0.5$ as curvas de resposta da força de sustentação são bem próximas, o que mostra uma baixa influência deste parâmetro no fenômeno de desprendimento de vórtices.

2.3.2 Separação do escoamento ao redor de um cilindro próximo à uma placa plana

Taneda (1965) investigou de maneira qualitativa a esteira de vórtices formada a jusante de um cilindro próximo a uma placa, para distâncias de $0.1D$ e $0.6D$ e baixo Reynolds. Ressalta-se o arranjo experimental não convencional empregado por Taneda, o qual optou por dispor o modelo no plano vertical, anulando o efeito da camada limite da placa. O autor foi o primeiro a inferir que para as condições onde a razão $\frac{\delta}{D}$ é pequena, observa-se que a esteira possui apenas uma coluna⁴ de vórtices. Também concluiu que conforme *delta* decai, o comprimento da esteira de vórtices aumenta com a distância a jusante. A Figura 2.4 traz duas fotografias, obtidas empregando técnicas para visualização do escoamento, que permitem conferir o desenho dos vórtices na esteira do corpo para um mesmo R_e . Como dito, a Figura 2.4a apresenta uma única coluna de vórtices e uma largura mais expressante que a Figura 2.4b.

⁴Tradução livre do termo em inglês *single row*.

Figura 2.4: Fotografias obtidas por Taneda (1965) para mostrar a esteira de vórtices atrás de um cilindro próximo de uma placa.

A Figura 2.5 exhibe as localizações dos pontos de separação com a variação do adimensional $\frac{e}{D}$. Cada curva apresenta os resultados experimentais obtidos para diferentes Reynolds e $\frac{\delta}{D}$. Sabe-se que para o cilindro isolado o escoamento é simétrico na seção longitudinal e o gráfico mostra que com o aumento da distância entre os dois corpos, a separação converge para um mesmo ângulo, em torno de 80° . Para o caso do cilindro encostado na placa plana, i.e. $\frac{e}{D} = 0$, do experimento publicado por Hiwada et al. (1986), observa-se que há apenas um ponto de separação do escoamento, fato decorrente da parte inferior do cilindro não permitir fluxo. Logo, o descolamento dá-se apenas na face superior do corpo e colabora para a formação de uma única coluna de vórtices.

O trabalho de Hiwada et al. (1986) expõe os pontos de separação para $Re \approx 10^4$, i.e. regime subcrítico, já o de Nishino, Roberts e Zhang (2007) para $Re \approx 10^5$, i.e. regime crítico. Nota-se que para aquele a convergência ocorre mais rapidamente e tende assintoticamente para um $\theta_s \approx 80^\circ$. Tal resultado converge com o esperado para cilindros isolados no regime subcrítico, no qual a separação ocorre entre $80^\circ < \theta_s < 85^\circ$. Partindo da situação em que o cilindro está assentado na placa até a condição $\frac{e}{D} = 1$, percebe-se que há uma assimetria em relação aos pontos de separação do escoamento. Ao compararmos as condições $\frac{e}{D} = 0.2$ e $\frac{e}{D} = 1$, evidencia-se um retardo na separação do escoamento inferior, com ângulos de separação próximos de $\theta_s = 100^\circ$. Quando o ângulo de separação é simétrico para a parte superior e inferior do corpo, este apresenta valores próximos de zero para o coeficiente de sustentação.

2.3.3 Coeficiente de arrasto e sustentação

A distribuição de pressão ao redor de um cilindro é simétrica, implicando em uma força de sustentação nula. Já foi debatido que para $\frac{e}{D}$ pequenos, a separação do escoamento é assimétrica. Dito isso, é de se esperar uma forte influência do espaçamento

Figura 2.5: Localização dos pontos de separação do escoamento variando com o parâmetro $\frac{e}{D}$ para diferentes Reynolds e $\frac{\delta}{D}$. Fonte: Sintetizado pelo autor a partir de Hiwada et al. (1986) e Nishino, Roberts e Zhang (2007).

placa-cilindro no comportamento da força de sustentação. A pressão na região do escoamento separado é baixa, devido à alta energia cinética do escoamento naquela região. As Figuras 2.6 e 2.7 mostram um conjunto de dados experimentais para os adimensionais de força e sustentação. Os resultados englobam as pesquisas de Geöktun (1975), Wilson e Caldwell (1971), Hiwada et al. (1986) e Lei, Cheng e Kavanagh (1999). Como discutido brevemente na seção 2.3.1, Lei, Cheng e Kavanagh (1999) conduziram ensaios para investigar a influência da camada limite na resposta do cilindro próximo à placa, variando os adimensionais Re , $\frac{\delta}{D}$. Os autores avaliaram o efeito do espaçamento placa-cilindro nas forças fluidodinâmicas.

O valor típico de C_D para cilindros isolados e $Re \approx (10^4)$ é de 1.2 (ROSHKO, 1961). O experimento de Wilson e Caldwell (1971) mostra que o C_D sofre variações com a

proximidade de uma placa. Valores de C_D superiores a 1.8 foram obtidos para $Re = 3.3E^4$ e $\frac{e}{D} \approx 1.75$. A região compreendida entre $0 < \frac{e}{D} < 1$, sofre uma pronunciável variação do C_D . O arrasto é sensível a camada limite da placa para $0.5 < \frac{e}{D} < 1.5$, diferente do percebido para a sustentação. Geöktun (1975) encontrou uma inesperada tendência nos valores do coeficiente de arrasto variando com o $\frac{e}{D}$. O arrasto é mínimo quando o cilindro está encostado na placa plana. Também indicou que o arrasto máximo ocorre com $\frac{e}{D} = 0.5D$.

Figura 2.6: Coeficiente de arrasto variando com o parâmetro $\frac{e}{D}$. Fonte: Sintetizado pelo autor a partir de Geöktun (1975), Wilson e Caldwell (1971), Hiwada et al. (1986) e Lei, Cheng e Kavanagh (1999).

A manifestação do C_L e $C_{L,RMS}$ indica a assimetria no campo de distribuição e o início do desprendimento de vórtices alternados, respectivamente (SUMER; FREDSE, 2006). O C_L tende assintoticamente a zero conforme a assimetria do escoamento ao redor do corpo esmaece. Quanto mais assimétrico é a distribuição de pressão ao redor do corpo,

mais o C_L irá se pronunciar. Espera-se que para corpos com distribuição simétrica a sustentação seja nula. Logo, conforme a assimetria se expressa a força de sustentação aparece, devido a diferença entre a pressão acima e abaixo do cilindro. A variação do coeficiente de sustentação é dominada pelo parâmetro $\frac{e}{D}$ e por Re .

Figura 2.7: Coeficiente de sustentação variando com o parâmetro $\frac{e}{D}$. Fonte: Sintetizado pelo autor a partir de Geöktun (1975), Wilson e Caldwell (1971), Hiwada et al. (1986) e Lei, Cheng e Kavanagh (1999).

Sumer, Jensen e Fredsøe (1991) realizaram estudo experimental abordando o efeito de uma placa no escoamento ao redor de um cilindro, o sistema foi montado verticalmente e permitiu a variação da distância entre a placa e o cilindro. Os autores empregaram a técnica de visualização experimental de escoamentos para apreciar o comportamento da esteira no regime sub-crítico. Eles concluíram que para uma resposta na direção transversal com amplitude de um diâmetro, vibração típica do fenômeno de VIV, o cilindro irá aproximar da placa plana e a razão $\frac{e}{D}$ será momentaneamente próxima de 0. Tal

comportamento é investigado por Sumer et al. (1994), para diferentes razões $\frac{e}{D}$, a partir de ensaios em canal de água recirculante e impondo um movimento transversal ao cilindro. Este parâmetro foi cambiado entre alguns valores típicos de vibração para cilindros expostos a correnteza. Quando o cilindro aproxima da placa, o escoamento sofre uma redução no espaço que antes detinha para fluir, ocasionando um aumento substancial na velocidade e, conseqüente, queda no campo da pressão na parte inferior do corpo. Tal característica foi constatada em Sumer, Jensen e Fredsøe (1991) e Sumer et al. (1994), aquele avalia o caso estacionário com $\frac{e}{D} = 0.4$ e o segundo a amplitude forçada de $A/D = 0.25$ e $\frac{e}{D} = 0.35$. Ambos os casos foram experimentados para situações com escoamento oscilatório caracterizado pelo número de Keulegan-Carpenter⁵ igual a 20.

2.3.4 Frequência de Strouhal

O estudo de Geöktun (1975) aliou experimentos realizados para visualização do escoamento, em canal de água, com a medição da frequência de desprendimento de vórtices na parte superior e inferior de cilindros, em condições de escoamento de $Re = 1.53E^5$. Algumas importantes conclusões podem ser retiradas da sua investigação acerca do S_t : para o cilindro encostado na placa plana não há desprendimento de vórtices, $\frac{e}{D} = 0.5$ é a configuração com mais vórtices tridimensionais do experimento realizado, para $\frac{e}{D} < 1$ há uma notória diferença entre a frequência de desprendimento de vórtices na parte superior e inferior do cilindro. Tal fato, pode implicar em um comportamento oscilatório menor quando o corpo for livre para transladar.

2.3.5 Vibrações induzidas pela emissão de vórtices em cilindros com baixa razão de massa e próximo à uma placa plana

As seções anteriores discutiram o escoamento ao redor de cilindros fixos, provindos de ensaios cativos, o que é de grande utilidade para entendimento do fenômeno, entretanto, deseja-se investigar a oscilação do cilindro. Logo, o mesmo deve possuir, ao menos, um grau de liberdade. Esta seção irá sintetizar alguns resultados experimentais da resposta ao VIV para cilindros, com e sem a presença da placa, introduzindo algumas típicas características do que se espera ao investigar a amplitude de resposta. Três experimentos foram selecionados para melhor compreender a resposta ao VIV, esses são mostrados na Figura 2.9. Busca-se entender como os parâmetros $\frac{e}{D}$ e de massa-amortecimento, $m^*\zeta$,

⁵O parâmetro Keulegan-Carpenter (KC) é empregado em análises que avaliam o escoamento oscilatório, tal estudo está além do escopo deste trabalho.

Figura 2.8: Número de Strouhal variando com o parâmetro $\frac{e}{D}$. Fonte: Sintetizado pelo autor a partir de Geöktun (1975).

afetam o fenômeno.

Khalak e Williamson (1997b) compararam as amplitudes máximas de um cilindro com baixo parâmetro de massa-amortecimento, $m^*\zeta = 0.13$, obtidos em água com os dados experimentais de Feng realizados no ano de 1968 e testados em ar com $m^*\zeta = 3.28$. A resposta do cilindro pode ser seccionada em três ramos, o primeiro abrange a excitação inicial, o segundo, ramo superior, contém a região com altas amplitudes e caracterizado pela sincronia entre as frequências, lock-in, e a região final, nomeada como ramo inferior, a qual a resposta decresce. Assi (2005) atenta para o fato que apenas sistemas com $m^*\zeta$ baixo estão vulneráveis à ocorrência dos três ramos. Verificou-se que para os dados obtidos em ar, alto $m^*\zeta$, a curva é mais triangular o que descaracteriza o comportamento do ramo superior, pela inexistência da região de sincronização. Já para o experimento em água tal ramo contém uma região na qual a frequência de oscilação do cilindro capta a frequência natural da estrutura. Khalak e Williamson (1997a) apresentaram a característica curva

Regime de resposta	Amplitude de resposta na direção transversal	V_R
Excitação inicial	Abrupto aumento da amplitude.	< 4.5
<i>Upper branch</i>	Região com as maiores amplitudes de vibração.	4.5 - 7.0
<i>Lower branch</i>	Apresenta amplitudes moderadas de resposta.	6.5 - 12.0
Dessincronização	Redução drástica da amplitude de vibração.	> 12

Tabela 1: Regimes de resposta adaptado do trabalho experimental de Khalak e Williamson (1997a).

de resposta, com quatro regimes de resposta bem estabelecidos para cilindros isolados com baixo $m^*\zeta$. Essas distintas regiões são mostradas na Tabela 1.

A descontinuidade na curva do estudo de Khalak e Williamson (1997a) de resposta ampara a divisão da curva em regiões distintas, as quais representam o comportamento da estrutura para diferentes condições do escoamento. Nota-se que entre um ramo de resposta a outro há um pulso da resposta, como no caso em que a $V_R \approx 4,5$ é possível verificar que a amplitude cresce sobremaneira nessa região. Essa região de V_R abrange a transição entre o início da excitação e o regime *upper branch*. Este apresenta elevadas amplitudes e aquele caracteriza-se por possuir dois ramos de resposta, um praticamente periódico, com baixas oscilações, e outro com um abrupto aumento da amplitude. A segunda notória transição ocorre em $V_R \approx 7$, onde a amplitude de resposta sofre uma moderada redução. O regime *lower branch* é caracterizado por amplitudes mais brandas que as do regime anterior, mas ainda sim relevantes para o problema estrutural. Por fim, pode-se destacar o regime de dessincronização como aquele com baixas amplitudes e pouco sensível ao incremento da velocidade. Os dados experimentais são expostos na Figura 2.9, representados pelos marcadores quadrados, e cada curva representa o regime de resposta proposto pelos autores Khalak e Williamson (1997a). outra característica notória que permite discutir é acerca do caráter autorregulado do fenômeno, o qual é condicionado a amplitudes máximas próximas da dimensão característica.

Outro importante estudo que destaca o comportamento de estruturas flexíveis, com alta razão de aspecto, propensas à VIV é apresentado por Huera-Huarte (2006). O autor confirmou o comportamento multi-modal desse tipo de estrutura, bem como a inexistência do *lower branch*, a partir de ensaios em água e ar⁶, e a variação da tração do modelo ensaiado. Huera-Huarte e Bearman (2009) investigaram o comportamento dinâmico de um cilindro flexível exposto ao fenômeno de vibrações induzida por vórtices, para tal realizou experimento em canal de água com cilindro esbelto, alta razão de aspecto, e

⁶Os ensaios em ar foram nomeados por Huera Huarte com a expressão em inglês *empty tank*, para se opor ao tanque preenchido com água.

avaliou o impacto da tração na amplitude de resposta. Os resultados são apresentados na Figura 2.9, os dados são representados pelos marcadores triangulares. Apesar da semelhança entre as duas investigações, Uma notável diferença é a faixa de V_R alcançada no experimento de 2006, permitindo uma análise mais ampla do desenvolvimento dos ramos na resposta do cilindro

Tsahalis (1984) traz uma pioneira pesquisa experimental acerca da resposta (X e Z) ao VIV com foco no efeito da proximidade de uma placa plana e cilindro flexível. A medição foi realizada utilizando um acelerômetro no centro do modelo e é representada pelos círculos preenchidos. Nota-se que a resposta não apresenta uma nova elevação da amplitude após a região de dessincronização. Como era esperado, os experimentos com menor razão de massa apresentaram uma menor amplitude de resposta. Para o cilindro próximo da placa, a amplitude máxima ocorreu para velocidades superiores que os demais casos.

Observa-se dos resultados reunidos na Figura 2.9, a típica resposta ao fenômeno de VIV. Contudo, há de se considerar que os experimentos com menor $m^*\zeta$, apresentam uma maior dificuldade na identificação dos regimes de resposta. Adicionalmente, o efeito da placa é de difícil compreensão apenas com os dados disponíveis.

Algumas conclusões podem ser feitas a partir deste capítulo: os mecanismos presentes na interação entre o fluido e a estrutura ainda não são completamente entendidos, grande parte do estudo experimental já realizado estava limitado às ferramentas disponíveis para execução do ensaio e aquisição dos dados e, por fim, o VIV em cilindro próximo à placa plana ainda é pouco explorado, o que motiva a investigação experimental proposta nesta pesquisa.

Figura 2.9: Amplitude máxima de vibração na direção perpendicular ao escoamento, para cilindro isolado com diferentes m^* e para o arranjo placa-cilindro com espaçamento $\frac{e}{D} = 1$. A curva tracejada representa a região da excitação inicial. Já a linha contínua o *upper branch*. O pontilhado o regime *lower branch*. A região final, $V_R > 12$, é caracterizada pela dessincronização e a redução do fenômeno de VIV. Fonte: Sintetizado pelo autor a partir de Khalak e Williamson (1997a) e Huera-Huarte e Bearman (2009).

PARTE II

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL E
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A análise experimental desenvolvida durante esta pesquisa visa a obtenção de dados de um sistema físico, a partir da condução de testes realizados em tanque de reboque, com o objetivo de desvendar a amplitude e período da vibração provocada pelo desprendimento dos vórtices à jusante do modelo. O sistema físico inclui um longo cilindro, com baixo $m^*\zeta$, e uma placa plana, na qual a distância entre ambos é controlada e variável para atender a investigação proposta. Espera-se obter a velocidade de reboque, a tração aplicada no cilindro e o deslocamento da estrutura, este discretizado no tempo e espaço. Este capítulo visa apresentar e discutir as limitações desses aspectos e expor os pré-testes necessários para realização do ensaio de VIV.

3.1 Parâmetros experimentais

Como discutido anteriormente, pretende-se investigar a resposta dinâmica do cilindro exposto ao escoamento e a uma certa distância de um plano, para alcançar tal propósito foi executado ensaio em tanque de reboque do sistema composto pelo modelo flexível e uma estrutura retangular disposta sob aquele. Esta foi inserida para que o sistema experimentasse cenário semelhante ao encontrado na prática, o já descrito vão livre de duto. Esse pode ser interpretado como um cilindro longo com baixa rigidez e livre para oscilar nas direções longitudinal e transversal.

A interação fluido-estrutura pode ser caracterizada a partir de um grupo de parâmetros adimensionais como Strouhal, S_t , Reynolds, R_e , razão de massa, m^* , velocidade reduzida, V_R e a razão de aspecto, L/D . Partindo do pressuposto que o modelo não sofreu alterações relevantes no que concerne a dimensão característica do cilindro e que o fluido, no qual o sistema está imerso, manteve as propriedades físicas constantes durante toda a campanha de testes, alguns desses parâmetros podem ser descritos com um número menor de variáveis. O número de Reynolds, por exemplo, será função apenas da velocidade de reboque do tanque, como visto na Equação 2.2. Na prática, a razão de aspecto relaciona o compri-

mento do vão livre ao diâmetro do duto¹, o que corresponde ao comprimento do cilindro e seu respectivo diâmetro².

O número adimensional de Strouhal, Equação 2.1, relaciona a frequência característica em que os vórtices são emitidos, devido ao fenômeno fluidodinâmico, e as características do escoamento. Como já discutido, o S_t irá sofrer influência da proximidade com a placa com o cilindro, mas para os arranjos pretendidos $S_t = 0.2$ é uma estimativa razoável. A frequência de desprendimento de vórtices é regida pela Equação 3.1 e também será função da velocidade.

$$f_s(U) = \frac{S_t U}{D} \quad (3.1)$$

A velocidade reduzida é calculada a partir da frequência natural do primeiro modo na direção transversal ao fluxo. A frequência natural irá variar, moderadamente, para cada condição de espaçamento e foram obtidas individualmente através do teste de decaimento, esse será detalhado subsequentemente. V_R é definido na Equação 3.2, atenta-se para a dependência desse com a velocidade U .

$$V_R(U) = \frac{U}{D f_{nz}} \quad (3.2)$$

Busca-se cobrir a região de sincronização, que como exposto no capítulo 2, ocorre na região em que a frequência de Strouhal é próxima da natural. Logo, a Equação 3.3 traz a estimativa da velocidade crítica para a frequência natural do primeiro modo.

$$U_{critico} = \frac{f_{n,1} D}{S_t} \quad (3.3)$$

Sabe-se que a razão de massa irá desenvolver um importante papel no VIV. O adimensional, Equação 3.4, relaciona a massa estrutural do cilindro e a massa do volume do fluido deslocado.

$$m^* = \frac{4m}{\pi \rho_{fluido} D^2 L_{cilindro}} \quad (3.4)$$

Todos os parâmetros supracitados serão determinados nas próximas seções.

¹ Relacionado com desníveis temporários do leito oceânico, que ocasionam um vão livre variável, podendo o comprimento e o GAP alterar a qualquer momento.

² O diâmetro do modelo foi mensurado no seu nó central.

3.2 Infraestrutura experimental

A infraestrutura utilizada é composta por um modelo em escala fixado com fusos, uma estrutura plana construída abaixo do modelo, um carro dinamométrico que reboca os outros dois à uma velocidade conhecida e o sistema de aquisição de imagens. Atenta-se aos seguintes detalhes da Figura 3.1: cinco câmeras foram instaladas à uma profundidade aceitável da linha d'água; Uma robusta estrutura foi montada para rebocar o cilindro; O sistema de suporte do modelo, permitiu variar a distância entre a placa e o cilindro. A Figura 3.1a mostra um esquema da infraestrutura experimental e a Figura 3.1b traz as dimensões do tanque de reboque.

(a) Esquema do aparato experimental empregado na investigação proposta. Atenta-se aos seguintes detalhes:

(b) Dimensões da seção horizontal do tanque de reboque.

Figura 3.1: Esquema do arranjo experimental e dimensões relevantes do problema.

A campanha de ensaios com modelo em escala reduzida foi conduzida no tanque de reboque do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), a Figura 3.2 retrata a infraestrutura à disposição para realização do ensaio.

Figura 3.2: Tanque de reboque utilizado para realização dos ensaios.

3.2.1 Aparato experimental

A fim de investigar a influência da placa no escoamento ao redor do cilindro, cinco diferentes condições, em relação a distância entre os dois, foram ensaiadas. Ao retornar à aplicação prática, é comum imaginar a condição padrão do duto com esse repousando sob o fundo oceânico, a qual pode ser reproduzida laboratorialmente empregando um modelo cilíndrico em contato com uma placa plana, como mostra o esquema da Figura 3.3, sendo rebocado com velocidades de interesse para investigação do fenômeno.

Figura 3.3: Arranjo experimental para a condição em que o cilindro está encostado na placa.

Como condição de referência, o modelo foi rebocado a uma distância muito grande da placa. Essa faz menção a situação hipotética de um cilindro montado elasticamente na horizontal sem interferência de outra estrutura, caso fundamental da investigação do fenômeno para estrutura com baixo m^* e nomeada no presente trabalho como cilindro isolado. As demais condições foram selecionadas baseadas no espaçamento entre o modelo e a placa, a fim de investigar como o fenômeno é afetado pela presença desta. Em

termos práticos, a estrutura de suporte manteve a mesma profundidade ao longo dos testes, entretanto, foi possível alterar a posição do cilindro. A caracterização do sistema deve considerar as limitações físicas da infraestrutura e dos materiais à disposição para construção do mesmo. Um aglomerado das limitações impostas pelas dimensões do tanque é exposto na Tabela 2.

Tabela 2: Limitações quanto à dimensão do tanque.

Largura	Irá restringir o comprimento máximo do modelo, delimitando a razão de aspecto.
Profundidade	A estrutura que suporta o modelo e a placa, deve ser tão rígida quanto possível. Busca-se posicionar o sistema composto pela placa, cilindro e câmeras, o mais distante possível da superfície livre.
Comprimento	A distância útil à disposição para rebocar o modelo irá afetar o tempo máximo de aquisição, o que interfere na qualidade dos resultados ao aplicar as ferramentas estatísticas para processamento dos dados coletados.

Ao que se refere a profundidade da estrutura de suporte, Ewins (1984) ressalta em sua obra que o aparato pode causar a excitação da estrutura e, por isso, deve ser suficientemente curto e rígido, evita-se dessa forma que o mesmo introduza sua própria ressonância na medição. Como visto na Equação 3.2, a velocidade reduzida irá variar com os parâmetros f_n e D que podem ser modulados para varrer a faixa de V_r de interesse, sendo que a faixa de velocidade de reboque do carro é limitada.

3.2.2 Condição de contorno

A condição de contorno do caso real é bi-apoiada, mas replicar essa mesma condição para o modelo em escala reduzida é extremamente complicado, visto que tal condição impossibilitaria a aquisição de dados importantes para o ensaio e o modelo fica livre para se movimentar também no eixo axial. A alternativa sugerida pela recomendação prática (VERITAS, 2006) é a utilização de modelos em condição de contorno pinada-pinada, ou seja, o modelo é livre para rotacionar no ponto de fixação, mas não se desloca. A bibliografia ainda infere que a frequência natural é sensível as condições de contorno, ou seja, estruturas com baixa rigidez tendem a não alterar a resposta dinâmica devido a condição de contorno experimental. Tal fato contribui para resultados experimentais favoráveis quando comparados com a aplicação prática, já que a rigidez do modelo é

Figura 3.4: Foto da fixação dos modelos no carro dinamométrico.

extremamente baixa. O modelo em escala reduzida foi fixado ao carro dinamométrico pelas rótulas, sem restrição ao movimento transversal e longitudinal. Para monitorar e controlar a tração imposta ao modelo foram fixados em cada extremidade e com simetria axial uma célula de carga e um fuso, na qual o primeiro exerceu a função de mensuração da força e o segundo o ajuste da mesma. A Figura 3.4 mostra a condição de contorno adotada no experimento.

3.3 Caracterização do modelo

Uma vez definido o modelo, os adimensionais descritos anteriormente foram manipulados a fim de definir os parâmetros experimentais. Atinente a caracterização do modelo, foram realizados ensaios de decaimento em água para obtenção da frequência natural e amortecimento.

Segundo a recomendação prática DNV-RP-F105 (VERITAS, 2006) a razão de aspecto relevante para o problema estudado, cilindros flexíveis, deve estar entre $100 < L/D < 200$. O comprimento foi selecionado para atender o intervalo proposto. A razão de aspecto é comum a todas as condições, $L/D = 131.45$, ou seja, o modelo já é considerado flexível tendo de ser levado em consideração a sua natureza multimodal.

Foram feitas medições em laboratório para obtenção dos principais parâmetros experimentais do modelo em escala construído, as medições são expostas na Tabela 3.

Tabela 3: Resumo dos principais parâmetros do modelo.

Rigidez axial	EA	757	N
Rigidez flexional	EI	0.04	Nm^2
Comprimento	L	2800	m
Diâmetro externo	D	0.0213	m
Massa linear estrutural	m	0.42	kg/m

3.4 Frequência natural e coeficiente de amortecimento

A frequência natural da estrutura pode ser modulada ao alterar a massa, comprimento e tração aplicada no modelo, nota-se que as duas primeiras variáveis afetam sobremaneira a razão de massa, definida na Equação 3.4. Com o intuito de aumentar a massa linear do modelo, foi adicionado água dentro do mesmo, sendo todo o volume interno preenchido cuidadosamente com o fluido³.

Priorizando a caracterização do primeiro modo de vibrar o centro do modelo foi deslocado e séries temporais do deslocamento foram obtidas. Espera-se uma relação linear⁴ entre as frequências naturais, a qual respeita a relação exibida na Equação 3.5. Portanto, as demais frequências podem ser estimadas a partir da frequência de primeiro modo.

$$f_{n,i} = i f_{n,1} \quad (3.5)$$

O ensaio de decaimento consiste na aplicação de uma força o intuito de induzir a vibração livre do modelo, que encontra-se inicialmente em repouso e, após a excitação no nó central, percebe-se que o modelo oscila em torno da sua posição de equilíbrio, decaindo a amplitude a cada passo de tempo, até retornar para a condição inicial de repouso. A proporção que a amplitude decai está relacionada com o amortecimento, ζ , do sistema, espera-se para a condição ensaiada o regime sub-crítico que corresponde à $\zeta < 1$.

Para cada condição de espaçamento foi realizado um teste individual, denominado teste de decaimento, e, em cada teste, foram executadas cinco excitações espaçadas no tempo. A Figura 4.1a mostra o sinal do deslocamento, obtido para o decaimento do cilindro isolado, aquisitado no nó de aplicação da força (centro do modelo). Como a excitação da estrutura é realizada manualmente, a resposta da estrutura está condicionada na qualidade na qual é executado o deslocamento do centro. A metodologia aplicada para

³O procedimento de preencher todo o volume interno do modelo foi o seguinte: o duto foi disposto verticalmente, sendo preso em uma de suas extremidades, e a cada período de tempo inseriu-se o líquido de preenchimento. O processo ocorreu sucessivamente até que todo o volume estivesse preenchido.

⁴A relação linear foi sugerida pela semelhança do problema com a condição de uma corda, a qual possui uma dependência linear entre os modos de vibrar e a frequência daquele modo.

limitar a janela de tempo e determinar qual das repetições será utilizada na fase subsequente, para obter os parâmetros frequência e amortecimento, consistiu na aplicação de dois critérios de seleção: O primeiro diz respeito a quantidade de ciclos de cada repetição ou o comprimento do sinal entre cada impulso.

Figura 3.5: Sinal de decaimento na posição central do cilindro.

Dois métodos serão empregados na determinação da frequência, um no domínio do tempo e outro no da frequência. O primeiro consiste na extração dos parâmetros à partir da série temporal do decaimento, seguiu-se a abordagem de Blevins (1990) e Chakrabarti (2005). O procedimento consiste na obtenção da posição temporal das máximas amplitudes do sinal, onde a distância entre os pontos corresponderá ao período amortecido do sinal. Em posse do período, facilmente a frequência amortecida pode ser obtida e, ao usar o modelo linear de amortecimento, determina-se o parâmetro ζ . Já a abordagem no domínio da frequência é feita a partir da transformada de Fourier no sinal de deslocamento. A Figura 3.6 apresenta ambos métodos e os parâmetros extraídos do sinal de decaimento para a condição do cilindro isolado. Adicionalmente, a Tabela 4 expõe os resultados das demais condições.

Condição	$f_{N,1}$ [Hz]	ζ_{linear} [%]
e/D=0.0	1.283	5.65
e/D=0.5	1.283	5.65
e/D=1.0	1.287	5.12
e/D=2.0	1.350	5.37
isolado	1.323	4.60

Tabela 4: Extração dos parâmetros modais para a tentativa escolhida.

Figura 3.6: Extração dos parâmetros modais para a tentativa escolhida.

3.5 Aquisição dos dados

3.5.1 Tração do modelo

A tração mensurada nas extremidade do modelo, para cada instante de tempo, é apresentada na Figura 3.7. As médias foram calculadas com os dados contidos na região entre as duas linhas verticais pontilhadas. As médias são exibidas com seus respectivos desvios padrões.

3.5.2 Aquisição da velocidade

A velocidade foi discretizada de tal modo a abranger as regiões com maior propensão ao fenômeno, na seção 2.3.5 foi discutida que a faixa de velocidade reduzida de maior interesse ocorre entre $V_R = 4$ e $V_R = 12$. Com o propósito de cobrir a maior região possível do fenômeno, variou-se entre 2 e 16 o V_R . Para os casos limites, encostado no fundo e isolado, o modelo foi rebocado em 20 velocidades. Já para as condições de $e/D = 0.5, 1.0$ e 2.0 a discretização foi de 40 pontos, priorizou-se a região de velocidade propensa ao fenômeno de VIV, sendo nessas maior a densidade de pontos.

Figura 3.7: Força de tração atuando axialmente no modelo.

Um exemplo da série temporal adquirida pelo sistema Aqdados (frequência=100Hz) para a condição $e/D = 2$ é exibida na Figura 3.8. Para cada discretização dessa grandeza foi feita uma média na região na qual a velocidade apresenta poucas oscilações, ou seja, descartando a parte inicial do sinal onde o carro de reboque está acelerando. O critério de corte foi a constância da aceleração. As velocidades nominais encontradas nesta etapa serão empregadas para calcular a velocidade reduzida correspondente de cada condição.

A velocidade reduzida será calculada com base na primeira frequência natural $f_{n,1}$, identificada a partir dos ensaios de decaimento em água parada como mostrado na seção anterior.

3.5.3 Monitoramento do deslocamento

A vibração da estrutura pode ser definida como a oscilação dessa em torno da posição de equilíbrio, o que equivale a dizer que ocorre uma alternância intermitente da posição do corpo em relação à condição inicial. Com o objetivo de monitorar a trajetória do cabo, um sistema submerso de rastreamento óptico foi adotado, esse foi instalado junto ao aparato construído para realização do ensaio. O sistema de aquisição faz uso das técnicas de processamento de imagens para conversão das imagens captadas pelas câmeras em séries temporais do movimento. O monitoramento do movimento faz o rastreamento passivo dos treze alvos instalados no modelo flexível. O arranjo adotado para colagem dos adesivos

Figura 3.8: Velocidade e aceleração do carro de reboque.

refletivos visou uma sequência alternadas de 2 e 3 alvos para facilitar a identificação dele. Note também que um alvo foi fixado no fundo falso, servindo como eventual referência fixa de comparação. Para cada um dos 13 alvos fixados no modelo foram monitorados os movimentos nas direções: horizontal (X ou direção de deslocamento do carro de reboque); vertical (Z) e Y (posição do alvo na direção longitudinal do modelo), conforme ilustra a Figura 3.9. Todos os registros de movimento dos alvos, das células de carga e também do transdutor de velocidade do carro de reboque foram colhidos a uma taxa de amostragem de 100Hz, no caso da monitoração por imagem, correspondendo a 35 mil frames por sinal.

Com as coordenadas das 14 posições mensuradas, tanto no modelo quanto na placa, é possível recuperar a elástica da linha, obtida pelo espelhamento dos dados no plano de simetria e, posteriormente pela interpolação cúbica entre os pontos. Adicionalmente, é possível conferir se o parâmetro e/D foi alcançado ao manipular a coordenada do alvo central e o fixado na placa. A Figura 3.10 exibe a condição estática e permite a visualização das posições dos alvos reflexivos.

3.6 Camada limite do experimento

Como visto na Seção 2.3.1, a camada limite da placa plana pode afetar o fenômeno de VIV. Isto posto, a presente seção visa computar a espessura da camada limite da placa

Figura 3.9: Fita reflexiva instalada no modelo para monitoramento do deslocamento do corpo em 13 posições.

Figura 3.10: Condição estática do sistema ensaiado.

plana. A Figura 3.11 traz um esquema de como a camada limite evolui na placa e o perfil de velocidade na região da fronteira da placa. Busca-se nesta seção encontrar o valor da espessura da camada limite na posição do cilindro.

Figura 3.11: Plano paralelo ao escoamento.

Uma importante consideração deve-se ao fato de que os experimentos foram conduzidos em ambos sentidos na direção do escoamento. O cilindro foi disposto assimetricamente à placa, como ilustra a Figura 3.12, e, por isso, a espessura da camada limite foi calculada para as duas distâncias entre borda de ataque da placa e cilindro. O arranjo mostrado expõe as dimensões relevantes para o cálculo da espessura da camada limite, δ . Adicionalmente, as velocidades extremas e o correspondente Re são mostrados na Tabela 5. A dimensão característica no cálculo do adimensional $Re_{e,x}$, foi o comprimento da placa, L .

Figura 3.12: Esquema das características do sistema físico utilizadas para cálculo da camada limite.

Para a faixa de Reynolds do problema, a variável η assume o valor 5 e os valores de δ , a qual foi adimensionalizada pela dimensão característica do cilindro, são exibidos na Tabela 5.

U [m/s]	R_e	$R_{e,x}$	δ/D em X=10D	δ/D em X=20D
0.05	1.10E+03	4.99E+04	0.22	0.45
0.50	1.10E+04	4.99E+05	0.07	0.14

Tabela 5: Espessura da camada limite da placa plana do arranjo experimental.

Como já discutido, para $0.1 < \frac{\delta}{D} < 0.5$ o efeito da camada limite da placa plana no escoamento do cilindro não é expressivo. Infere-se que para o caso apresentado, a maior espessura da camada limite é inferior àquela indicada como crítica. Optou-se por apresentar os resultados em função da velocidade de corrente livre, U, para todas as condições estudadas.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Ao investigar um sistema físico, busca-se extrair informações relevantes para entender a natureza do problema, como por exemplo a amplitude e frequência da vibração. O processo de extração pode ser denominado como processamento de sinal e, geralmente, tem como objetivo manipular o dado bruto a fim de reduzir ruídos ou transformar os dados medidos de modo a visualizar novas características. Este capítulo trará a coleção de resultados gerados a partir dos dados experimentais coletados.

4.1 Análise dos dados

Cada caso ensaiado, entenda-se como caso o ensaio com específico arranjo e condições de escoamento, fornece uma coleção de dados discretizada no tempo e espaço, para os três graus de liberdade. Fica evidente que a quantidade de mensurações é gigantesca, sendo o objetivo dessa seção mostrar como foi feita a organização desses dados com o objetivo de extrair os resultados esperados para caracterização do fenômeno. Um aglomerado das principais características do experimento pode ser visto na Tabela 6.

A velocidade reduzida foi calculada com base na primeira frequência natural $f_{n,1}$, identificada a partir dos ensaios de decaimento em água parada. São apresentados os valores máximos e mínimos do adimensional V_R e da tração exercida no modelo.

Cada sinal foi investigado individualmente na busca de expor resultados coerentes

Condição	$m^*\zeta_{linear}$	V_R	Tração [N]	Corridas
e/D=0.0	0.068	1.84 - 16.80	46.0 - 49.0	20
e/D=0.5	0.068	1.85 - 17.23	46.0 - 49.5	40
e/D=1.0	0.062	1.77 - 16.58	45.0 - 48.5	40
e/D=2.0	0.065	1.71 - 15.99	43.5 - 48.5	40
Isolado	0.056	1.72 - 15.70	44.0 - 50.0	20

Tabela 6: Resumo das dos principais parâmetros experimentais para as cinco condições ensaiadas.

com o que foi experimentado pelo modelo. Nesse processo, apesar de esporádico, algumas amostras apresentaram mensurações, em alguns instantes de tempo, que não eram condizentes com a real trajetória da estrutura. Os desvios foram identificados pela investigação da trajetória de cada alvo, sendo descartados os dados correspondentes às regiões anômalas. Grande parte do problema relacionado ao erro citado, deu-se nas regiões da extremidade do cilindro.

Consoante às limitações geométricas do tanque de reboque e das velocidades de interesse que foram investigadas, todos os ensaios tiveram duração média de 350s, o que garantiu uma quantidade suficiente de amostras para descrever o fenômeno. Um total de 35000 pontos foram coletados para cada série ensaiada em cada discretização espacial¹, entretanto, faz-se necessário descartar parte das amostras que não caracterizam o problema investigado. Um claro exemplo, são os trechos inicial e final do sinal que, como visto no capítulo anterior, o carro de reboque dispõe de certo tempo para atingir a velocidade proposta, o que pode transferir ao modelo ruídos indesejados, já a amostragem final pode sofrer influência da desaceleração do carro.

A janela temporal utilizada para os cálculos dos resultados pode influenciar sobremaneira na resposta procurada. À vista disso, a seleção foi realizada considerando o critério de estacionariedade, o método para avaliar se o sinal é estacionário será detalhado a seguir.

4.1.1 Análise da incerteza do sinal

Como apresentado na Tabela 2, o comprimento limitado do tanque de reboque irá refletir na qualidade do sinal, o que induz uma incerteza aleatória na mensuração da média do sinal. Idealmente, a incerteza do sinal pode ser computada ao reproduzir as mesmas condições de escoamento e arranjo repetidas vezes. A prática de obter repetições do mesmo sinal é, por muitas vezes, inatingível no campo experimental pelo alto custo da infraestrutura empregada. Uma alternativa é detalhada nos trabalhos publicados por Brouwer, Tukker e Rijsbergen (2015) e Brouwer, Tukker e Rijsbergen (2013), onde os autores apresentam uma ferramenta que permite estimar a incerteza de medidas estatísticas, i.e. média e desvio padrão, para uma única repetição².

A ferramenta foi nomeada por TST, abreviação do termo em inglês *Transient Scanning Technique*, fundamenta-se em determinar a janela temporal da série que compreende a

¹Refere-se aos 13 alvos instalados no cilindro e o alvo da placa

²A repetição concerne à prática de realizar mais de uma medição para o mesmo arranjo e velocidade de reboque. Sendo o número de repetições, N_{rep} , diretamente proporcional ao tempo de utilização do tanque de reboque.

região estacionária dos dados mensurados. O sinal pode ser entendido como uma coleção de dados que ao serem manipulados resultam em importantes informações sobre o sistema físico estudado. Os dados podem ser fragmentados em duas regiões, dados observados e calculados, o primeiro abrange todo o sinal mensurado, já o outro apenas o segmento de interesse para análise do sinal, delimitando a região na qual as propriedades estatísticas são aplicadas. Muitas ferramentas matemáticas assumem que o sinal é estacionário, e essa simplificação permite obter os resultados esperados, entretanto, não é comum verificar a estacionariedade do sinal³. O TST permite avaliar se a região escolhida para análise é estacionária e, adicionalmente, fornece uma estimativa da incerteza.

A incerteza, u_1 , é estimada como mostra a Equação 4.1 e será empregada na avaliação acerca da estacionariedade. O método consiste na verificação visual da relação entre u_1 e a quantidade de amostras, TS. Pelo método da autocovariância aplicado a uma janela móvel, o sinal será estacionário caso apresente inclinação negativa, ao que concerne a taxa de variação na escala logarítmica de u_1 em relação a TS. A fim de amenizar os efeitos iniciais e finais do sinal, sucessivos cortes na janela temporal devem ser aplicados até alcançar a condição de estacionariedade, a qual é exposta na Equação 4.2.

$$u_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) C_{xx,biased}(\tau) d\tau} \quad (4.1)$$

$$\Delta u_1 = m \Delta TS \begin{cases} Estacionario & \text{se } m = -1 \\ Nao - estacionario & \text{se } m \neq -1 \end{cases} \quad (4.2)$$

A Figura 4.1 mostra um exemplo de como o método foi aplicado no sinal de deslocamento vertical, mensurado no nó central do modelo. A série apresentada na Figura 4.1a foi avaliada quanto sua estacionariedade e apresenta uma incerteza estimada de 0.1%. Todos dados observados foram testados e, a partir do emprego do método TST, as 10 mil amostras iniciais foram descartadas, para a condição do exemplo. A localização no eixo da ordenada do ponto final da curva em azul, representa a incerteza da amostra selecionada para análise estatística.

4.1.2 Propriedades estatísticas para extração da amplitude

Há algumas diferentes metodologias para a construção da curva da amplitude de resposta em função da velocidade reduzida, cujo procedimento de elaboração consiste em

³Comumente o sinal é dividido visualmente, empregando critérios subjetivos.

(a) Região selecionada para avaliação da estimativa da incerteza e da estacionariedade do sinal.

(b) Acumulativo de u_1 percorrendo o sinal no sentido do começo ao fim da série.

(c) Acumulativo de u_1 percorrendo o sinal no sentido do fim ao começo da série.

Figura 4.1: Exemplo da aplicação do método TST aplicado ao sinal da condição do cilindro isolado e $V_R = 6.11$.

resumir toda a informação da janela temporal selecionada, correspondente à um específico V_R , em um único ponto. A maneira de sintetizar esses dados irá variar de autor para autor. Por exemplo, nos resultados apresentados na Figura 2.9, os quais foram colhidos na literatura, os autores optaram por apresentar o maior valor absoluto da amostra. A máxima amplitude no trecho calculado é facilmente obtida ao empregar uma ferramenta matemática para processamento dos dados mensurados e dispara como boa alternativa aos que optam por adotar uma abordagem conservadora para apresentação dos resultados.

Uma outra abordagem emprega um estimador estatístico para inferir o valor da amplitude correspondente para a velocidade a que se refere o sinal temporal, um exemplo é o desvio padrão da média, representado pela letra grega σ . Um meio termo entre as duas abordagens já descritas, é aquela baseada nos valores absolutos dos extremos da amostra. Podendo apresentar a média de todos esses pontos ou apenas a média dos 10% maiores extremos.

Segundo Langley (1991), o desvio padrão pode ser obtido experimentalmente ao colher uma grande quantidade de dados e então calcular a soma de todos os erros quadrados de cada amostra mensurada, dividindo pelo número total dos dados coletados menos uma unidade. Esse método de estimar a amplitude do sinal é comumente chamada pela medida RMS, raiz quadrada da média. Sua formulação é muito próxima daquela empregada para o cálculo do desvio padrão. Entretanto, o valor RMS só será um bom estimador para sinais que não apresentam tendência (DEAKIN; KILDEA, 1999).

Começamos por introduzir a média do sinal temporal, a qual pode ser obtida como mostra a Equação 4.3.

$$\bar{a} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S a_Z(t_i) \quad (4.3)$$

A Equação 4.4 mostra o valor RMS, no qual te refere-se ao valor almejado do sinal e é, usualmente, estimado como nulo. Adicionalmente, como abordado por Deakin e Kildea (1999), para que A_{RMS} configure uma estimativa razoável da amplitude a última componente da equação deve, também, ser nula. O que implica na usual fórmula encontrada na literatura para estimativa da amplitude via valor RMS, nessa a média do sinal, $\bar{a}$, é zero. O que resulta na Equação 4.5.

$$(A_{RMS})^2 = \left(\frac{1}{S-1} \sum_i^S (a_i - \bar{a})^2 \right) + (\bar{a} - te)^2 \quad (4.4)$$

Nas Equações 4.3, 4.4 e 4.5, a quantidade de amostras é representada pela letra S.

O valor RMS mensura o desvio de uma variável randômica, em torno de uma média ou valor aceitável.

$$A_{Z,RMS} = \sqrt{\frac{1}{S-1} \sum_{i=1}^S a_Z(t_i)^2} \quad (4.5)$$

Para os sinais que apresentam média diferente de zero, o desvio padrão da média será reconhecido como um melhor estimador da oscilação proveniente do fenômeno de VIV. Como, por exemplo, o sinal da coordenada X, em que a força de arrasto atua e um apreciável deslocamento no sentido da corrente é experimentado pelo modelo, portanto, a estimativa da amplitude na direção horizontal será melhor caracterizada por σ_X . Dentre as condições ensaiadas, aquelas próximas ao plano podem apresentar assimetria no escoamento ao redor do cilindro, o que resultará em uma componente não-nula da sustentação média do corpo.

Como já exposto, o experimento coletou dados no domínio do tempo e espaço, sendo a formulação adequada para o cálculo da amplitude estimada condizente com ambas discretizações. O desvio da padrão da média será calculado como mostram as Equações 4.6 e 4.7, para as direções vertical e horizontal, respectivamente.

$$\sigma_Z = \sqrt{\frac{1}{S-1} \sum_{i=1}^S \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N-1} [a_Z(y_j, t_i) - \bar{a}_Z]^2 \right]} \quad (4.6)$$

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{1}{S-1} \sum_{i=1}^S \left[\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N [a_X(y_j, t_i) - \bar{a}_X]^2 \right]} \quad (4.7)$$

A amplitude de oscilação obtida através dos estimadores estatísticos resultam na amplitude nominal, as quais são apresentadas nas Equações 4.8 e 4.9.

$$\frac{\sigma_Z \sqrt{2}}{D} = \tilde{A}_Z \quad (4.8)$$

$$\frac{\sigma_X \sqrt{2}}{D} = \tilde{A}_X \quad (4.9)$$

4.2 Resultados

O problema versa sobre um sistema contínuo com infinitos modos e graus de liberdade, o que experimentalmente foi traduzido para um sistema discreto constituído por 13 pontos espalhados ao longo da direção longitudinal. A aquisição do deslocamento foi obtida para as três coordenadas, X, Y e Z, em todo o domínio do tempo. Uma boa forma de iniciar o processamento de dados do deslocamento é pela verificação visual do sinal temporal obtido. O mapeamento temporal e espacial dos dados, pode ser investigado através da elástica da linha.

A recuperação da elástica da linha foi obtida pela interpolação cúbica entre os 23 pontos, sendo 13 apurados pelo sistema de aquisição de imagem e os demais obtidos devido a simetria do problema. Os gráficos da Figura 4.2 visam discutir qual o comportamento em todos instantes de tempo para uma mesma velocidade de reboque variando para as cinco condições estudadas.

Visualmente é possível afirmar que a oscilação do cilindro mostrado na Figura 4.2e, condição isolado, é simétrica em relação ao eixo Y. Essa característica condiz com o esperado para o arranjo testado, no qual o escoamento na região inferior e superior são proporcionais e semelhantes ao esquema apresentado na Figura 2.2. Já para a condição $e/D = 0.0$, a oscilação é restrita ao sentido oposto à placa, o que pode ser verificado na Figura 4.2a, onde a região inferior da elástica permanece praticamente plana durante todo o teste. Ao incrementar a distância entre a placa e o cilindro, a curva da elástica caminha em direção a simetria entre a parte superior e inferior da oscilação.

A Figura 2.7 discutiu o aparecimento da componente de sustentação média para condições em que a presença da placa exerce uma grande influência no escoamento ao redor do cilindro. Para o cilindro próximo da placa, essa componente irá influenciar o comportamento da resposta. Quando C_L é apreciável, a oscilação na direção vertical irá apresentar uma assimetria em relação ao eixo longitudinal. Apesar de estar aquém do escopo do trabalho, o qual não abrange a mensuração da força agindo no modelo, é relevante ao problema discutir sobre a possível aparição da componente média da força de sustentação.

Uma possível assimetria no sinal acarreta uma média não-nula da série, o que como já visto, irá influenciar na determinação do resultado da amplitude. Os Gráficos 4.3 e 4.4 foram construídos utilizando as Equações 4.8 e 4.9.

Pode-se concluir a partir do Gráfico 4.3 que, diferentemente da curva apresentada por

(a) Condição $e/D=0.0$. (b) Condição $e/D=0.5$. (c) Condição $e/D=1.0$. (d) Condição $e/D=2.0$.

(e) Condição cilindro isolado.

Figura 4.2: Registros temporais em todos os instantes do movimento na direção transversal para o $V_R \approx 7$.

Figura 4.3: Resultado da amplitude nominal na direção perpendicular ao escoamento para as cinco condições.

Williamson e Govardhan (2004), a amplitude não decresce e a região de sincronização pendura para toda a faixa de $V_R > 4$. Quando a dessincronização de um modo começa ocorrer outra frequência torna-se dominante fazendo com que a estrutura vibre para velocidades acima de $V_r=10$. Assim como a amplitude, a frequência foi adimensionalizada pela frequência natural do primeiro modo na direção Z, obtida através do ensaio de decaimento. Os resultados para todas as condições são mostrados na Figura 4.5. Conclui-se a partir da curva da frequência em função da velocidade, que ocorre a manutenção das zonas de sincronização durante todas as condições de escoamento ensaiada. Comportamento semelhante pode ser encontrado no trabalho de Vieira (2017), que também trata de cilindros flexíveis expostos ao fenômeno de vibrações induzidas por vórtices, concluiu-se que sempre existirá uma frequência dominante e por tal razão não ocorre o dessincronização.

A condição $e/D = 0.0$ apresenta a menor amplitude de resposta entre $2 < V_R < 11$, a qual converge com o pressuposto que para distâncias inferiores a 0.3 a formação de vórtices é suprimida, o que reflete na baixa amplitude de resposta do cilindro. Destacam-se os grandes valores alcançados pela condição $e/D = 0.5$ entre $8 < V_R < 10$ e a súbita queda da amplitude em $V_R = 11$. As demais condições apresentaram semelhante resposta entre si, e uma manutenção da magnitude de amplitude em quase todo domínio estudado. O que permite concluir que a amplitude transversal cresceu de maneira pronunciada a partir de $V_R > 3.50$ e, mesmo após a ocorrência de altas magnitudes, a vibração aparenta estabelecer-se entre $0.6 < \tilde{A}_Z < 0.8$, diferente da clássica resposta ao VIV, que após a zona de sincronização onde altas amplitudes são alcançadas, a emissão de vórtices é interrompida e a magnitude da resposta decresce rapidamente. Não é possível identificar a característica autolimitante do fenômeno, uma análise mais minuciosa sobre as possíveis causas será feita na próxima seção.

A amplitude na direção paralela ao escoamento é, comumente, de baixa relevância se comparada com a resposta na direção transversal. Contudo, as oscilações atingiram significantes valores para todas as condições de arranjo e velocidade. Percebe-se um crescimento quase linear da amplitude da resposta com o aumento de V_R .

A trajetória que o corpo descreve está relacionada com o padrão de oscilação do mesmo, sendo prática comum em trabalhos da área classificar a trajetória do corpo a partir de formas já estabelecidas, como o numeral oito, 8, ou a letra C^4 . Estudos pregressos sobre o tema de VIV apontam alguns padrões recorrentes da trajetória do corpo. Jeon e Gharib (2001) afirmaram que é natural o corpo exposto ao fenômeno de VIV descrever uma trajetória com o padrão 8. Jauvtis e Williamson (2003) realizaram um estudo acerca do escoamento ao redor de um cilindro com dois graus de liberdade e apresentaram diversas formas que a trajetória pode assumir em função da velocidade reduzida, ressalta-se que para casos com baixa razão de massa, $m^* = 2.6$, os autores encontraram que para a amplitude máxima ($A_{Z,max} = 1.5D$) o corpo desenhava a forma de um C . Espera-se identificar o padrão da oscilação para os pontos de interesse ao empregar ferramentas para traçar a trajetória no tempo.

Alguns casos, correspondentes aos pontos dos gráficos com marcadores preenchidos, serão agora detalhados com maior profundidade fazendo-se uso de ferramentas matemáticas e gráficas que proporcionam maior facilidade no processo de discussão do fenômeno. A primeira técnica permite traçar a trajetória que o corpo percorre em todos os instantes de tempo. A segunda lida com o domínio da frequência, o qual agrega

⁴Também conhecida como trajetória crescente.

Figura 4.4: Resultado da amplitude nominal na direção horizontal para as cinco condições.

informações relativas ao modo de vibração e a frequência dominante de vibração. Os procedimentos adotados são justificados e descritos abaixo:

- **Trajetoória descrita pelo cilindro**

A trajetória no plano vertical compreende o percurso da coordenada Z , em relação a direção horizontal⁵, para todos os instantes calculados. Cada discretização espacial irá carregar sua própria trajetória característica, escolheu-se mostrar as trajetórias de sete diferentes posições ao longo do comprimento do cilindro. Os extremos da amplitude Z , para cada posição, irão auxiliar no desenho da envoltória, a qual corresponde a oscilação característica de Z em relação a Y (eixo longitudinal). O gráfico ainda traz a curva traçada com o valor de $\tilde{A}_Z$ em função da localização no

⁵Para facilitar a visualização, os correspondentes em X foram multiplicados por 20.

Figura 4.5: Resultado da frequência na direção perpendicular ao escoamento.

eixo longitudinal. Tal gráfico será nomeado neste trabalho como Trajetória no plano XZ.

Adicionalmente, apresenta-se a trajetória no plano horizontal. O qual permite considerar a trajetória descrita no sentido do escoamento, em relação às demais direções.

• Densidade da trajetória

Entendendo que para o presente caso há certa dificuldade para identificar os tradicionais padrões, uma forma diferente de visualização será feita a seguir. Objetivou-se ressaltar a região onde existe uma densidade maior na trajetória e, por assim, delinear o padrão da trajetória. Por tratar-se de um cilindro flexível é comum que outras posições apresentem amplitudes de oscilação apreciáveis. Nesse contexto, foram selecionadas duas posições, no comprimento do cilindro, de interesse para obter

a densidade da trajetória no plano

- **Densidade espectral de potência - PSD⁶**

A análise no domínio da frequência é conduzida pela aplicação da transformada de Fourier, método amplamente empregado para identificação da distribuição de energia em faixas de frequência. Tal tipo de análise alcançou grande destaque no processamento de sinais em diversas áreas devido a simplicidade de implementação e relevância das informações de saída. No entanto, o método deve ser aplicado com cautela, tendo em vista duas restrições: o sistema deve ser linear e o sinal estritamente periódico ou estacionário.

A função de densidade espectral mostra a intensidade da energia em função da frequência, em outras palavras, mostra quais faixas de frequências são significativas e a localização, no cilindro, das mesmas.

A Tabela 7 traz os padrões mais recorrentes para as cinco condições ensaiadas. O padrão horizontal ocorreu para uma grande faixa de velocidades nas condições de arranjo em que o cilindro estava próximo ao plano, o que é razoável, visto que a placa irá restringir o escoamento inferior, interrompendo a alternância de vórtices, o que coíbi a vibração na direção vertical. Percebe-se pela imagem correspondente ao padrão horizontal, que a oscilação está concentrada na região próxima a placa e que em grande parte do tempo amostrado o cilindro apresentou uma baixa amplitude na direção Z. O padrão de O é recorrente para os pontos (referente a discretização espacial) que apresentam baixa amplitude de vibração, como ocorre na região central do modelo para $f_Z \approx 2f_{n,Z}$ e acarreta a dominância do segundo modo e baixa amplitude no centro do modelo.

⁶Acrônimo do termo em inglês *Power Spectral Density*.

Padrão de 8	Acentuado movimento nas direções X e Z
Padrão de C	Notável amplitude nas duas direções
Padrão de O	Moderada oscilação nas direções X e Z
Padrão horizontal	Oscilação predominante em X

Tabela 7: Padrões de oscilação com maior aparição entre as condições ensaiadas.

4.3 Condição do cilindro isolado

A Figura 4.6 permite a apreciação da amplitude de resposta na direção *cross-flow*, empregando as três abordagens detalhadas anteriormente. É possível identificar o mesmo padrão de resposta para ambas medidas, com uma pequena redução da amplitude ao redor da $V_R = 10$ e um perceptível pulo da magnitude de oscilação na região da $V_R = 4$. Diferente das curvas mostradas na Figura 2.9, não há uma zona, dentro das velocidades ensaiadas, em que a dessincronização manifesta-se.

Nota-se que a primeira região com concentração de altas amplitudes, intitulada como *upper branch*, ocorre para velocidades superiores as encontradas pelos autores apresentados na Seção 2.3.5, as quais são centradas em torno de $V_R = 5.5$. Outra relevante observação é quanto a curva de amplitude máxima, onde os resultados aqui encontrados possuem magnitudes de ordem superior as encontradas normalmente na literatura. Alguns fatores podem ser levantados ao redor do que foi dito, o que promove a discussão a seguir.

O estudo de Khalak e Williamson (1997a) trata de um sistema com apenas um grau de liberdade. Moe e Wu (1990) foram um dos primeiros a apresentar resultados experimentais

para dois graus de liberdade. Eles encontraram um deslocamento na velocidade reduzida para a maior amplitude e um ligeiro aumento da amplitude, quando comparado com o caso livre para oscilar apenas na direção transversal.

Figura 4.6: Curva de resposta do cilindro isolado ao fenômeno de VIV.

O trabalho de Huera-Huarte e Bearman (2009) trata do efeito da tração na resposta da amplitude de um cilindro flexível isolado e possui m^* ligeiramente maior que o do modelo aqui exposto. Jauvtis e Williamson (2004) apresentaram importantes atualizações para entender a interação fluido-estrutura agindo em cilindros com dois graus de liberdade e baixa razão de massa e amortecimento. A primeira relevante conclusão é atinente aos ramos de resposta da amplitude para duas distintas condições de contorno, 1DOF e 2DOF. Concluiu-se que os três ramos, já bem estabelecidos na literatura da área e apresentados no Capítulo 2, encontrados para o caso onde o cilindro está restrito ao movimento no plano transversal, são também identificados para a condição na qual o corpo pode oscilar na

direção *in-line*. Conjuntamente aos resultados com dois graus de liberdade, observaram uma grande modificação da resposta para $m^* < 6$, estabelecendo que para esses casos um novo ramo deveria ser adicionado, ao já bem conhecido padrão da amplitude de resposta variando com a velocidade reduzida. Propuseram o *super-upper* ramo, no qual amplitudes nominais com 1.5D podem ser alcançadas. O parâmetro m^* pode ser um dos principais responsáveis pela altas amplitudes de resposta obtidas nesta pesquisa.

Foram traçadas as trajetórias não dimensionais no plano correspondente às direções horizontal e vertical, essas são mostradas na Figura 4.7. A envoltória delinea a simétrica oscilação na direção transversal, o que para esta condição era o esperado. Em concordância com a amplitude máxima de resposta já apresentada, a magnitude da vibração alcança mais de 1D e valor nominal, descrita no gráfico pela linha pontilhada em azul, próximo a 0.8D. As trajetórias das Figuras 4.7c e 4.7d, foram construídas usando todo o sinal coletado e, evidenciam o deslocamento inicial da estrutura no sentido da corrente, devido à força de arrasto atuando no corpo. No mais, quando o escoamento já está desenvolvido as forças flutuantes, em X e Z, atuando na estrutura são perceptíveis, assim como o padrão C de oscilação.

A região compreendida entre $3.5 < V_R < 5.0$, apresenta um abrupto aumento da amplitude de resposta e, propõe-se investigar esse trecho no domínio da frequência. A Figura 4.8 expõe os resultados da densidade espectral da potência para a direção Z e X, respectivamente. Nota-se uma resposta monocromática para a direção vertical e ambas energias estão posicionadas próximas a $f_{n,Z1}$ no eixo da ordenada, o que denota uma frequência dominante do primeiro modo. Até $V_R = 3.5$, Figura 4.8a, a energia da oscilação é muito baixa quando comparada com as demais, justificando a pequena amplitude de oscilação mostrada na Figura 4.6. Em $V_R = 4.6$ é possível verificar uma estreita variação do adimensional de frequência e intensa energia.

A transição do padrão da resposta para X ocorre na mesma região que a de Z, com uma pequena diferença quanto a velocidade em que ocorre a primeira amplitude significativa. Os resultado do PSD, Figura 4.9, converge com aquele obtido no domínio do tempo, sendo que a amplitude torna-se apreciável para $V_R > 4.5$. A partir desta velocidade reduzida, a frequência dominante aproxima da do primeiro modo. Os quatro resultados podem ser separados em dois grupos, os com frequência dominante do segundo modo e os de primeiro modo. Para o primeiro grupo a oscilação é baixa e o a resposta em frequência concentra-se ao redor de $2f_{n,Z}$. Já o outro grupo possui um razoável aumento da amplitude de oscilação e o aparecimento de três frequências concomitantes, sendo a dominante de primeiro modo.

(a) Trajetória no plano XZ e envoltória da oscilação característica na direção perpendicular ao escoamento (*cross-flow*).

(b) Trajetória no plano ZX e envoltória da oscilação característica na direção paralela ao escoamento (*in-line*).

(c) Trajetória na posição $L/4$.

(d) Trajetória na posição $L/2$.

Figura 4.7: Trajetória do movimento para a condição do cilindro isolado e $V_R = 5.08$.

4.4 Condição do cilindro em contato com a placa, $e/D = 0.0$

Ao longo do texto, foi exaustivamente discutido sobre a assimetria da oscilação de Z, proveniente da interrupção do escoamento na parte inferior do cilindro. A Figura 4.10 confirma que a vibração não estabelece a posição inicial do cilindro como o eixo de oscilação, diferente do que ocorre para o cilindro isolado. Ao esboçar a amplitude como função da velocidade reduzida, percebe-se que a magnitude da oscilação cresce quase linearmente com a variável, apresentando raras regiões com queda da amplitude de

Figura 4.8: Variação da energia da amplitude em Z para a condição do cilindro isolado e $3.5 < V_R < 5.0$.

resposta. O comportamento linear da resposta está relacionado ao aumento da velocidade, a qual induz forças hidrodinâmicas que deslocam o modelo à uma nova posição padrão, criando uma distância artificial entre o modelo e a placa. A nova configuração do modelo irá implicar na flutuação do corpo em torno desta nova posição e o escoamento não mais estará, totalmente obstruído na lacuna entre o cilindro e a placa.

As trajetórias da coordenada Z para três distintas regiões da velocidade são exibidas na Figura 4.11. Mesmo que com algumas discrepância entre as duas envoltórias, estabele-se um perfil com maior simetria com o aumento da velocidade. Os padrões de oscilação mostram-se constantes com a variação da velocidade e discretização espacial.

Diferente da densidade espectral apresentada para o caso do cilindro isolado, Figura 4.8, em que a resposta é em sua maioria monocromática, a condição com o cilindro disposto sobre o plano apresenta uma maior interação entre os modos de vibrar. A Figura 4.12 permite comparar a resposta na frequência e o padrão de oscilação para duas condições de arranjo, $e/D = 0.0$ e $e/D = 2.0$. É possível perceber o efeito da proximidade da placa na resposta da estrutura, pelo espalhamento da energia em quatro distintas faixas de frequência quando o cilindro está em contato com a placa, diferente da faixa concentrada

Figura 4.9: Variação da energia da amplitude em X para a condição do cilindro isolado e $3.5 < V_R < 5.0$.

Figura 4.10: Curva de resposta do cilindro isolado ao fenômeno de VIV.

(a) Trajetória no plano XZ para $V_R = 4.33$.

(b) Trajetória no plano XZ para $V_R = 8.63$.

(c) Trajetória no plano XZ para $V_R = 16.16$.

Figura 4.11: Trajetória do movimento para a condição $e/D = 0.0$.

apresentada em $e/D = 2.0$. Nota-se o segundo modo de vibrar, em torno de $f_Z = 2f_{n,Z}$, e, concomitante, a frequência do primeiro modo. Adicionalmente, a amplitude de oscilação, quando o cilindro afasta-se do plano, atinge valores bem mais expressivos, em ambas direções, que o encontrado para $e/D = 0.0$. Pode-se concluir, que para grandes lacunas entre os dois corpos, a placa parece não afetar o fenômeno e, assemelha-se à condição do cilindro isolado.

Figura 4.12: PSD das condições $e/D = 0.0$ e $e/D = 2.0$.

4.5 Condição do cilindro próximo à placa, $e/D = 0.5$, $e/D = 1.0$ e $e/D = 2.0$

A Figura 4.13 aborda a região de transição da condição $e/D = 0.5$ na faixa de $3.48 < V_R < 4.00$, onde a amplitude máxima dobra de magnitude. O primeiro sinal apresenta duas distintas regiões correspondentes a uma alta amplitude de oscilação e outra onde ocorre uma supressão do fenômeno, na Figura 4.14a é possível verificar o início da sincronização da frequência do escoamento com a natural de primeiro modo, nota-se que a energia de oscilação ainda é muito fraca para essa velocidade. Para $V_R = 3.82$, há predominância da amplitude de vibração próxima a $0.4D$. Entretanto, em algumas regiões da série a amplitude é aparentemente nula. Para o próximo incremento da velocidade o regime já aparenta estar definido e a série não apresenta nenhuma interrupção. As duas últimas velocidades possuem uma estreita faixa com alta energia de amplitude, ao redor da frequência de primeiro modo.

A densidade da trajetória, para os três casos, é mostrada na Figura 4.15, atente-se para o curioso fato de que apesar do pequeno incremento da velocidade, a oscilação apresentou padrões de oscilação distintos. Para a condição de baixa energia, Figuras 4.14a

e 4.15a, a oscilação parece dominante na direção horizontal e com baixa amplitude em Z. Para o próximo passo da velocidade, a $f_Z/f_{n,Z}$ é mais relevante e reflete em uma maior oscilação em Z. Ao passo que para o último caso, $V_R = 4.00$, é dominante a oscilação na direção vertical e exibe alta energia em $f_Z \approx f_{n,Z}$. Este último caso, configura a região de sincronização característica do fenômeno de vibrações induzidas por vórtices.

As trajetórias referente a condição $e/D = 1.0$ são exibidas na Figura 4.16 e os resultados no domínio da frequência para os pontos selecionados podem ser vistos na Figura 4.17. Nota-se que o modo de vibrar do primeiro caso assemelha-se ao comportamento da função seno, com a amplitude máxima localizada no centro do cilindro. A densidade espectral confirma que a frequência dominante é a do primeiro modo, exibindo um resultado monocromático para a razão de frequência e centrado próximo a 1. A amplitude de resposta para $V_R = 10.87$ atinge 1D para a média dos 10% maiores picos, entretanto, de acordo com a envoltória a máxima amplitude não está localizada no centro do modelo. Essa característica indica o modelo flexível pode estar vibrando em outro modo, o que se confirma pela resposta espectral. Na Figura 4.17b fica evidente que o segundo modo de vibrar é dominante para essa condição de arranjo e velocidade.

Ao recapitular a curva da resposta do cilindro flexível e distante por 1D da placa, apresentada na Figura 2.9, percebe-se que o fenômeno aparenta cessar após a primeira região de pico da resposta. Vale recordar que o experimento conduzido por Tsahalís (1984), obteve apenas a medição no centro do cilindro e, por tal razão, aparenta uma dessincronização com o aumento da frequência de desprendimento dos vórtices ocasionada pelo incremento da velocidade da corrente. Uma das possibilidades é a existência de outra região de ressonância, mas que não pode ser mensurada pela ausência de informações provenientes de outras posições ao longo do comprimento do cilindro. A discretização espacial, obtida pelo monitoramento dos alvos instalados no modelo, revelou informações significativas sobre a amplitude da vibração. Na maior parte dos casos, a amplitude transversal cresceu de maneira pronunciada a partir de $V_R > 3.50$ e, mesmo após a ocorrência de altas magnitudes, a vibração aparenta estabelecer-se entre $0.6 < \tilde{A}_Z < 0.8$.

(a) $V_R = 3.48$. (b) $V_R = 3.82$. (c) $V_R = 4.00$.Figura 4.13: Região de transição do regime de escoamento da condição $e/D = 0.5$.

Figura 4.14: Análise espectral da região de transição do regime de escoamento da condição $e/D = 0.5$.

Figura 4.15: Densidade da trajetória do alvo central na região de transição do regime de escoamento da condição $e/D = 0.5$.

(a) Trajetória no plano XZ para $V_R = 5.97$.

(b) Trajetória no plano XZ para $V_R = 10.87$.

(c) Trajetória no plano XZ para $V_R = 13.92$.

Figura 4.16: Trajetória do movimento para a condição $e/D = 1.0$.

(a) $V_R = 5.97$. (b) $V_R = 10.87$. (c) $V_R = 13.92$.Figura 4.17: Densidade espectral da potência para a condição $e/D = 1.0$.

5 CONCLUSÃO

Uma vasta quantidade de estudos foram realizados para cilindros fixos e próximos à uma placa plana, alguns tantos outros para cilindros flexíveis, mas raras investigações experimentais foram conduzidas para investigar o efeito da placa próxima a um cilindro flexível com dois graus de liberdade com foco no fenômeno de vibrações induzidas pelo escoamento. Foram apresentados alguns trabalho precedentes para avaliar o desprendimento de vórtices e o campo de forças do cilindro quando exposto a presença da placa plana. Algumas importantes conclusões foram tiradas, entre elas destaca-se a predominância de dois parâmetros, e/D e Re , em relação a força de sustentação e a frequência de Strouhal, f_S . Mais adiante, os resultados da resposta em amplitude mostraram uma forte dependência ao parâmetro que relaciona a massa linear a massa deslocada da estrutura, m^* .

O presente trabalho apresentou uma investigação experimental do fenômeno da interação fluido-estrutura para um cilindro flexível na presença de uma placa plana, para diferentes condições de escoamento, obtidas pela variação da velocidade, a qual impacta o número de Reynolds e a frequência de Strouhal. A razão de massa foi mantida constante para todos os experimentos aqui realizados. Como já apresentado por outros autores, uma baixa razão de massa irá implicar em maiores amplitudes de resposta. O que de fato ocorreu, foram identificadas amplitudes mais altas que as encontrada em pesquisas precedentes e com maior m^* . Alinhado com a bibliografia da área, na qual foi descoberto através de ensaio com cilindro fixo que não há emissão de vórtices para distâncias menores que $0.3D$, os ensaios experimentais aqui conduzidos para avaliação da dinâmica do cilindro mostraram reduzida amplitude de vibração quando a esse está em contato com a placa ($e/D = 0.0$). Para a condição em que o cilindro está disposto a mais de $1D$ da placa ($e/D = 1.0$ e 2.0), a amplitude de resposta é semelhante ao caso do cilindro isolado. A condição $e/D = 0.5$ é a mais intrigante, visto que até o $V_R = 10$ comporta-se semelhante ao caso de referência. Mas com o acréscimo da velocidade a curva de resposta se aproxima das amplitudes da condição $e/D = 0.0$. Esses resultados convergem com o trabalho de (GEÖKTUN, 1975), o qual conduziu uma investigação experimental do campo de forças

e desprendimento de vórtices em cilindros fixos variando o parâmetro e/D . Os resultados desse autor mostraram que apenas para $e/D = 1.25$ o desprendimento de vórtices reestabelece a frequência do caso isolado ($S_t = 0.20$).

O efeito da proximidade da placa foi analisado para quatro diferentes arranjos, $e/D = 0, 0.5, 1.0$ e 2.0 e variadas condições de escoamento foram testadas, todas contidas no regime sub-crítico ($10^3 < R_e < 10^4$). Adicionalmente aos casos onde a presença da placa foi investigada, a condição do cilindro isolado foi estudado servindo como referência. Ao total 160 corridas foram conduzidas para concretização deste estudo, sendo todos os casos analisados e seus resultados apresentados.

Foram realizadas análises no domínio do tempo e da frequência, além da reconstrução da trajetória percorrida pelo cilindro, Obtida pelo uso do sistema de monitoramento da posição em diversos pontos ao longo do comprimento do cilindro (discretização espacial).

O comportamento da amplitude nominal em função da velocidade reduzida, mostrou uma resposta diferente da clássica curva de VIV, onde é facilmente identificável as zonas de sincronização e a característica autolimitante do fenômeno. Para o caso aqui apresentado, houve uma manutenção da amplitude de oscilação para todo o domínio de velocidades testadas e os cinco diferentes arranjos. Essa característica é atinente a natureza flexível da estrutura, onde há sempre uma frequência dominante e ocasiona sucessivas zonas de ressonância, sendo essa sincronização responsável pela vibração da estrutura.

Por se tratar de um duto flexível, i.e, vibração multimodal, a amplitude não decresce e não há zonas de dessincronização. Isto porque quando perde-se a sincronia de um modo, começa a ocorrer, outra frequência torna-se dominante fazendo com que a estrutura vibre para velocidades acima de $V_R = 10$.

O efeito da placa na resposta da amplitude na direção vertical é pronunciável apenas para a condição em que o cilindro está em contato com a placa, sendo esse arranjo caracterizado pelas baixas amplitudes de resposta. O comportamento manifesta-se na análise espectral, pelo aparecimento de concomitantes modos de vibrar e com baixa energia. Convergingo assim com resultados encontrados na literatura, onde propõem uma interrupção do desprendimento de vórtices para $e/D < 0.3$. A resposta na direção horizontal apresenta pouca sensibilidade a presença da placa, apresentando um crescimento linear em função da velocidade para as cinco condições.

Para o cilindro isolado a amplitude máxima de resposta é superior a $1.5D$ e o valor nominal próximo a $0.8D$. Para o cilindro encostado na placa a amplitude apresentou valores mais moderados, alcançando $\tilde{A}_Z \approx 0.6$.

Conclui-se que a proximidade da placa será mandatória na resposta de amplitude para distâncias muito pequenas, conforme o cilindro afasta-se da placa o mecanismo de desprendimento de vórtices é restaurado e o fenômeno de VIV assemelha-se ao do cilindro isolado. Do ponto de vista prático, onde a condição inicial é $e/D = 0$, ou $GAP = 0$, o duto está pouco vulnerável ao fenômeno de VIV. Ao agravar-se as condições do vão, o cilindro fica exposta a ocorrência da vibração.

REFERÊNCIAS

- ASSI, G. R. d. S. *Estudo experimental do efeito de interferência no escoamento ao redor de cilindros alinhados*. Dissertação — Universidade de São Paulo, 2005.
- BARLTROP, N. D.; ADAMS, A. J. *Dynamics of fixed marine structures*. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 1991. v. 91.
- BEARMAN, P.; ZDRAVKOVICH, M. Flow around a circular cylinder near a plane boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge Univ Press, v. 89, n. 01, p. 33–47, 1978.
- BEARMAN, P. W. Vortex shedding from oscillating bluff bodies. *Annual review of fluid mechanics*, Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 16, n. 1, p. 195–222, 1984.
- BLEVINS, R. D. Flow-induced vibration. New York, NY (USA); Van Nostrand Reinhold Co., Inc., 1990.
- BLOOR, M. S. The transition to turbulence in the wake of a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge Univ Press, v. 19, n. 02, p. 290–304, 1964.
- BROUWER, J.; TUKKER, J.; RIJSBERGEN, M. V. Uncertainty analysis of finite length measurement signals. In: *The 3rd International Conference on Advanced Model Measurement Technology for the EU Maritime Industry (AMT'13)*, Gdansk, Poland. [S.l.: s.n.], 2013. p. 260–274.
- BROUWER, J.; TUKKER, J.; RIJSBERGEN, M. van. Uncertainty analysis and stationarity test of finite length time series signals. In: *The 4th International Conference on Advanced Model Measurement Technology for the Maritime Industry (AMT'15)*, Istanbul, Turkey. [S.l.: s.n.], 2015.
- CHAKRABARTI, S. *Handbook of Offshore Engineering (2-volume set)*. [S.l.]: Elsevier, 2005.
- CUNHA, L. D. *Vibração induzida por vórtices: análise crítica de modelos fenomenológicos*. Tese de Doutorado — Universidade de São Paulo, 2005.
- DEAKIN, R.; KILDEA, D. A note on standard deviation and rms. *Australian surveyor*, Taylor & Francis, v. 44, n. 1, p. 74–79, 1999.
- EWINS, D. J. *Modal testing: theory and practice*. [S.l.]: Research studies press Letchworth, 1984. v. 15.
- GARCIA, E. M.-H. *Prediction by energy phenomenology for harnessing hydrokinetic energy using vortex-induced vibrations*. [S.l.]: ProQuest, 2008.

GEÖKTUN, S. *The drag and lift characteristics of a cylinder placed near a plane surface*. Tesi de doutorado — Monterey, California. Naval Postgraduate School, 1975.

GERRARD, J. The mechanics of the formation region of vortices behind bluff bodies. *Journal of fluid mechanics*, Cambridge University Press, v. 25, n. 2, p. 401–413, 1966.

GONÇALVES, R. T. *Vibrações induzidas pela emissão de vórtices em cilindros com baixa razão de aspecto*. Tese de Doutorado — Universidade de São Paulo, 2013.

GUO, B.; SONG, S.; GHALAMBOR, A.; CHACKO, J. *Offshore pipelines*. [S.l.]: Elsevier, 2005.

HAGER, W. Blasius: A life in research and education. *Experiments in Fluids*, Springer, v. 34, n. 5, p. 566–571, 2003.

HIWADA, M.; MABUCHI, I.; KUMADA, M.; IWAKOSHI, H. Effect of the turbulent boundary layer thickness on the flow characteristics around a circular cylinder near a plane surface. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, v. 52, n. 479, p. 2566–2574, 1986.

HUERA-HUARTE, F.; BEARMAN, P. Wake structures and vortex-induced vibrations of a long flexible cylinder—part 1: dynamic response. *Journal of Fluids and Structures*, Elsevier, v. 25, n. 6, p. 969–990, 2009.

HUERA-HUARTE, F. J. *Multi-mode vortex-induced vibrations of a flexible circular cylinder*. Tesi de Doutorado — Imperial College London (University of London), 2006.

JAUVTIS, N.; WILLIAMSON, C. Vortex-induced vibration of a cylinder with two degrees of freedom. *Journal of Fluids and Structures*, Elsevier, v. 17, n. 7, p. 1035–1042, 2003.

JAUVTIS, N.; WILLIAMSON, C. The effect of two degrees of freedom on vortex-induced vibration at low mass and damping. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 509, p. 23–62, 2004.

JEON, D.; GHARIB, M. On circular cylinders undergoing two-degree-of-freedom forced motions. *Journal of Fluids and Structures*, Elsevier Science, v. 15, n. 3-4, p. 533–541, 2001.

KAISER, M. J. A review of deepwater pipeline construction in the us gulf of mexico—contracts, cost, and installation methods. *Journal of Marine Science and Application*, Springer, v. 15, n. 3, p. 288–306, 2016.

KHALAK, A.; WILLIAMSON, C. Fluid forces and dynamics of a hydroelastic structure with very low mass and damping. *Journal of Fluids and Structures*, Elsevier, v. 11, n. 8, p. 973–982, 1997.

KHALAK, A.; WILLIAMSON, C. H. Investigation of relative effects of mass and damping in vortex-induced vibration of a circular cylinder. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier, v. 69, p. 341–350, 1997.

KOUSHAN, K. Vortex induced vibrations of free span pipelines. Tapir, 2009.

- KOVASZNAY, L. Hot-wire investigation of the wake behind cylinders at low reynolds numbers. In: THE ROYAL SOCIETY. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. [S.l.], 1949. v. 198, n. 1053, p. 174–190.
- LANGLEY, R. B. The mathematics of gps. *GPS world*, v. 2, n. 7, p. 45–50, 1991.
- LEE, J. Introduction to offshore pipelines and risers. *N/P*, 2009.
- LEI, C.; CHENG, L.; KAVANAGH, K. Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier, v. 80, n. 3, p. 263–286, 1999.
- MOE, G.; WU, Z.-J. The lift force on a cylinder vibrating in a current. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, v. 112, n. 4, p. 297–303, 1990.
- MORAIS, J. M. d. Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da petrobras na exploração e produção offshore. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2013.
- NETO, J. B. O.; COSTA, A. J. D. A petrobrás e a exploração de petróleo offshore no brasil: um approach evolucionário. *Revista Brasileira de Economia*, SciELO Brasil, v. 61, n. 1, p. 95–109, 2007.
- NISHINO, T.; ROBERTS, G. T.; ZHANG, X. Vortex shedding from a circular cylinder near a moving ground. *Physics of Fluids*, AIP, v. 19, n. 2, p. 025103, 2007.
- PALMER, A. C.; KING, R. A. *Subsea pipeline engineering*. [S.l.]: PennWell Books, 2004.
- PIOMELLI, U. Large-eddy and direct simulation of turbulent flows. Citeseer, 1997.
- RELF, E.; SIMMONS, L. The frequency of eddies generated by the motion of circular cylinders through* a fluid. r. & m. 917. *British ARC*, June, 1924.
- ROSHKO, A. On the development of turbulent wakes from vortex streets. 1954.
- ROSHKO, A. Experiments on the flow past a circular cylinder at very high reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge Univ Press, v. 10, n. 03, p. 345–356, 1961.
- SUMER, B.; FREDSE, J.; JENSEN, B.; CHRISTIANSEN, N. Forces on vibrating cylinder near wall in current and waves. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 120, n. 3, p. 233–250, 1994.
- SUMER, B.; JENSEN, B.; FREDSE, J. Effect of a plane boundary on oscillatory flow around a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge Univ Press, v. 225, p. 271–300, 1991.
- SUMER, B. M.; FREDSE, J. *Hydrodynamics around cylindrical structures*. [S.l.]: World scientific, 2006. v. 26.
- TANEDA, S. Experimental investigation of vortex streets. *Journal of the Physical society of Japan*, The Physical Society of Japan, v. 20, n. 9, p. 1714–1721, 1965.

TSAHALIS, D. Vortex-induced vibrations of a flexible cylinder near a plane boundary exposed to steady and wave-induced currents. *Journal of Energy Resources Technology*, American Society of Mechanical Engineers, v. 106, n. 2, p. 206–213, 1984.

VERITAS, D. N. Free spanning pipelines. *Recommended practice DNV-RPF105*, 2006.

VIEIRA, D. P. *Estudo experimental das Vibrações induzidas pela emissão de vórtices em cilindros flexíveis inclinados em relação a correnteza*. Tese de Doutorado — Universidade de São Paulo, 2017.

WEI, T.; SMITH, C. Secondary vortices in the wake of circular cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 169, p. 513–533, 1986.

WHITTLE, T. Pigs, pipelines and pluto: A history of the united kingdom's largest oil pipeline and storage system during world war two. *Measurement and Control*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 46, n. 7, p. 199–204, 2013.

WILLIAMSON, C.; GOVARDHAN, R. Vortex-induced vibrations. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Annual Reviews, v. 36, p. 413–455, 2004.

WILLIAMSON, C. H.; ROSHKO, A. Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder. *Journal of fluids and structures*, Elsevier, v. 2, n. 4, p. 355–381, 1988.

WILSON, J. F.; CALDWELL, H. M. Force and stability measurements on models of submerged pipelines. *Journal of Engineering for Industry*, American Society of Mechanical Engineers, v. 93, n. 4, p. 1290–1298, 1971.

ZDRAVKOVICH, M. M. *Flow around Circular Cylinders: Volume 2: Applications*. [S.l.]: Oxford university press, 1997. v. 2.

ANEXO A – AMPLITUDES DE VIBRAÇÃO NA DIREÇÃO VERTICAL

Figura A.1: Curva de resposta ao fenômeno de VIV - Condição $e/D = 0.0$.

Figura A.2: Curva de resposta ao fenômeno de VIV - Condição $e/D = 0.5$.

Figura A.3: Curva de resposta ao fenômeno de VIV - Condição $e/D = 1.0$.

Figura A.4: Curva de resposta ao fenômeno de VIV - Condição $e/D = 2.0$.